

Antti Kanninen & Riku Puolakka

JÄRJESTELMÄALUSTAN TARKAN PAIKKATIEDON JA PERUS- SUUNNAN MÄÄRITTÄMINEN

JÄRJESTELMÄALUSTAN TARKAN PAIKKATIEDON JA PERUS- SUUNNAN MÄÄRITTÄMINEN

Antti Kanninen & Riku Puolakka
Opinnäytetyö
Syksy 2014
Tietotekniikan koulutusohjelma
Oulun seudun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun seudun ammattikorkeakoulu
Tietotekniikan koulutusohjelma

Tekijät: Antti Kanninen, Riku Puolakka
Opinnäytetyön nimi: Järjestelmälustan tarkan paikkatiedon ja perussuunnan määrittäminen
Työn ohjaajat: Timo Vainio, Pertti Pasanen
Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: Syksy 2014
Sivumäärä: 65 + 10 liitettä

Tämän opinnäytetyön aiheena oli tutkia erilaisien satelliittipaikannusjärjestelmien ja -laitteiden soveltuvuutta Puolustusvoimien järjestelmälustojen paikkatiedon ja perussuunnan määrittämiseen. Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää käytössä olevien satelliittipaikannuslaitteiden asennustapa, toimivuus, tarkkuus ja sopivuus järjestelmälustan paikantamiseen ja suuntaamiseen, tutkimukselle annettujen rajoitusten puitteissa. Työssä tutkittiin myös vaihtoehtoisten suunnistuslaitteiden käyttöä ja niiden suuntatarkkuutta.

Työssä perehdyttiin paikantamisessa käytettäviin tekniikoihin, järjestelmälustaan ja GPS- ja GLONASS-satelliittipaikannuslaitteisiin. Paikannuslaitteiden antennien asennuspaikka järjestelmälustassa kartoitettiin uudelleen ja asennukset suoritettiin sen perusteella. Antennien ja satelliittipaikannuslaitteiden väliset kaapelit tehtiin paikannuslaitteiden ohjekirjallisuuden antamien arvojen mukaisesti ja niiden sähköiset arvot todennettiin mittauksilla. Satelliittipaikannuslaitteistojen asennukset suoritettiin järjestelmälustan sisälle laitekaappiin erillisten ohjeistuksien mukaisesti.

Tutkimuksen mittaukset suoritettiin Jyväskylässä, Tikkakosken lentokentän läheisyydessä. Järjestelmälustalle suoritettiin luotettavat referenssimittaukset, joihin tutkimuksessa mukana olleiden satelliittipaikannuslaitteiden ja vaihtoehtoisten suunnistamislaitteiden mittaustuloksia analyysissa verrattiin.

Tutkimuksen tuloksista saadaan käsitys tällä hetkellä käytössä olevien satelliittipaikannuslaitteiden paikannus- ja suunnistus- ja tarkkuuksista ja myös suunnistusnopeudesta. Vaihtoehtoisten suunnistusmenetelmien käytettävyydet ja tarkkuudet on myös analysoitu tutkimuksessa. Tuloksien toivotaan palvelevan jatkossa järjestelmälustojen tulevia elinkaaripäivityksiä.

Asiasanat: GLONASS, GPS, järjestelmälusta, paikannuslaite, satelliittipaikannusjärjestelmä

ALKULAUSE

Tämä opinnäytetyö on tehty Ilmavoimien materiaalilaitokselle syksyn 2014 aikana.

Haluamme kiittää opinnäytetyön tilaajaa tämän opinnäytetyön tekemisen mahdollistamisesta. Haluamme myös kiittää kaikkia Ilmavoimien materiaalilaitoksen, Ilmasotakoulun ja Jyvässeudun Johtokartoitus Oy:n työntekijöitä, jotka ovat auttaneet opinnäytetyön toteutuksessa. Kiitämme myös opinnäytetyömme ohjaajia, ohjaavaa opettajaamme Timo Vainiota ja järjestelmäinsinööri Pertti Pasasta.

Kotiväelle kiitokset kannustamisesta ja myönteisestä suhtautumisesta työn ohessa opiskeluun.

Jyväskylässä 20.11.2014

Antti Kanninen ja Riku Puolakka

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
ALKULAUSE	4
SISÄLLYS	5
KESKEISET TERMIT JA LYHENTEET	7
1 JOHDANTO	10
2 MÄÄRITYS	11
3 TYÖSSÄ KÄYTETYT PAIKANNUSJÄRJESTELMÄT	13
3.1 Satelliittimittauksen perusteet	13
3.2 GPS	15
3.3 GLONASS	18
3.4 Satelliitin lähetysteho ja häirintä	19
3.5 GPS-satelliitit	21
4 JÄRJESTELMÄALUSTAN PAIKANTAMISEN YLEISKUVAUS	23
4.1 Järjestelmälusta	24
4.2 Satelliittipaikannuslaitteet	25
4.2.1 Hemisphere Crescent VS100	26
4.2.2 Thales Ashtech Aquarius ²	27
4.2.3 Ashtech ABX802 ja Ealtec TA-08	29
4.2.4 Trimble SPS555H	31
4.2.5 Referenssimittauslaite	32
5 ASENNUS	33
5.1 Antennien asennus	33
5.2 Antennikaapelit	34
5.3 Antennikaapeleiden RF-mittaukset	36
5.4 Paikannuslaitteistojen asennus järjestelmälustaan	38
6 MITTAUKSET	42
6.1 Referenssimittaus	43
6.2 Hemisphere Crescent VS100	45
6.3 Thales Ashtech Aquarius ²	47
6.4 Ashtech ABX802	50
6.5 Trimble SPS555H	52

6.6 Vaihtoehtoiset suunnistuslaitteet	53
7 MITTAUSTULOKSIEN ANALYSOINTI	56
7.1 Analysointi	56
7.2 Tulokset	58
8 YHTEENVETO	60
LÄHTEET	63
LIITTEET	66
LIITE 1. Lähtötietomuistio	
LIITE 2. CRL-500 Häiriömittaukset	

KESKEISET TERMIT JA LYHENTEET

AS	Anti-Spoof. P(Y)-koodin salaus.
BPSK	Binary Phase Shift Keying. Binäärinen vaiheavainnus.
C/A	Coarse Acquisition. GPS-siviilinavigointisignaali.
CBRN	Chemical, Biological, Radiological and Nuclear. Kemiallinen, biologinen, radioaktiivinen ja ydinaktiivinen suoja.
CDMA	Code Division Multiple Access. Koodijaettu kanavointi.
CL	Civil Long. Siviilikäyttöön tarkoitettu satelliittipaikannuksen signaali.
CM	Civil Moderate. Siviilikäyttöön tarkoitettu satelliittipaikannuksen signaali.
CW	Continuous Wave. Moduloimaton kantaalto.
DGPS	Differential Global Positioning System. Differentiaalinen GPS.
DME	Distance Measuring Equipment. Etäisyydenmittausjärjestelmä.
e-Dif	Extended Differential. Laajennettu differentiaalikorjaus.
EMC	Electromagnetic Compatibility. Elektromagneettinen laitteistojen yhteensopivuus.
EGNOS	European Geostationary Navigation Overlay Service.
EMP	ElectroMagnetic Pulse. Elektroniikkaa ja sähkölaitteita vaurioittava sähkömagneettisen säteilyn purkaus.
FDM	Frequency Division Multiplexing. Taajuusjaettu kanavointi.
FDMA	Frequency Division Multiple Access. Taajuusjaettu monikäyttö.
GLONASS	Global'naya Navigatsionnaya Sputnikowaya Sistema. Venäjän puolustusministeriön kehittämä satelliittipaikannusjärjestelmä.

GNSS	Global Navigation Satellite System.
GPS	Global Positioning System. Yhdysvaltain puolustusministeriön kehittämä satelliittipaikannusjärjestelmä.
HDOP	Horizontal Dillution of Precision. Paikannuksen hyvyysluku.
HF	High Frequency. 3–30 Mhz:n taajuusalue.
HP	High Precision. GLONASS-sotilasnavigointisignaali.
L-Dif	Local Differential.
M-koodi	Military Code. Uusi sotilaskäyttöön tarkoitettu koodi satelliittipaikannuksessa.
MF	Medium Frequency. 300 kHz – 3 MHz:n taajuusalue.
MLU	Mid-Life Update. Elinkaaripäivitys.
MSAS	Multi-functional Satellite Augmentation System.
N-liitin	N Connector. Kierteytetty keskikokoinen RF-liitin 0–11 GHz:n taajuusalueelle.
NB	Narrowband. Kapeakaistainen lähete.
PPS	Pulse Per Second.
PRN	Pseudo Random Noise Code. Näennäissatunnainen koodaus.
P(Y)	Precision Code. GPS-sotilasnavigointisignaali.
RF	Radio Frequency. Radioaallot.
RFI	Radio Frequency Interference. Radiotaajuiset häiriöt.
RTK	Real-Time Kinematic. Reaaliaikainen kinemaattinen mittaus.
SA	Selective Availability. GPS-signaalin heikennys.

SBAS	Satellite Based Augmentation System. Satelliittipohjainen parannusjärjestelmä.
SIM	Sotilasilmailumääräys.
SP	Standard Precision. GLONAS siviilinavigointisignaali.
SWR	Standing Wave Ratio. Seisovan aallon suhdeluku.
SSR	Secondary Surveillance Radar. Toisiotutkajärjestelmä.
TNC-Liitin	Treaded Neil-Concelman. Kierteytetty RF-liitin 0–11 GHz:n taajuusalueelle.
TVJ	Tiedustelu, valvonta ja johtamisjärjestelmä.
UHF	Ultra High Frequency. 300 MHz – 3 GHz:n taajuusalue.
VDC	Voltage Direct Current. Tasavirta.
VOR	Very high frequency Omni directional Range. Monisuuntamajakka.
VRS	Virtual Reference Station. Virtuaalinen referenssiasema.
WAAS	Wide Area Augmentation System. GPS-paikannusta tukeva järjestelmä.
WB	Wideband. Laajakaistainen lähete.

1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on tutkia järjestelmäalustan tarkan paikkatiedon ja perussuunnan määrittämistä käyttäen GPS- (Global Position System) ja GLONASS-satelliittipaikannusjärjestelmiä (Global'naya Navigatsionnaya Sputnikowaya Sistema) absoluuttista paikanmäärittämistä käyttäen sekä tutkia vaihtoehtoisten suunnistuslaitteiden käyttömahdollisuuksia järjestelmäalustan suuntaamiseksi (liite 1). Järjestelmäalustojen perussuunnan määrittämisessä on ollut suuria ongelmia, joihin etsimme tässä työssä tehtyjen testien perusteella ratkaisuja mahdollisia tulevia järjestelmäalustojen ja satelliittipaikannuslaitteistojen MLU-elinkaaripäivityksiä (Mid-Life Update) varten.

Järjestelmäalustalla tässä työssä tarkoitetaan Puolustusvoimien käytössä olevia laitesuojia ja pyöräalustaisia panssaroituja ajoneuvoja, joihin on asennettu erilaisia elektronisia järjestelmiä. Tässä tutkimuksessa järjestelmäalustana käytetään Conlog Oy:n valmistamaa CRL-500-järjestelmäalustaa. Järjestelmäalustat ovat nykyään raskaasti panssaroituja ja niiden toimintaympäristöt ovat erittäin haasteellisia, joten ne ja ympäristössä vallitsevat olosuhteet aiheuttavat haasteen luotettavan paikkatiedon ja perussuunnan saamiselle monitie-etenemisen ja erilaisten radiotiellä olevien häiriöiden takia.

Nykyisin käytössä olevat järjestelmät ovat erittäin kehittyneitä ja vaativat järjestelmäalustoilta ja niissä käytettäviltä laitteistoilta erityisiä ominaisuuksia. Tämän lisäksi järjestelmiä käyttävillä henkilöillä on oltava erilaisia taitoja ja vankka kokemus laitteistojen käytöstä, ettei omalla tekemisellään tietämättä aiheuteta haittaa laitteistojen oikeanlaiselle toiminnalle.

2 MÄÄRITYS

Tutkimuksessa pyritään selvittämään, mikä projektin käytössä olevista paikannuslaitteistoista ja millainen antennien asennuspaikka on toimivin järjestelmäalustan tarkan paikkatiedon ja perussuunnan määrittämiseen. Työn tarkoitus on myös selvittää, onko olemassa vaihtoehtoja suuntaamismenetelmää järjestelmäalustalle tilanteessa, milloin käytössä olevat GPS- ja GLONASS-satelliittipaikannusjärjestelmät eivät ole käytettävissä.

Työssä paikannuslaitteiden asennukset suoritetaan olemassa olevien asennusohjeiden mukaisesti, samalla tarkastaen ohjeiden ja käytettävien materiaalien oikeellisuus. Antennien asennuspaikka kartoitetaan uudestaan, koska tutkimuksessa mukana olevan järjestelmäalustan nykyisin käytettävissä asennuspaikoissa on havaittu olevan ongelmia paikkatiedon ja perussuunnan saamiselle.

Järjestelmäalustalle suoritetaan referenssimittaukset, jotta paikka- ja suuntatiedolle saadaan luotettavat vertailuarvot. Referenssimittaukset suoritetaan käyttäen suhteellista paikantamista, jolla paikkatiedon tarkkuudessa päästään alle 5 cm:n ja suuntatiedossa päästään jopa 0,01 asteen tarkkuuteen.

Tarkimpien Puolustusvoimien käytössä olevien järjestelmien järjestelmäalustan perussuunnan tarkkuudeksi on määritetty $\pm 0,1$ astetta. Tietyissä järjestelmissä tietoturvaluusien takia paikkatiedon ja perussuunnan määrittämisessä ei voida käyttää differentiaalista tai suhteellista paikantamista. Tutkimuksessa pyritään saavuttamaan mahdollisimman tarkka perussuunta järjestelmäalustalle absoluuttisella paikanmäärittämisellä ilman ulkoista korjausta. Käytämme työssä määrittämisensä järjestelmäalustan perussuunnalle $\pm 0,1$ asteen suuntatarkkuutta.

Paikkatiedon tarkkuus ei ole yhtä kriittinen kuin perussuunnalle määritetty tarkkuus. Paikkatiedon tarkkuudelle tutkimuksen lähtötiedoissa ei ollut annettu määrittämisensä, koska paikkatieto pystytään määrittämään nykyisin karttasovelluksia käyttäen, mutta käytimme tutkimuksessa määrittämisensä differentiaaliselle paikannusjärjestelmälle luvattua 0,5–5 metrin paikannustarkkuutta.

Paikka- ja suuntatiedon mittaamiseen kuluva aika ei ollut määritelty tutkimuksen lähtötiedoissa, mutta määritimme ajan 15 minuuttiin, koska yleisesti käytettävien järjestelmälustojen käyttökuntoon laittaminen vie tämän verran aikaa.

Vaihtoehtoisten suuntaamismenetelmien käyttö tulee esille, kun järjestelmälustaa käytetään peitteisessä maastossa, jolloin käytössä olevien satelliittipaikannuslaitteiden käyttö on mahdotonta. Tutkimuksessa selvitetään, mitkä laitteet olisivat sopivia vaihtoehtoisia suunnistuslaitteita ja mikä on niiden suuntatarkkuus.

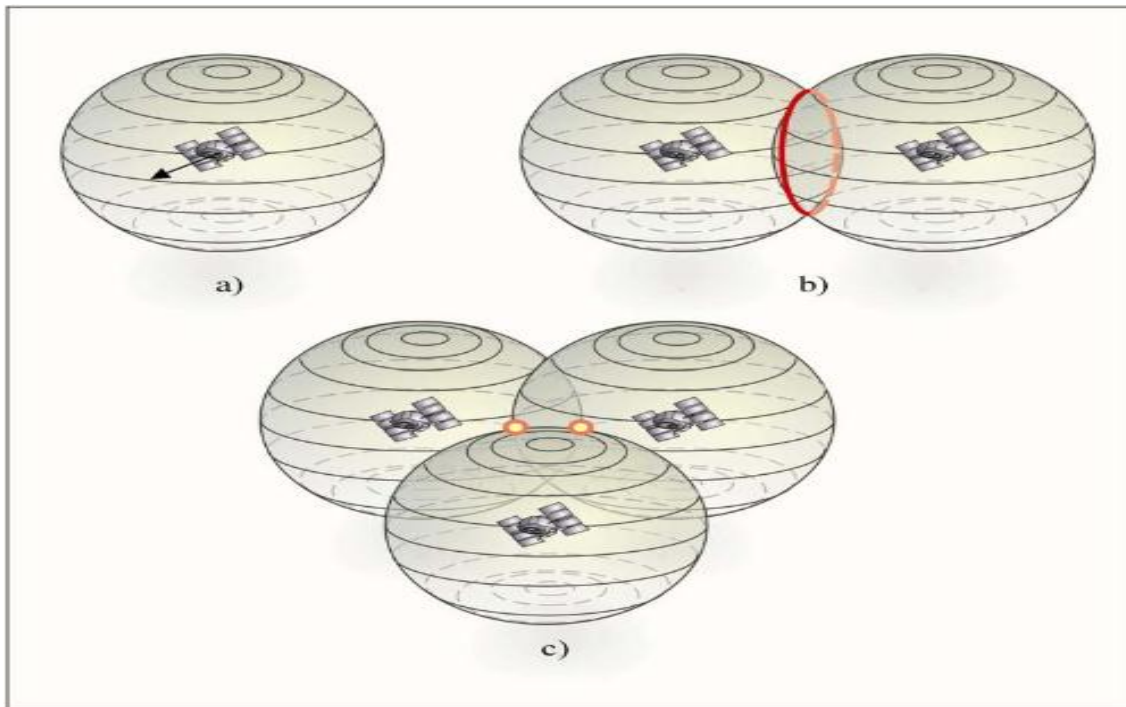
3 TYÖSSÄ KÄYTETYT PAIKANNUSJÄRJESTELMÄT

Työssä tutkitaan erilaisia paikannusmenetelmiä käyttäviä suunnistuslaitteita paikkatiedon ja perussuunnan mittaamiseksi järjestelmälustalle. Tutkimuksessa käsitellään GPS- ja GLONASS-satelliittipaikannusjärjestelmiä.

3.1 Satelliittimittauksen perusteet

Satelliittimittaus on satelliittipaikannusjärjestelmien avulla tehtävää sijainnin määrittämistä satelliittisignaaleista. Satelliittimittauksesta käytetään termiä GPS-mittaus, mutta nykyään yleisesti puhutaan maailmanlaajuisesta GNSS-mittauksesta (Global Navigation Satellite System). Tällöin sijainnin määrittämisessä käytetään yhdessä GPS-järjestelmän kanssa muitakin käytössä olevia satelliittipaikannusjärjestelmiä. (1.)

Satelliittipaikannus perustuu kolmiomittaukseen sekä satelliittien ja paikannusvastaanottimen pseudoetäisyyksien laskemiseen, joka lasketaan radiosignaalin lähetteen koodivaiheesta sekä signaalin vaiheesta. Yhden satelliitin pseudoetäisyyden mittauksella saadaan vastaanottimen paikaksi pallopinta. Kahdelta satelliitilta mitatuilla etäisyyksillä pystytään muodostamaan pallopintojen leikkauksen kehä. Kolmelta satelliitilta mitatuilla etäisyyksillä pystytään pallopintojen leikkaukseksi tarkentamaan kaksi pistettä. Nämä kaksi pistettä riittävät paikantamiseen, koska vain toinen pisteistä sijaitsee maanpinnalla ja toinen avaruudessa. (Kuva 1.) Normaalisti paikanmäärityksessä käytetään neljää satelliittipaikannusgeometrian parantamiseksi ja vastaanottimen kellovirheen poistamiseksi. (2, s. 445.)



KUVA 1. Paikantamisen geometria pallopintoina esitettynä (3, s. 15)

Satelliitit lähettävät eri taajuusalueilla olevia radiosignaaleja. Radiosignaalien kantoaaltoihin lisätään binäärikoodoja, joiden avulla paikanmääritys pystytään suorittamaan. Satelliittipaikanmääritys jaetaan kolmeen erilaiseen määrittelytyyppiin: absoluuttiseen, differentiaaliseen ja suhteelliseen paikanmääritykseen.

(1.)

Absoluuttista paikanmääritystä suoritetaan yleensä yhdellä vastaanottimella, esimerkiksi käsinavigaattorilla, joka vastaanottaa satelliitin lähettämän radiosignaalin. Tällöin normaalisti käytetään satelliittisignaalin C/A-koodia (Coarse acquisition). Vastaanotettua koodia verrataan navigaattorissa sisäisesti generoituun koodiin, josta saadaan selville signaalin kulku-aika ja siitä puolestaan selviää etäisyys satelliittiin. Vastaanottimen sijainti pystytään näin määrittämään, koska tieto satelliittien paikoista on välitetty radiosignaalin mukana vastaanottimelle. (1.)

Differentiaalinen paikanmääritys eli DGPS (Differential Global Positioning System) on paikannuksen alueellinen tarkennusmenetelmä, joka pienentää paikanmäärityksen virheitä differentiaalikorjauksen avulla. Korjaukset kiinteältä maa-

asemalta välitetään vastaanottimelle radion, matkapuhelimen tai satelliitin välityksellä. (1.)

Suhteellisessa paikanmäärityksessä satelliittien signaalien kantoaaltoa hyväksikäytetään paikanmääritykseen. Määritykseen tarvitaan vähintään kaksi vastaanotinta, joista toinen on tunnetussa koordinaattipisteessä. Mittauksessa määritetään koordinaattieroja vastaanottimien välillä. (1.)

Vastaanottimen lukittuessa satelliitin signaaliin mittaa vastaanotin kantoaallon vaiheen. Tämän jälkeen vastaanotin alkaa laskea signaalista tulevien kokonaisaallonpituuksien lukumäärää. Satelliitin liikkuesssa radallaan sen etäisyyden muutos alkaa näkyä vastaanottimen laskemien saapuneiden aallonpituuksien lukumäärässä. Kun useamman satelliitin aallonpituuksia on havaittu jonkin aikaa, pystytään laskemaan satelliitin etäisyys vastaanottimesta. Nykyään tärkeimpiä suhteellisen paikanmäärityksen sovelluksia ovat jälkilaskentaan perustuva staattinen GPS-mittaus ja reaaliaikaiseen laskentaan perustuva RTK-mittaus (Real-Time Kinematic). (1.)

Edellä mainituilla tekniikoilla saavutettavat mittaustarkkuudet ovat absoluuttisella paikanmäärityksellä alle 10 metriä, differentiaalisella 0,5–5 metriä ja suhteellisella jo alle 5 senttimetrin tarkkuuksia. (1.)

3.2 GPS

Global Position System on lyhennys sen alkuperäisestä nimestä NAVSTAR GPS (NAVigation Satellite Time and Ranging Global Positioning System), joka on satelliitteihin perustuva navigointijärjestelmä. Järjestelmän on alun perin kehittänyt sotilaskäyttöön Yhdysvaltain puolustusministeriö. Alkuperäisinä vaatimuksina järjestelmällä olivat muutaman metrin paikannustarkkuus, häiriösietoisuus ja signaalien yksisuuntaisuus. GPS-järjestelmä mahdollistaa käyttäjälle kaikkialla maapallolla paikkatiedon, nopeuden, suunnan ja tarkan ajan saamisen 24 h vuorokaudessa. (4, s. 11.)

GPS on suunniteltu jo alusta alkaen passiiviseksi etäisyyden mittaukseen perustuvaksi järjestelmäksi. Käyttäjä pystyy paikantamaan itsensä pelkästään

kuuntelemalla satelliitteja kolmiomittauksen tapaan. GPS-konseptin on mahdollistanut hajaspektritekniikka, elektroniikan integroitujen piirien kehittyminen, atomikellojen kehittyminen sekä kyky ennustaa ja ylläpitää satelliittien ratoja. (3, s. 19.)

GPS-järjestelmä koostuu käyttäjistä, kontrolliverkosta ja satelliiteista. Kontrolliverkko koostuu komentokeskuksesta Colorado Springsissä, viidestä seuranta-asemasta, kolmesta lähetinasemasta ja satelliiteista (2, s. 445). Satelliittikons-tellaatio muodostuu nykyään uusien satelliittisukupolvien tultua käyttöön 31 satelliitista, joista 24 on käytössä ja loput seitsemän ovat varalla (5).

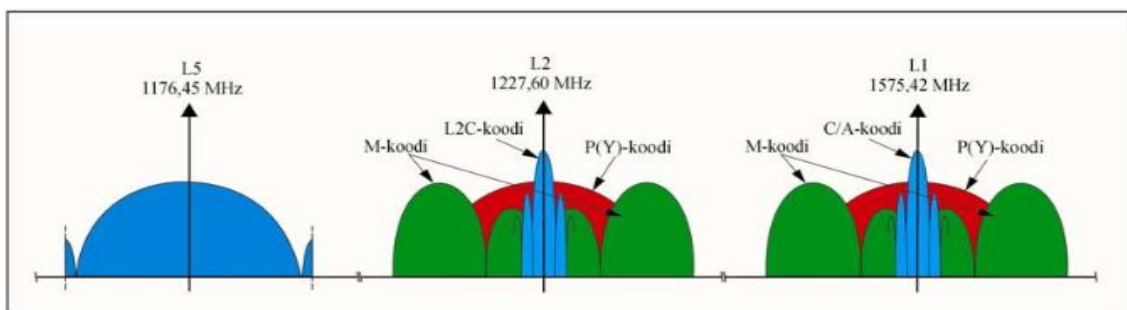
Satelliittien inkliinaatiokulma on 55 astetta ja niiden lentokorkeus 20 182 kilometriä, jolloin satelliitin kiertoaika radalla on 11 h 57 min 57 s eli puoli tähtivuorokautta. Satelliitteja on kuudella eri radalla, mikä takaa yli 4–5 satelliitin olevan näkyvissä yli 5 asteen kulmassa missä tahansa maapallolla. Satelliittien keilat kattavat maapallon sen pinnalta aina 200 kilometrin korkeuteen saakka. (2, s. 445.)

GPS-järjestelmässä käytetään suorasekvenssi-hajaspektritekniikkaa, jossa kaikki satelliitit lähettävät samoilla taajuuksilla kuitenkin häiritsemättä toisiaan. Satelliitit lähettävät signaalia kahdella eri kanta-aaltotaajuudella, joita merkitään lyhenteillä L1 (1575,42 MHz) ja L2 (1227,60 MHz). Käytettäessä kahta taajuutta ionosfäärin aiheuttaman viiveen vaikutus pystytään poistamaan pseudoetäisyyksistä, koska viiveen suuruus riippuu käytettävästä taajuudesta. Satelliittien rubidium- ja cesiumatomikellot tuottavat 10,23 MHz:n perustaajuuden, josta kertomalla saadaan lopulliset L1- ja L2-kanta-aaltotaajuudet. Satelliittien lähettämä signaali on oikeakätisesti ympyräpolarisoitua, BPSK-moduloitua (Binary Phase Shift Keying) signaalia. (3, s. 21.)

Satelliittien kanta-aaltosignaali on moduloitu pseudosatunnaisella PRN-koodilla (Pseudo Random Noise Code) ja varsinaista dataa sisältävällä navigointiviestillä. PRN-koodit eivät itsessään sisällä minkäänlaista informaatiota ja ne vaikuttavat täysin satunnaisilta, mutta koodi on kuitenkin täydellisesti ja yksikäsitteisesti toistettavissa. Tämän vuoksi niitä nimitetään valesatunnaisiksi bittijonoiksi. (3, s. 21.)

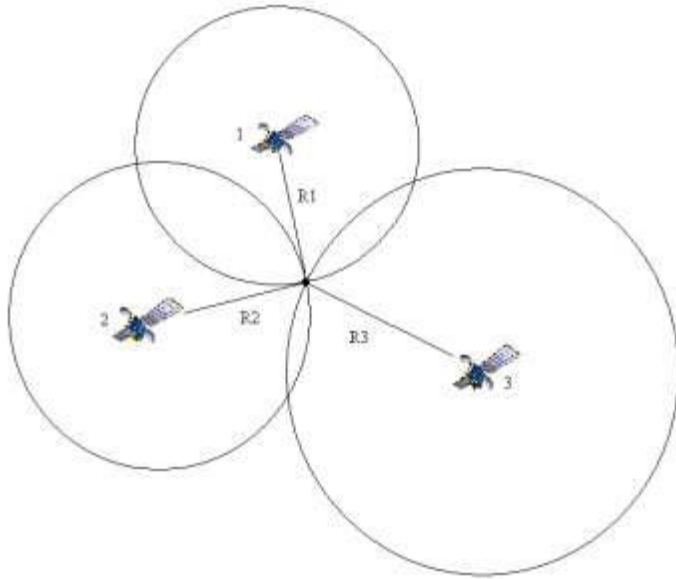
Satelliittien signaalit pystytään erottamaan toisistaan, koska satelliittien PRN-koodit on valittu siten, että niiden sekoittuminen toisiinsa on erittäin heikkoa eli ne ovat ortogonaalisia. Tällaista signaalien erottelua kutsutaan CDMA:ksi (Code Division Multiple Access) eli koodijakokanavoinniksi. CDMA-kanavoinnin etu on sen laajan spektrin mahdollistama pieni lähetysteho ja käytettävien taajuuksien päällekkäinen toiminta. (3, s. 22.)

Kantaaaltotaajuuksiin L1 ja L2 on nykyään moduloitu molempiin C/A-, P(Y)- (Precision Code) ja M-koodit (Military Code) (kuva 2), minkä on mahdollistanut uusien modernisoitujen satelliittien käyttöönotto. C/A-koodilla moduloitua L2-kantaaaltoa kutsutaan nimellä L2C. Sen käyttöön ottaminen on parantanut siviilikäytössä olevien paikannuslaitteiden tarkkuutta. M-koodi on uusi modernisoitu sotilaskäyttöön tarkoitettu koodi, joka on vahvasti salattu ja suunniteltu kestämään paremmin häirintää ja turvaamaan GPS:n sotilaskäyttöä. Uusien satelliittien tulemisen mukana on käyttöön otettu myös uusi kantaalto L5 (1176,45 MHz), joka palvelee ainoastaan lentoturvallisuuden palveluita ja tarjoaa käyttäjille parempaa tarkkuutta ja luotettavuutta. (5.)



KUVA 2. GPS-järjestelmän signaalit modernisoinnin jälkeen (3, s. 24)

Neljän satelliitin signaalilla pystytään jatkuvaan kolmiulotteiseen paikantamiseen ja vastaanottimen kellovirhe pystytään korjaamaan. GPS-vastaanotin mittaa satelliittien signaalit ja laskee niiden perusteella oman paikkansa. Paikannus perustuu signaalien kolmiomittamiseen eli trilateraatioon (kuva 3). Kolmiomittamisessa satelliitin ja vastaanottimen välinen etäisyys saadaan laskettua kellonaikojen erotuksesta. Satelliitista lähetetty signaali sisältää lähetysaikatiedon, jolloin vastaanottimen on mahdollista laskea etäisyytensä satelliittiin. (4, s. 21–22.)



KUVA 3. Satelliittipaikannus kolmiomittauksella (6, s. 8)

3.3 GLONASS

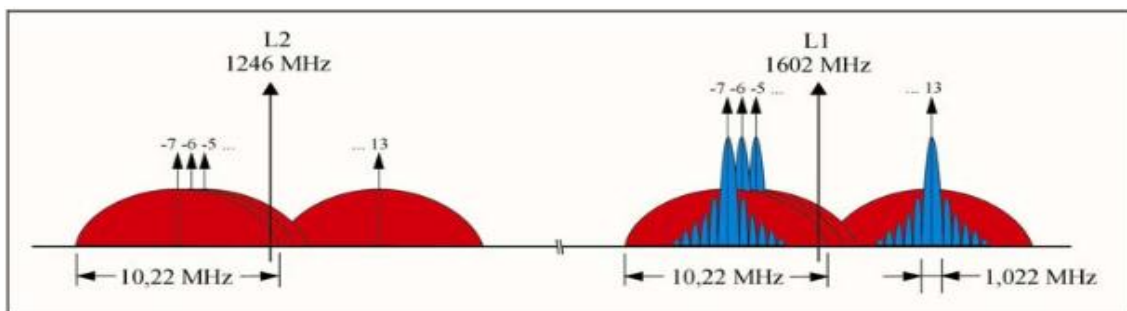
GLONASS (Global'naya Navigatsionnaya Sputnikowaya Sistema, Global Navigation Satellite System) on Venäjän kehittämä satelliittipaikannusjärjestelmä. GLONASS-järjestelmä on tekniikaltaan hyvin samankaltainen GPS-järjestelmän kanssa. Satelliittien erottelu perustuu GLONASS-järjestelmässä taajuusjakoon (FDMA, Frequency Division Multiple Access), kun taas GPS-järjestelmässä käytetään koodijakoa (CDMA). (3, s. 26.)

GLONASS-järjestelmä koostuu 24 satelliitista, jotka lentävät 19 130 km:n korkeudessa 64,8 asteen inkliinaatiokulmassa. Satelliitteja on kolmella eri ratatasolla, mikä takaa yli 5 satelliitin olevan aina näkyvissä missä tahansa maapallolla. Jokaisella ratatasolla on kahdeksan satelliittia 45 asteen erolla. Vastaanotin laskee oman sijaintinsa ja nopeuden mittaamalla vähintään neljän satelliitin pseudoetäisyyden sekä signaalin nopeuden doppler-siirtymän avulla. (2, s. 450.)

Järjestelmä lähettää kahta navigointisignaalia, siviili- (SP, Standard Precision) ja sotilasnavigointisignaalia (HP, High Precision). Avoimen SP-koodin paikannustarkkuus vaakatasossa on operaattorin mukaan 57–70 m ja pystytasossa 70 m. Nopeustarkkuus on 0,15 m/s ja saavutettavan ajan eli aikareferenssin tarkkuus 1 millisekuntia. GLONASS:n paikannustarkkuutta pystytään tarkentamaan

GPS:n tavoin differentiaalimenetelmillä. SP-signaalit ovat FDM-multipleksoituja (Frequency Division Multiplexing) lähetteitä ($L1 = 1602 \text{ MHz} + n \cdot 0,5625 \text{ MHz}$) ($L2 = 1246 \text{ MHz} + n \cdot 0,4375 \text{ MHz}$). Jokaisella satelliitilla on oma lähetystaajuutensa johtuen satelliittien erottelusta taajuusjaolla. Satelliitit lähettävät myös signaaleja samoilla taajuuksilla, mutta satelliitit eivät näy samaan aikaan vastaanottimelle. Tämä on hoidettu satelliittien ratakonfiguraatiolla. Satelliittien informaatio on BPSK-moduloitua ja sen bittinopeus on 50 bit/s. Satelliitin signaalin tasoksi luvataan $-156 \dots -161 \text{ dBW}$. (2, s. 450.)

GLONASS-järjestelmän HP-signaali on tarkoitettu ainoastaan sotilaskäyttöön ja sen sanoman rakennetta tai sisältöä ei ole virallisesti julkaistu, vaikka sen rakenne on tiedossa, koska sitä ei ole salattu. HP- ja SP-signaali lähetetään nykyisin molemmilla käytössä olevilla L1- ja L2-taajuuksilla (kuva 4). (3, s. 29.)



KUVA 4. GLONASS-signaalien spektrit (3, s. 29)

3.4 Satelliitin lähetysteho ja häirintä

Satelliittipaikannuksen häirintää toteutetaan pääsääntöisesti kolmella eri tekniikalla, jotka jakautuvat häirintäsignaalien perusteella seuraavasti: laajakaistainen häirintä WB (Wideband jamming), kapeakaistainen häirintä NB (Narrowband jamming) ja signaalin väärentäminen. CW-häirintä (Continuous Wave jamming) lasketaan kapeakaistaiseksi häirinnäksi. (7, s. 241.)

Laajakaistaisella häirinnällä tarkoitetaan usean paikannustaajuuden samanaikaista häirintää 10,23 MHz:n kaistanleveydellä. Tällainen häirintä on tehokasta ja haittaa vastaanottimen toimintaa paljon. Häirinnältä suojautumisen tekniikat ovat kalliimpia ja hankalampia asentaa vastaanottiin kuin kapeakaistaiseen häirintää vastaan suunnitellut ratkaisut. (7, s. 242.)

Kapeakaistaiselle häirinnälle on monta eri määritystä, mutta se voi olla mitä tahansa ei-haluttua signaalia, jonka kaistanleveys on esimerkiksi vähemmän kuin C/A-signaalin $\pm 1,023$ MHz. Kapeakaistainen häirintä on ainakin aikaisemmin, yleensä GPS:n osalta keskittynyt L1- tai L2-taajuuksien ympärille. Yleisin kapeakaistainen häirintä on CW-häirintää ja eniten sitä on testattu vastaanottiin yhtä paikannustaaajuutta käyttäen. CW-häirintää on esimerkiksi pyyhkäisy-CW (swept CW), amplitudimoduloitu CW (amplitude-modulated CW) ja pulssi-CW (pulsed CW). CW-häirinnän etu on suurten tehotasojen keskittäminen pienelle taajuuskaistalle. Kapeataajuiset häirintämenetelmät eivät tuota kovin suurta uhkaa satelliittipaikannukselle, koska kyseisen tyyppinen häirintälähete on suhteellisen helppo suodattaa pois eikä se vaikuta suuresti vastaanottimen tehokkuuteen. (7, s. 242.)

Signaalin väärentäminen on myös yksi keino häiritä satelliittipaikannusta, mutta sen toteuttaminen vaatii jo jonkin verran enemmän teknistä osaamista kuin edellä mainitut häirintätavat. GPS-signaaliin voidaan vaikuttaa esimerkiksi GPS-signaalin uudelleenlähettämisellä tai sen viivästämällä. Viivästystekniikassa häirintävastaanottimella siepataan oikea GPS-signaali ja ohjataan se pitempää reittiä varsinaiseen vastaanottimeen. Tällä aiheutetaan aikaviivettä signaaliin. Häirintävastaanottimen sijainnin ei tarvitse olla tarkasti jossain tietyssä sijainnissa suhteessa häirittävään vastaanottimeen. Häirinnän teho riippuu satelliittikonfiguraatiosta ja satelliittien etäisyydestä. Satelliittikonfiguraatietietoon vaikuttaminen edellyttää vastaanottimen käyttämien satelliittien tuntemista ja niiden uusien paikkojen laskemista. Käytännön ratkaisuihin yleensä häirintä suoritetaan käyttämällä kahta häirintäyksikköä. Useasti häirintälähetin on esimerkiksi lennossa ja häirintävastaanotin taas maanpinnalla. (7, s. 243.)

Vaativampi häirinnän muoto on hajaspektrikohinalla häirintä (signaali-informaation häirintä). Häirintä perustuu GPS-signaalin paikannuskoodin tapaisen signaalin lähettämiseen paikannusvastaanottimelle. C/A-koodia häirittäessä häirintälähetimen tehoteho vähennettynä signaalin tehoteholla on onnistuneessa häirinnässä niinkin alhainen kuin 20 dB. Tällä tavalla häirinnällä pystytään periaatteessa estämään 1 watin häirintälähetteellä C/A-koodin käyttö vajaan 1 000

km:n säteellä, jolloin häirintä on suhteellisen vaikea havaita normaalein keinoin. (7, s. 243.)

3.5 GPS-satelliitit

GPS Block IIA -luokan satelliitteja oli yhteensä 18 kappaletta, nimet IIA-10–IIA-28 ja ne ovat laukaistu vuosina 1990–1997. GPS Block IIA lähettää paikannus-signaaleja L1- ja L2-taajuudella. C/A-koodia L1-taajuudella ja P-koodia kummallakin taajuudella. Lisäominaisuuksina on signaalien ratatietojen lähetyksen heikkennyksen mahdollisuus SA (Select Availability) ja AS (Anti-Spoof), joka salaa P-koodin P/(Y)-koodiksi estäen sen luvattoman käytön. Jokainen satelliitti sisältää yhteensä neljä atomikelloa, joista rubidium- ja cesiumkelloja on kumpiakin kaksi. Satelliitin suunniteltu käyttöikä on seitsemän vuotta. (8.)

GPS Block IIR -luokan satelliitteja on laukaistu vuosina 1997–2004 yhteensä 13 kappaletta, nimet IIR-1–IIR-13. Satelliitit eroavat edeltäjästä Block IIA:sta siten, että niissä atomikelloja on kolme ja ne kaikki ovat rubidiumkelloja. Satelliitin suunniteltu käyttöikä on kahdeksan vuotta. (9.)

GPS Block IIR(M) -luokan satelliitteja on laukaistu vuosina 2005–2009 kahdeksan kappaletta, nimet IIR-14M–IIR-21M. Satelliitti lähettää edellisten satelliittien lähettämien signaalien lisäksi uusia L2C- ja M-signaalia. L2C-signaalista on vielä kaksi eri versiota, jotka ovat L2CM (Civil Moderate) ja L2CL (Civil Long). L2CM-koodi on 10 230 bittiä pitkä ja toistuu 20 millisekunnin välein 511,5 kbit/s:n nopeudella. L2CL-koodi on 767 230 bittiä, ja toistuu 1,5 sekunnin välein nopeuden ollessa sama 511,5 kbit/s. M-signaali on uusi USA:n armeijan käyttöön luotu signaali, jolla on parempi häiriönkestävyys. Satelliittien M-signaalien voimakkuutta voidaan säätää tarpeen mukaan. Satelliitin suunniteltu käyttöikä on kahdeksan vuotta. (8.)

GPS Block IIF -luokan satelliitteja on laukaistu vuodesta 2010 alkaen yhteensä seitsemän kappaletta, nimet IIF-1–IIF-7. Satelliitti lähettävät kaikkia samoja signaaleja kuin Block IIR(M) -satelliitit, mutta näiden lisäksi vielä uutta L5-taajuista signaalia. Signaali on tarkoitettu siviilikäyttöön ja se toimii 1176 MHz taajuus-

della. Satelliitit on varustettu kehittyneillä atomikelloilla ja niiden lähettämien signaalien pitäisi olla laadultaan parempia ja tehokkuudeltaan voimakkaampia kuin edellisten satelliittien. Satelliitin suunniteltu käyttöikä on 12 vuotta. (8.)

GPS Block IIF -luokan satelliittien tulisi toimia siihen asti, että uudet kolmannen luokan GPS Block III -satelliitit saadaan käyttöön. Uusien satelliittien suunniteltu laukaisu alkaa vuonna 2016. Näiden kolmannen sarjan satelliittien lähettämiin signaaleihin tulee edellisten lisäksi L1C-signaali. (9.)

4 JÄRJESTELMÄALUSTAN PAIKANTAMISEN YLEISKUVAUS

Järjestelmäalustana tässä työssä on käytetty Puolustusvoimien käytössä olevaa Conlog Group Oy:n valmistamaa CRL-500-sarjan järjestelmäkonttia CRL-562 (kuva 5).



KUVA 5. Järjestelmäalusta CRL-562

Järjestelmäalustan paikantaminen ja suuntaaminen suoritetaan käytön aikana GPS- ja GLONASS-satelliittipaikannuslaitteilla, mikä on osoittautunut ongelmalliseksi varsinkin suuntatiedon mittaamisen osalta. Tutkimuksessa pyritään selvittämään, mikä käytössä olevista paikannuslaitteistoista ja millainen antennien

asennustapa on toimivin järjestelmäalustan paikkatiedon ja perussuunnan määrittämiseen. Tutkimuksen tarkoitus on myös selvittää, onko olemassa vaihtoehtoisia suuntaamismenetelmää järjestelmäalustalle tilanteessa, milloin käytössä olevat GPS- ja GLONASS-satelliittipaikannusjärjestelmät eivät ole käytettävissä.

Järjestelmäalustan perussuunnan tarkkuudeksi on yleensä tarkimpien Puolustusvoimien käytössä olevien järjestelmien kohdalla määritetty $\pm 0,1$ astetta. Tietoturvallisuussyiden takia järjestelmäalustan paikan ja suunnan määrittämisessä ei voida käyttää differentiaali- tai RTK-korjausta. Paikkatiedon tarkkuus ei ole yhtä kriittinen kuin perussuunnalle määritetty tarkkuus, koska paikkatieto saadaan nykyään selvitettyä erilaisten karttapalveluiden avulla.

Tutkimuksessa käytetyt satelliittipaikannuslaitteet ja materiaalit ovat Ilmavoimien materiaalilaitoksen hankkimia CRL-konttijärjestelmäprojektiin. Laitteistojen asennuksessa noudatetaan Ilmavoimien TVJ-alan (Tiedustelu-, Valvonta- ja Johtamisjärjestelmä) ja sotilasilmaluviranomaisen määrittämiä asennusohjeistuksia ja kelpoisuusmääräyksiä SIM-To-Lv-003 (Sotilasilmaluvun määritys) ja SIM-He-lv-002.

Tutkimuksen referenssimittaukset järjestelmäalustan perussuunnalle ja paikkatiedolle suoritettiin 23.9.2014 Jyväskylän Johtokartoitus Oy:n Trimble R10 GNSS -paikantimella ja Trimble TSC3 -maastotietokoneella.

4.1 Järjestelmäalusta

Työssä käytetty CRL-500-sarjan järjestelmäalusta on teräsrakenteinen, lämpöeristetty ja ballistisella suojauksella (taso 2, Stanag 4569) varustettu laitesuoja, joka on jaettu EMP-väliseinällä (Electromagnetic Pulse) operointi- ja laitetilaan. Järjestelmäalusta on varustettu mm. RFI- (Radio Frequency Interference)/EMP-/EMC- (Electro Magnetic Compatibility), CBRN-suojauksella (Chemical, Biological, Radiological and Nuclear) sekä automaattisilla valvonta-, lämmitys-, ilmastointi- ja sammutusjärjestelmillä ja häivytyksen ja naamiointijärjestelmällä. Järjestelmäalusta on varustettu hydraulisella teleskooppimastojärjestelmällä, jossa on 24-metrinen hydraulistoiminen masto ja hydrauliset jalat, jotka mahdollistavat kontin käytön haastavissakin maasto-olosuhteissa. (10.)

Järjestelmäalusta on haasteellinen kohde paikan- ja suunnanmäärittämiselle, koska sen runko ja masto on valmistettu metallista ja aiheuttaa täten monitie- etenemistä, joka vaikuttaa GPS- ja GLONASS-signaalin kulkuun. Järjestelmä- alustan masto häiritsee myös signaalien etenemistä satelliittipaikannuslaitteen antennille, minkä takia antennien sijoituspaikka täytyy valita huolella satelliitti- paikannuslaitteen toiminnan varmistamiseksi. Järjestelmäalustalle on tehty häi- riömittaukset (liite 2), joista nähdään, aiheuttaako järjestelmäalusta itsessään ul- koisia tai sisäisiä elektronisia häiriöitä.

4.2 Satelliittipaikannuslaitteet

Tutkimuksessa oli käytössä neljä eri satelliittipaikannuslaitteistoa, jotka on han- kittu järjestelmäalustojen paikkatiedon ja suunnan määrittämistä varten. Laitteis- tot koostuvat satelliittipaikannuslaitteesta ja kahdesta antennista (primary ja se- condary). Laitteista kaksi käyttää GPS-paikannusta ja kaksi on GPS- ja GLONASS-yhdistelmälaitteita eli GNSS-laitteistoja, jotka käyttävät molempia paikannusmenetelmiä yhtäaikaaisesti.

Paikkatiedon ja suunnan mittaamista varten satelliittipaikannuslaitteiston täytyy saada mitatuksi neljän satelliitin signaalit sen molemmilla antennilla, että se kykenee määrittämään sijaintinsa luotettavasti. Paikkatiedon mittaaminen lait- teistossa tapahtuu, kun vastaanotin saa mitattua ja laskettua primary-antennin paikkatiedon. Tämän jälkeen laitteisto mittaa ja laskee secondary-antennin paik- katiedon, jonka jälkeen yhdistetyn paikkatiedon tarkkuus tulisi olla senttimetri- luokkaa.

Suunnan mittaaminen tapahtuu, kun vastaanotin mittaa secondary-antennin paikkatiedon ja sitä verrataan primary-antennin paikkatietoon. Mitatuista paikka- tiedoista ja käyttäjän antaman tai paikannuslaitteen laskeman antennien välisen peruslinjan pituuden avulla paikannuslaite laskee suunnan primary-antennista secondary-antenniin.

4.2.1 Hemisphere Crescent VS100

Hemisphere Crescentin VS100-satelliittipaikannuslaite on kaksikanavainen, kaksiantenninen, L1-kantoaaltotaajuusalueen C/A-koodia sekä kantoaallonvaiheen mittausta tukeva GPS-paikannin (kuva 6). Molemmissa vastaanottimen kanavissa on 12 alikanavaa, eli vastaanotin pystyy vastaanottamaan 24 satelliitin signaalit yhtäaikaaisesti. Alikanavista kaksi on varattu SBAS (Satellite Based Augmentation System) -järjestelmän signaaleille. (11, s. 80.)

SBAS on yksi vastaanottimen DGPS-järjestelmistä, jonka lisäksi laite tukee Hemispheren e-Dif- (Extended Differential) ja L-Dif- (Local Differential)/RTK-korjauksia. SBAS-järjestelmä käyttää paikkatiedon tarkentamiseen geostationäärisiä tietoliikennesatelliitteja, joita ovat mm. WAAS- (Wide Area Augmentation System), EGNOS- (European Geostationary Navigation Overlay Service) ja MSAS-järjestelmät (Multi-functional Satellite Augmentation System). (11, s. 6–7.)



KUVA 6. Hemisphere Crescent VS100 -satelliittipaikannuslaite (12)

Vastaanottimen laskema absoluuttinen paikannustieto saadaan L1-taajuuden C/A-koodista. Paikannustarkkuuden luvataan olevan alle 0,6 metrin ja jatkuvan

suuntatarkkuuden 0,1–0,3 asteen välissä riippuen antennien sijoittamisesta. Suuntatieto on mahdollista saada siirrettyä ulkoisiin järjestelmiin laitteessa olevan sarjaliikenneliittimen (D9) kautta, jota käytetään myös laitteen konfigurointiin. (11, s. 80–81.)

E-Dif-korjauksella laite pystyy tarkentamaan sijaintiaan ilman ulkoista virheenkorjaussignaalia, laskemalla oman pseudo-korjauksen. Toimintoa tarvitaan alueille, joilla SBAS-signaalia ei ole saatavilla. Valmistajan mukaan laite kykenee tämän avulla pitämään tarkkuuden 95 prosentissa tapauksista alle 1 metrissä 30 minuutin jälkeen SBAS-signaalin häviämistä. L-Dif toimii kuten RTK, mutta on erityisesti Hemispheren GPS-laitteille suunniteltu palvelu. (11, s. 7.)

Laitteessa on myös gyro- ja kallistussensorit, joita se käyttää pääasiassa RTK-korjauksen nopeuttamiseen laitteen liikuessa. Gyrosensorin luvataan kuitenkin pystyvän pitämään suunta 1 asteen tarkkuudella 3 minuutin ajan GPS-signaalien häviämisen jälkeen. (11, s. 11–12.)

Antennisignaalin tehotason tulee olla vastaanottimella 10–40 dB:n välillä ja antennien luvataan tuottavan 28 dB:n vahvistus signaaliin, jolloin antennikaapeleiden vaimennus saa maksimissaan olla 18 dB. Laitteen käyttöjännite on 9–36 VDC (Voltage Direct Current) ja laitteistosta löytyy kaksi RS232-liityntää datan ulostuloa ja korjaussignaalien (L-Dif, RTK) tuomista varten. (11, s. 31–32.)

4.2.2 Thales Ashtech Aquarius²

Thales Ashtech Aquarius^{2b}-satelliittipaikannuslaite on kaksikanavainen, kaksi-antenninen, L1- ja L2-kantoaaltotaajuusalueilla toimiva kantoaallonvaiheen mittausta tukeva GPS-paikannin (kuva 7). Laite vastaanottaa L1- ja L2-taajuudella paikannussignaalia kummankin signaalin kantoaallon vaiheesta sekä L1:n P(Y)- ja C/A-koodista. Laitteisto pystyy mittaamaan kummallakin kanavalla L1-taajuudelta 16 alikanavaa ja L2-taajuudelta 12 alikanavaa, jolloin laitteisto pystyy mittaamaan 28 satelliitin signaalit kummallakin kanavalla. (13, s. 293.)



KUVA 7. Thales Ashtech Aquarius² -satelliittipaikannuslaite (13, s. 1)

Laitteen antennit tulee asentaa vähintään 2 metrin päähän toisistaan. Kahden metrin peruslinjalla laitteen kerrotaan pystyvän antamaan suuntatieto 0,1 asteen tarkkuudella ja paikkatieto metrin tarkkuudella. Antennisignaalin teho saa vai-
mentua kaapelissa maksimissaan 24 dB, joka tarkoittaa maksimissaan 30 met-
trin mittaisia RG223-tyypin kaapeleita. Signaalin tason vastaanottimella tulee
olla 15–40 dB:n välillä ja antennien luvataan tuottavan 39 dB:n vahvistus sig-
naaliin. (13, s. 10–13.)

Suhteellisessa paikannuksessa laitetta voidaan käyttää toistinasemana, joka lä-
hettää omaa sijaintiaan sekä korjaussignaalia (RTK) eteenpäin UHF-alueen
(Ultra High Frequency) lähettimensä kautta. Kantamaksi luvataan jopa 40 kilo-
metriä. EGNOS-korjauksen lisäksi laitteella on mahdollista vastaanottaa kor-
jaussignaalia myös UHF-taajuudelta (Magellan U-link) sekä HF-/MF-
(High- ja Medium Frequency) vastaanottoa käyttäen. Laite on monipuolisesti
käyttäjän konfiguroitavissa erilaisin komentokehotekäskyin. (13, s. 292.)

Laitteen käyttöjännite on 9–36 VDC ja laitteistosta löytyy neljä I/O-porttia, joista
portti A on RS422-liityntä D9-liittimellä, portti B on RS232-liityntä D9-liittimellä.
Loput kaksi eli C- ja D-portit on RS422-liityntöjä D15-liittimillä. Paikannuslaitetta
pystytään etäohjaamaan tietokoneella Terminal-yhteyttä käyttäen, joko graafi-
sen käyttöliittymän kautta tai komentokehotteita syöttämällä. RS422-liityntöjä

käytetään kytkettäessä satelliittipaikannuslaite muihin laitteisiin ja kun paikannustietoa lähetetään laitteelta eteenpäin. Lisäksi laitteeseen on mahdollista kytkeä erillinen näyttö. (13, s. 293–294.)

4.2.3 Ashtech ABX802 ja Ealtec TA-08

Ashtech ABX802 sisältää kaksikanavaisen GNSS-satelliittipaikannuslaitteen ja kaksi antennia (kuva 8). Paikannuslaitteessa ei ole omaa näyttöä, vaan se on kytketty Ealtec TA-08 -näyttöyksikköön. Vastaanotin vastaanottaa GPS-signaalin lisäksi myös GLONASS-signaalia ja tulevaisuudessa laitteella on mahdollista vastaanottaa myös eurooppalaisen Galileo-järjestelmän signaalit. Laitteen kummassakin kanavassa on 120 alikanavaa. Vastaanotettavia GPS-signaaleja ovat L1-taajuudella C/A- ja P-koodi sekä kantoaallonvaihe, L2-taajuudella P-koodi, L2C-taajuus sekä tulevaisuudessa L5-taajuus. GLONASS-järjestelmän L1- ja L2-taajuuksien SP-koodit sekä Galileo-järjestelmän E1- ja E5-taajuudet. (14.)



KUVA 8. Ashtech ABX802 -satelliittipaikannuslaite

Paikannuslaitteessa on SBAS-korjauksen (EGNOS) lisäksi valmistajan oma virheenkorjausohjelma Ashtec Z-blade, jonka luvataan mm. parantavan signaalin tunnistusnopeutta. Tästä johtuen laitteen paikannusnopeudet ovat kiitettävät, yleensä alle minuutin käynnistyksestä. (14.)

Antennien asennusetäisyydeksi toisistaan suositellaan 2 metrin matkaa. Paikannustarkkuus luvataan olevan SBAS-korjauksella alle 50 cm ja suuntatarkkuuden 0,1 astetta. Laite kykenee täysin itsenäiseen koodin ja signaalin vaiheen mittaukseen. Vastaanotin on tutkimuksessa olevista laitteista ainut, jossa ei ole itsessään näyttöä eikä näppäimiä. (14.)

Laitteen käyttöjännite on 9–36 VDC ja laitteistosta löytyy kolme RS232-liityntää, joista kaksi on liitetty primary-antennin vastaanottimeen ja yksi secondary-antennin vastaanottimeen. Liityntöjen kautta voidaan laitteistoa ohjelmoida, ottaa erilaisia dataulostuloja ja syöttää laitteelle RTK-dataa, jos laitteen sisäistä UHF-radiota ei käytetä. Laitteen liitynnöistä löytyy myös UHF-vastaanottimen antenniliitin, USB 2.0 -portti ja PPS-ulostulo (Pulse Per Second). (14.)

Ealtecin näyttöyksikkö (kuva 9) on pienikokoinen kosketusnäytöllinen tietokone, johon on asennettu Ashtech ABX802:n vastaanotinhelmisto. Näyttöyksikön tietokoneen prosessori on Intel Atom 1,1 GHz, kosketusnäyttö on 8 tuuman kokoinen ja sen tarkkuus on 800 * 600. Käyttöjärjestelmänä näyttöyksikössä toimii Windows XP Professional. Näytön sivusta löytyvät liittimet verkkokaapelille (RJ45), USB 2.0:lle ja RS232:lle, näitä jokaista kaksi kappaletta. Näyttöyksiköllä käytetään Ashtech ABX802-vastaanotinta Ashtechin valmistaman ohjelmiston kautta. (15.)



KUVA 9. Ealtec TA-08 -näyttöyksikkö (15)

4.2.4 Trimble SPS555H

Trimble SPS555H on modulaarinen GNSS-satelliittipaikannuslaite, joka sisältää kaksikanavaisen satelliittipaikannusvastaanottimen kahdella antennilla (kuva 10). Vastaanotin vastaanottaa GPS-signaalin lisäksi myös GLONASS-signaalia ja tulevaisuudessa on mahdollisuus myös eurooppalaisen Galileo-järjestelmän signaalien vastaanottoon. (16.)

Trimble SPS555H koostuu kahdesta Trimble SPS855-vastaanottimesta, jotka on yhdyskaapelin kautta kytketty toisiinsa. Kumpaankin laitteeseen on kytketty yksi antenni. Antenneina käytettiin Trimblen Zephyr Model 2 -antenneja. Paikantimien on mahdollista vastaanottaa GPS:n L1-, L2-, L2C- ja L5-taajuuksia, GLONASS:n L1- ja L2-taajuuksia sekä Galileon E1- ja E5-taajuuksia. Laite pysyy vastaanottamaan virheenkorjaus signaaleja SBAS- ja OmniStar-satelliiteilta. (16.)

Laitteissa on sisäiset akut, joiden toiminta-aika on noin 10 tuntia. Antennien asennusetäisyydeksi suositellaan kahta metriä. Jatkuvan paikannustarkkuuden luvataan olevan jopa 25 cm:n luokkaa ja suunnan 0,09 astetta, kun antennien etäisyys on toisistaan kaksi metriä. Suunnan laite määrittää kuten aikaisemmatkin laitteet, vertaamalla antennien sijaintia toisiinsa. Paikannus kyetään laskemaan signaalin vaiheesta sekä aikaerosta. Alikanavia kummassakin laitteessa on 440 kappaletta, joista neljä on varattu korjaussignaaleille. (16.)



KUVA 10. Trimble SPS555H -satelliittipaikannuslaite (17.)

4.2.5 Referenssimittauslaite

Järjestelmälustan referenssimittaukset suoritettiin Trimble R-10 -paikantimella ja Trimble TSC3 -maastotietokoneella. Laitteistolla mitattuihin tuloksiin verrattiin tutkimuksessa olleiden paikannuslaitteiden mittaustuloksia.

Trimble R-10 on mobiiliyhteydellä varustettu verkko-RTK-paikannin (kuva 11). Se kykenee vastaanottamaan 16 eri GNSS-satelliitin taajuutta 440 alikanavalla, mm. GPS- (L1C/A, L1C, L2C, L2E, L5), GLONASS- (L1SP, L1PP, L2SP, L2PP, L3), Galileo- (GIOVE-A ja GIOVE-B, E1, E5a, E5B) sekä SBAS-satelliiteista L1C/A- ja L5-taajuudet. Laitteistolle luvataan verkko-RTK-korjauksella 8 millimetrin ja staattisella GNSS-mittauksella 3 millimetrin paikantamistarkkuus. (18.)

Trimble TSC3 -maastotietokone on Windows Mobile -käyttöjärjestelmällä varustettu ja Trimble Access™ -mittausohjelmistoa käyttävä tietokone, jolla ohjataan Trimble R-10 -satelliittipaikannuslaitetta ja jonka kautta erilaisia mittauksia suoritetaan (kuva 11). Mittaustulokset tallentuvat laitteen muistiin, mutta laite on varustettu myös mobiiliyhteydellä, jonka kautta mittaja pystyy lähettämään mittaustulokset esimerkiksi suoraan yrityksen toimistolle. (19.)



KUVA 11. Trimble TSC3-maastotietokone (19) ja R10-satelliittipaikannuslaite (18)

5 ASENNUS

Laitteiden asennussuunnittelu aloitettiin tutkimalla ja analysoimalla järjestelmäalustan häiriömittauksia (liite 2). Häiriömittauksen tuloksissa ei havaittu järjestelmäalustan sisätiloissa eikä ulkopuolella elektronisesti häiritseviä tekijöitä, jotka osuisivat paikannuksessa käytettäville taajuuksille tai niiden 15 ensimmäiselle aliharmoniselle taajuudelle (78–801 MHz). Ainoa järjestelmäalustan tuottama häiriö on havaittavissa 25 MHz:n taajuudella järjestelmäalustan sisä- ja ulkotiiloissa, mutta se ei vaikuta paikannusjärjestelmien toimintaan. Järjestelmäalustan itse aiheuttamien elektronisten häiriöiden vaikutus paikannukseen pystytään näin ollen sulkemaan pois tutkimuksesta.

5.1 Antennien asennus

GPS- ja GLONASS-satelliittipaikannuslaitteiden antennien alkuperäinen asennuspaikka huomattiin aikaisemmin tekemissämme testauksissa erittäin ongelmalliseksi, ja päätimme kartoittaa antenneille uuden asennuspaikan, jotta antennit saataisiin pois alkuperäiseltä paikalta järjestelmäalustan katolta. Antennien alkuperäiset asennuspaikat olivat katolla sijaitsevan maston pedissä 2,4 metrin korkeudella järjestelmäalustan pitkän sivun suuntaisesti, jolloin antennien kannan pituudeksi muodostui noin 5 metriä (kuva 12). Paikannuslaitteistojen ohjekirjallisuudessa antennien kannan pituudeksi annettiin suosituksena 2 metriä.



KUVA 12. Maston peti

Suoritetussa testauksessa antennien sijoitusta pedissä yritettiin parantaa asentamalla absorboivaa mattoa antennien alle ja niiden ympäristöön vaimentamaan mahdollista monitie-etenemistä. Mattojen asennukset eivät vaikuttaneet laitteistojen käytettävyyteen suunnan saamiseksi, vaan suunta järjestelmäalustalle saatiin satunnaisesti.

Seuraavaksi antennit asennettiin irti maston pedistä noin 1,5-metrisien kiinnitysjalkojen avulla, jotka kiinnitettiin maston petiin. Antennit siirtyivät järjestelmäalustan reunan ulkopuolelle, mutta jäivät korkeudeltaan samalle 2,4 metrin tasolle lähelle järjestelmäalustan runkoa (kuva 12). Suoritetuissa mittauksissa suunta saatiin paremmin alkuperäiseen asennuspaikkaan verrattuna, mutta välillä suuntaa ei saatu ollenkaan. Laitteistoista GLONASS-vastaanottimella varustetut paikannuslaitteet toimivat tällä asennuksella GPS-vastaanottimia paremmin.

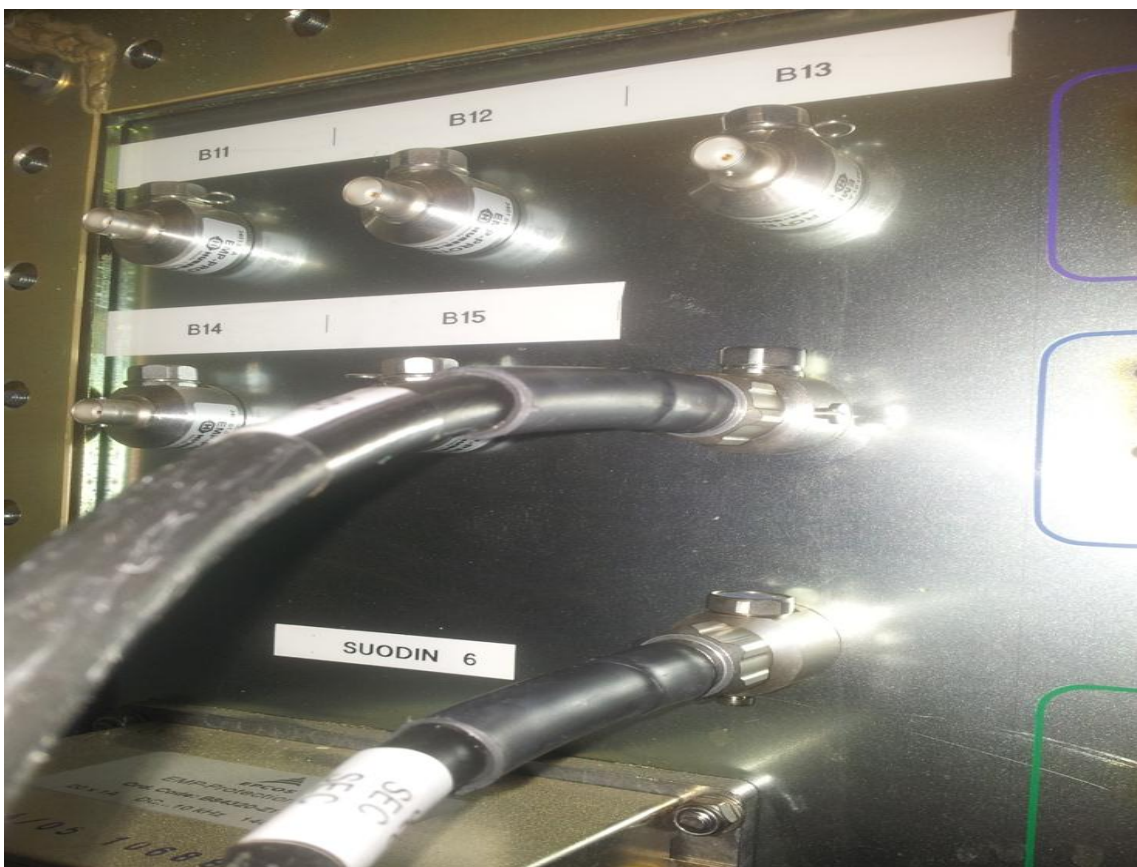
Asennuspaikaksi antennille katsottiin parhaimmaksi järjestelmäalustan masto, jossa antennit saadaan asennettua mahdollisimman korkealle avoimeen ympäristöön pois järjestelmäalustan rungon läheltä, jotta signaalin monitie-etenemistä ei muodostuisi. Antennien asennuskorkeudeksi tällä muutoksella saatiin maasta mitattuna noin 8 metriä. Antenneille suunniteltiin ja tehtiin uusi maston runkoon kiinnitettävä teline.

5.2 Antennikaapelit

Laitteiden ohjekirjoista tutkittuna laitteen ja antennin välisien RF-kaapeleiden (Radio Frequency) vaimennus saa olla maksimissaan Thales Ashtech Aquarius² -paikannuslaitteella 24 dB ja Hemisphere Crescent VS100:illa 15 dB. Muiden paikannuslaitteiden ohjekirjoissa ei vaimennusta mainittu, joten käytimme 15 dB:ä kaapeleiden maksimivaimennuksena. Kaapeliksi valitsimme kontin ulkopuolelle RG214-kaapelin ja kontin sisätiloissa käytettiin RG223-kaapelia. Kaapelit ovat taipuisia suurtaajuuskaapeleita, jotka täyttävät vaaditun MIL-C-17-standardin. Kaapeleiden vaimennus on 1000 MHz:n taajuudella valmistajan ilmoituksen mukaan RG214-kaapelilla 26,7 dB / 100 m ja RG223-kaapelilla 50,1 dB / 100 m.

Kaapelit mitoitettiin järjestelmäalustan mastoon ja sisätiloihin sopivan mittaisiksi. RG214:n mitaksi tuli 8 metriä ja RG223:n 3 metriä, jolloin kaapeleiden vaimennukseksi laskennallisesti tulee 2,14 dB RG214:lle ja 1,5 dB RG223:lle. Kaapeleihin asennettiin Huber+Suhnerin valmistamat RF-liittimet, joiden vaimennuksena yleensä laskennallisesti käytetään 1 dB/liitin, jolloin kaapelin vaimennukseen voidaan laskea 4 dB lisää vaimennusta kaapelia kohden.

Mastoon tulleisiin RG214-kaapeleihin tehtiin uros-TNC-liittimet (Treaded Neil-Concelman) antenniin kiinnitettävään päähän ja järjestelmäalustan EMP-läpiviennille tulevaan päähän uros-N-liittimet (N Connector). Järjestelmäalustan sisälle tuleviin RG223-kaapeleiden EMP-läpiviennille kiinnitettävään päähän tehtiin uros-N-liittimet ja GPS-laitteeseen kiinnitettävään päähän uros-TNC-liittimet. Kaapelit yhdistetään EMP-läpivientilevyllä (kuva 13) Huber+Suhnerin 3402.17.A-mallisilla ukkos- ja EMP-läpivientisuojuilla, jonka vaimennukseksi ilmoitetaan 0,2 dB. Siirtolinjan vaimennukseksi mastosta antennilta kontin sisällä olevalle paikannuslaitteelle saadaan laskennallisesti 7,84 dB.



KUVA13. Järjestelmäalustan EMP-läpivientilevy

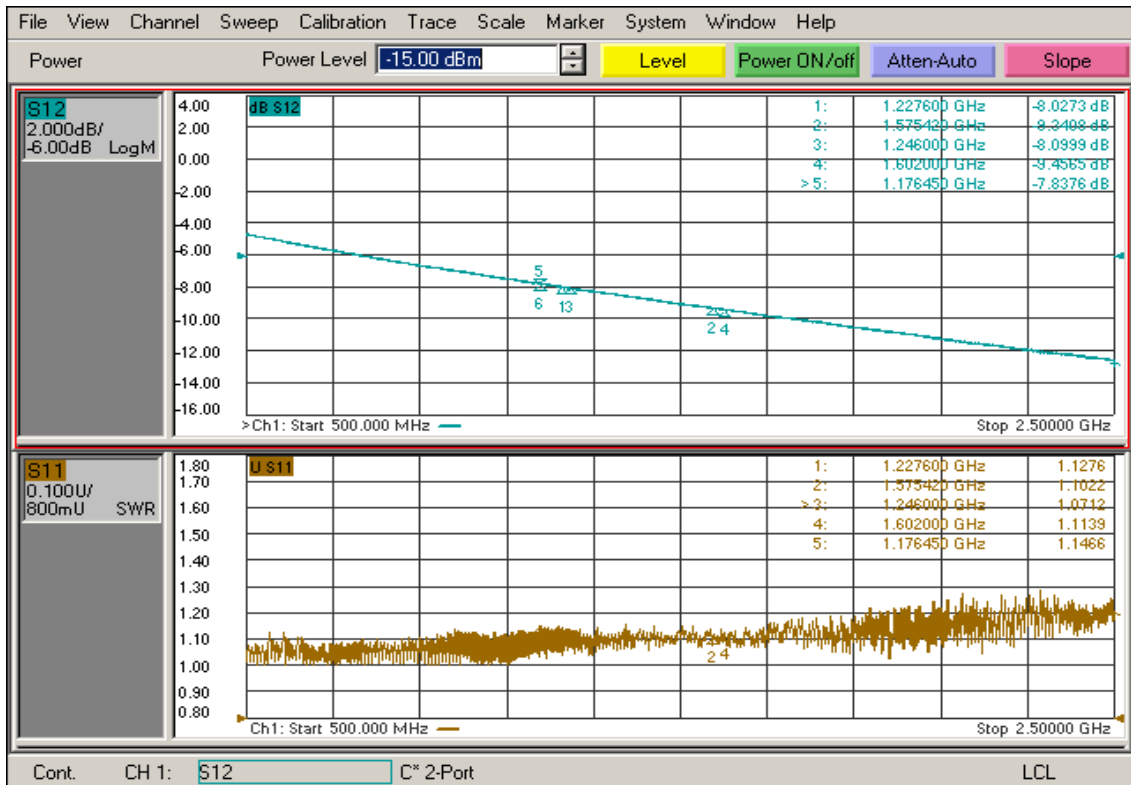
5.3 Antennikaapeleiden RF-mittaukset

Kaapeleille suoritettiin mittaukset Agilent E8363B PNA-vektoriiriianalysointilaitteella, joka on kalibroitu 17.4.2014. Mittaukset suoritettiin normaaleissa huoneolosuhteissa lämpötilan ollessa +22 °C ja ilmankosteuden 50 %. Mittauksissa huomattiin, että alkuperäisessä asennuksessa käytössä olleet Huber+Suhnerin 3401.17.A-mallin ukkos- ja EMP-läpivientisuojauslaitteiden taajuusalue ei yltänyt 1 GHz:ä ylemmäs, jolloin yli 1 GHz:n taajuudet vaimenivat kriittisesti.

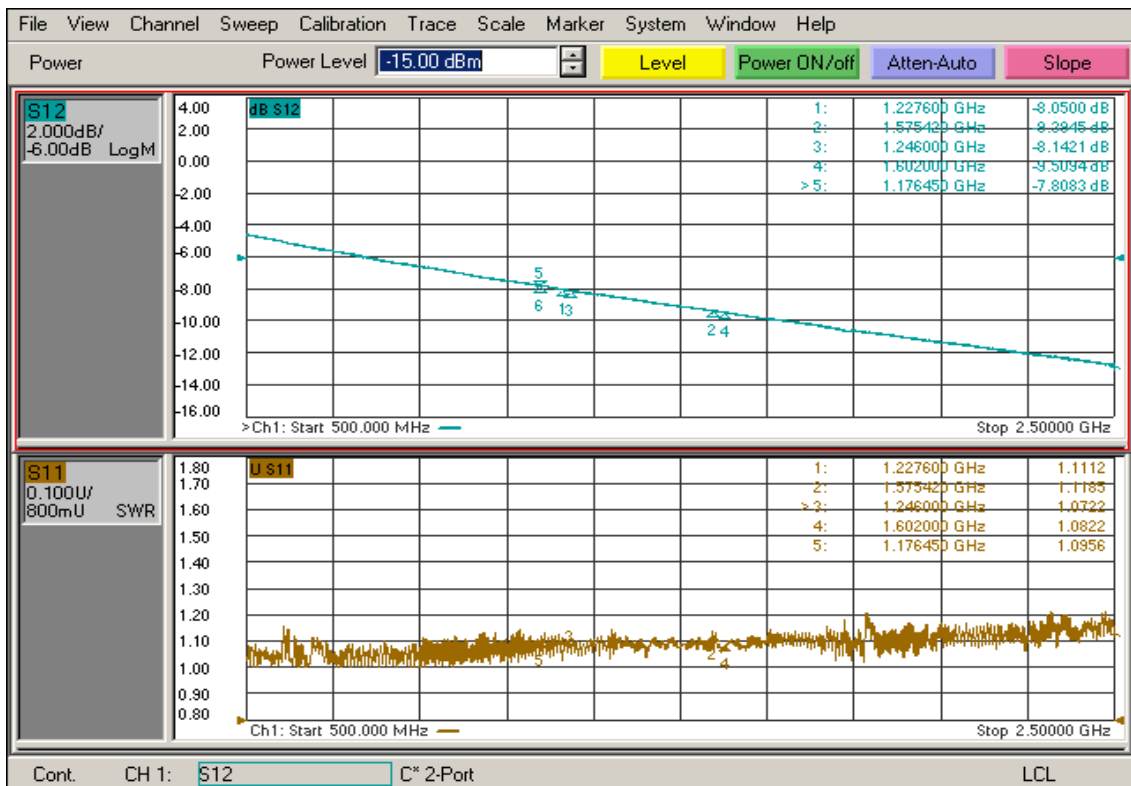
Läpivientisuojauslaitteet vaihdettiin toiseen malliin (3402.17.A), jonka taajuusalue on DC–2,5 GHz, jolloin siirtolinjan (kaapelit ja EMP-läpivientisuojauslaitteet) vaimennus saatiin pysymään laitteiden ohjekirjoissa annetuissa rajoissa. Siirtolinjan vaimennus ja seisovan aallon suhteen (SWR, Standing Wave Ratio) mittaustulokset primary- ja secondary-kanaville ovat nähtävillä kuvissa 14 ja 15. Mittauksissa mittauspisteet on asetettu GPS:n ja GLONASS:n yleisimmin käytössä olevien taajuuksien kohdalle.

Siirtolinjan vaimennus mitattiin S12-mittauksella, joka mittaa siirtolinjan vaimennuksen seuraavasti. Analyysointilaitteen portista 1 lähetetään -15 dBm:n teholla koko 0,5–2,5 GHz:n välisen taajuusalueen yli pyyhkäisevä signaalianalysointilaitteen porttiin 2, missä tuleva tehotaso mitataan ja mittaustulos piirretään näytölle. SWR-mittaus suoritetaan S11-mittauksena, jolloin portista 1 syötettävä signaali mitataan samassa portissa, jolloin saadaan selville siirtolinjan seisovan aallon suhde eli tehon takaisin heijastuma.

Mittaustuloksista nähdään, että siirtolinjan vaimennus on erittäin lähellä laskennallista arvoa. Primary-kanavan siirtolinjan maksimivaimennus löytyy korkeimmalla GLONASS:n käyttämällä 1602 MHz:n taajuudella, missä vaimennusta on -9,46 dB. Secondary-kanavan siirtolinjassa maksimivaimennus on samalla taajuudella 1602 MHz -9,51 dB. SWR-mittauksen tulos primary-siirtolinjassa on suurin 1176 MHz:n taajuudella 1,147 ja secondary-siirtolinjassa 1575 MHz:n taajuudella 1,118, jotka ovat erittäin hyvät arvot.



KUVA 14. Primary-kanavan siirtolinjan mittaustulos



KUVA 15. Secondary-kanavan siirtolinjan mittaustulos

5.4 Paikannuslaitteistojen asennus järjestelmäalustaan

Antenneille teimme järjestelmäalustan mastoon kiinnitettävän antennitelineen, joka voidaan pitää kuljetuksen aikana mastossa tai poistaa helposti, jos järjestelmäalustaa kuljetetaan vaikeassa maastossa. Antenniteline suunniteltiin siten, että siihen voidaan asentaa kaikkien työssä olevien paikannuslaitteiden antennit. Telineen leveys on kuljetuskunnossa 1,2 m ja toimintakunnossa 2 m (kuva 16).



KUVA 16. Antenniteline toimintakunnossa mastossa

Tutkimuksessa antennien kaapeleiden kiinnitykset järjestelmäalustan mastoon suoritettiin magneettikiinnikkeillä (kuva 17), jotta kaapelit saadaan irrotettua myös kuljetuksen ajaksi tai jos antennien paikka olisi jouduttu tutkimuksessa muuttamaan. Kaapelit on mahdollista kiinnittää maston kyljessä sijaitsevaan kiinteään kaapelirataan, jos antennien paikka katsotaan mittauksien jälkeen niille sopivaksi ja asennustapa hyväksytään virallisesti käyttöön.



KUVA 17. Magneettikiinnike

Mastosta tulevat RG214-kaapelit kiinnitetään järjestelmäalustan ulkoseinässä olevaan EMP-läpivientiseinään (kuva 18), jossa sijaitsevat ukkos- ja EMP-läpivientisuoja. Läpivientisuoja estävät järjestelmäalustan sisällä olevien elektronisten laitteiden rikkoontumisen sähkömagneettisen pulssin syntyessä tai salaman osuessa mastoon tai mastossa oleviin GPS-antenneihin.

Järjestelmäalustan sisätilassa EMP-läpivientiseinältä kaapelointi jatkuu RG223-kaapelilla läpivientiseinältä laitekaappiin, jonne paikannuslaitteet asennetaan. Läpivientiseinän ja laitekaapin välinen kaapelointi asennettiin katossa sijaitsevaan kaapelihyllyyn, josta ne saadaan vietyä sisälle laitekaappiin, laitekaapin päällä takareunassa olevasta kaapeliläpiviennistä.



KUVA 18. Järjestelmäalustan EMP-läpivientiseinä

GPS- ja GLONASS-paikannuslaitteistot asennettiin järjestelmälustan sisällä sijaitsevaan laitekaappiin (kuva 19). Asennukset suoritettiin järjestelmälustan alkuperäisten asennussuunnitelmien mukaisesti, jotta mahdolliset asennus- ja suunnitteluvirheet voidaan tutkimuksessa sulkea pois.

Paikannuslaitteet kytkettiin laitevalmistajien toimittamilla kytkentäjohdoilla Powernet Oy:n valmistamaan ADC7180 DC-jännitelähteeseen, jonka ulostulojännite on 24 VDC. Laitteet maadoitettiin laitekaapin takaseinässä sijaitsevaan maadoituspisteeseen ja kiinnitettiin asennuslevyille. Laitekaappi asennettavien laitteiden etulevyt asennettiin peitelevyihin, kuten oikeassakin asennuksessa (kuva 20). Laitteista kahta ei ole suunniteltu suljettuun laitekaappi asennukseen, vaan niihin on olemassa kiinnikkeet joko katto- tai pöytäasennukseen.



KUVA 19. Paikannuslaitteiden asennus laitekaapissa



KUVA 20. Laitekaappi käyttövalmiina

6 MITTAUKSET

Järjestelmälustan paikkatiedon ja perussuunnan mittaukset suoritettiin Jyväskylässä, Tikkakosken lentokentän läheisyydessä sijaitsevalla Puolustusvoimien alueella. Lentokenttäympäristö valittiin tarkoituksella, koska järjestelmälustojen käyttöpaikat eivät aina ole häiriöttömiä, jolloin kentän läheisyydessä pystytään toimimaan luonnollisesti häiriöllisessä ympäristössä niin elektronisesti kuin maastollisesti. Alkuperäisen projektisuunnitelman mukaista häiriönkestävyyden testaamista häirintäsignaaleilla emme pystyneet toteuttamaan testeissä vaadittavien taajuushallinnan lupien takia.

Elektronisia häiriöitä mittausalueella aiheuttavat lentokentän etäisyydenmittausjärjestelmä DME (Distance Measuring Equipment) 962–1213 MHz, toisiotutka SSR (Secondary Surveillance Radar) 1030 MHz ja 1090 MHz ja satelliittipuhelimet 1610–1660 MHz. Satelliittipaikannuksen taajuusalueelle osuvat 15 ensimmäistä aliharmonista taajuutta ovat taajuusvälillä 78–801 MHz, jotka voivat vaikuttaa häiritsevästi satelliittipaikannukseen. Tälle taajuusalueelle testausympäristössä osuvat VOR-majakka (Very high frequency Omnidirectional Range), radiopuhelimet ja ilmailuradioliikenne. Vallitsevat maasto-olosuhteet mittauspaikan ympäristössä olivat pohjoisesta etelään olevalla sektorilla 30 metriä korkea kalliota, etelästä luoteeseen avoin lentokenttäalue ja luoteesta pohjoiseen 15 metriä korkea sekametsää.

Paikannuslaitteiden mittauksia varten järjestelmälustan mastossa oleva antenniteline levitettiin käyttökuntoon ja masto nostettiin peruskorkeuteen, jotta antennit ovat oikeassa asennossa (kuva 21). Mittauksissa kirjataan kuuden mittauksen tulokset, joita ovat paikkatieto, suunta ja suunnistusaika. Paikkatiedon ja suunnan saamisen jälkeen laite sammutettiin ja käynnistettiin uudelleen. Paikannuslaitteen käynnistymisen jälkeen kelloitettiin aika suunnan uudelleen saamiseen.



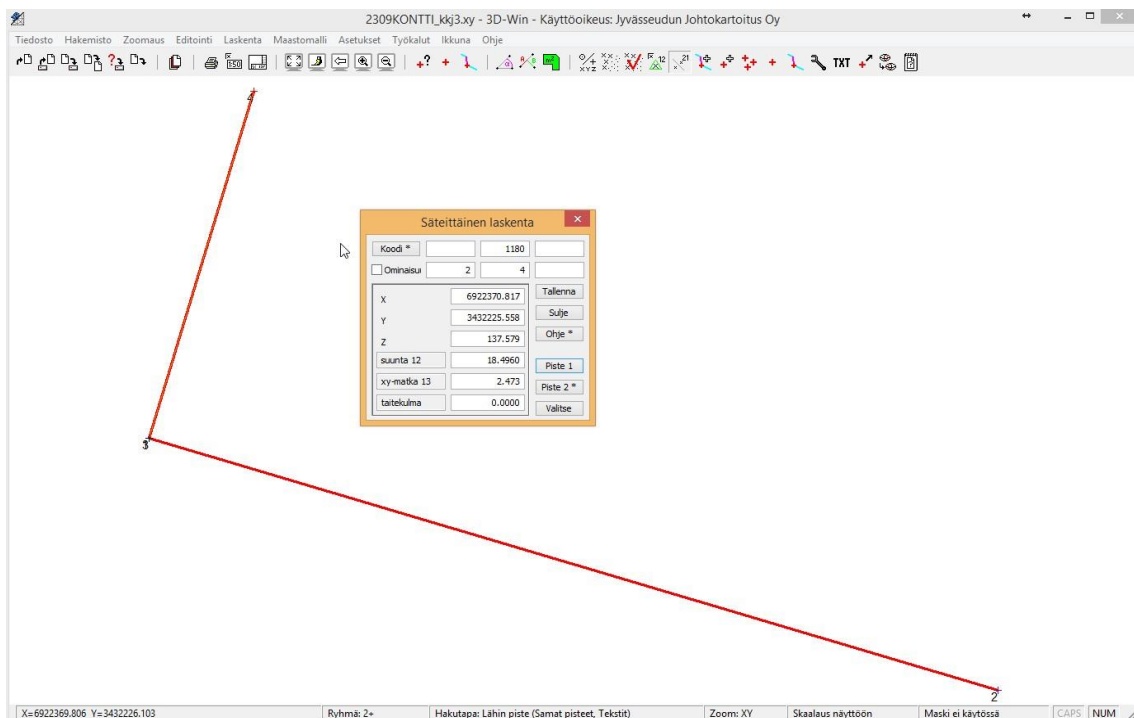
KUVA 21. Järjestelmälustan masto mittausvalmiudessa

6.1 Referenssimittaus

Järjestelmälusta asetettiin testauspaikalle ja sille suoritettiin tarvittavat referenssimittaukset. Mittaukset suoritti Jyvässeudun Johtokartoitus Oy Trimble R10 GNSS -paikantimella ja Trimble TSC3 -maastotietokoneella. Laitteisto käyttää differentiaalista RTK-korjausta, jonka lähteenä on Geotrim Oy:n Trimnet VRS-tukiasemaverkkopalvelu (Virtual Reference Station). Mittauksissa käytetyn VRS-tukiaseman sijainti oli 62°24'00,97434" pohjoista leveyttä, 25°41'10,34838" itäistä pituutta ja 156,513 metriä korkealla merenpinnasta. Laitteiston paikannustarkkuus RTK-korjauksen kanssa mittauksissa oli $\pm 1,1$ cm ja paikkatiedon ja suunnan mittaukset suoritettiin 201 mittauksella jokaista mitattua kulmapistettä kohti.

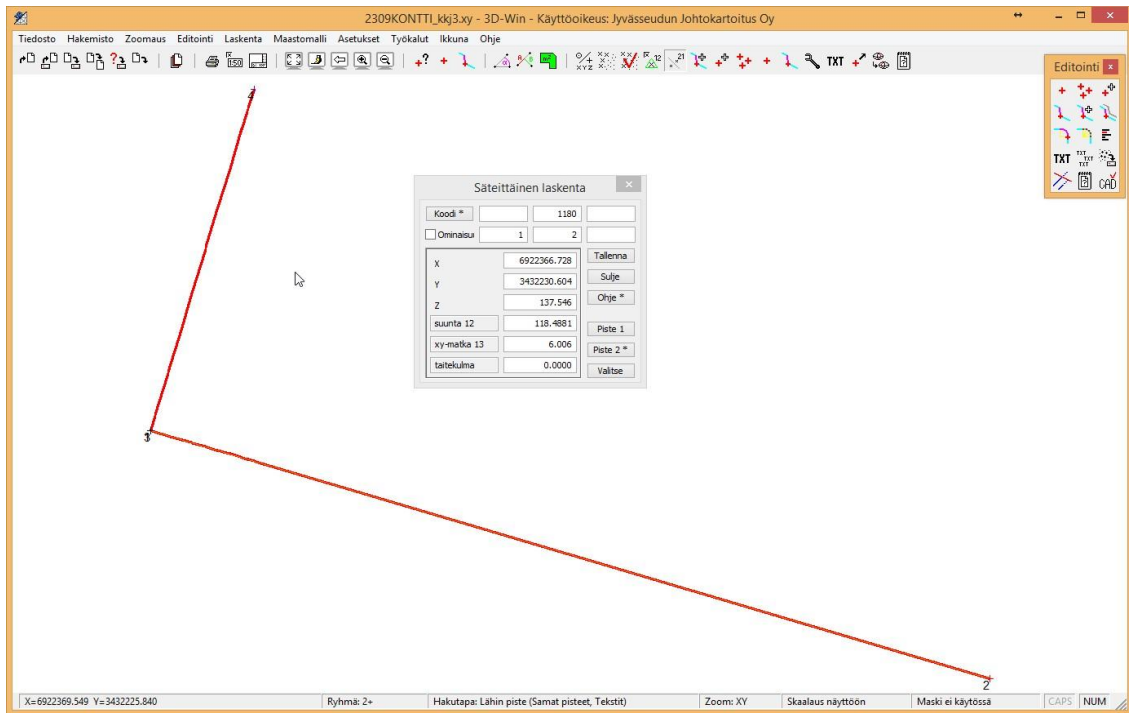
Järjestelmäalustalle mitattiin referenssimittauksessa suunnat pääty- ja sivuseinän mukaisesti, että laskennallisesti voidaan vielä varmistaa suuntien paikkansapitävyys. Alkuperäisissä mittaustuloksissa suunnat oli ilmoitettu gooneina, joka on maanmittauksessa käytetty mittayksikkö suunnalle. Goonit saadaan muutettua asteiksi kertomalla gooneina annettu suunta 0,9:llä.

Päätyseinän suunnanmittaus suoritettiin kulmapisteestä 3 kulmapisteeseen 4 suuntaan. Mittaustulokseksi saatiin 18,4960 goonia, joka on 16,65 astetta (kuva 22).



KUVA 22. Päätyseinän mittaustulos

Sivuseinän suunnanmittaus suoritettiin kulmapisteestä 3 kulmapisteeseen 2 suuntaan. Mittaustulokseksi saatiin 118,4881 goonia, joka on 106,64 astetta (kuva 23).



KUVA 23. Sivuseinän mittaustulos

Mitatuista suunnista laskettu erotus on 89,99 astetta mikä on erittäin lähellä 90:tä astetta. Tulos varmistaa referenssimittauksen tarkkuuden riittäväksi paikkatiedon ja perussuunnan määrittämistä varten (taulukko 1). Paikkatieto pysyi mittauksissa samana, koska kulmapistettä 3 on käytetty molemmissa mittauksissa ensisijaisena mittauspisteenä, jonka suhteen suunta on mitattu.

TAULUKKO 1. Referenssimittauksen muunnetut tulokset ja suuntien erotus

Järjestelmälustan seinä	Pohjoinen leveys	Itäinen pituus	Suunta
Päätyseinä	62°24.017907'N	025°41.163446'E	16,65°
Sivuseinä	62°24.017907'N	025°41.163446'E	106,64°
Suuntien erotus		0	0 89,99°

6.2 Hemisphere Crescent VS100

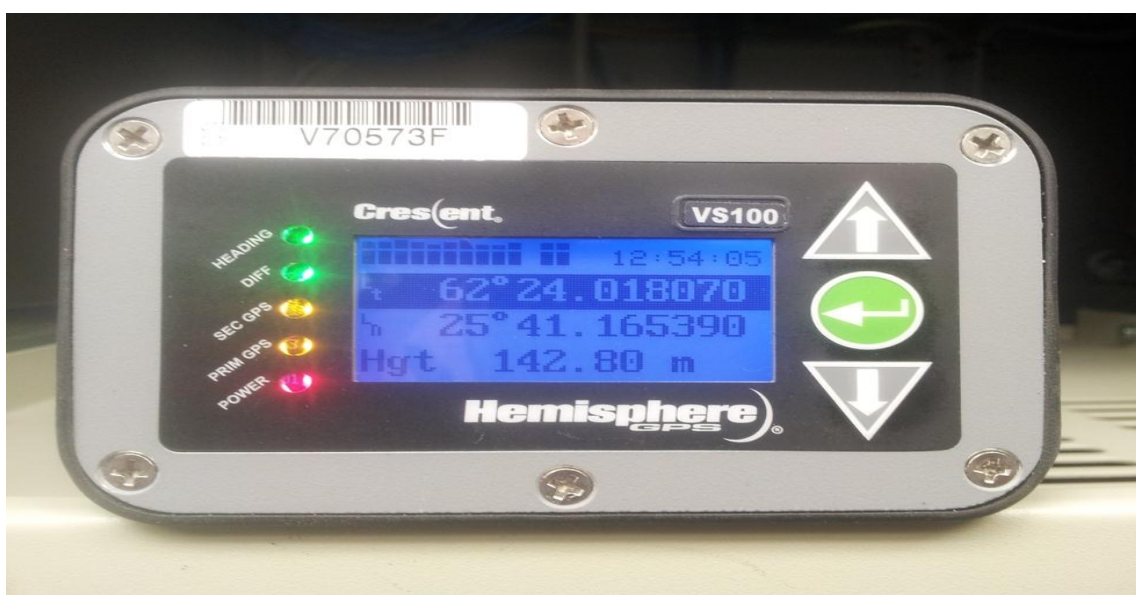
Hemisphere Crescent VS100 -satelliittivastaanottimen käyttöönotossa on huomioitava, että antennien liittimien tulee osoittaa samaan suuntaan ja antennien välimatka on annettava manuaalisesti paikannuslaitteelle, jos antennoja ei ole

asennettu oletusarvojen mukaan 0,5 metrin päähän toisistaan. Ohjekirjan mukaan paikannuslaitteen etupaneelin tulisi osoittaa aina primary-antennia kohden ja olla asennettu fyysisesti antennien väliin. Asennettaessa paikannuslaite edellä olevien ohjeiden mukaisesti pystytään gyro- ja kallistussensoreita käyttämään hyväksi paikannuksessa ja suunnistamisessa.

Tutkimuksessa paikannuslaitteen gyro- ja kallistussensori otettiin pois käytöstä, koska laitetta ei voitu asentaa antennien väliin ja järjestelmälustan suunnan mittausta ei käytön aikana tarvita jatkuvasti. Gyro- ja kallistussensorit voidaan poistaa käytöstä painamalla Menu → Vector → Aiding Features → Gyroaid/Tiltaid → Off. Paikannuslaite toimii oletusasetuksilla, joten muita muutoksia ennen mittausta ei laitteelle tarvitse tehdä.

Laitte löysi mittauksissa myös kaksi SBAS-korjaussatelliittia (EGNOS), mutta niiden signaalitasot olivat alhaiset, mikä johtuu satelliittien kiertoradan sijainnista päiväntasaajalla vain 30 000 kilometrin korkeudella. Suomesta katsottuna EGNOS-satelliitit ovat varsin matalalla lähellä taivaanranta ja jo kohtalaisen pienet maastoesteet tai rakennukset heikentävät korjaussignaalia.

Laitteen näytön ylärivillä vasemmalla olevat pylväät ilmaisevat satelliittien määrän ja niiden signaalitason. Ylärivillä keskellä olevat pylväät ilmaisevat SBAS-korjaussatelliittien signaalitasot (kuva 24).



KUVA 24. Hemisphere Crescent VS100:n mittaustulos näytöllä

Laitteella mitatut tiedot on kirjattu ylös, kun laitteen Heading-valo syttyi etupaneelissa (taulukko 2). Mittauksissa laite löysi 10 satelliittia, joista se pystyi mitauksissa käyttämään seitsemää.

TAULUKKO 2. Hemisphere Crescent VS100:n mittaustulokset

Pohjoinen leveys	Itäinen pituus	Suunta	Suunnistusaika
62°24.017640'N	025°41.163780'E	195,09°	6 min
62°24.018270'N	025°41.164020'E	208,14°	10 min 30 s
62°24.019160'N	025°41.163860'E	20,24°	1 min 17 s
62°24.017600'N	025°41.165201'E	100,51°	1 min 1 s
62°24.018280'N	025°41.165070'E	100,51°	1 min 30 s
62°24.018950'N	025°41.165010'E	71,38°	1 min 20 s

6.3 Thales Ashtech Aquarius²

Thales Ashtech Aquarius² -laitteistoja löytyi käytöstä kolmella eri ohjelmistoversiolla, joista kaksi on laitteistotoimittajan oletusasetuksilla (default configuration), mutta eri ohjelmistoversioilla. Kolmas laite on varustettu sotilaskäyttöön suunnitellulla ohjelmistoversiolla (army heading configuration), jossa paikkatiedon ja suunnan ilmoittamistarkkuutta on parannettu 0,01 asteeseen, kun oletusasetuksilla olevan laitteen ilmoittamistarkkuus on 0,1 astetta.

Laitteen käyttöönotossa on huomioitava, että antennien kiinnittämisen jälkeen on vastaanottimelle aina suoritettava kalibrointi antennien tarkan välimatkan selvittämiseksi. Vasta tämän jälkeen laitteisto pystyy laskemaan antennien välisen tarkan suunnan.

Ennen antennien kalibroinnin aloittamista on varmistuttava, että vastaanottimen seurannassa on tarpeeksi satelliitteja (vähintään 06/06 SVs) ja paikanlaskennan laatuluku on Q.3 (kuva 25). Laatuluku ilmaisee satelliittisignaalin HDOP:n (Horizontal Dilution Of Precision) eli vaakasuuntaisen sijainnin tarkkuuden hyvyden ja häirinnän (SA) päällä olemisen. Antennien kalibrointi on käynnistettävä välittömästi, kun laitteeseen on kytketty virta ja edellä mainitut asiat täyttyvät.



KUVA 25. Thales Ashtech Aquarius²:n mittaustulos näytöllä

Kalibroitivalikkoon laitteessa pääsee painamalla F3 (AUX) → F2 (INIT) → F3 (HEADING). Auenneessa valikossa rivin USED sarakkeeseen LENGHT annetaan antennien likimääräinen välimatka metreinä. Tämä nopeuttaa kalibrointi-prosessia huomattavasti. Välimatkan kirjaamisen jälkeen painetaan F2 (BASE) -näppäintä kalibroinnin aloittamiseksi. Kalibrointi voidaan pysäyttää F3 (STOP) -näppäimellä, kun LENGHT-sarakkeen RMS-arvo on lähellä nollaa ja Average-arvo on lähellä annettua likimääräistä pituutta. Pysäyttämisen jälkeen on painettava F4 (APPLY), joka siirtää lasketun välimatkan USED-arvoksi. Painamalla F5 (OK) uusi laskettu välimatka otetaan käyttöön. Päänäyttöön mittausunäkymään siirtymiseksi on painettava F1 (←) kerran.

Laite on edellisten toimien jälkeen valmis käyttöön. Laitetta ei tarvitse kalibroida jokaisen käynnistyskerran jälkeen, vaan ainoastaan silloin, kun antennit on käytetty irti laitteesta tai niiden välimatkaa on muutettu. Suuntatieto on luotettava, kun näytöllä suuntatiedon edessä lukee HDG_T. Jos suuntatiedon edessä lukee HDG_E, on suuntatieto epätarkka estimaatti todellisesta suunnasta. Tätä HDG_E suuntalukemaa ei saa käyttää järjestelmäalustan suuntaamisessa.

Mittaukset suoritettiin ensimmäisenä oletusasetuksilla ja vanhemmalla ohjelmistoversiolla olevalla paikannuslaitteella. Mittauksissa laite löysi kahdeksan käytettävissä olevaa satelliittia molemmille kanaville ja suuntalukema on kirjattu vasta kun HDG_T on ilmestynyt suuntatiedon eteen (taulukko 3).

TAULUKKO 3. Thales Ashtech Aquarius² Default configuration -mittaustulokset

Pohjoinen leveys	Itäinen pituus	Suunta	Suunnistusaika
62°24.01813'N	025°41.16448'E	15,9°	1 min 55 s
62°24.01732'N	025°41.16347'E	15,8°	1 min 27 s
62°24.01759'N	025°41.16409'E	15,8°	1 min 04 s
62°24.01839'N	025°41.16098'E	15,8°	0 min 49 s
62°24.01806'N	025°41.16086'E	15,8°	0 min 50 s
62°24.01787'N	025°41.16481'E	15,5°	0 min 53 s

Toisen mittauksissa mukana olleen paikannuslaitteen ohjelmistona oli tehtaan oletusasetukset, mutta ohjelmistoversio oli päivitetty uudempaan versioon. Mittauksissa laite löysi yhdeksän käytettävissä olevaa satelliittia ja mittaukset kirjattiin kuten edellisessä laitteessa (taulukko 4). Mittauksissa huomattiin, että uudemmalla ohjelmistoversiolla varustettu laite suoritti jokaisen laitteen käynnistämisen jälkeen automaattisesti antennien kalibroinnin.

TAULUKKO 4. Thales Ashtech Aquarius² Default configuration firmware päivitetty -mittaustulokset

Pohjoinen leveys	Itäinen pituus	Suunta	Suunnistusaika
62°24.01741'N	025°41.16581'E	15,9°	1 min 20 s
62°24.01832'N	025°41.16600'E	15,8°	0 min 40 s
62°24.01770'N	025°41.16696'E	15,9°	0 min 25 s
62°24.01947'N	025°41.16652'E	15,7°	0 min 50 s
62°24.01931'N	025°41.16745'E	15,8°	0 min 33 s
62°24.01825'N	025°41.16638'E	15,7°	0 min 58 s

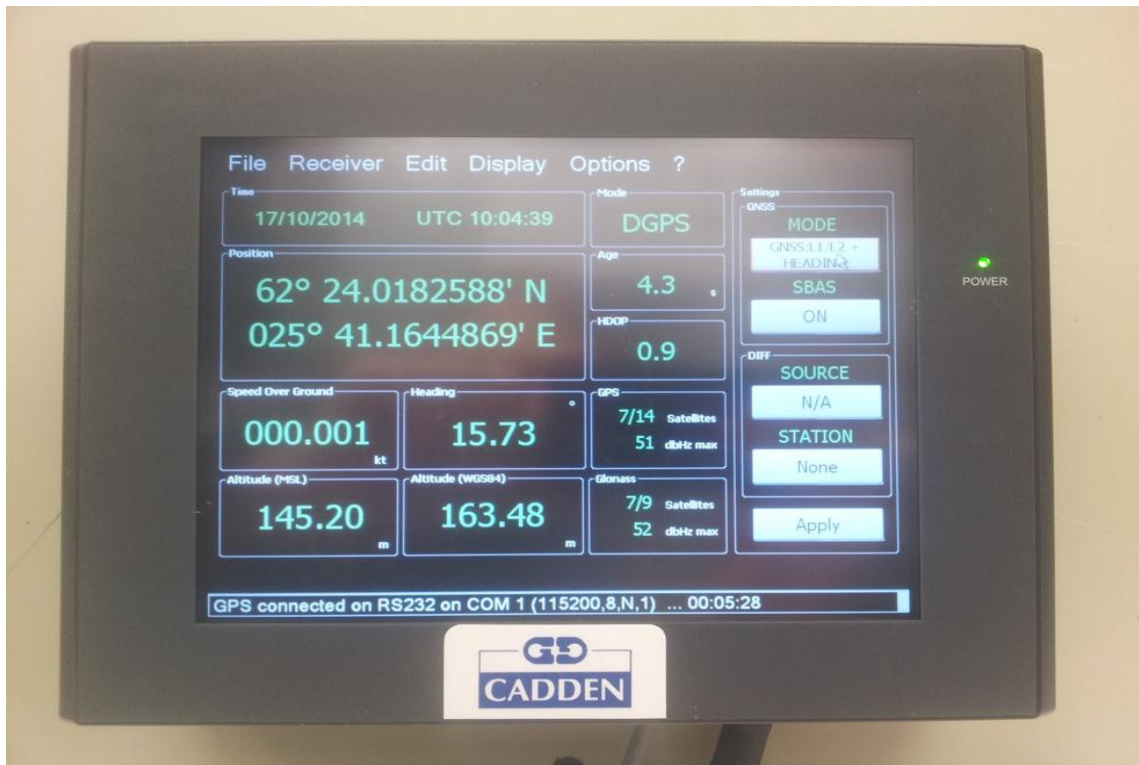
Kolmas paikannuslaite oli sotilaskäyttöön tarkoitettulla ohjelmistoversiolla varustettu. Mittauksissa huomattiin laitteen olevan käynnistymisessä hitaampi ja käytettäviä satelliitteja laite löysi yhdeksän molemmille kanaville (taulukko 5).

TAULUKKO 5. Thales Ashtech Aquarius² Army heading configuration -mit-taustulokset

Pohjoinen leveys	Itäinen pituus	Suunta	Suunnistusaika
62°24.018166'N	025°41.165510'E	16,02°	1 min 45 s
62°24.018333'N	025°41.162442'E	15,67°	1 min 40 s
62°24.018583'N	025°41.164237'E	15,82°	1 min 27 s
62°24.018360'N	025°41.161973'E	15,64°	2 min 02 s
62°24.017950'N	025°41.163210'E	15,60°	1 min 41 s
62°24.017538'N	025°41.163143'E	15,33°	1 min 51 s

6.4 Ashtech ABX802

Ashtechin GNSS-satelliittipaikannuslaitteisto on mittauksissa mukana olleista laitteista uusin. Paikannuslaitteen ja näyttölaitteen yhteen kytkeminen suoritetaan RS232-kaapelilla. Kaapeli kytketään paikannuslaitteen COM 1- tai COM 2 -portista näyttölaitteen COM 1-porttiin. Laitteisto toimii täysin automaattisesti virran kytkemisen jälkeen ja se suorittaa itsenäisesti antennien kalibroinnin ennen mittauksien aloittamista. Näyttölaitteen käyttöjärjestelmän käynnistyttyä avautuu Ashtechin navigointiohjelma ja laite aloittaa mittauksen. Näyttölaite ilmaisee myös HDOP-luvun, joka oli hyvä 0,9 (kuva 26).



KUVA 26. Ashtech ABX802:n mittaustulos Ealtecín AT-80-näytöllä

Paikannuslaite löysi mittauksissa 14 GPS-satelliittia, joista yhdeksän oli käytettävissä. GLONASS-satelliitteja laite löysi yhdeksän, joista seitsemän oli käytettävissä. Mittauksissa laite toimi erittäin nopeasti ja oli mittauksien nopeimpia ja vakaimpia laitteita (taulukko 6).

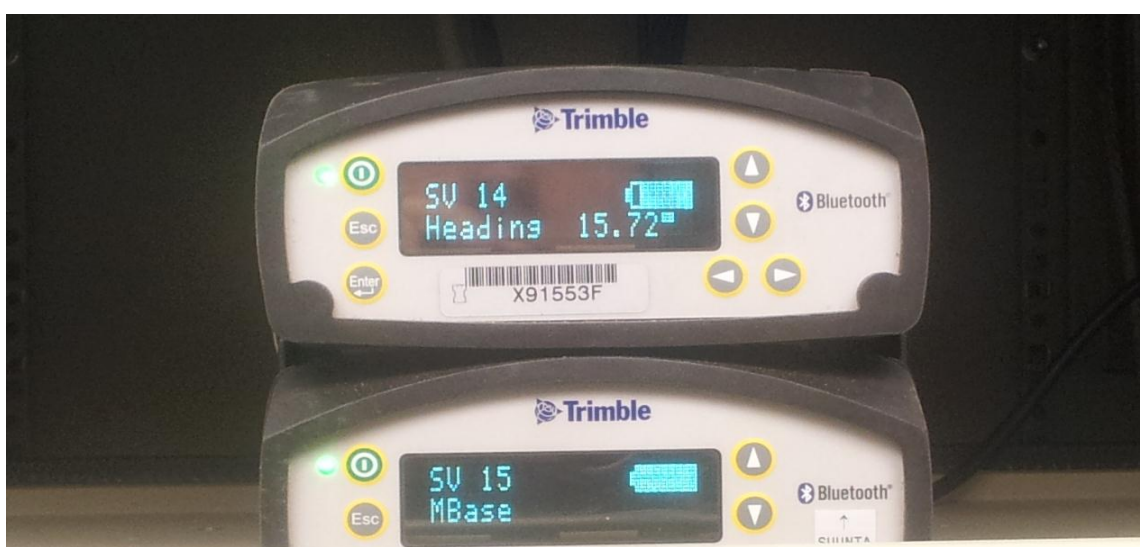
TAULUKKO 6. Ashtech ABX802:n mittaustulokset

Pohjoinen leveys	Itäinen pituus	Suunta	Suunnistusaika
62°24.0177915'N	025°41.1643830'E	15,62°	0 min 11 s
62°24.0180473'N	025°41.1655668'E	15,68°	0 min 03 s
62°24.0182748'N	025°41.1644065'E	15,77°	0 min 09 s
62°24.0182652'N	025°41.1643747'E	15,65°	0 min 12 s
62°24.0182671'N	025°41.1643768'E	15,67°	0 min 10 s
62°24.0183194'N	025°41.1645090'E	15,82°	0 min 08 s

6.5 Trimble SPS555H

Trimblen GNSS-satelliitipaikannuslaitteiston käyttöönotossa on tarkistettava, että modulaariset vastaanottimet on yhdistetty kaapelilla toisiinsa laitteiston takapaneelista löytyvistä IOIO-liitännöistä. Laitteisto suorittaa antennien kalibroinnin itsenäisesti ja aloittaa mittauksen laitteiden käynnistyttyä. Laitteisto on selkeälukuinen ja helppokäyttöinen.

Mittauksissa laitteisto löysi 15 satelliittia toisella ja 14 satelliittia toisella vastaanottimellaan (kuva 27).



KUVA 27. Trimble SPS555H:n mittaustulos näytöllä

Laitteisto toimi mittauksissa hyvin ja suunnat tulivat jokaisella mittauksella nopeasti (taulukko 7).

TAULUKKO 7. Trimble SPS555H:n mittaustulokset

Pohjoinen leveys	Itäinen pituus	Suunta	Suunnistusaika
62°24.01.10109N	025°41.09.80455E	15,47°	2 min
62°24.01.07925N	025°41.09.97941E	15,53°	30 s
62°24.01.06820N	025°41.09.99494E	15,43°	26 s
62°24.01.07828N	025°41.09.94621E	15,67°	30 s
62°24.01.06926N	025°41.09.94591E	15,63°	30 s
62°24.01.06482N	025°41.09.79985E	15,69°	20 s

6.6 Vaihtoehtoiset suunnistuslaitteet

Vaihtoehtoisina suunnistuslaitteina mittauksissa käytettiin Suunnon Tandem 360PC/360R G -kompattia (kuva 28) ja Fujinon 7x50 MTRC-SX -suuntakiikareita (kuva 29). Vaihtoehtoisien suunnistuslaitteiden löytäminen tähän tarkoitukseen oli hankalaa. Erilaisten lasersuuntakehien käyttö on mahdotonta joidenkin järjestelmälustojen kanssa, koska niissä voi olla käytössä laservaroittimet, jotka laukaisevat järjestelmälustan omasuojalaitteet.

Suunnon Tandem-kompassille valmistaja ilmoittaa tarkkuudeksi 0,33 astetta ja erottelukyvyyksi 0,5 astetta. Kompassi on tarkkuusinstrumentti, jossa on säädettävä optiikka, nestetäytteiset ja jalokivilaakeroidut optisesti luettavat ruusut sekä avaruuskulmanmittaus. (20.)



KUVA 28. Suunto Tandem 360PC/360R G (20)

Kompassilla suunnan mittaus tapahtuu katsomalla suuntaruusun optiikan läpi molemmat silmät avoinna, jolloin optiikassa näkyvä suuntaviiva asetetaan järjestelmälustan seinän mukaisesti. Optiikan läpi katsoessa pystytään suuntaviivan takana olevasta ruususta katsomaan mitattu suunta.

Mittaukset kompassilla suoritettiin järjestelmälustan edestä noin 10 metrin päästä etuseinästä ja vasemmalta sivustalta noin 5 metrin päästä sivuseinästä (taulukko 8). Kompassia käytettäessä on huomioitava, että järjestelmälustan

runko aiheuttaa magneettikentän, joka vääristää mittaustulosta mitattaessa suuntaa liian läheltä järjestelmäalustaa.

Fujinon 7x50 MTRC-SX -suuntakiikarit ovat sisäisellä Suunnon kompassilla varustetut kiikarit, jotka on suunniteltu merenkulun ammattilaisten käyttöön. Kiikareille ei löytynyt valmistajan ilmoittamia kompassin teknisiä tietoja, mutta mittaustulokset antavat käsityksen tarkkuudesta, joka on Suunnon tarkkuuskompassin kanssa samaa luokkaa 0,5 astetta.



KUVA 29. Fujinon 7x50 MTRC-SX (21)

Suuntakiikarit on yhdistelmälaite, jossa kiikareihin on lisätty tarkka kompassi. Kiikarien optiikan läpi katsottaessa näkyy kohteen lisäksi pysty- ja vaakasuorat linjat, joiden perusteella kompassi näyttää suuntalukemaa. Suuntalukema näkyy kiikareiden lävitse katsottaessa näkymän alareunassa.

Mittauksessa kiikarin pystysuora linja kulki järjestelmäalustan seinän mukaisesti ja mittauspaikka oli kohtisuorassa kontin kulmaan nähden. Järjestelmäalusta kiikaroiitiin kahdesta suunnasta, edestä 20 metrin päästä kohtisuoraan järjestelmäalustan vasemmasta etukulmasta sekä sivusta 9 metrin päästä järjestelmäalustasta kohtisuoraan vasemmasta etukulmasta (taulukko 8).

Suunnan kiikaroinnit suoritettiin 90 asteen erolla toisiinsa, jolloin pystyimme tarkistamaan kompassikiikarin suuntatarkkuuden. Mittauksien kiikarointietäisyydet eivät olleet samat, koska kiikarointi vaatii suoran näköyhteyden konttiin, mikä oli maastoesteiden vuoksi mahdotonta.

Laitteilla mitatut suunnat ovat magneettisuuntia, joihin on huomioitava eranto. Eranto eli magneettinen deklinaatio on mittauspisteellä +9 astetta, jolloin kompassisuuntaan on lisättävä tämän verran, että saadaan maantieteellinen pohjoissuunta. (22.)

TAULUKKO 8. Vaihtoehtoisten suunnistuslaitteiden mittaustulokset

Laite	Mitattu suunta
Suunto Tandem, päätyseinä	18,5°
Suunto Tandem, sivuseinä	289,5°
Fujinon 7x50MTRC-SX, päätyseinä	17,0°
Fujinon 7x50MTRC-SX, sivuseinä	287,0°

7 MITTAUSTULOKSIEN ANALYSOINTI

Tutkimuksessa mukana olleiden satelliittipaikannuslaitteiden mittaustuloksien analysointi suoritettiin työlle annettujen määrityksien mukaisesti. Työssä määrittäjäksi oli annettu suunnalle $\pm 0,1$ asteen suuntatarkkuus. Paikkatiedon tarkkuudelle ei ollut annettu määrittelyä, koska paikkatieto pystytään määrittelemään nykyisin karttasovelluksia käyttäen, mutta käytimme analysoinnissa määrittäjänsä differentiaaliselle paikanmäärittämiselle luvattua 0,5–5 metrin paikannustarkkuutta. Paikantamisen ja suuntatiedon mittaamiseen kuluva aika on määritelty maksimissaan 15 minuuttiin, koska yleisesti järjestelmälustojen käyttökuntoon laittaminen vie tämän verran aikaa.

7.1 Analysointi

Mittauksissa laitteistoista kirjattiin kuuden mittauksen tulokset. Paikkatiedon ja suunnan mittaamisen jälkeen laite sammutettiin ja käynnistettiin uudelleen. Paikannuslaitteen käynnistymisen jälkeen kelloitettiin aika paikkatiedon ja suunnan uudelleen saamiseen. Mittaustuloksista laskettiin jokaiselle paikannuslaitteelle paikkatiedon, suunnan ja suunnistamiseen menneen ajan keskiarvot (taulukko 9).

TAULUKKO 9. Paikannuslaitteiden mittaustulosten keskiarvot

Laite	Pohjoinen leveys	Itäinen pituus	Suunta	Aika
Hemisphere Crescent VS100	62°24.018317'N	025°41.164490'E	115,98°	3 min 36 s
Thales Aquarius Dflt cnfg	62°24.01789'N	025°41.16311'E	15,77°	1 min 09 s
Thales Aquarius Dflt cnfg FW	62°24.01841'N	025°41.16652'E	15,80°	0 min 47 s
Thales Aquarius Army hdg cnfg	62°24.018155'N	025°41.163419'E	15,68°	1 min 44 s
Ashtech ABX802	62°24.0181609'N	025°41.1646028'E	15,70°	0 min 09 s
Trimble SPS555H	62°24.017950'N	025°41.165197'E	15,52°	0 min 43 s
Kompassi Suunto Tandem	0	0	18,5°	0 min 10 s
Suuntakiikarit Fujinon	0	0	17,0°	0 min 10 s

Tärkeimpänä ominaisuutena tutkimuksessa on pidetty laitteen ilmoittaman suuntatiedon tarkkuutta. Referenssimittauksen antama suunta järjestelmälusalle oli 16,65 astetta, johon vertaamme paikannuslaitteistojen keskiarvotuloksia. Suunta tarkkuuden raja-arvona pidettiin tutkimukselle annettua $\pm 0,1$:tä astetta. Raja-arvoon ei päässyt yksikään tutkimuksessa mukana olleista satelliittipaikannuslaitteistoista (taulukko 10). Lähimmäksi raja-arvoa pääsi tehtaan oletusasetuksilla ja uudella ohjelmistoversio päivityksellä ollut Thalesin paikannuslaite. Kaikilla kolmella eri ohjelmistoversioilla olevat Thalesin paikantimet, sekä Ashtechin paikannin pääsivät alle yhden asteen suuntatarkkuuteen. Trimblen suuntatieto ylittää raja-arvon 1,12 asteella, joka käytännössä johtui laitteen suuntatiedon jatkuvasta vaihtelusta mittauksen aikana tämä vaikutti laitteen keskiarvoon ja tulokseen heikentävästi. Mittauksissa mukana ollut Hemisphere Crescentin VS100-satelliittipaikannuslaite oli mittauksissa huonoin. Laitteisto mittasi suunnalle keskiarvoksi 115,98 astetta, joka ylittää referenssimittauksen tuloksen lähes sadalla asteella.

Paikkatiedon mittaustarkkuus laskettiin laitteistojen keskiarvotuloksista muuntamalla ne metrimuotoon. Muuntaminen tapahtuu Suomen korkeuksilla siten, että pituusasteen minuutin tuhannesosan ($0,001'$) tarkkuus vaihtelee pohjoisen Lapin noin 0,63 metristä pääkaupunkiseudun noin 0,93 metriin. Mittaustulokset paikkatiedolle on laskettu ottamalla keskiarvo Suomen tarkkuuksista, joka on 0,78 metriä (taulukko 10).

TAULUKKO 10. Mittaustulosten erot referenssiarvoon metreinä

Pisteiden erot metreissä	Pohjoinen leveys	Itäinen pituus	Suunta
Hemisphere Crescent VS100	3,198	8,1432	99,33°
Thales Aquarius Dflt cnfg	-0,0156	-0,2652	-0,88°
Thales Aquarius Dflt cnfg FW	0,39	2,3946	-0,85°
Thales Aquarius Army hdg cnfg	0,19344	-0,02106	-0,97°
Ashtech ABX802	0,19812	0,90246	-0,95°
Trimble SPS555H	0,3354	1,36578	-1,13°
Kompassi Suunto Tandem	0	0	1,95°
Suuntakiikarit Fujinon	0	0	0,45°

Alle yhden metrin horisontaalisella tarkkuudella samalle pisteelle itsensä paikansivat Thalesin paikannuslaitteet Default- ja Army-ohjelmistolla sekä Ashtech ABX802-paikannuslaite. Tätä tulosta analysoitaessa huomataan, kuinka ilman ulkoista korjausta, pois lukien satelliittien kautta saatua DGPS-korjausta, on mahdollista päästä useallakin laitteella tarkkoihin paikannustuloksiin. Paikkatiedon mittauksissa huonoimmat tulokset saatiin Hemisphere Crescentin VS100-laitteistolla, jonka mitatuissa paikkatiedoissa on virhettä 3,198 metriä pohjoisessa leveydessä ja 8,1432 metriä itäisessä pituudessa.

Viimeisenä vertailtiin laitteen nopeutta suuntatiedon saamiseen. Laitteita keskenään vertaillessa on ollut välttämätöntä mitata aikaa, jotta ilmoitetut tulokset laitteiden välillä olisivat vertailukelpoisia ja tuloksia voidaan verrata raja-arvoksi annettuun 15 minuuttiin. Satelliittipaikannuksessa laitteen paikantaessa paikallaan olevan pisteen sijaintia on tyypillistä mittaustuloksen heittelehtiminen. Tämä johtuu esimerkiksi mitattujen satelliittien lukumäärän vaihtelusta ja maastoesteistä jotka johtuvat satelliitin siirtymisestä sijaintiin, josta sillä ei enää ole suoraa yhteyttä paikannuslaitteeseen. Paikannusnopeus ei ole kuitenkaan työssä ollut merkittävässä asemassa laitteiden erilaisen toimintatapojen takia.

Nopeimmin suuntatiedon laitteista sai mitattua Ashtech AXB802, koska laite osaa käyttää tehokkaasti edellisen käyttökerran tietoja hyväkseen, ja näin ollen nopeuttaa paikka- sekä suuntatiedon saantia. Kaikki vertailussa olevat laitteet ovat tarkoitukseen nopeutensa suhteen erittäin sopivia (taulukko 9).

7.2 Tulokset

Mittauksista GPS-paikannuslaitteista parhaiten suoriutuivat Thales Ashtech Aquarius² -laitteistot ja GNSS-yhdistelmälaitteista Ashtech ABX802. Laitteistojen suuntatarkkuus pysyi alle yhdessä asteessa mitattuun referenssiarvoon nähden. Laitteistoilla mitattujen tuloksien ja referenssimittauksien välinen suuntaero voi johtua järjestelmäalustassa olevasta mastojärjestelmästä. Järjestelmäalustan suunta referenssimittauksissa on mitattu järjestelmäalustan katolla sijaitsevista nurkkien kulmapaloista. Mastojärjestelmän kiinnityskulma järjestel-

määlustaan voi heittää muutaman senttimetrin, jolloin mittaustuloksissa ilmennyt noin yhden asteen heitto mastossa sijaitsevilla antennilla on mahdollinen.

Paikkatiedonmittauksissa laitteistot mittasivat paikkansa erittäin hyvin siihen nähden, että minkäänlaisia korjauksia ei paikannuslaitteissa käytetty. Absoluuttisen paikanmäärityksen tarkkuuden on ilmoitettu olevan alle 10 metriä, jolloin kaikki laitteet täyttävät määritelmän. Tutkimuksessa määrittämiseksi asetettiin differentiaalisen paikanmäärityksen tarkkuus 0,5–5 metriä, mihin kaikki muut laitteistot pääsivät, paitsi Hemisphere Crescentin VS100-laitteisto.

Hemisphere Crescentin VS100-paikannuslaitteisto käyttää ainoastaan L1-taajuutta, joka voi selittää laitteistolla mitatut suunta- ja paikkatiedon tulokset. Vastaanotin on suunniteltu käytettäväksi laivoissa, jolloin satelliittinäkyvyys on parempi eikä maastoesteitä ole.

Paikannuslaitteistojen mittaustuloksien perusteella järjestelmäalustan tarkan paikkatiedon ja perussuunnan määrittämiseen sopivat laitteistot ovat Thales Ashtech Aquarius²- ja Ashtech ABX802 -laitteistot. Laitteistoilla järjestelmäalustan suuntatieto saadaan alle yhden asteen tarkkuudella ja paikkatieto alle metrin tarkkuudella.

Vaihtoehtoisia suunnistuslaitteita vertaillen Fujinonin kompassikiikarit pärjäsivät Suunnan kompassia paremmin suunnan tarkkuudessa. Kompassikiikareilla suunta voidaan kiikaroida kauempaa, jolloin suuntalinjan pituus kontin suuntaisesti on varmasti merkittävä seikka ja vaikuttaa suunnan tulokseen paljon. Molemmat vaihtoehtoiset suunnistuslaitteet toimivat hyvin ja niillä pystytään mittaamaan suunta järjestelmäalustalle vähintään kahden asteen tarkkuudella. Molempien laitteiden käytössä on huomioitava, että erilaiset maasto-olosuhteet taikka rakennelmat voivat synnyttää magneettikenttiä ja vääristää mittaustuloksia. Mittaukset on hyvä suorittaa järjestelmäalustan molempien seinien mukaisesti, jolloin pystytään arvioimaan suuntatiedon oikeellisuutta. Vaihtoehtoisilla suunnistuslaitteilla sijaintitietoa ei kuitenkaan pystytä määrittämään, mutta nykyisin käytössä olevien karttaohjelmistojen avulla paikkatieto pystytään määrittämään riittävällä tasolla.

8 YHTEENVETO

Tutkimuksen tavoitteina oli selvittää, mikä käytössä olevista paikannuslaitteistoista ja millainen antennien asennuspaikka olisi toimivin järjestelmäalustan tarkan paikkatiedon ja perussuunnan määrittämiseen ja tutkia myös vaihtoehtoisia suunnistusmenetelmiä.

Työssä paikannuslaitteiden antennien sijoituspaikka muutettiin järjestelmäalustan mastoon. Antenneille valmistettiin uusi kiinnitysteline, joka kiinnitettiin mastoon 8 metrin korkeudelle. Antennien sijoituspaikan muutoksella laitteistot saivat mitattua jokaisella käynnistyksellä paikka- ja suuntatiedon, joka ei aikaisemmillä asennuspaikoilla onnistunut.

Antennikaapelit valmistettiin itse ja niille suoritettiin RF-mittaukset, että nähtiin kaapeleiden täyttävän paikannuslaitteistojen ohjekirjoissa annetut vaimennusarvot. Antennikaapeleiden mittauksien yhteydessä huomattiin järjestelmäalustan alkuperäisissä asennuksissa käytetyn ukkos- ja EMP-läpivientisuojan olevan taajuusalueeltaan vääränlainen. Läpivientisuoja vaihdettiin uuteen laajempi taajuiseen malliin ja sen jälkeen mittaukset saatiin suoritettua arvojen mukaisesti.

Satelliittipaikannuslaitteistojen asennukset järjestelmäalustan sisällä sijaitsevaan laitekaappiin suoritettiin olemassa olevien asennusohjeiden mukaisesti. Asennusohjeet tarkastettiin ja niissä ei havaittu olevan virheitä asennustapojen tai käytettävien materiaalien osalta.

Tutkimuksessa mukana olleiden laitteistojen mittaukset suoritettiin Jyväskylässä, Tikkakosken lentokentän läheisyydessä. Referenssimittaukset suoritti Jyväskylän Johtokartoitus Oy, jolloin paikannuslaitteiden mittauksille saatiin luotettava vertailukohta. Mittauksien alussa paikannuslaitteiden käyttöönottomenetelyt tarkistettiin suorittamalla ne ohjeiden mukaisesti. Paikannuslaitteilla suoritettiin paikkatiedon ja perussuunnan mittaukset ja niistä saadut tulokset kirjattiin analysointia varten.

Analysoinnissa paikannuslaitteella mitatuista tuloksista laskettiin keskiarvot paikkatiedolle ja suunnalle, joita verrattiin referenssimittauksen tuloksiin. Paikkatiedon keskiarvotulos muunnettiin metriarvoksi, jolloin pystyttiin vertailemaan paikannuslaitteiden paikkatiedon tarkkuutta paremmin.

Suuntatiedon mittauksissa yhdelläkään paikannuslaitteistolla ei päästy määritettyyn $\pm 0,1$ asteen suuntatarkkuuteen. Lähes kaikilla laitteistoilla päästiin alle yhden asteen tarkkuuksiin, lukuun ottamatta Hemisphere ja Trimblen laitteistoja. Parhaiten suuntatiedon mittasivat Thales Ashtech Aquarius² -laitteistot, jotka saavuttivat alle 0,97 asteen suuntatarkkuudet.

Paikkatiedon mittauksissa laitteistot mittasivat paikkansa erittäin hyvin siihen nähden, että ulkoista korjausta ei paikannuslaitteissa käytetty. Absoluuttisen paikanmäärityksen tarkkuuden satelliittipaikannuksessa on ilmoitettu olevan alle 10 metriä, jolloin kaikki laitteet täyttävät tämän määritelmän. Tutkimuksessa määrittämiseksi oli asetettu differentiaalisen paikanmäärityksen tarkkuus 0,5–5 metriä, mihin kaikki muut laitteistot pääsivät, paitsi Hemisphere Crescent VS100 -laitteisto. Parhaiten paikkatiedon mittasi Thales Ashtech Aquarius² -laitteisto Army Heading-konfiguraatiolla saavuttaen alle 20 senttimetrin paikannustarkkuuden. Hemisphere Crescent VS100 -laitteisto oli jälleen huonoin.

Paikantamisen ja suuntatiedon mittaamiseen kuluva aika oli tutkimuksessa määritetty maksimissaan 15 minuuttiin. Tutkimuksen laitteistoista kaikki suoritettiin mittauksista annetun määrityksen mukaisesti.

Mitattujen suunta- ja paikkatietojen tuloksien ja referenssimittauksien välinen suunta- ja paikkatietoero voi johtua järjestelmälustassa olevan mastojärjestelmän kiinnityksestä. Järjestelmälustan suunta referenssimittauksissa mitattiin järjestelmälustan katolla sijaitsevista nurkkien kulmapaloista. Mastojärjestelmän kiinnityskulma järjestelmälustaan voi heittää muutaman senttimetrin, jolloin mittaustuloksissa ilmennyt noin yhden asteen heitto mastossa sijaitsevilla antennissa on mahdollinen. Maston vääränlaisella harustamisella on myös mahdollista aiheuttaa maston kiertymistä, jolloin suuntatieto muuttuu.

Tutkimuksessa olleista paikannuslaitteista mittaustuloksien perusteella järjestelmälustan paikkatiedon ja perussuunnan määrittämiseen suositellaan käytettäväksi Thales Ashtech Aquarius²- tai Ashtech ABX802 -laitteistoa. Laitteistoilla päästään alle yhden asteen ja yhden metrin mittaustarkkuuksiin.

Vaihtoehtoisiksi suunnistamislaitteiksi valitsimme Suunnon Tandem-tarkkuuskompassin ja Fujinonin suuntakiikarit. Laitteilla suoritetuissa mittauksissa Fujinonin suuntakiikareilla suuntatieto saatiin mitattua 0,45 asteen tarkkuudella ja Suunnon tarkkuuskompassilla 1,95 asteen tarkkuudella. Laitteiden käytössä on huomioitava mahdolliset magneettikenttien tuottamat virheet suuntatiedossa. Tällöin suuntamittaukset laitteilla kannattaa aina suorittaa järjestelmälustan molempien seinien mukaisesti. Vaihtoehtoisilla suunnistuslaitteilla pystytään suuntaamaan järjestelmälusta, jos satelliittipaikannuslaitteita ei ole mahdollista käyttää.

Tutkimuksessa pystyttiin selvittämään, mitkä käytössä olevista paikannuslaitteista ovat sopivat järjestelmälustan paikkatiedon ja perussuunnan määrittämiseen. Antenninen asennuspaikka pystyttiin määrittelemään toimivammaksi kuin entinen asennuspaikka. Vaihtoehtoisia suunnistamismenetelmiä tutkittiin ja niistä sopivimmat valittiin mittauksiin mukaan.

Jatkotoimenpiteinä tutkimuksessa määritetty uusi antennien asennuspaikka ja -tapa esitetään hyväksyttäväksi virallisesti käyttöön. Tutkimuksen jatkokehityksenä voitaisiin nyt löytyneistä ratkaisuista tutkia ja selvittää, kuinka näille satelliittipaikannuslaitteistoille pystyttäisiin toimittamaan tietoturvallisesti korjausdataa. Jatkotutkimuksessa voisi myös selvittää laitteistojen häiritävyyden kestoa korjausdatalla ja ilman.

LÄHTEET

1. Satelliittimittaus eli GPS-mittaus. 2014. Maanmittauslaitos. Saatavissa: <http://www.maanmittauslaitos.fi/kartat/kartoitus/gps-mittaus>. Hakupäivä 16.11.2014.
2. Kosola, Jyri - Solante, Tero 2013. Digitaalinen taistelukenttä, informaatioajan sotakoneen tekniikka. Helsinki: Maanpuolustuskorkeakoulu, Sotatekniikan laitos.
3. Airos, Esa - Korhonen, Risto - Pulkkinen, Timo 2007. Satelliittipaikannusjärjestelmät. Helsinki: Edita Prima Oy.
4. Poutanen, Markku 1999. GPS- paikanmääritys. Hämeenlinna: Karisto Oy.
5. Official U.S. Government information about the Global Positioning System (GPS) and related topics. 2014. NOAA. Saatavissa: <http://www.gps.gov/systems/gps/space/>. Hakupäivä 28.10.2014.
6. Airu, Ville 2009. Paikannus GPS- ja GSM-järjestelmässä. Tampere: Tampereen ammattikorkeakoulu, Tietotekniikan osasto. Opinnäytetyö. Saatavissa: <https://publications.theseus.fi/handle/10024/10210>. Hakupäivä 27.11.2014.
7. Satelliittiohjattavien täsmäaseiden nykytila ja niiden häirittevyys. 2005. Suomen sotatieteellinen seura. Saatavissa: www.js.tsv.fi/index.php/ta/article/download/47905/13779/. Hakupäivä 3.11.2014.
8. United States Naval Observatory (USNO) Block II satellite information. 2014. Saatavissa: <http://tycho.usno.navy.mil/ftp-gps/gpsb2.txt>. Hakupäivä 16.10.2014.
9. Official U.S. Government information about the Global Positioning System (GPS) and related topics. 2014. Saatavissa: <http://www.gps.gov/systems/gps/space/#generations>. Hakupäivä 16.10.2014.

10. Sensoriasema CL-500. 2013. Conlog Group. Saatavissa: <http://www.conlog-group.fi/fi/tuotteet-ja-palvelut/puolustus-ja-turvallisuus/tiedustelu-valvonta-ja-johtamistilat/sensoriasema-cl-500.html>. Hakupäivä 6.10.2013.
11. Hemisphere GPS LCC 2007. Hemisphere Crescent VS100 Series User Guide. Canada: Hemisphere GPS.
12. Hemisphere Crescent VS100 GPS-laite. 2011. Swathe-Services. Saatavissa: <http://swathe-services.com/files/1713/2584/6070/hemisphere-crescent-vs-100-gps-compass.jpg>. Hakupäivä 15.10.2013.
13. Thales Navigation 2002. Thales Ashtech Aquarius² & Aquarius Series User Manual. France: Thales Navigation.
14. Ashtech ABX series datasheet. 2014. Trimble Navigation Limited. Saatavissa: http://www.ashtech.com/library/DS_ABX_Series_US.pdf. Hakupäivä 3.11.2014.
15. Ealtec-TA08 Paneelitietokone. 2014. Ealtec. Saatavissa: <http://www.ealtec.pro/cadrebaproductsfrdroitTA08.htm>. Hakupäivä 3.11.2014.
16. Trimble SP855H GNSS modular receiver datasheet. 2013. Trimble Navigation Limited. Saatavissa: http://construction.trimble.com/sites/construction.trimble.com/files/marketing_material/022482-2508A_SPS855%20GNSS%20Modular%20Receiver_DS_0513_LR.pdf. Hakupäivä 3.11.2014.
17. Trimble marine receivers and sensors. 2014. Trimble Navigation Limited. Saatavissa: <http://construction.trimble.com/products/marine-systems/marine-receivers-and-sensors>. Hakupäivä 6.11.2014.
18. Trimble R10 GNSS -järjestelmä. 2013. Trimble Navigation Limited. Saatavissa: http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-636302/022543-544C-FIN_TrimbleR10_DS_1013_LR.pdf. Hakupäivä 10.11.2014.

19. Trimble TSC3 -maastotietokone. 2013. Trimble Navigation Limited. Saatavissa: http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-656922/022543-512C-FIN_TSC3System_DS_0413_LR.pdf. Hakupäivä 10.11.2014.
20. Suunto Tandem tarkkuuskompassi. 2014. Suunto. Saatavissa: <http://www.suunto.com/fi-FI/Tuotteet/Kompassit/Suunto-Tandem/Suunto-Tandem-360PC360R-G/>. Hakupäivä 16.11.2014.
21. Fujinon 7x50 MTR-SX Poseidon SX Series. 2014. OpticsPlanet. Saatavissa: <http://www.opticsplanet.com/fujinon-poseidon-binoculars-7x50mtr.html>. Hakupäivä 16.11.2014.
22. Magneettiset navat ja kentän hitaat muutokset. 2014. Ilmatieteen laitos. Saatavissa: <http://ilmatieteenlaitos.fi/maan-magneetikentan-synty>. Hakupäivä 15.11.2014.
23. Pasanen, Pertti 2003. CRL-500 EMI NOISY ZONE MEASUREMENT REPORT. Tikkakoski: C3I Materiel Command.

LÄHTÖTIETOMUISTIO

Tekijä Antti Kanninen ja Riku Puolukka
 Tilaaja Ilmavoimien Materiaalikeskus
 Tilaajan yhdyshenkilö ja yhteystiedot ins. Pertti Pasanen 0299386241
PL14, 41161 Tikkakoski Pertti.Pasanen@mil.fi
 Työn nimi Järjestelmäalustan tarkkan paikantiedon ja perussuunnan
määrittäminen
 Työn kuvaus Järjestelmäalustan paikannusjärjestelmän
tutkiminen nopeuden, tarkkuuden ja kustannus-
tehokkuuden suhteen
 Työn tavoitteet Toimivan paikannus- ja suunnistamisjärjestelmän
täydentäminen, asennus järjestelmäalustaan, tutkimuksen
tuloksien ja asennuksen dokumentointi
 Tavoiteaikataulu oimnäytön arvioitu valmistamisaika on
31.10.2014
 Päiväys ja allekirjoitukset Tikkakoskelta 10.2.2014
Antti Kanninen
Riku Puolukka



C3I Materiel Command

EMI Noisy Zone
Measurement report

Page 1/9

Rev. 1.0

CRL-500 EMI NOISY ZONE MEASUREMENT REPORT

Writer PPA

Inspector ARP

Approval TPA



EMI NOISY ZONE MEASUREMENT REPORT

1.0 Date, place and climate

08.09.2003 (11.00 – 15.30) Monday at FiAF garage,
Tikkakoski
Temperature +20° C
Humidity 50% Rh

2.0 Measuring equipments

2.1 Antennas

R&S HFH 2-Z2
BiConilog Antenna EMCO 3142
R&S HF-906

2.2 Analyzer

R&S FSEK 30

3.0 Measuring points

Nine measurements were conducted.; five inside the shelter, one for reference outside the shelter and three near the HWA-equipment. Measuring points are shown in the drawing "Emi_noisy_zoneEN.dwg". Eight of the measurements were done as field strength. Measurement five was done as the antenna voltage.

3.1 Measurement one

- Equipment

- R&S FSEK 30
- R&S HFH 2-Z2 (10KHz-30MHz)

Peak in 25MHz is still unsolved, but definitely it is not coming inside of shelter because same peak is also outside.



3.2 Measurement two

- Equipment

- R&S FSEK 30
- BiConilog Antenna EMCO 3142 (30MHz-1GHz)

Measured vertical polarization, horizontal polarization was impossible to measure due to size of the antenna.

3.3 Measurement three

- Equipment

- R&S FSEK 30
- BiConilog Antenna EMCO 3142 (30MHz-1GHz)

Same measurement as in measurement two, but now measuring point was front of rack five.

3.4 Measurement four

- Equipment

- R&S FSEK 30
- R&S HF-906 (1GHz -18GHz)

Horizontal polarization, antenna was pointed into HWA system.

3.5 Measurement five

- Equipment

- R&S FSEK 30
- R&S HF-906(1GHz -18GHz)

Antenna voltage measurement.

3.6 Measurement six

- Equipment

- R&S FSEK 30
- R&S HF-906(1GHz -18GHz)

Measured field strength outside of the shelter, for reference only.



3.7 Measurement seven

- Equipment
 - R&S FSEK 30
 - R&S HFH 2-Z2 (10KHz-30MHz)

Same peak as in inside the shelter was found.

3.8 Measurement eight

- Equipment
 - R&S FSEK 30
 - R&S HF-906 (1GHz-18GHz)

Antenna directed to the HWA control center.
Measurement was done in vertical polarization.

3.9 Measurement nine

- Equipment
 - R&S FSEK 30
 - BiConilog Antenna EMCO 3142 (30MHz-1GHz)

Peaks at measurement results are due to radio, TV and other common broadcasts. Measurement was done in vertical polarization.

4.0 Inaccurateness

Power to active antenna R&S HFH 2-Z2 was coming from R&S FSEK 30. Power cable was unshielded. Unshielded power cable brought interferences inside of the shelter. Measuring point for the antennas were compromise due to the size of the antenna (excluding R&S HF-906). Shelter walls are conductive so there can exist some reflections. Measurement accuracy was +- 6dB.

5.0 Results

All measurements are below required value 67 dBµV/m (EN-standard).

Attachments

EMI_Noisy_zoneEN.dwg
Measurement results fig. 1..9 (included as follows)

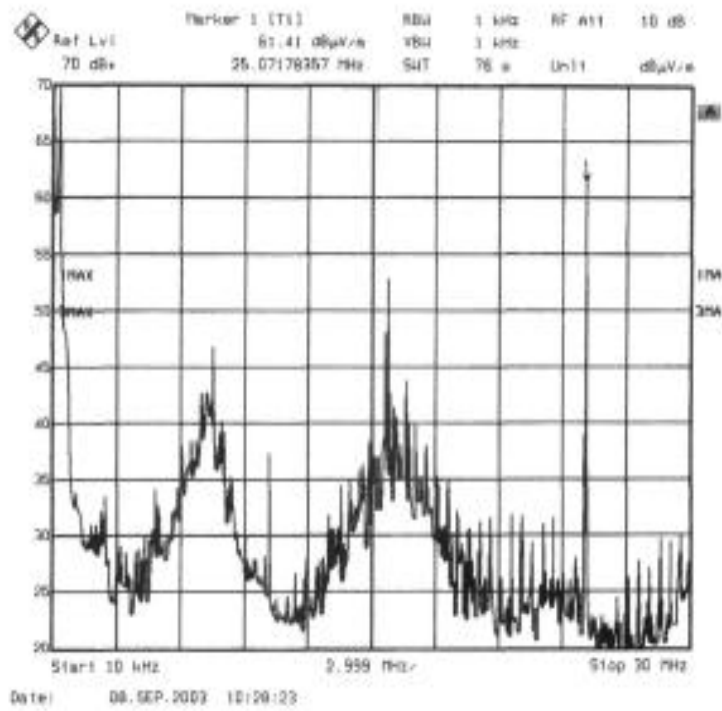


Figure 1: Measurement 1, field strength

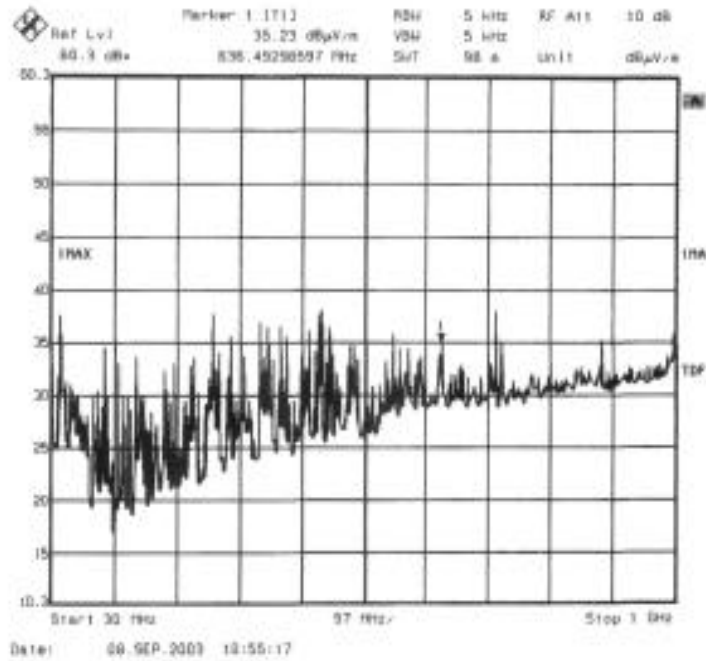


Figure 2: Measurement 2, field strength

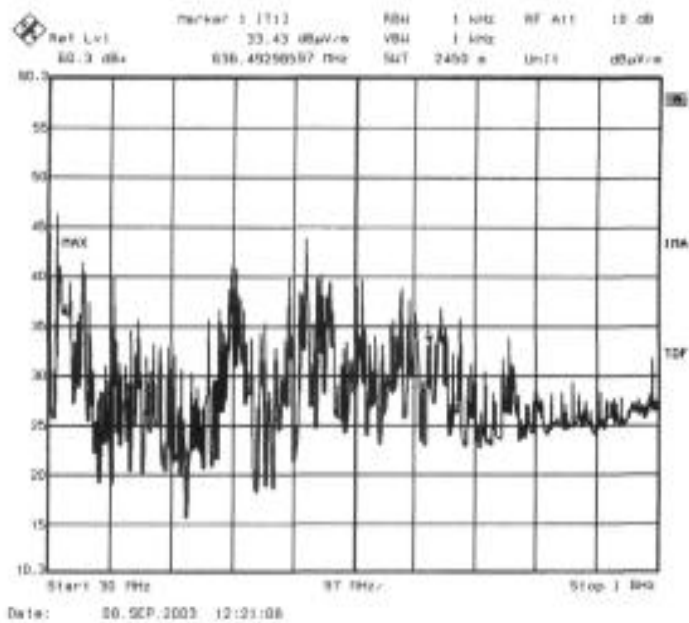


Figure 3: Measurement 3, field strength

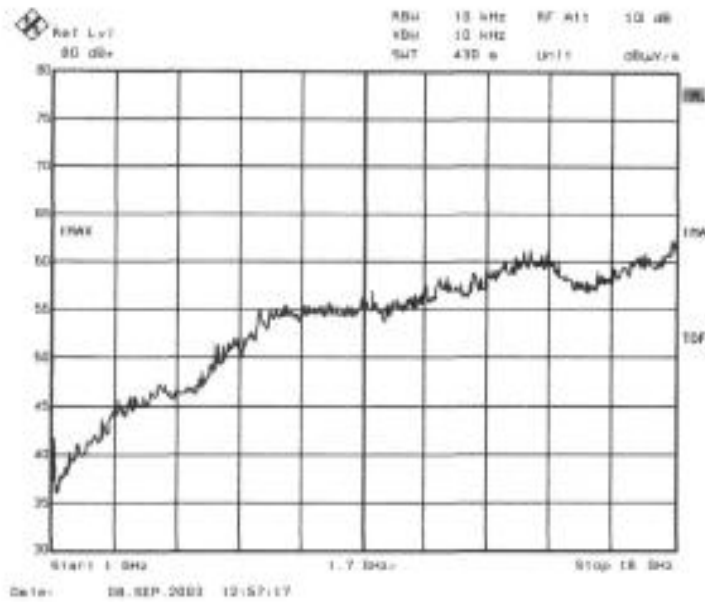


Figure 4: Measurement 4, field strength

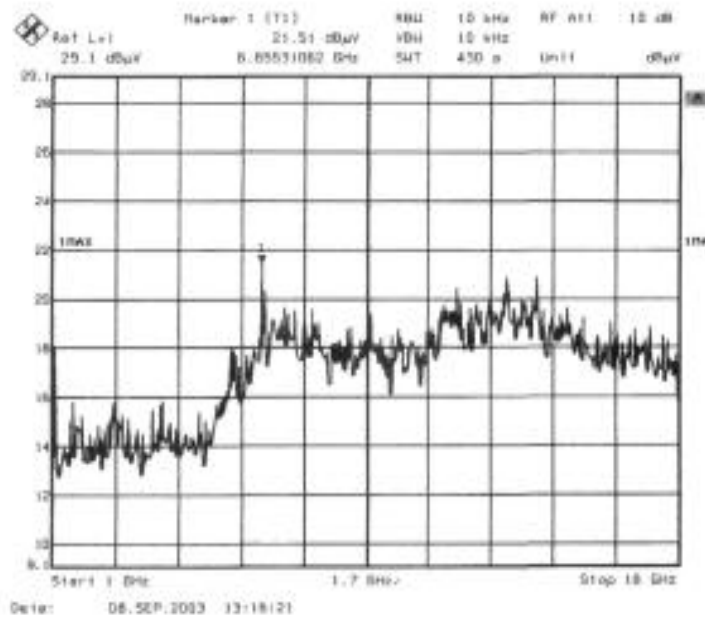


Figure 5: Measurement 5, antenna voltage

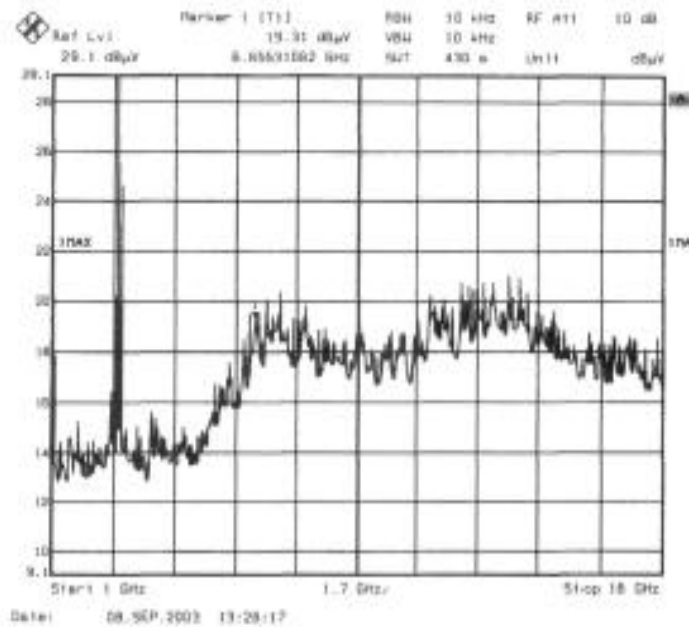


Figure 6: Measurement 6, field strength

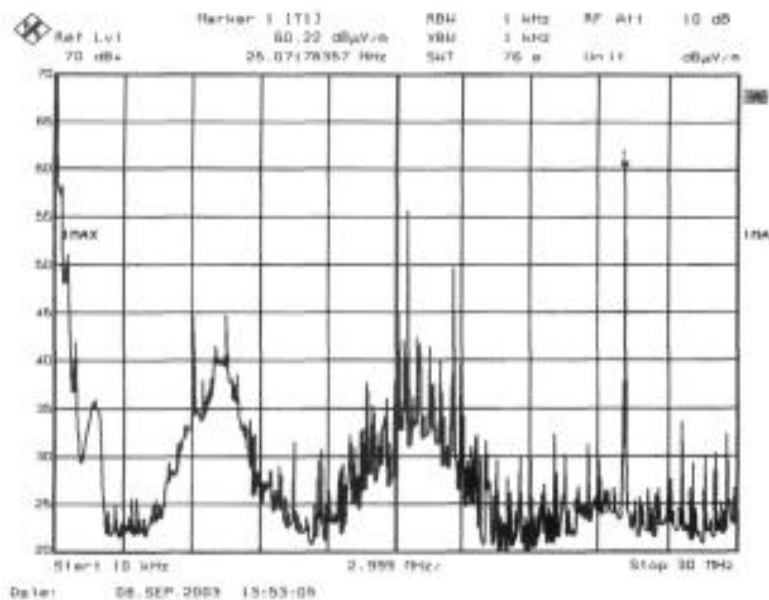


Figure 7: Measurement 7, field strength



C3I Materiel Command

EMI Noisy Zone
Measurement report

Page 9/9

Rev. 1.0

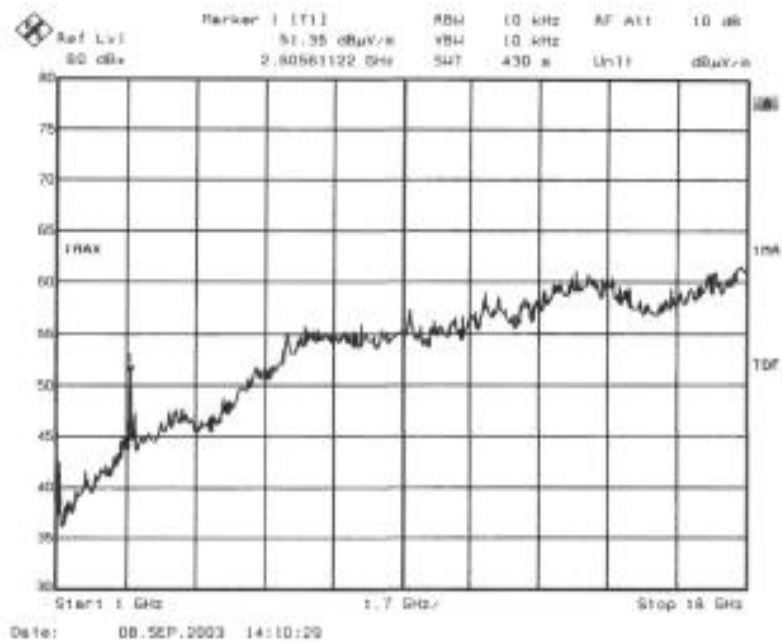


Figure 8: Measurement 8, field strength

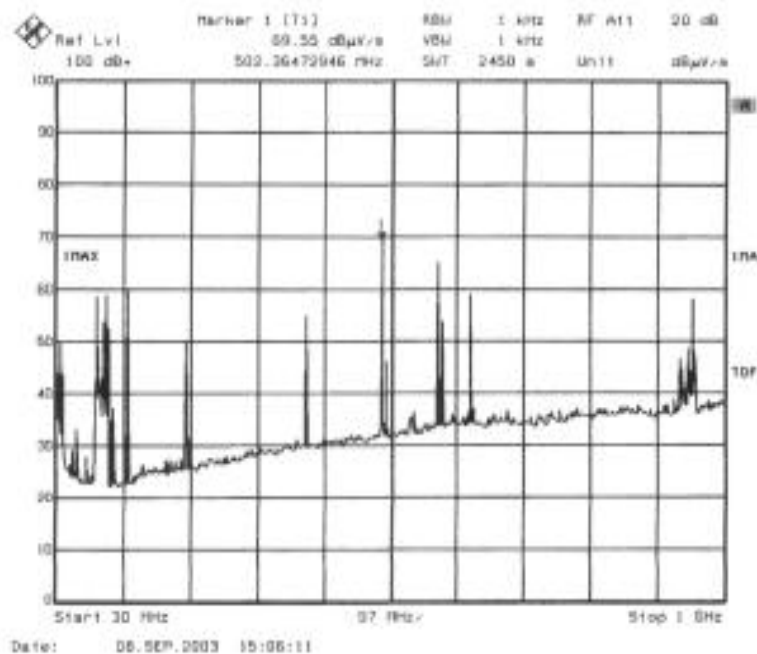


Figure 9: Measurement 9, field strength