



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

PETTERI KALLIO
SUUNNAN MÄÄRITTÄMINEN KAHDELLA GPS-VASTAANOTTIMELLA
Diplomityö

Tarkastaja: professori Karri Palovuori
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Tieto- ja sähkötekniikan
tiedekuntaneuvoston kokouksessa 4.
syyskuuta 2013

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Signaalinkäsittelyn ja tietoliikennetekniikan koulutusohjelma

KALLIO, PETTERI: Suunnan määrittäminen kahdella GPS-vastaanottimella

Diplomityö, 51 sivua, 2 liitesivua

Huhtikuu 2015

Pääaine: Sulautetut järjestelmät

Tarkastaja: professori Karri Palovuori

Avainsanat: GPS, Satelliittipaikannus, Suunta, Koordinaatit, Navigaatio

Satelliitteihin perustuvan paikannusjärjestelmän hyödyntäminen on yleistynyt erittäin laajalle käyttäjäkunnalle. Järjestelmää hyödynnetään monipuolisesti niin siviilikäytössä kuin sotilaallisessakin käytössä. Tässä työssä tutkittiin, onko mahdollista laskea suunta käyttäen kahta erillistä vastaanotinta. Suunnan määrittämiseen valmistetut kaupalliset laitteet toteuttavat mittauksen kahden tai useamman erillisen antennin avulla. Mittauksia varten rakennettiin oma mittalaite, joka kerää vastaanottimilta paikkatietoja ja laskee niiden perusteella suunnan. Laite toimii yhdessä tietokoneen kanssa ja välittää tietoa tietokoneelle sekä saa samalla käyttöjännitteensä USB-väylästä. Laitteen tietokoneelle välittämien tietojen laajuus on valittavissa laitteesta.

Työ voidaan jakaa kahteen osioon. Ensimmäisessä osiossa käsitellään teoriaa satelliittipaikannusjärjestelmän toiminnasta ja maapallon mallintamisesta. Satelliittipaikannusjärjestelmästä käydään läpi järjestelmän synty ja kehitys. Teoriaosassa käsitellään myös järjestelmän toimintaa käytännössä sekä erilaisia järjestelmän toimintaan vaikuttavia asioita. Tämän lisäksi perehdytään myös maan mallintamiseen sekä siihen liittyviin asioihin, joita on otettu huomioon työn toteutuksessa. Toisessa osassa käsitellään työtä varten rakennetun mittalaitteiston suunnittelua ja toteutusta, sekä mittalaitteella toteutettuja mittauksia ja näistä saatuja tuloksia.

Jotta suunnan määrittäminen voisi olla mahdollista, pitäisi molemmilla vastaanottimilla ilmenevä poikkeama omasta sijainnistaan olla yhtä suuri ja samansuuntainen. Tällaiseen tilanteeseen voitaisiin mahdollisesti päästä silloin, kun molemmilla vastaanottimilla olisi sama satelliittigeometria. Samaan satelliittigeometriaan päästiin mittauksissa muutamaan otteeseen, toki tällöinkin vain hetkellisesti. Suunnan määrittäminen vaatisi sen, että satelliittigeometria olisi koko ajan sama, jolloin myös satelliittigeometrian muutokset pitäisi olla molemmilla vastaanottimilla identtiset. Tällaiseen tilanteeseen ei päästy missään vaiheessa mittauksien aikana ja siksi tämän teorian toimivuutta ei voida tämän työn puitteissa osoittaa oikeaksi. Tällaisen tilanteen luominen vaatisi luultavasti erittäin optimaalisen mittaustilanteen sekä todella pitkäaikaiset mittaukset.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Signal processing and Communications Engineering

KALLIO, PETTERI: Determine compass point with two GPS-modules

Master of Science Thesis, 51 pages, 2 Appendix page

April 2015

Major: Embedded systems

Examiner: Professor Karri Palovuori

Keywords: GPS, Positioning systems, Bearing, Coordinates, Navigation

Global positioning system has a variety of applications in different places on earth. System is usable every location where is possible to receive the signals. Most recent usage of GPS is navigation, but it can be used for timing too. This research purpose was to examine is it possible to determine bearing with using two different GPS-modules. Commercial way to make GPS-compass and determine bearing is using two or even more antennas. For the research I have made own device which takes data from GPS-modules and calculates bearing. Device is contacted with USB to computer. Device takes power from USB and send data via USB to computer. You can choose the amount of data which will send to computer by pushing the button on device.

The research is divided into two parts. The first part is about history of GPS, development of GPS and modeling the earth. There is some information about inventing GPS and how it operates. Also there are some applications of GPS. The second part consist of measuring device and measurements. There are some information about designing device, choosing parts and how device works. Also there are data from measurements. At the end I think it's not possible to calculate real bearing by this method leaning to my measurements. It would need a lot of bigger measurements in optimal conditions.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty omaehtoisesti Tampereen teknillisen yliopiston elektroniikanlaitokselta peräisin olevasta aiheesta. Työn tarkoitus oli tutkia mahdollisuutta määrittää suunta käyttäen kahta erillistä GPS-vastaanotinta. Tätä varten suunnittelin ja tein mittalaitteen. Vaikkei työssä kyetty esittämään mahdollista toimivuutta, herätti se paljon mielenkiintoisia asioita pohdittavaksi. Toivonkin, että joku tämän työn pohjalta pystyisi joskus osoittamaan, että kyseisen suunnan laskeminen olisi mahdollista toteuttaa.

Kiitän ohjaajaani Mika Inkistä ja tarkastajaa Karri Palovuorta maltillisesta suhtautumisesta työn etenemiseen. Kiitän myös vaimoani Tainaa ja lapsiani Ainoa ja Sannia kärsivällisyydestä työn suhteen sekä vanhempiani tuesta opintojen kuluessa. Lisäksi haluan antaa myös kiitosta TeLE:n väelle, joiden avulla olen jaksanut jatkaa eteenpäin, sekä erityiskiitos Antti Ainasojalle ja Otto Hietamiehelle monista yhteisistä kurssisuorituksista.

16.3.2015
Tampereella

Petteri Kallio

SISÄLLYSLUETTELO

1	Johdanto	1
2	Global Positioning System	3
2.1	Järjestelmän synty ja kehitys	3
2.2	Järjestelmän rakenne	5
2.2.1	Avaruussegmentti	6
2.2.2	Kontrollisegmentti	7
2.2.3	Käyttäjäsegmentti	8
2.3	Järjestelmän toiminta	9
2.3.1	Satelliittien lähettämä navigointidata	10
2.3.2	Etäisyyden laskenta	10
2.4	Erilaiset virheet	11
2.5	Tarkkuutta parantavia järjestelmiä	12
2.5.1	Satelliitteihin perustuva parannus	12
2.5.2	Differentiaalinen paikanmäärittäminen	13
2.5.3	Avustettu paikanmäärittäminen	13
2.6	NMEA-lausekkeet	13
2.6.1	Vastaanottimen lähettämät lauseet	14
3	Maan mallintaminen eri tavoin	16
3.1	Maapallon fysikaalinen mallinnus eli geoidi	16
3.2	Matemaattinen malli maapallolle	18
3.2.1	GRS80 ja WGS84 vertausellipsoidit	18
3.3	Pallon käyttäminen mallinnuksessa	19
3.4	Tasokoordinaatisto	20
3.5	Merkintälaskun käyttäminen kulman laskemisessa	22
3.5.1	Keskilatitudimenetelmä	22
3.5.2	Meridionaalimenetelmä	28
4	Mittalaitteisto	29
4.1	Kaupallinen toteutus	29
4.2	Suunnittelu	29
4.3	Osavalmiokkeet	30
4.3.1	Mikrokontrolleri	30
4.3.2	GPS-vastaanotin	32
4.3.3	Tietokoneliitäntä	32
4.3.4	Akun latauspiiri	33
4.3.5	LEDit	34
4.4	Rakenne	34
4.5	Mittalaitteen toiminta	36
4.5.1	Laskenta	37
4.5.2	Laitteen tulostevaihtoehdot	38
5	Mittauksien suoritus ja tulokset	41

5.1	Mittaussuunnitelma.....	41
5.1.1	Laitteiston valmistelut	41
5.1.2	Mittaustapahtuma	42
5.2	Toteutuneet mittaukset.....	43
5.3	Mittauksien tulokset.....	44
6	Yhteenveto	51
	Lähteet.....	52

TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

GPS	Global Positioning System
GLONASS	Globalnaja navigatsioonajasputnikovaja sistema
SA	Selective Availability
TWI	Two Wire Interface
SDA	Serial Data for TWI
SCL	Serial Clock for TWI
USART	Universal Synchronous/Asynchronous Receiver/Transmitter
UART	Universal Asynchronous Receiver/Transmitter
SPI	Serial Peripheral Interface
SBAS	Satellite Based Augmentation System
DGPS	Differential GPS
FTDI	Future Technology Devive Internatonal Ltd.
IC	Integrated Circuit
NMEA	National Marine Electronics Association
LED	Light-Emitting Diode
DOP	Dilution of precision
GLONASS	Global Navigation Satellite System
EGNOS	European Geostationary Navigation Overlay Service
WAAS	Wide Area Augmentation System
GAGAN	GPS and GEO Augmented Navigation
MSAS	Multi-functional Satellite Augmentation System
ICAO	International Civil Aviation Organization
ESA	European Space Agency
FAA	Federal Aviation Administration
A-GPS	Assisted GPS
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
USB	Universal Serial Bus
2SOPS	The 2 nd Space Operations Squadron
AFSCN	Air Force Satellite Control Network
PRN	Pseudo Random Noise

1 JOHDANTO

GPS-järjestelmä sai alkunsa vuonna 1960, kun Yhdysvaltojen merivoimat testasivat omassa maassaan kehitettyä satelliittijärjestelmää. Sotilaskäyttöön tarkoitettu GPS-järjestelmä näki päivänvalon 1960-luvun lopulla. Yhdysvallat vapautti järjestelmän siviilikäyttöön 1983. Päätös vapauttamisesta syntyi, kun korealainen matkustajakone eksyi kielletylle alueelle ja neuvostoliittolaiset ampuivat sen alas. Järjestelmän vapauttamisella pyrittiin estämään kulkuneuvojen eksyminen kielletyille alueille. Kuitenkin Yhdysvallat häiritsi GPS-signaaleja SA-häirinnän avulla, joka osaltaan vaikutti siihen, että järjestelmän rinnalle kehittyi muita järjestelmiä tarkkuuden parantamiseksi. GPS-järjestelmien yleistyessä Yhdysvallat päätti luopua SA-häirinnästä toukokuussa 2000. GPS-vastaanottimet yleistyivät laajemmin ensin autonavigaattorien muodossa. Tämän jälkeen vastaanottimet alkoivat hiljalleen olla osa matkapuhelimen vakiokomponentteja. Nykyään on olemassa monia erilaisia laitteita, jotka hyödyntävät vastaanottimia.

GPS-järjestelmä ei ole ainoa satelliittipaikannusjärjestelmä, vaan tämän lisäksi on venäläisten kehittämä GLONASS-järjestelmä. GLONASS-järjestelmä on hyvin pitkälle toiminnaltaan vastaava kuin GPS-järjestelmä. Erona järjestelmillä on se, että GLONASS-järjestelmässä jokainen vastaanottimen näkemä satelliitti lähettää signaalia eri lähetystaajuudella. Kuitenkaan ihan jokainen satelliitti ei käytä omaa lähetystaajuuttaan, vaan eri puolilla maapalloa olevat satelliitit saattavat käyttää samaa taajuutta. Nämä satelliitit eivät kuitenkaan ole saman vastaanottimen havaittavissa samaan aikaan. Osa nykyajan vastaanottimista tukee sekä GPS- että GLONASS-järjestelmää. Tällainen vastaanotin hyödyntää siis molempia järjestelmiä saadakseen tarkemman paikannustarkkuuden. Euroopassa on kehitteillä myös oma satelliittipaikannusjärjestelmä, jota kutsutaan nimellä GALILEO. GALILEO on tarkoitettu siviilikäyttöön ja sitä hallinnoivat ja ylläpitävät siviilit toisin kuin GPS- ja GLONASS-järjestelmiä. GALILEO-järjestelmän on suunniteltu sisältävän 30 satelliittia ja olevan täysin käyttökuntoinen vuonna 2020. Myös kiinalaisilla on oma COMPASS-niminen satelliittipaikannusjärjestelmä, joka tällä hetkellä kattaa vain Aasian alueen. COMPASS-järjestelmän maailmanlaajuinen kattavuus olisi tarkoitus olla valmis vuonna 2020.

Tässä työssä on tarkoitus tutkia, onko mahdollista toteuttaa satelliittikompassin suunnan antava laite kahta GPS-vastaanotinta käyttäen. Kaupallisissa satelliittikompassseissa suunnan määrittäminen tapahtuu kahdesta antennista saatuja arvoja vertaamalla. Tavoitteena on tutkia vastaanottimien välisen etäisyyden vaikutusta mittaustuloksiin sekä laitteen mahdollista käyttöä kompassisuunnan antavana laitteena. Mittaustuloksen oikeellisuuteen vaikuttaa huomattavasti vastaanottimien paikannuksen virhe ja sen vaikutus vastaanottimien paikkatietojen vertailussa. Vastaanottimilla pitäisi siis olla yhtä suuri virhe, jotta mittaus voisi antaa absoluuttisen suunnan. Tämän takia laitteen pitääkin pystyä tarkistamaan mahdollisia virheitä ja pyrkiä käyttämään sellaisia mittatuloksia, joiden arvot voisivat antaa halutun suunnan. Tätä voidaan tarkistella esimerkiksi vertaamalla paikkatiedoista saatua vastaanottimien etäisyyttä todelliseen etäisyyteen.

Työn toisessa luvussa käsitellään yleisesti GPS-järjestelmän syntyä, toteutusta ja erilaisia virheitä ja parannuksia. Kolmannessa luvussa käydään läpi maapallon mallintamista ja siihen liittyviä laskutoimituksia, joita tarvitaan suunnan määrittämisessä. Laitteen suunnittelua, rakennetta, osavalintoja ja toimintaa käsitellään neljännessä luvussa. Saatua mittaustuloksia tarkastellaan viidennessä luvussa. Yhteenveto työstä löytyy kuudennesta luvusta.

2 GLOBAL POSITIONING SYSTEM

Global positioning system (GPS) on maata kiertäviin satelliitteihin perustuva paikannusjärjestelmä. Satelliitit lähettävät signaaleja, joista vastaanotin saa laskettua olinpaikkansa, kiihtyvyytensä ja senhetkisen ajan. GPS toimii maalla, merellä sekä ilmassa eikä ole altis säätilan vaihteluille. Maksimaalista käyttäjämäärää ei ole rajattu, vaan järjestelmä on kaikkien vastaanottimien käytössä samanaikaisesti. Järjestelmän on kehittänyt Yhdysvaltain puolustusministeriö (Department of Defence, DOD), joka myös rahoittaa ja ylläpitää järjestelmää. Alun perin GPS on luotu sotilaskäyttöön, joka on osaltaan määrittänyt sen ominaisuuksia. Yhtenä esimerkkinä tällaisesta ominaisuudesta voidaan pitää sitä, ettei vastaanotin lähetä mitään signaalia ja näin ollen vastaanottajaa ei voida paikantaa. [1]

Tässä luvussa käsitellään GPS-järjestelmän alkuvaiheita ja kehittymistä. Luvussa 2.1 kerrotaan järjestelmän syntymisestä ja sen kehittymisestä tähän päivään. Näiden lisäksi on pieni katsaus lähitulevaisuuteen. Toisessa aliluvussa käsitellään järjestelmän rakennetta ja sen eri osia sekä maan päällä että taivaalla. Järjestelmän toimintaa eli paikan määrittystä käydään tarkemmin läpi luvussa 2.3. Neljännessä aliluvussa käsitellään paikannukseen vaikuttavia häiriöitä sekä niiden ehkäisemistä. Paikannuksen tarkkuutta parantavia järjestelmiä käsitellään luvussa 2.5. Viimeisessä aliluvussa käsitellään yleisesti GPS-vastaanottimillakin käytössä olevaa tiedonsiirtostandardia nimeltään NMEA-standardi.

2.1 Järjestelmän synty ja kehitys

GPS-järjestelmän juuret johtavat aina 1960-luvun alkuun, jolloin Yhdysvaltojen merivoimat testasivat omassa maassaan kehitettyä Transit-nimistä satelliittijärjestelmää. Järjestelmään kuului viisi satelliittia, joiden avulla laivat pystyivät tarkistamaan sijaintinsa tunnin sykleissä. Transit-järjestelmän seuraajan Timation-satelliitin avulla havaittiin vuonna 1967, että tarkat atomikellot toimivat myös avaruudessa. Pian tämän jälkeen kehitettiin sotilaskäyttöön tarkoitettu GPS ja satelliittien määrää avaruudessa lisättiin. [2]

Alkujaan sotilaskäyttöön tarkoitettu järjestelmä vapautettiin Yhdysvaltojen toimesta siviilikäyttöön. Tämä tapahtui sen jälkeen, kun korealainen matkustajakone eksyi ja joutui neuvostoliittolaisten alas ampumaksi vuonna 1983. Tämän jälkeen erilaisten kulkuneuvojen oli mahdollista paikallistaa oma sijaintinsa ja näin välttää eksyminen kielletyille alueille. Kuitenkaan järjestelmän siviilikäyttöön vapautettu versio ei ollut

lähellekään niin tarkka kuin sotilaskäytössä oleva. Tämä osaltaan vaikutti siihen, että järjestelmän rinnalle kehitettiin erilaisia ratkaisuja, jotta järjestelmän tarkkuutta saataisiin parannettua. Tavalliselle ihmiselle GPS-järjestelmät tulivat tutuksi aluksi lähinnä autonavigaattorien muodossa. Nykyään kuitenkin vastaanottimia on monissa erilaisissa laitteissa, kuten monissa urheiluun liittyvissä laitteissa ja matkapuhelimissa. Matkapuhelimessa vastaanottimen käyttötarkoitusta on helppo muuttaa sovelluksia vaihtamalla. [2]

Ensimmäiset 11 satelliittia olivat tyypiltään Block I -satelliitteja. Nämä satelliittit laukaistiin taivaalle vuosien 1978 ja 1985 välisenä aikana yhtä lukuunottamatta. Block I -satelliitit sijaitsivat lähes ympyränmuotoisilla kiertoradoilla, joiden säde on noin 26,560 km ja kiertoaika noin 12 tuntia. Block I -satelliitit olivat kiertoradoillaan 63 asteen kulmassa päiväntasaajaan nähden. Block I -satelliitit sisälsivät yhden cesium- ja kaksi rubidium atomikelloa. Block I -satelliitit oli suunniteltu kestävänsä viisi vuotta, mutta suurin osa satelliiteista ylitti eliniän odotuksen. Pisimmän ajan toiminnassa oli satelliitti numero kolme, joka toimi suunnilleen kolmesta ja puoli vuotta. Viimeinen Block I -satelliitti poistui käytöstä 18.11.1995. Taulukossa 1 on esitetty Block I -satelliittien elinkaaret. [3]

Taulukko 1 Block I -satelliittien elinkaaret

#	laukaistu	käyttöön	pois
1	22.2.1978	29.5.1978	17.7.1985
2	13.5.1978	14.7.1978	12.2.1988
3	6.8.1978	13.11.1978	18.5.1992
4	10.12.1978	8.1.1979	27.8.1986
5	9.2.1980	27.2.1980	11.5.1984
6	26.4.1980	16.5.1980	6.5.1991
7	laukaisu epäonnistui 18.1.1981		
8	14.7.1983	10.8.1983	4.5.1993
9	13.6.1984	19.7.1984	28.2.1994
10	8.9.1984	3.8.1984	18.11.1995
11	9.8.1984	30.8.1985	13.4.1994

Toisen sukupolven Block-satelliittien laukaisut alkoivat vuonna 1989. Block II -satelliitteihin oli lisätty toinen cesium atomikello. Satelliiteissa oli myös sensorit, jotka havaitsevat ydinohjuksen laukaisun. Ensimmäiset Block II -satelliitit suunniteltiin niin, että ne pystyvät toimimaan 14 päivää ilman, että ne tarvitsevat yhteyttä kontrollikeskukseen. Seuraaviin satelliitteihin tehtiin vain pientä parannusta, ja Block IIA -satelliitit pystyvät toimimaan 180 päivää ilman yhteyttä kontrollikeskukseen. IIR(M)-satelliitit eroavat IIR-satelliiteista siten, että signaaleihin on lisätty M-koodiosa sekä näiden lisäksi uusi siviilikäyttöön tarkoitettu signaali L2C. M-koodiosa on suunniteltu sotilaskäyttöön ja sillä pyritään vähentämään mahdollisuutta estää GPS-

vastaanottimen toimintaa. L2C on siviileille tarkoitettu GPS-signaali, joka on suunniteltu erityisesti kaupalliseen käyttöön. Signaali lähetetään 1227,60 Mhz taajuudella, joka on eri kuin muiden siviilikäyttöön tarkoitettujen signaalien käyttämä taajuus. Tämän signaalin avulla pystytään korjaamaan ionosfäärin aiheuttamaa virhettä. Vastaanotin voi päästä todella tarkkoihinkin paikannustuloksiin, jos siinä on tuki kahdelle taajuudelle. [4] [5]

Block IIF -satelliiteissa on kehittyneemmät atomikellot. Lisäksi niissä on parannettu tarkkuutta, signaalin laatua sekä voimakkuutta. Lisäksi niihin on lisätty kolmas siviilikäyttöön tarkoitettu signaali, jota kutsutaan nimellä L5. L5 signaali on tarkoitettu korkeaa suorituskykyä vaativiin sovelluksiin. Signaali käyttää taajuutta 1176,45 MHz. Signaalia lähetetään taajuudella joka on varattu yksinomaan lentämisen turvallisuutta parantaville palveluille. Käyttämällä L5 signaalia yhdessä L1 C/A ja L2C signaalien kanssa päästään todella hyviin paikannustuloksiin. Block IIF -satelliittien laukaisut jatkuvat tälläkin hetkellä. Seuraavan sukupolven Block III -satelliitteja on jo suunniteltu ja niiden laukaisut pitäisivät alkaa vuonna 2016. Taulukossa 2 on esitetty eri Block II -satelliittien määriä, laukaisuajankohtia sekä tällä hetkellä käytössä olevien määrät. [5] [4]

Taulukko 2 Block II -satelliitit tällä hetkellä.

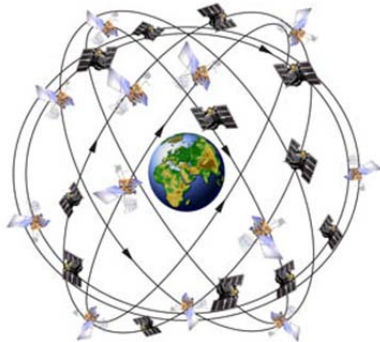
	kpl	laukaisut		käytössä
		alkoi	loppui	
Block II	9	1989	1990	0
Block IIA	19	1990	2009	4
Block IIR	13	1997	2004	12
Block IIR(M)	8	2005	2009	7
Block IIF	12	2010	jatkuu	8

2.2 Järjestelmän rakenne

Paikannusjärjestelmä on jaettu kolmeen osa-alueeseen, joita ovat avaruus-, kontrolli-, ja käyttäjäsegmentti. Avaruussegmenttiin kuuluvat maata kiertävillä radoillaan olevat satelliitit, jotka lähettävät signaaleja käyttäjille. Miehittämättömistä maa-asemista ja ohjauskeskuksesta koostuva kontrollisegmentti tarkkailee satelliittien lentoratoja sekä kellonaikoja ja tarvittaessa lähettää satelliiteille tietoja tarvittavista korjauksista. Sekä avaruus- että kontrollisegmenttiä hallitsee Yhdysvaltojen puolustusministeriö. Käyttäjäsegmenttiin kuuluu kaikki vastaanottimien kehittämiseen liittyvä toiminta niin siviili- kuin sotilaskäytössä.

2.2.1 Avaruussegmentti

Avaruussegmentti koostuu signaaleja lähettävistä satelliiteista. Satelliitteja on tällä hetkellä toimintakuntoisina 31 kappaletta. [6] Yhdysvallat ylläpitää järjestelmää niin, että vähintään 24 satelliittia olisi toiminnassa suurimman osan ajasta. Satelliitit lentävät noin 20,200 kilometrin korkeudessa maan pintaan nähden. Satelliittien kiertoaika radoilla on noin 12 tuntia, joten jokainen satelliitti kiertää maan kahdesti päivässä. Satelliitit kiertävät maata kuudella eri kiertoradalla, jotka jokainen on yhtä etäällä maasta. Jokaisella kiertoradalla on neljä satelliittia tasaisin välimatkoin ja tämän lisäksi muita satelliitteja. Satelliittien sijoittuminen maapallon kiertoradoille on havainnollistettu kuvassa 1. Tämä järjestely takaa sen, että jokaisessa paikassa maapallolla on samaan aikaan nähtävissä vähintään neljä satelliittia. Vuonna 2011 Yhdysvaltojen ilmavoimat toteutti perusjärjestelmälle laajennuksen, jonka jälkeen järjestelmän runko koostuu 27 satelliitista. Tällä päivityksellä saatiin parannettua satelliittijärjestelmän maailmanlaajuista toimimista. [5] [7]



Kuva 1 Satelliittien sijoittuminen maan kiertoradoille [8]

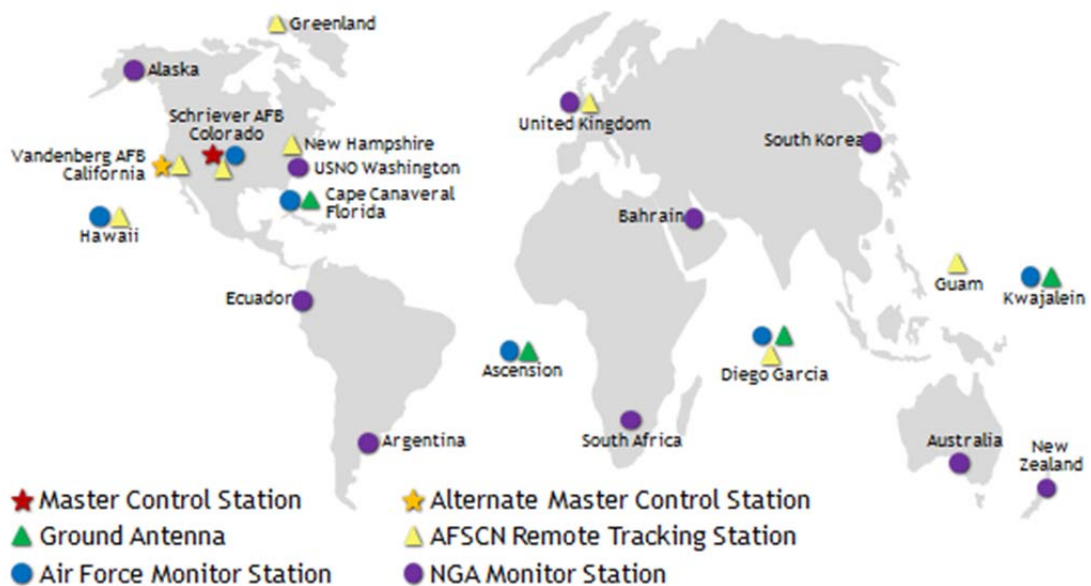
Jokainen satelliitti lähettää signaaleja koko ajan kahdella eri taajuudella. Näitä taajuuksia kutsutaan L1- ja L2-taajuuksiksi ja niiden lähetystaajuuudet ovat 1575,42 MHz (L1) ja 1227,60 MHz (L2). Näiden taajuuksien lisäksi Block IIF -satelliitit lähettävät signaaleja myös L5-taajuudella, joka on 1176,45 Mhz. Aluksi järjestelmä oli suunniteltu niin, että L1-taajuudella lähetettiin kahta erilaista signaalia, toinen siviilikäyttöön ja toinen puolustusministeriön valtuuttamille käyttäjille. L2-taajuudella lähetettiin signaalia vain valtuutetuille käyttäjille. Vuodesta 2005 lähtien käytössä olleet Block IIR(m)- ja sitä uudemmat satelliitit lähettävät siviilikäyttöön tarkoitettua signaalia myös L2 taajuudella. Näiden lisäksi Block IIF -satelliitit lähettävät L5-taajuudella signaalia, joka on myös tarkoitettu siviilikäyttöön. Nämä L2- ja L5-taajuudella lähetettävät signaalit eivät tällä hetkellä sisällä varsinaista dataosuutta. [4] [9]

2.2.2 Kontrollisegmentti

Kontrollisegmentti koostuu maanpäällisten laitosten verkostosta, jonka tehtävänä on seurata satelliitteja, tarkkailla niiden lähettämiä signaaleja, analysoida satelliittien tietoja sekä lähettää komentoja ja tietoja satelliiteille. Tällä hetkellä toiminnassa olevaan kontrollisegmenttiin kuuluu ohjauskeskus, joka sijaitsee Coloradossa sekä varaohjauskeskus, joka sijaitsee Kaliforniassa. Ohjauskeskuksien lisäksi verkostoon kuuluu 12 antennia, joita käytetään satelliittien hallinnointiin. Näiden lisäksi verkostoon kuuluu myös 16 tarkkailuasemaa. Kyseisten laitosten sijainnit maapallolla näkyvät kuvassa 2. [7] [10]

GPS järjestelmän ylläpidosta vastaa ryhmä nimeltä The 2nd Space Operations Squadron eli 2SOPS, joka toimii ohjauskeskuksessa Coloradossa. Ryhmän tehtävänä on varmistaa GPS:n saatavuus ja hyvä tarkkuus sekä siviili- että sotilaskäyttöön vuorokauden ympäri. Ohjauskeskuksessa tarkkaillaan satelliittien kuntoa ja tarkkuutta. Ohjauskeskus kerää tietoa tarkkailuasemilta ja käyttää näiltä saatua tietoa satelliittien tarkkojen sijaintien laskemiseen. Laskuista saatujen tarkkojen sijaintien tiedot päivitetään satelliiteille. [7] [10]

Tarkkailuasemat tarkkailevat GPS satelliitteja, kun ne ovat aseman havaittavissa. Tarkkailuasemat välittävät havaitsemansa tiedot ohjauskeskukseen. Tarkkailuasemia on yhteensä 16, joista kuusi on ilmavoimien hallinnassa ja 10 kuuluu National Geospatial Intelligence Agencylle. Antenneja käytetään satelliittien kanssa kommunikointiin. Pelkästään GPS-järjestelmää varten on neljä antennia, jotka sijaitsevat tarkkailuasemien yhteydessä, kuten kuvasta 1 voidaan havaita. Tämän lisäksi ohjauskeskus on liitetty myös Ilmavoimien maailmanlaajuiseen satelliittienhallintaverkostoon (AFSCN), johon kuuluu kahdeksan hallintalaitosta. [7] [10]



Kuva 2 Kontrollisegmentin osat maapallolla. [10]

2.2.3 Käyttäjäsegmentti

Käyttäjäsegmenttiin kuuluu sekä sotilaskäyttöön että siviilikäyttöön tarkoitettut GPS-signaalia vastaanottavat laitteet. Sotilaskäytössä GPS-järjestelmää hyödynnetään myös moneen muuhun toimintaan kuin pelkkään paikantamiseen, kuten kohteiden merkintään, lähialueiden ilmatukeen, ”älykkäisiin” aseisiin ja kohtaamispaikkojen määrittämiseen. Siviilipuolella GPS-signaaleja hyödyntäviä järjestelmiä on käytössä monilla eri osa-alueilla. Tällaisia osa-alueita ovat esimerkiksi maanviljely, lentoliikenne, ympäristön tarkkailu, merenkulku, junaliikenne, tieliikenne sekä erilaiset ensiapu- ja pelastustehtävät. [11][12]

Maanviljelyssä paikannusjärjestelmää voidaan hyödyntää esimerkiksi osana viljelysuunnitelmaa, peltojen kartoittamista, maanäytteiden kohdentamista sekä traktorin ohjausta. GPS-järjestelmä antaa paremman mahdollisuuden maanviljelijälle toimia tilanteissa, joissa näkyvyys on heikkoa kuten sateisella, sumuisella, pölyisellä tai pimeällä kelillä. GPS-järjestelmä yhdessä muiden järjestelmien kanssa mahdollistaa pellon viljelyn osioimisen pienempiin yksiköihin. Tällöin voidaan säätää tarkemmin lannoitteiden ja siemenien käyttöä osien mukaan ja päästä parempiin tuloksiin. [11][12]

Ilmailussa GPS-järjestelmä lisää turvallisuutta sekä kustannustehokuutta. Järjestelmän avulla on optimoitu lentoreittejä paremmiksi. Paremmat lentoreitit säästävät aikaa ja polttoainetta. Uusien siviilikäyttöön suunnattujen signaalien käyttö hyödyttää eniten juuri lentoliikennettä ja ne ovatkin kehitetty lähinnä lentoliikennettä ajatellen. GPS-järjestelmästä on hyötyä myös lentoliikenteen valvonnassa ja kokonaisuuden hallinnassa.[11][12]

GPS-järjestelmää hyödynnetään myös erilaisissa ympäristön tilaan liittyvissä tarkkailuissa. Esimerkiksi vuonna 2010 Meksikonlahdella tapahtuneessa öljyonnettomuudessa hyödynnettiin GPS-järjestelmää siten, että meressä kelluvaan öljylauttaan tiputettiin poijuja, joissa oli GPS-paikannin. Näiden paikantimien liikkeiden avulla pysyttiin kartalla öljylautan liikkeistä. Paikannusta käytetään myös eläinten liikkeiden seurantaan. Tarkkailtavalle eläimelle asennetaan panta, joka lähettää tietyn väliajoin eläimen paikkatietoja. Paikkatietojen avulla seurataan eläimen liikkeitä sen eri elämänvaiheissa. Tällä tavalla voidaan myös seurata esimerkiksi tietyn susilauman liikehdintää.[11][12]

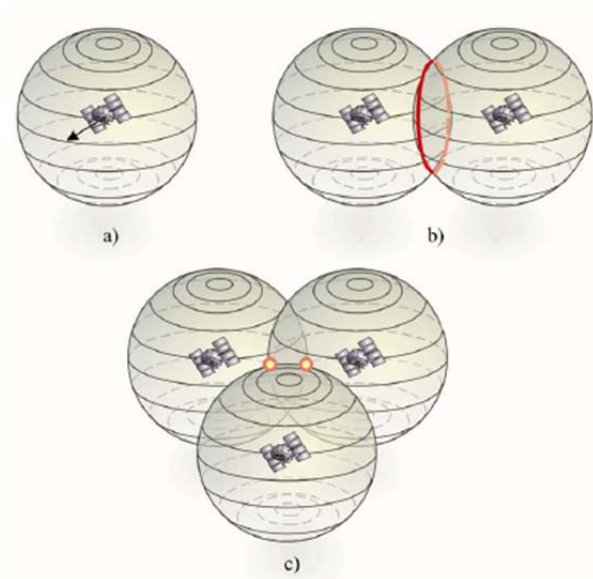
Merenkulun näkökulmasta GPS-järjestelmä on hyvin olleellinen. Järjestelmä mahdollistaa nopean ja tarkan tavan navigoida, mitata nopeutta sekä määrittää sijainti merellä. Tämän lisäksi järjestelmästä on suuri apu paikantamis- ja pelastustehtävissä. Merellä laivan kapteeni pystyy paikannuksen avulla seuraamaan omaa sijaintiaan avomerellä sekä tarkkailemaan reittejä. Tarkan sijainnin tietäminen on tärkeää varsinkin satamaan tultaessa ja satamasta poistuttaessa. GPS-järjestelmää hyödynnetään myös

satamassa konttien seurannassa ja konttien siirtämiseen käytettävässä automaatiassa. Järjestelmää hyödyntämällä on esimerkiksi saatu vähennettyä konttien väärinsijoittamista. Paikannuksesta on suuri apu satama-alueella tapahtuvan liikenteen seurantaan ja järjestelemiseen. [11][12]

Näiden edellä mainittujen tapauksien lisäksi on myös monenlaisia muita keinoja hyödyntää GPS-järjestelmää niin yksittäisen ihmisen kuin suurien järjestelmienkin toimesta. Integroitujen piirien kehitys siivitti myös GPS-järjestelmien kehitystä ja mahdollisti pienten, kevyiden ja halvempien vastaanottimien valmistamisen. Vastaanottimien käyttäminen on nykyään todella yleistä, ja se löytyy esimerkiksi melkein jokaisesta myynnissä olevasta matkapuhelimesta. Matkapuhelimissa vastaanottimelta saatua paikannustietoa voidaan hyödyntää monipuolisesti valitsemalla eri käyttötarkoituksiin tehtyjä sovelluksia.. [9]

2.3 Järjestelmän toiminta

Vastaanotin tarvitsee sijainnin määrittämiseen maapallolla vähintään neljän satelliitin signaalien tiedot. Kolmea satelliittia käytetään paikan määrittämiseen ja neljättä vastaanottimen kellon asettamiseksi oikeaan aikaan. Oikea aika on todella tärkeä, koska yhden millisekunnin virhe ajassa aiheuttaa 300 kilometrin virheen paikannuksessa. Järjestelmän toiminta perustuu vastaanottimen ja satelliittien etäisyyden laskemiseen. Kuvassa 3 on esitetty satelliittien etäisyyksistä ratkaistuna paikka. Kuvan 3 kohdassa a on kuvattu tilannetta, jossa on tietoa yhden satelliitin etäisyydestä. Kuvan 3 kohdassa b on saatu tieto toiseltakin satelliitilta, jolloin vastaanottimen sijainti pystytään haarukoimaan kahden pallon muodostamaan ympyräkehän muotoiseen leikkaukseen. Kuvan 3 c kohdassa on kolmannenkin satelliitin tiedot otettu mukaan ja näin on saatu muodostettua kaksi leikkauspistettä. Näistä kahdesta pystytään päättämään oikea sijainti sillä perusteella, että toinen piste sijaitsee joko maapallon sisällä tai kauempana avaruudessa. [13] [14][15]



Kuva 3 Satelliittipaikannuksen geometria [14]

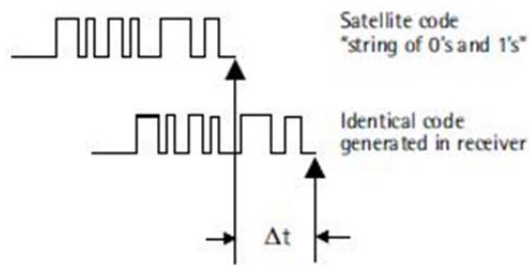
2.3.1 Satelliittien lähettämä navigointidata

Satelliittien lähettämä signaali sisältää 1500 bittiä navigointidataa. Navigointidatan datakehys koostuu viidestä alikehyksestä, joista jokainen sisältää 300 bittiä dataa. Jokaisen alikehysten alkuun on varattu 30 bittiä TLM-kentälle (Telemetry), joka sisältää tietoa satelliitin tilasta. Tämän jälkeen HOW-kentälle (handover word), on varattu 30 bittiä. HOW-kenttä aktivoi vastaanottimen tulevaa dataa varten. Lopuksi alikehyksessä on varattu 240 bittiä itse datalle. Datan sisältämä informaatio riippuu alikehysten järjestysluvusta. Ensimmäinen alikehysten datakenttä sisältää kellonajan oikeaksi korjaamiseen tarvittavaa dataa. Toinen ja kolmas alikehyksessä sisältää satelliitin lentoratatietoja. Neljännen alikehysten dataosuus on varattu maa-asetille lähetettäviä erikoissanomia varten. Viidennen alikehysten data sisältää osan almanakasta, josta selviää kaikkien satelliittien tilatietoja. Saadakseen koko almanakan selville, tarvitsee vastaanottimen ottaa useampia datakehkyksiä. [22]

2.3.2 Etäisyyden laskenta

Etäisyys lasketaan satelliitin lähettämän signaalin kulkuajasta. Satelliitin lähettämä signaali kulkee valonnopeutta, joten etäisyys saadaan laskettua kertomalla kulku-aika valonnopeudella. Kulkuajan määrittäminen tapahtuu niin, että satelliitti lähettää yksilöllistä koodia. Kyseisestä koodista käytetään nimitystä PRN-koodi. Nimitys tulee siitä, että koodi vaikuttaa satunnaiselta kohinalta, mutta todellisuudessa se on tarkasti määriteltä matemaattisen algoritmin tulos. Vastaanotin alkaa tuottaa PRN-koodia vastaavaa koodia eri ajanhetkillä. Sisääntulosignaalia korreloidaan yhdellä tai useammalla vastaanottimessa tuotetulla koodilla ja seurataan milloin korrelaatio saavuttaa huippunsa. Tätä korrelointia saatetaan joutua tekemään monta kertaa ennen kuin saavutetaan oikea kohta. Korrelaation maksimikohdan ja prosessin alkukohdan

välinen ajanmuutos vastaa aikaeroa (Δt , kuvassa 4). Tämä aikaero on yhtä suuri kuin signaalin kulku-aika. [13] [14][15][36]



Kuva 4 Vastaanottimen muodostaman ja vastaanottaman signaalin aikaero[15]

2.4 Erilaiset virheet

Yksi suurimmista virheenaiheuttajista oli järjestelmän ylläpidon tietoisesti aiheuttama virhe, jota kutsuttiin SA-häirinnäksi (tulee sanoista Selective Availability). Paikannuksen tarkkuutta heikennettiin lisäämällä satelliittien signaaleihin virhettä, etteivät muiden valtioiden armeijat pystyisi hyödyntämään tarkkaa signaalia. Yhdysvaltojen armeijan omat laitteet osasivat ottaa SA-häirinnän virheen huomioon laskutoimituksissaan. GPS-järjestelmien yleistyessä hiljalleen päätettiin SA-häirinnästä luopua toukokuussa 2000. Yhdysvaltain puolustusministeriöllä on kuitenkin olemassa teknologia, joka mahdollistaa GPS-signaalien poistamisen tietyiltä alueilta tarvittaessa. [7]

Tällä hetkellä yhtenä suurimpana virheen aiheuttajana on ilmakehä. Sekä ilmakehän ionosfääri että troposfääri vaikuttavat satelliittien lähettämien signaalien etenemisnopeuteen. Etenemisnopeuksien muutokset aiheuttavat virhettä. Troposfäärin vaikutus signaalin virheellisyyteen on vain joitain desimetrejä eli huomattavasti pienempi kuin ionosfäärillä. Ionosfääri voi aktiivisimmillaan aiheuttaa nopeita kulkuajan vaihteluita ja virhe voi olla hetkellisesti jopa kymmeniä metrejä. Ionosfäärin aiheuttamia virheitä voidaan ehkäistä käyttämällä useampaa kuin yhtä mittaustaajuutta. [14]

Mahdollista virhettä aiheuttaa myös monitie-eteneminen. Tällöin signaali ei päädy suoraan vastaanottajalle vaan heijastuu esimerkiksi rakennelmista. Vastaanotin saa tällöin signaalin, jonka kulku-aika on ollut todellista pidempi. Vastaanotin kuvittelee satelliitin olevan todellisuutta kauempana, koska kulku-aika on pidempi. Tätä varten vastaanottiin on luotu erilaisia algoritmeja, joiden avulla tutkitaan signaalin mahdollista heijastumista. Heijastuneen signaalin sisältämää dataa ei käytetä paikantamiseen.[14]

Satelliitin toiminta aiheuttaa myös virhettä. Satelliitin toiminnasta aiheutuvat virheet liittyvät satelliitin kelloon ja liikerataan. Vaikka satelliittien kellot ovatkin tarkkoja atomikelloja, aiheuttavat olosuhteet näihin jonkin verran virhettä ajan kuluessa. Näitä kelloja kuitenkin seurataan ja satelliiteille lähetetään korjausparametrejä, jotka ne välittävät vastaanottaville laitteille. Näiden korjausparametrien avulla saadaan virhettä korjattua. Korjauksen suuruuteen vaikuttaa se, milloin satelliitin korjausparametrit ovat asetettu. Satelliiteille ennalta asetettuihin ratoihin tarvitsee myös tehdä muutoksia, koska niiden liikerataan vaikuttava kuun ja maan vetovoimat. Satelliittien liikeradan muutoksien tarvetta seurataan keskusvalvomosta ja satelliiteille lähetetään korjausparametrit välitettäväksi vastaanottimille.

[16]

Paikannustarkkuuteen vaikuttaa myös satelliittigeometria. Satelliittigeometrialla tarkoitetaan sitä, miten satelliitit ovat sijoittuneet vastaanottajaan nähden sillä hetkellä. Satelliittien ollessa jakautuneena eri puolilla taivasta on tilanne paljon parempi, kuin silloin jos ne olisivat lähekkäin. DOP-luku kuvaa satelliittigeometrian vaikutusta mittaustarkkuuteen. Mitä pienempi DOP-luku on, sitä vähemmän satelliittigeometria aiheuttaa virhettä. Jos vastaanottimella on näkyvissä enemmän kuin neljä satelliittia, voi vastaanotin valita käyttöönsä niiden satelliittien signaalit, joiden satelliittigeometriasta syntyy pienin DOP-arvo. [17]

2.5 Tarkkuutta parantavia järjestelmiä

Aikojen saatossa on kehitetty erilaisia järjestelmiä, joiden tarkoitus on ollut parantaa mittauksen tarkkuutta. Satelliitteihin perustuva parannus kehitettiin sitä varten, että lentokoneiden sijainti saataisiin tarkemmaksi erityisesti nousu- ja laskuvaiheissa. Differentiaalinen paikanmääritys sai alkunsa siitä, että sitä käytettiin SA-häirinnän aiheuttaman virheen minimoimiseksi. Avustetun GPS:n kehittymiseen vaikutti tarve paikantaa matkapuhelin tarkemmin hätätilanteissa.

2.5.1 Satelliitteihin perustuva parannus

Satelliittipohjainen parannusjärjestelmä (SBAS) perustuu ylimääräisten satelliittien lähettämiin korjaussignaaleihin. Parannusjärjestelmä on luotu sitä varten, että peruspaikannusjärjestelmät kuten GPS ja GLONASS eivät täyttäneet kansainvälisen siviili-ilmailujärjestön (ICAO) vaatimuksia tarkkuuden osalta. SBAS perustuu alueellisiin järjestelmiin, joita ylläpitävät eri tahot. Euroopan alueen kattava järjestelmä on nimeltään EGNOS ja sitä ylläpitää Euroopan avaruusjärjestö (ESA). Pohjois-Amerikan vastaavaa järjestelmää kutsutaan nimellä WAAS ja sen ylläpitäjänä toimii Yhdysvaltojen ilmailuhallitus (FAA). Vastaavia järjestelmiä on myös Japanilla MSAS ja Intialla GAGAN. [18] [19]

2.5.2 Differentiaalinen paikanmääritys

Differentiaalinen paikanmääritys (DGPS) tarkoittaa sitä, että vastaanottimelle välitetään differentiaalikorjauksia tarkkuuden parantamiseksi. Differentiaalikorjaukset saadaan tukiasemilta, jotka sijaitsevat tunnetuissa sijainneissa. Nämä tukiasemien vastaanottimet pystyvät arvioimaan satelliittien signaaleista johtuvia virheitä, koska niiden sijainti on tiedossa ja se ei muutu. [20] [19]

Tukiasemien vastaanottimissa on tarpeeksi kanavia (yleensä 12), joiden avulla tukiasema pystyy vastaanottamaan signaaleja kaikilta näkyvissä olevilta satelliiteilta. Tukiasema laskee vastaanottamistaan signaaleista paikkatietoa ja vertaa tätä omaan tunnettuun paikkatietoonsa. Näiden vertailujen avulla tukiasema pystyy laskemaan satelliittien etäisyystiedoissa olevia virheitä ja tarvittavia korjaustietoja. Differentiaalikorjauksen tiedot välitetään vastaanottimille, jotka kyseistä korjausmuotoa tukevat, yleensä matkapuhelinverkkoa tai radiotaajuuksia hyödyntäen. Yleisimmät käyttökohteet differentiaalikorjauksilla on merellä, jolloin viestit välitetään radiotaajuuksilla, sekä matkapuhelimilla, jolloin viestit kulkevat matkapuhelinverkossa. Matkapuhelimissa differentiaalinen paikanmääritys on osa avustettua paikanmääritystä. [20] [19]

2.5.3 Avustettu paikanmääritys

Avustettu paikanmääritys eli A-GPS on yleensä tarjolla matkapuhelimissa ja se hyödyntää matkapuhelinverkkoa. A-GPS:n toiminta voidaan jakaa kahteen eri alueeseen sen mukaan, laskeeko matkapuhelimen sijainnin puhelin itse saatujen datojen mukaan vai laskeeko sijainnin palvelin, joka välittää sijainnin matkapuhelimelle. Yleensä avustettu GPS toimii niin, että ensin matkapuhelimen suuntaa-antava sijainti määritetään matkapuhelinverkkoa hyödyntäen. Tämän jälkeen matkapuhelin saa tukiasemalta tiedon siitä, mitkä satelliitit ovat näkyvissä sillä alueella. Näiden lisäksi matkapuhelimelle voidaan välittää differentiaalipaikannuksen tietoja. Puhelin voi avustaa paikanmääritystään vielä hyödyntäen omia sensoreitaan.[21] [19]

2.6 NMEA-lausekkeet

Työssä käytettävät vastaanottimet välittävät tietonsa käyttäen NMEA-standardiin perustuvia lausekkeitä. NMEA eli National Marine Electronics Association on tuottoa tavoittelematon yhteisö, joka koostuu erilaisista merellä käytettävään elektroniikkaan perehtyneistä tahoista. Standardi määrittelee sähköisen rajapinnan sekä tiedonsiirtoprotokollan veneilyssä käytettävien elektronisten laitteiden tiedonsiirtoon. [22][23]

NMEA 0183 standardin mukaan laitteiden kommunikointi tapahtuu lauseilla, jotka koostuvat ASCII-merkeistä. Lauseet alkavat aina \$-merkillä ja loppuvat merkkeihin <CR> (carriage return, 0x0D) ja <LF> (NL line feed, new line, 0x0A). Lauseen sisältämät tietokentät on eroteltu toisistaan pilkuilla. Heti \$-merkin jälkeen lauseessa tulee viisimerkkinen tunniste. Tunnisteen kaksi ensimmäistä merkkiä kertoo, mikä laite on kyseessä ja kolme seuraavaa merkkiä kertoo, minkälaista tietoa lause sisältää. Lauseen lopussa ennen lauseen päättävää <CR><LF> merkkejä on *-merkki ja kaksi merkkiä, jotka ovat tarkistussummaa varten. Näiden kahden merkin avulla voidaan tarkistaa, että lause on vastaanotettu oikein. Tarkistussumma saadaan lausekkeesta siten, että otetaan kaikki merkit \$ ja *-merkkien välistä ja tehdään merkki kerrallaan xor-operaatio, eli ensin ensimmäisen ja toisen merkin välillä xor-operaatio, ja sitten siitä saatu tulos kolmannen merkin kanssa jne. [22][23]

Standardissa on myös olemassa toisenlaisia lausekkeita, joita kutsutaan ”proprietary message” -nimellä. Näiden lauseiden tunniste on \$-merkin jälkeen P-kirjain. P-kirjaimen jälkeen tulee kolmimerkkinen laitteen valmistajan tunniste. Näitä lauseita käytetään muuttamaan laitteen asetuksia. Tässä työssä on käytetty alla esitettyä lausetta SBAS-järjestelmän käyttöönottoon vastaanottimessa. [22][23]

\$PMTK313,1*2E<CR><FL>

Lauseen MTK tarkoittaa, että komento koskee MediaTek-nimisen valmistajan laitetta. Tämän jälkeen tulee koodi 313, joka kyseisessä tapauksessa on tunnus SBAS-sateliitin etsimiselle ja käyttämiselle löydettyä. Sitten tulee pilkku, joka erottaa tietokentät toisistaan. Pilkun jälkeinen ykkönen tarkoittaa tämän komennon yhteydessä aktivointia. Vastaavasti kyseinen ominaisuus saadaan kytkettyä pois päältä, jos pilkun jälkeinen merkki vaihdettaisiin nollaksi. Tämä tietysti vaatisi myös tarkistussumman muuttamista oikeaksi (2F). Tähtien jälkeiset kaksi merkkiä (2E) ovat tarkistussumma, jonka avulla viestin oikeellisuus saadaan tarkistettua aivan kuten aikaisemmin esitellyn lauseen tapauksessa. [24]

2.6.1 Vastaanottimen lähettämät lauseet

Työssä käytettävä GPS-vastaanotin lähettää tietoa neljässä erilaisessa lauseessa. Koska kyseessä on GPS-vastaanotin, alkaa lause aina \$GP. Tämän jälkeen tulee kolmimerkkinen lauseen sisällöstä kertova tunniste. Tässä työssä käytettävän vastaanottimen tunnisteet ovat listattu taulukkoon 3.

Taulukko 3 NMEA-lauseiden tunnistet

tunniste	kuvaus
GGA	Global Positioning System Fix Data
RMC	Recommended Minimum Specific GNSS Data
GSV	Satellite in view
GSA	DOP and Active Satellites

GGA-lauseke pitää sisällään tiedot ajasta ja paikasta ja tämän lisäksi erilaisia tietoja paikan laskemiseen käytetyistä korjauksista. RMC-lauseke kertoo ajan, paikan, päivämäärän, suunnan ja nopeuden solmuissa. GSV-lauseke sisältää tietoja saatavilla olevista satelliiteista, kuten satelliittien määrän ja niiden tunnistet sekä muita ominaisuuksia. Vastaanotin voi lähettää useamman GSV-lausekkeen riippuen nähtävissä olevista satelliittien määrästä. Lauseke sisältää aina myös oman järjestysnumeronsa sekä tiedon, montako GSV-lauseketta vastaanotin lähettää. GSA-lauseke sisältää tietoa itse laskentaan käytetyistä satelliiteista ja eri DOP-arvoja. Käydään esimerkkinä läpi yksi GGA-lausekeen sisältö:

```
$GPGGA,114353.000,6126.8034,N,02350.6030,E,1,10,0.91,31.4,M,12.9,M,,*55<CR><FL>
```

Ensin GGA-lausekkeessa tulee kellonaika, joka ilmoitetaan muodossa tunnit, minuutit, sekunnit ja sekunnin desimaalit. Esimerkitapauksessa kello on siis 11:43:53. Seuraavaksi tulee latitudi, joka ilmoitetaan muodossa asteet, minuutit ja minuuttien desimaaliosa. Tässä tapauksessa siis 61 astetta ja 26,8034 minuuttia. Tämän jälkeen tulee kirjain N tai S, joka kuvaa, ollaanko pohjoisella vai eteläisellä pallonpuoliskolla. Tässä tapauksessa ollaan siis pohjoisella pallonpuoliskolla. Sitten tulee longitudi, joka on vastaavassa muodossa kuin latitudi, eli 23 astetta ja 50,6030 minuuttia. Longitudien jälkeen tuleva kirjain, E tai W, kertoo ollaanko eteläisellä vai itäisellä pallonpuoliskolla. Esimerkkilauseessa ollaan siis itäisellä pallonpuoliskolla. Seuraavana tuleva ykkönen kertoo koordinaattien laskuun käytettyä tapaa. Tässä tilanteessa ykkönen kertoo siitä, että käytössä on standardi paikannuspalvelu. Tämän jälkeen tulee laskennassa käytettyjen satelliittien määrä, joka esimerkissä on kymmenen. Arvo 0.91 on horisontaali DOP arvo, joka kuvastaa satelliittigeometrian hyvyyttä. Arvo 31.4 kertoo korkeuden merenpinnasta. Arvo 12.9 kertoo poikkeaman vertailuellipsoidin ja merenpinnankorkeuden välillä. [24]

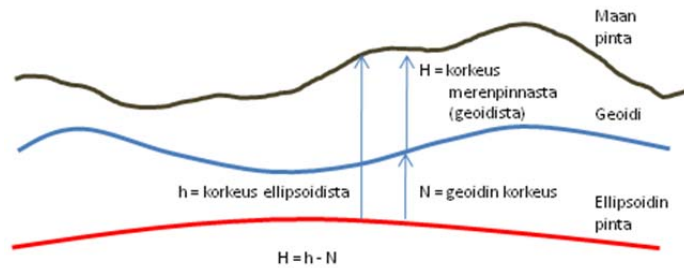
3 MAAN MALLINTAMINEN ERI TAVOIN

Maan mallintaminen on tärkeä osa GPS-paikantimen antamien koordinaattien hyödyntämistä. Mallinnuksen tarkkuuden valintaan vaikuttaa sovelluksen vaatima tarkkuus. Liian tarkka mallintaminen monimutkaistaa arvojen laskemista ja siksi onkin tärkeää osata valita sopiva tarkkuus. Maata pystytään mallintamaan monin eri tavoin riippuen siitä, millaisella tarkkuudella mallintaminen tehdään. Joihinkin sovelluksiin voidaan käyttää karkeana mallinnuksena pelkkää palloa, joka kuitenkin aiheuttaa isojakin virheitä napojen alueilla. Karttojen tekemisessä käytetään yleisesti ellipsoideja, jotka tarjoavat tähän tarkoitukseen riittävän tarkkuuden. Maata ei kuitenkaan pystytä yksityiskohtaisesti mallintamaan, koska maan muoto muuttuu koko ajan. Maan muodon muuttumiseen vaikuttavat esimerkiksi maan nousut, vuorovedet ja jäätiköiden sulaminen sekä hitaammin vaikuttavana mannerlaattojen liikkeet. Tarkimpana mallinnuksena käytetään geoidia, joka kuitenkin on fysikaalinen malli, eikä näin ole esitettävissä matemaattisella lausekkeella. [25]

Alkuun luvussa käsitellään monimutkaisempia malleja kuten luvussa 3.1 geoidia, joka on fysikaalinen mallinnus maapallolle. Luvussa 3.2 käsitellään maapallon matemaattista mallia. Matemaattisena mallinnuksena on käytössä ellipsoidi. Yksinkertaisempaa matemaattista mallinnusta palloa käsitellään luvussa 3.3. Luvussa 3.4 käsitellään työn tarkkuuteen riittävää tasokoordinaattimallinnusta. Suunnan laskemista koordinaateista merkkilaskulla käsitellään luvussa 3.5.

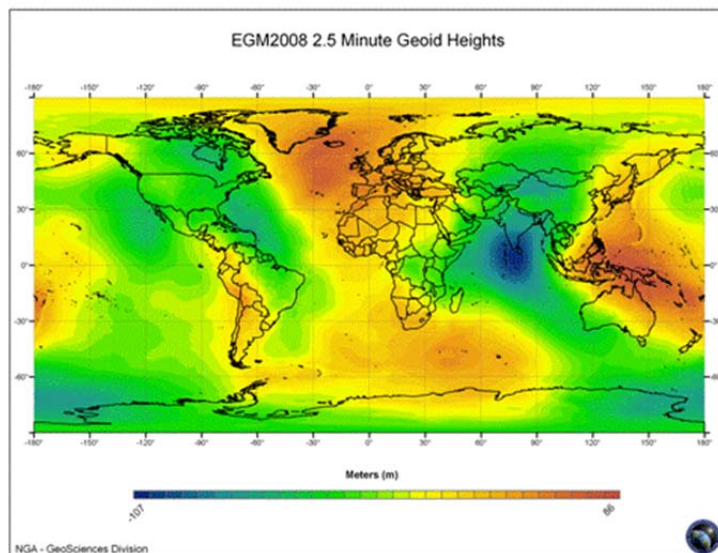
3.1 Maapallon fysikaalinen mallinnus eli geoidi

Geoidi on muoto, joka muistuttaa maapalloa, silloin kun valtameren vapaa pinta asettuu lepotilaan. Geoidi kuvaa maan massojen aikaansaamaa painovoimaa, ja sen muodossa on havaittavissa esimerkiksi maankuoren tiheysvaihtelut. Muodosta erottuvat erilaiset asiat kuten tiheät malmiesiintymät, meteoriittien törmäyksistä aiheutuneet kraatterit, valtameren keskiselänteet ja mannerten alityöntövyöhykkeet. Näiden painovoimakenttien määrittämiseen tarvitaan maan pinnalla suoritettuja mittauksia, koska avaruudesta käsin tehdyt havainnot eivät mahdollista noin sataa kilometriä pienempien yksityiskohtien tarkastelua. Tämä johtuu siitä, että eri paikoista tulevat painovoimasignaalit sekoittuvat keskenään. [25]



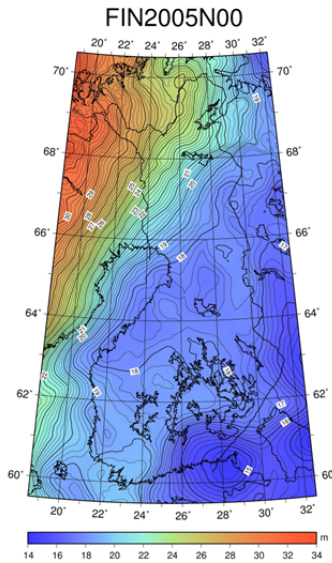
Kuva 5: Todellisen maanpinnan, vertausellipsoidin ja geoidin välinen riippuvuus [26]

Geoidin pintaa ilmaistaan korkeusvaihteluna vertailuellipsoidiin nähden kuten kuvassa 5 on esitetty. Pinnan poikkeama saattaa olla jopa 100 metriä suuntaan tai toiseen. Matalimmillaan geoidin pinta on Intian eteläpuolella ja korkeimmillaan Islannin lähistöllä. Meren pinta eroaa geoidista pahimmillaan vain metrin verran, jos ei oteta huomioon lyhytaikaisia vaihteluita. Maan pinta saattaa poiketa geoidista huomattavasti enemmän, jopa kilometrejä. Kuvassa 6 on esitetty EGM2008 geoidimalli, jossa kuvataan geoidin pinnan korkeuseroja vertailuellipsoidiin nähden. [25]



Kuva 6: EGM2008 geoidin korkeuserot WGS84-vertausellipsoidiin nähden [27]

Geoidimalleja on olemassa myös alueellisia, joista pystytään tarkemmin määrittämään pienemmän alueen korkeuserot. Kansallisiin referenssijärjestelmiin voidaan sovittaa paikalliset geoidi mallit ja tästä syntyy kansallinen geoidimalli. Suomessa käytössä oleva geoidimalli on FIN2005N00, joka on esitetty kuvassa 7.[28]



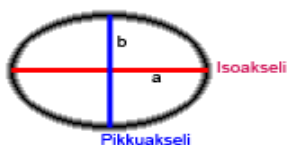
Kuva 7: Geoidin korkeuksia vertausellipsoidiin nähden Suomen alueella [28]

3.2 Matemaattinen malli maapallolle

Maan muodon matemaattisena mallina voidaan pitää vertausellipsoideja, jotka ottavat huomioon maan poikkeamisen pallomuodosta litistyneisyyden vuoksi. Ellipsoidi on ellipsin pyörähdyskuva, eli se on kuin pallo, joka on litistynyt navoiltaan. Myös geoidit pohjautuvat ellipsoideihin. Ellipsoidinkin antama tarkkuus on riittävä moniin sovelluksiin ja sitä käytetään esimerkiksi karttoja piirrettäessä.

3.2.1 GRS80 ja WGS84 vertausellipsoidit

Monet järjestelmät perustuvat GRS80-vertausellipsoidiin, kuten myös GPS-järjestelmien käyttämä WGS84-ellipsoidi. Todellisuudessa näiden kahden ellipsoidin korkeuserot poikkeavat kaikkialla maapallolla korkeintaan yhden millimetrin. Vertausellipsoidit ilmaistaan yleensä kahdella arvolla: toinen on pyörähtävän ellipsin isoakselin puolikkaan (merkitty kuvassa 8 kirjaimella a) pituus metreinä ja toinen on litistyneisyys. Litistyneisyys saadaan laskettua jakamalla isoakselin puolikkaan ja pikkuakselin puolikkaan (merkitty kuvassa 8 kirjaimella b) erotus isoakselin puolikkaan pituudella. Käyttämällä kuvassa 8 esitettyjä merkintöjä isoakselin ja pikkuakselin puolikkaille saadaan litistyneisyydelle kaava 1. Usein vertailuellipsoidien yhteydessä litistyneisyydestä ilmoitetaan käänteisarvo. [29]



Kuva 8: Ellipsoidista ja sen akselit.

kaava 1:
$$f = \frac{a-b}{a}$$

GRS80-vertailuellipsoidin parametrit, jossa a on maapallon säde metreissä päiväntasaajan kohdalta ja $1/f$ on litistyneisyyden käänteisarvo.

$$a = 6\,378\,137\text{m}$$

$$1/f = 298.257\,222\,101$$

WGS84-vertailuellipsoidin parametrit

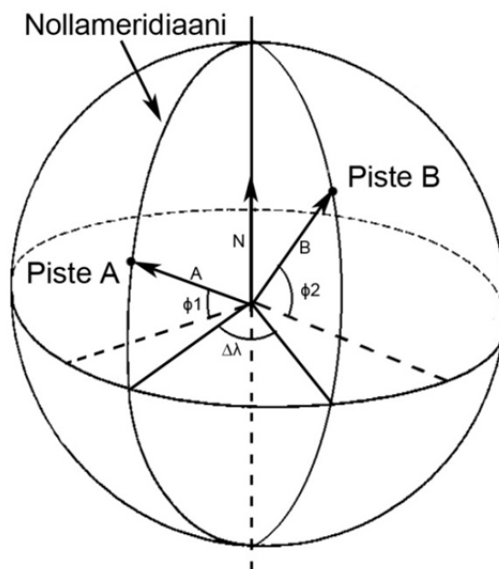
$$a = 6\,378\,137\text{m}$$

$$1/f = 298.257\,223\,563$$

Kuten yllä olevat parametrit osoittavat, näiden kahden vertailuellipsoidin litistyneisyyksissä oleva poikkeama on vain hyvin pientä. [29]

3.3 Pallon käyttäminen mallinnuksessa

Laskennallista puolta pystytään yksinkertaistamaan ellipsoideista mallintamalla maapalloa pallona. Tämä ei kuitenkaan ota huomioon maapallon litistyneisyyttä ja sen takia laskuihin tulee erisuuruisia virheitä riippuen siitä, ollaanko päiväntasaajalla vai napojen lähetyvillä. Päiväntasaajan kohdilla virhettä ei juuri ole, koska pallo ja ellipsoidi vastaavat toisiaan siellä hyvinkin tarkkaan. Navoilla taas virhe on suurimmillaan, koska pallo ei ota huomioon litistyneisyyttä. [25]



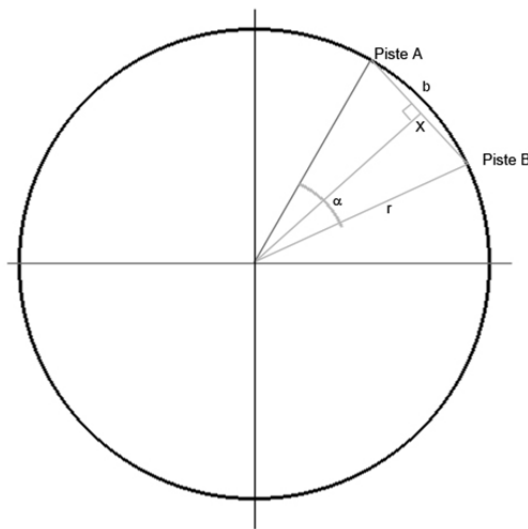
Kuva 9 Pallon muotoinen mallinnus maapallosta.

Pallon tapauksessa pisteiden välisen suunnan määrittämiseksi pitäisi käyttää origokeskeistä laskutapaa. Tästä syntyisi monimutkaisia lausekkeita, joita pystytään hieman yksinkertaistamaan valitsemalla akselien asennot suotuisiksi. Kuvassa 9 on esitetty havainnollistava kuva kahden pisteen välisestä suunnasta origon suhteen. Kuitenkaan tässä työssä vaadittava tarkkuus ei edellytä pisteiden välisen suunnan

laskemiseen pallogeometrian käyttöä. Tarkemmin asiaa käydään läpi seuraavassa luvussa. [25]

3.4 Tasokoordinaatisto

Tarkastellaan maapallosta sellaista poikkileikkausta, joka kulkee sekä pisteen A että pisteen B kautta. Tästä syntyy ympyrä, jonka kehällä molemmat pisteet sijaitsevat, kuten kuvassa 10 on esitetty.



Kuva 10 Pallon poikkileikkaus pisteiden A ja B kautta

Ympyrästä voidaan laskea origosta pisteisiin piirrettyjen säteiden muodostama kulma, kun tiedetään kaaren pituus b ja maapallon säde r . Kulma saadaan laskettua sektorin kaaren pituuden kaavasta 2 muokkaamalla muotoon kaava 3.

kaava 2:
$$b = \frac{\alpha}{360^\circ} 2\pi r$$

kaava 3:
$$b = \frac{\alpha}{360^\circ} 2\pi r \rightarrow \alpha = \frac{360^\circ}{2\pi r} b$$

Kun sektori jaetaan keskeltä kahteen osaan, saadaan kaksi yhtäläistä suorakulmaista kolmiota, joiden kärkikulma on $\frac{\alpha}{2}$ ja hypotenuusa r . Näillä tiedoilla voidaan ratkaista jänteen pituus hyödyntäen suorakulmaisen kolmion laskusääntöjä. Lasketaan siis jänteen toisen puolikkaan pituus, joka sitten kerrotaan kahdella, että saadaan koko jänteen pituus. Kaavassa 4 on jänteen pituutta merkitty kirjaimella x , tällöin puolikkaan jänteen pituutta merkitään $x/2$.

kaava 4:
$$\sin \frac{\alpha}{2} = \frac{x/2}{r} \rightarrow x = \sin \frac{\alpha}{2} 2r$$

Lasketaan pisteiden välinen etäisyys suoraan pisteestä pisteeseen ja verrataan sitä ympyrän kaarta myötäilevään kaaren pituuteen. Tämä laskeminen toteutetaan kaavoja 3 ja 4 käyttäen. Kaavassa 3 ympyrän kaaren pituus on sama kuin pisteiden todellinen etäisyys maapallolla eli 25 metriä. Maapallon säteenä käytetään laskuissa 6370000 metriä. Näiden arvojen avulla saadaan pisteiden välinen kulma ratkaistua kaavasta 3.

$$\alpha = \frac{360^\circ}{\pi * 6370000} * 25 \approx 224,9 * 10^{-6}$$

Saadusta kulmasta voidaan tämän jälkeen laskea kaavasta 4 jänteen pituus eli kahden pisteen välinen suora etäisyys.

$$x = \sin\left(\frac{224,9 * 10^{-6}}{2}\right) 2r \approx 24,999999999984$$

Saadusta tuloksesta huomataan, että ero on erittäin pieni verrattuna pisteiden väliseen etäisyyteen kaarta pitkin. Taulukkoon 4 on laskettu muutamia kaaren pituuden ja jänteen pituuden välisiä eroja vastaanottimien eri etäisyyksillä.

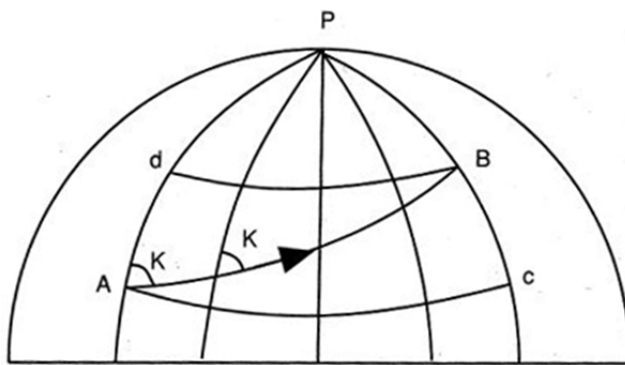
Taulukko 4 Maan pintaa mukailevan ja suoran matkan väliset erot vastaanottimien eri etäisyyksillä

Pisteiden välinen etäisyys maan pinnalla (m)	pisteiden välinen kulma maan keskipisteessä	etäisyyksien erotus (maan pintaa pitkin - suoraan pisteestä pisteeseen)
25	$224,9 * 10^{-6}$	16,04 pm
20	$179,9 * 10^{-6}$	8,22 pm
15	$134,9 * 10^{-6}$	3,47 pm
10	$89,9 * 10^{-6}$	1,03 pm
5	$45,0 * 10^{-6}$	0,13 pm
1	$9,0 * 10^{-6}$	1,00 fm

Tässä työssä kahden koordinaatin välinen etäisyys on maksimissaan 25 metriä, joka on vastaanottimien johtojen yhteenlaskettu maksimipituus. Tämä on niin pieni verrattuna maan säteeseen, ettei maan kaarevuus vaikuta pisteiden väliseen suuntaan niin suuresti, että sitä tarvitsisi ottaa huomioon laskuissa. Kuten taulukosta 4 voidaan huomata, on etäisyyksien eroavaisuus 1 femtometrillä noin 16 pikometriin, eli olematon vastaanottimien väliseen etäisyyteen nähden. Tästä johtuen voidaan pisteiden välinen kulma laskea tasokoordinaatistossa. Näin laskut saadaan suoritettua huomattavasti helpommin ja näin laitteen mikrokontrolleri selviää tehtävästä jouhevammin.

3.5 Merkintälaskun käyttäminen kulman laskemisessa

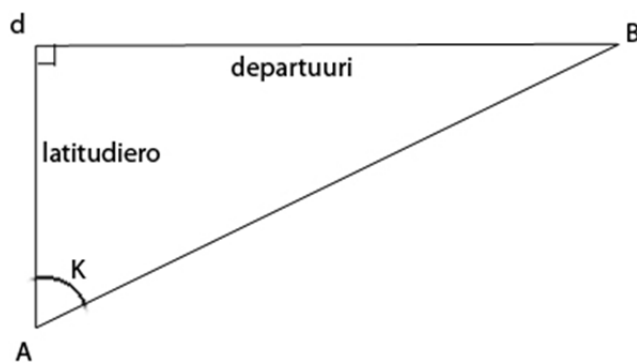
Kuvassa 11 on havainnollistettu aluksen kulkemaa reittiä maapallon pinnalla, pisteestä A pisteeseen B. Näiden pisteiden välille muodostuu loksodromi eli käyrä, joka muodostaa yhtä suuren kulman leikkaamiinsa pituuspiireihin. Pituuspiirien ja loksodromin välisiä kulmia on kuvassa 11 merkitty kirjaimella K. Aluksen siirtymä jaetaan kahteen osaan, joita ovat latitudin muutos (väli A-d, Kuva 11) sekä longitudin muutos (väli A-c, kuvassa 11). Latitudin muutos ilmaistaan meripeninkulmina. Yksi meripeninkulma vastaa 1 852 metriä. Longitudin muutosta ilmaistaan departuurina, joka osoittaa sen, montako meripeninkulmaa itään päin alus on liikkunut. Departuuri saadaan muutettua longitudieroksi merkintätaulukon tai laskimen avulla. [30]



Kuva 11 Aluksen kulkeman reitin kuvaus [30]

3.5.1 Keskilatitudimenetelmä

Kuvasta Kuva 11 saadaan muodostettua kuvan 12 mukainen tasokolmio. Kolmion arvojen laskemisessa voidaan käyttää suorakulmaisen kolmion matemaattisia ratkaisukeinoja. Kuljettua matkaa pisteestä A pisteeseen B kuvaa kolmion hypotenuusa, latitudiero kuvaa kolmion kulman K viereinen kateetti ja departuuria kulman K vastainen kateetti. [30]



Kuva 12 Ensimmäinen merkintäkolmio

Ensimmäisestä merkintäkolmiosta departuuri lasketaan käyttämällä keskilatitudimenetelmää. Menetelmän käytössä aiheutuu tietty laskennallinen virhe. Tämä virhe ei kuitenkaan vaikuta laskuun, jos pisteiden välinen etäisyys on alle 600 meripeninkulmaa. Jos etäisyys on suurempi kuin 600 meripeninkulmaa, on käytettävä meridionaalimenetelmää, josta kerrotaan enemmän luvussa 3.5.2. [30]

Keskilatitudimenetelmällä saadaan ratkaistua tulopaikan koordinaatit, jos tiedossa on lähtöpaikka, aluksen kulkema matka sekä kulkusuunta. Keskilatitudimenetelmällä saadaan myös laskettua kahden tiedossa olevan paikan välinen matka ja suunta. Molemmissa laskutoimituksissa voidaan käyttää merkintätaulukkoita tai laskinta. Merkintätaulukkoita ei käsitellä tässä sen enempää, koska työssä oleellisempaa ovat laskimella suoritettavat merkintälaskut. [30]

Tulopaikan koordinaattien laskemista hyödynnetään tässä työssä siihen, että lasketaan pisteitä, joita voidaan käyttää testidatana laskennallisuuden toiminnan tarkistamiseen. Tulopaikan koordinaattien laskeminen vaatii latitudieron ja longitudieron määrittämistä. Määrittämisen jälkeen pitää huomioida missä päin maapalloa ollaan ja mihin suuntaan kuljetaan. Nämä molemmat asiat vaikuttavat siihen, vähennetäänkö vai lisätäänkö longitudiero ja latitudiero lähtöpaikan koordinaatteihin. Taulukossa Taulukko 5 on esitetty, miten ero pitää huomioida kulkusuunnan ja sijainnin perusteella. [30]

Taulukko 5 Latitudierojen ja longitudierojen laskentasäännöt

Pohjoinen pallonpuolisko					
läntinen pallonpuolisko			itäinen pallonpuolisko		
kulkusuunta	latitudiero	longitudiero	kulkusuunta	latitudiero	longitudiero
0°-90°	lisätään	vähennetään	0°-90°	lisätään	lisätään
90°-180°	vähennetään	vähennetään	90°-180°	vähennetään	lisätään
180°-270°	vähennetään	lisätään	180°-270°	vähennetään	vähennetään
270°-360°	lisätään	lisätään	270°-360°	lisätään	vähennetään
Eteläinen pallonpuolisko					
läntinen pallonpuolisko			itäinen pallonpuolisko		
kulkusuunta	latitudiero	longitudiero	kulkusuunta	latitudiero	longitudiero
0°-90°	vähennetään	vähennetään	0°-90°	vähennetään	lisätään
90°-180°	lisätään	vähennetään	90°-180°	lisätään	lisätään
180°-270°	lisätään	lisätään	180°-270°	lisätään	vähennetään
270°-360°	vähennetään	lisätään	270°-360°	vähennetään	vähennetään

Latitudiero ($\Delta\varphi$) saadaan laskettua kaavalla 5, kun tiedetään matka (m) ja kulman suuruus (K). Laskeminen perustuu kuvassa 12 esitettyyn ensimmäiseen merkintäkolmioon ja tätä kautta suorakulmaisen kolmion matemaattisiin ratkaisukeinoihin. Latitudierosta halutaan tietää vain suuruus, joten käytetään itseisarvoa. [30]

kaava 5:
$$\Delta\varphi = |m * \cos(K)|$$

Longitudiero ($\Delta\lambda$) saadaan laskettua kaavan 9 mukaisesti, kun tiedetään departuuri (dep) ja keskilatitudi (φ_k). Keskilatitudi saadaan laskettua lähtöpaikan latitudin ja latitudieron avulla niin, että ensin lähtöpaikan (φ_l) latitudiin lisätään tai siitä vähennetään latitudiero taulukon Taulukko 5 mukaisesti. Näin saadaan tulopaikan latitudi (φ_t), kuten kaavassa 6 on esitetty. Tämän jälkeen tulopaikan ja lähtöpaikan latitudit lasketaan yhteen ja jaetaan kahdella, josta tuloksena saadaan keskilatitudi, kuten kaavassa 7 on esitetty. Departuuri saadaan laskettua kaavalla 8, kun tiedetään matka ja kulman suuruus. Longitudierostakin halutaan tietää vain suuruus, joten käytetään itseisarvoa. Sen jälkeen kun latitudiero ja longitudiero on saatu laskettua, voidaan muodostaa loppupisteen koordinaatit lisäämällä tai vähentämällä nämä alkupisteen koordinaattien arvosta. Longitudieroa laskiessa pitää huomioida erikseen kohdat, joissa $\cos\varphi_k$ saa arvon nolla. Tämä tapahtuu kulman ollessa 90 tai 270 astetta. Näissä tapauksissa longitudieroa ei ole. [30]

kaava 6:
$$\varphi_t = \varphi_l \pm \Delta\varphi$$

kaava 7:
$$\varphi_k = \frac{\varphi_l + \varphi_t}{2}$$

kaava 8:
$$dep = m \sin(K)$$

kaava 9:
$$\Delta\lambda = \left| dep * \frac{1}{\cos\varphi_k} \right|$$

Keskilatitudimenetelmällä voidaan ratkaista myös kahden tunnetun pisteen välinen etäisyys ja suunta. Toteutetun laitteen on tarkoitus laskea kahden paikantimilta saadun pisteen välinen suunta, joten seuraavaksi esiteltyä laskutapaa käytetään suunnan laskemiseen. Kuten edellä esitetty laskeminen, voidaan tämäkin suorittaa sekä taulukoilla että laskemalla. Tästäkin jätetään käymättä merkintätaulukoilla tapahtuva ratkaiseminen ja perehdytään laskemalla ratkaisemiseen. Laskeminen aloitetaan siitä, että ratkaistaan longitudiero ($\Delta\lambda$) ja latitudiero ($\Delta\varphi$). Longitudiero saadaan laskettua ottamalla alku- (φ_a) ja loppupisteen (φ_l) longitudit ja vertailemalla, kumpi niistä on suurempi. Sen jälkeen suuremmasta vähennetään pienempi ja näin saadaan eron suuruus selville. Longitudieron laskeminen on esitetty kaavassa 10. Latitudiero saadaan vastaavalla tavalla, kun käytetään laskemisessa latituedeja. Latitudieron laskeminen on esitetty kaavassa 11. [30]

kaava 10:
$$\Delta\lambda = \begin{cases} \lambda_a - \lambda_l, & \text{kun } \lambda_l < \lambda_a \\ \lambda_l - \lambda_a, & \text{kun } \lambda_l > \lambda_a \end{cases}$$

kaava 11:
$$\Delta\varphi = \begin{cases} \varphi_a - \varphi_l, & \text{kun } \varphi_l < \varphi_a \\ \varphi_l - \varphi_a, & \text{kun } \varphi_l > \varphi_a \end{cases}$$

Longitudi- ja latitudierojen lisäksi laskemisessa tarvitaan myös keskilatitudia (φ_k), joka saadaan laskemalla alku- ja loppupisteen latitudit yhteen ja jakamalla saatu summa kahdella, kuten on esitetty kaavassa 12. Kulman suuruuden määrittäminen vaatii departuurin (dep) ratkaisemista; tämä saadaan ratkaistua longitudieron ja keskilatitudin avulla kaavan 13 mukaisesti. Kun departuuri on saatu ratkaistua, saadaan laskettua kulman (K) suuruus kaavalla 14. Myös pisteiden välinen matka (m) saadaan ratkaistua laskettujen tietojen avulla kaavasta 15. [30]

kaava 12:
$$\varphi_k = \frac{\varphi_a + \varphi_l}{2}$$

kaava 13:
$$dep = \Delta\lambda * \cos(\varphi_k)$$

kaava 14:
$$\tan K = \frac{dep}{\Delta\varphi} \Rightarrow K = \arctan\left(\frac{dep}{\Delta\varphi}\right)$$

kaava 15:
$$m = \frac{\Delta\varphi}{\cos(K)}$$

Laskuista saadaan kulman suuruudeksi jotain väliltä 0-90 astetta. Tästä saadusta arvosta saadaan määritettyä todellinen suunta. Todellisen suunnan suuruuteen vaikuttaa se, missä päin maapalloa ollaan ja sen lisäksi vielä molempien pisteiden latitudien ja longitudien suuruudet. Taulukossa 6 on listattu, miten suunta saadaan laskettua missäkin maapallon osassa. Laskemalla saatua kulmaa on merkitty taulukossa kirjaimella K, alkupisteen latitudia φ_a , alkupisteen longitudia λ_a , loppupisteen latitudia φ_l ja loppupisteen longitudia λ_l . [30]

Taulukko 6 Sijainnin ja koordinaattien muutoksien vaikutus suuntaan.

Pohjoinen pallonpuolisko					
läntinen pallonpuolisko			itäinen pallonpuolisko		
latitudi	longitudi	suunta	latitudi	longitudi	suunta
$\varphi_l > \varphi_a$	$\lambda_l < \lambda_a$	K	$\varphi_l > \varphi_a$	$\lambda_l > \lambda_a$	K
$\varphi_l < \varphi_a$	$\lambda_l < \lambda_a$	180°-K	$\varphi_l < \varphi_a$	$\lambda_l > \lambda_a$	180°-K
$\varphi_l < \varphi_a$	$\lambda_l > \lambda_a$	180°+K	$\varphi_l < \varphi_a$	$\lambda_l < \lambda_a$	180°+K
$\varphi_l > \varphi_a$	$\lambda_l > \lambda_a$	360°-K	$\varphi_l > \varphi_a$	$\lambda_l < \lambda_a$	360°-K
Eteläinen pallonpuolisko					
läntinen pallonpuolisko			itäinen pallonpuolisko		
latitudi	longitudi	suunta	latitudi	longitudi	suunta
$\varphi_l < \varphi_a$	$\lambda_l < \lambda_a$	K	$\varphi_l < \varphi_a$	$\lambda_l > \lambda_a$	K
$\varphi_l > \varphi_a$	$\lambda_l < \lambda_a$	180°-K	$\varphi_l > \varphi_a$	$\lambda_l > \lambda_a$	180°-K
$\varphi_l > \varphi_a$	$\lambda_l > \lambda_a$	180°+K	$\varphi_l > \varphi_a$	$\lambda_l < \lambda_a$	180°+K
$\varphi_l < \varphi_a$	$\lambda_l > \lambda_a$	360°-K	$\varphi_l < \varphi_a$	$\lambda_l < \lambda_a$	360°-K

Suuntaa ei voida ratkaista kaavalla 14 silloin, kun latitudiero ei ole. Tällöin pitää kulman suuruus määrittää erillisellä tarkastuksella. Kulman suuruus on tällöin joko 90 tai 270 astetta, ja siihen vaikuttaa sijainti maapallolla sekä alku- ja loppupisteiden longitudit. Taulukkoon 7 on listattu longitudien ja sijainnin vaikutus kulman suuruuteen tilanteissa, joissa latitudiero on nolla. [30]

Taulukko 7 Longitudien ja sijainnin vaikutus kulmaan latitudieron ollessa nolla.

Pohjoinen pallonpuolisko			
läntinen pallonpuolisko		itäinen pallonpuolisko	
longitudit	kulma	longitudit	kulma
$\lambda_l < \lambda_a$	90°	$\lambda_l > \lambda_a$	90°
$\lambda_l > \lambda_a$	270°	$\lambda_l < \lambda_a$	270°
Eteläinen pallonpuolisko			
läntinen pallonpuolisko		itäinen pallonpuolisko	
longitudit	kulma	longitudit	kulma
$\lambda_l < \lambda_a$	90°	$\lambda_l > \lambda_a$	90°
$\lambda_l > \lambda_a$	270°	$\lambda_l < \lambda_a$	270°

Käydään esimerkin avulla läpi tilanne, josta löytyy sekä latitudi- että longitudiero. Kuvitellaan tilanne, jossa GPS-vastaanottimet antavat koordinaateiksi arvot 6126.7371N ja 2352.1980E sekä 6127.0405N ja 2350.6268E. Kyseiset koordinaatit ovat sellaisessa muodossa, jossa ensin tulee asteet ja tämän jälkeen minuutit ja minuuttien osat. Koordinaatit on ensin muutettava desimaalimuotoon, koska tätä muotoa käytetään laskennassa. Muuttaminen tapahtuu niin että otetaan ensin asteet erilleen minuuteista ja niiden osista. Näin saadaan taulukon Taulukko 8 mukaiset arvot.

Taulukko 8 asteet ja minuutit eriteltyinä

asteet	minuutit	asteet	minuutit
61	26.7371	61	27.0405
23	52.1980	23	50.6268

Tämän jälkeen desimaalimuotoon päästään, kun minuutit jaetaan 60:llä ja saatu tulos lisätään asteisiin.

$$61 + \frac{26,7371}{60} \approx 61,4456$$

$$23 + \frac{52,1980}{60} \approx 23,8700$$

$$61 + \frac{27,0405}{60} \approx 61,4507$$

$$23 + \frac{50,6268}{60} \approx 23,8438$$

Laskennassa käytettävät koordinaatit ovat desimaalimuodossa 61,4456 ja 23,8700 sekä 61,4507 ja 23,8438. Lasketaan saaduista desimaalimuodoista ensin latitudi- ja longitudiero kaavojen 10 ja 11 mukaisesti sekä kaavan 12 mukaan keskilatitudi.

$$\Delta\varphi = 61,4507 - 61,4456 = 0,0051$$

$$\Delta\lambda = 23,8700 - 23,8438 = 0,0262$$

$$\varphi_k = \frac{61,4456 + 61,4507}{2} \approx 61,4482$$

Edellä ratkaistujen lisäksi kulman laskemiseen tarvitaan departuuri, joka saadaan laskettua longitudieron ja keskilatitudin avulla kaavasta 13. Kulma (K) saadaan ratkaistua departuurin ja latitudieron avulla kaavasta 14.

$$dep = 0,0262 * \cos(61,4482) \approx 0,0125$$

$$K = \arctan\left(\frac{0,0125}{0,0051}\right) \approx 68^\circ$$

Lopullinen suuntakulma saadaan määriteltyä taulukon 5 avulla. Koordinaateista nähdään, että ollaan pohjoisella pallonpuoliskolla (N) sekä itäisellä pallonpuoliskolla (E), tällöin valitaan taulukosta näitä vastaavasta osasta koordinaattien osoittama kulman laskutapa. Koska lähtöpaikan longitudi on suurempi ja latitudi pienempi, tulee lopullisen kulman suuruudeksi 180°-K.

$$suunta = 180^\circ - 68^\circ = 112^\circ$$

Lopullinen suuntakulma on siis suuruudeltaan 112 astetta.

3.5.2 Meridionaalimenetelmä

Keskilatitudimenetelmä käy epätarkaksi, jos matkan pituus on suurempi kuin 600 meripeninkulmaa. Tällöin käytettävä menetelmä on meridionaalimenetelmä. Meridionaalimenetelmässä lasketaan myös merkintäkolmion sivujen pituuksia, mutta käytössä on kuitenkin erilainen kolmio kuin keskilatitudimenetelmässä. Yleisesti meridionaalimenetelmää käytetään, kun halutaan laskea tiettyjen pisteiden välinen etäisyys ja suunta. Meridionaalimenetelmä eroaa keskilatitudimenetelmästä siten, että siinä käytetään latitudieron sijasta meridionaalieroja ja departuurin sijasta longitudieroja. Myös laskukaavat ovat tästä syystä erilaisia, mutta niitä ei kuitenkaan käsitellä tässä työssä sen tarkempaa. Laitteen laskuissa käytetään keskilatitudimenetelmää, koska sen toteuttaminen laitteessa on helpompaa. Laitteen koordinaattien välinen etäisyyskin on huomattavasti alle 600 meripeninkulman, joten keskilatitudimenetelmä ei anna virheellistä tulosta.

[31]

4 MITTALAITTEISTO

Tässä luvussa käsitellään rakennettua mittalaitteistoa, sen suunnittelua ja vastaavaan tarkoitukseen olevia kaupallisia laitteita. Kappaleessa 4.1 kerrotaan kaupallisista laitteista ja niiden toiminnasta. Suunnittelusta kerrotaan kappaleessa 4.2. Kappaleessa 4.3 kerrotaan keskeisistä osavalinnoista sekä osien oleellisista ominaisuuksista. Mittalaitteiston rakennetta ja toteutusta kuvataan kappaleessa 4.4. Kappale 4.5 käsittelee itse laitteen toimintaa.

4.1 Kaupallinen toteutus

Kaupalliset toteutukset, joissa käytetään suunnan määrittämistä, voidaan karkeasti jakaa kahteen erilliseen ryhmään. Toisessa ryhmässä on laitteet, joiden pääasiallinen tehtävä on ilmoittaa suunta. Tällaisia laitteita ovat satelliittikompassit, joita on usein käytössä esimerkiksi veneissä. Satelliittikompassit toimivat pääperiaatteeltaan siten, että niissä on kaksi tai useampi antenni. Näiden laitteiden toiminta perustuu siihen, että niissä on kaksi antennia, joiden välimatka tiedetään. Antennien kautta kulkevan suoran suunta saadaan määritettyä signaalien kantoaallossa ilmenevien taajuuserojen avulla. Toisena ryhmänä voidaan pitää laitteita, jotka käyttävät suunnan määrittämiseen edellistä paikkatietoa ja laskevat suunnan näiden avulla. Tällaista tapaa käytetään yleisesti esimerkiksi navigaattoreissa, joissa on vain yksi antenni ja yksi vastaanotin. Tässä työssä on tarkoitus tutkia, pystytäänkö toteuttamaan laite, jonka toiminta olisi suunnan määrittämisen osalta vastaavaa kuin veneilyyn tarkoitetuissa satelliittikompassissa. Kuitenkin erona on se, että kahden antennin sijaan käytössä on kaksi erillistä vastaanotinta.

4.2 Suunnittelu

Mittalaitteen suunnittelu alkoi siitä, että määriteltiin, millainen laite halutaan ja mitä sillä pitää pystyä mittaamaan. Laitteen tarkoitus oli kyetä tarkastelemaan, pystyykö kahdella erillisellä vastaanottimella määrittämään suuntaa luotettavasti. Laitteen suunnittelu alkoi siitä, että laitteeseen tulisi kaksi vastaanotinta ja mikrokontrolleri, joka käsittelee vastaanottimilta saatua dataa. Tämän jälkeen päätettiin laitteen toimivan yhdessä tietokoneen kanssa, joten liitäntä tietokoneeseen tuli olla mukana laitteessa. Haluttiin jättää vielä avoimeksi se, tapahtuisiko laskenta itse laitteessa vai tietokoneella. Näillä määrittelyillä saatiin hahmoteltua jo laitteen perusosat. Mikrokontrollerin haluttiin sisältävän tarpeeksi liityntöjä sekä laskentatehoa, tästä asiasta tarkemmin luvussa 4.3.1. Vastaanottimien haluttiin pysyvän ajan tasalla myös silloin, jos laitteesta

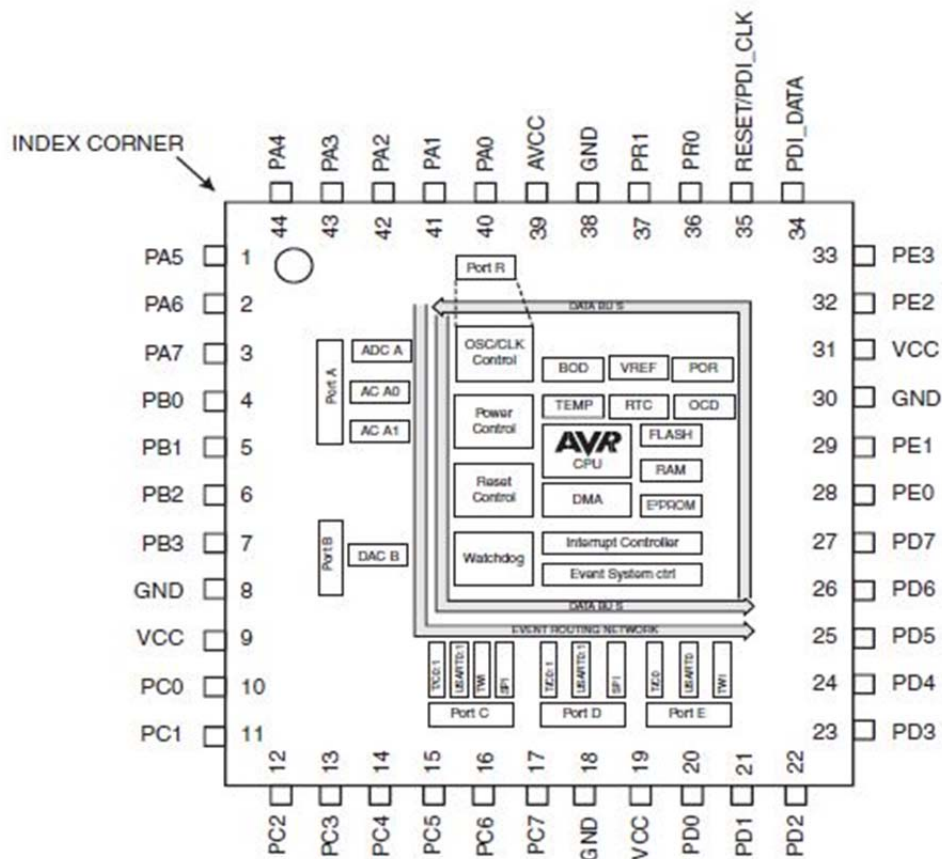
katkeaisi virta, ja tätä varten oli suunniteltava ylläpitojännite vastaanottimia varten. Ylläpitojännitettä varten laitteeseen suunniteltiin pieni akku ja akun käyttöön tarvittava elektroniikka. Laitteen käyttöjännitteen lähdettä suunniteltaessa päädyttiin siihen, että jännite otetaan tietokone-liitännän kautta, koska liitäntä joka tapauksessa tulee olemaan osana käyttöä. Akkua ei siis käytetä itse laitteen jännitelähteenä vaan ainoastaan vastaanottimien tietojen ylläpitoon. Liitännäksi tietokoneen välille valittiin USB-väylä, josta saatiin myös käyttöjännite. USB-väylän antama virta riittää laitteelle hyvin. USB-väylän toteutuksesta kerrotaan enemmän luvussa 4.3.3. Näiden lisäksi laitteeseen suunniteltiin varalta myös muutamia muita liityntöjä, jos laitteen jatkokehittely vaatisi jotain muita ominaisuuksia. Laitteen suunnitteluvaiheessa lisättiin piirilevyille liitännämahdollisuus myös kolmannelle anturille. Kolmantena anturina suunnitteluvaiheessa mietittiin esimerkiksi gyroskooppiä tai digitaalista kompassia, joiden avulla voitaisiin tukea kahden vastaanottimen laskentaa. Piirilevyille lisättiin myös paikka radiolähttimelle, jos tulisi tarve käyttää toista tapaa kommunikoida tietokoneen kanssa.

4.3 Osavallinnat

Tässä osiossa on kerrottu keskeisimmistä työssä käytetyistä osista ja niiden oleellisista ominaisuuksista. Osan valintaan vaikuttavista syistä kerrotaan myös, jos niihin on ollut jokin erityinen syy. Monen osan kohdalla valintaan vaikutti se, että osat olivat heti saatavilla sekä yhteensopivia laitteen toteutuksen kanssa. Myös aiempi kokemus osien käytöstä painoi valinnassa.

4.3.1 Mikrokontrolleri

Mikrokontrolleriksi työlle valikoitui ATxMega32A4, jonka lohkoakaavio ja pinnijärjestys on esitetty kuvassa 13. Osittain tähän vaikutti aikaisempi kokemus ATMega-sarjan kontrollereista. Kuitenkaan kyseisen sarjan kontrollereissa ei ollut työssä tarvittavaa määrää USART-väyliä. Valitusta kontrollerista löytyy myös riittävästi laskentatehoa tarvittaviin laskutoimituksiin.



Kuva 13 Mikroprosessorin lohkokaavio ja pinnijärjestys [32]

ATxMega32A4 kontrollerilta löytyy viisi USART-väylää sekä kaksi SPI-väylää ja kaksi TWI-väylää. Nämä riittävät tämän työn toteuttamiseen hyvin, sillä minimissään laitteen toteuttamiseen vaaditaan kolme USART-väylää: yksi molemmille GPS-vastaanottimille ja yksi tietokoneen dataväylää varten. Tämän lisäksi halutaan vielä yksi TWI-väylä mahdolliselle lisälaitteelle ja yksi USART-väylä radiopiiriä varten. Kontrollerissa on 36 sisäänmenoksi tai ulostuloksi ohjelmoitavaa pinniä, joista osaa käytetään väylissä. Pinneihin kytketään myös nappi sekä kaksi lediä, joiden avulla voidaan testata laitteen toimintaa. Nappia voidaan myös käyttää lopullisessa toteutuksessa esimerkiksi laitteen tietokoneelle lähettämien tietojen laajuuden säätämiseen. [32]

Mikrokontrollerille syötettävän käyttöjännitteen tulee olla 1,6 ja 3,6 voltin väliltä. Käyttöjännitteen suuruudella on myös vaikutusta mikrokontrollerin taajuuteen. Mikrokontrolleria ei voida ajaa yli 12 MHz taajuudella, jos käyttöjännite on alle 2,7 voltia. Tässä työssä mikrokontrollerin ja oheislaitteiden käyttöjännitteeksi valittiin 3,3 voltia. Tämä jännite toimii kaikilla komponenteilla hyvin, ja se saadaan helposti reguloitua viiden voltin sisääntulojännitteestä. Valitulla taajuudella mikrokontrollerin taajuus voidaan nostaa 32 MHz. [32]

4.3.2 GPS-vastaanotin

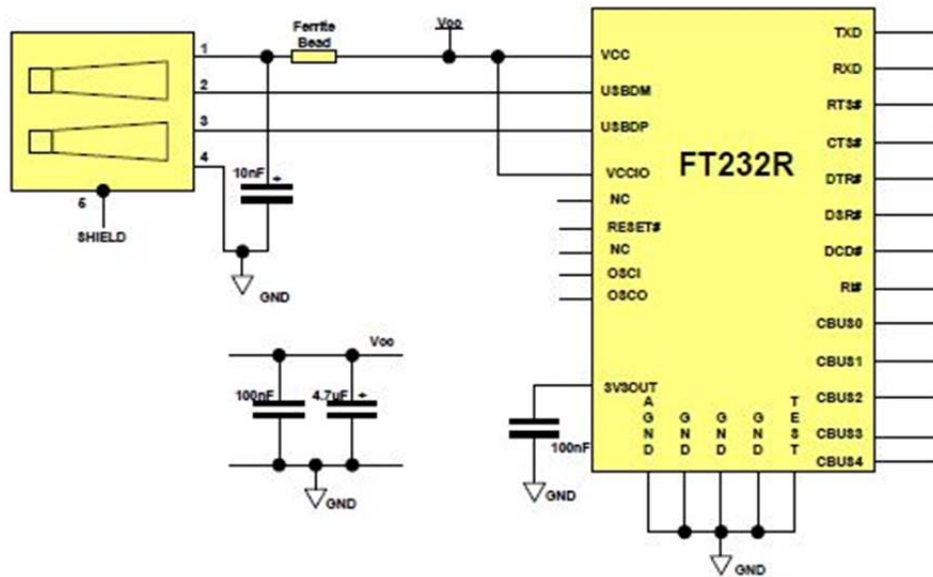
GPS-vastaanotinpiiriksi valittiin Fastrax UP501 GPS Receiver. Valintaan vaikutti lähinnä helppo saatavuus. Fastrax välittää ja vastaanottaa dataa NMEA0183 standardin mukaisilla lausekkeilla. USART-väylän tiedonsiirtonopeus voidaan valita seuraavista vaihtoehtoista: 4800, 9600, 14400, 19200, 38400, 57600 tai 115200 baudia. Perusasetuksena on NMEA protokollan mukaan 9600 baudia. Piiristä on myös valittavissa kolme eri taajuutta, joilla piiri antaa navigointitietoja. Nämä taajuudet ovat kymmenen hertsiä, viisi hertsiä ja yksi hertsi, joista viimeinen on perusasetuksena piirillä. Kun halutaan käyttää SBAS-toimintoa, voidaan piiriä ajaa vain yhden hertsin toimintataajuudella. Käytettäessä viittä tai kymmentä hertsiä, pitää USART-väylän nopeutta nostaa viiden hertsin toimintataajuudella 38400 baudiin ja kymmenen hertsin toimintataajuudella 115200 baudiin. Piiristä voidaan myös valita, mitä NMEA-lausekkeita se antaa ulos. [24]

Vastaanotin toimii kolmessa erilaisessa tilassa. Käynnistyessään vastaanotin siirtyy ”Tracking/Navigating”-tilaan. Tässä tilassa vastaanotin hakee kaikki vaihtoehtoiset satelliitit ja kerää näiden almanakkatiedot talteen. Tietojen keräämiseen piirin käynnistämiseen menee n. 12 minuuttia ja tämän jälkeen vastaanotin siirtyy ”Low Power Tracking/Navigating”-tilaan. Tässä tilassa vastaanotin ei enää kerää almanakkatietoja vaan jatkaa pelkän paikkatiedon antamista ja virrankulutus pienenee. Kolmantena tilana piirillä on ”Backup”-tila, jossa piiri ylläpitää aikaa sekä tallettaa satelliittien lentoratatiedot. Tähän tilaan siirrytään silloin, kun käyttöjännite katkeaa, mutta varmistussähkö on vielä käytössä. Tämä tila mahdollistaa sen, että piiri saadaan nopeammin takaisin käyttöön, kun piirin ei tarvitse erikseen hakea aikaa eikä satelliittien ratoja.

4.3.3 Tietokoneiliitäntä

Mikrokontrollerin ja tietokoneen välistä liikennettä hoitamaan valittiin FTDI:n valmistama FT232R USB UART IC. Suurimpana valintaan vaikuttavana tekijänä oli kokemus kyseisen piirin käytöstä. Kyseisellä piirillä on myös hyvä ajurituki niin windows, linux kuin mac-tietokoneillekin. Piiri voidaan kytkeä laitteeseen usealla eri tavalla sen mukaan, minkälaisia ominaisuuksia piiristä halutaan käyttää. Tässä työssä haluttiin käyttöjännite ottaa USB-kytkennän kautta, joten päädyttiin käyttämään kuvan 14 osoittamaa kytkentätapaa. Kuvassa 14 esitettyssä kytkennässä V_{DD} vastaa laitteessa käytettyä viiden voltin jännitettä. Kyseinen viiden voltin jännite syötetään akunlatauspiirille, reguloitavaksi mikrokontrollerin käyttöjännitteeksi sekä vastaanottimille reguloitavaksi.

6.1 USB Bus Powered Configuration



Kuva 14 FT232R piirin kytkentämalli, kun halutaan virta USB-väylästä [33]

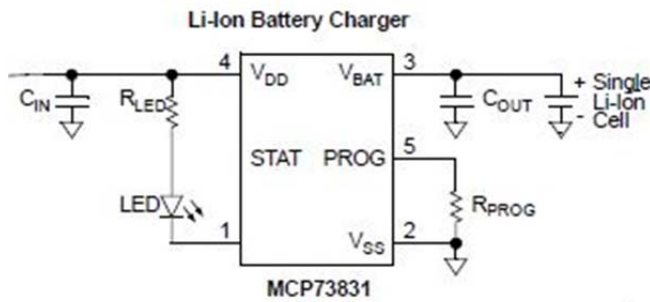
FT232R-piirin tarkoitus on muuttaa mikrokontrollerilla käytössä olevasta UART-väylästä tuleva data USB-väylään sopivaan muotoon. Kontrollerista tuleva data siis kierrätetään kyseisen piirin kautta ennen kuin se välitetään tietokoneelle. Piiri hoitaa kommunikaation laitteesta 115 200 baudin sekuntinopeudella. Muista datan ominaisuuksista on mainittu enemmän laitteiston valmistelua mittauksia varten käsittelevässä luvussa 5.1.1.

4.3.4 Akun latauspiiri

Akun latauspiiriksi valikoitui Microchipin valmistama MCP73831. Suurena vaikuttavana tekijänä osavalmiinnalle oli helppo saatavuus sekä valmiina olevat toimivat mallikytkennät. Piiri on tarkoitettu litium-ioni-akuille sekä litium-polymeeriakuille. Työssä käytetty akku oli litium-polymeeri akku. Akun lataamiseen käytettävään maksimivirran suuruuteen voidaan vaikuttaa komponenttivalinnoilla. Virta voi olla 15 milliampeerista aina 500 milliampeeriin asti. Virran suuruus määritetään vastuksen arvoa muuttamalla ja saadaan laskettua kaavasta 16. Kaavasta 16 saadaan myös muodostettua kaava 17, jolla voidaan laskea vastuksen arvon sallittu vaihteluväli. Vastuksen tulee siis olla kahden kilo-ohmin ja 66 kilo-ohmin väliltä. Kuvassa 15 on esitetty työssä käytettävä kytkentämalli akunlatauspiirille.

kaava 16:
$$I_{REG} = \frac{1000V}{R_{PROG}}$$

kaava 17:
$$I_{REG} = \frac{1000V}{R_{PROG}} \rightarrow R_{PROG} = \frac{1000V}{I_{REG}}$$



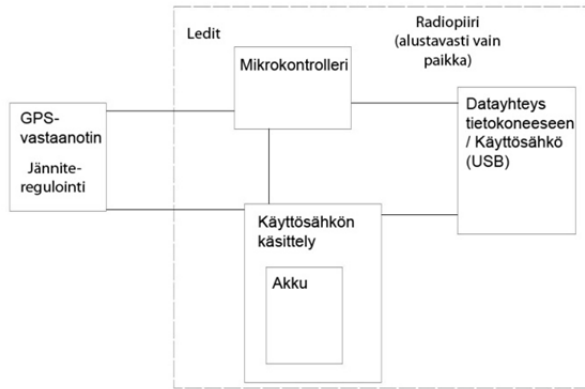
Kuva 15 Akkulaturipiirin kytkentä [34]

4.3.5 LEDit

Laitteeseen haluttiin laittaa myös neljä lediä, joilla laitteen toimintaa pystyttäisiin havainnollistamaan. Yhden ledin tarkoitus on palaa silloin, kun laitteeseen on kytkettynä käyttöjännite. Yhtä lediä käytetään akun latauksen ilmoittamisessa ja sitä ohjaa akun latauspiiri. Kahta muuta lediä käytetään merkinantoon ja niitä ohjataan mikrokontrollerilla. Näitä kahta lediä on lähinnä ajateltu hyödynnettävän laitteen ohjelmointivaiheessa virheiden tarkasteluun ja testikäyttöön.

4.4 Rakenne

Mittalaitteisto koostuu kahdesta erillisestä GPS-vastaanotinyksiköstä ja emolaitteesta. Laitteen rakennetta tarkemmin kuvaava lohkokaavio on esitetty kuvassa 16. GPS-vastaanottoyksikkö on rakennettu mahdollisimman vähillä komponenteilla, jotta siitä saataisiin kohtalaisen pienikokoinen. Kuitenkin sinne haluttiin oma jännitteenkäsittely, jotta saataisiin vastaanottimelle mahdollisimman häiriötön jännite. Vastaanotinyksikölle syötetään johtoa pitkin emolaitteesta viiden voltin jännite, maataso, ylläpitojännite akulta sekä tuleva ja lähtevä dataväylä. Vastaanottimelle syötettävä viiden voltin jännite säädetään 3,3 volttiin jänniteregulaattorilla. Vastaanottimen käyttöjännite tässä toteutuksessa on 3,3 volttia. Ylläpitojännitteen häiriönsieto on parempi ja se tuodaan johtoa pitkin emolaitteesta. Tämä mahdollistaa sen, ettei vastaanotinlaitteen sisään tarvittu akkua ja latauspiiriä. Tällä toteutuksella voidaan käyttää vain yhtä akkua ja latauspiiriä kahden sijaan. Sekä GPS-moduulien että emolaitteen piirikaaviot löytyvät liitteinä työn lopusta.



Kuva 16 Mittalaitteiston lohkokkaavio

Emolaitteesta löytyy mikrokontrolleri, joka käsittelee GPS-vastaanotinyksiköiltä saatua dataa ja välittää sen eteenpäin sarjaliikenteenä micro-USB-liittimen kautta tietokoneelle. Tämän lisäksi emolaitteessa on akku ja sitä varten oleva latauspiiri. Akkua käytetään ainoastaan varmennusjännitteen syöttämiseen vastaanotinyksiköille. Itse laite ei siis toimi akulla vaan vaatii käyttöjännitteen erikseen. Emolaite saa käyttöjännitteensä USB-liittimen kautta. Kyseinen viiden voltin jännite ohjataan suoraan vastaanotinyksiköiden liittimille, akkulaturi-piirille sekä piirille, joka hoitaa liikennettä mikrokontrollerin ja tietokoneen välillä. Muualla emolaitteessa on käytössä 3,3 voltin jännite, joka luodaan jänniteregulaattorilla.

Emolaitteeseen on myös varattu paikka kolmannelle laitteelle. Tämän liittimen lähettyville on tuotu sekä viiden voltin että 3,3 voltin jännitteet, maataso ja yhteys pinneihin 10 ja 11. Nämä pinnit ovat TWI-väylän SDA- ja SCL-pinnit. Tarvittaessa ylimääräinen liitin tullaan toteuttamaan liittimellä, jossa on neljä pinniä. Tällöin kyseiseen liittimeen kytketään maataso, molemmat TWI-väylän pinnit sekä joko viiden voltin tai 3,3 voltin käyttöjännite, riippuen siitä, mikä laite on tarkoitus lisätä emolaitteeseen. Laitteeseen on varmuuden vuoksi tehty myös paikka radiopiirille, jota voidaan hyödyntää tarvittaessa.

Taulukkoon 9 on kirjattu GPS-vastaanotinyksiköiden ja emolaitteen väliset kytkennät. Taulukosta on helppo katsoa mihin pinniin on mikäkin osa laitteesta kytketty ja samalla on helppo tarkistaa, mitkä ovat oikeasti kytkettynä toisiinsa. Käytetyssä kaapelissa ollut ylimääräinen kuudes johto liitettiin yhteen maajohdon kanssa.

Taulukko 9 GPS-vastaanotinyksikön ja emolaitteen väliset kytkennät

Pinni	GPS-vastaanotin	Johto	Liitin 1		Liitin 2	
			Toiminta	CPU	Toiminta	CPU
1	Reguloitava jännite	punainen	5 Volttia		5 Volttia	
2	RX	valkoinen	TXD0 USARTC0	13 - PC3	TXD1 USARTD1	27 - PD7
3	TX	musta	RXD0 USARTC0	12 - PC2	RXD1 USARTD1	26 - PD6
4	GND	keltainen ja vihreä	GND		GND	
5	VDD_B	sininen	Jännite akulta		Jännite akulta	

4.5 Mittalaitteen toiminta

Mittalaite toimii siten, että se käsittelee vastaanottimilta saatuja NMEA-lausekkeita ja poimii niistä vastaanottimien koordinaatit ja muita tietoja. Koordinaattien lisäksi tallennetaan laskentaan käytettyjen satelliittien määrä ja näiden tunnistenumerot, fixvalid-indikaattori, HDOP-, VDOP-, PDOP-arvot, näkyvien satelliittien määrä sekä laskennassa käytetty tila (fixmode). Fixvalid-indikaattori on numero välillä 1-8, arvon merkitys on selvennetty taulukossa 10. HDOP, PDOP ja VDOP arvot ovat DOP arvoja, jotka kuvaavat satelliittigeometriaa. HDOP tarkoittaa horisontaalista DOP lukua ja VDOP vertikaalista DOP lukua. PDOP tarkoittaa paikkaan liittyvää DOP lukua ja on HDOP ja VDOP arvojen yhdistelmä. Mitä pienempiä DOP arvot ovat, sen paremmin satelliitteja on käytettävissä ja sen parempi tarkkuus vastaanottimilla. Fixmode-indikaattori kertoo siitä, miten koordinaattien arvoja on tarkennettu. Se voi saada kolme eri arvoa: 1 = korjausta ei saatavilla, 2 = 2D ja 3 = 3D.

Taulukko 10 fixvalid-indikaattorin numeroiden merkitykset.

Fix valid indicator
1 = GPS fix (SPS)
2 = DGPS fix
3 = PPS fix
4 = Real Time Kinematic
5 = Float RTK
6 = estimated (dead reckoning) (2.3 feature)
7 = Manual input mode
8 = Simulation mode

Mittalaitteen saatua kaikki yhteen sykliin liittyvät NMEA-lausekkeet ja kerättyä näistä tallennettavat tiedot, siirtyy mittalaite laskentatilaan. Vastaanottimet antavat uutta tietoa aina sekunnin välein. Laskentatilassa mittalaite laskee vastaanottimilta saatujen

koordinaattien perusteella suunnan vastaanottimelta yksi vastaanottimelle kaksi. Laskemisen jälkeen suunta välitetään tietokoneelle. Laitteelta on valittavissa, kuinka kattavasti laite lähettää tietoa tietokoneelle. Lähetettävien tietojen vaihtoehdot on käsitelty luvussa 4.5.2.

4.5.1 Laskenta

Ohjelmakoodissa 1 on esitetty suunnan laskemiseen käytetyn funktion koodia. Osa koodista on korvattu siten, että sulkuihin on kirjoitettu, mitä siinä kohtaa oikeassa koodissa tapahtuu. Tämä on tehty siitä syystä, että osissa on koodia suhteessa toiminnallisuuteen aika paljon. Tällä hetkellä koodi on suunniteltu siten, että se toimii oikein vain pohjoisen pallonpuoliskon itäisellä osalla. Ohjelmaan on kirjoitettu myös mahdollisuus tulostaa laskennassa käytettyjä arvoja laskennan oikeellisuuden tarkastamiseksi. Tietojen tulostukset tapahtuvat siinä tapauksessa, että funktiolle parametrina annettava prints-muuttuja on suurempi kuin kolme.

Ohjelmakoodissa 1 tapahtuva laskenta perustuu keskilatitudimenetelmään. Aluksi tarkastellaan koordinaattien avulla, mihin suuntaan liike on ja valitaan apumuuttujien arvot niin, että laskennasta saatu tulos on välillä 0-90. Tämän jälkeen funktio muuttaa koordinaatit vastaanottimilta saadusta muodosta laskennassa käytettyyn muotoon. Koordinaatit tulevat vastaanottimilta muodossa, jossa asteet ovat kokonaislukuna ja minuutit tulevat neljän desimaalin tarkkuudella (DDMM.MMMM). Laskennassa käytetään desimaalimuotoa, jossa asteiden yli menevä osa ilmoitetaan desimaaleina. Tähän muotoon päästään, kun vastaanottimilta saadut minuutit jaetaan 60:llä ja lisätään asteisiin. Kulman laskemiseen tarvitaan departuurin ja latitudieron arvot. Departuurin laskemiseen tarvitaan keskilatudia ja longitudieroa. Ohjelma laskee longitudieron, latitudieron ja keskilatitudin. Näiden laskemisen jälkeen saadaan laskettua departuuri, jonka jälkeen lasketaan kulman suuruus (0-90). Kulman suuruus saadaan laskusta desimaalilukuna ja se halutaan pyöristää kokonaisluvuksi. Luvun pyöristäminen on toteutettu niin, että desimaalilukuun lisätään puolikas, ja tämän jälkeen luku sijoitetaan kokonaislukumuuttujaan. Sijoittaminen kokonaislukumuuttujaan aiheuttaa sen, että luvusta putoaa desimaaliosa pois. Tästä syystä lukuun sijoitetaan ensin puolikas, jotta luku pyöristyy ylöspäin desimaaliosan ollessa 0.5 tai suurempi ja alaspäin desimaaliosan ollessa pienempi kuin 0.5. Tämän jälkeen suoritetaan vielä laskutoimenpiteitä aikaisempien tarkastelujen perusteella, jotta kulman suuruus saadaan määritettyä välille 0-360 astetta. Lopuksi kulman suuruus lähetetään tietokoneelle.

```

void bearing(uint8_t prints)
{
    //Alustetaan laskennassa tarvittavat apumuuttujat

    (Tässä kohtaa muuttujien alustuksia)

    //Kutsutaan funktiota joka tarkastelee vastaanottimien
    //latituedeja ja longituedeja keskenään.
    checkdirection();

    (Tässä kohtaa muutetaan koordinaatit lukumuotoon)
    (Tässä kohtaa on tietojen tulostamista, jos parametrit valittu
    siten)
    // Jos latitudi ei muutu siitä seuraisi nolalla jakaminen,
    ohietaan sellaisessa tilanteessa laskenta

    (Tarkastelu ja päätelmät kulman suuruudesta 90 tai 270 ja paluu
    funktiosta pois)

    //Muutetaan koordinaatit desimaalimuotoon
    longitudea = (longitudea / 60) + Coordarray[GPS1].longdeg;
    latitudea = (latitudea / 60) + Coordarray[GPS1].latideg;
    longitudeb = (longitudeb / 60) + Coordarray[GPS2].longdeg;
    latitudeb = (latitudeb / 60) + Coordarray[GPS2].latideg;

    (Tietojen tulostusta)

    (Apumuuttujien alustuksia)

    (Tarkastellaan suunnan mukaan muuttujia ja laitetaan laskentaa
    varten oikeisiin paikkoihin)

    // Lasketaan longitudi ero
    longituediff = usedlongitudeb - usedlongitudea;
    // Lasketaan latitudi ero
    latituediff = usedlatitudeb - usedlatitudea;
    // Lasketaan keskilatitudi
    medianlatitude = ( usedlatitudea + usedlatitudeb ) / 2 ;
    // Lasketaan departuuri
    departure = longituediff * cos(medianlatitude/180 * PI);
    // Lasketaan kulman suuruus (arvo väliltä 0-90)
    anglea = atan2(departure, latituediff) * 180 / PI;

    (Tietojen tulostusta)

    (Lasketaan kulman todellinen arvo)

    angleb = anglea + 0.5;
    reale = angleb;
    // Kulman arvon tulostus
    Send_Int(realangle);
    uSendPacketD0(CR); ///

```

Ohjelmakoodi 1 Suunnan laskemiseen käytetty funktio.

4.5.2 Laitteen tulostevaihtoehdot

Laitteesta saatavat tiedot ovat valittavissa viidessä erilaisessa muodossa riippuen siitä, mitä tietoja halutaan tarkastella. Oletuksena laite tulostaa vain pelkän laskennassa saadun kulman asteina. Tulostusta saadaan säädettyä painamalla laitteessa olevaa nappia. Nappia painamalla laite siirtyy tulostustilasta seuraavaan ja viimeisen tilan jälkeen taas ensimmäiseen. Toisessa tulostusvalinnassa kulman suuruuden lisäksi

tulostetaan molemmilta vastaanottimilta saadut koordinaatit taulukoituna, kuten alla olevassa mallitulosteessa on esitetty.

Latitude:	N/S	Longitude:	E/W
6126, 8034	N	2350, 6036	E
6126, 8030	N	2350, 6344	E

91

Tämän jälkeen saadaan lisättyä tulostettavaa dataa taas nappia painamalla. Kolmannessa tulostusvalinnassa tulostetaan lisäksi myös HDOP, PDOP ja VDOP arvot ja näiden lisäksi myös fixmode-indikaattori, fixvalid-indikaattori sekä koordinaattien laskemiseen käytettyjen satelliittien määrä. Alla olevassa mallitulosteessa on nähtävissä, miten tiedot tulostuvat.

Latitude:	N/S	Longitude:	E/W	H	P	V	f _m	f _v	sat
6126, 8034	N	2350, 6037	E	2.35	2.53	0.94	3	1	5
6126, 8030	N	2350, 6347	E	0.91	1.24	0.85	3	1	8

91

Edellä esitettyjen lisäksi voidaan vielä tulostaa satelliittien yksilölliset tunnuksset, jolloin voidaan verrata vastaanottimien käyttämiä satelliitteja keskenään. Satelliittien tunnuksset tulostuvat alla esitetyn mallitulosteen mukaisesti.

Latitude:	N/S	Longitude:	E/W	H	P	V	f _m	f _v	sat
6126, 8034	N	2350, 6035	E	2.35	2.53	0.94	3	1	5
6126, 8030	N	2350, 6347	E	0.91	1.24	0.85	3	1	8

Satelliites:
 5: 1, 32, 3, 23, 9
 8: 25, 31, 1, 3, 6, 32, 9, 20

91

Tämän lisäksi voidaan vielä tulostaa itse kulman laskemiseen käytetyt koordinaatit sekä oleellisimmat välivaiheet. Ensin laskentavaiheesta tulostuvat koordinaatit, joita laskemiseen käytetään. Tästä voidaan varmistaa, että laskenta tapahtuu varmasti oikeilla koordinaattien arvoilla. Seuraavaksi tulostuvat ensimmäisen vastaanottimen longitudin ja latitudin koordinaatit desimaalimuodossa (longitude1 ja latitude1). Tämän jälkeen tulostuu vastaavasti toisen vastaanottimen desimaalimuodot (longitude 2 ja latitude2). Näiden jälkeen tulostuvat longitudiero (longitudediff), latitudiero (latitudediff) ja keskilatitudi (medianlatitude). Sitten tulevat laskujen tulokset: departuuri (departure), laskennassa saatu kulma, joka on väliltä 0-90 (calculated angle) sekä oikea suuntakulma (real angle), jossa on otettu huomioon todellinen suunta.

Latitude:	N/S	Longitude:	E/W	H	P	V	f _m	f _v	sat
6126, 8034	N	2350, 6030	E	2.35	2.53	0.94	3	1	5
6126, 8030	N	2350, 6345	E	0.91	1.24	0.85	3	1	8

Satellites:

5: 1, 32, 3, 23, 9

8: 25, 31, 1, 3, 6, 32, 9, 20

bearing data:

6126, 8034N | 2350, 6030E | 6126, 8030N | 2350, 6345E

Longitude1: 23, 843385

Latitude1: 61, 446723

Longitude2: 23, 843910

Latitude2: 61, 446720

Longitude diff: 0, 000524

Latitude diff: 0, 000003

median latitude: 61, 446723

departure: 0, 000250

calculated angle: 89, 1282

real angle: 91

5 MITTAUKSIEN SUORITUS JA TULOKSET

Tässä luvussa käsitellään mittaussuunnitelmaa, toteutuneita mittauksia ja laitteen käyttämistä mittaustilanteessa. Luvussa 5.1 on alussa mietittyjä mittaustapauksia sekä tietoa laitteen valmistelusta mittaustapahtumaan. Toisessa aliluvussa käydään läpi toteutuneet mittaukset ja näistä koostettua dataa. Toteutuneet mittaukset olivat laajemmat kuin alun perin oli suunniteltu, koska mittausten aikana heräsi mielenkiintoa erilaisiin mittaustapauksiin.

5.1 Mittaussuunnitelma

Mittauksissa on tarkoituksena tutkia, onko mahdollista laskea suunta kahdelta GPS-vastaanottimelta saatujen tietojen avulla. Mittaukset suoritetaan varta vasten rakennetulla laitteella, johon kuuluu itse emolaite sekä kaksi johdoilla liitettävää GPS-vastaanotinta. Laitteen lisäksi tarvitaan tietokone, jolle emolaite lähettää tietoa. Emolaite liitetään tietokoneeseen USB-väylää käyttäen. Tämän lisäksi tarvitaan mittanauha tai jokin vastaava, jolla saadaan määritettyä vastaanottimien välimatka sekä asteikko, jolla saadaan määritettyä vastaanottimien suuntakulman muutos.

5.1.1 Laitteiston valmistelut

Vastaanottimia varten on kaksi eripituista johtoa, yhden metrin ja 19 metrin pituiset. Lyhyemmällä johdolla kytketään toinen vastaanottimista liittimeen numero yksi ja pidemmällä johdolla vastaanotin liittimeen numero kaksi. Tämän jälkeen laite voidaan kytkeä tietokoneeseen kiinni, jolloin laite alkaa toimia. Yhteydenpito laitteeseen tapahtuu USB-väylää käyttäen ja siihen voidaan käyttää esimerkiksi terminal[35] sovellusta. Laite kommunikoi USB-väylällä käyttäen seuraavia parametrejä: nopeus 115200 b/s, databittejä kahdeksan, ei parillisuutta, yksi pysäytysbitti eikä kättelyä. Nämä asetukset pitää laittaa terminal-ohjelmaan, jos niitä ei siellä jo valmiiksi ole. Nämä asiat on havainnollistettu kuvassa 17 ympyröimällä oikeat kohdat. Asetusten lisäksi kuvasta on myös ympyröity yhdistämiseen tarvittava Connect-nappula sekä tietojen tallentamiseen tiedostoon tarkoitettu StartLog-nappula. Esimerkkitapauksessa laite yhdistyy virtuaaliseen sarjaporttiin com2. Kun asetukset on laitettu kohdalleen ja laite kytketty tietokoneeseen, painetaan Connect-nappulaa. Yämän jälkeen tietokoneen näytölle alkaa tulostua mittaustuloksia, jos vastaanottimilta on saatu kunnollista signaalia. Näytölle ei välttämättä heti alkuun ilmesty mitään, koska vastaanottimilta saatu data ole vielä oikeanlaista. Sen vastaanottimen, joka on kytketty liitääntään yksi, on tarkoitus mittausten aikana pysyä paikallaan, ja liitääntään kaksi kytkettyä vastaanotinta

5.2 Toteutuneet mittaukset

Mittaukset suoritettiin niin, että toinen mittapiste (vastaanotin yksi) sijoitettiin kiinteästi tiettyyn pisteeseen. Tämän jälkeen merkittiin osa ympyrän kehästä viiden, kymmenen, viidentoista ja kahdenkymmenen metrin etäisyyksille vastaanottimesta. Merkityille kehille mitattiin mittapisteistä taulukon 12 osoittamat määrät niin, että mittapisteiden välinen kulma oli viisi astetta. Pisteet merkittiin siten, että niiden välinen jänne mitattiin. Nämä pisteiden väliset etäisyydet ovat kirjattu taulukkoon 13.

Taulukko 12 Mittauksissa käytettyjen mittapisteiden määrä ja alku- ja loppupisteen välinen kulmanmuutos

etäisyys	mittapisteiden määrä	kulmanmuutos A-L
20 m	5	20
15 m	7	30
10 m	13	60
5 m	36	175

Taulukko 13 Mittapisteiden välisten jänneiden pituudet viiden asteen muutoksella.

etäisyys	jänneen pituus
20 m	1,74 m
15 m	1,31 m
10 m	0,87 m
5 m	0,44 m

Itse mittaukset suoritettiin tässä vaiheessa kolmella eri tavalla ja näistä kerättiin tietoa. Mittauksista otettiin talteen molempien vastaanottimien koordinaatit ja laitteen laskema kulma. Näiden lisäksi seurattiin myös HDOP, VDOP, PDOP-arvoja sekä näkyvien satelliittien määrää. Ensimmäisessä mittaustavassa toista vastaanotinta siirrettiin järjestyksessä mittapisteestä toiseen aina viiden asteen välein ja annettiin hetken aikaa olla aina jokaisessa mittapisteessä. Tätä mittaustapaa käytettiin jokaiselle etäisyydelle. Toisessa mittaustavassa toista vastaanotinta kuljetettiin lopun ja alun väliä kaksi kertaa eli lopusta alkuun ja takaisin loppuun ja sitten vielä sama toisen kerran putkeen. Tässä tapauksessa vastaanotinta pidettiin hetki aina loppu- alkupisteissä, paitsi 20 metrin etäisyydellä. Kyseinen mittaus suoritettiin viiden, kymmenen ja kahdenkymmenen metrin etäisyyksille. Kolmannessa mittaustavassa toista vastaanotinta kuljetettiin alkupisteestä valittuihin mittauspisteisiin siten, ettei siirtymä olisi vain viittä astetta kerrallaan. Valitut mittapisteet mitattiin erikseen siten, että vastaanotin palautettiin alkupisteeseen ennen mittausta. Taulukosta 14 näkyy tässä mittauksessa käytetyt mittapisteet ja niiden kulmapoikkeama alkupisteeseen nähden.

Taulukko 14 Valitut mittapistet ja niiden kulma alkuperäiseen (1.) nähden

20m		15 m		10 m		5m	
5.	20°	3.	10°	7.	30°	21.	100°
3.	10°	5.	20°	3.	10°	14.	65°
4.	15°	4.	15°	10.	45°	5.	20°
		6.	25°	5.	20°	17.	80°
						11.	50°

Näiden kolmen edellä mainitun mittauksen lisäksi käytiin jälkeinpäin tekemässä vielä neljäs mittaus. Tässä mittauksessa toinen vastaanotin asetettiin paikoilleen ja siitä mitattiin samaan suuntaan paikat viiden, kymmenen ja kahdenkymmenen metrin etäisyyksille. Toinen vastaanotin laitettiin ensin 20 metrin etäisyydelle ja kerättiin mittaustietoja noin tunnin verran. Vastaava mittaus tehtiin myös 10 metrin ja viiden metrin etäisyyksille.

5.3 Mittauksien tulokset

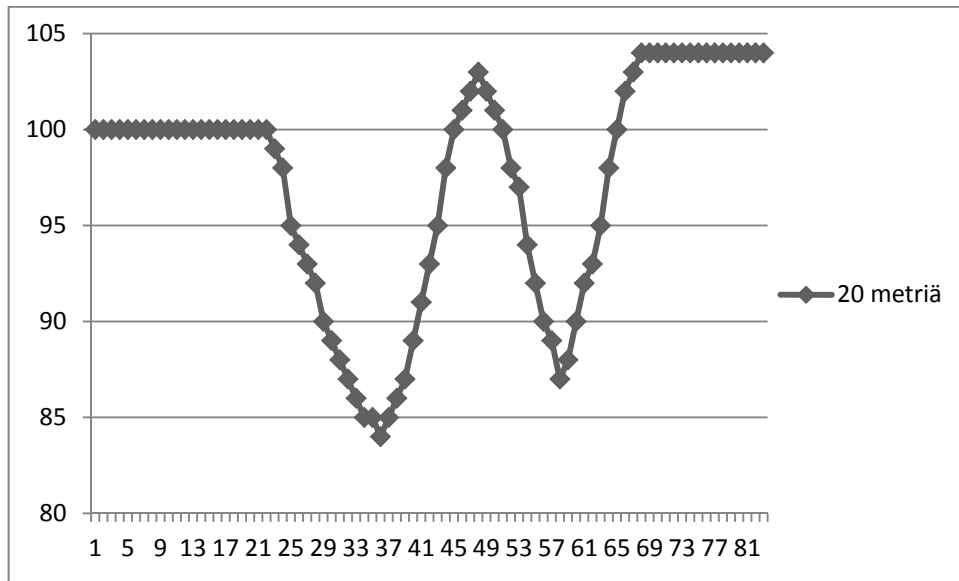
Taulukossa 15 on esitetty ensimmäisen mittaustavan tuloksia. Mittauksista on havaittavissa, että tulokset alkavat laahata, eli mittauksissa saatu suunta on siirtymää selvästi pienempi. Taulukkoon on merkitty mittalaitteen antama suunta, tästä suunnasta laskettu muutos alkupisteestä saatuun lukemaan sekä mittapisteen todellinen poikkeama alkupisteestä.

Taulukko 15 Mittaustuloksia viiden asteen väleillä olevilta mittapisteiltä

20 metriä													
	1.	2.	3.	4.	5.								
saatu suunta	91	96	99	103	107								
poikkeama alkuun		5	8	12	16								
todellinen poikkeama		5°	10°	15°	20°								
15 metriä													
	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.						
saatu suunta	90	96	99	101	104	107	112						
poikkeama alkuun		6	9	11	14	17	22						
todellinen poikkeama		5°	10°	15°	20°	25°	30°						
10 metriä													
	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.	13.
saatu suunta	84	86	88	92	94	99	103	113	116	117	124	126	127
poikkeama alkuun		2	4	8	10	15	19	29	32	33	40	42	43
todellinen poikkeama		5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°	55°	60°
5 metriä													
	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.	
saatu suunta	74	78	82	86	90	94	100	105	110	105	112	114	
poikkeama alkuun		4	8	12	16	20	26	31	36	31	38	40	
todellinen poikkeama		5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°	55°	
	13.	14.	15.	16.	17.	18.	19.	20.	21.	22.	23.	24.	
saatu suunta	120	122	126	129	132	136	143	146	153	158	164	169	
poikkeama alkuun	46	48	52	55	58	62	69	72	79	84	90	95	
todellinen poikkeama	60°	65°	70°	75°	80°	85°	90°	95°	100°	105°	110°	115°	
	25.	26.	27.	28.	29.	30.	31.	32.	33.	34.	35.	36.	
saatu suunta	175	180	183	187	190	197	201	208	211	213	216	218	
poikkeama alkuun	101	106	109	113	116	123	127	134	137	139	142	144	
todellinen poikkeama	120°	125°	130°	135°	140°	145°	150°	155°	160°	165°	170°	175°	

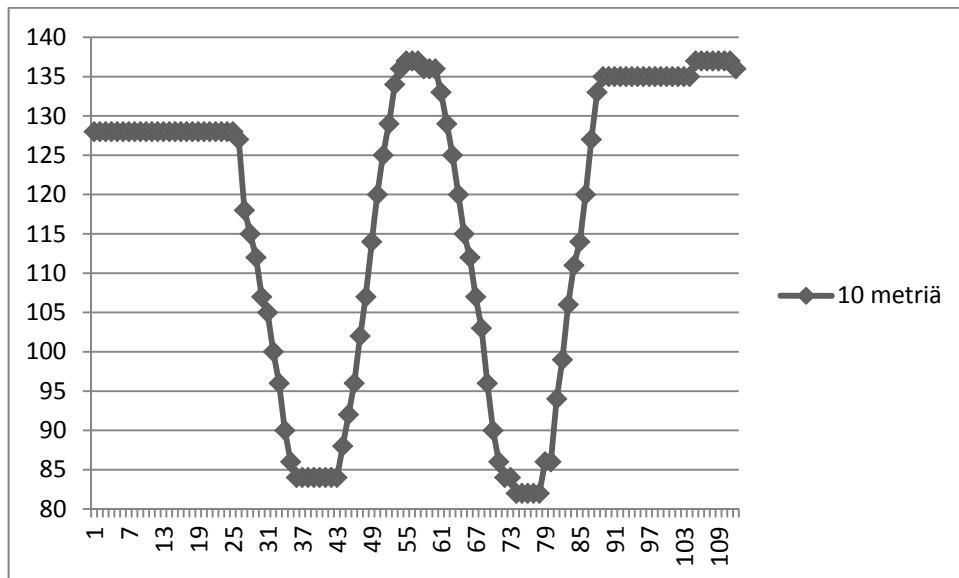
Toisessa mittauksessa vastaanotinta liikutettiin lopusta alkuun toistaen sama kahteen kertaan. Kuvaajassa 1 on mittauksen tulokset 20 metrin osalta. 20 metrin mittauksissa vastaanotinta ei pidetty päätepisteissä paikallaan vaan se oli koko ajan liikkeessä. Kuitenkin on havaittavissa, että loppupiste siirtyy lähemmäs oikeaa arvoaan, kun vastaanotinta on liikutettu reilummin. Mittauksissa olisi selkeästi pitänyt pitää vastaanotinta hetki alku- ja loppupisteissä, kuten on toimittu viiden ja kymmenen metrin tapauksissa. Kuitenkin kuvaajasta voidaan tulkita, että alkupisteen arvo ensimmäisellä käyntikerralla on ollut 84 astetta ja loppupisteen arvo lopuksi 104 astetta. Näiden pisteiden väli vastaa mittaustilanteessa olleiden mittapisteiden 20 asteen kulmanmuutosta.

Kuvaaja 1 Liikkeessä mitatut arvot 20 metrin etäisyydellä.



Kuvaajassa 2 on vastaava mittaus 10 metrin etäisyydellä. Myös tässä tapauksessa liikkeen seurauksena alkupisteen ja loppupisteen väliseksi muutokseksi saadaan isompi muutos kuin ensimmäisessä mittaustapauksessa. Ensimmäisessä mittauksessa alkupisteen suunta oli 84 ja loppupisteen suunta 127. Toisessa mittauksessa alkupisteen suunta oli 82 ja loppupisteen 137, eli suunnan muutos oli 55 astetta. Tämä kuitenkin poikkeaa jo viisi astetta todellisesta tilanteesta.

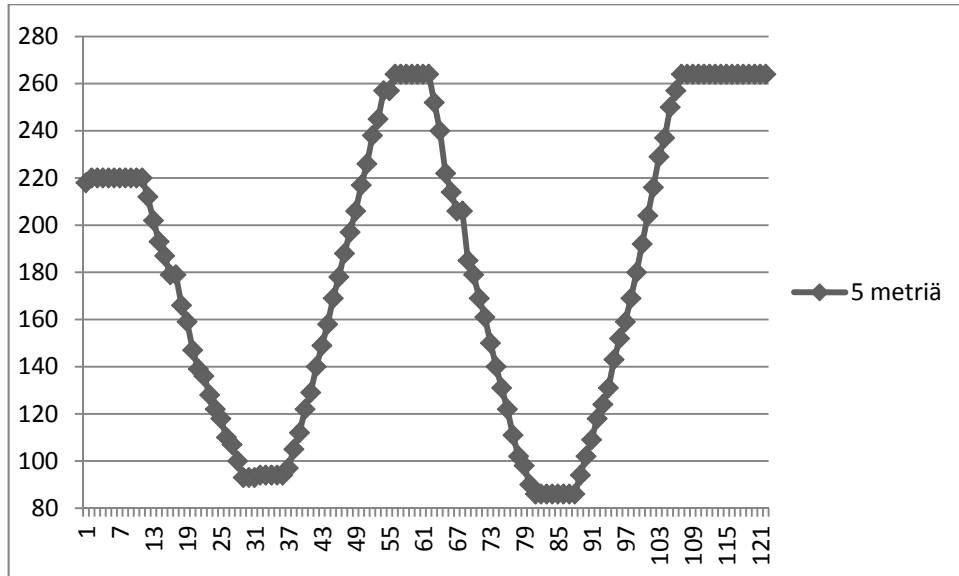
Kuvaaja 2 Liikkeessä mitatut arvot 10 metrin etäisyydellä



Kuvaajassa 3 on nähtävissä vastaanottimen liikuttamisen aiheuttamat muutokset, kun vastaanottimien etäisyys on viisi metriä. Tässäkin tapauksessa on nähtävissä, että loppupisteen suunta kasvaa liikkeen seurauksena. Alkupisteen arvoksi tässä mittauksessa saadaan 86 ja loppupisteen arvoksi 264. Suunnan muutos tässä

mittauksessa on siis suuruudeltaan 178 astetta. Alku- ja loppupisteen suunnan muutos pitäisi viiden metrin tapauksessa olla 175 astetta. Mittauksen muutoksen poikkeama on siis aika lähellä oikeaa arvoa.

Kuvaaja 3 Liikkeessä mitatut arvot viiden metrin etäisyydellä



Edellisten mittauksien havaintojen perusteella päätettiin tehdä vielä lisää mittauksia, koska selvästi liikkeellä oli merkitystä mittauksiin ja niiden antamiin lukemiin. Näissä mittauksissa valikoitiin muutama mittapaikka jokaiselta etäisyydeltä, kuten taulukossa 14 on esitetty. Taulukossa 16 on esitetty näiden mittausten tuloksia. Alkupisteen suuntaa on merkitty järjestysnumerolla 1. ja muut pisteet ovat numeroitu alkupisteestä laskien. Taulukkoon on myös merkitty todellinen poikkeama kyseisellä pisteellä alkupisteen suunnasta.

Taulukko 16 Satunnaisesti valittujen mittapisteiden mittaus

20 metriä				15 metriä			
1.	88	erotus	todellinen	1.	96	erotus	todellinen
5.	106	18	20	3.	99	3	10
3.	99	11	10	5.	109	13	20
4.	104	16	15	4.	105	9	15
				6.	111	15	25
10 metriä				5 metriä			
1.	90	erotus	todellinen	1.	82	erotus	todellinen
7.	112	22	30	21.	179	97	100
3.	100	10	10	14.	122	40	65
10.	130	40	45	5.	90	8	20
5.	105	15	20	17.	157	75	80
				11.	123	41	50

Noin tunnin kestävästä mittauksista saadusta datasta käy ilmi vastaanottimien suurehko vaeltaminen. Jokaiselta etäisyydeltä saatiin vajaat 3600 mittaustapahtumaa. Taulukossa 17 on esitetty mittauksissa saatujen suuntien määrä, pienin saatu arvo, suurin saatu arvo, keskiarvo sekä keskiarvo poikkeama. Taulukon arvoista on nähtävissä erittäin suuriakin poikkeamia suunnan suuruudessa sekä sen, että etäisyyden lyhentyessä vaihtelua tulee selvästi enemmän.

Taulukko 17 Kooste pidempiaikaisista mittauksista.

	5 metriä	10 metriä	20 metriä
Mittauksien määrä	3498	3482	3594
Minimi	104	51	52
Maksimi	245	165	123
Keskiarvo(pyöristetty)	163	129	100
Keskiarvo poikkeama (pyöristetty)	19,717	17,472	9,873

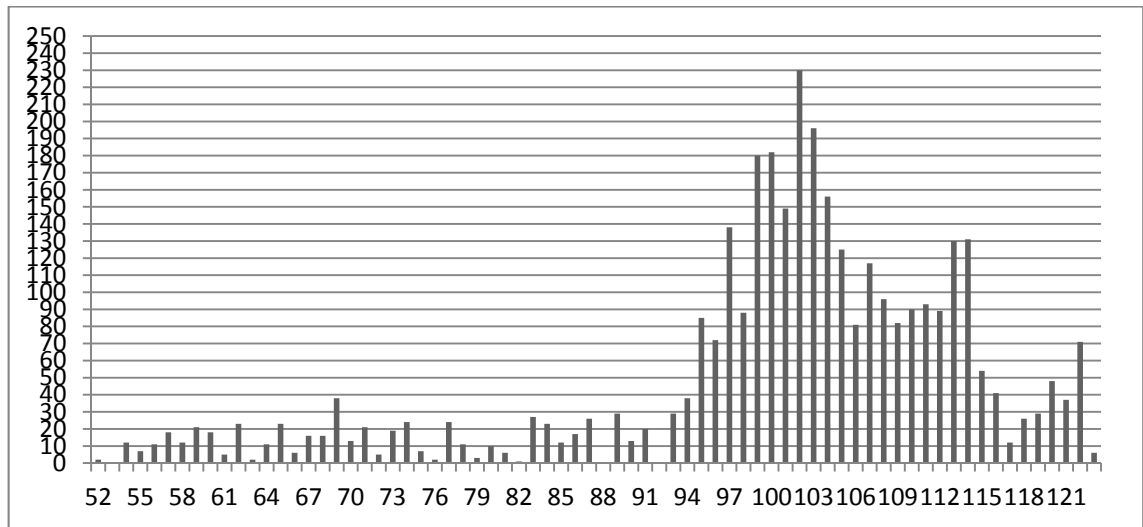
Taulukossa 17 esitetyistä tuloksista tehtiin myös vertailulaskentaa tietokoneella, jotta kyettiin tarkastelemaan laitteen laskentatarkkuutta ja lukualueiden aiheuttamaa pyöristystä. Vertailussa oli havaittavissa sitä suurempaa poikkeamaa mitä lyhyempi väli vastaanottimilla oli. Taulukossa 18 on esitetty suunnan laskennassa laitteella ja tietokoneella tapahtuvien poikkeaminen tunnuslukuja.

Taulukko 18 Laitteella ja tietokoneella tehdyn laskennan ero.

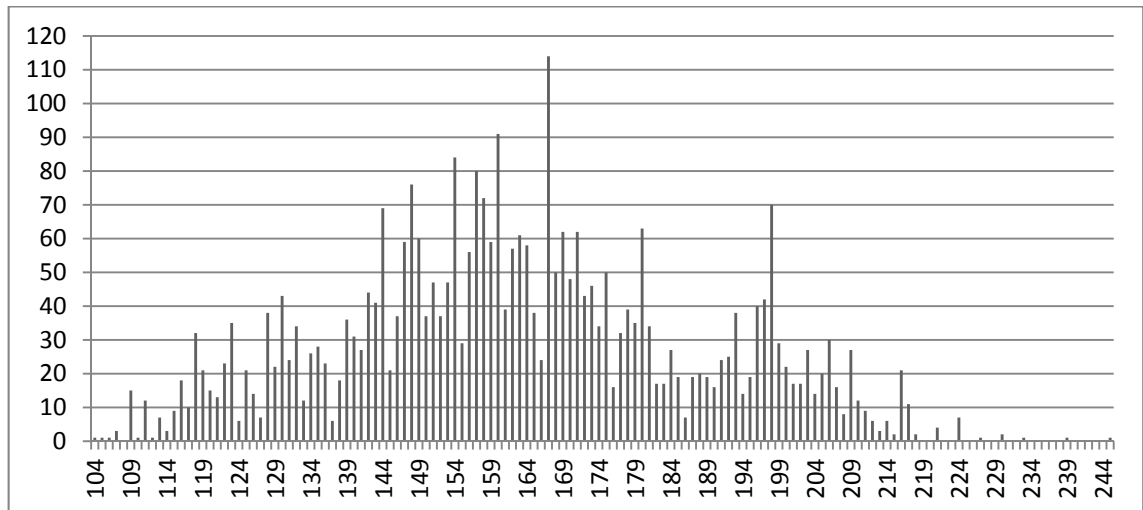
	5 metriä	10 metriä	20 metriä
minimi	0	0	0
maksimi	19	6	2
keskiarvo(pyöristetty)	1,101	0,912	0,540
keskiarvo poikkeama(pyöristetty)	0,883	0,624	0,525

Kuvaajissa 4,5 ja 6 on esitetty mittauksissa saatujen suuntien kappalemäärät minimiarvon ja maksimiarvon väliltä.

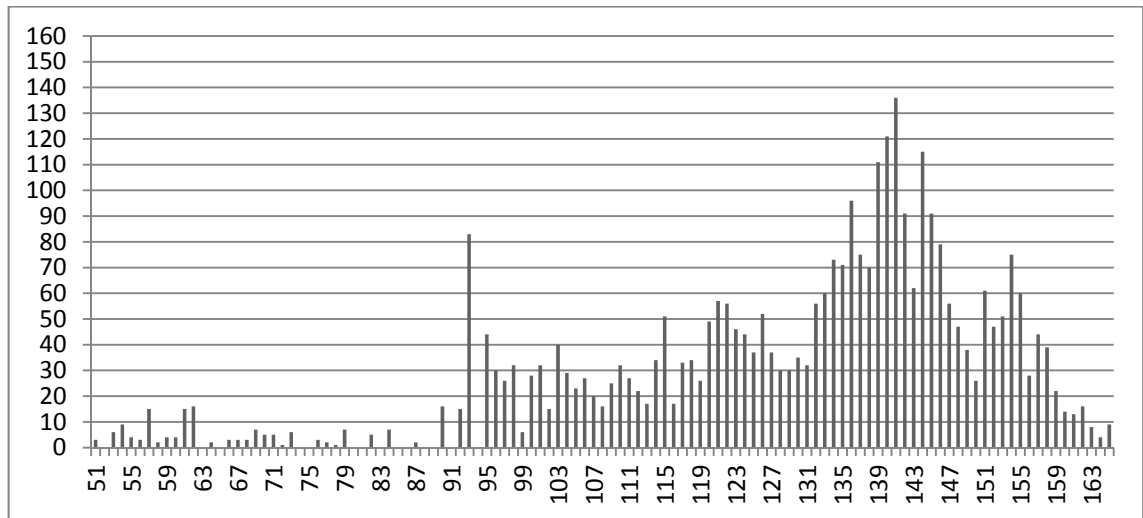
Kuvaaja 4 Kahdenkymmenen metrin etäisyydellä saatujen suuntien määrät



Kuvaaja 5 Kymmenen metrin etäisyydellä saatujen suuntien määrät



Kuvaaja 6 Viiden metrin etäisyydellä saatujen suuntien määrät



Vaikka toinen vastaanotin oli viimeisellä mittauskerralla paikallaan yli kolme tuntia ja sillä oli suurimman osan ajastaan havaittavissa yli kymmenen satelliittia, sen sijaintitiedot eivät vakiintuneet. Mittausten aikana vastaanottimen latitudi vaihteli välillä 61 astetta 28,5554 minuuttia ja 61 astetta 28,5884 minuuttia. Eroa minimin ja maksimin välillä on 0,0330 minuuttia. Latitudin yksi minuutin tuhannesosa vastaa Suomessa noin 0,63-0,93 metrin matkaa, riippuen siitä, missä päin Suomea ollaan. Vaihtelua on siis jopa kymmeniä metrejä. Vastaanottimen longitudi vaihteli mittausten aikana 23 asteesta 48,4121 minuutista aina 23 asteeseen 48,5338 minuuttiin. Eroa minimin ja maksimin välillä on 0,1217 minuuttia. Longitudin minuutin tuhannesosa vastaa 1,852 metriä, joten eron suuruus on noin 225 metriä.

6 YHTEENVETO

Mittauksista voidaan todeta se, että vastaanottimen paikka ei stabiloidu pitkissäkään mittauksissa vaan se vaeltelee jonkin verran. Tämä oli tiedossa jo, kun työtä lähdettiin tekemään ja tarkoitus oli tutkia, olisiko tämä vaeltelu molemmilla vastaanottimilla yhdenmukaista. Uskon, että vaeltelu voisi olla yhdenmukaista molemmilla vastaanottimilla sellaisessa tilanteessa, että molemmilla vastaanottimilla olisi identtinen satelliittigeometria. Mittauksissa saatiin joitakin kertoja vastaanottimet sellaiseen tilaan, että niillä oli sama satelliittigeometria. Kuitenkaan tällöin ei vaeltelua tapahtunut, vaan koordinaatit pysyivät samoina. Vaeltelua tapahtui enimmäkseen silloin, kun vastaanottimen satelliittigeometria muuttui. Mittauksissa ei tullut vastaan sellaista tilannetta, jossa molempien vastaanottimien satelliittigeometria olisi muuttunut samaan aikaan samalla tavalla. Käytännön mittauksissa tällaiseen tilanteeseen päästäisiin tuskin koskaan. Tällainen vaatisi ilmeisesti aivan optimaalisen tilanteen satelliittigeometrian osalta sekä näkyvissä olevien satelliittien osalta. Mittauksissa päästiin kuitenkin tilanteisiin, joissa vastaanotin käytti laskennassaan 14 satelliittia, mutta tällöin molempien satelliittigeometriat eivät olleet samat.

Mittauksien aikana havaitsin myös, etteivät laitteen lukualueet riitä tarkkaan laskemiseen, ja pyörityksistä tulee virhettä suunnan laskemiseen. Vertailuarvojen laskemiseen käytettiin tietokonetta, jossa on 64-bittinen käyttöjärjestelmä. Mitä pienempi oli vastaanottimien välinen etäisyys, sitä suuremmaksi tuli laskemisessa syntyneet poikkeukset. Jo lähtötilanteen koordinaattien lukuarvo saattoi muuttua 0,0001 minuuttia, ja tämän lisäksi eri laskuvaiheiden arvojen pyöritykset aiheuttivat suunnan laskemiseen jonkin verran virhettä. Kahdenkymmenen metrin etäisyydellä tämä aiheutti pahimmillaan vain kahden asteen virheen, kun taas viiden metrin etäisyydellä virhe oli pahimmillaan jopa 16 astetta. Mittaukset suoritettiin niin, että toinen vastaanotin oli koko ajan omalla paikallaan. Tällainen tilanne ei käytännössä tulisi esimerkiksi veneellä kovin usein vastaan, vaan molemmat vastaanottimet olisivat liikkeessä. En kokenut tarpeelliseksi mitata vastaanottimia tällaisessa tilanteessa, koska paikallaankaan ei päästy lupaaviin tuloksiin.

Näiden tutkimusten pohjalta tulen siihen loppupäätelmään, ettei käytännössä voida toteuttaa suunnan laskemista tällaisella laitteella, ainakaan kovin tarkasti. Tekemällä erilaisia tarkastuslaskelmia ja sulkemalla pois ”virheellisiä” suuntia voidaan päästä kohtalaiseen tulokseen, muttei kuitenkaan sellaiseen, joka hyödyttäisi esimerkiksi veneilyssä. Tällöinkin oikeiden arvojen saamisen väli saattaisi olla hyvinkin pitkä.

LÄHTEET

- [1] Poutanen, Markku. 1998. GPS-paikanmääritys. Hämeenlinna, Karisto Oy:n kirjapaino. 269 s.
- [2] http://eu.mio.com/fi_fi/global-positioning-system_4977.htm, viitattu 9.12.2014.
- [3] <ftp://tycho.usno.navy.mil/pub/gps/gpsb1.txt>, viitattu 29.1.2015.
- [4] <http://www.gps.gov/systems/gps/modernization/civilsignals/#L2C> viitattu 29.1.2015
- [5] <http://www.gps.gov/systems/gps/space/>, viitattu 29.1.2015
- [6] <http://www.navcen.uscg.gov/?Do=constellationStatus>, viitattu 29.1.2015.
- [7] Hofmann-Wellenhof, Bernhard, Lichtenegger, Herbert ja Wasle, Elmar. 2008. GNSS – Global Navigation Satellite Systems, Wien, Springer-Verlag. 537 s.
- [8] <http://www.schriever.af.mil/news/story.asp?id=123260251>, viitattu 30.1.2015
- [9] Misra Pratap ja Enge Per. 2006. Global Positioning System – Signals, Measurements, and Performance Second Edition, Massachusetts, Ganga-Jamuna Press. 569 s.
- [10] <http://www.gps.gov/systems/gps/control/>, viitattu 29.1.2015
- [11] http://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/ato/service_units/techops/navservices/gnss/gps/usersegments/, viitattu 2.2.2015
- [12] <http://www.gps.gov/applications>, viitattu 2.2.2015
- [13] <http://www.montana.edu/gps/understd.html>, viitattu 2.2.2015
- [14] Airos, Esa, Korhonen, Risto ja Pulkkinen, Timo, 2007. Satelliittipaikannusjärjestelmät, Riihimäki, Puolustusvoimien Teknillinen Tutkimuskeskus. 61s.
- [15] El-Rabbany Ahmed. 2002. Introduction to GPS The Global Positioning System, Boston, Artech house. 176 s.
- [16] Kaplan, Elliott D. ja Hegarty, Christopher J, 2005. Understanding GPS: Principles and Applications, Second Edition, Boston, Artech House. 726s.

- [17] http://www.nrem.iastate.edu/class/assets/nrem446_546/week3/Dilution_of_Precision.pdf , viitattu 9.12.2014.
- [18] <http://egnos-portal.gsa.europa.eu/discover-egnos/about-egnos/what-sbas>, viitattu 9.12.2014.
- [19] <http://www.maanmittauslaitos.fi/kartat/kartoitus/gps-mittaus>, viitattu 9.12.2014.
- [20] <http://www.amsa.gov.au/navigation/services/dgps/>, viitattu 9.12.2014.
- [21] http://plan.geomatics.ucalgary.ca/papers/04gnss_ion_dharetal.pdf, viitattu 9.12.2014.
- [22] Tetley, Laurie ja Calcutt, David. 2001. Electronic navigation systems 3rd ed. Boston, Butterworth-Heinemann. 423 s.
- [23] http://www.agt.bme.hu/tantargyak/bsc/bmeeeofav49/NMEAdescription_gy_12.pdf, viitattu 28.1.2015.
- [24] Fastrax Ltd. 2010. NMEA manual for Fastrax IT500 Series GPS Receiver. 38 s.
- [25] Poutanen, Markku. 2003. Maan muoto. Jyväskylä, Gummerus Kirjapaino Oy. 176 s.
- [26] <http://www.maanmittauslaitos.fi/kartat/koordinaatit/3d-koordinaatistot/ellipsoidigeoidi>, viitattu 9.12.2014.
- [27] http://earth-info.nima.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm2008/egm08_wgs84.html, viitattu 9.12.2014
- [28] <http://www.fgi.fi/fgi/fi/teemat/geoidi>, viitattu 9.12.2014
- [29] <http://www.maanmittauslaitos.fi/kartat/koordinaatit/3d-koordinaatistot/itrs-koordinaattijarjestelma>, viitattu 9.12.2014.
- [30] Krogars, Marco ja Olkkonen, Petteri. 1994. Opi navigoimaan, Jyväskylä, Keski-Suomen ammattioppilaitos. 166 s.
- [31] Karlsson, Sune. 2002. Merenkulun perusteet rannikolta avomerelle. Helsinki, Edita Prima Oy. 294 s.

[32] http://www.atmel.com/Images/Atmel-8011-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega164P-324P-644P_datasheet.pdf , viitattu 9.12.2014.

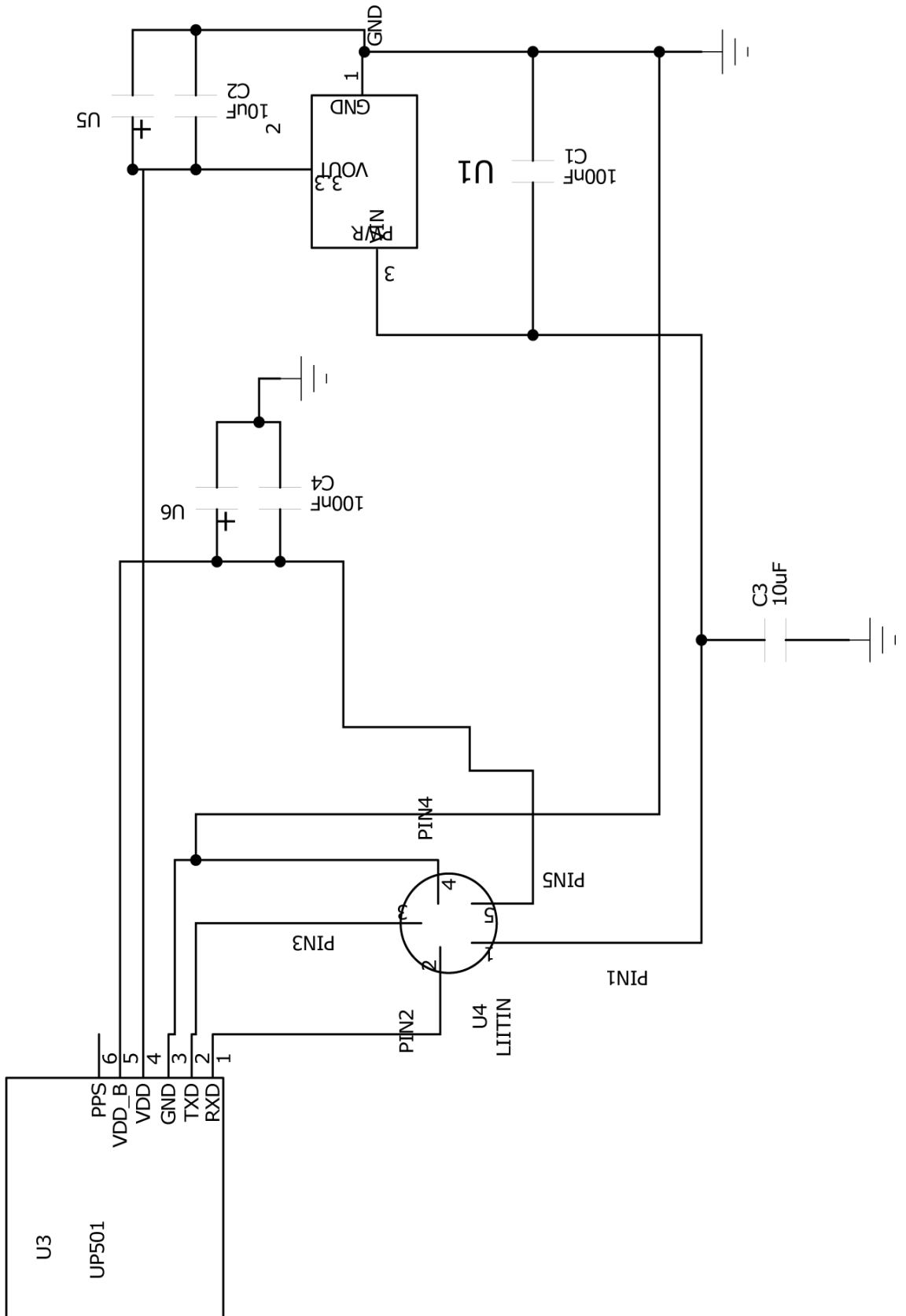
[33] http://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/ICs/DS_FT232R.pdf, viitattu 9.12.2014.

[34] <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/20001984g.pdf>, viitattu 9.12.2014.

[35] <https://sites.google.com/site/terminalbpp/>, viitattu 2.2.2015

[36] http://www.navipedia.net/index.php/Baseband_Processing, viitattu 16.3.2015

LIITE 1



LIITE 2

