

Metropolia Ammattikorkeakoulu
Maanmittaustekniikan koulutusohjelma

Iivari Lappalainen

**StarFire RTG -korjauspalvelun ja C-Nav-
paikannuslaitteiston testaus Merenkulkulaitoksella**

Insinöörityö 03.11.2008

Ohjaaja: toimistoinsinööri Jani Pötrönen
Ohjaava opettaja: yliopettaja Vesa Rope

Tekijä	Iivari Lappalainen
Otsikko	StarFire RTG korjauspalvelun ja C-Nav-paikannuslaitteiston testaus Merenkulkulaitoksella
Sivumäärä	70 sivua
Aika	20.10.2008
Koulutusohjelma	maanmittaustekniikka
Tutkinto	insinööri (AMK)
Ohjaaja	toimistoinsinööri Jani Pötrönen
Ohjaava opettaja	yliopettaja Vesa Rope
<p>Työn aiheena on StarFire RTG -paikannusjärjestelmän käyttöönottestaus Merenkulkulaitoksella. Työn tavoitteena oli selvittää StarFire RTG -korjauspalvelun ja C-Nav-paikannuslaitteiston toimivuus ja soveltuvuus Merenkulkulaitoksen merenmittauskäyttöön. Käytännön testimittausten lisäksi tarkoituksena oli selvittää StarFire RTG:n toimintaperiaate ja järjestelmärakenne.</p> <p>Teoriaosuus laadittiin StarFire RTG:n kehittämiseen ja markkinointiin osallistuneiden yritysten ja järjestöjen dokumenttien pohjalta. Selvitystyö oli työlästä, koska lisenssisyistä yritykset käyttävät samoista käsitteistä eri nimityksiä, eivätkä selitä suoraan yritysten välisiä kytköksiä StarFire RTG -järjestelmään.</p> <p>Maastotestausta varten laadittiin toimintasuunnitelma, mutta sitä jouduttiin pelkistämään mittauksissa esiintyneiden häiriöiden ja laiterikkojen vuoksi. Testauspaikoista kolme sijaitti Helsingissä ja neljä Turussa monikeilainalus Airistolla.</p> <p>Tulokset osoittavat, että StarFire RTG:n avulla on mahdollista saavuttaa desimetriluokan mittaustarkkuus hyvissä olosuhteissa, mutta että antenni myös hyvin herkkä ulkoisille häiriölähteille. Kolmessa neljästä testauspaikasta kohdattiin häiriölähteitä, jotka heikensivät antennin kykyä havaita L2-signaalia ja siten laskivat mittauksissa käytettyjen satelliittien määrää. Pahimmillaan häiriöt estivät mittauksen kokonaan.</p> <p>StarFire RTG:n ja C-Nav-laitteiston testaus tulee jatkumaan mittausaluksilla seuraavalla mittauskaudella 2009.</p>	
Hakusanat	StarFire, RTG, C-Nav, paikanmääritys, satelliittipaikannus, GPS, DGPS, differentiaalinen GPS, GDGPS

Author Title	Iivari Lappalainen Testing of StarFire RTG correction service and C-Nav positioning equipment at Finnish Maritime Administration
Number of Pages Date	70 20 October 2008
Degree Programme	Land Surveying Technology
Degree	Bachelor of Engineering
Instructor Supervisor	Jani Pötrönen, Hydrographic Survey Engineer Vesa Rope, Principal lecturer
<p>The aim of this thesis was to test and find out whether StarFire RTG correction service and C-Nav positioning equipment would match the requirements set for Finnish Maritime Administrations sea surveying operations. Second purpose was to describe and document the operating principle and structure of StarFire RTG.</p> <p>The theory part is based of documents written by different companies and parties behind the development and marketing of the StarFire RTG system. Different companies call the StarFire RTG and its operational concepts by different terms, because of various licenses and trademarks involved. Also, the companies did not usually mention the roles of other companies connected with StarFire RTG in their documents.</p> <p>A plan was formed to conduct the test surveying. However, due to various problems with testing equipment and mere ill-fortune, the testing was mostly performed in Helsinki city area. In addition, a brief test was carried out on the multibeam ship Airisto.</p> <p>The results of the surveys show that StarFire RTG has big potential when decimeter class surveying accuracy is needed. However, the system was unreliable at most of the testing sites. At most sites there were problems with unidentified interference sources, which weakened the antennas' ability to track the L2-signal. When L2-signal was weak, the C-Nav equipment would use less satellites in the position solution than it actually could have used. At its worst, the L2-signal interference made the surveying impossible.</p> <p>The testing of StarFire RTG and C-Nav equipment will be continued during the next surveying season on 2009.</p>	
Keywords	StarFire, RTG, Real Time GIPSY, satellite position, GPS, DGPS, differential GPS, GDGPS,

Sisälllys

Tiivistelmä

Abstract

Lyhenteet, käsitteet ja määritelmät

1 Johdanto	14
2 Taustatietoa Suomen merenmittauksesta.....	15
2.1 Merenkululaitoksesta yleisesti	15
2.2 Merenmittaus.....	16
3 Johdatus GPS-mittaukseen.....	17
3.1 GPS-järjestelmä.....	17
3.2 GPS-järjestelmän toimintaperiaate.....	18
3.3 GPS-signaali.....	19
3.3.1 C/A- ja P-koodi	19
3.3.2 GPS-navigaatioviesti.....	20
3.4 GPS-järjestelmän paikannustarkkuus ja virhetekijät	21
3.5 NAVSTAR GPS -satelliitit	23
3.6 DGPS	24
3.6.1 DGPS-järjestelmän virhetekijät	24
3.6.2 Merenkululaitoksen DGNSS.....	25
4 StarFire RTG	26
4.1 Lyhyesti.....	26
4.2 Syntyhistoria	26
4.3 Taustatietoa	27
4.4 Toimintakuvaus.....	29
4.5 StarFire RTG -korjaukset.....	30
4.6 StarFire RTG -järjestelmän rakenne	32
4.6.1 Maasegmentti	33
4.6.2 Kontrollisegmentti	34
4.6.3 Avaruussegmentti.....	35
4.6.4 Käyttäjäsegmentti.....	36
4.7 StarFire RTG:n koordinaatisto.....	37
5 Testauksen järjestäminen	38
5.1 Testauksen suunnittelu	38
5.2 Testauslaitteisto.....	38
5.3 Testauksessa tallennettava mittausdata.....	39
5.4 Testaustulosten käsittelyssä käytetyt ohjelmat.....	40
5.5 Testauksessa käytetyt koordinaatistot.....	40

6 Testauksen suorittaminen.....	42
6.1 Testauspaikka I: Merenkululaitoksen toimiston katto	42
6.1.1 Testauksen aloittaminen.....	42
6.1.2 Ensimmäiset tulokset	43
6.1.3 Paikallisten virhelähteiden selvittäminen.....	44
6.1.3.1 Firmware ongelmat	44
6.1.3.2 Satelliittien havaitseminen ja havaintomoodit	45
6.1.3.3 Laitteongelmat.....	47
6.2 Testauspaikka II: Helsinki City West Holiday Inn -hotellin katto.....	49
6.2.1 Testauksen aloittaminen.....	49
6.2.2 Tulokset.....	50
6.2.3 Paikallisten virhelähteiden selvittäminen.....	51
6.3 Testauspaikka III: Ilmalan vesitorni.....	53
6.3.1 Testauksen aloittaminen.....	53
6.3.2 Tulokset.....	54
6.3.3 Paikallisten virhelähteiden selvittäminen.....	55
6.4 Testauspaikka IV: Airisto	58
6.4.1 Testauksen aloittaminen.....	58
6.4.2 Tulokset: Mittausjakso I.....	59
6.4.3 Tulokset: Mittausjakso II	60
 7 Yhteenveto	 61
 Lähteet.....	 63
 Liitteet	
Liite 1: C-Nav 2050M:llä tallennettua NMEA-raakadataa.....	67
Liite 2: NMEA-raakadata muunnettu KKJ-koordinaatistoon ”EUREFMuunnos”- ohjelmalla.....	68
Liite 3: NMEA-data käsiteltävänä Excelissä	69
Liite 4: Merenkululaitoksen DGNS:llä tallennettua NMEA-dataa.....	70

Lyhenteet, käsitteet ja määritelmät

A/S	”Anti-Spoofing”. Menetelmä, jolla Yhdysvaltojen armeijan P-koodi moduloidaan W-koodin avulla salatuksi P(Y)-koodiksi. ks. ”P-koodi”.
almanac	Datatiedosto, joka sisältää GPS-satelliittien karkeat kiertoratatiedot, kellokorjaukset, toimintatila- sekä ilmakehätiedot. GPS-satelliitit lähettävät almanakka tiedoston vastaanottimelle. Vastaanotin määrittelee satelliittien sijainnin almanakan ja ephemeriksen perusteella. ks. ”ephemeris”.
Beidou	Kiinan suunnittelema oma satelliittipaikannusjärjestelmä. Tällä hetkellä Beidou koostuu neljästä testisatelliitista, eikä se ole vielä julkisessa käytössä. Beidoun on suunniteltu pystyvän 10 metrin paikannustarkkuuteen. Järjestelmä tulee lähettämään NAVSTAR GPS:n tavoin sekä siviili- että salattua sotilassignaalia.
C/A-koodi	”Coarse Acquisition Code” on GPS-satelliittien luoma pseudosatunnainen koodi GPS-signaalin matka-ajan laskemiseksi. C/A on suunniteltu siviilikäyttöön ja Yhdysvaltain puolustusministeriö voi halutessaan heikentää sen tarkkuutta SA-häirinnällä. ks. ”SA”.
COMPASS	”Compass Navigation Satellite System” (CNSS), Beidou-2. Kiinan suunnitteleman satelliittipaikannusjärjestelmän toisen vaiheen kansainvälinen nimi. ks. ”Beidou”.
DGPS	Differentiaalinen GPS. Tekniikka, jossa satelliittipaikannustarkkuutta parannetaan erillisen, tunnetulla pisteellä sijaitsevan tukiaseman lähettämällä korjaussignaalilla. Korjaus saadaan

vertaamalla keskenään tukiaseman tarkkaan tunnettua ja havaittua sijaintia keskenään. Korjaus eliminoi tukiasemaan ja liikkuvaan vastaanottimeen vaikuttavat yhteiset virhelähteet lähes kokonaan (ilmakehä, satelliittien ratavirheet, jne.).

DGNSS	”Differential Global Navigation Satellite Service”. GNSS-järjestelmä, jonka tarkkuutta parannetaan DGPS-korjaussignaaleilla. ks. ”DGPS” ja ”GNSS”.
DoD	”Department of Defense”, Yhdysvaltain puolustusministeriö. NAVSTAR GPS -järjestelmän kehittäjä ja rahoittaja.
EGNOS	”European Geostationary Navigation Overlay Service”. Euroopan avaruusjärjestön ESA:n (European Space Agency), Euroopan komission ja EUROCONTROLin (European Organisation for the Safety of Air Navigation) kehittämä Euroopan alueella toimiva SBAS-järjestelmä. Sen yhdysvaltalainen vastine on WAAS.
ETRS89 / ETRF89	”European Terrestrial Reference System 1989”. Euroopan alueelle luotu koordinaattijärjestelmä, joka yhtyy kansainväliseen ITRS-järjestelmään eepokkivuonna 1989. Sijaitsee kokonaan Euraasian mannerlaatan kiinteällä osalla. ETRF89, eli ”European Terrestrial Reference Frame 1989” on ETRS89 realisaatio.
ephemeris	GPS-vastaanottimien tarvitsema tiedosto, joka sisältää tiedot satelliittien sisäisestä ajasta, GPS-viikon numeron sekä satelliittien ratatiedot. GPS-satelliitit lähettävät ephemeristiedot automaattisesti vastaanottimelle.

FAA	”Federal Aviation Administration”, Yhdysvaltain ilmailuun liittyvistä asioista vastaava viranomainen.
Fokus	Digita Oy:n luoma maksullinen DGPS-palvelu, jonka tarjoamaa korjaustietoa lähetetään valtakunnallisten radioasemien RDS-kanavalla. Paikannustarkkuus noin kaksi metriä. Nykyään palveluntarjoajana toimii Indagon Oy.
Galileo	Kehitteillä oleva eurooppalainen satelliittipaikannusjärjestelmä, joka on suunniteltu erityisesti Euroopassa tapahtuvan siviilikäytön tarpeisiin. Galileon tarkoitus on myös taata Euroopan unionin riippumattomuus ulkopuolisista paikannusjärjestelmistä, joista suurin osa on eri maiden puolustusvoimien hallinnassa.
GcGPS	”C-Nav Globally corrected GPS”, C&C Technologies:in tuotenimi RTG-mittaukselle.
GDGPS	”Global Differential GPS”. NASA Jet Propulsion Laboratory:n kehittämä DGPS-tyyppinen paikannusmenetelmä, jonka tarkkuus perustuu RTG-algoritmiin ja laajaan referenssiverkkoon (GGN).
GGN	”Global GPS Network”. NASA:n rakentama ja hallinnoima maailmanlaajuinen GPS-referenssiverkko, joka koostuu noin 70 kaksitaajuusvastaanottimesta.
Glonass	”GLObalnaja NAVigatsionnaja Sputnikovaja Sistema” on GPS:n kaltainen venäläinen sotilaskäyttöön kehitetty satelliittipaikannusjärjestelmä. Se on kehitetty toimimaan yhdysvaltalaista GPS:ää paremmin Venäjän leveysasteilla, mutta järjestelmä on kärsinyt toistuvasti rahoituksen puutteesta.

GNSS	”Global Navigation Satellite System”. Alunperin synonyymi GPS:lle, mutta satelliittipaikannusjärjestelmien lisääntyessä termillä tarkoitetaan yhä useammin paikannusjärjestelmiä, jotka voivat hyödyntää samanaikaisesti eri satelliittipaikannusjärjestelmien konstellaatioita..
GPS	”Global Positioning System”. Puhemielessä GPS:llä tarkoitetaan yleensä mitä tahansa satelliittipaikannusjärjestelmää, mutta alunperin GPS on ollut lyhenne amerikkalaisesta NAVSTAR GPS -sotilaspaikannusjärjestelmästä. ks. ”GNSS”.
GPRS	”General Packet Radio Service”. GSM-verkossa 56–114 kbit/s nopeudella toimiva tiedonsiirtopalvelu. Palvelun avulla voidaan esimerkiksi käyttää internetiä ja vastaanottaa GPS korjaussignaalia. ks. ”VRS” ja ”RTK”.
GRN	”Ground Reference Network”. Navcomin rakentama ja hallinnoima maailmanlaajuinen 31 tukiaseman referenssiverkko StarFire-järjestelmälle.
INMARSAT	Englantilainen tietoliikennesatelliittiyhtiö, jonka geosynkronisella radalla olevien satelliittien välityksellä StarFire-järjestelmän korjaukset välitetään käyttäjälle.
ionosfääri	Ilmakehän ylin kerros, sijaitsee 50–400 kilometrin korkeudella. Voi vaikuttaa GPS:n paikannustarkkuuteen useita metrejä.
IRNSS	”Indian Regional Navigational Satellite System”. Suunnitteilla oleva intialainen satelliittipaikannusjärjestelmä. Valmistuessaan IRNSS koostuisi kolmesta geostationaarisesta ja neljästä geosynkronisesta satelliitista.

ITRF	”International Terrestrial Reference Frame”. International Earth rotation and Reference systems Service:n (IERS) luoman maailmanlaajuisen koordinaattijärjestelmän (ITRS) realisaatio. Koska IERS:n seuraamat havaintopisteet sijaitsevat ympäri maapalloa eri mannerlaatoilla, ITRF-koordinaatteihin liittyy aina epookkivuosi, mistä selviää, minkä vuoden havaintojen perusteella koordinaatiston määrittely on tehty. Mannerlaatat liikkuvat noin kolmesta seitsemään senttimetriä vuodessa.
ITRS	”International Terrestrial Reference System” (ITRS). Maailmanlaajuinen koordinaattijärjestelmä. ks. ”ITRF”.
JPL	”Jet Propulsion Laboratory”. NASA:n tutkimuskeskus.
L-Band	L-taajuuksilla (Long) tarkoitetaan yleisesti taajuuksia välillä 1–2 GHz.
LES	”Land Earth Station” tarkoittaa StarFire-järjestelmässä maanpäällistä asemaa, jonka kautta geostationaarisille INMARSAT-satelliiteille siirrettävä RTG-korjaustieto välitetään avaruuteen.
multipath-virhe	Multipath-virheellä tarkoitetaan monitieheijastusta, jossa yhdestä säteilylähteestä lähetetyt signaalit saapuvat vastaanottimeen heijastumisen vuoksi eri reittejä pitkin.
NASA	”National Aeronautics and Space Administration” on Yhdysvaltojen avaruusohjelmasta vastaava virasto.
NAVSTAR GPS	Yhdysvaltain puolustusministeriön kehittämä satelliittipaikannusjärjestelmä.

NMEA	NMEA (National Marine Electronics Association) on luonut viesti spesifikaation sähköisten laitteiden ja tietokoneiden väliseen kommunikointiin. Satelliittipaikannuksessa käytettyjä erilaisia NMEA-viestejä on 32, ja ne sisältävät eri tietoja sijainnista, havaituista GPS-satelliiteista, nopeudesta jne.
P-koodi	Precise / Protected, salattu sotilaskäyttöön tarkoitettu NAVSTAR GPS -koodi. Virallinen nimi P(Y)-koodi. Tarkempi kuin C/A-koodi. ks. C/A-koodi.
PRN-koodi	”Pseudo Random Noise / Number”, näennäissatunnainen koodi, jota vertaamalla GPS-vastaanotin saa tietoonsa havaitun GPS-signaalin lähetyshetken.
Pseudoetäisyys	GPS-vastaanottimen antennin ja satelliitin näennäisetäisyys. Saadaan kertomalla signaalin matka-aika valonnopeudella (radioaaltojen nopeus). Pseudoetäisyys ei vastaa täysin todellista etäisyyttä, sillä erilaiset virhelähteet vaikuttavat aina sen mittaukseen.
rover	Mikä tahansa tallentava GPS-vastaanotin.
RTG	“Real Time GPS Inferred Positioning System, Real Time GIPSY”. NASA:n kehittämä algoritmi tosiaikaisen paikantamisen tarkkuuden parantamiseksi.
RTK	”Real Time Kinematic”. Paikannustekniikka, jossa tunnetulla pisteellä oleva referenssiasema lähettää reaaliaikaisia korjauksia yhdelle tai useammalle vastaanottimelle. Korjauksen muodostamisessa käytetään L1- ja L2- taajuuksien kantoaaltoja varsinaisten navigaatioviestien sijaan. RTK vaatii kaksitaajuusvastaanottimen ja RTK:n tarkkuus on joitain senttimetrejä, kun

taas yleisemmin DGPS-sovelluksien tarkkuus on tavallisesti useista desimetreistä muutamiin metreihin. [33]

SA	”Selective Availability”, C/A-koodin häirintämenetelmä jolla DoD voi halutessaan heikentää NAVSTAR GPS:n siviilitarkkuutta sadoilla metreillä. SA on ollut pois käytöstä 01.05.2000 lähtien, eikä sitä ole suunniteltu uusiin NAVSTAR GPS -satelliitteihin. ks ”C/A”.
SBAS	”Satellite Based Augmentation System”. Järjestelmä joka levittää GPS-korjaustietoa laajalle alueelle satelliittien välityksellä.
SET	”Solid Earth Tide”. Maanvuoksi-ilmio. Kuun ja Auringon vetovoimien vaikutus Maan kiinteisiin osiin.
StarFire	Kaupallinen globaali SBAS-järjestelmä, joka välittää RTG-korjaussignaalia.
troposfääri	Alailmakehä. Paksuus vaihtelee ilmamassan, vuodenajan ja maantieteellisen sijainnin mukaan napa-alueiden 6–8 kilometristä päiväntasaajan 16–20 kilometriin. Vaikutus GPS:n tarkkuuteen on vähäinen.
VRS	”Virtual Reference Station”. Geotrim Oy:n Suomessa tarjoama maksullinen RTK-palvelu, jolla käyttäjä pääsee noin 2 cm tarkkuuteen ilman omaa tukiasemaa. VRS:n käyttö vaatii GPRS-yhteyden muodostamisen laskentakeskukseen.

WAAS	“Wide Area Augmentation System”. FAA:n ylläpitämä SBAS-järjestelmä, rakennettu ilmailun navigaatioavuksi. WAAS kattaa Pohjois-Amerikan ja Havaijin. Järjestelmän eurooppalainen vastine on EGNOS.
WADGPS	“Wide Area Differential GPS”. Laajalla alueella toimiva DGPS, usein synonyymi SBAS:lle.
WGS-84	”World Geodetic System 1984”. Maailman kattava, geodesiassa ja paikannuksessa käytetty datumi. Perustuu GRS-80-ellipsoidiin.

1 Johdanto

Laivanrakentamisen ja merenkäynnin historian uskotaan ulottuvan jopa 45 000 vuoden päähän menneisyyteen. Varmaa on kuitenkin se, että siitä lähtien kun ensimmäiset laivat rakennettiin, on myös sattunut merionnettomuuksia. Vanha sananlasku sanoo, että ”Tuurilla ne laivatkin seilaavat”, mikä onkin varmasti aikoinaan pitänyt ainakin osittain paikkaansa. Nykypäivänä merenkulun on kuitenkin perustuttava hyvän onnen sijaan varmaan tietoon, tarkemmin sanottuna paikkatietoon siitä, missä ja millaisilla vesillä laivat minäkin ajanhetkenä liikkuvat.

Tämä lopputyö on tehty Merenkululaitoksen sisäisen tuotannon merenmittaustuotantoyksikössä. Lopputyön tarkoituksena oli selvittää StarFire RTG -korjauspalvelua käyttävän C-Nav 2050M GPS-mittalaitteen toimivuutta ja suorituskykyä sekä soveltuvuutta Merenkululaitoksen merenmittauskäyttöön.

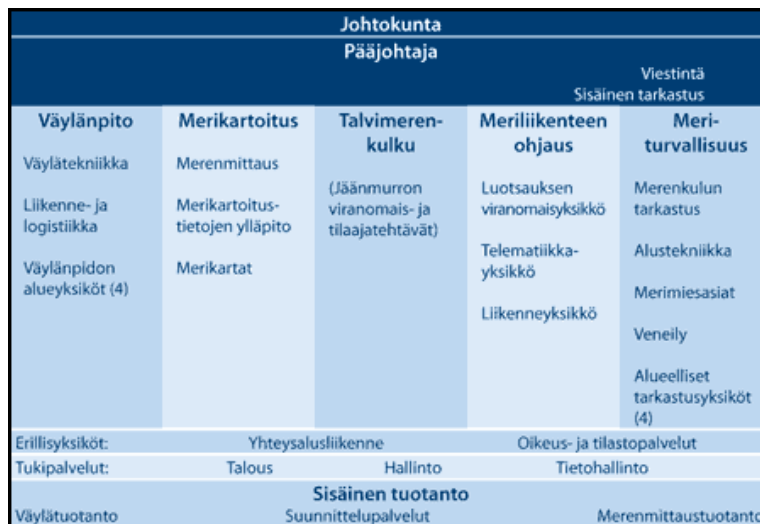
Tällä hetkellä Merenkululaitoksen luotausaluksissa on käytössä kolme eri korjausjärjestelmää: VRS (virtuaali-RTK), Fokus DGPS sekä Merenkululaitoksen oma DGNSS-palvelu. GPRS-datayhteyden välityksellä toimivan VRS:n tarkkuus on näistä ylivoimaisesti paras, noin 5 cm tarkkuudellaan, mutta VRS-palvelun kantamaa rajoittavat GSM-verkon kuuluvuus sekä etäisyydet korjauksen tukiasemaverkkoon. Fokus DGPS:llä sekä Merenkululaitoksen omalla DGNSS:llä on parempi kantama, mutta niidenkään kuuluvuus saaristoalueen ulkopuolella avomerellä ei ole aina taattu. Molempien järjestelmien tarkkuus on noin 2 metrin luokkaa.

Teoriassa StarFire RTG ei ainoastaan yhdistä Merenkululaitoksen käytössä olevien järjestelmien parhaita ominaisuuksia, vaan myös vahvistaa niitä. Korjaussignaali on maailmanlaajuinen kuuluvuus sekä Fokus DGPS:ää että Merenkululaitoksen DGNSS-järjestelmää parempi desimetriluokan paikannustarkkuus. Käytännössä Starfire RTG -palvelun käyttö siis parantaisi mittaustarkkuutta VRS-kantaman ulkopuolisilla alueilla sekä periaatteessa mahdollistaisi mittausalusten toiminnan missä tahansa päin maapalloa.

2 Taustatietoa Suomen merenmittauksesta

2.1 Merenkululaitoksesta yleisesti

Merenkululaitos vastaa kauppamerenkulun ja muun vesiliikenteen perustoimintaedellytyksien ylläpidosta ja kehittämisestä taloudellisesti, turvallisesti ja ympäristöä säästäen. Merenkululaitoksen toiminnan vastualueet ja organisaatio näkyvät kuvassa 1.



Kuva 1. Merenkululaitoksen organisaatio 01.01.2008 alkaen [1].

Merenkululaitoksen toiminnan perustana ovat turvallinen ja tehokas kauppamerenkulku sekä yhteiskunnan ja asiakkaiden tarpeet.

Merenkululaitos hankkii merenkulun varmistamiseen tarvittavat tuotannolliset palvelut joko perustettavilta liikelaitoksilta tai muilta yrityksiltä. Merenkululaitoksen toiminta rahoitetaan kauppamerenkulun osalta asiakkailta perittävillä väylämaksuilla ja viranomais- sekä yhteiskunnallisten tehtävien osalta valtion budjetista. Vuosibudjetin suuruus on noin 103 miljoonaa euroa. Henkilöstöä Merenkululaitoksessa on lähes 800 työntekijää. [1]

2.2 Merenmittaus

Merikartoituksen tehtävänä on kerätä, ylläpitää ja julkaista tietoja Suomen meri- ja järvialueilta ensisijaisesti kauppamerenkulun tarpeita varten. Merikartoituksen yhteiskunnallinen vaikuttavuus näkyy merenkulun turvallisuutena ja onnettomuuksien vähäisyytenä. Luotettavat ja ajantasaiset merikartoitustiedot ovat turvallisen navigoinnin ja meriliikenteen sujuvuuden edellytys. Merikartoituksella on merkittävä rooli merellisen ympäristön suojelussa. [2, s. 8.]

Merenmittauskausi alkaa maassamme jäiden lähdön jälkeen eli yleensä toukokuussa ja päättyy säiden huonontuessa ja myrskytuulien puhaltaessa pääasiallisesti syyskuun loppuun mennessä. Tuona aikana Merenkululaitoksen neljä mittausretkikuntaa mittaavat maamme meri- ja sisävesialueita keskimäärin 2 500 neliökilometriä. Mittauskaudella toiminta on hyvin riippuvaista vallitsevista sääolosuhteista. Suomen vedet kuuluvat maailman vaikeimmin navigoitaviin vesialueisiin myös niiden mataluuden, karikkojen sekä talvisten jääolosuhteiden vuoksi. [3, s. 7; 4.]

Merenmittaus voidaan jakaa kahteen alalajiin, aluemittaukseen, jonka tavoitteena on kartoittaa vesialueen yleiset syvyysarvot sekä tarkempaan väylämittaukseen. Päämenetelmänä merenmittauksessa käytetään monikeilainluotausta, jolla saadaan paljon entistä tarkempaa ja runsaampaa tietoa merenpohjan muodoista. Merkittävää monikeilainmittauksen yleistymiselle on ollut erityisesti satelliittipaikannuksen sekä aluksen liikkeitä kompensoivien laitteiden kehitys. [4]

Merenkululaitos tekee myös geodeettisia mittauksia, joilla täydennetään merenmittausten tasorunkona käytettyä Suomen valtakunnallista kolmiopisteverkkoa sekä kartoitetaan merenkulun turvalaitteiden tarkkoja sijainteja. Suurin osa mittauksista suoritetaan staattisina GPS-mittauksina, mutta joitain kohteita kartoitetaan myös takymetrillä.

3 Johdatus GPS-mittaukseen

3.1 GPS-järjestelmä

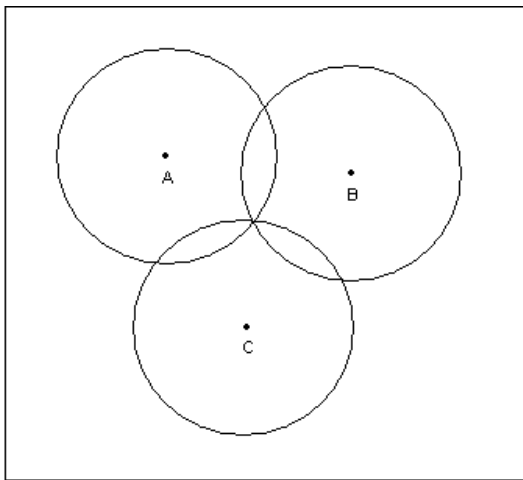
NAVSTAR GPS (NAVigation Satellite Time And Ranging Global Positioning System), on muodostunut yhä tarkemmäksi käsitteeksi niin navigoinnin, paikanmäärittäminen kuin tavallisten ihmistenkin parissa. Se on Yhdysvaltain puolustusministeriön (DoD, Department of Defence) kehittämä ja ylläpitämä satelliittipaikannusjärjestelmä, jolla käyttäjä voi määrittää oman sijaintinsa ja nopeutensa maapallolla 24 h vuorokaudessa. [5, s. 11.]

GPS-järjestelmä on yksisuuntainen, mikä tarkoittaa sitä, että käyttäjän ei tarvitse itse lähettää mitään tietoa sijaintinsa määrittelemiseksi. Järjestelmä on myös säästä riippumaton sekä toimintavarma ja helppokäyttöinen tavallisen ihmisen paikanmäärittästarpeisiin. Paikkatiedon ammattilaiset joutuvat kuitenkin eliminoimaan ja vähentämään satelliittimittauksen virhelähteitä saadakseen geodeettisesti tarkkaa tietoa. GPS on viime vuosina mullistanut sijainninmäärittämisen niin alan ammattilaisille kuin tavallisille ihmisillekin.

NAVSTAR GPS -järjestelmän lisäksi on olemassa ainoastaan yksi toimintakunnossa oleva satelliittipaikannusjärjestelmä, venäläinen GLONASS. Yhdysvaltojen ja Venäjän lisäksi monilla muillakin valtioilla on kuitenkin kehitteillä omia satelliittipaikannusjärjestelmiä. Näitä ovat esimerkiksi eurooppalainen Galileo, intialainen IRNSS sekä kiinalaiset COMPASS ja Beidou. Tässä opinnäytetyössä käsitellään kuitenkin ainoastaan NAVSTAR GPS -järjestelmää. Kaikki viittaukset GPS-järjestelmiin tarkoittavat ensisijaisesti NAVSTAR GPS:ää, ellei erikseen toisin mainita.

3.2 GPS-järjestelmän toimintaperiaate

GPS-paikannus perustuu satelliittietäisyyksien mittaamiseen. Pallotrigonometrian mukaisesti on mahdollista määrittää tuntematon sijainti, jos tiedetään etäisyys kolmeen tunnettuun pisteeseen (kuva 2). Sijaintiratkaisuksi saadaan kuitenkin kaksi pistettä. Näistä toinen voidaan rajata pois laskennallisesti, sillä se sijaitsee joko maapallon sisällä tai avaruudessa.



Kuva 2. Yksinkertaistettu kuva satelliittien A, B ja C etäisyyksien leikkauksista, joiden keskellä vastaanotin sijaitsee.

Satelliitin ja vastaanottimen etäisyys lasketaan radioaallon matkaan kuluneesta ajasta: etäisyys = nopeus x radioaallon kuluaika. Signaalin kuluaika määritetään vertaamalla satelliitin ja vastaanottimen samanaikaisesti muodostamaa identtistä PRN-koodia (pseudorandom number/noise) toisiinsa. Vastaanotin siis etsii GPS-signaalista havaitsemansa PRN-koodin osan itse luomastaan PRN-koodista ja laskee, kuinka kauan aikaa sitten kyseinen kohta luotiin.

GPS-satelliiteissa käytetään tarkkoja atomikelloja aikavirheen minimoimiseksi. Atomikellot ovat myös äärimmäisen vakaita ja kykenevät teoriassa säilyttämään alle yhden sekunnin tarkkuuden kymmenien tuhansien vuosien ajan. Tarkimmatkaan atomikellot eivät voi kuitenkaan koskaan eliminoida ajasta johtuvaa virhettä kokonaan, sillä atomikellot ovat liian kalliita käytettäväksi tavallisissa vastaanottimissa.

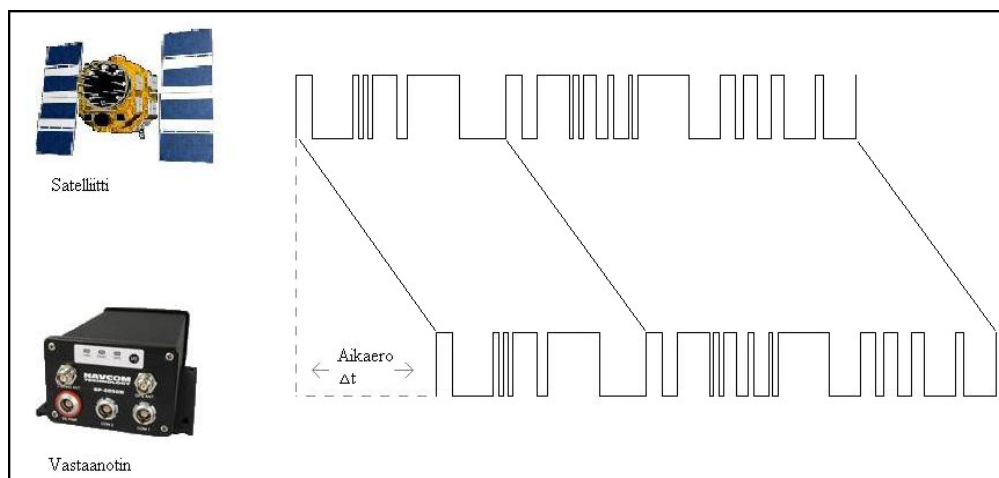
Vaikka vastaanottimen paikan määrittäminen onnistuu teoriassa kolmella satelliitilla, käytännössä tarvitaan kuitenkin yhteensä vielä neljänten satelliitin aikaeron minimoimiseksi. Neljättä etäisyysmittausta käytetään ”tarkistusmittauksena”, jonka avulla voidaan selvittää vastaanottimen kellon ja GPS-ajan välinen ero. [5, s. 11, 21–22.]

3.3 GPS-signaali

3.3.1 C/A- ja P-koodi

GPS-satelliitit lähettävät kahta erilaista paikannussignaalia: Julkista C/A-koodin sisältävää L1-taajuutta (1575,42 MHz) sekä tarkempaa, mutta salattua asevoimien käyttöön tarkoitettua P-koodia L2-taajuudella (1227,60 MHz). C/A-koodiin perustuvaa paikannuspalvelua kutsutaan myös SPS-paikantamiseksi (Standard Positioning Service) ja P-koodiin perustuvaa sotilaspaikantamista PPS-paikantamiseksi (Precise Positioning Service). [5, s. 19; 6.]

Jokainen GPS-satelliitti lähettää omaa uniikkia PRN-koodiaan, jonka perusteella vastaanotin kykenee erottamaan satelliitit toisistaan (kuva 3). PRN-koodien tarkkuus perustuu siihen, että ne täsmäävät tai korreloivat vahvasti keskenään vain silloin kun ne ovat täsmälleen kohdikkain. Satelliittien PRN-koodit on luotu siten, etteivät ne korreloi toistensa kanssa. [5, s. 19; 6.]



Kuva 3. Vastaanotin vertailee PRN-koodeja signaalin kulkuajan määrittämiseksi.

C/A-koodi on 1 023 bittiä pitkä PRN-koodi, joka toistuu millisekunnin välein lähetyksnopeudella 1,023 Mbit/s. P-koodi on samankaltainen kuin C/A-koodi, mutta sen PRN-koodi koostuu 6 187 100 000 000 bitistä, ja se toistuu vain kerran viikossa lähetyksnopeudella 10,23 Mbit/s. [6]

P-koodin C/A-koodia suurempi tarkkuus perustuu sen PRN-koodin suurempaan pituuteen. Suuri pituus mahdollistaa tarkemman korrelaation sekä signaalien että ajan välillä. Käytännössä vastaanotin siis pystyy laskemaan satelliittien etäisyydet tarkemmin kuin C/A-koodia käyttämällä.

Kuten aiemmin mainittiin, P-koodi on salattu. Salaus perustuu P-koodin modulointiin erityisellä salatulla sekvenssillä, W-koodilla, josta syntyy salattu Y-koodi. Satelliittien lähettämän salatun koodin virallinen nimi onkin P(Y)-koodi, vaikka yleensä siitä käytetäänkin lyhyempää nimitystä P-koodi.

3.3.2 GPS-navigaatioviesti

GPS-signaaliin on moduloitu C/A- ja P-koodin lisäksi myös navigaatioviesti (Navigation message). Jotta vastaanotin pystyisi laskemaan sijaintinsa, sen on tiedettävä satelliittien sijainti sekä tarkka aika. Jokainen GPS-satelliitti lähettää jatkuvasti vastaanottimen tarvitsemia tietoja navigaatioviestin muodossa. [6]

Navigaatioviesti koostuu 1 500 bitistä, jotka on jaettu tasaisesti viideksi 300 bitin jaksoksi. Viestin lähetyksnopeus on 50 bit/s, eli koko viestin siirtymiseen menee aikaa 30 sekuntia ja yhden jakson siirtämiseen 6 sekuntia. Navigaatioviestin sisältämät tiedot jakautuvat seuraavasti: [6]

Jakso I: Sisältää GPS-päivämäärän ja -kellonajan sekä satelliittien statuksen ja toimintatilan (käytössä / poissa käytöstä).

Jakso II ja III: Sisältävät yhdistettynä satelliitin ephemeriksen, eli tarkat rataparametrit etäisyyden ratkaisua varten. Satelliitit lähettävät ainoastaan omaa ephemeristietoaan, ja

siksi vastaanottimen on ladattava se erikseen. Ephemeris vanhenee noin neljässä tunnissa.

Jaksot IV ja V: Sisältävät satelliittien almanakan, eli tiedot kaikkien satelliittien karkeasta sijainnista taivaalla, PRN-tunnistenumerot, kellokorjauksen ja ilmakehän viiveparametrit. Almanakan sisältämää tietoa käytetään mittauksen alkuvaiheessa satelliittien nopeaan hakuun, se ilmoittaa satelliittien paikan huomattavasti epätarkemmin kuin ephemeris. Yksi navigaatioviesti sisältää vain 1/25 koko almanakasta, joten sen kokonaan lataamiseen menee siis yhteensä 12,5 minuuttia. Karkean tarkkuutensa vuoksi almanakka vanhenee vasta 180 päivän kuluttua.

3.4 GPS-järjestelmän paikannustarkkuus ja virhetekijät

Tavanomaisella pelkkää C/A-signaalia käyttävällä GPS-vastaanottimella voisi teoriassa päästä noin kolmen metrin tarkkuuteen. Käytännössä kuitenkin mittausympäristöstä, -olosuhteista ja laitteistosta aiheutuvat virheet (kuva 4) heikentävät mittaustarkkuuden noin 15 metrin suuruisiksi. Tämä tarkkuus ei riitä vaativampaan navigointiin (esim. saaristot ja väylät), eikä yleensä ammattimaisiin geodeettisiin mittauksiin. [5, s. 11.]

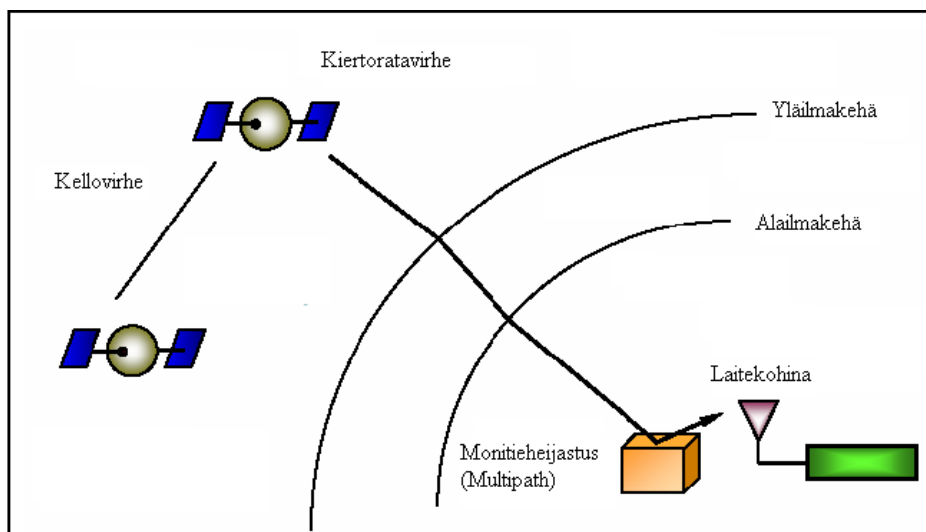
GPS:n suurin yksittäinen virhelähde on signaalin heijastuminen ja hidastuminen yläilmakehässä, jossa pidentynyt matka-aika saa satelliitin ja vastaanottimen etäisyyden näyttämään todellista pidemmältä. Signaalin kulkunopeus hidastuu ilmakehässä, koska se ei ole koostumukseltaan homogeenistä. Alailmakehästä aiheutuu huomattavasti paljon vähemmän virhettä kuin yläilmakehästä.

Seuraavaksi suurimmat virheet aiheutuvat satelliitin epätarkasta ephemeriksestä: maapallon ja kuun vetovoimat aiheuttavat aurinkotuulten ohella pieniä muutoksia satelliittien kiertoratoihin, satelliitit saattavat myös huojua hieman radoillaan.

Satelliittien atomikellojen sisäisen ajan pienikin muuttuminen heikentää heti paikannustarkkuutta, sillä radioaallot etenevät lähes valonnopeudella. Aikadilaatio aiheuttaa sen, että kiertoradalla olevan satelliitin atomikellon aika etenee hieman

nopeammin kuin maanpinnalla. Tämän johdosta kellovirheen minimoimiseksi GPS-satelliittien atomikellot on maanpinnalla laitettu toimimaan kertoimen $4.465 * 10^{-10}$ verran hitaampaa, jotta maapallon kiertoradalla satelliittien sisäinen aika olisi mahdollisimman yhtenevä maassa olevien atomikellojen kanssa. [7]

Ilmakehän ohella GPS-signaali voi heijastua myös mittausympäristöstä. Tällainen monitieheijastumisesta aiheutuva virhe (multipath) on yleensä noin metrin suuruinen, mutta huonossa mittausympäristössä signaali voi heijastua hyvinkin voimakkaasti esimerkiksi rakennusten katoista ja muista heijastavista pinnoista. Sähkölaitteiden käytölle ominainen kohina aiheuttaa myös virhettä mittauksiin. Kuvassa 5 on esimerkkejä virheen jakautumisesta.



Kuva 4. Käyttäjästä riippumattomat virhelähteet [8, s. 35]

-Yläilmakehä	+5,0m
-Ratavirhe	+2,5m
-Kellovirhe	+1,5m
-Multipath	+0,6m
-Alailmakehä	+0,5m
-Laitetekohina	+0,3m

Kuva 5. Esimerkki GPS:n virheen jakautumisesta (URE) [8, s. 36; 9]

Edellä mainitut virheet ovat käyttäjästä riippumattomia. Käyttäjistä aiheutuvat virheet vaihtelevat luonnollisesti niin suuruudeltaan kuin lukumäärältäänkin. *Karkeaksi virheeksi* kutsutaan kertaluontoista virhettä, kuten mittalaitteen sijoittamista väärään paikkaan tai kirjausvirhettä. *Systemaattinen virhe* toistuu joka mittauksella aina saman suuruisena, mikä aiheutuu esimerkiksi virheellisestä mittaustavasta tai mittalaitteen/-ohjelman vääristä asetuksista.

Käyttäjistä johtuvia virheitä voidaan välttää riittävillä teorian- ja käytännöntaitojen hallinnalla sekä luonnollisesti huolellisuudella.

Yhdysvaltain armeija kykenee häiritsemään siviilien käyttöön tarkoitettua C/A-signaalia ja täten heikentämään GPS:n tarkkuutta. Tekniikka tunnetaan nimellä Selective Availability (SA), ja sillä voidaan tuottaa sijaintiin suurimmillaan jopa 100 m:n virhe. Häirinnän tarkoitus oli estää vihollista käyttämästä GPS-järjestelmää USA:ta ja sen liittolaisia vastaan.

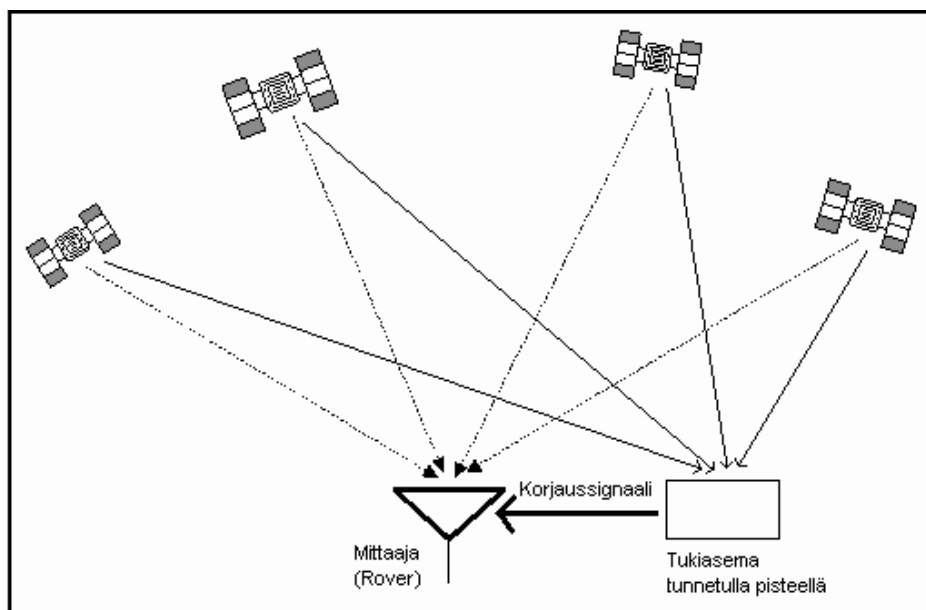
SA-häirintä lopetettiin presidentti Bill Clintonin toimesta 01.05.2000, mutta halutessaan Yhdysvaltain armeija kykenee ottamaan SA:n uudestaan käyttöön koska tahansa. 19.09.2007 Yhdysvaltain puolustusministeriö ilmoitti, että tulevaisuudessa käyttöön tulevissa GPS III -satelliiteissa ei tule olemaan SA-ominaisuutta.

3.5 NAVSTAR GPS -satelliitit

NAVSTAR GPS -satelliittikonstellaatio koostu aina vähintään 24 GPS-signaalia lähettävästä NAVSTAR-satelliitista sekä lisäksi vaihtelevasta määrästä näiden varasatelliitteja. Tällä hetkellä maapalloa kiertää yhteensä 31 kappaletta Block2-sarjan satelliittia. Niiden kiertoradat on valittu siten, että teoriassa vähintään kuusi satelliittia on havaittavissa missä päin tahansa maapalloa ajankohdasta riippumatta. [10]

3.6 DGPS

Differentiaalinen paikannus (DGPS, kuva 6) on mittaustapa, jossa liikkuvan (”mittaavan”) ns. rover GPS -vastaanottimen tueksi perustetaan tunnetulle pisteelle tukiasema (referenssiasema). Tukiasema lähettää vastaanottimelle (rover) havaitsemiensa satelliittien mitattujen pseudoetäisyyksien sekä tunnetun pisteen tarkan sijainnin pohjalta laskettujen pseudoetäisyyksien erotuksen. Näin voidaan poistaa lähes kokonaan kaikki ne virheet, jotka lähekkäisillä vastaanottimilla esiintyvät samansuuruisina. Tyypillisimmät virheet, joita DGPS:n avulla voidaan korjata, ovat satelliitin kiertoradasta, kellovirheestä sekä ylä- ja alailmakehästä johtuvat virheet. [5, s. 202.]



Kuva 6. DGPS-järjestelmän toiminta [11].

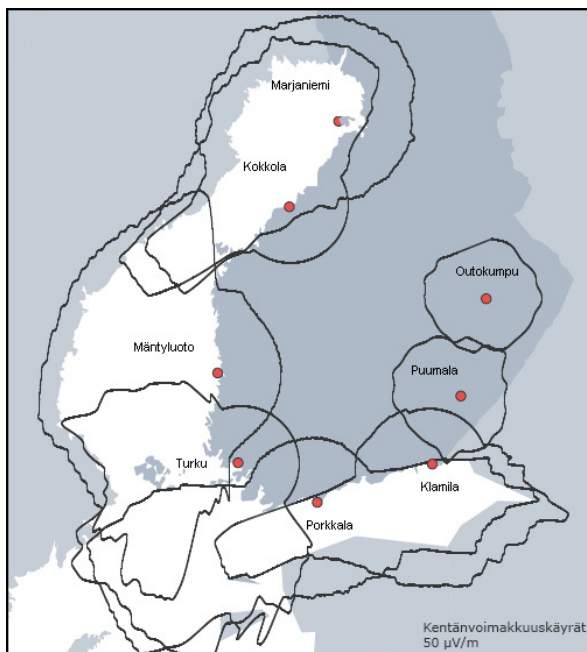
3.6.1 DGPS-järjestelmän virhetekijät

DGPS:ää käytettäessä on huomioitava, että mittaus tapahtuu riittävän lähellä tukiasemaa. Mitä kauempana tukiasemasta mitataan, sitä enemmän mittaustarkkuus kärsii ilmakehän paikallisten ominaisuuksien muuttuessa. Myös tukiaseman korjaussignaalin kantama ja kuuluvuus asettavat rajoituksia mittaukselle. Tavallisimmat DGPS-sovellutukset voivat olla erityisen hankalia käyttää alueilla, joilla on rajoitettu näkyvyys

taivaalle, sillä ne edellyttävät, että tukiasema sekä rover-vastaanotin pystyvät havaitsemaan samoja satelliitteja yhtäaikaaisesti. DGPS:n muihin huonoihin puoliin kuuluu myös ylimääräisen tukiaseman perustamisen ja ylläpidon vaatima aika ja raha. Tukiaseman perustaminen ei myöskään aina ole käytännöllistä tai edes mahdollista kaikissa olosuhteissa. [5, s. 202–203.]

3.6.2 Merenkulkulaitoksen DGNSS

Merenkulkulaitos tarjoaa satelliittinavigoinnin tueksi ilmaisen DGNSS-palvelun (Differential Global Navigation Satellite System) Suomen aluevesillä. Palvelulle luvataan 10 m parempaa tarkkuutta, 95 % ajasta. Käytännössä tarkkuus on 1–2 metrin luokkaa. Järjestelmä koostuu nykyisin kahdeksasta radioasemasta (kuva 7), jotka sijoitettu niin että suurin osa rannikosta on ns. kaksoispeittoaluetta, jolloin korjaussignaali on kuultavissa samanaikaisesti vähintään kahdelta eri radioasemalta. Palvelun käyttämistä varten tarvitaan GPS-vastaanottimen lisäksi korjaussignaalin vastaanottamiseen soveltuva ns. beacon-vastaanotin [12]



Kuva 7. Merenkulkulaitoksen DGNSS-järjestelmän radioasemat [Merenkulkulaitos]

4 StarFire RTG

4.1 Lyhyesti

StarFire RTG on maailmanlaajuinen WADGPS (Wide Area Differential GPS) järjestelmä, joka välittää luomaansa korjaussignaalia GPS-vastaanottimille INMARSAT-satelliittien välityksellä vuorokauden jokaisena hetkenä kaikkialle maailmassa, lukuunottamatta pohjois- ja etelänapaa. Palvelun tarjoaja NavCom lupaa käyttäjälle parempaa kuin 0.1 metrin horisontaalista ja 0.15 metrin vertikaalista reaaliaikaista mittaustarkkuutta. Palvelu vaatii toimiakseen StarFire RTG -yhteensopivan kaksitaajuus GPS-vastaanottimen. [13]

Tässä opinnäytetyössä käsitellään ainoastaan StarFiren RTG-mittaustilaa. Kaikki viittaukset StarFire-mittauksiin tarkoittavat ensisijaisesti kaksitaajuus RTG-mittausta.

4.2 Syntyhistoria

StarFiren kehittäminen juontuu vuoteen 1994, jolloin John Deere-yhtiön insinöörit miettivät kokouksessaan tulevaisuuden kehityssuuntia. GPS-vastaanottimien ja viljalaskurien yhdistäminen peltojen tuoton mittaamiseksi vaikutti lupaavalta. Kuitenkin GPS:n tarkkuus ei ollut SA-häirinnän johdosta vielä tuolloin riittävä käytännöllisten karttojen tuottamiseksi.

1997 perustettiin ryhmä, jonka tehtävä oli ratkaista, kuinka GPS:n tarkkuutta voitaisiin parantaa. John Deeren oman insinööriryhmän lisäksi projektiin ottivat osaa Standfordin yliopisto sekä erityisesti NASA:n Jet Propulsion Laboratory (JPL). Ryhmä alkoi rakentaa täysin uudenlaista DGPS-paikannusjärjestelmää, joka ei ainoastaan korjaa SA-häirinnästä aiheutuvaa virhettä vaan myös muita satelliittimittauksen globaaleja sekä paikallisia virhelähteitä reaaliajassa. [13]

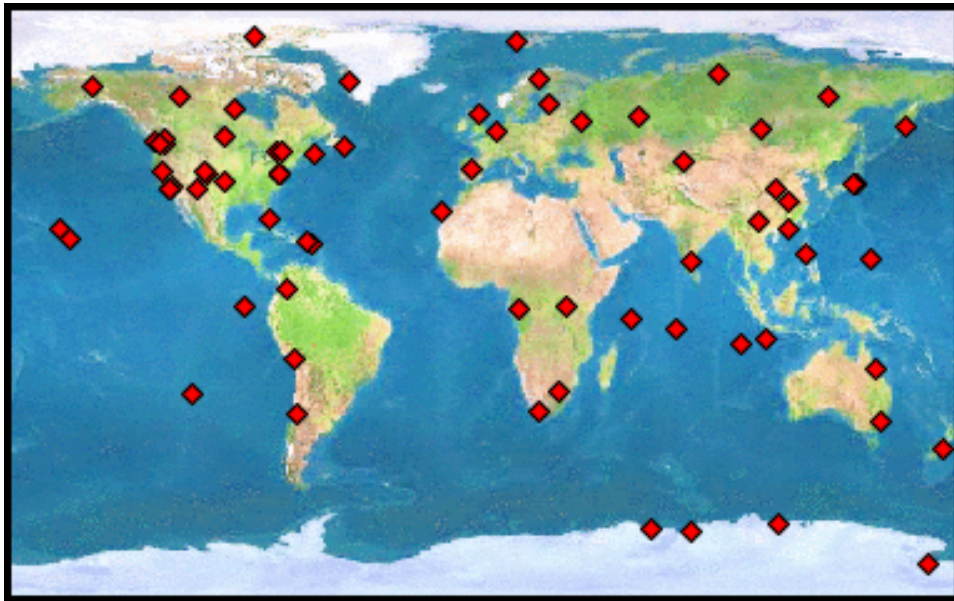
4.3 Taustatietoa

StarFire sekä StarFire RTG ovat John Deere Companyn omistaman NavComin tuotenimiä. NavCom on lisensoinut laskentakeskuksissaan käytettävän GPS-satelliittien kiertorata- ja kellovirheitä korjaavan RTG-algoritmin (Real Time GPS Inferred Positioning System, kutsutaan myös Real Time GIPSY) Jet Propulsion Laboratoryltä. JPL vastaa edelleen algoritmin kehittämisestä. Korjaussignaalin välitysjärjestelmän ylläpitämisestä sekä kehittämisestä vastaa puolestaan NavCom.

NavCom myös valmistaa StarFire-yhteensopivat kaksitaajuus-GPS-vastaanottimet. StarFire-palvelua ja sitä hyödyntäviä GPS-vastaanottimia myydään kahden eri yrityksen toimesta. Suurin osa NavCom/John Deeren asiakkaista toimii maankamaralla, etenkin maatalouden parissa, kun taas C&C Technologiesilla on yksinoikeus tarjota StarFireä merellä tapahtuvaan paikantamiseen. C&C Technologiesilla ei ole kuitenkaan oikeutta käyttää StarFire-nimeä, vaan se kutsuu sitä C-Nav tuoteperheensä mukaisesti nimellä C-Nav GcGPS (Globally Corrected GPS). Aiemmin palvelu on tunnettu mm. nimillä C-Nav Precise Point Positioning sekä C-Nav Positioning System. Kaikki C-Nav-vastaanottimet ovat NavComin valmistamia ja C&C Technologiesin pakkaamia. [14; 15.]

StarFire-järjestelmää ei pidä sekoittaa JPL:n omaan Globally Differential GPS (GDGPS) järjestelmään. Järjestelmä on kehitetty vastaamaan NASA:n omia satelliittipaikannustarpeita. Koska JPL on RTG-algoritmin kehittäjä, on GDGPS:ssä käytössä aina hieman kehittyneempi versio algoritmista. RTG-prosessointia varten JPL omistaa kolme omaa laskentakeskusta (GDGPS Operation Center, GOC). Nämä GOCit eivät kuitenkaan voi välittää GDGPS-korjauksia satelliitin välityksellä ympäri maapalloa kuten StarFire voi, vaan reaaliaikainen korjausten välittäminen tapahtuu vain internetin välityksellä.

GDGPS:n käyttämä tukiasemaverkko on maailman suurin referenssiverkko, se sisältää NASA:n oman Global GPS Networkin (GGN. kuva 8) 70 referenssiaseman ja yhteistyökumppaneiden referenssiasemat yhteenlaskettuna yli sata tukiasemaa (lokakuu 2006). [15; 16.]



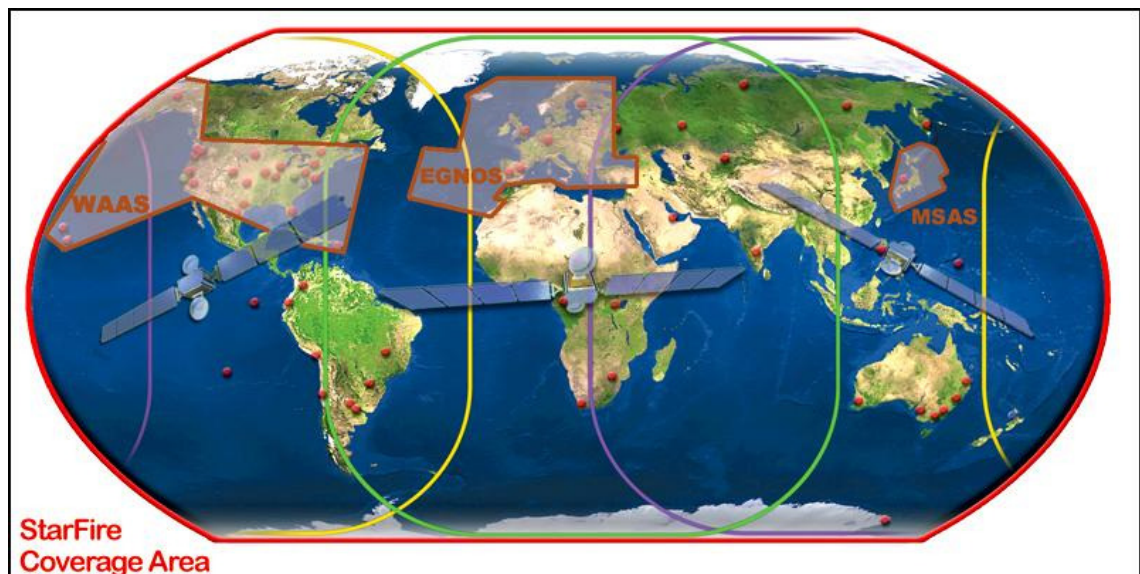
Kuva 8. NASA Global GPS Network (GGN), lokakuu 2006 [16]

4.4 Toimintakuvaus

StarFire RTG -korjaus perustuu NavComin ja JPL:n rakentamaan maailmanlaajuiseen 66 referenssiaseman verkkoon (kuva 9), joka havaitsee GPS-satelliitteja koko ajan ympäri vuorokauden. Jokaista satelliittia havaitsee jatkuvasti vähintään seitsemän eri referenssiasemaa. Havaittu GPS-data lähetetään internetin välityksellä kahteen Yhdysvalloissa sijaitsevaan laskentakeskukseen, joissa JPL:n luoma RTG-korjausalgoritmi ratkaisee havaintojen pohjalta jokaiselle GPS-satelliitille oman kiertorata- sekä kellokorjauksen. Korjaukset lähetetään LES-asetille (Land Earth Station), joista ne välitetään edelleen geostationaarisella radalla sijaitseville INMARSAT-tietoliikennesatelliiteille ja näiden kautta StarFire-palvelun tilaajan GPS-vastaanottimeen L-taajuudella (L-Band, 1–2 GHz).

Käyttäkseen StarFire RTG -korjausta käyttäjä tarvitsee StarFire RTG -yhteensopivan vastaanotimen sekä kolmitaajuusantennin. Edellä mainitun korjaussignaalin lisäksi antennin on kyettävä havaitsemaan L1- ja L2-taajuuksia, joita keskenään vertaamalla vastaanotin pystyy ratkaisemaan paikallisen yläilmakehästä johtuvan virheen.

StarFire-palvelun käyttö edellyttää maksullisen käyttölisenssin. [6; 13; 17, s.7; 18. s. 2]



Kuva 9. StarFire-palvelun referenssiasemat (2008) sekä korjaussignaalin näkyvyys [13].

4.5 StarFire RTG -korjaukset

StarFire RTG korjaa monia tavallisen GPS-paikannuksen virheitä joko osittain tai lähes kokonaan. Kehittyneen vastaanottimen ansiosta kaikkia korjaustietoja ei tarvitse lähettää StarFire-korjaussignaalissa, vaan vastaanotin kykenee ratkaisemaan ne itse mittaushetkellä (kuva 10).

Korjaus	Toteutus
Satelliitin kiertorata	RTG-korjaus minuutin välein
Satelliitin kellokorjaus	RTG-korjaus 1–2 sekunnin välein
Yläilmakehä (ionosfääri)	NavCom L1/L2 vastaanotinteknologia
Alailmakehä (troposfääri)	UNV WAAS -malli (Mendes 1999)
Heijastukset (multi-path)	Multi-Path Mitigation -ohjelma ja antennitekniologia
Vastaanottimen sisäinen virhe	NavCom L1/L2/L-taajuus -vastaanotinlaitteisto
Maanpinnan vuoksi-ilmiö (earth tide)	Vastaanottimen sisäinen Sinko-malli ja algoritmi

Kuva 10. StarFire RTG:n korjaukset ja niiden toteutus.

Satelliitin kiertorata – Kiertoratavirhe johtuu siitä, ettei satelliitti ole tarkalleen ephemeriksen osoittamassa paikassa (ks. 3.2.1). StarFire-järjestelmä lähettää vastaanottimelle minuutin välein laskentakeskuksen luomat GPS-satelliittien sijaintikorjaukset.

Satelliitin kellokorjaus – Pienikin kellovirhe GPS-satelliitin atomikellossa voi saada aikaan hyvinkin suuren sijaintivirheen (ks. 3.2.1), siksi kellovirheen RTG-korjaus tehdään noin kahden sekunnin välein. Kellokorjaus perustuu kiertoratakorjauksen tavoin referenssiasemista saatavan suuren havaintojoukon RTG-laskentaan. [18, s. 2.]

Yläilmakehä – Kaksitaajuusvastaanotin kykenee sisäisesti eliminoimaan yläilmakehästä johtuvan virheen lähes kokonaan. Tämä tapahtuu vertaamalla L1- ja L2-taajuuksilla lähetettävän P(Y)-sotilaskoodin vaihemuutosta keskenään. P(Y)-koodi on salattu, mutta se ei haittaa StarFire RTG -mittauksia, koska koodin sisältämää salattua tietoa ei tarvita. [19, s. 1–2, 5–6.]

Alailmakehä – Virheitä korjataan Mendes 1999 -alailmakehämallista kehitetyllä UNB WAAS -mallilla. Tämä on kehitetty alun perin Yhdysvaltojen ilmailulaitoksen FAA:n

(Federal Aviation Administration) rakentaman lentoliikenteen avuksi tarkoitettun WAAS-järjestelmän (Wide Area Augmentation System) alailmakehämalliksi New Brunswickin yliopistolla. Vastaanotin suorittaa korjauksen automaattisesti, eikä sitä voi muuttaa tai kytkeä pois. [20]

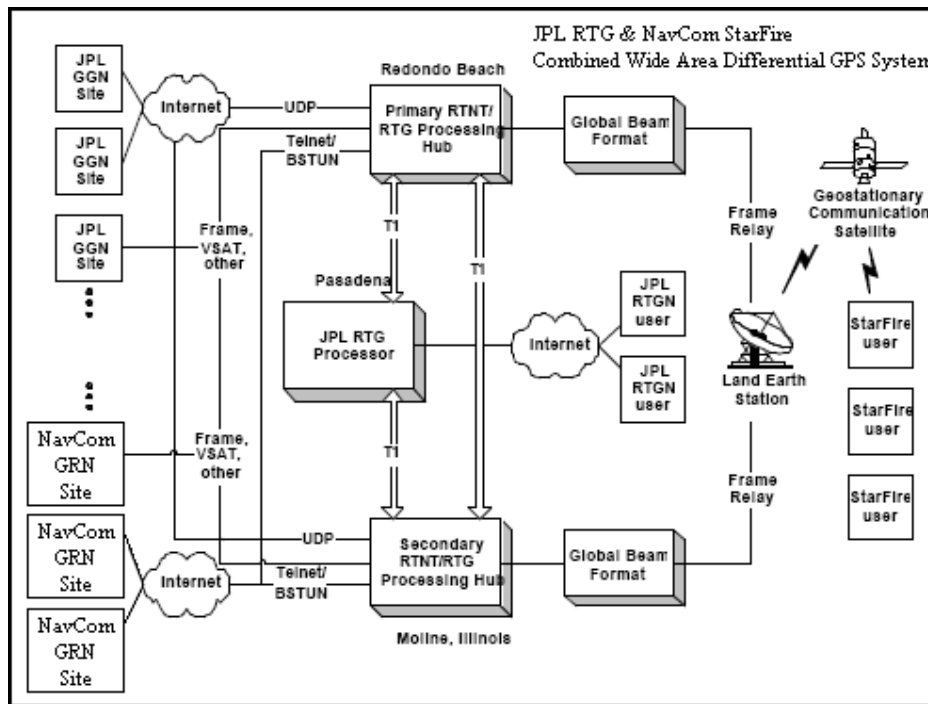
Heijastukset – Monitieheijastukset minimoidaan antennin muotoilulla sekä vastaanottimen sisäisellä Multi-Path Mitigation -pseudoetäisyyden tasoituksella. Tasoitus perustuu L1- ja L2-taajuuksien vertaamiseen kuten yläilmakehästäkin johtuvan virheen poistaminen. Menetelmä perustuu NavComin kehittämiin algoritmeihin. Nämä ovat automaattisesti aina käytössä, eivätkä ole käyttäjän muokattavissa. [21, s. 5.]

Vastaanottimen sisäinen virhe – Vastaanottimesta johtuvat virheet minimoidaan laitteiston valmistuksen ja ohjelmistojen tiukalla laadunvalvonnalla. Vastaanotinten laadullinen tasaisuus voidaan taata sillä, että John Deerellä on yksinoikeus valmistukseen. Myös käytetyt ohjelmat ja ajurit tehdään kaikki saman yritysryhmän sisällä, jolloin mahdolliset puutteet ja virheet voidaan korjata päivityksellä hyvin nopeasti.

Maanpinnan vuoksi-ilmiö – Ilmiöllä tarkoitetaan kuun ja auringon vetovoimien aiheuttamaa maanpinnan liikettä (SET, Solid Earth Tide). Vuoksi-ilmiö on huomioitu laskentakeskusten RTG-algoritmissä. Lisäksi vastaanottiin ja StarFire navigaatio-ohjelmiin on sisällytetty muunnettu versio James Sinkon vuonna 1995 tekemästä maanpinnan vuoksi-ilmiömallista. Muutoksilla nopeutettiin ja yksinkertaistettiin mallin laskentaa. Käyttäjä voi valita, käyttääkö SET-korjausta vai ei. [22, s. 9–10.]

4.6 StarFire RTG -järjestelmän rakenne

Kuva 11 esittää rakennekuvan StarFire RTG:n ja JPL:n GDGPS:n toiminnasta. Kuvassa 12 ovat StarFire RTG:n pääsegmentit.



Kuva 11. StarFire RTG:n ja JPL:n GDGPS-järjestelmien toimintarakente [23, s. 2].



Kuva 12. StarFire-järjestelmän neljä pääsegmenttiä.

4.6.1 Maasegmentti

Maasegmentti koostuu maailmanlaajuisesta GPS-referenssiasemaverkosta. Vuoden 2008 alussa toimivia referenssiasemia oli 66 kappaletta, ja vuoden loppuun mennessä on suunniteltu lisäävän ainakin neljä uutta asemaa. StarFire-referenssiasemista 31 kuuluu JPL:n operoimaan NASA Global GPS Networkiin (GGN). Loput referenssiasemista kuuluvat NavComin rakentamaan ja ylläpitämään Starfire Ground Reference Networkiin (GRN). [24; 19, s. 3; 25, s. 3.]

NavComin referenssiasemilla käytetään kahta NCT-2100D GPS L1-/L2 -vastaanotinta, jotka on kytketty yhteiseen choke ring -antenniin monitieheijastusten (multipathing) minimoimiseksi. Lisäksi referenssiasemille on tarpeen mukaan sijoitettu yksi tai useampia liikettä kompensoivia StarFire iTC (integrated Terrain Compensation) GPS -vastaanottimia, joiden tehtävä on valvoa järjestelmän suorituskykyä ja StarFire-korjaussignaalin voimakkuutta käyttäjän näkökulmasta. ITC-vastaanotinyksiköitä kutsutaan myös valvontayksiköiksi (monitor units). [18; 25; 26.]

Satelliittihavaintojen sekä tukiasemien ja kaksitaajuisten GPS-vastaanottimien suuren lukumäärän luvataan tekevän StarFire-järjestelmästä paitsi äärimmäisen tarkan, myös hyvin toimintavarman.

Referenssiasemien sijainnit on valittu tarkkaan sekä verkkogeometriaa että aseman turvallisuutta ja GPS-näkyvyyttä ajatellen. Jokaisella referenssiasemalla on varavirranlähde sekä vähintään kaksi erilaista datayhteyttä laskentakeskuksiin (kontrollisegmentti). Datayhteyksien toteutus riippuu referenssiaseman sijainnista, yleisimmät ovat: internetyhteys, lankapuhelinyhteys, Frame Relay ja VSAT-satelliittiyhteys. [18, s. 3; 25, s. 3.]

NavComin suorittamat testit, sekä järjestelmän käyttöhistoria ovat osoittaneet, että referenssiasemat ovat hyvin toimintavarmoja, eikä simuloituissa testeissä havaittu mittaustarkkuuden heikkenemistä edes useamman referenssiaseman vioittuessa samanaikaisesti. [19, s. 4.]

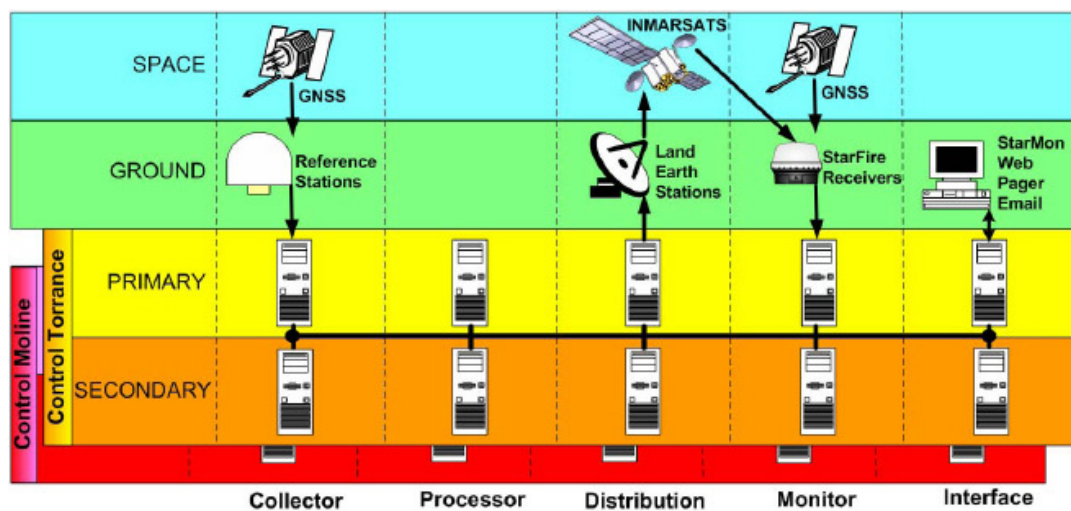
4.6.2 Kontrollisegmentti

Kontrollisegmentti koostuu kahdesta itsenäisestä laskentakeskuksesta (Control Center/Processing Hub). Yksi laskentakeskus sijaitsee NavCom:in pääkonttorissa Torrancessa, Kaliforniassa. Toinen puolestaan sijaitsee John Deeren pääkonttorissa Molinessa, Illinoisissa.

Referenssiasemien lähettämä tieto saapuu laskentakeskuksiin yleensä alle kahden sekunnin viiveellä. Laskentakeskusten välille on rakennettu nopeat tietoliikenneyhteydet sekä yhteys JPL:n omaan laskentakeskukseen, joka kykenee tarvittaessa toimimaan lisävarmistuksena ongelmatilanteissa.

Molemmilla laskentakeskuksilla on kaksi erillistä tuotantolinjaa – primääri ja sekundääri. Laskenta tapahtuu molemmissa laskentakeskuksissa täysin itsenäisesti, tuloksena saadaan siten neljä erilaista korjausarvokokonaisuutta. [18, s. 4; 25, s. 4]

Korjaussignaalin prosessointi tapahtuu seuraavien osavaiheiden (kuva 13) kautta:



Kuva 13. Tiedonsiirtyminen ja korjaussignaalin prosessoinnin osavaiheet [18, s. 4].

Kerääjät (Collectors) hallitsevat data- ja kommunikaatioyhteyksiä referenssiasemiin sekä keräävät niistä havaintotiedot prosessoijille.

Prosessoijat (*Processors*) ovat RTG-algoritmiä suorittavia kaksiytimisiä Pentium-tietokoneita. Eri tuotantolinjojen prosessoijat laskevat aina satelliittien samanhetkistä sijaintia yhtä aikaa.

Kellovirheen prosessointi on optimoitu äärimmäisen nopeasti laskettavaksi. Vaikka havaintoja kerätään kuuden sekunnin ajalta puskuriksi, lasketaan korjaus kuitenkin yhden sekunnin välein. Prosessissa käytetyt tukiasemat valitaan vallitsevan atomifrekvenssistandardin mukaisesti. Satelliittien kiertoratakorjaus lasketaan minuutin välein ja siinä hyödynnetään aina kaikkia toimivia referenssiasemia.

Jakelu (*Distribution*) päättää, minkä tuotantolinjan korjauksia tullaan käyttämään, ja hallitsee laskentakeskuksen ja kuuden LES-aseman välisiä tietoliikenneyhteyksiä.

Valvojat (*Monitors*) seuraavat koko ajan StarFiren infrastruktuurin ja laitteiden toimintaa. Lisäksi strategisesti referenssiasemille sijoitetut StarFire iTC -vastaanottimet välittävät valvontajärjestelmälle tietoa korjaussignaalin voimakkuudesta ja geodeettisesta tarkkuudesta.

Käyttöliittymä (*Interface*) ilmoittaa järjestelmän suoritus- sekä kontrolliarvot ja arkistoi ne. Havaitessaan tarkkuustoleranssien ylittymisen tai muun virheen StarMon-ohjelma luo automaattisen virheilmoituksen ja lähettää sen työvuorossa oleville kunnossapitoinsinööreille sähköpostin ja hakulaitteen avulla.

4.6.3 Avaruussegmentti

StarFiren avaruussegmentti koostuu kuudesta geostationaarisella kiertoradalla olevasta INMARSAT-tietoliikennesatelliitista. Nämä välittävät LES-asemista vastaanottamaansa RTG-korjaussignaalia L-taajuusalueella (1–2 GHz) alueelle, joka kattaa leveyspiirien 75° N ja 75° S väliin jäävän alueen.

INMARSAT-satelliittikonstellaatio on jaettu kahdeksi erilliseksi kolmen satelliitin ryhmäksi: NET-1 ja NET-2 (kuva 14). Jokaista INMARSAT-satelliittia varten on oma

LES-asema. LES-asemilla on nopeat kaapeli-, VSAT- ja ISDN -yhteydet molempiin laskentakeskuksiin. NET-1 ja NET-2 saavat korjaukset eri laskentakeskuksista.

LES-asemat vastaanottavat ja tarkistavat laskentakeskuksista saapuvat korjaukset itsenäisesti, minkä jälkeen automatiikka valitsee korjausmuunnokset lähetettäväksi LES-aseman kohteena olevalle INMARSAT-satelliitille. [18, s. 7–8; 25, s. 7–8]

Land Earth Station	Satelliitin pituusaste	Verkko
Laurentides, Kanada	98°W	NET-1
Berum, NL	25°E	NET-1
Perth, WA	109°E	NET-1
Santa Paula, CA, USA	142°W	NET-2
Southbury, Cn, USA	15,5°W	NET-2
Auckland, NZ	143.5°E	NET-2

Kuva 14. LES-asemien ja INMARSAT-satelliittien sijainnit.

4.6.4 Käyttäjäsegmentti

StarFire-vastaanottimessa on kolme ydinosa: Touchstone 4 ASIC precise GPS L1-/L2 -vastaanotinsiru, L-taajuusvastaanotin korjaussignaaliille sekä tri-band-antenni L1-/L2-/L-taajuuskaistojen vastaanottamiseksi. [25, s. 8]

RTG-algoritmi käyttää Kalman-suodatinta vastaanottimen ja satelliitin välisen kanavan sekä GPS-signaalien vaihekoodien sisältämien poikkeamien ja epäselvyyksien selvittämiseksi. Sijainti selviää sen jälkeen käyttämällä pienimmän neliösumman menetelmän apuna vaihetasoitettua refraktiota (phase-smoothed refraction) sekä korjattuja koodin havaintokohtia (bias-corrected code observables). [25, s. 8.]

StarFire-palvelua käyttää maailmanlaajuisesti yli 40 000 käyttäjää (toukokuu 2008).

4.7 StarFire RTG:n koordinaatisto

StarFire:n referenssiverkkon tukiasemien sijainnit on määritelty ITRF 2005 (International Terrestrial Reference Frame) -realisaatiossa. StarFire-vastaanottimen tuottama sijaintitieto on heti käytettävissä, mutta käyttäjän on syytä huomioida, että ITRF 2005:n ja yleisesti GPS:n kanssa käytetyn WGS 84:n sijainneissa on jonkin verran eroa. Muunnettaessa ITRF 2005 johonkin toiseen paikkatietorealisaatioon, tuleekin huomioida ITRF 2005:n neljäs ulottuvuus: aika. Mannerlaattojen liikkuminen ja Suomessa myös maankohoaminen vaikeuttavat ITRF 2005 -koordinaattien muunnostyötä paikalliseen järjestelmään. [25, s. 9–10.]

5 Testauksen järjestäminen

5.1 Testauksen suunnittelu

Lähtökohtaisesti testauksen piti sujua hyvin suoraviivaisesti. Aluksi oli tarkoitus tutustua C-Nav-laitteistoon ja testata StarFire RTG -korjauspalvelun toiminta- sekä suorituskykyä staattisessa mittauksessa eri asetuksilla. Tähän ensimmäiseen testausvaiheeseen arvioitiin kuluvan kaiken mennessä hyvin ehkä kolmesta neljään viikkoa, minkä jälkeen voitaisiin siirtyä loppuajaksi testaamaan C-Navin kinemaattista tarkkuutta autossa, sekä varsinaisessa käyttökohteessa eli mittausaluksessa.

5.2 Testauslaitteisto

Testauslaitteisto koostui C-Nav 2050M GPS -laitteesta, NavComin valmistamasta tri-band-antennista, C-NaviGator kontrolli- ja näyttöpäätteestä sekä mittausdatan tallentamiseen käytetystä tietokoneesta (kuvat 15–16).



Kuva 15. Testikaluston ”sisälaitteet” Ilmalan vesitornilla, kuvassa vasemmalta lukien: kannettava tietokone, C-NaviGator, C-Nav 2050M ”blackbox”. Kuvan oikeassa laidassa oleva antennijohto vie katolla olevaan antenniin.



Kuva 16. Testikaluston ”ulkolaitteet”, eli antenni, antennijohto, kolmijalka sekä kolmijalan alusta. Kuvauspaikka Helsinki City West Holiday Inn -hotellin katto.

Yllä mainitun varsinaisen testikaluston lisäksi käytössä oli myös VRS-laitteisto C-Navin staattisessa testauksessa käytettyjen pisteiden tarkkojen EUREF-FIN-koordinaattien määrittämiseksi.

5.3 Testauksessa tallennettava mittausdata

Testauksen aikana mittalaitteilla tallennettiin kahdentyyppistä dataa: NMEA-formaatin mukaisia viestejä ASCII-muodossa sekä laitevalmistajan omassa binääriformaattissa olevaa vaihedataa.

Testauksen alussa tallennettiin ainoastaan NMEA GGA -viestiä, mutta pian kävi selväksi, että tarvittiin tarkempaa tietoa havaituista satelliiteista ja ryhdyttiin tallentamaan myös sijaintihavainnossa käytetyt satelliitit yksilöivää GSA-viestiä. [27]

Binäärimuodossa oleva vaihedata olisi sisältänyt paljon kiinnostavia tietoja, mutta valitettavasti sen avaamiseksi ei ollut saatavilla ohjelmaa. Näitä tiedostoja lähetettiin kuitenkin useaan otteeseen C&C Technologiesin C-Nav Support -palveluun

mittausdatan tarkempaa analysointia varten mm. virhelähteiden löytämiseksi ongelmatilanteissa. Näiden tiedostojen koko oli yleensä 15–20 kertaa suurempi (n. 39 MB / 24 h) kuin GGA- ja GSA-viestejä sisältävä ASCII-tiedosto (n. 0,2-0,3 MB / 24 h).

5.4 Testaustulosten käsittelyssä käytetyt ohjelmat

Mittaustulosten käsittelyssä käytettiin pääasiallisesti kolmea ohjelmaa: Excel, Notepad ja Maanmittauslaitoksen ”EUREFMuunnos”-koordinaattimuunnos-ohjelmaa. [28]

Tämän insinööriyön tekeminen havainnollisti hyvin Excelin heikkoudet käsiteltäessä suurikokoisia tiedostoja. Suurimpia puutteita oli kolme, ja ne vaativat pisteaineistojen käsittelyssä erityistä huomiota.

Ensimmäiseksi, Exceliin pystyy tuomaan sisään kerralla korkeintaan 65 536 riviä. Toiseksi, Excelin kuvaajien yksittäiset ryhmät voivat koostua korkeintaan 32 000 pisteestä, eikä Excel myöskään varoita millään tavalla tämän pistemäärän ylittymisestä. Kolmanneksi, Excelin funktiot eivät osaa käsitellä isoja lukuja sellaisinaan, vaan pyöristelevät niitä automaattisesti – tämän vuoksi koordinaateista on poistettava esimerkiksi yli sadan metrin olevat numerot.

5.5 Testauksessa käytetyt koordinaatistot

Kuten kappaleessa 4.7 mainittiin, StarFire RTG perustuu ITRF 2005 -koordinaatistossa määriteltyyn referenssi verkkoon. ITRF 2005:n ja EUREF-FINin välille ei ole määritelty virallisia muunnosparametrejä. Testauksen kannalta olisi ollut parasta, jos mittaustulokset olisi saatu muunnettua EUREF-FIN-koordinaateiksi, sillä tällöin vertailu VRS:llä saatuihin EUREF-FIN-koordinaatteihin olisi ollut yksinkertaista. [29]

Geodeettiselta laitokselta saatiin tieto, että ITRF:n ja EUREF-FINin kanta-koordinaatiston ETRF:n eri vuosieepokkien välille olisi kyllä olemassa muunnosparametrit – mutta ne eivät huomioi ollenkaan mm. Skandinaviassa tapahtuvaa maannousua. [29]

Muunnostyöhön ei siksi ryhdytty sen monimutkaisuuden ja epäselvän hyödyn vuoksi. Sen sijaan testaamisessa päätettiin keskittyä selvittämään testilaitteen varsinaista tarkkuutta. Mittauksissa saadut ITRF 2005 -koordinaatit muunnettiin ”EUREFMuunnos”-ohjelmalla maantieteellisistä koordinaateista suorakulmaiseen KKJ-koordinaatistoon tulkinnan helpottamiseksi. Kuvassa 17 on lyhyesti yleistä tietoa testauksen kannalta oleellisista koordinaatistoista.

Koordinaatistojärjestelmistä yleisesti		
	ITRF 2005	Vuoden 2005 maailmanlaajuisen ITRS -koordinaatistojärjestelmän realisaatio, johon StarFire RTG perustuu.
ITRF 2005 - EUREF-FIN muunnosta ei ollut saatavilla, joten "EUREFMuunnos"-ohjelmalla koordinaatit muunnettiin ITRF 2005:sta suoraan KKJ:hin.	ETRS 89	Eurooppalainen koordinaatistojärjestelmä, joka yhtyy kansainväliseen ITRS-järjestelmään eepokkivuonna 1989.
	EUREF 89	ETRS 89:n realisaatio. Koordinaatit eivät muutu ajan myötä toisin kuin ITRS:ssä, sillä pisteet sijaitsevat samalla mannerlaatalla.
	EUREF-FIN	EUREF 89:n realisaatio ja pistetihennys Suomen alueella.
	KKJ	Kartastokoordinaatistojärjestelmä, perustuu Hayfordin vertausellipsoidiin.

Kuva 17. Yleistä tietoa koordinaatistojärjestelmistä [30].

6 Testauksen suorittaminen

6.1 Testauspaikka I: Merenkululaitoksen toimiston katto

6.1.1 Testauksen aloittaminen

Staattisen mittaustarkkuuden testaaminen aloitettiin Merenkululaitoksen Porkkalankadun toimiston katolta (kuva 18). Katolla sijaitsee jo ennestään tunnettu EUREF-FIN-kiintopiste, jolla on suoritettu GPS-mittauksia aiemminkin. Testaus aloitettiin 11.06.2008.

Testilaitteiston sisälle tulevien laitteiden sijoittaminen oli helppoa, sillä ilmastointihuoneen seinään oli porattu valmiiksi reikä katolla tehtävien GPS-mittausten antennijohtoja varten sähköpistokkeen viereen (kuva 19).



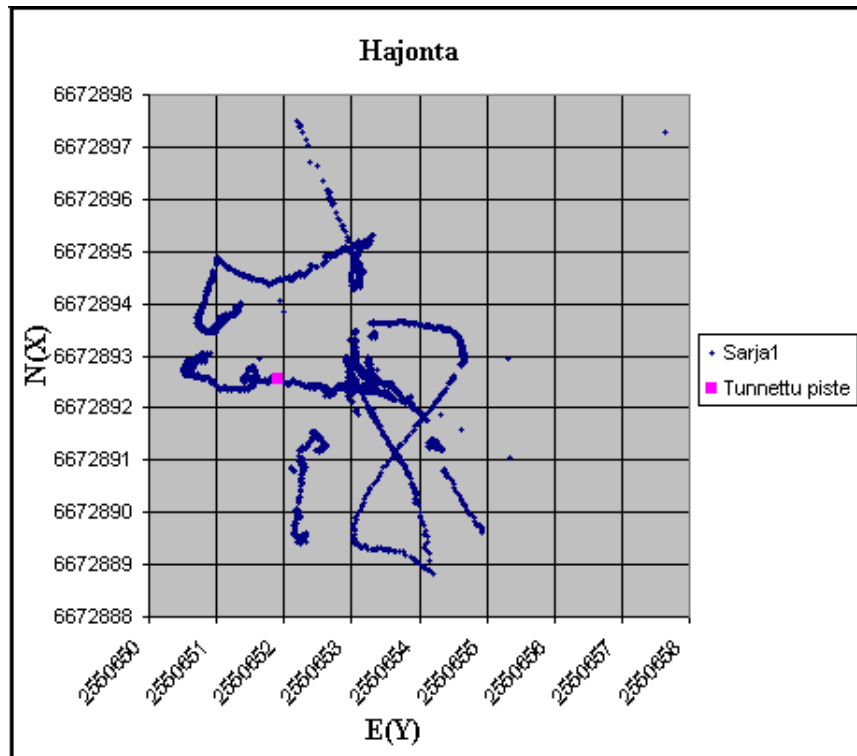
Kuvat 18 ja 19. Koko testilaitteisto Merenkululaitoksen katolla ja ilmastointihuoneessa. Vasemmassa kuvassa näkyvä antennikaapeli tulee sisälle oikean puoleisessa kuvassa ylhäällä keskellä näkyvästä reiästä sisälle.

Mittaus hoidettiin siten, että testilaitteisto laitettiin joka aamu tallentamaan satelliittihavaintoja 5 sekunnin havaintovälillä ja tulokset kerättiin ja analysoitiin aina seuraavana aamuna. Aluksi mittausasetuksia muuteltiin päivän tai kahden välein kun yritettiin löytää ”oikeita” asetuksia, joilla mittaustarkkuus ja korjaussignaalin varmuus olisivat parhaat mahdolliset.

6.1.2 Ensimmäiset tulokset

Vaikka mittauspaikka oli jo aiemmassa käytössä todettu kaikin puolin hyvin GPS-mittaukseen sopivaksi, testilaitteilla ei päästy lähellekään laitevalmistajan lupaamaa 0,1 metrin horisontaalista tarkkuutta.

Tallennettu mittausdata oli laadultaan hyvin epätasaista. Kaikkia havaintokertoja yhdisti kuitenkin mittaustulosten voimakas vaeltaminen (kuva 20). Käytännössä tämä tarkoitti sitä, että vaikka koordinaatistossa suuri osa havainnoista saattoi hyvinkin sijoittua esimerkiksi reilun puolen metrin säteelle toisistaan, välillä havainnot kuitenkin ”vaelsivat” useiden metrien – monesti myös jopa kymmenien tai satojen metrien päähän. Nämä siirtymät eivät ilmentyneet pelkkinä yksittäisinä piikkeinä, vaan niistä muodostui aina ”lonkeroita”. Vaikka satelliittitilanne olisi parantunut tällaisen yksittäisen sijainnin siirtymisen jälkeen usealla satelliitilla, sijainti ei siirtynytäkään välittömästi takaisin lähelle aiempien mittausten keskiarvoa, vaan sen sijaan alkoi hitaasti siirtyä havaintoväli havaintoväliltä kohti havaintoryhmän keskustaa muodostaen edetessään vaeltavia pistejonoja. Muutaman mittauspäivän data jopa koostui kokonaan pelkästään koordinaatiston poikki suoraviivaisesti vaeltavasta pistejonosta.



Kuva 20. Havaintopisteet vaeltavat voimakkaasti, mittaus tehtiin 12.–13.06.2008. Kuvassa ei näy kolmen pisteen muodostamaa jonoa, joka jatkuu koilliseen kymmenen metriä kuvan ulkopuolelle.

6.1.3 Paikallisten virhelähteiden selvittäminen

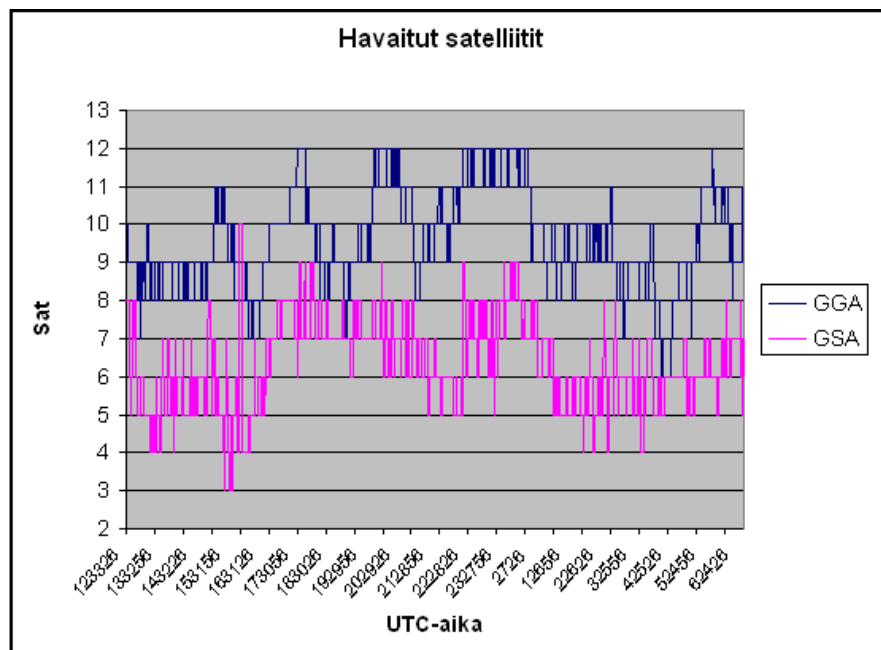
6.1.3.1 Firmware ongelmat

Vaihedataa lähetettiin C-Nav:in tukihenkilöille ja sieltä saatiinkin pian tieto, että C-Nav 2050M -vastaanottimessa käytetty firmware versio 3.1.17 ei ole täysin virheetön. Tukihenkilöiden suosittelemat mittausasetukset olivat muuten yhtenevät jo käytössä vakiintuneisiin asetuksiin, paitsi yhden asetuksen kohdalta. Vaikka asetuksista oli laitettu muiden SBAS-järjestelmien (WAAS/EGNOS) käyttö pois päältä, saattoi vastaanotin silti yrittää seurata niiden satelliitteja. Tämä puolestaan aiheutti ainakin osan koordinaattien äkillisistä siirtymisistä metrienkin päähän oletetusta sijainnista. Ongelma ratkesi lopulta laittamalla manuaalisesti vastaanotin seuraamaan SBAS-satelliittia PRN 122, joka on INMARSAT-satelliitti Amerikan yllä pituuspiirillä 142 W ja siten varmasti vastaanottimen ulottumattomissa. [31]

6.1.3.2 Satelliittien havaitseminen ja havaintomoodit

GSA-viestien lisääminen tallennettavaan dataan paljasti sen, että GGA- ja GSA-viesteissä olevat satelliittihavainnot eivät täsmänneet keskenään. GSA-viestit näyttivät lähes aina, että sijainninmäärityksessä on käytetty vähemmän satelliitteja kuin GGA osoitti. Ero oli yleensä vain muutaman satelliitin luokkaa, mutta ajoittain ero kasvoi jopa kaksinkertaiseksi (kuva 21). Tämän toisaalta todettiin osittain selventävän sitä, miksi mittauksissa tulokset olivat monesti hyvin huonoja, vaikka satelliittiennusteen ja GGA-viestin mukaan taivaan olisi pitänyt olla täynnä havaintokelpoisia satelliitteja.

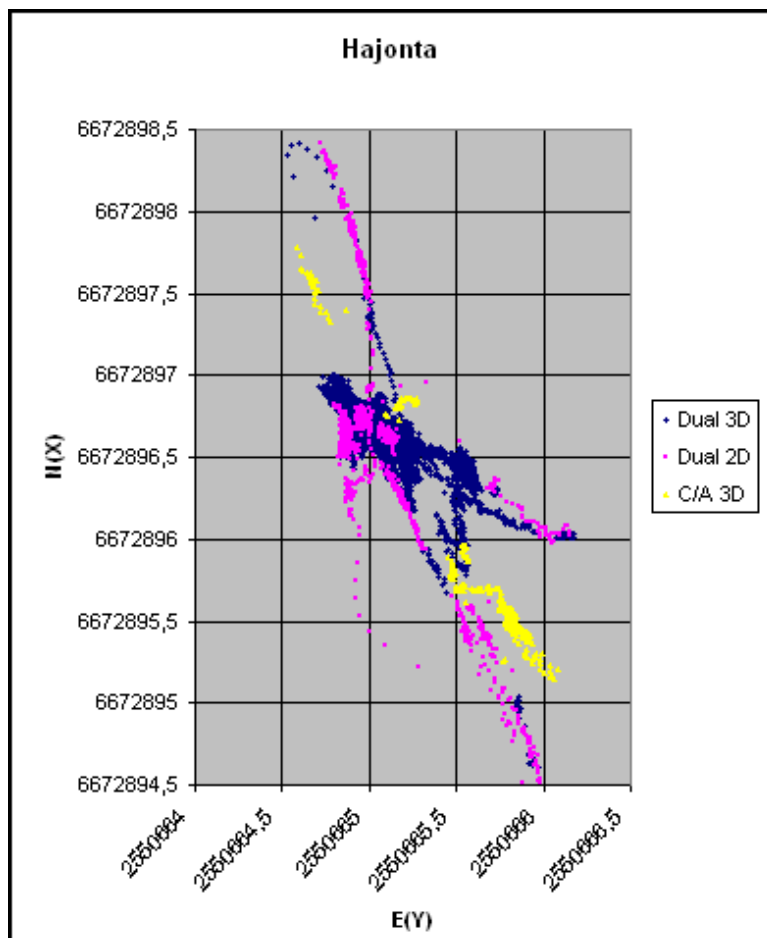
Vaikka C-Nav 2050M -manuaali väittääkin, että GGA-viestin seitsemäs kenttä kertoo mittauksessa käytettyjen satelliittien lukumäärän ”Number of GPS SVs used in solution fix”, käyttökokemus tukee esimerkiksi NMEA Data-Internet -sivun tulkintaa, että numero kuvastaa pikemminkin *seurattuja* kuin mittauksessa käytettyjä satelliitteja – ”Number of satellites being tracked”. [27]



Kuva 21. Satelliittihavainnot aikajanaalla 02.–03.07.2008.

Mittaustarkkuus korreloi tarkasti GSA:n osoittaman satelliittien lukumäärän kanssa. Viisi havaintosatelliittia osoittautui kynnykseksi: mikäli satelliittien geometria oli hyvä, mittaustarkkuus ei välttämättä huonontunut merkittävästi vielä viidelläkään satelliitilla, mutta geometrian ollessa huono tai GSA:n laskiessa alle viiden satelliitin se huononi heti.

Heikko satelliittitilanne aiheutti myös sen, että mittaustila ei aina silloin pysynyt kaksitaajuisessa Dual 3D -havaintomoodissa, vaan vaihtui joko yksitaajuisen C/A-moodiin tai yleisemmin kaksitaajuisen Dual 2D -moodiin (kuva 22). Kaikkein suurimmat virheet tapahtuivat kuitenkin, kun GSA-viestissä oli ilmoitus ”Fix not available” tai mittaus tapahtui ”Non-DGPS”-moodissa, mutta molemmat olivat kuitenkin harvinaisia ja lyhytkestoisia tässä mittaustaikassa.



Kuva 22. Havaintomoodin mukaan väritetty hajontakuva, 30.6.–01.07.2008.

6.1.3.3 Laiteongelmat

Syy siihen miksi vastaanotin lopulta käytti sijainnin määrittämisessä vähemmän satelliitteja kuin GGA:n ja GPS-ennusteen mukaan taivaalla oli havaittavissa, ei ollut aivan yksiselitteinen. Ongelmien jatkuessa häiriötekijäksi alettiin epäillä erityisesti seuraavia asioita:

- Monitieheijastukset
- Ulkoinen säteilynlähde
- Näköongelmat
- Viallinen tai sopimaton antennijohto
- Viallinen antenni tai vastaanotin.

Testauksen aikana käytettiin 7°:n korkeusmaskia, mutta käytännössä alle 30°:n jäävät satelliitit jäivät usein hyödyntämättä. C-Nav Supportin tekemien binääridata- analyysien perusteella todettiin, että L2-signaalin vahvuus oli heikko. Heikosta L2- signaalista seurasi taas se, että vastaanotin kykeni hyödyntämään kaksitaajuusmoodissa ainoastaan hyvin korkealla olevia satelliitteja tai mittaamaan yksitaajuisessa C/A-tilassa ilman L2-signaalia.

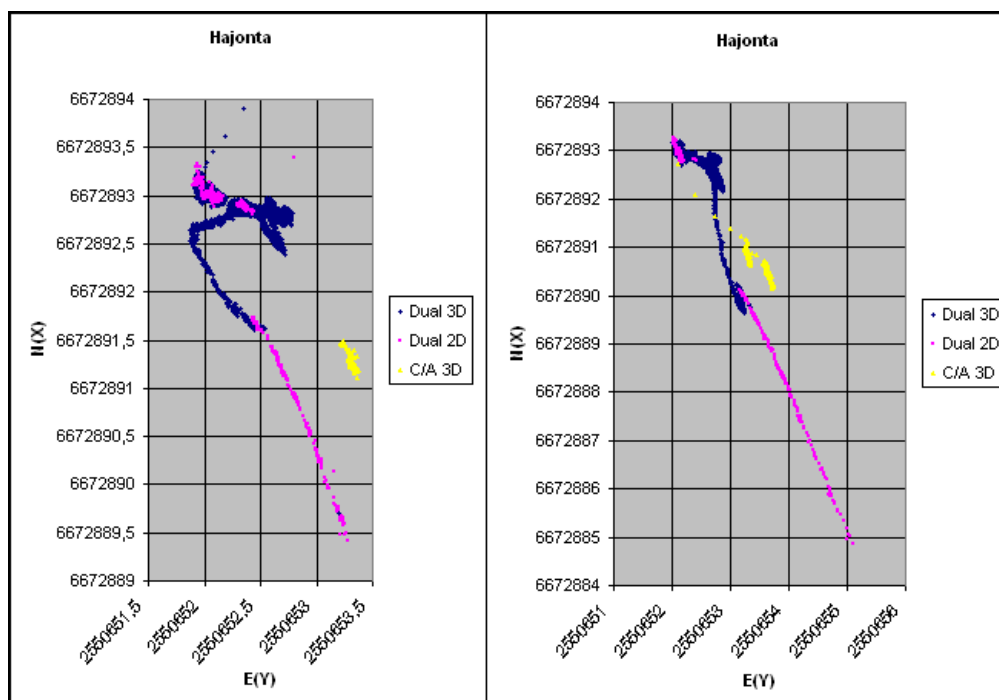
Koska mittauspaikalla oli tehty GPS-mittauksia aiemminkin, monitieheijastusten ja näköngelman ei oletettu aiheuttavan ongelmia testaukselle. Katolla ei myöskään tiettävästi ollut mitään säteilylähteitä, jotka olisivat voineet vaikuttaa mittauslaitteistoon. Epäilyt kohdistuivat siten itse laitteistoon.

Antennijohdtona käytettiin ensin pitkää RG58/U-johtoa, mutta sen pelättiin pituutensa vuoksi vaimentavan antennista tulevaa signaalia liikaa. C-Nav-manuaalissa RG58/U:n maksimipituudeksi ilmoitetaan 13,7 m (10 dB hävikki 1,5 GHz taajuudella), ja käytössä olleen johdon pituus oli noin 13 metriä. Antennin mukana tullut johto oli puolestaan aivan liian lyhyt, joten käyttöön otettiin lopulta paksu RG214-kaapeli. RG214:n tarkan hävikin laskeminen oli vaikeaa, sillä kaapelin molemmissa päissä oli ylimääräiset sovittimen liitäntää varten. Taulukosta voitiin kuitenkin arvioida, että 15 metrin

matkalla hävikki olisi noin 5 dB ja sovittimien aiheuttama ylimääräinen hävikki noin 0,5 dB/kpl – kokonaishävikki olisi näin noin 6 dB, mikä alittaa selvästi manuaalisissa mainitun ylärajan.

Koska tilanne ei kuitenkaan korjaantunut kaapeliakaan vaihtamalla, C-Nav Supportin tukihenkilö epäili L2-signaalin heikkouden johtuvan viallisesta antennista. Uutta antennaa päästiin kokeilemaan heti heinäkuun alussa.

Kolmen täyden mittapäivän jälkeen tulokset näyttivät uudella antennilla pitkälti samanlaisilta kuin vanhallakin antennilla (kuvat 23 ja 24). GGA:n ja GSA:n ilmoittamien satelliittihavaintojen keskiarvot olivat ehkä hieman lähempänä toisiaan kuin vanhalla antennilla, mutta näin pienestä aineistosta on turha tehdä syvällisempiä päättelyitä. Koska tilanne ei muuttunut olennaisesti uudella antennillakaan, päätettiin lopettaa mittaus Merenkulkulaitoksen katolla ja siirtyä testaamaan laitteistoa muualle.



Kuva 23 ja 24. Vaihtoantennilla mitatut hajontakuvat 02.–03.07.2008 (vas.) ja 03.–04.07.2008 (oik.). Sijainti vaeltaa edelleen runsaasti, eikä paikannustarkkuus ole lähelläkään luvattua 0,1 m:n tarkkuutta.

6.2 Testauspaikka II: Helsinki City West Holiday Inn -hotellin katto

6.2.1 Testauksen aloittaminen

Mittaukset tehtiin 04.–09.07.2008 ja ne suoritettiin samalla tavalla kuin edelliselläkin mittauspaikalla. Merenkululaitoksen vieressä sijaitseva Holiday Inn -hotelli valittiin toiseksi testauspaikaksi sen korkeuden ja ideaalisen näkyvyyden vuoksi (kuva 25). Rakennus on lähiympäristönsä korkein. Testikaluston sisälle tulevat laitteet, tietokone, vastaanotin sekä C-NaviGator saatiin sijoitettua pienten vaikeuksien jälkeen rakennuksen ilmastointihuoneeseen suojaan niin sateelta kuin mahdollisilta ohikulkijoiltakin.

Koska uuden antennijohdon ja antennin hankkiminen eivät juurikaan parantaneet mittauksia ensimmäisellä testauspaikalla, ongelmat viittasivat joko vialliseen vastaanottimeen tai satelliittien huonoon näkyvyyteen. Holiday Innillä tehtävien mittausten ajateltiin ratkaisevan lopullisesti näkyvyysongelmat sekä mahdolliset heijastukset. Katolla mitattiin kahdesta eri kohdasta, ensin katon keskellä (kuva 16) ja myöhemmin aivan rakennuksen idän puoleisessa päädyssä (kuva 26) mahdollisimman kaukana näkyvistä antenneista.

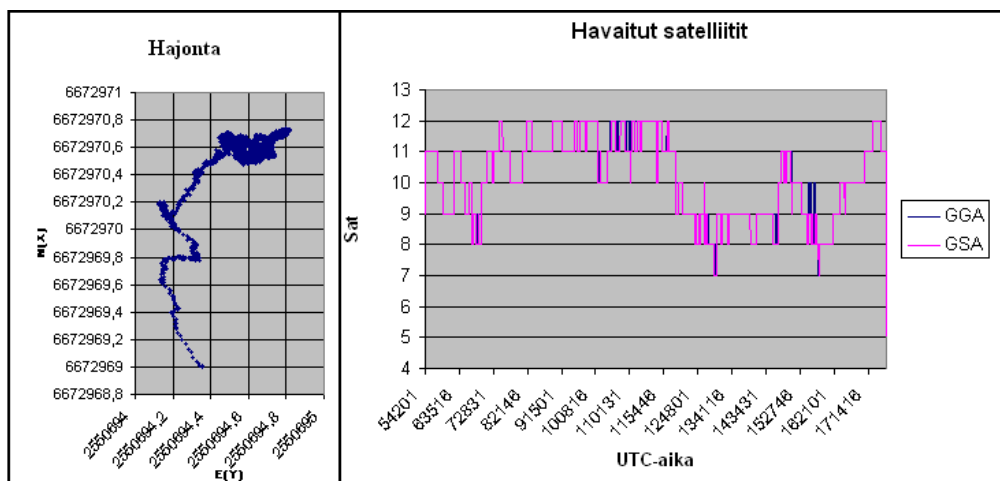
Merenkululaitoksen katosta poiketen hotellin katolla sijaitsee neljä pienehköä satelliittilautasta. Nämä ovat kuitenkin yhdessä ryhmässä katon lännenpuoleisella laidalla ja sijaitsevat vasta toiseksi korkeimmassa kerroksessa. Lisäksi ne ovat suunnattu pois päin rakennuksen keskustasta, länteen ja lounaaseen.



Kuvat 25 ja 26. Vasemmassa kuvassa MKL:n toimisto vasemmalla ja Holiday Inn hotelli keskellä. Oikeanpuoleisessa kuvassa antenni Holiday Inn -hotellin katon idänpuoleisessa päädyssä.

6.2.2 Tulokset

Tulokset eivät vastanneet testipaikalle asetettuja korkeita odotuksia, vaan pikemminkin herättivät vain lisää kysymyksiä. Mittausdata oli käytännössä pelkkää yhden taajuuden C/A- sekä Dual 2D -moodeja, paitsi 04.–05.07.2008 klo 05:39–17:42 UTC, jolloin GGA- ja GSA-satelliittihavainnot täsmäsivät lähes täysin toisiaan. Havaittujen satelliittien suuresta määrästä huolimatta myös tässä Dual 3D -osuudessa on pitkä vaeltava osuus alussa.



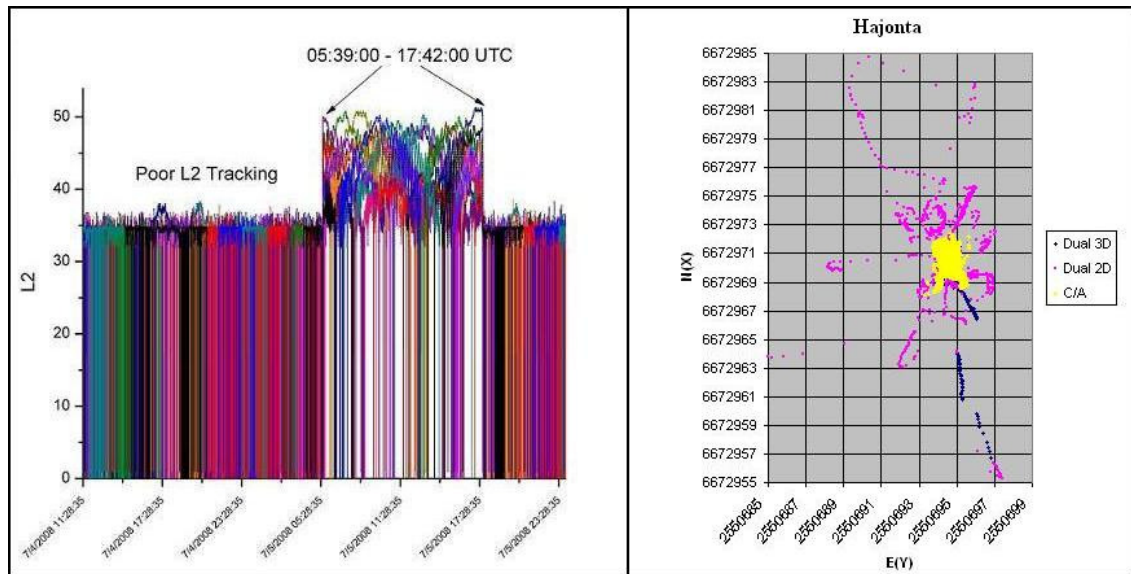
Kuvat 27 ja 28. Hajontakuva sekä havaitut satelliitit 04.–05.07.2008 tehdyn mittauksen häiriöttömästä ajankohdasta. Hajontakuvassa näkyvä häntä on syntynyt siitä, kun moodi on muuttunut Dual 3D -moodiksi ja sijainti on vaeltanut kohti ”todellista sijaintia”.

Lupaavanoloista dataa saatiin ainoastaan edellä mainittuna ajankohtana, jolloin GGA- ja GSA-satelliittihavainnot olivat kohdakkain. Silloinkin koettiin silti samankaltaista vaeltamista kuin Merenkulkulaitoksen toimiston katolla aikaisemmissa mittauksissa. Mittauspaikan siirtäminen hotellin katon idän puoleiseen reunaan, mahdollisimman kauas näkyvistä mahdollisista häiriölähteistä, ei vaikuttanut mittaustuloksiin.

6.2.3 Paikallisten virhelähteiden selvittäminen

Holiday Inn -hotellin katolla suurimman virhelähteen luonne oli hyvin selvä. Havainnot koostuivat pääosin pelkästään C/A- ja Dual 2D -moodeista siksi, että L2-signaali oli yhtä edellä mainittua poikkeavaa ajankohtaa lukuunottamatta niin huono, ettei vastaanotin pystynyt käyttämään L2-taajuutta joko lainkaan tai korkeintaan hyvin huonosti. Huomioon otettavaa oli myös se, että Dual 2D -moodi oli itse asiassa epätarkempi kuin C/A-moodi. Tämä johtunee siitä, että vastaanotin yrittää luoda ilmakehäkorjausta hyvin huonosta signaalista, joka sitten heikensi tarkkuutta entisestään.

Edellä mainitusta ja etenkin C-Nav Supportin lähettämästä kuvaajasta (kuva 29 ja 30) on pääteltävissä, että kyseessä on jokin laite, joka päällä ollessaan häiritsee voimakkaasti L2-signaalin voimakkuutta hotellin katolla. Signaalin seuraaminen ensin helpottui ja sitten taas vaikeutui kuin veitsellä leikaten. Muutos on äkillinen, ja sen vaikutus näkyy heti GSA-viestissä.



Kuvat 29 ja 30. Vasemmanpuoleinen kuva on C-Nav Supportin lähettämä, L2-signaalin voimakkuuden näyttävä kuvaaja 04.–05.07.2008 tehdyltä istunnolta. Oikeanpuoleinen hajontakuva on samalta ajanjaksolta, ja se osoittaa selkeästi C/A- ja Dual 2D-moodeissa tehtyjen havaintojen erot.

Hotellin katolla ei näkynyt neljää satelliittilautasta lukuun ottamatta muita mahdollisia säteilynlähteitä. Lähellä olevista muista rakennuksista ei myöskään ollut nähtävissä mitään satelliittilautasta tai vastaavaa lähetintä, joka olisi suunnattu kohti Holiday Inn-hotellia. Satelliittilautaset eivät todennäköisesti aiheuttaneet häiriötä, sillä ne olivat pienikokoisia (halkaisija alle puoli metriä), suunnattu mittauspaikasta poispäin ja kerrosta alempana ilman näköyhteyttä mittaavaan antenniin. Koska mittauspaikan siirtäminen rakennuksen toiseen päähän ei vaikuttanut mittaustuloksiin, tultiin lopulta siihen johtopäätökseen, että hotellin ilmastointihuoneessa on jokin L2-signaalia häiritsevää säteilyä lähettävä laite.

Hotellista ei onnistuttu tavoittamaan ketään, joka olisi varmuudella tiennyt, mitä kaikkia laitteita ja lähettimiä rakennuksen ilmastointihuoneeseen on asennettu. Koska häiriölähteen tarkemman luonteen selvittämiseen ei ollut resursseja ja mittaus hotellin katolla osoittautui L2-signaalin häiriöiden vuoksi käytännössä mahdottomaksi, testausta päätettiin jatkaa toisessa paikassa.

6.3 Testauspaikka III: Ilmalan vesitorni

6.3.1 Testauksen aloittaminen

Länsi-Pasilassa sijaitseva luoteenpuoleinen Ilmalan vesitorni (kuva 31) valittiin kolmanneksi testauspaikaksi kolmesta syystä: erinomainen näkyvyys, hyvät tilat mittauslaitteiden sijoittamiselle ja se, että Geodeettinen laitos on aiemmin käyttänyt samaa paikkaa omissa mittauksissaan. Mittaukset tehtiin 10.07.–26.08.2008 samoja metodeja käyttäen kuin kahdessa aiemmassakin mittauspaikassa.

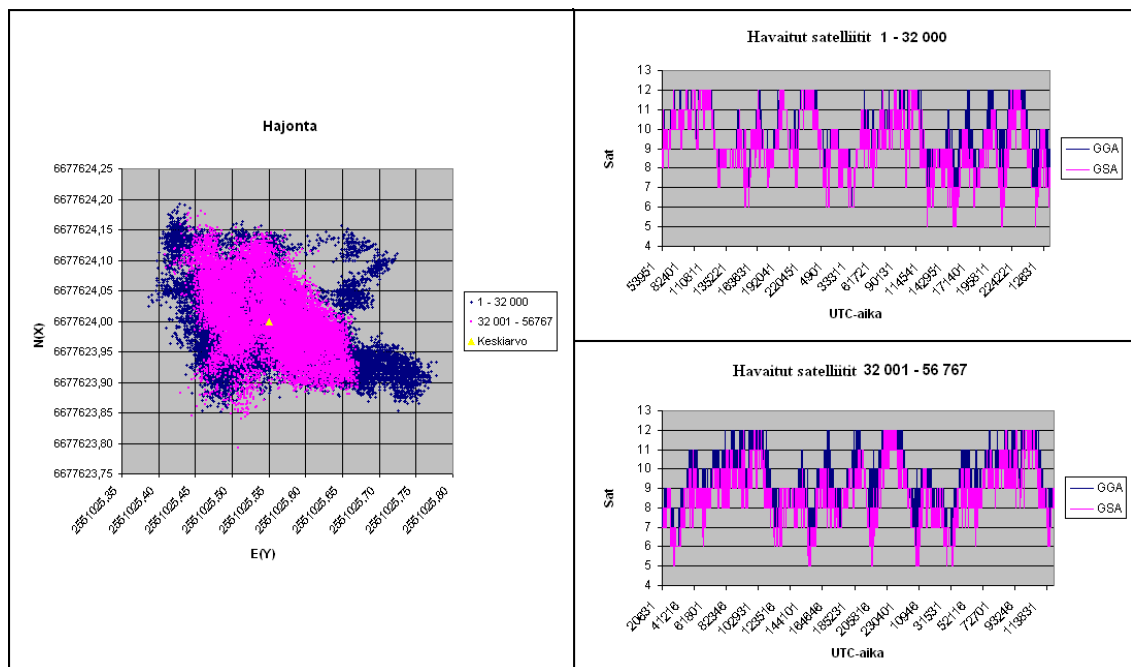
Mittauspaikan ympäristössä sijaitsee paljon erilaisia antennoja, radiomastoja sekä satelliittilautasia (kuva 32). Sekä mittauspaikkana olleen vesitornin että sen vieressä olevan toisen vesitornin katolla on paljon erilaisia lähettimiä. Lisäksi lähiympäristössä oli myös Pasilan linkkitorni sekä MTV:n että muiden yritysten satelliittilautasia ja lähettimiä. Ennakkoon varauduttiin siihen, että tulokset olisivat samansuuntaisia kuin Holiday Inn -hotellin katolla. Testipaikalle pääsy oli kuitenkin niin vaivatonta, että mittausta päätettiin kokeilla.



Kuvat 31 ja 32. Mittaus tapahtui vasemmassa kuvassa kauempana näkyvän vesitornin päällä [32]. Oikeanpuoleinen kuva on otettu vesitornin katolta.

6.3.2 Tulokset

Vastoin pahimpia epäilyjä, Ilmalan vesitorni osoittautui heti ensimmäisen mittauspäivän jälkeen erittäin lupaavaksi testauspaikaksi. Hyvästä alusta huolimatta antenni siirrettiin seuraavana päivänä varmuuden vuoksi kuvan 31 osoittamasta paikasta katon toiseen laitaan, sillä vesitornin keskellä olevista satelliittilautasista yksi osoitti suoraan sitä kohti. Seuraavan seitsemän päivän aikana tallennettu mittausdata olikin sitten hyvin laadukasta (kuvat 33–35).



Kuvat 33, 34 ja 35. Hajontakuva sekä GGA- ja GSA-viesteissä havaitut satelliitit. Havainnot tehtiin 15.–18.07.2008.

11.–18.07.2008 tehtiin 120 951 havaintoa, joista vain 168 oli Dual 2D -moodissa ja loput 120 783 Dual 3D -moodissa. Sekä X- että Y-koordinaattien keskihajonnat olivat molemmat noin 7 cm. Mittaustarkkuus oli selkeästi parempaa kuin aiemmin. Hyvät tulokset selittynevät sillä, että GGA-viestin lisäksi myös GSA:ssa näkyi paljon enemmän satelliitteja kuin muissa testauspaikoissa. GGA-satelliittihavaintojen keskiarvo oli 9,8 ja keskihajonta 1,4 satelliittia. Vastaavasti GSA-satelliittihavaintojen keskiarvo oli 9,2 ja keskihajonta 1,5 satelliittia. Valitettavasti testaus päättyi huonon onnen siivittämänä ennenaikaisesti.

6.3.3 Paikallisten virhelähteiden selvittäminen

Havaintosarjan ei ollut tarkoitus päättyä vielä perjantaina 18.07.2008, vaan jatkua vielä seuraavalle viikolle. Seuraavana maanantaiaamuna jouduttiin kuitenkin toteamaan kolmijalan kaatuneen ja antennin kolhiutuneen silmin nähden (kuvat 36 ja 37).

Mittausdataa tarkastelemalla kaatumisen ajankohdaksi tarkentui edellä mainittu perjantai, kello 15:30. Kolmijalka oli pystytetty tukevasti tähtialustan päälle, eikä yhdenkään jalan todettu löystyneen. Koska vesitornin ylimmässä kerroksessa toimiva kahvila oli jo tuohon aikaan suljettu eikä vesitornin henkilökunnan mukaan katolla ollut käynyt korjaus- tai asennusmiehiä, todettiin kolmijalan kaatumisen syyksi kova tuuli. Ilmatieteenlaitoksen mukaan päivä oli ollut mittausalueella heikkotuulinen, joten kyseessä on täytynyt olla epäonnisen kova tuulenpuuska.



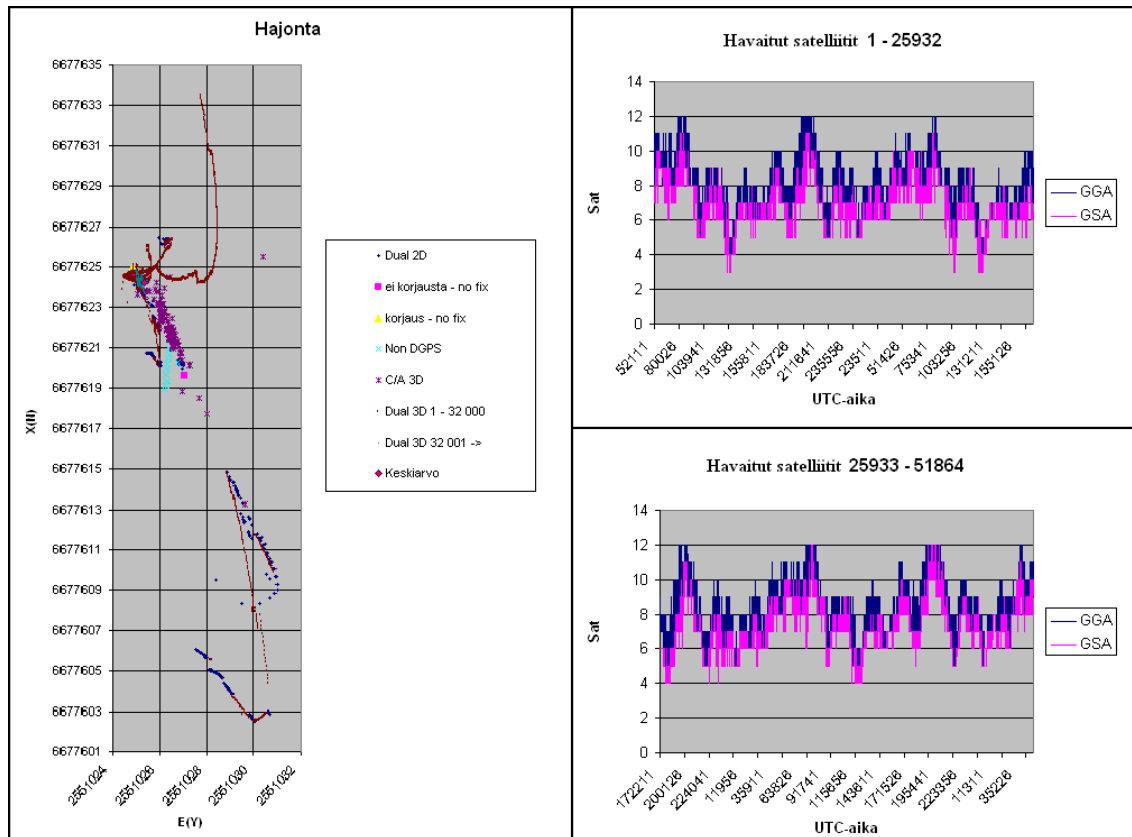
Kuvat 36 ja 37. Kaatunut kolmijalka ja lähikuva vahingoittuneesta antennista.

Kaatuneella antennilla yritettiin mitata vielä 21.–23.07.2008, mutta tuloksista oli nähtävissä, että mitä suurimmalla todennäköisyydellä antenni ei ollut enää täysin toimivassa kunnossa. Vaikka koje pystytettiin takaisin samalle kohdalle kuin aikaisemmin, havaittujen satelliittien keskiarvot olivat yhdeksän sijaan noin seitsemän kunakin ajan hetkenä. Lisäksi Dual 2D -havaintoja oli 598, C/A-havaintoja 116 ja non-DGPS-havaintoja 12. Kahden mittauspäivän havaintojen laatu oli siten paljon heikompaa kuin koko edeltävän viikon aikana oli havaittu.

Testausta yritettiin jatkaa myös ensimmäisellä antennilla, mutta 23.–29.07.2008 saatujen tulosten perusteella vanha antenni toimi jopa huonommin kuin nyt kaatunut antenni. X:n ja Y:n lasketut keskihajonnat olivat yleensä 13 cm, mutta mittauksissa oli havaittavissa taas ajoittain huomattavaa vaeltamista ja muutamana päivänä jopa korjaussignaalin puuttumista. Havaittujen satelliittien keskiarvot olivat kahdeksan (GGA) ja seitsemän (GSA).

Tilanne yritettiin ratkaista hankkimalla vielä kolmas antenni. Uudella antennilla testaus suoritettiin 21.–26.08.2008 likimain samalla paikalla ja tarkalleen samoin asetuksin kuin aiemmallakin kerralla. Mittaustarkkuus ei kuitenkaan päässyt uudellakaan antennilla samaan tarkkuuteen, kuin samalla paikalla havaittiin 11.–18.07.2008 (kuvat 38–40).

Uudellakin antennilla NMEA-viesteissä havaitut satelliitit olivat edelleen samaa tasoa kuin 18. päivän kaatumisen jälkeen oli havaittu kahdella aiemmalla antennilla (GGA 8, GSA 7). Kahtena päivänä sekä X:n että Y:n keskihajonnat olivat selkeästi alle 10 cm, mutta muuten tulokset jättivät paljon toivomisen varaa, esimerkiksi 22.–25.08.2008 X:n keskihajonta oli 1,5 metriä ja Y:n 0,62 metriä. Lisäksi viimeistä mittauspäivää lukuun ottamatta jokaisessa hajontakuvaajassa oli selkeästi nähtävissä luoteeseen ja kaakkoon suuntautuvaa, jopa 15 metrin päähän ulottuvaa vaeltamista.



Kuvat 38, 39 ja 40. Mittaus tapahtui 22.–25.08.2008. Hajontakuvassa ilmenee voimakasta vaeltamista sekä mittaustilojen vaihtelua. Satelliittien havaintokuvista on myös selvästi nähtävissä, kuinka GGA-viesti osoittaa aina yhtä tai kahta satelliittia enemmän kuin GSA-viesti.

6.4 Testauspaikka IV: Airisto

6.4.1 Testauksen aloittaminen

Syyskuun puolessavälissä tuli mahdollisuus testata laitteistoa monikeilainalus Airiston kannella Turussa (kuva 42.). Alus oli koko mittausajan satamassa. Mittauksen tarkoituksena oli verrata StarFire RTG:n toimintaa Airiston käyttämään Merenkululaitoksen omaan DGNSS-palveluun sekä selvittää testilaitteiston toimivuutta sille suunnitellussa varsinaisessa käyttöympäristössä.

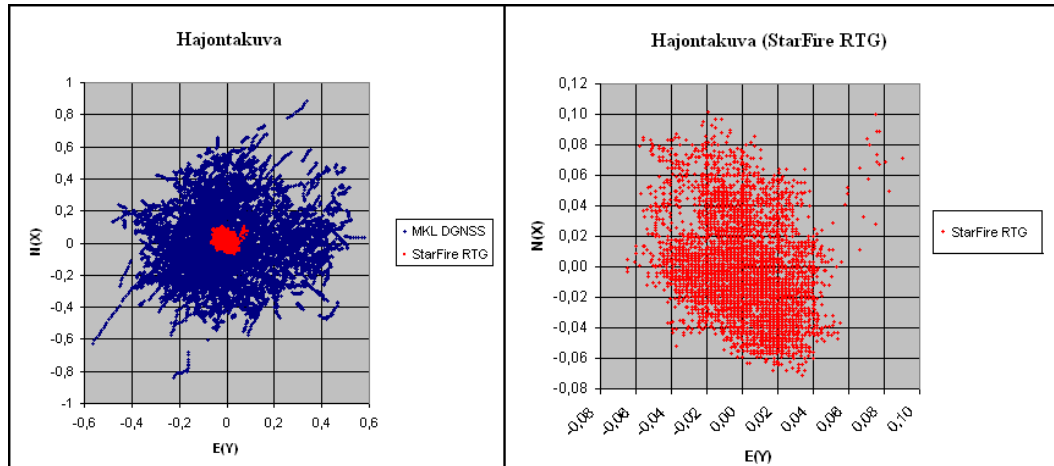
Mittausasetukset olivat muuten identtiset edellä tehtyjen mittausten kanssa, paitsi havaintoväli oli yksi sekunti. Merenkululaitoksen DGNSS:ää käyttävän vastaanottimen havaintoväli oli 0,2 sekuntia, mittaustulosten yhtenäistämiseksi aineistonkäsittelyssä huomioitiin vain joka viides mittaus.



Kuva 41. Monikeilainalus Airisto. Laivan oma GPS-antenni sijaitsee korkeimman maston huipulla, StarFire RTG:tä käyttävä C-Nav-antenni puolestaan sijaitsee komentosillan katon etureunassa näkyvässä mastossa.

Testaus tapahtui 15.–16.09.2008, jonka välisenä aikana suoritettiin kaksi mittausjaksoa. Ensimmäinen mittaus kesti puolitoista tuntia ja toinen kuusi ja puoli tuntia. Ottaen huomioon, että StarFire RTG:llä ja Merenkululaitoksen omalla korjauspalvelulla saatuja koordinaatteja ei voitu verrata suoraan toisiinsa edellä mainituista syistä johtuen, tulokset olivat oikein lupaavia. Valitettavasti kinemaattista tarkkuutta ei voitu testata.

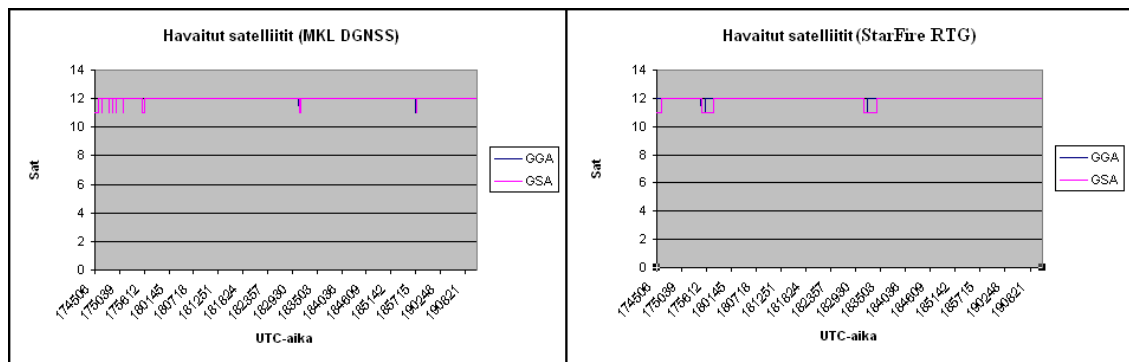
6.4.2 Tulokset: Mittausjakso I



Kuvat 42 ja 43. Airistolla 15.09.2008 suoritettujen mittausten hajontakuva, jossa on molempien laitteistojen hajontakuvat ensimmäiseltä mittausjaksolta. Koordinaatit on siirretty erilliskoordinaatistoon vertailun helpottamiseksi, koordinaatit on annettu metreissä.

StarFire RTG:llä tehtyjen mittausten X:n keskihajonnaksi tuli 3,2 cm ja Y:n 2,2 cm.

Vastaavasti Merenkulkulaitoksen oman DGNS:n X:n keskihajonta oli 17,2 cm ja Y:n 46,6 cm (kuvat 42 ja 43).

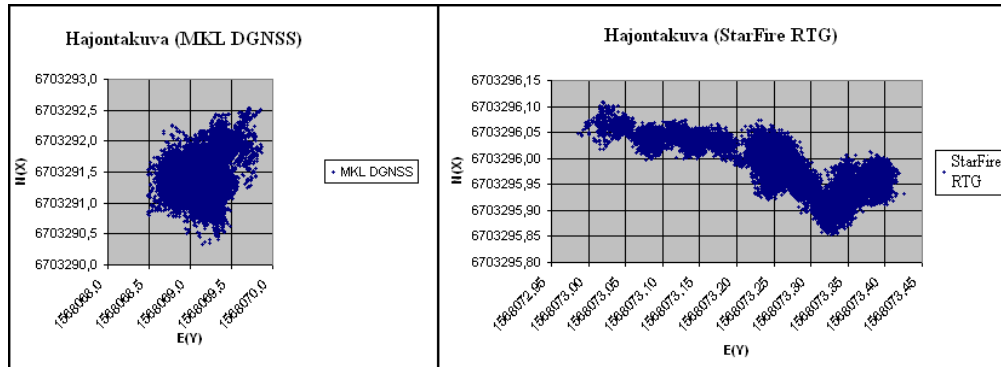


Kuvat 44 ja 45. Airistolla 15.09.2008. Ensimmäisen mittausjakson satelliittihavainnot.

Ensimmäistä puolentoista tunnin mittausjaksoa voi pitää hyvin onnistuneena.

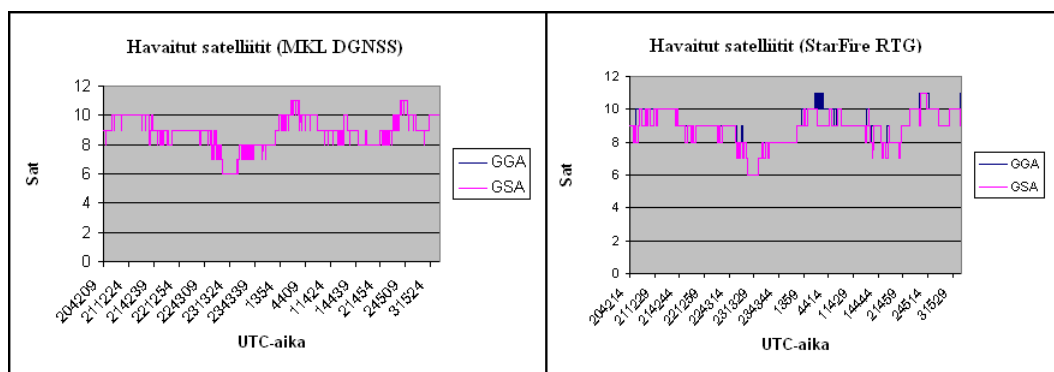
Kummassakaan hajontakuvassa ei ole nähtävissä vaeltamista, ja molemmat laitteet ovat havainneet lähes jatkuvasti 12 satelliittia (kuvat 44 ja 45). Mittauksen ainoana varjopuolena on sen lyhyt puolentoista tunnin kesto, minkä pohjalta ei voi tehdä johtopäätöksiä StarFire RTG:n toimintavarmuudesta ja tarkkuudesta pitkällä aikavälillä.

6.4.3 Tulokset: Mittausjakso II



Kuvat 46 ja 47. Airisto 15.–16.09.2008. Toisen mittausjakson hajontakuvat.

C-Navin hajontakuvassa näkyy itään suuntautuvaa siirtymistä noin 0,4 metrin verran (kuva 47). Tässä tapauksessa siirtymisen voidaan katsoa johtuneen Aurajoen virtauksen aiheuttamasta laivan todellisesta kääntymisestä. Koska Airiston keula osoitti virtaa vasten ja C-Nav-vastaanotin oli lähempänä keulaa, virtaus vaikutti voimakkaammin siihen, kun taas lähes keskellä olevaan laivan omaan GPS-vastaanottimeen vaikutus on ollut hyvin vähäinen.



Kuvat 48 ja 49. Airistolla 15.–16.09.2008 suoritettujen mittauksen satelliittihavainnot molemmilta laitteistoilta. Havainnot lähes identtisiä.

Mittauksen aikana tehdyt satelliittihavainnot eivät tietenkään kärsineet virtauksesta ja olivat yllättävän yhdenmukaisia kaikin puolin. Merenkululaitoksen oman DGNSS-järjestelmän ja C-Navin tekemät havainnot ovat lähes identtisiä (kuvat 48 ja 49). Merenkululaitoksen järjestelmän molempien viestien satelliittihavaintojen keskiarvo oli 9,02. C-Navin GGA-viestien keskiarvo oli 9,08 ja GSA-viestien 8,86.

7 Yhteenveto

Satelliittipaikannus on vuosien varrella kehittynyt huimasti. Se on myös yleistynyt ja jopa arkipäiväistynyt. Käyttäjäkunnan nopea kasvu on johtanut siihen, että satelliittipaikannukselle myös keksitään koko ajan uusia käyttösovelluksia. Toisaalta tämä kaikki asettaa suurempia vaatimuksia uusien paikannuslaitteiden ominaisuuksille ja suorituskyvylle.

C-Nav ja StarFire RTG näyttävät paperilla hyviltä ratkaisuilta desimetriluokan paikanmäärittystä vaativiin mittauksiin kaikkein syrjäisimmillekin alueille. Kuitenkin tässä opinnäytetyössä tehdyt mittaukset ovat osoittaneet, että StarFire RTG ei vielä pysty vastaamaan kaikilta osin niihin haasteisiin, joita ammattimainen mittaustyö edellyttää.

Ongelmat voidaan tiivistää lyhyesti yhdellä sanalla: Toimintavarmuus. StarFire RTG osoitti niin Ilmalan vesitornissa 15.–18.07.2008, kuin Turussa Airiston kannellakin 15.–16.09.2008, että suorituskykyä järjestelmässä kylläön. Mutta hyvästä tarkkuudesta ei ole kuitenkaan mitään hyötyä, jos se ei ole aina varmasti saatavilla. Viimeistä mittauspaikkaa, Airistoa lukuunottamatta kaikilla muilla testauspaikoilla törmättiin etenkin erilaisiin satelliittien havaitsemiseen liittyviin ongelmiin, joita ei yksinkertaisesti voitaisi hyväksyä työn aikana merenmittausaluksessa.

Mittausten aikana saadut kokemukset ja C-Nav Supportin kanssa käytyjen sähköpostien vaihdon perusteella on selvää, että suurin ongelma on antennin kyvyssä havaita L2-signaalia. Vaikuttaisi siltä, että antenni on hyvin herkkä erilaisille häiriölähteille, joista toisena testauspaikkana toiminut Holiday Inn -hotellin katto on äärimmäinen esimerkki.

Käytännössä L2-signaalin havaitsemiseen liittyvät ongelmat tarkoittavat sitä, että StarFiren toimivuus on testattava erikseen jokaisessa mittausaluksessa, jossa sitä aiottaisiin käyttää. Laivoissa on paljon erilaista elektroniikkaa, lähettäjiä ja vastaanottimia, joiden mahdollisista vaikutuksista StarFire RTG:n toimintaan ei voi tietää etukäteen. Lisäksi on myös periaatteessa mahdollista, että L2-signaalin

häiriöherkkyys voisi estää tai haitata mittausta joillain mittausalueilla olevien rakennusten, rakenteiden tai toisten alusten vuoksi. Palveluntarjoaja ei ole yksilöinyt mitään tiettyjä laitteita tunnetuiksi häiriölähteiksi tai antanut sellaisiin mitään suosituksetäisyyksiä.

StarFire RTG:n eduksi on kuitenkin todettava, että niinä kertoina, joina kaikki on toiminut moitteettomasti, mittausjälki on vaikuttanut todella hyvältä. Mitään ongelmaahan ei olisi ollut, mikäli järjestelmän suorituskyky olisi aina sillä tasolla kuin Ilmalassa aluksi mitattiin tai mistä lyhyet mittaukset Airstolla antoivat viitteitä.

StarFire RTG:n ja C-Navin testausta tullaan jatkamaan seuraavalla mittauskaudella 2009 todellisessa käyttöympäristössä.

Lähteet

- 1 Merenkululaitos: Esittely. (WWW-dokumentti.)
<<http://www.fma.fi/organisaatio/>> (Luettu 07.04.2008).
- 2 Merikartoitusohjelma 2005–2015. Merenkululaitoksen julkaisu 7/2005.
- 3 Kurtti Hanno: Merenmittausaineiston jälkikäsitteilyohjelmistojen testaus. Insinööriyö, EVTEK-maanmittaustekniikka, 2006.
- 4 Merikartoitus. (WWW-dokumentti.) Merenkululaitos.
Tarkka osoite ei ole saatavilla, linkki ”Merenmittaus” osoitteessa:
<<http://www.fma.fi/toiminno/merikartoitus/>> (Luettu 07.04.2008).
- 5 Poutanen Markku: GPS-paikanmääritys. Karisto Oy, 1999.
- 6 Global Positioning System Overview. (WWW-dokumentti.) University of Colorado at Boulder.
<http://www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/gps/gps_f.html>
(Luettu 01.06.2008)
- 7 Suntola Tuomo: GPS-järjestelmän teoreettisista perusteista. (WWW-dokumentti.) GPS-meteorologian seminaari, Ilmatieteen laitos, 27.11.2002.
<http://www.sci.fi/~suntola/DU_library/2003_Ilmatieteen_Laitos_GPS_seminar.pdf>
- 8 How GPS Works Part 2. (WWW-dokumentti.) LUCID Summer Workshop, July 30, 2004.
<www.eecs.lehigh.edu/~skishore/research/lucid/lucid_5.ppt>
- 9 GPS Tutorial. (WWW-dokumentti.) Trimble.
<<http://www.trimble.com/gps/index.shtml>> (Luettu 30.04.08).

- 10 GPS. (WWW-dokumentti.) Los Angeles Air Force Base.
<<http://www.losangeles.af.mil/library/factsheets/factsheet.asp?id=5325>>
(Luettu 30.04.2008).
- 11 Narinen Tero: Global Positioning System. Seminaarityö.
Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu, Tietotekniikan osasto, 22.3.1999
< <http://www.it.lut.fi/kurssit/98-99/1591/seminars/Narinen/Narinen.html>>.
- 12 Meriliikenteen ohjaus. (WWW-dokumentti.) Merenkululaitos.
<<http://www.fma.fi/toiminnot/meriliikenteenohjaus/?cat=radionavigointi&page=#dgnss>> (Luettu 09.04.2008).
- 13 Navcom: Basics / History. (WWW-dokumentti.)
<<http://www.navcomtech.com/StarFire/StarFireHome.cfm>>
(Luettu 12.05.2008).
- 14 C-Nav Globally Corrected GPS. (WWW-dokumentti.) C&C Technologies.
<<http://www.cctechnol.com/site30.php>> (Luettu 13.05.2008)
- 15 Bar-Sever Yoaz E. Dr. Manager: NASA's Global Differential GPS System.
Sähköpostit 14.4.2008 & 16.04.2008.
- 16 The NASA Global Differential GPS System. (WWW-dokumentti).
<<http://www.gdgps.net/index.html>> (Luettu 20.05.2008).
- 17 Hudson John – C&C Technologies & Sharpe, Tenny – NavCom:
.Globally Corrected GPS (GcGPS): C-Nav GPS System. (WWW-dokumentti.)
18.-19.09.2001 Dynamic Positioning Conference.
<http://www.navcomtech.com/Support/Download/Globally%20Corrected%20GPS_C-Nav.pdf>

- 18 Dixon Kevin NavCom:
StarFire™: A Global SBAS for Sub-Decimeter Precise Point Positioning.
ION GNSS 19th International Technical Meeting of the Satellite Division,
26.-29.09.2006
- 19 Sharpe Tenny & Hatch Ron NavCom, Nelson Fred, John Deere & Co: StarFire
and Real-Time GIPSY: A Global High-Accuracy Differential GPS System.
(WWW-dokumentti.)
<<http://www.navcomtech.com/Support/Download/StarFire%20and%20Real-Time%20GIPSY.pdf>>
- 20 Mendes V.B, Collins J.P. & Langley R.B: (University of New Brunswick)
The Effect of tropospheric Propagation Delay Errors in Airborne GPS Precision
Positioning.
- 21 Globally Corrected GPS: C-Nav GPS System. (C-Nav Powerpoint-esitys).
<<http://www.hydrographicsociety.org/Articles/Presentations/>>
- 22 Hatch Ronald R. & Sharpe Richard T: Recent Improvements to the StarFire
Global DGPS Navigation Software. NavCom Technology. (2004).
- 23 Bar-Sever Yoaz, Muellerschoen Ron & Reichert Angie:
The Development and Demonstration of NASA's Global Differential System.
JPL, California Institute of Technology.
- 24 JPL/Nasa GGN Sites used for RTG corrections. C&C Technologies. (WWW-
dokumentti.) <<http://www.cctechnol.com/site.php?pageID=81>> (Luettu
14.05.2008).
- 25 C-Nav: Global SBAS for Sub-decimeter Precise Point Positioning.
< <http://www.cctechnol.com/uploads/CNAVPPPSubdecimeterRev2.pdf>>
Julkaisu vuosi 2008.

- 26 StarFire iTc esittely. (WWW-dokumentti). John Deere.
<http://www.deere.com/en_INT/ag_equipment/ams/starfire_itc/index.html>
(Luettu 20.05.2008).
- 27 NMEA data. (WWW-dokumentti.)
< <http://www.gpsinformation.org/dale/nmea.htm#GSA>>
(Luettu 02.09.2008).
- 28 Haljala Sakari: EUREF-FIN:n ja KKJ:n väliset muunnokset.
EUREFMuunnos-ohjelman käyttöohje.
Maanmittauslaitos Kehittämiskeskus, 04.09.2003
- 29 Häkli Pasi, vanhempi tutkija, Geodeettinen laitos, Koordinaattijärjestelmät.
Sähköpostit 28.–29.05.2008.
- 30 Varonen Jukka: EUREF-FIN ja koko maapalloa kuvaavat koordinaatistot.
Merenkulkulaitos, 17.06.2003.
- 31 C-Nav Support: Sähköpostit toukokuu–syyskuu 2008.
- 32 Savolainen Leo. Valokuva Ilmalan vesitorneista, 11.05.2003.
- 33 The Difference between DGPS & RTK. (WWW-dokumentti.) Trimble.
<http://www.trimble.com/ag_gps.shtml> (Luettu 17.10.2008).

Liite 1: C-Nav 2050M:llä tallennettua NMEA-raakadataa

\$GPGGA,174506.00,6026.085281,N,02213.972806,E,2,12,1.0,8.513,M,20.884,M,10.0,0225*7B
 \$GPGSA,A,3,03,06,07,15,16,18,21,24,26,27,29,,1.8,1.0,1.5*39
 \$GPGGA,174507.00,6026.085280,N,02213.972801,E,2,12,1.0,8.497,M,20.884,M,10.0,0225*71
 \$GPGSA,A,3,03,06,07,15,16,18,21,24,26,27,29,,1.8,1.0,1.5*39
 \$GPGGA,174508.00,6026.085276,N,02213.972800,E,2,12,1.0,8.471,M,20.884,M,9.0,0225*46
 \$GPGSA,A,3,03,06,07,15,16,18,21,24,26,27,29,,1.8,1.0,1.5*39
 \$GPGGA,174509.00,6026.085273,N,02213.972796,E,2,12,1.0,8.472,M,20.884,M,10.0,0225*79
 \$GPGSA,A,3,03,06,07,15,16,18,21,24,26,27,29,,1.8,1.0,1.5*39
 \$GPGGA,174510.00,6026.085275,N,02213.972804,E,2,12,1.0,8.475,M,20.884,M,10.0,0225*74
 \$GPGSA,A,3,03,06,07,15,16,18,21,24,26,27,29,,1.8,1.0,1.5*39
 \$GPGGA,174511.00,6026.085271,N,02213.972796,E,2,12,1.0,8.446,M,20.884,M,10.0,0225*75
 \$GPGSA,A,3,03,06,07,15,16,18,21,24,26,27,29,,1.8,1.0,1.5*39
 \$GPGGA,174512.00,6026.085271,N,02213.972793,E,2,12,1.0,8.450,M,20.884,M,10.0,0225*74
 \$GPGSA,A,3,03,06,07,15,16,18,21,24,26,27,29,,1.8,1.0,1.5*39
 \$GPGGA,174513.00,6026.085271,N,02213.972798,E,2,12,1.0,8.467,M,20.884,M,10.0,0225*7A
 \$GPGSA,A,3,03,06,07,15,16,18,21,24,26,27,29,,1.8,1.0,1.5*39
 \$GPGGA,174514.00,6026.085268,N,02213.972802,E,2,12,1.0,8.443,M,20.884,M,9.0,0225*47
 \$GPGSA,A,3,03,06,07,15,16,18,21,24,26,27,29,,1.8,1.0,1.5*39
 \$GPGGA,174515.00,6026.085270,N,02213.972800,E,2,12,1.0,8.440,M,20.884,M,10.0,0225*76
 \$GPGSA,A,3,03,06,07,15,16,18,21,24,26,27,29,,1.8,1.0,1.5*39
 \$GPGGA,174516.00,6026.085268,N,02213.972803,E,2,12,1.0,8.465,M,20.884,M,10.0,0225*78
 \$GPGSA,A,3,03,06,07,15,16,18,21,24,26,27,29,,1.8,1.0,1.5*39
 \$GPGGA,174517.00,6026.085271,N,02213.972797,E,2,12,1.0,8.454,M,20.884,M,10.0,0225*71
 \$GPGSA,A,3,03,06,07,15,16,18,21,24,26,27,29,,1.8,1.0,1.5*39
 \$GPGGA,174518.00,6026.085268,N,02213.972803,E,2,12,1.0,8.459,M,20.884,M,10.0,0225*79
 \$GPGSA,A,3,03,06,07,15,16,18,21,24,26,27,29,,1.8,1.0,1.5*39
 \$GPGGA,174519.00,6026.085265,N,02213.972800,E,2,12,1.0,8.447,M,20.884,M,10.0,0225*79
 \$GPGSA,A,3,03,06,07,15,16,18,21,24,26,27,29,,1.8,1.0,1.5*39
 \$GPGGA,174520.00,6026.085268,N,02213.972809,E,2,12,1.0,8.470,M,20.884,M,10.0,0225*73
 \$GPGSA,A,3,03,06,07,15,16,18,21,24,26,27,29,,1.8,1.0,1.5*39
 \$GPGGA,174521.00,6026.085263,N,02213.972814,E,2,12,1.0,8.473,M,20.884,M,10.0,0225*76
 \$GPGSA,A,3,03,06,07,15,16,18,21,24,26,27,29,,1.8,1.0,1.5*39
 \$GPGGA,174522.00,6026.085262,N,02213.972803,E,2,12,1.0,8.449,M,20.884,M,10.0,0225*7B
 \$GPGSA,A,3,03,06,07,15,16,18,21,24,26,27,29,,1.8,1.0,1.5*39
 \$GPGGA,174523.00,6026.085263,N,02213.972802,E,2,12,1.0,8.461,M,20.884,M,10.0,0225*70
 \$GPGSA,A,3,03,06,07,15,16,18,21,24,26,27,29,,1.8,1.0,1.5*39
 \$GPGGA,174524.00,6026.085265,N,02213.972814,E,2,12,1.0,8.466,M,20.884,M,10.0,0225*71
 \$GPGSA,A,3,03,06,07,15,16,18,21,24,26,27,29,,1.8,1.0,1.5*39
 \$GPGGA,174525.00,6026.085264,N,02213.972812,E,2,12,1.0,8.464,M,20.884,M,10.0,0225*75
 \$GPGSA,A,3,03,06,07,15,16,18,21,24,26,27,29,,1.8,1.0,1.5*39
 \$GPGGA,174526.00,6026.085268,N,02213.972822,E,2,12,1.0,8.465,M,20.884,M,9.0,0225*40
 \$GPGSA,A,3,03,06,07,15,16,18,21,24,26,27,29,,1.8,1.0,1.5*39
 \$GPGGA,174527.00,6026.085271,N,02213.972822,E,2,12,1.0,8.454,M,20.884,M,10.0,0225*73
 \$GPGSA,A,3,03,06,07,15,16,18,21,24,26,27,29,,1.8,1.0,1.5*39
 \$GPGGA,174528.00,6026.085268,N,02213.972816,E,2,12,1.0,8.463,M,20.884,M,10.0,0225*77
 \$GPGSA,A,3,03,06,07,15,16,18,21,24,26,27,29,,1.8,1.0,1.5*39
 \$GPGGA,174529.00,6026.085269,N,02213.972815,E,2,12,1.0,8.467,M,20.884,M,10.0,0225*70
 \$GPGSA,A,3,03,06,07,15,16,18,21,24,26,27,29,,1.8,1.0,1.5*39

Liite 2: NMEA-raakadata muunnettu KKJ-koordinaatistoon ”EUREFMuunnos”-ohjelmalla

\$GPGGA,174506.00,6703295.971,N, 1568073.365,E,2,12,1.0,8.513,M,20.884,M,10.0,0225*7B
 \$GPGSA,A,3,03,06,07,15,16,18,21,24,26,27,29,,1.8,1.0,1.5*39
 \$GPGGA,174507.00,6703295.969,N, 1568073.360,E,2,12,1.0,8.497,M,20.884,M,10.0,0225*71
 \$GPGSA,A,3,03,06,07,15,16,18,21,24,26,27,29,,1.8,1.0,1.5*39
 \$GPGGA,174508.00,6703295.962,N, 1568073.359,E,2,12,1.0,8.471,M,20.884,M,9.0,0225*46
 \$GPGSA,A,3,03,06,07,15,16,18,21,24,26,27,29,,1.8,1.0,1.5*39
 \$GPGGA,174509.00,6703295.956,N, 1568073.356,E,2,12,1.0,8.472,M,20.884,M,10.0,0225*79
 \$GPGSA,A,3,03,06,07,15,16,18,21,24,26,27,29,,1.8,1.0,1.5*39
 \$GPGGA,174510.00,6703295.960,N, 1568073.363,E,2,12,1.0,8.475,M,20.884,M,10.0,0225*74
 \$GPGSA,A,3,03,06,07,15,16,18,21,24,26,27,29,,1.8,1.0,1.5*39
 \$GPGGA,174511.00,6703295.952,N, 1568073.356,E,2,12,1.0,8.446,M,20.884,M,10.0,0225*75
 \$GPGSA,A,3,03,06,07,15,16,18,21,24,26,27,29,,1.8,1.0,1.5*39
 \$GPGGA,174512.00,6703295.952,N, 1568073.353,E,2,12,1.0,8.450,M,20.884,M,10.0,0225*74
 \$GPGSA,A,3,03,06,07,15,16,18,21,24,26,27,29,,1.8,1.0,1.5*39
 \$GPGGA,174513.00,6703295.952,N, 1568073.358,E,2,12,1.0,8.467,M,20.884,M,10.0,0225*7A
 \$GPGSA,A,3,03,06,07,15,16,18,21,24,26,27,29,,1.8,1.0,1.5*39
 \$GPGGA,174514.00,6703295.947,N, 1568073.361,E,2,12,1.0,8.443,M,20.884,M,9.0,0225*47
 \$GPGSA,A,3,03,06,07,15,16,18,21,24,26,27,29,,1.8,1.0,1.5*39
 \$GPGGA,174515.00,6703295.951,N, 1568073.359,E,2,12,1.0,8.440,M,20.884,M,10.0,0225*76
 \$GPGSA,A,3,03,06,07,15,16,18,21,24,26,27,29,,1.8,1.0,1.5*39
 \$GPGGA,174516.00,6703295.947,N, 1568073.362,E,2,12,1.0,8.465,M,20.884,M,10.0,0225*78
 \$GPGSA,A,3,03,06,07,15,16,18,21,24,26,27,29,,1.8,1.0,1.5*39
 \$GPGGA,174517.00,6703295.952,N, 1568073.357,E,2,12,1.0,8.454,M,20.884,M,10.0,0225*71
 \$GPGSA,A,3,03,06,07,15,16,18,21,24,26,27,29,,1.8,1.0,1.5*39
 \$GPGGA,174518.00,6703295.947,N, 1568073.362,E,2,12,1.0,8.459,M,20.884,M,10.0,0225*79
 \$GPGSA,A,3,03,06,07,15,16,18,21,24,26,27,29,,1.8,1.0,1.5*39
 \$GPGGA,174519.00,6703295.941,N, 1568073.360,E,2,12,1.0,8.447,M,20.884,M,10.0,0225*79
 \$GPGSA,A,3,03,06,07,15,16,18,21,24,26,27,29,,1.8,1.0,1.5*39
 \$GPGGA,174520.00,6703295.947,N, 1568073.368,E,2,12,1.0,8.470,M,20.884,M,10.0,0225*73
 \$GPGSA,A,3,03,06,07,15,16,18,21,24,26,27,29,,1.8,1.0,1.5*39
 \$GPGGA,174521.00,6703295.938,N, 1568073.373,E,2,12,1.0,8.473,M,20.884,M,10.0,0225*76
 \$GPGSA,A,3,03,06,07,15,16,18,21,24,26,27,29,,1.8,1.0,1.5*39
 \$GPGGA,174522.00,6703295.936,N, 1568073.363,E,2,12,1.0,8.449,M,20.884,M,10.0,0225*7B
 \$GPGSA,A,3,03,06,07,15,16,18,21,24,26,27,29,,1.8,1.0,1.5*39
 \$GPGGA,174523.00,6703295.938,N, 1568073.362,E,2,12,1.0,8.461,M,20.884,M,10.0,0225*70
 \$GPGSA,A,3,03,06,07,15,16,18,21,24,26,27,29,,1.8,1.0,1.5*39
 \$GPGGA,174524.00,6703295.942,N, 1568073.373,E,2,12,1.0,8.466,M,20.884,M,10.0,0225*71
 \$GPGSA,A,3,03,06,07,15,16,18,21,24,26,27,29,,1.8,1.0,1.5*39
 \$GPGGA,174525.00,6703295.940,N, 1568073.371,E,2,12,1.0,8.464,M,20.884,M,10.0,0225*75
 \$GPGSA,A,3,03,06,07,15,16,18,21,24,26,27,29,,1.8,1.0,1.5*39
 \$GPGGA,174526.00,6703295.947,N, 1568073.380,E,2,12,1.0,8.465,M,20.884,M,9.0,0225*40
 \$GPGSA,A,3,03,06,07,15,16,18,21,24,26,27,29,,1.8,1.0,1.5*39
 \$GPGGA,174527.00,6703295.953,N, 1568073.380,E,2,12,1.0,8.454,M,20.884,M,10.0,0225*73
 \$GPGSA,A,3,03,06,07,15,16,18,21,24,26,27,29,,1.8,1.0,1.5*39
 \$GPGGA,174528.00,6703295.947,N, 1568073.374,E,2,12,1.0,8.463,M,20.884,M,10.0,0225*77
 \$GPGSA,A,3,03,06,07,15,16,18,21,24,26,27,29,,1.8,1.0,1.5*39
 \$GPGGA,174529.00,6703295.949,N, 1568073.373,E,2,12,1.0,8.467,M,20.884,M,10.0,0225*70
 \$GPGSA,A,3,03,06,07,15,16,18,21,24,26,27,29,,1.8,1.0,1.5*39
 \$GPGGA,174530.00,6703295.955,N, 1568073.378,E,2,12,1.0,8.484,M,20.884,M,10.0,0225*79

Liite 4: Merenkulkulaitoksen DGNS:llä tallennettua NMEA-dataa

\$GPGGA,174459.80,6026.0829095,N,02213.9681178,E,2,11,1.04,14.6624,M,20.6579,M,7.5,0604*4D
 \$GPGSA,M,3,16,29,06,15,27,24,26,03,18,21,07,,2.05,1.04,1.77*0A
 \$GPGRS,174459.80,0,0.245,0.245,-0.079,0.835,-0.401,0.061,0.097,0.063,-0.228,-0.029,-0.183,*4E
 \$GPGLL,6026.0829095,N,02213.9681178,E,174459.80,A,D*69
 \$GPVTG,080.971,T,,M,0.0033,N,0.0061,K,D*08
 \$GPZDA,174459.80,15,09,2008,00,00*63
 \$GPGGA,174500.00,6026.0829092,N,02213.9681181,E,2,11,1.04,14.6503,M,20.6579,M,7.7,0604*4D
 \$GPGSA,M,3,16,29,06,15,27,24,26,03,18,21,07,,2.05,1.04,1.77*0A
 \$GPGRS,174500.00,0,0.245,0.239,-0.081,0.829,-0.401,0.060,0.098,0.065,-0.227,-0.029,-0.187,*49
 \$GPGLL,6026.0829092,N,02213.9681181,E,174500.00,A,D*6D
 \$GPGGA,174500.20,6026.0829100,N,02213.9681183,E,2,11,1.04,14.6407,M,20.6579,M,7.9,0604*4C
 \$GPGSA,M,3,16,29,06,15,27,24,26,03,18,21,07,,2.05,1.04,1.77*0A
 \$GPGRS,174500.20,0,0.246,0.235,-0.080,0.828,-0.396,0.057,0.094,0.064,-0.227,-0.028,-0.192,*41
 \$GPGLL,6026.0829100,N,02213.9681183,E,174500.20,A,D*67
 \$GPVTG,332.429,T,,M,0.0241,N,0.0447,K,D*05
 \$GPZDA,174500.20,15,09,2008,00,00*64
 \$GPGGA,174500.40,6026.0829084,N,02213.9681203,E,2,11,1.04,14.6353,M,20.6579,M,8.1,0604*4D
 \$GPGSA,M,3,16,29,06,15,27,24,26,03,18,21,07,,2.05,1.04,1.77*0A
 \$GPGRS,174500.40,0,0.245,0.231,-0.080,0.824,-0.394,0.054,0.093,0.066,-0.228,-0.027,-0.197,*49
 \$GPGLL,6026.0829084,N,02213.9681203,E,174500.40,A,D*67
 \$GPVTG,162.520,T,,M,0.0421,N,0.0779,K,D*04
 \$GPZDA,174500.40,15,09,2008,00,00*62
 \$GPGGA,174500.60,6026.0829099,N,02213.9681226,E,2,11,1.04,14.6339,M,20.6579,M,8.3,0604*4A
 \$GPGSA,M,3,16,29,06,15,27,24,26,03,18,21,07,,2.05,1.04,1.77*0A
 \$GPGRS,174500.60,0,0.246,0.233,-0.080,0.817,-0.396,0.051,0.097,0.066,-0.230,-0.027,-0.195,*46
 \$GPGLL,6026.0829099,N,02213.9681226,E,174500.60,A,D*6E
 \$GPVTG,010.682,T,,M,0.0683,N,0.1264,K,D*09
 \$GPZDA,174500.60,15,09,2008,00,00*60
 \$GPGGA,174500.80,6026.0829087,N,02213.9681109,E,2,11,1.04,14.6664,M,20.6579,M,7.1,0604*45
 \$GPGSA,M,3,16,29,06,15,27,24,26,03,18,21,07,,2.05,1.04,1.77*0A
 \$GPGRS,174500.80,0,0.239,0.194,-0.084,0.850,-0.376,0.070,0.011,0.069,-0.217,-0.029,-0.184,*4E
 \$GPGLL,6026.0829087,N,02213.9681109,E,174500.80,A,D*61
 \$GPVTG,229.538,T,,M,0.0389,N,0.0721,K,D*09
 \$GPZDA,174500.80,15,09,2008,00,00*6E
 \$GPGGA,174501.00,6026.0829071,N,02213.9681117,E,2,11,1.04,14.6634,M,20.6579,M,7.3,0604*4D
 \$GPGSA,M,3,16,29,06,15,27,24,26,03,18,21,07,,2.05,1.04,1.77*0A
 \$GPGRS,174501.00,0,0.241,0.188,-0.084,0.840,-0.374,0.068,0.020,0.070,-0.217,-0.030,-0.179,*4F
 \$GPGLL,6026.0829071,N,02213.9681117,E,174501.00,A,D*6E
 \$GPVTG,180.517,T,,M,0.0338,N,0.0626,K,D*08
 \$GPZDA,174501.00,15,09,2008,00,00*67
 \$GPGGA,174501.20,6026.0829065,N,02213.9681128,E,2,11,1.04,14.6637,M,20.6579,M,7.5,0604*43
 \$GPGSA,M,3,16,29,06,15,27,24,26,03,18,21,07,,2.05,1.04,1.77*0A
 \$GPGRS,174501.20,0,0.240,0.185,-0.086,0.839,-0.370,0.067,0.019,0.071,-0.218,-0.030,-0.178,*43
 \$GPGLL,6026.0829065,N,02213.9681128,E,174501.20,A,D*65
 \$GPVTG,014.728,T,,M,0.0140,N,0.0259,K,D*0B
 \$GPZDA,174501.20,15,09,2008,00,00*65
 \$GPGGA,174501.40,6026.0829062,N,02213.9681140,E,2,11,1.04,14.6593,M,20.6579,M,7.7,0604*43