
**SATELLIITTI- JA PSEUDOLIITTINAVIGOINNIN
TUKIASEMARATKAISU**



Ammattikorkeakoulun opinnäytetyö

Tietotekniikan koulutusohjelma

Riihimäki, 12.5.2011

Juha Munter



Tietotekniikan koulutusohjelma
Riihimäki

Työn nimi Satelliitti- ja pseudoliittinavigoinnin tukiasemaratkaisu

Tekijä Juha Munter

Ohjaava opettaja Raimo Hälinen

Hyväksytty _____._____.20____

Hyväksyjä

RIIHIMÄKI

Tietotekniikan koulutusohjelma

Tietoliikennetekniikan suuntautumisvaihtoehto

Tekijä

Juha Munter

Vuosi 2011**Työn nimi**

Satelliitti- ja pseudoliittinavigoinnin tukiasemaratkaisu

TIIVISTELMÄ

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli suunnitella ja toteuttaa reaaliaikaisen kinemaattisen paikannuksen tukiasemaratkaisu, joka kykenee käyttämään paikan- ja nopeudenmäärittämisessä sekä satelliitti- että pseudoliittisignaaleja. Tukiasemaratkaisua tullaan käyttämään Space Systems Finlandin Harbour Environment Pseudolites -järjestelmässä, jonka tarkoitus on laajentaa reaaliaikaisen kinemaattisen paikannuksen käyttöä sellaisiin käyttöympäristöihin, joissa luotettava kokoaikainen yhteys satelliitteihin on syystä tai toisesta mahdotonta.

Järjestelmä perustuu maanpäällisten GPS L1 -signaalilähteiden – pseudoliittien – käyttöön reaaliaikaisessa kinemaattisessa paikannuksessa satelliittisignaalien lisäksi. Pseudoliittien käyttö mahdollistaa navigoinnin tilanteissa joissa satelliittisignaalien kulkutie vastaanottimelle katkeaa esimerkiksi liikkuvien laitteiden takia, parantaa mittaustarkkuutta ja nopeuttaa sijaintiratkaisun palautumista käyttöön tilanteissa, joissa signaalit syystä tai toisesta katkeavat. Järjestelmä koostuu tyypillisesti yhdestä tai useammasta pseudoliitistä, yhdestä tai useammasta tukiasemasta ja yhdestä tai useammasta liikkuvasta vastaanottimesta. Tukiasema lähettää jatkuvasti liikkuvalla vastaanottimelle pseudoetäisyyden ja kantoaallon vaiheeseen perustuvaa mittausdataa, jonka avulla liikkuva vastaanotinlaite kykenee laskemaan oman suhteellisen sijaintinsa erittäin tarkasti ja luotettavasti.

Tukiasemaratkaisu toteutettiin parhaiten vaatimuksiin sopivien komponenttien, jotka konfiguroitiin suunnittelun ja testauksen tuloksena optimaalisella tavalla, ja joiden käyttämät viestityypit ja protokollat määriteltiin olosuhteita parhaiten hyödyntäviksi. Testauksessa tukiasemaratkaisu havaittiin toimivaksi ja se vastasi vaatimusmäärittelyjä. Laitteistoa ei saatu toimimaan kokonaan standardimuotoisin viestein, sillä viestityypin käytössä oleva versio ei tukenut pseudoliittisignaalien käyttöä. Tulevaisuutta ajatellen kehityskohteenä on seuraavan pseudoliitteja tukevan standardin käyttöönoton yhteydessä viestityyppien muuttaminen standardimuotoisiksi helpottamaan eri laitevalmistajien laitteiden käyttöä keskenään.

Avainsanat Satelliitti, Pseudoliitti, GPS, GNSS, Reaaliaikainen Kinemaattinen paikannus

Sivut

63 s, + liitteet 4 s.

RIIHIMÄKI

Degree Programme in Information Technology
Telecommunications Technology

Author	Juha Munter	Year 2011
Subject of Bachelor's thesis	Base station solution for satellite and pseudo-lite navigation	

ABSTRACT

The purpose of this thesis was to design and implement a base station solution for real time kinematic positioning capable of using both satellite and pseudolite signals. The base station is to be used in Space Systems Finland's Harbour Environment Pseudolites system, the purpose of which is to make real time kinematic positioning available to environments where it has traditionally been impossible due to frequent signal outages and strong multipath effects. The system is based on the usage of terrestrial GPS L1 signal generators – pseudolites – with real time kinematic positioning in addition to satellite signals. This makes real time kinematic navigation possible in difficult environments where the satellite signals are frequently lost due to e.g. moving machinery; it also makes the navigation solution more reliable and accurate and speeds up its re-initialization if the signals are lost. The system consists of one or several pseudolites, one or several base stations and one or several rover stations. The base station continuously broadcasts data of its pseudorange and carrier phase measurements to the rover station and using this data the rover station can calculate its own relative position with high accuracy and reliability.

The base station was designed and constructed using hardware components most suitable for the system's operation and configured according to the results of design and testing for the most optimized performance. Protocols and message types for inter-device communication were chosen so that the system's operation would be as optimized and as reliable as possible. Testing proved the base station to be functioning as planned and its operation to adhere to initial product requirements. The usage of completely standardized message types proved to be impossible since the current version of the message standard used does not support pseudolite operations. In the future the system could be updated to use standardized messages when updating to a pseudolite supporting version of the standard.

Keywords Satellite, Pseudolite, GPS, GNSS, Real Time Kinematic

Pages 63 p + appendices 4 p.

TYÖSSÄ ESIINTYVÄT LYHENTEET:

ASCII: American Standard Code for Information Interchange, 7-bittinen tietokonemerkitö.

CDMA: Code Division Multiple Access, Koodijakokanavointi.

CRC: Cyclic Redundancy Check, Tarkisteavainalgoritmi.

DOP: Dilution Of Precision, satelliittigeometriasta johtuva tarkkuuden epävarmuus.

ECEF: Earth-Centered-Earth-Fixed, Maapalokeskeinen koordinaattijärjestelmä.

GNSS: Global Navigation Satellite System, Yleisnimitys satelliittipaikannusjärjestelmille.

HEP: Harbour Environment Pseudolites- järjestelmä.

LNA: Low Noise Amplification, signaalinvahvistusmenetelmä.

NMEA: National Maritime Electronics Association, em. yhdistyksen määrittelemä kommunikaatiostandardi.

PRN: Pseudo-Random Noise, Pseudosatunnainen signaali.

RF: Radio Frequency, Radiotaajuus.

RFID: Radio Frequency Identification, Radiotaajuuksinen etätunnistus.

RMS: Root Mean Square, Neliöllinen keskiarvo.

RTCM: Radio Technical Commission for Maritime Services, em. komission määrittelemä viestintästandardi satelliittipaikannusjärjestelmiin.


RTK: Real Time Kinematic, Reaaliaikainen kinemaattinen paikannus.

SBAS: Satellite Based Augmentation System, Satelliittipaikannusjärjestelmän toimintaa parantava alueellinen järjestelmä.

SSF: Space Systems Finland.

VSWR: Voltage Standing Wave Ratio, Seisovan aallon suhde.

WGS-84: World Geodetic System revision 84, Yhdysvaltain puolustusministeriön määrittelemä ja ylläpitämä koordinaattijärjestelmä ja siihen liitetyvä geoidimalli.



SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	1
2	SATELLIITTIPAIKANNUS	2
2.1	Historia.....	2
2.2	Toimintaperiaatteet.....	4
2.3	Satelliittipaikannusjärjestelmien arkkitehtuuri.....	8
2.3.1	Avaruussegmentti	8
2.3.2	Ohjaussegmentti	10
2.3.3	Käyttäjäsegmentti	11
2.4	Satelliittisignaalit.....	12
2.4.1	Signaalien sisältö	12
2.4.2	Signaalitaajuudet	13
2.4.3	Tekninen toteutus	14
2.5	Satelliittinavigoinnin edistyneet konseptit	16
2.5.1	Differentiaalinen satelliittipaikannus.....	16
2.5.2	Reaaliaikainen kinemaattinen paikannus	17
2.6	Virhelähteet	19
2.6.1	Ionosfääristä johtuvat virheet	19
2.6.2	Troposfääristä johtuvat virheet.....	20
2.6.3	Efemeridivirheet	20
2.6.4	Kello- ja pyörästysvirheet	20
2.6.5	Moniheijastuminen	21
2.6.6	Rajoitettu saatavuus.....	22
2.6.7	Tarkkuuden epävarmuus	22
3	HARBOUR ENVIRONMENT PSEUDOLITES -JÄRJESTELMÄ	24
3.1	Yleiskuvaus	24
3.2	Projektin hyödyt ja tavoitteet	24
3.3	Vaatimusmäärittelyt	25
3.3.1	Yleiset vaatimukset	25
3.3.2	Operationaaliset, toiminnalliset ja suorituskykyvaatimukset.....	25
3.3.3	Tekniset vaatimukset.....	25
3.3.4	Ympäristövaatimukset ja käyttöönotto.....	26
3.4	Toiminta	27
3.5	Laitteisto.....	28
3.5.1	Kokonaiskuvaus	28
3.5.2	Pseudoliitit ja lähetinantennit	28
3.5.3	Liikkuva vastaanotin	32
3.6	Ongelmakohdat	34
4	TUKIASEMARATKAISU	35
4.1	Tukiasemaa koskevat vaatimusmäärittelyt.....	35
4.2	Komponentit.....	36
4.2.1	Satelliittivastaanotin	36
4.2.2	Satelliittiantenni.....	39
4.2.3	Radiomodeemi.....	41
4.3	Laitteiston toiminta	43
4.3.1	Yleiskuvaus	43

4.3.2	Satelliittivastaanottimen toiminnan kuvaus.....	43
4.3.3	Viestit ja protokollat	44
4.3.4	Konfigurointi	51
4.4	Tukiasemaratkaisun testaus.....	55
4.4.1	Testaus suunnitteluvaiheessa.....	55
4.4.2	Lopullinen testaus.....	56
5	TULOKSET JA PÄÄTELMÄT.....	59
5.1	Lopullinen kokoonpano.....	59
5.1.1	Laitteisto ja liitännät	59
5.1.2	Konfiguraatio.....	60
5.2	Parannusehdotukset.....	61
	LÄHTEET	62

Liite 1 RANGE-lokiviesti

Liite 2 RTCM3-lokiviesti

Liite 3 RAWEPHEM-lokiviesti

Liite 4 Tukiaseman binääristen viestien koot eri havaintomäärillä

1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on suunnitella ja toteuttaa tukiasemaratkaisu reaaliaikaiseen kinemaattiseen paikannukseen, joka kykenee käyttämään satelliittisignaalien lisäksi pseudoliittisignaaleja. Pseudoliitiksi nimitetään maanpäällistä signaaligeneraattoria, joka generoi GPS-satelliittipaikannussignaalin kaltaista signaalia jota GPS-vastaanottimet voivat käyttää hyödykseen minimaalisin ohjelmistomuutoksin. Tukiasemaratkaisua tullaan käyttämään Space Systems Finlandin kehittämässä Harbour Environment Pseudolites -järjestelmässä, jonka tarkoitus on lisätä esimerkiksi satama-alueiden satelliittipaikannuksen tarkkuutta ja luotettavuutta käyttämällä satelliittisignaalien lisäksi reaaliaikaisessa kinemaattisessa paikannuksessa pseudoliittien generoimaa signaalia.

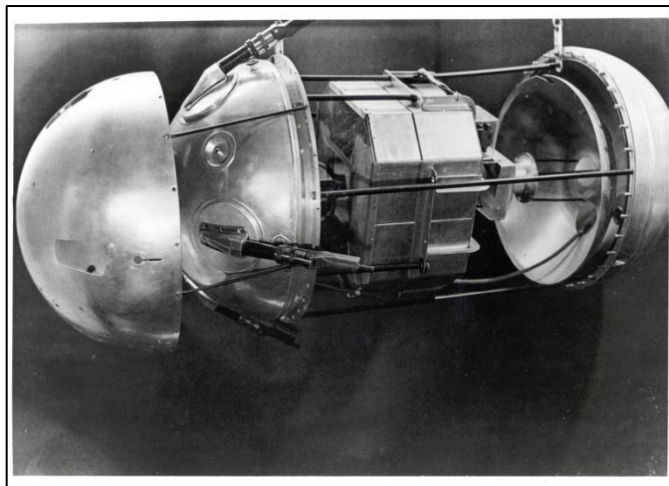
Space Systems Finland on vuonna 1989 perustettu Espoon Niittykummissa sijaitseva yritys, jonka pääliiketoiminta-alueita ovat ohjelmisto- ja järjestelmäsuunnittelu sekä turvallisuuskriittinen järjestelmäarviointi valituilla aloilla, esimerkiksi avaruusteknologian, ydinvoimateollisuuden ja teollisuuden järjestelmien parissa. Yritys aloitti toimintansa kehittämällä ohjelmistoja satelliitteihin ja niiden maaohjausjärjestelmiin, ja nykyään noin puolet Space Systems Finlandin liiketoiminnasta liittyy avaruusohjelmistoihin ja neljännes ohjelmistojen laadunhallintapalveluihin. Yksi neljännes koostuu ohjelmisto- ja laitteistokehityspalveluista elektroniikkateollisuudelle, erityisesti GPS-signaalilähteiden ja navigointiratkaisujen kehityksestä. SSF on yksi vakiintuneista eurooppalaisista avaruusohjelmistojen toimittajista, ja on vuosien mittaan tehnyt yli 20 avaruusohjelmistoprojektia sekä tarjonnut validointi- ja konsultointipalveluja 20 muussa projektissa. Tätä opinnäytetyötä kirjoitettaessa SSF:n ohjelmistot ovat osana kuutta operatiivista satelliittia.

2 SATELLIITTIPAIKANNUS

Koska tämä opinnäytetyö vaatii lukijaltaan pintaa syvempää ymmärrystä satelliittipaikannusjärjestelmien toiminnasta ja teoriasta, keskittyy tämä osio selvittämään satelliittipaikannuksen konseptia. Esimerkeissä ja teknisissä tiedoissa on käytetty pääasiassa Yhdysvaltalaisen GPS-järjestelmän yksityiskohtia, mutta koska kaikki nykyiset satelliittipaikannusjärjestelmät toimivat samoilla peruseriaatteilla, voidaan tietoja soveltaa muihinkin järjestelmiin.

2.1 Historia

Satelliittipaikannuksen syntyyn johtaneet tapahtumat saivat alkunsa jo vuonna 1957, kun Neuvostoliitto laukaisi maailman ensimmäisen satelliitin, Sputnik-1:n (Kuva 1). Koska Sputnik-1 oli rakenteeltaan erittäin yksinkertainen ja pelkästään lähetti avaruudessa radiosignaalia radiolähettimensä kautta, onnistui signaalin kuuntelu millä tahansa tarkoitukseen sopivalla radiovastaanottimella. Yhdysvaltalaisessa Johns Hopkinsin yliopistossa tutkijat mittasivat Yhdysvaltojen yli lentäneen Sputnik-1:n signaalia, ja koska he tiesivät oman sijaintinsa maapallolla, pystyivät he laskemaan satelliitin lentoradan laskemalla signaaliin vaikuttaneen Doppler-efektin suuruuden ja muuntamalla sen etäisyydeksi satelliittiin. Tämä synnytti idean: Entä jos tilanne olisi päinvastainen – satelliitin lentorata ajan funktiona tunnettaisiin erittäin tarkasti, ja sen avulla laskettaisiin maassa olevan kohteen sijainti?



Kuva 1 Sputnik-1 -satelliitti (NASA Photo Gallery 2009)

Tämä ajatus johti ensimmäisten sotilaskäyttöisten satelliittipaikannusjärjestelmien syntyyn. Vuonna 1960 yhdysvaltojen merivoimat aloitti Transit-satelliittijärjestelmän testauksen, jonka avulla merivoimien laivat kykenivät tunnin välein tarkastamaan sijaintinsa merellä. Transit koostui nykyisiin järjestelmiin verrattuna vaatimattomasta vain viiden satelliitin järjestelmästä. Hieman myöhemmin, vuonna 1963, USA:n ilmavoimien avaruusteknologiayksikkö aloitti Project 621B -nimellä tunnetun oman satelliittipaikannusprojektinsa. Vuonna 1967 laukaistiin ensimmäinen Timation-satelliittijärjestelmään kuulunut satelliitti, joka varmisti erittäin tarkkojen

atomikellojen käytön olevan mahdollista myös avaruudessa. Eri satelliitti-paikannusprojektit yhdistettiin vuonna 1973 päätöksellä muodostaa Defensive Navigation Satellite System -nimellä tunnettu järjestelmä. Myöhemmin nimi lyheni Navstar-GPS:ksi, ja nykyään järjestelmä tunnetaan yleisesti vain nimellä GPS, Global Positioning System.

GPS-järjestelmää oli alun perin kehitetty vain armeijan käyttöön, mutta vuonna 1980 Neuvostoliiton ampuessa alas korealaisen Korean Airlinesin lentokoneen, joka oli navigointivirheen takia eksynyt Neuvostoliiton kiellettyyn ilmatilaan, määräsi presidentti Ronald Reagan GPS:n valmistuttuaan avoimeksi myös siviilikäyttöön vastaavanlaisten tragedioiden ehkäisemiseksi. (Hoffman-Wellenhop, Lichtenegger & Collins 2001, 2–5, 11.)

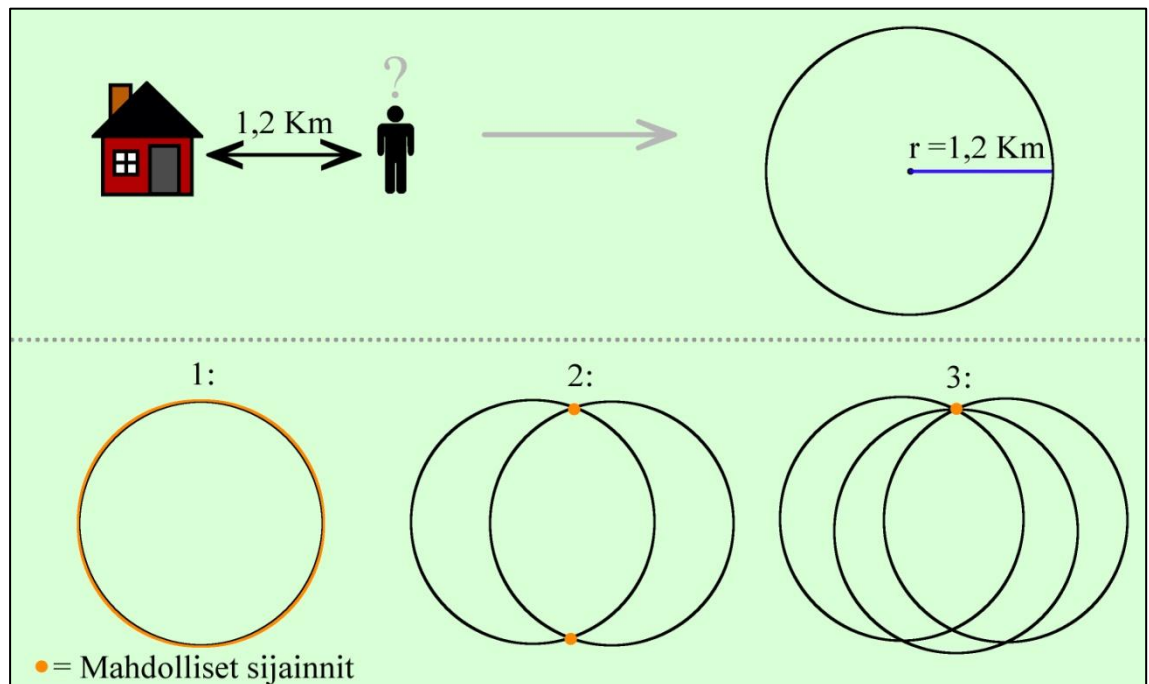
Kirjoitushetkellä operationaalisia GNSS-järjestelmiä on kaksi; Yhdysvaltojen GPS sekä Venäjän GLONASS (Taulukko 1). Alueellisia jo käytössä olevia satelliittipaikannusjärjestelmiä ovat ranskalainen DORIS ja Kiinan BeiDou. Lisäksi kehitteillä on Euroopan Unionin ja Euroopan Avaruusjärjestön toimesta GALILEO-paikannusjärjestelmä, ja Kiina pyrkii tulevaisuudessa laajentamaan edellä mainittua BeiDou-järjestelmäänsä globaaliksi COMPASS-järjestelmäksi. Myös Intia ja Japani kehittelevät omia alueellisia paikannusjärjestelmiään, nimiltään IRNSS ja QZSS. (GNSS World 2010.)

Taulukko 1 Satelliittinavigointijärjestelmät

Järjestelmä	Tila	Satelliitit	Toiminta-alue	Huomioita
GPS	Toiminnassa	31	Globaali	-
GLONASS	Toiminnassa	24	Globaali	Satelliitteja määrä lisätä 30:n
BeiDou	Toiminnassa	5	Kiina + ymp.	-
Compass	Kehitteillä	35	Globaali	BeiDoun seuraaja
Galileo	Kehitteillä	24	Globaali	2 satelliittia kiertoradalla, loput suunnitteilla
DORIS	Toiminnassa	5	Ranska	-
IRNSS	Kehitteillä	7	Intia	-
QZSS	Kehitteillä	3	Japani	Heikon tarkkuutensa takia lähinnä käytettäväksi GPS-järjestelmän lisänä

2.2 Toimintaperiaatteet

Satelliittipaikannus perustuu niin sanottuun trilateraatioon: jos henkilö ei tiedä missä on, mutta tietää etäisyytensä muutamaun tunnettuun pisteeseen, voi hän tunnettujen etäisyyksien avulla laskea sijaintinsa (kuva 2). Maan pinnalla, kun korkeutta ei oteta huomioon, tarvitaan kolme tunnettua pistettä ja täten kolme tunnettua etäisyyttä; yksi tunnettu etäisyys asettaa henkilön s-säteiselle ympyrälle, jonka keskipisteenä on tunnettu sijainti ja s tunnettu etäisyys siihen. Kaksi tunnettua etäisyyttä tuottaa kaksi ympyrää, jolloin henkilö sijaitsee jommassakummassa ympyröiden kahdesta leikkauspisteestä. Kolmannen tunnetun pisteen lisääminen tuottaa kolme ympyrää ja yhden pisteen jossa kaikki ympyrät leikkaavat, joka on henkilön sijainti.

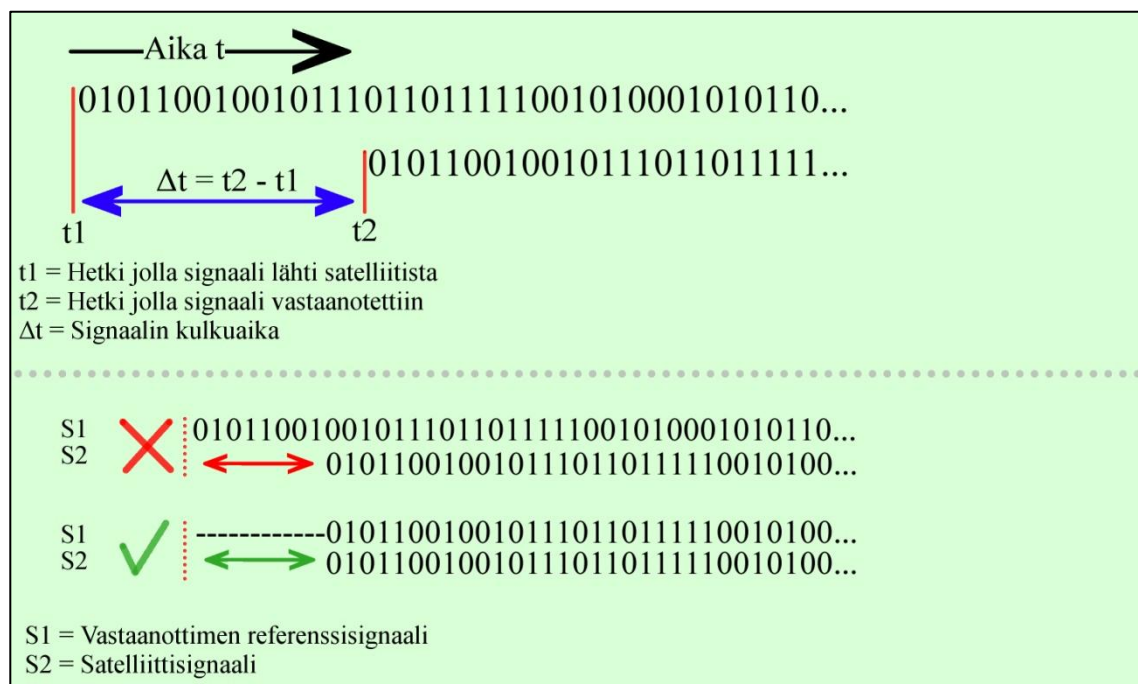


Kuva 2 Trilateraation toimintaperiaatteet

Satelliittipaikannusjärjestelmän toimintaperiaate on pähkinänkuoressa täten melko yksinkertainen: kun satelliittien tarkat paikat tiedetään tietyllä tarkalla ajan hetkellä, voidaan etäisyys niihin laskea kun tarkkaillaan jokaisen satelliitin lähettämää yksilöllistä signaalia ja mitataan, miten kauan tällä signaalilla kestää matkata satelliitista vastaanottimeen. Hankaluuksia edellä mainittuun toimenpiteeseen aiheuttaa vaadittava tarkkuus, sillä koska satelliittien signaalit kulkevat valon nopeudella c , vaaditaan erittäin tarkkoja kelloja, jotta signaalien matkaviivettä kyetään mittaamaan. Nykysukupolven satelliiteissa käytetään pääasiassa tarkkoja rubidiumkelloja, joiden käymistä säädellään maasta käsin vielä tarkemmilla cesiumkelloilla, joiden kellovirhe on luokkaa yksi sekunti 100 000 vuodessa. Tarvittavan tarkkuuden lisäksi ongelmia tuottaa se, että satelliittien signaalit heikenevät huomattavasti yli kahdenkymmentuhannen kilometrin matkansa aikana satelliitista vastaanottimeen. (Jeffery 2010, 9–10,16, 22–23.)

Satelliitin lähettämä yksilöllinen signaali on luonteeltaan pseudosatunnainen toistuva bittijono PRN, Pseudo-Random Noise, jonka tarkempi sisältö

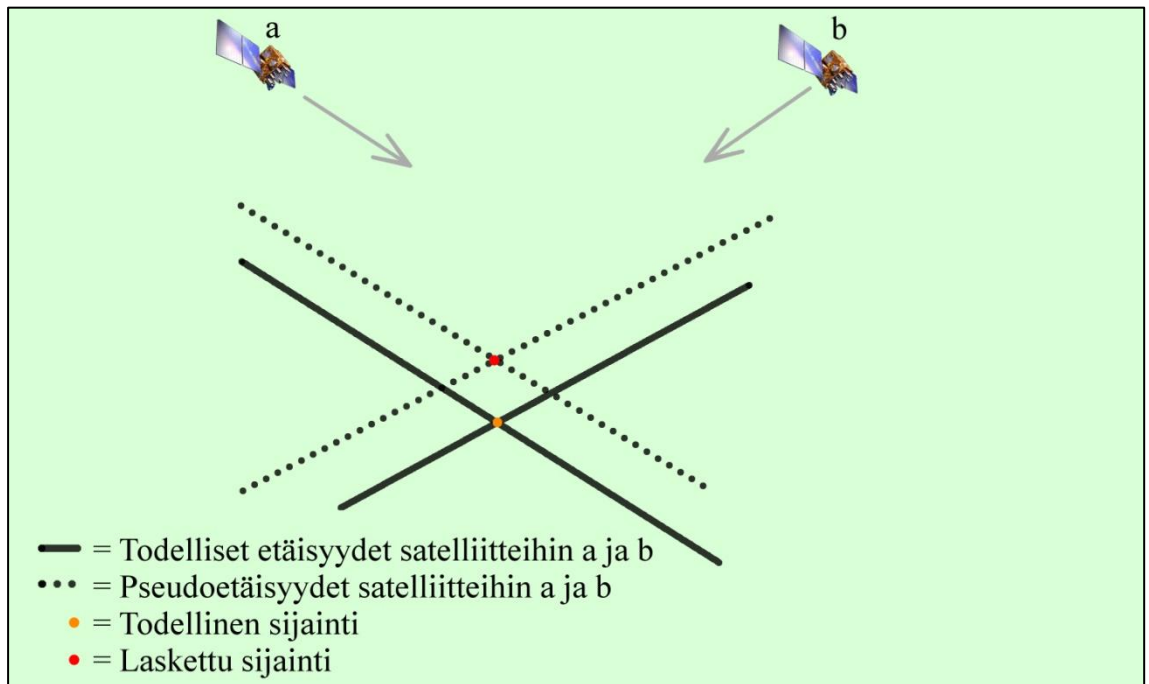
on selvitetty kappaleessa 2.4.3. Vastaanotin laskee etäisyytensä satelliittiin vertaamalla vastaanotettua bittijonoa vastaanottimen generoiman identtisen bittijonon kanssa, ja viivästä määrittämällä tätä referenssisignaalia tarpeellisen määrän sijoittaa signaalit korrelaatioon eli vastaamaan toisiaan (kuva 3). Koska signaalin nopeus on tunnettu, voidaan etäisyys sen lähettäneeseen satelliittiin laskea annetuilla tiedoilla, ja tämä proseduuri toistetaan jokaiselle vastaanottimen käyttämälle satelliittisignaaliille. Koska laskentatulokset sisältää vääjäämättä jonkin verran lähinnä vastaanottimen kellosta johtuvaa virhettä, nimitetään saatua laskentatulosta satelliitin pseudoetäisyydeksi. Jos signaaleihin vaikuttavia ulkoisia virhelähteitä ei oteta huomioon, paikannustarkkuus riippuu vastaanottimen kyvystä sijoittaa signaalit korrelaatioon mahdollisimman tarkasti. Tyypillisesti vastaanotinten tarkkuus tässä on noin 1 % bitinleveydestä, mikä vastaa perustapauksessa etäisyytenä noin kolmea metriä. (Poutanen 1998, 118–122.)



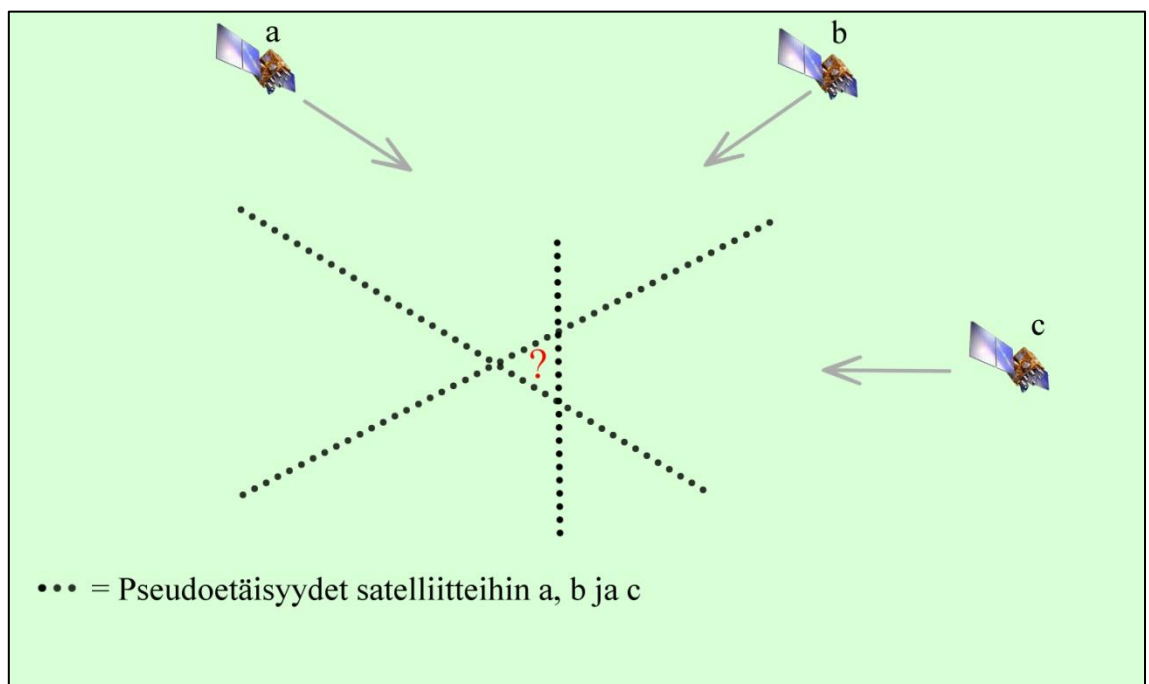
Kuva 3 Pseudoetäisyyden laskenta PRN-signaalin avulla ja signaalien korrelointi

Kun osion alussa kuvattu trilateraatioesimerkki siirretään todellisuutta vastaavaan kolmeen ulottuvuuteen ja satelliittipaikannusteknologian käyttöön, ei kolme satelliittisignaalia enää riitä. Tämä johtuu siitä, että vaikka itse satelliittijärjestelmä kykenee mittaamaan aikaa erittäin tarkasti, ei vastaanotin tähän itsenäisesti pysty, sillä kustannussyistä vastaanottimen kellot ovat pääasiassa kvartsikidekelloja, joiden tarkkuus on huomattavasti satelliittien kelloja alhaisempi; kellovirheen suuruus on noin yksi sekunti kahdessa päivässä. Kuvitteellisessa ideaalitapauksessa, jossa jokainen vastaanotin pitäisi sisällään äärimmäisen tarkan ja satelliittijärjestelmän kanssa synkronoidun kellon, paikan määrittäminen onnistuisi luotettavasti jo kolmella signaalilla. Vaikka on olemassa mahdollisuus jossa kolmessa ulottuvuudessa kolme tunnettua etäisyyttä aiheuttaa kaksi mahdollista näennäisesti validia sijaintia, pystytään käytännössä aina toinen sijainti sulkemaan pois sen ollessa joko maankuoren sisällä tai avaruudessa. Nykytilanteessa laite tarvitsee kuitenkin neljännen satelliittisignaalin, jolla se määrittelee oman kellovirheensä. Kellovirheen takia päädytään ristiriitai-

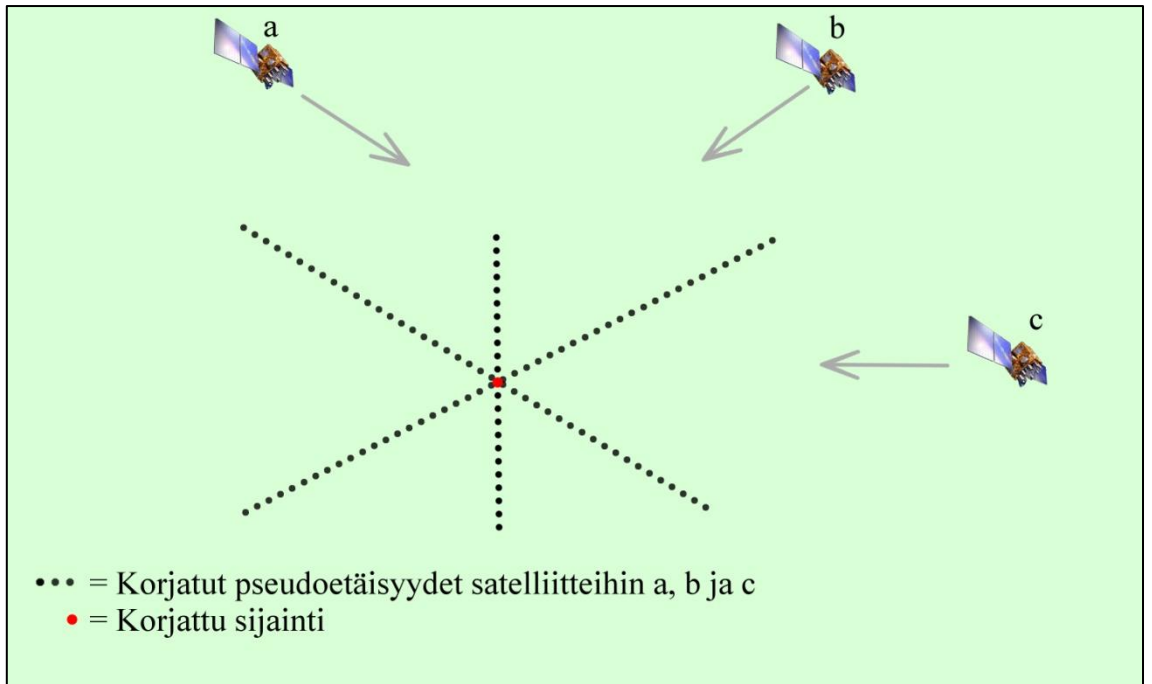
lanteeseen, jossa pseudoetäisyyksien leikkauskohtaa ei löydy. Laite tietää pseudoetäisyyssmittaustensa sisältävän virhettä, mutta virheen suuruutta ei ole tiedossa. Niinpä laite viivästää tai edistää omaa kelloaan niin paljon, että neljä signaalia leikkaa toisensa yhdessä pisteessä, jolloin satelliittijärjestelmän erittäin tarkka kello on ikään kuin siirretty vastaanottimelle. Tämä prosessi on esitetty kaksiulotteisena esimerkkinä kolmella signaalilla kuvissa 4, 5 ja 6. Edellä mainitusta syystä satelliittipaikannusjärjestelmä vaatii toimiakseen aina vastaanottimen yhteyden vähintään neljään satelliittiin millä tahansa ajan hetkellä. (Jeffery 2010, 23–25.)



Kuva 4 Vastaanottimen kellon aiheuttama pseudoetäisyydevirhe



Kuva 5 Satelliitin c pseudoetäisyys ei kellorvirheen johdosta leikkaa satelliittien a ja b pseudoetäisyyksiä



Kuva 6 Pseudoetäisyyksien korjaaminen kelloa viivästämällä tai edistämällä

Edellä mainitussa ideaalitapauksessa, jossa vastaanottimen kellovirhettä ei esiintyisi, pseudoetäisyyden P laskeminen satelliittiin n onnistuisi kaavalla 1 jossa T on ajan hetki jolla signaali vastaanotettiin, T_s ajan hetki jolla satelliitti lähetti signaalin ja c valonnopeus.

$$P_n = c(T - T_s) \quad (1)$$

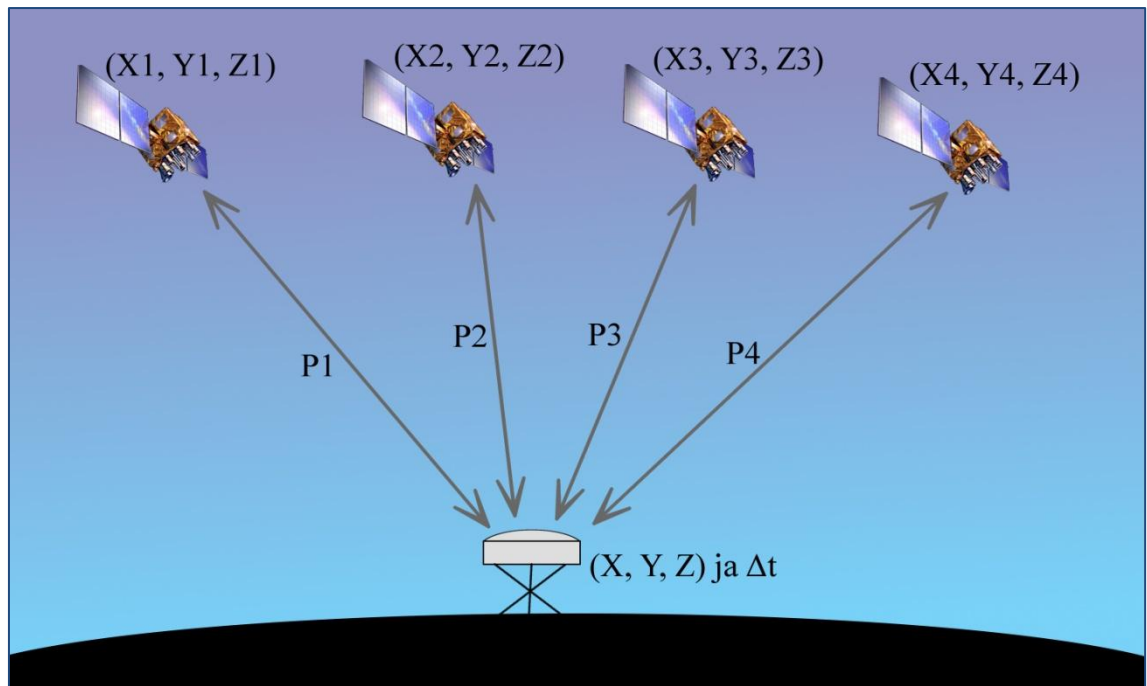
Kuitenkin, koska tuntemattoman suuruinen kellovirhe Δt on olemassa, täytyy se sisällyttää laskentaan kaavan 2 osoittamalla tavalla.

$$P_n = c([T + \Delta t] - T_s) \quad (2)$$

Tämä johtaa siihen, että tarvitaan neljän yhtälön yhtälöryhmä, josta ratkaistaan satelliittien tunnettujen sijaintien $X_n, Y_n, Z_n; n = 1..4$ ja pseudoetäisyyksien $P_1..P_4$ avulla vastaanottimen sijainti X, Y, Z ja kellovirhe Δt kaavan 3 mukaisesti. Yhtälöryhmän käyttöä on havainnollistettu kuvassa 7.

$$\begin{cases} P_1 = \sqrt{(X - X_1)^2 + (Y - Y_1)^2 + (Z - Z_1)^2} + c\Delta t \\ P_2 = \sqrt{(X - X_2)^2 + (Y - Y_2)^2 + (Z - Z_2)^2} + c\Delta t \\ P_3 = \sqrt{(X - X_3)^2 + (Y - Y_3)^2 + (Z - Z_3)^2} + c\Delta t \\ P_4 = \sqrt{(X - X_4)^2 + (Y - Y_4)^2 + (Z - Z_4)^2} + c\Delta t \end{cases} \quad (3)$$

GPS-järjestelmä käyttää referenssikoordinaatistonaan WGS-84 -järjestelmää. Koska laskennan edellytyksenä on kellovirheen Δt pysyminen muuttumattomana joka satelliitin kohdalla, edellytetään satelliittien kelloerojen erittäin tarkkaa tuntemista. (Hoffman-Wellenhof ym. 2001, 4–6.)



Kuva 7 Pseudoetäisyyslaskennan havainnekuva

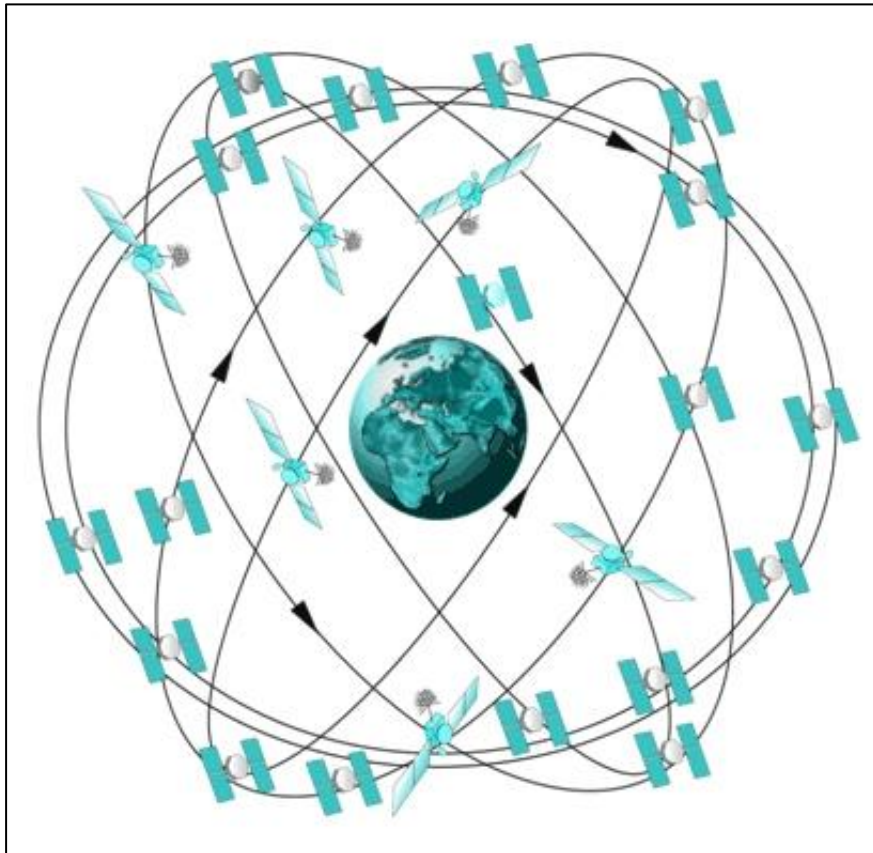
Satelliittisignaalien etsintä perustuu niin kutsuttuun almanakkaan, joka sisältää suurpiirteiset tiedot siitä, missä kukin satelliitti sijaitsee ja mikä kunkin satelliitin status on. Satelliitin löydettyään ja sen signaaliin lukkiututtuaan vastaanotin lataa satelliitin rata- eli efemeriditiedot joita käyttää sijainnin määrittämisessä. (Jeffery 2010, 19.)

2.3 Satelliittipaikannusjärjestelmien arkkitehtuuri

2.3.1 Avaruussegmentti

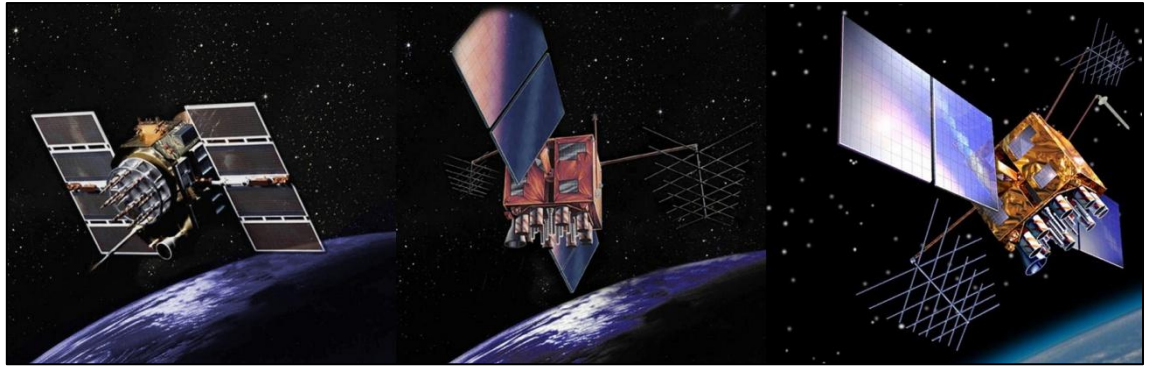
Avaruussegmentti koostuu maata kiertävistä satelliiteista, joita on jokaisessa satelliittipaikannusjärjestelmässä tyypillisesti muutamia kymmeniä, ja ne kiertävät maapalloa sopivasti sijoiteltuna noin 20 000–30 000 kilometrin korkeudessa niin, että mistä tahansa maapallon pisteestä on aina näkyvyys vähintään neljään satelliittiin. Esimerkiksi GPS-järjestelmässä satelliitteja on 31 kappaletta varasatelliitit mukaan lukien – tilanne GPS-almanakkatietojen mukaan 8.3.2011 – ja ne kiertävät maata kiertoradalla, jonka säde on 26 560 kilometriä kuudessa eri tasossa (Kuva 8). (GPS Satellite Outage Information 2011; Hoffman-Wellenhof ym. 2001, 12–18.) Satelliittien inkliinaatio on 55 astetta ja korkeus maanpinnasta keskimäärin 20 200 kilometriä. GPS-järjestelmässä satelliittien kiertoaika on noin 12 tuntia, ja mistä tahansa maapallon pisteestä on näkymät vähintään kuuteen ja enintään kahteentoista satelliittiin millä tahansa ajan hetkellä. On myös huomioitavaa, että kunkin tason satelliitit eivät ole toisiinsa nähden tasaisesti sijoiteltuna 90 asteen kulmassa, vaan satelliittien kulmaerot ovat 30, 105, 120 ja 105 astetta. Satelliittien orientaatio muuttuu jatkuvasti niin, että aurinkopaneelit ovat aina aurinkoon päin, ja antennit osoittavat aina maan keskustaa kohti. Satelliittipaikannusjärjestelmissä termi konstellaatio viittaa joko tietyn GNSS-järjestelmän kaikkiin käytössä oleviin satelliit-

teihin, tietyllä hetkellä yksittäiselle vastaanottimelle näkyviin satelliitteihin tai tietyllä hetkellä vastaanottimen sijainnin laskemisessa käytettäviin satelliitteihin. (Hoffman-Wellenhof ym. 2001, 12–18; What is GPS 2010.)



Kuva 8 GPS:n konstellatio (GPS Image Gallery 2010)

GPS-järjestelmässä satelliitit jakautuvat sukupolviin laukaisuajankohtansa ja tekniikkansa mukaan. Ensimmäiset vuosina 1978–1985 laukaistut satelliitit kuuluivat ensimmäisen sukupolven Block I -satelliitteihin, joita seurasi Block II ja sen variaatiot IIA, IIR, IIR-M ja IIF. Kaikki tätä opinnäyteytötä kirjoitettaessa toiminnassa olevat GPS-satelliitit kuuluvat joko luokkaan Block IIA, joita on toiminnassa 10 kappaletta, Block IIR joita on toiminnassa 12 kappaletta, Block IIR-M joita on toiminnassa 7 kappaletta tai Block IIF joita on toiminnassa kaksi kappaletta (Kuva 9). (GPS Wing Reaches GPS III IBR Milestone 2010.) Vuodesta 2014 eteenpäin on tarkoitus laukaista yhteensä 36 uuden Block III -sukupolven satelliitteja sen eri variaatioilla Block IIIA, Block IIIB ja Block IIIC (Lockheed Martin Press Release 2008).

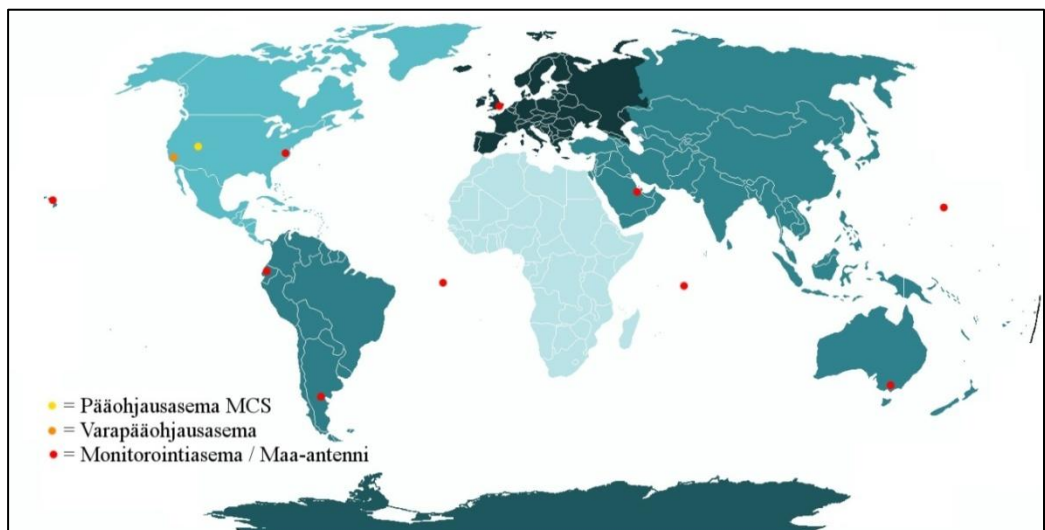


Kuva 9 Piirroket käytetyimmistä Block IIA-, Block IIR-, ja Block IIR-M- tyypin GPS-satelliiteista (GPS Image Gallery 2010)

Yksittäisistä satelliiteista puhuttaessa ne yleisimmin yksilöidään joko juoksevan Space Vehicle- eli SV-numeronsa tai niille määrätyn pseudosatunnaisen koodinsa eli PRN-numeronsa mukaan, GPS-järjestelmässä satelliitit siis tunnetaan ”nimillä” PRN 1–PRN 32 tai SV 1–SV n. Jokainen rakennettu GPS-satelliitti sen nykyisestä tilasta riippumatta – esimerkiksi käytössä, poistettu käytöstä tai tuhoutunut epäonnistuneessa laukaisussa – omaa yksilöllisen SV-numeron, kun taas kulloinkin käytössä oleville satelliiteille on jaettu PRN-numerot väliltä 1–32, joten on huomioitavaa että $PRN \neq SV$. (Collins 2010, 29–30.)

2.3.2 Ohjaussegmentti

Ohjaussegmentti koostuu GPS-järjestelmässä yhdestä pääohjausasemasta MCS, yhdestä varapääohjausasemasta, neljästä maa-antennista ja kuudesta monitorointiasemasta (Kuva 10). Ohjaussegmentti on vastuussa avaruusjärjestelmän tiedonpäivityksestä ja muista mahdollisista toimenpiteistä, esimerkiksi ratakorjauksista. Monitorointiasemat vastaanottavat satelliittien navigaatioviestiä, jonka lähettävät edelleen pääohjausasemalle. Siellä satelliittien efemeridit lasketaan uudelleen, minkä jälkeen efemeridi- ja kellokorjaukset syötetään satelliiteille.

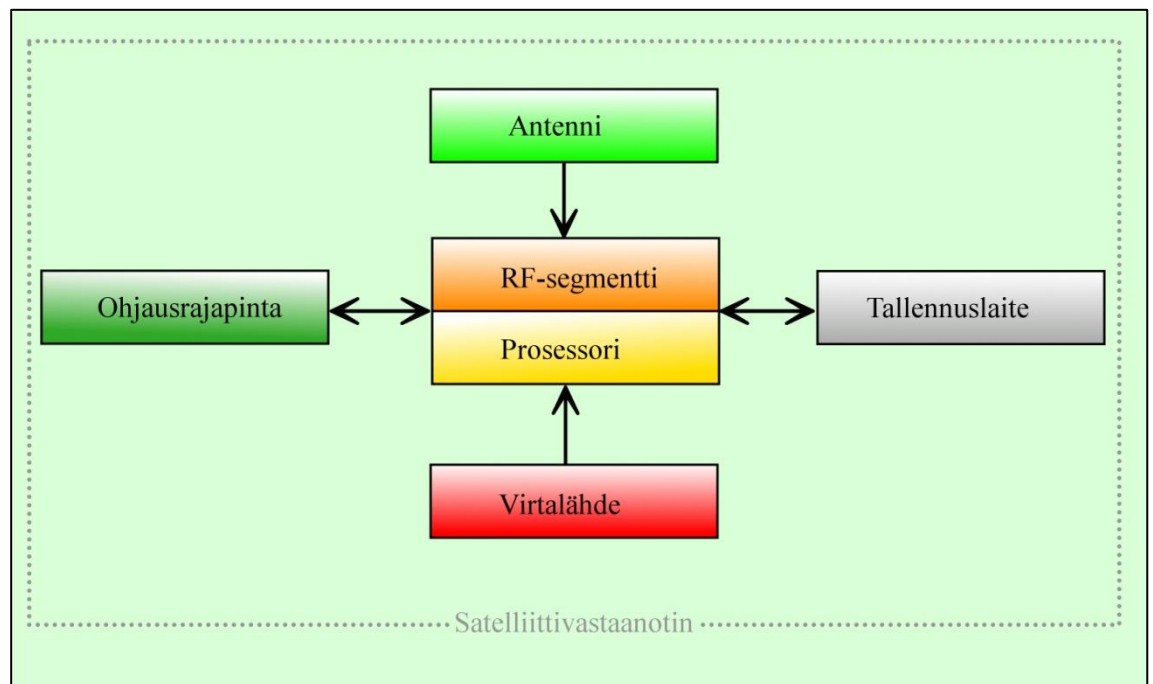


Kuva 10 Ohjausasemien sijainnit

Ohjausegmentti päivittää satelliittien almanakkatiedot normaalioperaatio-olosuhteissa vähintään kuuden päivän välein. Almanakka pitää sisällään koko konstellaation satelliittien suurpiirteiset ratatiedot ja statukset. Almanakan suurpiirteisestä luonteesta johtuen hätätilanteessa järjestelmän almanakkatietoja voidaan käyttää jopa 180 päivän ajan. Satelliitin efemeriditiedot ovat huomattavasti tarkemmat ja ne päivitetään maasta käsin tyypillisesti 24 tunnin välein, mutta hätätilanteita varten satelliitille syötetään etukäteen seuraavan 60 päivän efemeriditiedot. Satelliitti itse päivittää omat efemeriditietonsa muutaman tunnin välein. (Hoffman-Wellenhof ym. 2001, 18–20, 65–67; Jeffery 2010, 31.)

2.3.3 Käyttäjäsegmentti

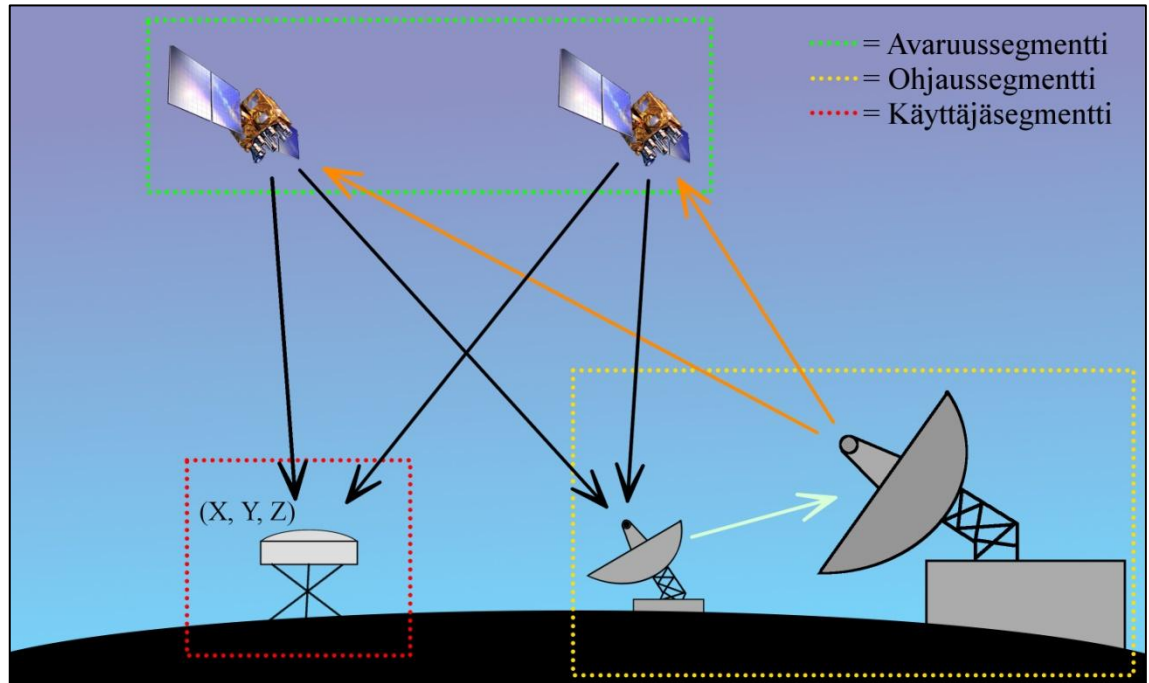
Käyttäjäsegmentti koostuu erilaisista satelliittivastaanottimista, joiden tehtävänä on vastaanottaa ja käsitellä signaalit ja laskea niiden perusteella paikka- ja aikaratkaisu. Vastaanotinten ominaisuudet vaihtelevat käyttötarkoituksensa mukaan, mutta voidaan sanoa, että kaikki satelliittivastaanottimet rakentuvat kuvan 11 esittämän konseptin ympärille. Se koostuu vastaanotinantennista, signaalinkäsittelyn suorittavasta radiotaajuuseli RF-osasta, laskennan ja järjestelmän ohjauksen suorittavasta prosessorista ja jonkinlaisesta muistista tallennuslaitteen muodossa, johon havainnot tallennetaan. Lisäksi laite sisältää virransyötön ja ohjausraja- pinnan käyttäjän ja laitteen välille, mikä voi olla esimerkiksi kosketusnäyttö. (Hoffman-Wellenhof ym. 2001, 78–80.)



Kuva 11 Satelliittivastaanottimen perusrakenne

Käyttäjäsegmentti on koko GPS-järjestelmän ydin siinä mielessä, että järjestelmän muut segmentit toimivat palvellakseen sitä (Kuva 12). Laite voi näyttää lasketun paikan koordinaattipisteet esimerkiksi laitteeseen tallennetun kartan päällä, kuten esimerkiksi autonavigaattorit tekevät. Normaalissa käytössä vastaanotin voi olla joko yksi- tai monitaajuuksinen; yksi-

taajuuksinen vastaanotin voi hyödyntää ainoastaan L1-taajuuden paikannussignaalia, kun taas monitaajuuksinen vastaanotin kykenee hyödyntämään sekä L1-että L2-taajuuksien signaaleja, mistä on hyötyä signaalivirheiden eliminoinnissa. Oma lukunsa ovat sotilaskäyttöön tarkoitetut vastaanottimet, jotka ovat käytännössä aina kaksitaajuuksisia kyeten vastaanottamaan P(Y)-signaalin sekä L1-että L2-taajuuksilla. (Hoffman-Wellenhof ym. 2001, 20–21.)

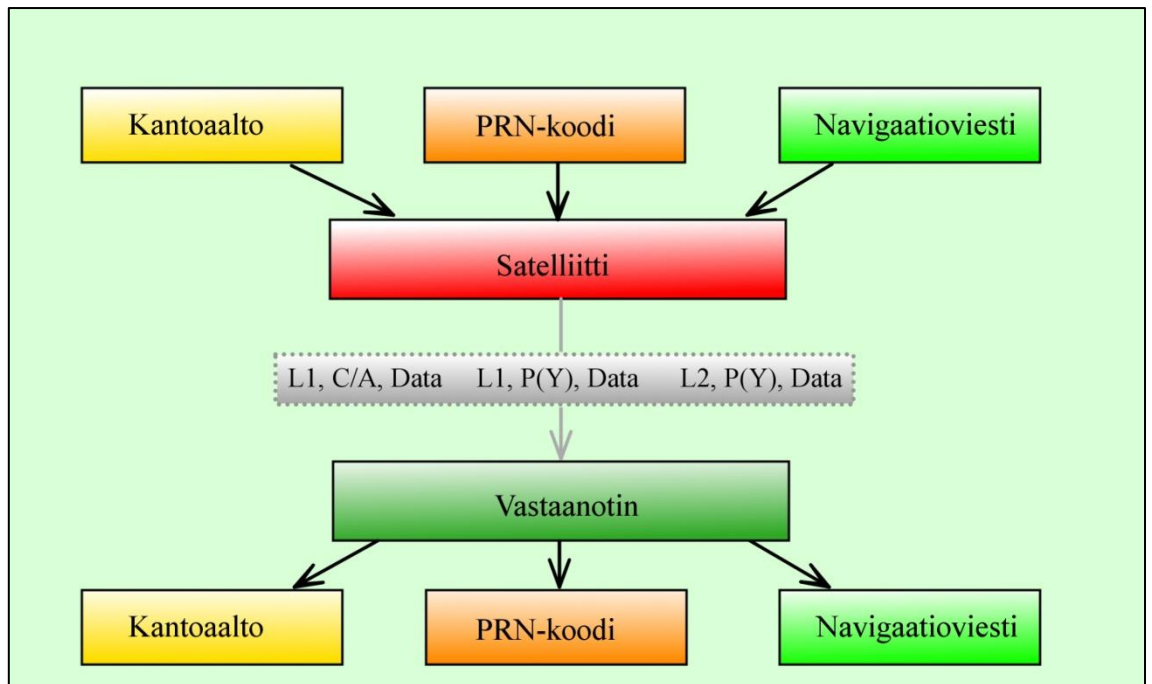


Kuva 12 Segmenttien kokonaiskuva

2.4 Satelliittisignaalit

2.4.1 Signaalien sisältö

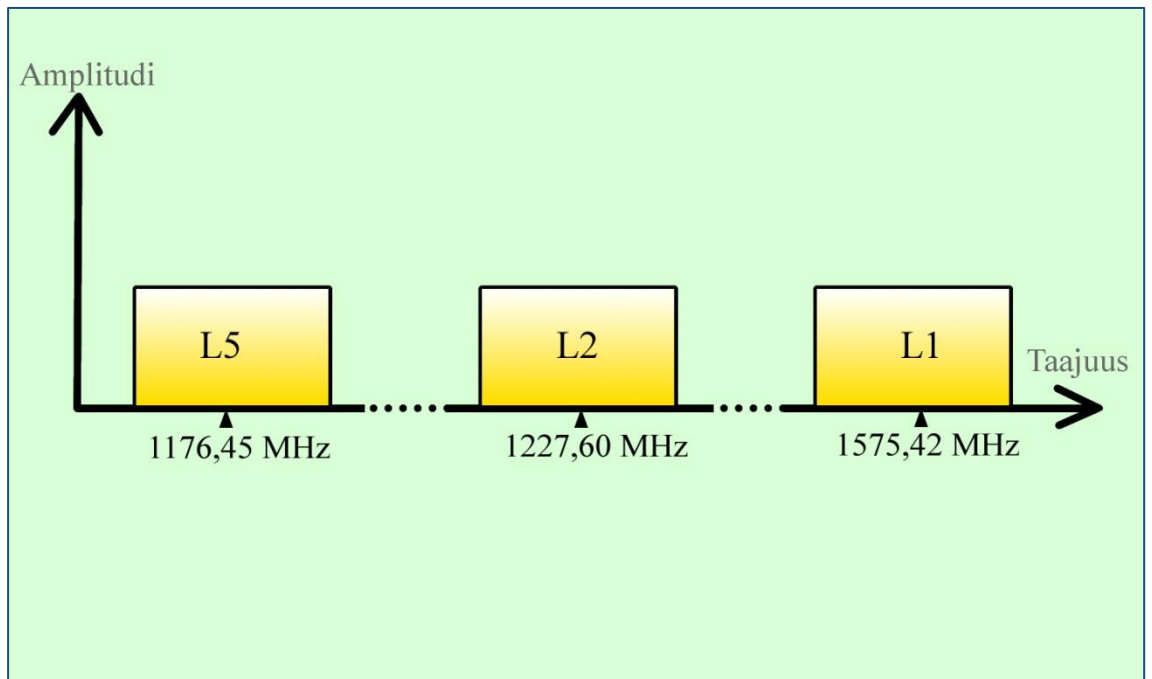
Satelliitin signaali perustuu kolmeen toisistaan eroteltavissa olevaan osaan; signaalin pohjana toimivaan kantaaltoon jota moduloimalla se saadaan kuljettamaan informaatiota, satelliitin tunnistukseen ja signaalin kulkuajan laskemiseen käytettävään PRN-koodiin ja varsinaista dataa sisältävään navigaatioviestiin (Kuva 13).



Kuva 13 Satelliittisignaalin sisältö ja kulku GPS-järjestelmässä yksinkertaistettuna

2.4.2 Signaalitaajuudet

GPS-satelliittien navigaatio-signaalit on moduloitu CDMA-tekniikalla ja ne käyttävät sisältönsä sanelemana jotain kolmesta kantaaallon taajuudesta, L1, L2 tai L5 (Kuva 14). Kantaaalltoa moduloidaan joko kaikille avoimella Coarse Acquisition eli C/A-koodilla tai vain sotilaskäyttöön tarkoitettuulla salatulla Precision eli P(Y)-koodilla (Taulukko 2).



Kuva 14 Kantaaallon taajuuskaistat

L1-taajuus 1575,42 MHz on GPS-satelliittien paikannussignaaliaajuus jota moduloidaan C/A-koodilla ja jonka kaikki GPS-vastaanottimet kykenevät vastaanottamaan. Yksinkertaisimmillaan satelliittipaikannus perustuu yksinomaan L1-taajuudella välitettäviin tietoihin. C/A-signaalin lisäksi L1-taajuutta moduloidaan myös P(Y)-koodilla, johon ei normaaleilla vastaanottimilla päästä käsiksi.

L2-taajuus 1227,60 MHz on moduloitu P(Y)-koodilla, jonka ansiosta P(Y)-signaalia vastaanottamaan kykenevillä vastaanottimilla on aina kaksi taajuutta käytössään. Uusimmat satelliitit Block IIR-M:stä eteenpäin lähettävät L2-taajuudella lisäksi myös C/A-moduloitua niin sanottua L2C-signaalia, joka voidaan vastaanottaa monitaajuuksisella siviilivastaanottimella. (Poutanen 1998, 118–119; Van Sickle 2001, 9, 15; Jeffery 2010, 30.)

L5-taajuus 1176,45 MHz on tällä hetkellä koekäytössä yhdessä satelliitissa. Sen on tarkoitus tulevaisuudessa päätyä Safety of Life- eli turvallisuuskriittiseen käyttöön esimerkiksi siviili-ilmailun avuksi ja tarjota häiriöille vastustuskykyisen signaalin. (Jeffery 2010, 30–32.)

Edellä mainittujen taajuuskaistojen lisäksi satelliittijärjestelmä käyttää kahta taajuutta, joilla ei ole mitään tekemistä itse paikannuksen kanssa; L3-taajuus 1381,05 MHz ydinräjähdysten havaitsemiseen ja L4-taajuus 1379,913 MHz, joka liittyy ionosfäärivirheiden tutkimiseen. (GPS Frequencies 2009.)

Taulukko 2 GPS:n taajuuskaistat

Nimi	Taajuus	Käyttötarkoitus
L1	1575,42 MHz	C/A- sekä P(Y)-signaalit
L2	1227,60 MHz	Pääasiassa P(Y)-, uudemmissa satelliiteissa myös C/A-signaali
L5	1176,45 MHz	Tulevaisuudessa Safety of Life - operaatiot
L3	1381,05 MHz	Ydinräjähdysten havaitseminen
L4	1379,913 MHz	Ionosfääritestit

2.4.3 Tekninen toteutus

Satelliittien paikannussignaalit ovat luonteeltaan pseudosatunnaisia binäärijonoja, joista käytetään termiä PRN, Pseudo-Random Noise.

C/A-koodi on 1023-bittinen yhden millisekunnin välein toistuva PRN-bittikuvio. Jokaisella satelliitilla on oma uniikki PRN-koodinsa, joka korreloi huonosti minkä tahansa muun PRN-koodin kanssa. Tästä syystä vastaanotin kykenee tunnistamaan ja yksilöimään satelliitin sen signaalin perusteella. C/A-signaalin lähetystaajuus on 1,023 megabittiä sekunnissa.

P(Y)-koodi on huomattavasti C/A-koodia monimutkaisempi PRN-binäärijono; sen pituus on $6,1871 \cdot 10^{12}$ bittiä ja se toistuu noin viikon välein. Jokaisen satelliitin P(Y)-koodi on osa niin sanottua Master-P-koodia, joka on pituudeltaan noin $2,35 \cdot 10^{14}$ bittiä. Jokaiselle satelliitille on siis määritelty toistettavakseen oma segmenttinsä Master-P-koodista. Koska P(Y)-koodi on tarkoitettu viranomaiskäyttöön, on se moduloitu niin sanotulla W-koodilla, joka on tarkoitusta varten luotu salaussekvenssi; kun salaamaton P-koodi kryptataan W-koodilla, saadaan salattu Y-koodi. On kuitenkin huomioitava että usein P(Y)-koodista puhutaan pelkkänä P-koodina, vaikka nimenomaan tarkoitetaan salattua signaalia. P(Y)-signaalin lähetystaajuus on kymmenen kertaa C/A-signaalia suurempi, 10,23 megabittiä sekunnissa. Koska signaali on niin monimutkainen, on siihen lukkiutuminen lähes mahdotonta ilman avustusta, ja tästä syystä signaalia ei ole tarkoitettu käyttäjä yksistään. Vastaanottimen on ensin tarkoitettu lukkiutua C/A-signaaliin, ja vasta tämän avustuksella P(Y)-signaaliin. (Poutanen 1998, 119–121, 152–153.)

Varsinainen satelliittien lähettämä navigaatiodata on moduloitu C/A- ja P(Y)-signaalien päälle. Nämä tiedot muodostavat niin sanotun navigointiviestin, joka pitää sisällään satelliittipaikannusjärjestelmän päivämäärän ja tarkan kellonajan, satelliitin kunnan ja statuksen, satelliitin efemeriditiedot ja paikannusjärjestelmän almanakan. Jos satelliitilla on ongelmia tai sen lentorataa korjataan, se näkyy suoraan satelliitin statuksessa jolloin paikannusjärjestelmät eivät käytä kyseistä signaalia. Koska paikannusjärjestelmän täytyy kyetä laskemaan satelliitin täsmällinen sijainti signaalin lähettyshetkellä, ovat efemeriditiedot erittäin tarkat. (Jeffery 2010, 18–19.)

Tekniseltä toteutukseltaan navigaatioviesti on 1500 bittiä pitkä 300 bitin alikehysiin jaettu viesti, jonka lähetystaajuus on 50 bittiä sekunnissa. Viestin sisältö on jaettu alikehysiin siten, että jokainen alikehys pitää sisällään GPS-järjestelmän tarkan ajan. Alikehys 1 pitää sisällään GPS-viikon, satelliitin ajan suhteessa järjestelmän aikaan ja satelliitin kunto- ja statustiedot. Alikehykset 2 ja 3 sisältävät yhdessä satelliitin kokonaiset efemeriditiedot ja alikehykset 4 ja 5 yhteensä 4 % konstellaation almanakkatiedoista. Almanakkatietojen kokonaispituus on 15000 bittiä, ja vastaanottimen täytyy käsitellä 25 kokonaista viestikehystä almanakkatietojen täydelliseen kokoamiseen.

Jokainen alikehys on vastaavasti jaettu kymmeneen sanaan, jossa sanojen 3–10 sisältö riippuu alikehyksestä (Taulukko 3). Kaksi ensimmäistä sanaa sen sijaan ovat aina samat; alikehys alkaa aina telemetriasanalla TLM, jonka avulla vastaanotin osaa aloittaa alikehysten vastaanottamisen, ja joka myös toimii vastaanottotapahtuman kellotuksen aloittajana. Toinen sana on aina handover-sana HOW, jonka tehtävänä on määrittellä mihin alikehykseen sana kuuluu, ja viestittää millä GPS-järjestelmän ajan hetkellä

seuraavan alikehyksen ensimmäinen bitti saapuu. (Hoffman-Wellenhof ym. 2001, 76–77; Van Sickle 2001, 4–6.)

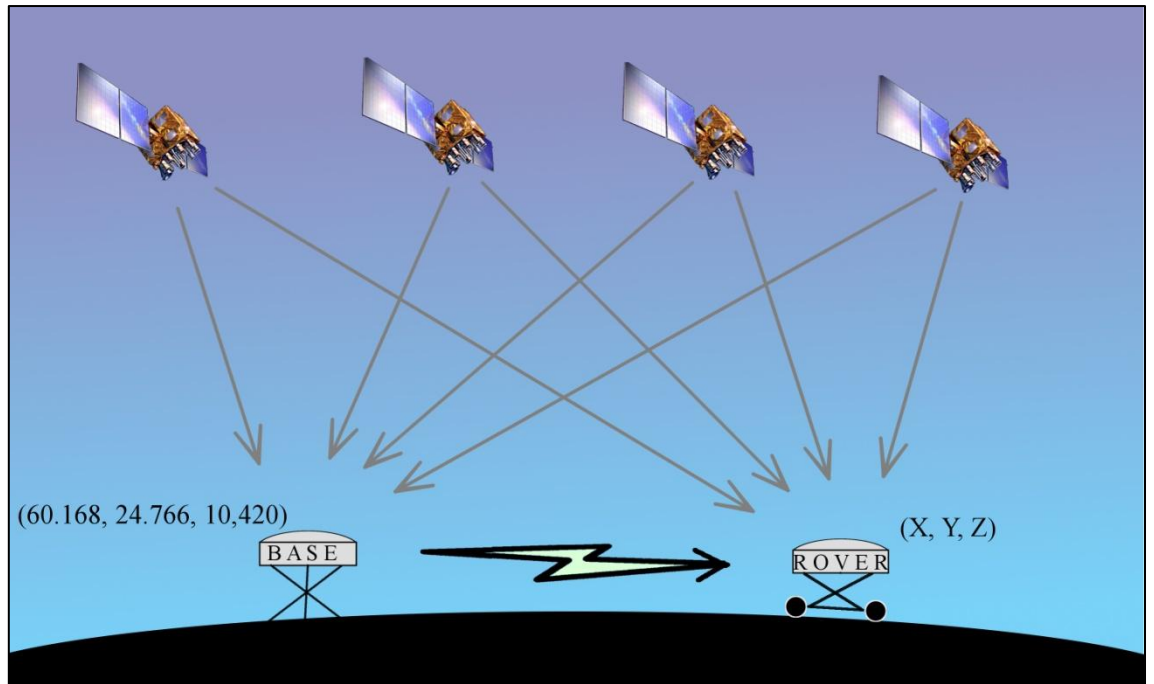
Taulukko 3 Navigaatioviestin sisältö

Kehys	Alikehys	Sana	Sisältö
Navigaatioviesti 1500 bittiä	1	1-2	TLM ja HOW
		3-10	Satelliitin kello ja GPS-aika
	2-3	1-2	TLM ja HOW
		3-10	Efemeriditiedot
	4-5	1-2	TLM ja HOW
		3-10	Yhteensä 4 % almanakka-tiedoista

2.5 Satelliittinavigoinnin edistyneet konseptit

2.5.1 Differentiaalinen satelliittipaikannus

Differentiaalinen satelliittipaikannus eli differentiaalinen GNSS tai DGNS perustuu normaalin satelliittipaikannuksen periaatteille ja toimii muuten samalla tavalla, mutta lisäksi käytössä on tukiasema – Base Station – jonka sijainti tunnetaan tarkasti. Tukiasema samanaikaisesti sekä mittaa satelliittipaikannusjärjestelmän ilmoittamaa pseudoetäisyyttä satelliitteihin että laskee tunnetun paikkansa avulla sen todellista etäisyyttä niihin. Vertaamalla näitä kahta tulosta toisiinsa voidaan pseudoetäisyysvirheiden suuruus laskea tarkasti ja sen pohjalta laatia korjauksia varsinaiseen satelliittipaikannussignaaliin (Kuva 15). Nämä korjaustiedot tukiasema lähettää lähialueilla sijaitseville liikkuville vastaanottimille – Rover Station – tyypillisesti radiomodeemin kautta, ja niiden avulla liikkuvien vastaanotinten suhteellinen paikannustarkkuus tukiasemaan nähden paranee tyypillisesti suuruusluokkaan 1–10 metriä. Paikannuksen yleinen tarkkuus on suoraan verrannollinen tukiaseman tunnetun sijainnin tarkkuuteen. (Strang & Borre 1997, 452–453; Collins 2010, 40–41.)

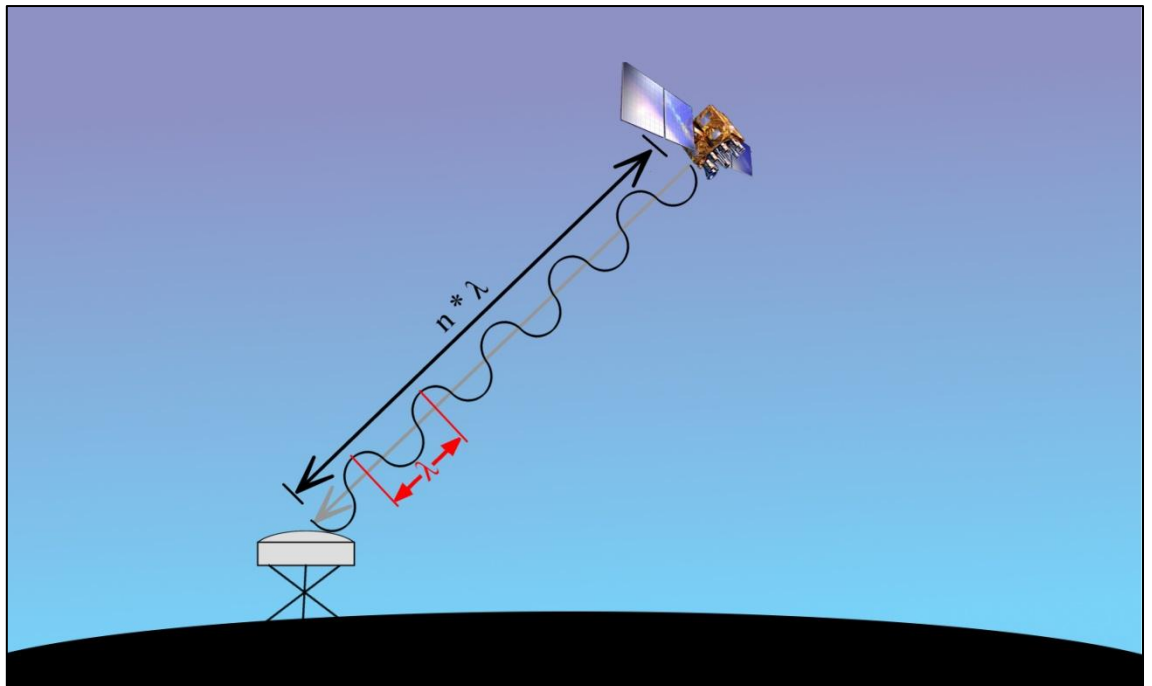


Kuva 15 Differentiaalisen satelliittipaikannuksen toimintaperiaate

Differentiaalinen satelliittipaikannus poistaa tehokkaasti sellaisia pseudoetäisyysmittavirheitä, joiden taustalla olevat syyt eivät johdu itse vastaanotinlaitteesta vaan olosuhteista ja muista vastaavista tekijöistä. Mitä lähempänä liikkuva vastaanotin on tukiasemaa, sitä tarkemmin eri virheitä voidaan korjata. Maksimietäisyys tukiaseman ja vastaanottimen välillä on noin 400 kilometriä. Koska tyypilliset differentiaalisen paikannuksen korjaamat virheet ovat satelliitti- ja signaaliikohtaisia – esimerkiksi efemeridivirheet ja ilmankehän aiheuttamat vääristymät signaaliin – huonontaa virheenkorjauskykyä huomattavasti mahdollinen, joskin harvinainen, tilanne jossa vastaanotin ja tukiasema eivät kykene näkemään samoja satelliitteja. (RTCM Special Committee no. 104 2001, 1.7–1.8.)

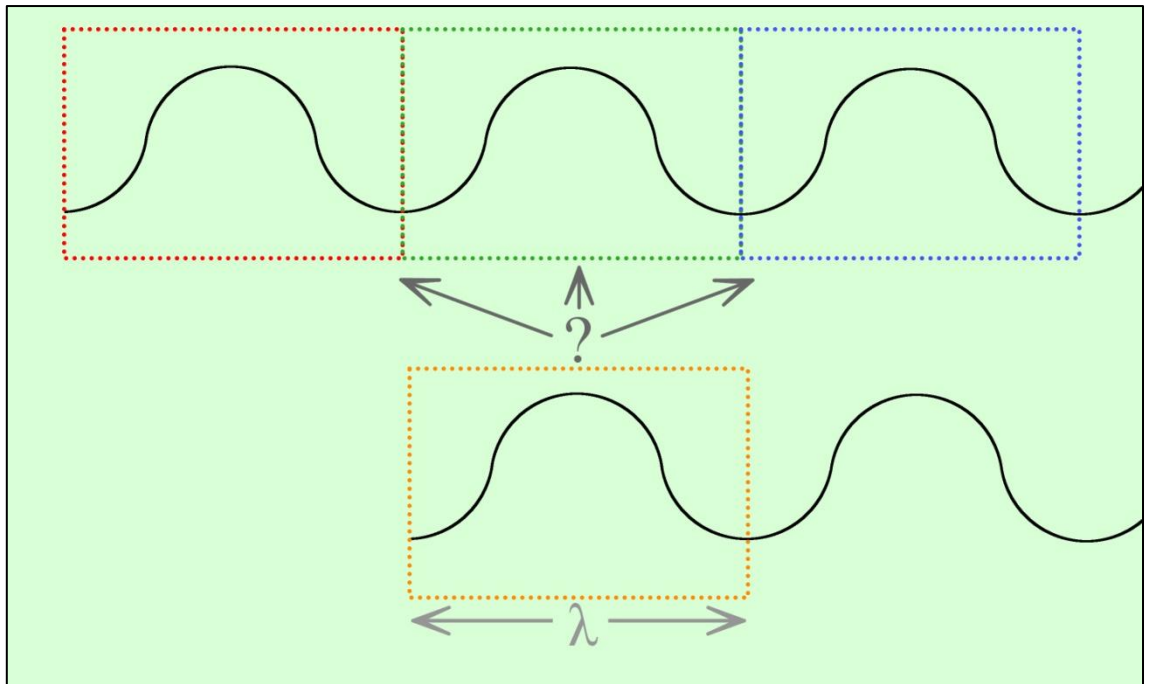
2.5.2 Reaaliaikainen kinemaattinen paikannus

Reaaliaikainen kinemaattinen paikannus eli RTK muuttaa hieman satelliittipaikannuksen peruskonseptia. Siinä missä perinteinen satelliittipaikannus perustuu satelliitin lähettämän PRN-signaalin vastaanottamiseen ja vertaamiseen vastaanottimen sisäisen vastaavan PRN-kopion kanssa, käytetään reaaliaikaisessa kinemaattisessa paikannuksessa itse koodin sijasta sen kantaaltoa (Kuva 16). Vastaanotin määrittää kantaallon vaihe-eron ja sen, kuinka monta kokonaista aallonpituutta λ kantaallosignaali on käynyt läpi matkallaan satelliitista maahan, ja näistä tiedoista laskee etäisyytensä satelliittiin. C/A-koodin lähetystaajuus on 1,023 MHz, mutta sen kantaallon yli tuhat kertaa suurempi, 1575,42 MHz L1 tai 1227,60 MHz L2. Kun vastaanotin tyypillisesti kykenee asettamaan signaalit korrelaatioon noin 1 % tarkkuudella bitinleveydestä tai kantaaltoa mitattaessa aallonpituudesta, pystyy reaaliaikainen kinemaattinen paikannus teoriassa toimimaan millimetrien tarkkuudella. (Collins 2010, 44–45.)



Kuva 16 Reaaliaikaisen kinemaattisen paikannuksen toimintaperiaate

Käytännössä reaaliaikaiseen kinemaattiseen paikannukseen liittyy kuitenkin ongelmia. PRN-signaali on tarkoituksella koodattu sellaiseksi, että vastaanottimen on helppoa vertailla satelliitin signaalia sisäisesti generoituun vastaavaan ja näin ollen laskea signaalin kulku-aika. Kantoaaltosignaali sen sijaan on käytännössä sinimuotoista ja jokainen aallonpituus identtinen toisensa kanssa, joten vastaanottimen on mahdotonta pelkästään tätä signaalia tarkkailemalla tietää, onko signaalit asetettu korrelaatioon oikein vai onko siinä yhden tai useamman kokonaisen aallonpituuden suuruisen virhe (Kuva 17). Tämä ongelma ratkaistaan monimutkaisilla tilastollisilla menetelmillä vertailemalla RTK-mittauksia perinteiseen C/A- tai P(Y)-koodin mittauksiin, mutta tämäkään ei riitä virheen poistamiseen kokonaan. Korrelaatiovirhe aiheuttaa aallonpituuden tai sen monikerran suuruisen virheen myös paikannustarkkuuteen; L1-signaalia käytettäessä aallonpituus on noin 19 cm. Reaaliaikaiseen kinemaattiseen paikannukseen liittyvää hankalasti selvittävää kokonaisten aallonpituuksien määrää kutsutaan kokonaislukutuntemattomaksi, Integer Ambiguity, jonka ratkaisu ensin approksimoidaan kokonaislukurajoitteettomalla ratkaisulla, Float Ambiguity Resolution. (Van Sickle 2001, 26–29, 228–231; Poutanen 1998, 125–126.)



Kuva 17 Kantoaaltojen vertailun ongelma

Käytännön mittauksissa RTK-mittauksia käytetään useimmiten differentiaalisen satelliittipaikannuksen kanssa, jolloin tukiasema lähettää havainnoimansa erot kantoaaltosignaalinmittausten tuottamassa paikassa sen omaan tiedettyyn paikkaan verrattuna eteenpäin joko korjausten tai raakadatan muodossa liikkuville vastaanottimille, jolloin käytännössäkin päästään rajoitetulla etäisyydellä tukiasemasta liikkuvan vastaanottimen millimetriluokan tarkkuuteen tukiaseman suhteen. Absoluuttinen mittaustarkkuus riippuu tukiaseman tunnetun sijainnin tarkkuudesta. (Collins 2010, 45; Van Sickle 2001, 232–234.)

2.6 Virhelähteet

Koska satelliittipaikannuksen perusedellytyksenä on ajan- ja paikanmittauksen suuri tarkkuus, on satelliittipaikannus osin nykyteknologian rajoitusten ja osin fysiikan lakien takia altis virheille. Tässä luvussa käsitellään yleiset virhelähteet, niiden vaikutukset mittaustarkkuuteen ja mahdolliset keinot virheiden havaitsemiseen, kumoamiseen tai ennaltaehkäisyyn.

2.6.1 Ionosfääristä johtuvat virheet

Ionosfääri on yläilmakehän osa, joka ulottuu noin 50 kilometristä aina yli tuhanteen kilometriin asti. Nimensä mukaisesti ionosfääri on auringon säteilyn vaikutuksesta voimakkaan ionisoitunut. Ionosfääri viivästä satelliittipaikannussignaalia, joka puolestaan aiheuttaa paikannustarkkuuteen virhettä. Koska ionisoituminen johtuu auringon säteilystä, on sen määrä ja sitä kautta satelliittipaikannuksen tarkkuuteen aiheuttama virhe riippuvainen vuorokauden ajasta, päivisin virhe on korjaamattomana noin 20–30 metrin luokkaa ja öisin vain noin 3–6 metriä. (RTCM Special Committee no. 104 2001, 1.7.)

Signaalin viivästyminen ionosfäärissä on taajuusriippuvaista, joten kaksi-taajuuksista vastaanotinta käytettäessä ionosfäärin aiheuttama virhe voidaan melko tehokkaasti poistaa vertaamalla L1 ja L2-taajuuden signaaleja toisiinsa. Lisäksi differentiaalista satelliittipaikannusta käytettäessä ionosfäärivirhe korjaantuu suurilta osilta automaattisesti, koska signaalit referenssiasemalle ja liikkuviin vastaanottimiin kulkevat erittäin lähellä toisiaan. Vastaanottimet osaavat myös poistaa virhettä ionosfäärin virhevaikutusta mallintamalla. Yksitaajuuksisia vastaanottimia käytettäessä ei-differentiaalisessa järjestelmässä ionosfäärin aiheuttama virhe on suurin yksittäinen virhelähde pseudoetäisyyden mittaustarkkuudessa. (Hoffman-Wellenhof ym. 2001. 199–106.)

2.6.2 Troposfääristä johtuvat virheet

Troposfääri on ilmakehän alin kerros, joka ulottuu maan pinnalta keskimäärin 17 kilometriin, päiväntasaajan seudulla korkeus on noin 20 kilometriä ja navoilla vain noin 7 kilometriä. Kuten ionosfääri, myös troposfääri viivästyttää satelliittipaikannussignaalia, ja tämä aiheuttaa jälleen virhettä paikannustarkkuuteen, jonka suuruus on pahimmillaan noin 30 metriä jos satelliittien kulmakorkeus on matala. Troposfäärissä virhe johtuu lähinnä signaalin taitumisesta signaalin kulkiessa epätasaisesti ilmaan ja kaantuneiden aineiden, esimerkiksi vesihöyryn, läpi. Toisin kuin ionosfäärin aiheuttamissa virheissä, troposfäärivirheet eivät ole taajuudesta riippuvaisia vaan sen sijaan ovat aina melko yhteneviä ja ennustettavia ja tästä syystä melko helposti mallinnettavia ja eliminaitavia. Myös troposfäärin aiheuttamat virheet kumoutuvat differentiaalista GNSS:ää käytettäessä tehokkaasti signaalien kulkiessa referenssiasemalle ja liikkuville vastaanottimille lähellä toisiaan. (RTCM Special Committee no. 104 2001, 1.7; Hoffman-Wellenhof ym. 2001, 106–108.)

2.6.3 Efemeridivirheet

Efemeridivirhe tarkoittaa tilannetta, jossa satelliitin todellinen sijainti poikkeaa kiertoratatietojen ennustamasta sijainnista. Koska koko satelliittipaikannusjärjestelmä perustuu tarkkoihin ja luotettaviin efemeriditietoihin ja sitä kautta erittäin tarkasti määritettävissä olevaan satelliitin sijaintiin, on efemeridivirheiden vähentäminen ollut koko järjestelmän historian ajan korkean prioriteetin tehtävä. Tyypillisesti efemeridivirheet aiheuttavat noin kolmen metrin virhettä paikannustarkkuuteen, mutta differentiaalisen GNSS:n käyttö vähentää efemeridivirheen vaikutukset lähes olemattomiin. (RTCM Special Committee no. 104 2001, 1.7.)

2.6.4 Kello- ja pyörästysvirheet

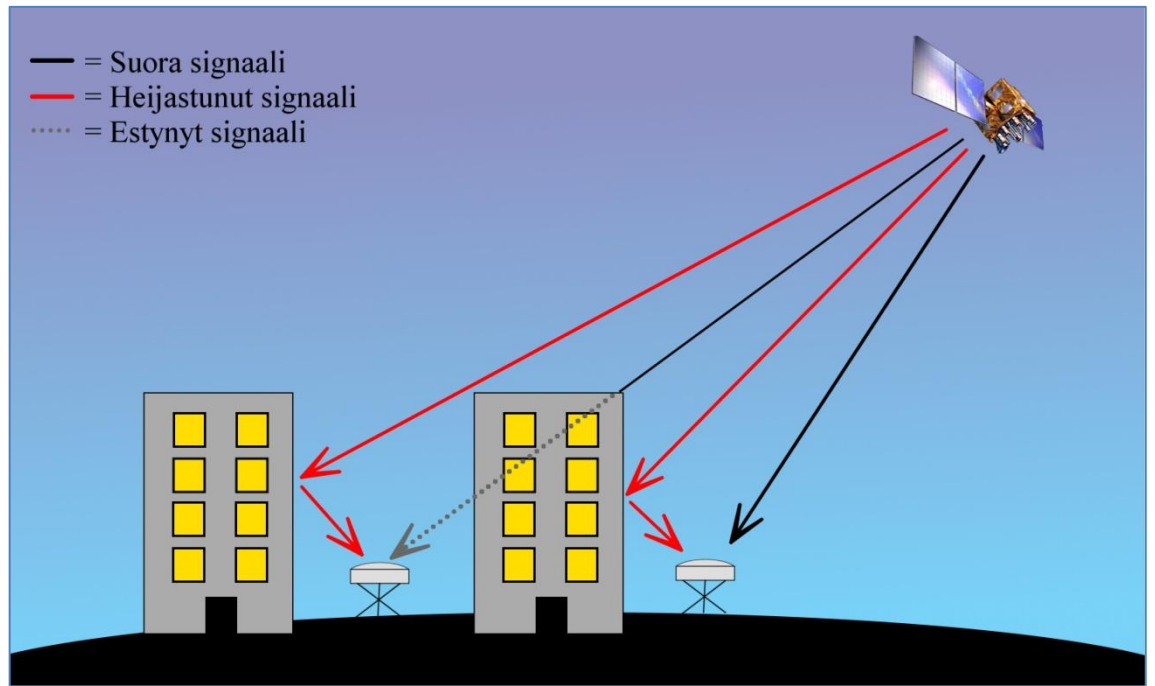
Kellovirheitä syntyy sekä vastaanottimessa että satelliitissa. Satelliitin kellovirheellä tarkoitetaan tapahtumaa, jossa satelliitin kellonaika poikkeaa satelliittijärjestelmän määrittämästä kellonajasta. Satelliittisignaaleja kellottavat oskillaattorit ovat vapaakäyntisiä ja niitä monitoroidaan maasta käsin, joten kellovirheen olemassaolo tiedostetaan ja sen suuruus pyritään pitämään mahdollisimman minimaalisena. Vastaanottimen kellovirhe liitt-

tyy kappaleessa 2.2 selitettyihin vastaanotintekniikan rajoituksiin. Vaikka vastaanottimen kelloa ja sitä kautta pseudoetäisyyksiä korjataan neljän satelliittisignaalin avulla, ei virhettä pystytä silti eliminoimaan täysin. Pyöristysvirheet liittyvät mittausten ja laskennan rajalliseen tarkkuuteen eri laitteissa, mikä väistämättä johtaa minimaaliseen mutta havaittavaan tarkkuuden menetykseen.

Yhteensä nämä virhelähteet tuottavat noin muutaman metrin virhettä paikannustarkkuuteen. Differentiaalisen GNSS:n käyttö vähentää virhelähteiden vaikutusta huomattavasti lyhyillä välimatkoilla tukiasemasta parhaimmillaan poistaen virheet. (RTCM Special Committee no. 104 2001, 1.8; Poutanen 1998, 143.)

2.6.5 Moniheijastuminen

Moniheijastumiseksi kutsutaan tilannetta, jossa satelliittisignaali ei matkaakaan vastaanottimeen suoraan vaan heijastuu siihen jostain, tyypillisesti esimerkiksi talon seinästä tai vuoresta (Kuva 18). Koska pseudoetäisyyden mittaaminen perustuu suoraan signaalin kulkuajan mittaamiseen satelliitilta vastaanottimelle, aiheuttaa lyhyenkin kiertotien kulkenut signaali huomattavaa virhettä pseudoetäisyyteen. Moniheijastumisen aiheuttamaa virhettä voidaan vähentää vastaanottimilla, joiden ohjelmisto osaa havaita tilanteen jossa saman satelliitin signaali havaitaan sekä suoraan että viivästyneenä, jolloin laskennassa ei oteta huomioon viivästyntä signaalia. Tällöin virhettä syntyy ainoastaan tilanteissa, joissa suora tie satelliitilta vastaanottimeen on jostain syystä tukittu, jolloin vastaanotin havaitsee pelkästään viivästyneen signaalin. Tilannetta parantaa myös se, mitä useamman satelliittisignaalin vastaanotin havaitsee, koska tällöin se kykenee todennäköisemmin sulkemaan pois laskuista epäilyttäviä tuloksia antavan signaalin. (Poutanen 1998, 137–139; Hoffman-Wellenhof ym. 2001, 125–126.)



Kuva 18 Moniheijastuminen

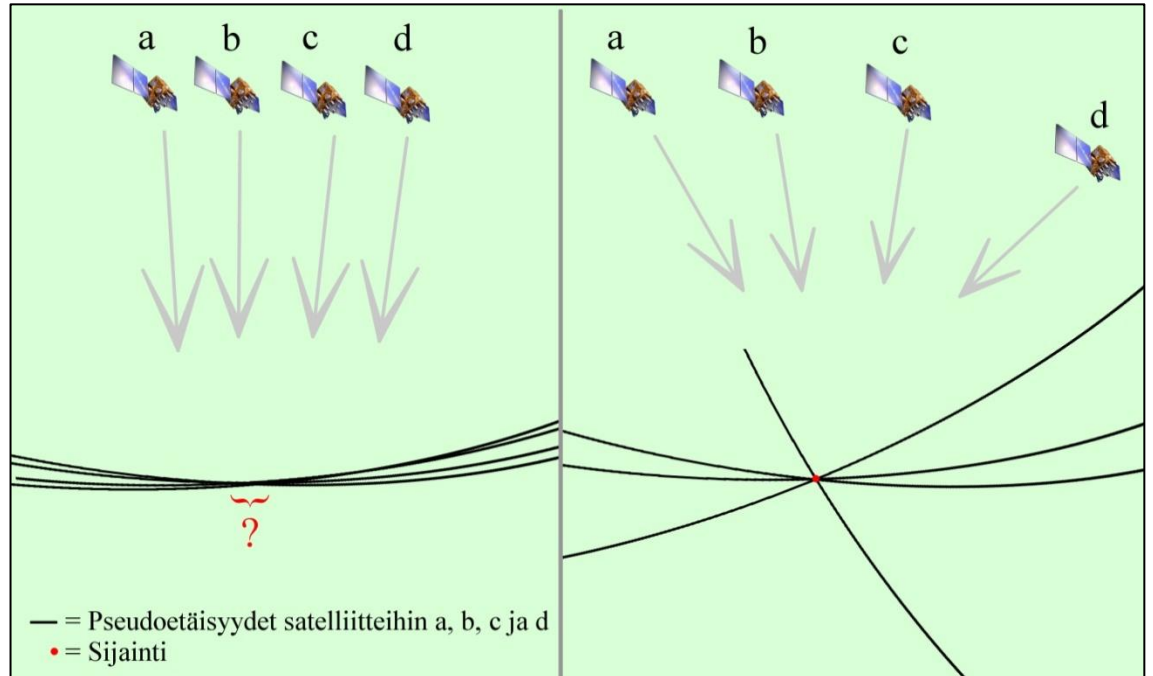
2.6.6 Rajoitettu saatavuus

Rajoitettu saatavuus eli Selective Availability tai SA tarkoitti GPS:n satelliittisignaaleihin lisättyä keinotekoisia, satunnaista suuruista kellovirhettä, jonka tuottamisen syynä olivat USA:n turvallisuushuolet mahdollisen sotatilan varalta. Rajoitetun saatavuuden tuottamat pseudoetäisyysvirheet olivat tyypillisesti noin 30 metrin luokkaa, mutta differentiaalinen GPS vähensi rajoitetun saatavuuden aiheuttaman virheen käytännössä nolliin. Tämä seikka teki SA:sta differentiaalisen GPS:n kehittämisen jälkeen turhan, etenkin kun yhdysvallat kykeni jo silloin tarvittaessa estämään GPS-paikannuksen haluamaltaan alueelta. Näistä syistä rajoitettu saatavuus kytkettiin lopullisesti pois päältä toukokuussa 2000, joten kyseinen virhelähde on poistunut. (Poutanen 1998, 23; RTCM Special Committee no. 104 2001, 1.7.)

2.6.7 Tarkkuuden epävarmuus

Tarkkuuden epävarmuus eli Dilution of Precision tai DOP on termi, joka kuvaa satelliittien geometrian vaikutusta paikannustarkkuuteen; mitä lähempänä vastaanottimen käyttämät satelliitit ovat toisiaan, sitä epävarmempia mittaustulokset ovat ja sitä korkeampi DOP-arvo signaaleilla on. Tämä johtuu siitä, että satelliittien pseudoetäisyyksien leikkauspistettä on sitä vaikeampi määrittää, mitä kauempana pseudoetäisyydet ovat kohdista toisiaan nähden. Pahimmassa tapauksessa pseudoetäisyydet ovat lähes samansuuntaisia keskenään, jolloin DOP on korkein mahdollinen.

DOP-arvon voi jakaa osakomponentteihin sen mukaan, mihin mittauksen alueeseen se vaikuttaa; horisontaalinen DOP eli HDOP, vertikaalinen DOP eli VDOP, ajan DOP eli TDOP, paikannuksen (pituuspiiri, leveyspiiri ja korkeus) DOP eli PDOP ja geometrinen (pituuspiiri, leveyspiiri, korkeus ja kello) DOP eli GDOP. DOP:n syntyä on selvitetty kuvassa 19. (Poutanen 1998, 177–179; Collins 2010, 45–47.)



Kuva 19 Kärjistetty havainnekuva korkean ja matalan DOP-arvon tilanteista

3 HARBOUR ENVIRONMENT PSEUDOLITES -JÄRJESTELMÄ

3.1 Yleiskuvaus

HEP-Järjestelmä perustuu reaaliaikaisen kinemaattisen paikannuksen käyttöön differentiaalisen satelliittipaikannuksen kanssa hyödyntäen paikka- ja nopeusratkaisussa myös pseudoliittisignaaleja. Projektin taustajatatuksena on laajentaa reaaliaikaisen kinemaattisen paikannuksen saatavuutta alueille, joissa suora kokoaikainen yhteys satelliitteihin 100 % varmuudella on syystä tai toisesta mahdotonta. Tällaisia käyttöympäristöjä ovat muun muassa satama-alueet, joissa esimerkiksi nosturit peittävät aika ajoin vastaanottimen. Järjestelmä koostuu kokonaiskuvaajattellen satelliitteja imitoivista pseudoliitteista ja niiden lähetysantenneista, yhdestä tai useammasta tukiasemasta ja yhdestä tai useammasta liikkuvasta vastaanotimesta.

3.2 Projektin hyödyt ja tavoitteet

Satamaympäristöissä laitteisto keskittyy paikannukseen konttien seurannan kannalta. Satamaan saapuvat kontit merkitään visuaalisesti, ja kontteja siirrettäessä niiden sijainti päivitetään keskitettyyn hallintatietokantaan. Kontteja siirtävä laitteisto voidaan jakaa kolmeen osaan: suuret nosturit, kuorma-autot ja niin sanotut hajasäärirukit, joista kaksi viimeistä on HEP-järjestelmän kannalta merkittäviä, koska nykyisellään ei ole olemassa kustannustehokkaita mutta samalla luotettavia tapoja niiden sijainnin määrittämiseen. Kohdealueella on paljon vapaasti liikkuvaa laitteistoa, ja itse kohdealue on tyypillisesti suurikokoinen. Reaaliaikaiseen kinemaattiseen paikannukseen perustuva järjestelmä on tarkkuudeltaan riittävä konttien paikannukseen vaadittavaan noin metrin tarkkuuteen verrattuna, mutta satelliittisignaalien laatu on jatkuva ongelma, sillä signaalien saatavuus vaihtelee liikuttaessa sijainnista toiseen ja signaalit katkeavat usein mastojen, konttien, laivojen ja nostureiden ympäristössä. Lisäksi signaalin katkeamisen jälkeen kohdelaitetta on kuljetettava tyypillisesti 10–30 sekuntia ilman paikannuksen saatavuutta ennen paikkaratkaisun palautumista, ja tämä johtaa suoraan ajan tuhlaukseen sekä virheisiin.

HEP-järjestelmän tavoitteena on ratkaista ongelma lisäämällä kohdealueelle differentiaalisen reaaliaikaisen kinemaattisen paikannuksen käyttöön pseudoliitteja jotka generoivat ja lähettävät GPS L1 -signaalin kaltaista signaalia jota tukiasema ja liikkuva vastaanotin kykenevät vastaanottamaan. Kun liikkuva vastaanotin käyttää paikka- ja nopeusratkaisunsa laskeamiseen sekä omia RTK-satelliitti- ja pseudoliittimittauksiaan että tukiaseman RTK-satelliitti- ja pseudoliittimittauksien dataa, kasvaa liikkuvan vastaanottimen sijainninmäärittämisen saatavuus ja tarkkuus huomattavasti ja se voi lisäksi nopeuttaa merkittävästi järjestelmän paikannusratkaisun palautumista käyttöön tilapäisen signaalien katkeamisen jälkeen.

Satamaympäristöjen lisäksi järjestelmää voi käyttää myös suurissa avo-kaivoksissa, joissa useita kymmeniä suurikokoisia maansiirtokoneita ja jopa satoja pienempikokoisia laitteita liikkuu yötä päivää. Tämän kaltaisissa

ympäristöissä törmäyksenhavaitsemisjärjestelmien käyttö on erittäin tärkeää. Jo olemassa olevat järjestelmät on toteutettu etäisyyksiä mittaamalla pääasiassa joko RFID-tekniikalla, tutkaa käyttämällä tai kameran avulla. GPS-tekniologiaa voidaan hyödyntää käyttämällä jo valmiiksi eri laitteissa asennettuna olevia GPS-vastaanottimia ja implementoida törmäyksenhavaitsemisjärjestelmä, joka jatkuvasti laskee laitteiden sijaintia, suuntaa ja nopeutta ja näiden tietojen perusteella varoittaa mahdollisesta törmäyskurssista. Syvällä kaivoksessa normaalin GPS-järjestelmän tarjoama saatavuus ei ole riittävä, mutta pseudoliitteja käyttävän HEP-järjestelmän avulla saatavuus kasvaa vaaditulle tasolle vaikka laitteiston hinta säilyy erittäin kilpailukykyisenä muilla teknologioilla toteutettuihin järjestelmiin verrattuna. (Laitinen & Granström 2010.)

3.3 Vaatimusmäärittelyt

3.3.1 Yleiset vaatimukset

Järjestelmän korkean tason arkkitehtuurin tulee pitää sisällään yksi tai useampi pseudoliitti, yksi tai useampi tukiasema ja yksi tai useampi liikkuva vastaanotin. Järjestelmän tulee perustua mahdollisimman suurilta osin valmiisiin kaupallisiin komponentteihin, ja komponenttien välinen kommunikointi tulee toteuttaa radiomodeemeja käyttäen, kaapelilla toteutettua yhteyttä voidaan tarjota vaihtoehtoisena kommunikointikeinona. Järjestelmän koon tulee olla ylöspäin skaalattavissa ilman keinotekoisia rajoituksia pseudoliittien tai liikkuvien vastaanotinten lukumäärässä, ja tulee olla mahdollista käyttää useita kymmeniä pseudoliitteja usean tukiaseman kanssa. (Laitinen 2010.)

3.3.2 Operationaaliset, toiminnalliset ja suorituskykyvaatimukset

Järjestelmän tulee kyetä kattamaan 5 x 5 kilometrin kokoinen alue ja kyetä toimimaan initialisoinnin ja konfiguroinnin jälkeen itsenäisesti keskeytyksettä 24 tuntia vuorokaudessa. Pseudoliittisignaalien tulee olla konfiguroitu niin, että ne eivät häiritse järjestelmän kohdealueen läheisyydessä tai sen sisäpuolella olevia järjestelmään kuulumattomia GPS-vastaanottimia. Pseudoliittisignaalia tulee voida jatkuvasti monitoroida niin, että mahdollisen signaalin vikatilanteen sattuessa järjestelmän operaattori voi ryhtyä heti tarvittaviin toimenpiteisiin. Mittausdatan lähetystaajuuden tulee olla vähintään 1 Hz. 3D-navigointitarkkuus nosturin läheisyydessä tulee olla vähintään R99 2 m, mikä tarkoittaa todellisessa sijainnissa sijaitsevan pallon sädettä, joka pitää sisällään paikkaratkaisun 99 %:n todennäköisyydellä. Paikkaratkaisun tulee tyypillisesti löytyä 10 metrin matkalla, kun vastaanotin liikkuu nosturin alta tilanteessa, jossa paikkaratkaisu on menetetty. (Laitinen 2010.)

3.3.3 Tekniset vaatimukset

Pseudoliittien tulee lähettää signaalia, jota voidaan käyttää standardeilla GPS-vastaanottimilla minimaalisin ohjelmistomuutoksia. Pseudoliittien

tulee tukea pulssitettua signaalia, joka mahdollistaa vastaanottimen toiminnan sekä lähellä ja kaukana lähettimestä. Pseudoliittien tulee tukea C/A-PRN -numeroita satelliiteille varattujen 1–32 ulkopuolelta siten, että PRN-numerot 33–37 ja 64–119 on tuettu. Korkean lähetystehon pseudoliittiversion kantaman tulee olla vähintään 5 kilometriä, ja standardiversi- on vähintään 500 metriä.

Eri säteilykuvioisia lähetinantenneja tulee olemaan saatavilla optimaalisen signaalin peiton aikaansaamiseksi erilaisissa järjestelmän kohdeympäris- töissä. Ympärisäteilevän antennin käyttö tulee mahdollistamaan asennuk- sen kohdealueen keskelle.

Satelliittivastaanottimen tulee kyetä lähettämään sekä pseudoetäisyyden että kantoaallon vaihe-eron raakadataa vähintään taajuudella 1 Hz. Vas- taanottimen tulee kyetä seuraamaan PRN-numeroita 33–37 ja 64–119, ja vastaanottimeen tulee voida määrittää, mitä PRN-koodeja seurataan. Alus- sa järjestelmän tulee tukea kahta eri vastaanotinta, joista toisen tulee olla hinnaltaan ala -tai keskikategoriassa, kustantaen alle 1000 €.

Radiomodeemien tulee toimia lisensoimattomalla taajuudella, jotta järjes- telmä ei tarvitse toimiakseen minkäänlaista radiotoimilupaa, ja tukea vä- hintään 9600 bitin lähetysnopeutta sekunnissa. Modeemin maksimikanta- ma tulee olla 5 kilometriä tai suurempi, vaihtoehtoisesti pienempitehoista modeemia voidaan käyttää tilanteissa, joissa tarvittava peittoalue on pie- nempi. Modeemien tulee myös kestää häiriöitä jota muu liikenne samalla taajuusalueella synnyttää. Modeemien tulee tukea broadcast-tyyppistä kommunikaatiota tukiasemalta liikkuville vastaanottimille ja many to one -tyyppistä kommunikaatiota liikkuvilta vastaanottimilta mahdolliselle mo- nitorointiasemalle.

Navigaatio-ohjelmisto tulee suunnitella tukemaan helppoa portattavuutta ja erilaisia vastaanottimia niin liikkuvan vastaanottimen kuin tukiaseman- kin puolella. Ohjelmiston tulee laskea sijainti, nopeus, aika ja RTK:n ko- konaislukurajoitteeton ratkaisu käyttäen sekä satelliitti- että pseudoliittiha- vaintoja sekä tukiasemasta että liikkuvasta vastaanottimesta. (Laitinen 2010.)

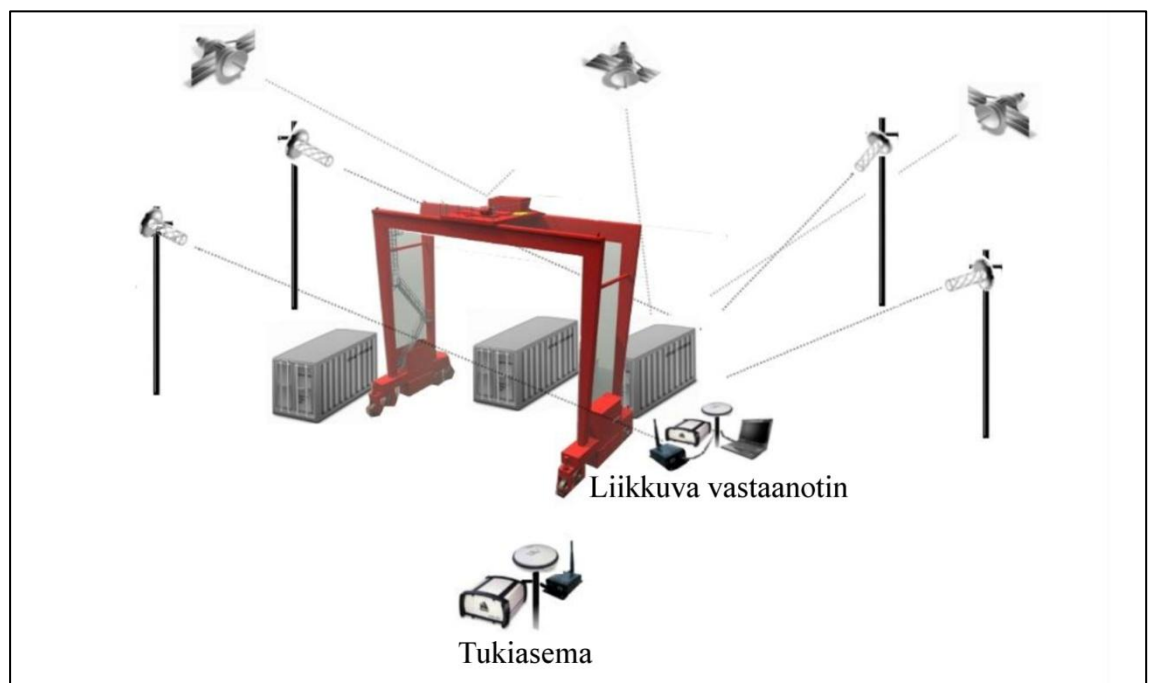
3.3.4 Ympäristövaatimukset ja käyttöönotto

Kaikkien järjestelmän fyysisten komponenttien tulee kyetä toimimaan ul- koilmassa ja kestää ankaria sääolosuhteita, mukaan lukien hiekka- ja lu- mimyrskyt, rankkasateet ja käyttölämpötilat välillä -40 °C .. 50 °C sekä huomattavat määrät kaupunkisaastetta, esim. happosadetta ja hienoa pölyä.

Järjestelmän käyttöohjeiden tulee mahdollistaa järjestelmän asennus ilman ulkopuolista apua henkilölle, jolla on aiempaa tuntemusta satelliittipaikan- nusjärjestelmistä. Järjestelmän asennuksen suorittaminen verrattain pienel- le alueelle ei tulisi kestää kahdelta ihmiseltä enempää kuin yhden työpäi- vän. Navigaatioviestin muodon tulee olla olemassa olevien GPS- vastaanottimien muotoa vastaava ja tukea NMEA-protokollaa. (Laitinen 2010.)

3.4 Toiminta

Järjestelmään kuuluu useita eri toiminnallisuuksia sisältäviä komponentteja. Järjestelmän toiminta perustuu GPS L1 -signaalin kaltaista signaalia generoiviin ja lähettäviin pseudoliitteihin joita on sijoiteltu kohdealueelle sopiviin sijainteihin, tyypillisesti esimerkiksi valopylväisiin alueen reunoilta (Kuva 20). Pseudoliittien lähetinantennit suunnataan siten, että ne tarjoavat mahdollisimman täydellisen kohdealueen signaalipeiton. Liikkuva vastaanotin vastaanottaa sekä satelliitti- että pseudoliittisignaaleja ja laskee molempia signaalityyppejä käyttäen pseudoetäisyydet ja kantoaaltojen vaihe-erot. Tämän jälkeen tukiasema lähettää mittaustietoa sekä mahdollisen muun tarvittavan informaation radiomodeemin välityksellä liikkuville vastaanottimille, jotka puolestaan hyödyntävät tätä dataa omien sijaintiensä määrittämiseen pseudoetäisyyksistä ja kantoaaltojen vaiheeroista satelliitti- ja pseudoliittisignaaleja käyttäen.

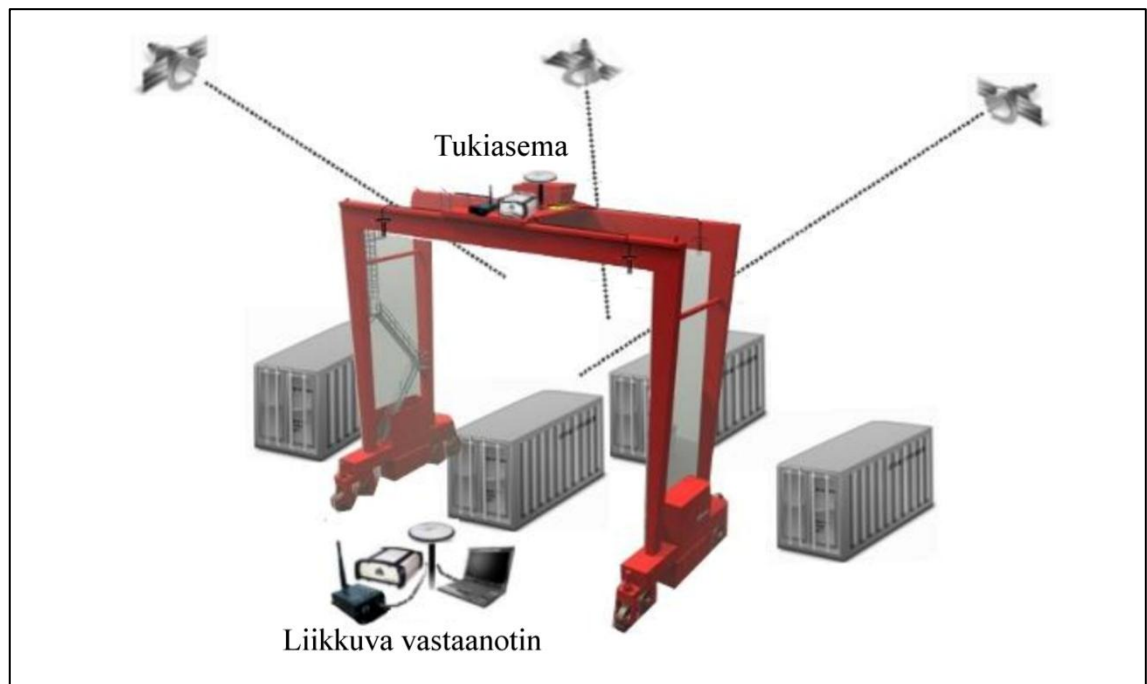


Kuva 20 HEP-järjestelmän tyypillinen kokoonpano ja asennus (Laitinen & Granström 2010)

Laitteiston toiminta edellyttää, että tukiasema sijaitsee paikassa jossa se kykenee näkemään kaikki pseudoliitit. Jos kohdealueena on sijainti, jossa sataprosenttinen näköyhteys pseudoliitteihin ei ole syystä tai toisesta mahdollista tai järkevää toteuttaa, voidaan lisätä toinen tukiasema, jotta kaikkia pseudoliittisignaaleja monitoroidaan.

Vaihtoehtoisesti järjestelmä voidaan rakentaa niin sanotun HotSpot -lähestymistavan mukaan, jolloin sekä tukiasema että pseudoliitit asennetaan suoraan liikkuvan nosturin ylärakenteisiin (Kuva 21). Pseudoliittien kiinnitys nosturin rakenteisiin on erittäin hyödyllistä tilanteissa, jossa liikkuva vastaanotin kulkee nosturin alitse. Koska nosturin liikkua jatkuvasti signaalien seuranta tukiaseman puolella olisi erittäin hankalaa, tulee myös tukiasema sijoittaa itse nosturiin. Lisäksi jokaisen pseudoliitin signaali täytyy jakaa kahtia toisen signaalin kulkiessa alaspäin osoittavalle lähe-

tinantennille ja siitä liikkuville vastaanottimille ja toinen johdon välityksellä tukiasemalle. Koska johdon käyttö vaikuttaa signaalin kulku-aikaan, on se otettava HotSpot -ratkaisua käytettäessä huomioon ohjelmallisesti ennen sijaintiratkaisun laskemista. (Laitinen & Granström 2010.)



Kuva 21 HEP-järjestelmän HotSpot -ratkaisu (Laitinen & Granström 2010)

3.5 Laitteisto

3.5.1 Kokonaiskuvaus

Järjestelmässä käytetty laitteisto pitää sisällään yhden tai useita pseudoliittejä sekä niiden lähetinantennit, yhden tai useamman tukiaseman sekä yhden tai useamman liikkuvan vastaanottimen. Pseudoliittien tehtävänä on lähettää generoimaansa signaalia lähetinantenniensa kautta kohdealueelle. Tukiasemat mittaavat RTK-menetelmällä sijaintiaan satelliitti- ja pseudoliittisignaaleista ja lähettävät mittausdatansa eteenpäin liikkuville vastaanottimille. Liikkuvat vastaanottimet käyttävät paikkaratkaisunsa laskemiseen sekä omia RTK-menetelmän satelliitti- ja pseudoliittimittauksiaan että tukiaseman lähettämää dataa. Seuraavissa kappaleissa tarkastellaan järjestelmän laitteistoon kuuluvia komponentteja yksityiskohtaisemmin. Koska tämän opinnäytetyön aiheena on järjestelmän tukiasemaratkaisu, käsitellään sitä muita laitteiston osia syvällisemmin kappaleessa 4.

3.5.2 Pseudoliitit ja lähetinantennit

Pseudoliitit ovat Space Systems Finlandin kehittämiä GPS L1 -signaaligeneraattoreita (Kuva 22). Pseudoliitit koostuvat sisäisesti kahdesta segmentistä; Digitaaliosasta, joka rakentuu prosessorista ja digitaalipiiristä, ja RF-modulista. RF-moduli generoi GPS L1 -kantaaltoa ja moduloi sitä digitaaliosan generoimalla C/A-koodilla ja navigaatioviestillä. Di-

gitaaliipiiri perustuu Alteran Cyclone FPGA -piiriin, ja järjestelmän firmwarea suoritetaan FPGA-piirille syntetisoidulla 32-bittisellä NIOS-prosessorilla. Ohjelmisto on kirjoitettu C-kielellä ja käännetty Alteran tarjoamalla GNU-työkaluilla. Pseudoliitin ominaisuudet on esitetty taulukossa 4. Jokaiseen järjestelmän käyttämään pseudoliittiin on konfiguroitu yksilöllinen, satelliittien käyttämistä PRN-numeroista 1–32 poikkeava PRN-numero. (Laitinen & Granström 2010.)



Kuva 22 Pseudoliitti (Laitinen & Granström 2010)

Taulukko 4 Pseudoliitin ominaisuudet.

Ominaisuudet		Huomioitavaa
Koko	140 x 140 x 70 mm	Ilman liittimiä
Paino	Alle 1000 g	Ilman virtalähdettä
Kotelo	Alumiinia	Merivettä hylkivä maalaus pyynnöstä
IP-luokitus	IP 6.6	Pyynnöstä IP 6.7
Virransyöttö	6..12 V DC / < 200 mA	-
Käyttölämpötila	-20 °C..+60 °C	Virransyötön ja oskillaattorin rajoittama
RF-lähetysteho	-18 dBm	Säädettävissä 2 dB:n välein 63 dB:n sisäisellä vaimenuksella
Pulssitus	Useita	FPGA:n säätelemä
Taajuuden säätö	+ - 800 MHz typ.	Optimoitu synkronoituja pseudoliitteja varten

Tilanteesta riippuen optimaalisimman signaalipeiton saavuttamiseksi ja moniheijastumisvirheiden vähentämiseksi pseudoliittien lähetyksantenniksi on mahdollista valita tilanteeseen sopivin antenni. Vaihtoehtoja on kaksi; Sarantelin SL1203A (Kuva 23) ja Space Systems Finlandin oma GPS L1 (Kuva 24).



Kuva 23 SL1203A-antenni (Laitinen & Granström 2010)



Kuva 24 SSF GPS L1 -antenni (Laitinen & Granström 2010)

SL1203A on pienikokoinen, kestävässä kotelossa oleva pallokuvioinen antenni, jonka ominaisuudet on esitetty taulukossa 5. GPS L1 on helix-antenni, jonka vahvistuskuviota voi helposti säätää antennin geometriaa muuttamalla, ja täten antennia voidaan muokata sopimaan kulloiseenkin käyttöympäristöönsä. GPS L1:n ominaisuudet on esitetty taulukossa 6. (Laitinen & Granström 2010.)

Taulukko 5 SL1203A-antennin ominaisuudet

Sarantel SL1203A	
Halkaisija	14,1 mm
Pituus	32 mm
Leveys	19 mm
Vahvistus lakipisteessä	-2,8 dB
Paino	13,4 g

Taulukko 6 SSF GPS L1 -antennin ominaisuudet

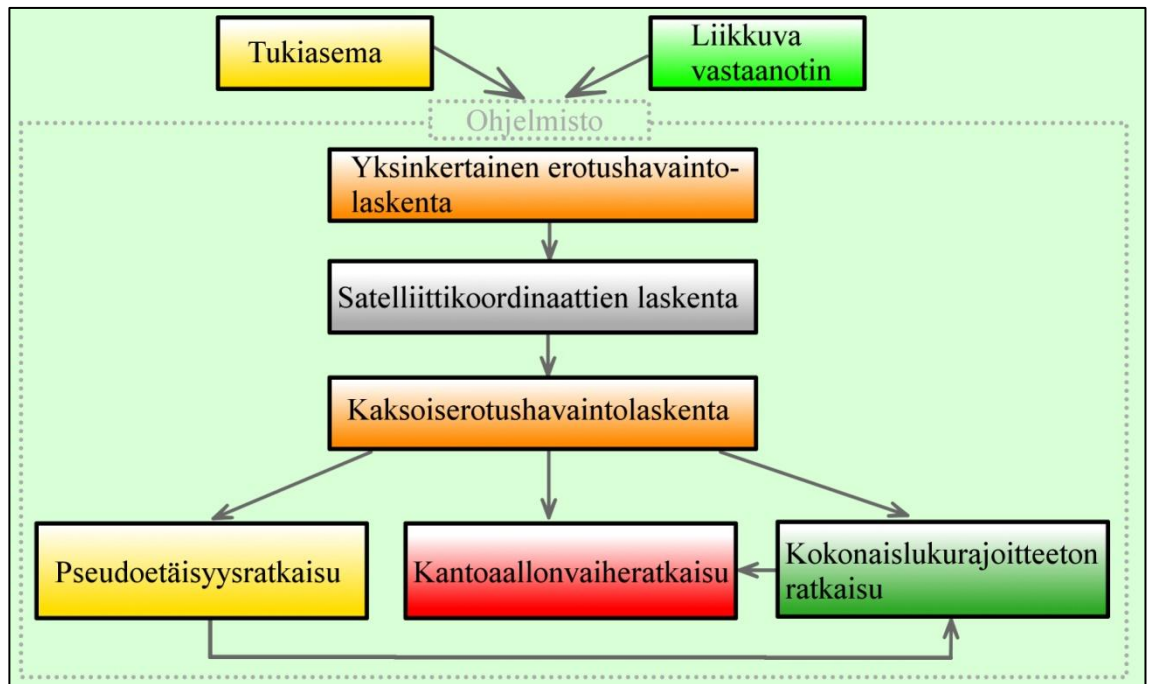
Space Systems Finland GPS L1 v. 1.1	
Puomin pituus	321 mm
Puomin leveys	64 mm
Kierrosten lukumäärä	7 kpl
Kierrosten välinen etäisyys	43 mm

Levyn halkaisija	250 mm
Impedanssi	131,6 Ω
Vahvistus antennin edessä	+11 dB

3.5.3 Liikkuva vastaanotin

Liikkuva vastaanotin on koko järjestelmän ydin; kaikki muut järjestelmän komponentit toimivat auttaakseen, helpottaakseen ja tarkentaakseen sen paikan- ja nopeudenmäärittystä. Se koostuu neljästä komponentista; satelliittivastaanottimesta, GPS-antennista, radiomodeemista ja navigaatio-ohjelmistoa suorittavasta laskentayksiköstä. Satelliittivastaanotin tässä tapauksessa on sekä liikkuvassa vastaanottimessa että tukiasemassa NovAtelin valmistama OEMV3, jonka tarkat tiedot on esitetty kappaleessa 4.2.1. Myös radiomodeemi on molemmissa laitteissa sama Digi Internationalin XStream, jonka tiedot on esitetty kappaleessa 4.2.3.

Liikkuvan vastaanottimen laskentayksikkönä voi tilanteesta riippuen toimia mikä tahansa navigaatio-ohjelmistoa suorittamaan kykenevä laite. Testitapauksissa laskentayksikkönä toimii kannettava tietokone, jolloin sekä liikkuvan vastaanottimen radiomodeemi että satelliittivastaanotin on liitetty suoraan tietokoneen COM-portteihin. Liikkuva vastaanotin sijaitsee kohdelaitteessa, erimerkiksi kontteja kuljettavassa hajasääritrukissa, jossa navigaatio-ohjelmisto vastaanottaa liikkuvan aseman mittausdataa satelliittivastaanottimelta ja tukiaseman dataa radiomodeeminsa kautta. Näiden tietojen avulla liikkuvan vastaanottimen laskentayksikkö kykenee laskemaan sijaintiratkaisunsa tarkasti sellaisissakin tilanteissa, jossa näköyhteys satelliitteihin on estynyt. Laskentayksikön ohjelmiston korkean tason kuvaus on esitetty kuvassa 25. Ohjelmointikielenä liikkuvan vastaanottimen navigaatio-ohjelmiston toteutuksessa on käytetty C++:aa käyttäen apuna avoimen lähdekoodin GPS Toolkit -kirjastoa.



Kuva 25 Liikkuvan vastaanottimen ohjelmiston korkean tason kuvaus

Joka mittaushetkellä laitteisto laskee vastaanotinten väliset erot pseudoetäisyydessä ja kantoaallonvaiheessa. Koska mittauksissa esiintyy latenssia, on mittausdata ekstrapoloitava vastaamaan liikkuvan vastaanottimen senhetkistä aikaa, jotta datasta kyetään laatimaan aikasykronoitu yksinkertainen erotushavaintolaskelma. Tämän jälkeen laite laskee satelliittien koordinaatit liikkuvan vastaanottimen vastaanottamien efemeriditietojen pohjalta, minkä jälkeen laite valitsee referenssisatelliitin tai pseudoliitin, ja suorittaa pseudoetäisyyden ja kantoaallonvaiheen kaksoiserotushavaintolaskelman, jonka pohjalta laite laskee pseudoetäisyyteen perustuvan sijaintiratkaisun. Tätä sijaintiratkaisua käytetään kantoaallon kokonaislukurajoitteettoman ratkaisun laskennassa, ja jos kantoaallon vaiheeroon perustuvaa ratkaisua ei ole saatavilla, käytetään sitä suoraan navigointiratkaisuna. Kokonaislukurajoitteeton ratkaisu lasketaan kerätyistä yksinkertaisista erotushavainnoista, ja jos ratkaisun tarkkuus on sillä hetkellä käytössä olevaa ratkaisua suurempi, käytetään uutta ratkaisua kantoaallon navigaatoratkaisussa. Lopullinen sijaintiratkaisu lasketaan käyttämällä kantoaallon vaihe-eron kaksoiserotushavaintoja. (Laitinen & Granström 2010.)

Tilanteissa, joissa käytössä on useampi tukiasema, määrittää liikkuva vastaanotin optimaalisimman tukiaseman mittaamalla radiomodeeminsa vastaanottaman signaalin vahvuutta ja vaihtamalla tarvittaessa modeeminsa hyppykanavaa ohjelmallisesti. Ohjelmistoon on tallennettu kaikkien järjestelmään kuuluvien tukiasemien koordinaatit ja niiden käyttämät hyppykanavat, ja ohjelmisto tutkii nykyiseltä tukiasemaltaan vastaanottamansa signaalin voimakkuutta esimerkiksi 300 millisekunnin välein. Jos mittaus-tulos on tarpeeksi monta kertaa peräkkäin alle asetetun raja-arvon, laskee ohjelmisto omista koordinaateistaan lähimpänä olevan tukiaseman ja siirtyy käyttämään sitä. Vaihtoehtoisesti tukiasemien sijaintitiedot voidaan jättää tallentamatta ohjelmistoon, jolloin tukiasemien vastuulla on lähettää

tarvittavat sijaintitiedot liikkuville vastaanottimille dataviestimuodossa. (Jahkola, Laitinen & Granström 2010.)

3.6 Ongelmakohdat

Teknisesti järjestelmän haasteena on tarjota jatkuva ja tarkka paikkaratkaisu silloinkin, kun satelliittisignaalit ovat heikkolaatuisia tai katkeavat kokonaan. Ongelma ratkaistaan riittävällä määrällä pseudoliitteja, ja lisäksi pseudoliittisignaalien laatua ja signaalipeittoa pyritään parantamaan. Toinen järjestelmän toteutuksen haaste liittyy olemassa olevien vastaanottimien olemattomaan pseudoliittitukeen, sillä navigaatioalgoritmien integroiminen laitteisiin on tällöin erittäin hankalaa. Tätä ongelmaa lähestytään neuvottelemalla satelliittivastaanotinten valmistajien, eritoten NovAtelin, kanssa pseudoliittituen lisäämisestä vastaanottimiin. Ongelmia saattaa aiheuttaa myös se, että pseudoliittien käyttämän GPS L1 -taajuuden käyttö saattaa joissain maissa olla rajoitettua tai kokonaan kiellettyä, jolloin järjestelmän käyttöönotto kyseisillä alueilla edellyttää pseudoliitteihin liittyvien säädösten määrittelyä kansainvälisellä tasolla. (Jahkola ym. 2010.)

4 TUKIASEMARATKAISU

4.1 Tukiasemaa koskevat vaatimusmäärittelyt

Järjestelmän vaatimusmäärittelyistä tukiasemaratkaisun toteutukseen vaikuttaa suoraan melko suuri osa. Näitä ovat laitteiston perustuminen mahdollisimman suurilta osin kaupallisesti saatavilla oleviin komponentteihin, autonominen toiminta 24 tuntia vuorokaudessa, mittausdatan lähetys vähintään kerran sekunnissa, eri komponenttien välinen viestintä radiomodeemien lisenssivapaalla taajuudella vähintään nopeudella 9600 bps, vähintään 5 x 5 km toiminta-alue, järjestelmän koon skaalattavuus ilman rajoituksia, pseudoliittien käyttämät PRN-numerot, mittausdatan lähetys sekä pseudoetäisyyteen että kantoaallon vaiheeseen perustuen, matalan tai keskitason hinta sekä sääolosuhteiden kesto.

Suurin osa tukiasemaratkaisua koskevista vaatimusmäärittelyistä toteutuu sopivilla hardware-valinnoilla niiden ollessa asioita, jotka perustuvat joko laitteiston fyysisiin ominaisuuksiin tai firmwaren sisältämiin asetuksiin, joihin käyttäjä ei pääse käsiksi. Konfiguroitavia ominaisuuksia ovat lähinnä laitteiston väliseen kommunikointiin käytettävä bittinopeus, seurattavat PRN-numerot ja mittausdatan lähetysnopeus, mutta näissäkin vaatimuksissa valittu laitteisto määrittää minimi- ja maksimiarvot, joiden on oltava riittävät.

Tukiasemaratkaisua koskevat vaatimusmäärittelyt liittyvät lähes yksinomaan tukiaseman GPS-vastaanottimen, radiomodeemin ja sen antennin toimintaan saatavilla olevien GPS-antennien ollessa melko yleiskäyttöisiä ja täten niiden täyttäessä vaatimukset ilman vaikeuksia. Vaatimusmäärittelyiden vaikutus eri laitteisiin on esitetty taulukossa 7.

Taulukko 7 Vaatimusmäärittelyt komponenteittain. X= pääasiallinen vaikutus, (X)= osittainen vaikutus

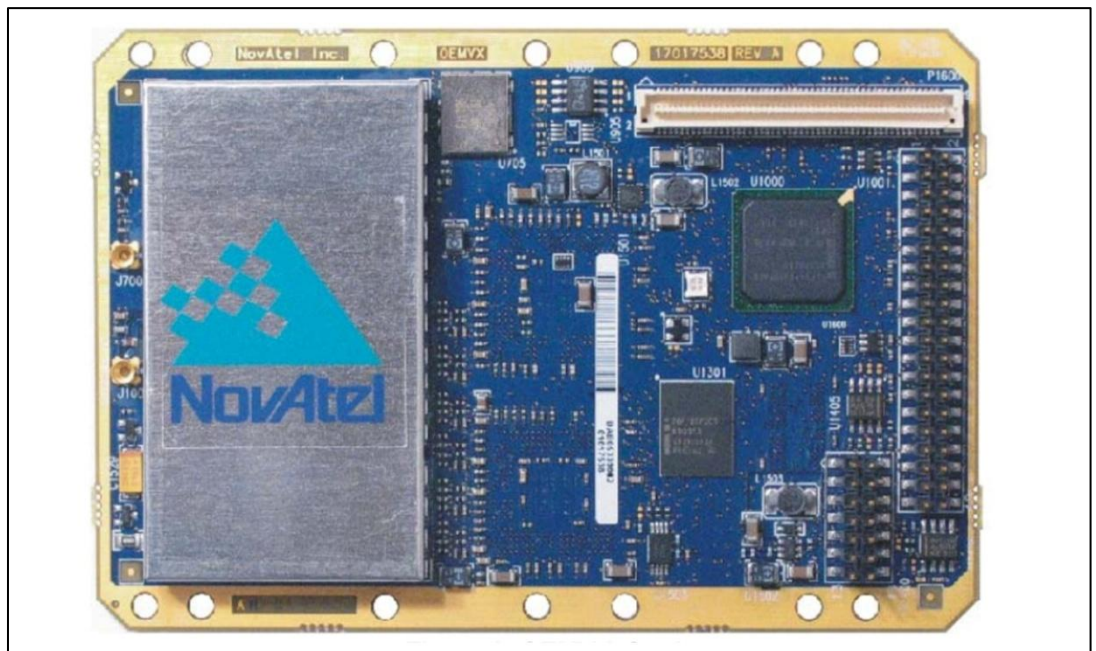
Vaatus	GPS-vastaanotin	RF-modeemi	RF-modeemiantenni
Perustuminen kaupallisesti saataviin komponentteihin	X	(X)	(X)
Autonominen toiminta 24 h	X	X	
Navigaatioviestin lähetystaajuus vähintään 1 Hz	X	(X)	
Viestintä lisenssivapaalla RF-taajuudella vähintään nopeudella 9600 bps		X	
Toiminta-alue vähintään 5x5 km		X	X
Skaalattavuus	X	X	X
Käytettävät PRN-numerot	X		

Mittaus sekä kantoaallon vaihe-erolla että pseudoetäisyysmittauksella	X		
Hinta	X	X	(X)
Sääolosuhteiden kesto	X	X	X

4.2 Komponentit

4.2.1 Satelliittivastaanotin

Sekä tukiasemaratkaisussa että liikkuvassa vastaanotimessa käytetty satelliittivastaanotin on NovAtelin valmistama OEMV3 (Kuva 26) asennettuna kestävään NovAtelin ProPak V3 -kotelointiin (Kuva 27). Metallinen kotelointi takaa toiminnan vaativissakin ympäristöoloissa, ja sisällä oleva satelliittivastaanotin on ominaisuuksiltaan enemmän kuin riittävä HEP-järjestelmän toimintaa ajatellen. Satelliittivastaanottimen ominaisuudet on esitetty taulukossa 8. (OEMV Family Operation and Installation User Manual 2010, 28–31.) OEMV3-satelliittivastaanottimien lisäksi järjestelmässä on mahdollista käyttää myös eräitä muita ominaisuuksiltaan riittäviä NovAtelin vastaanottimia sekä Fastraxin valmistaman ITRAX-tuoteperheen satelliittivastaanottimia niin liikkuvassa vastaanotimessa kuin tukiasemassa, mutta tämä opinnäytetyö keskittyy pääasiassa kuvaamaan järjestelmän toteutusta OEMV3-vastaanotinta käyttäen. Koska satelliittivastaanotinten toiminta vastaa hyvin pitkälti toisiaan, ei käytettävän vastaanottimen vaihtaminen aiheuta muutoksia järjestelmän korkean tason toimintaan, vaan ainoastaan matalan tason konfigurointiratkaisuihin. Lisäksi aiheutuvat muutokset ovat puhtaasti järjestelmän sisäisiä; laitteiston loppukäyttäjän kannalta mahdollinen muutos ei aiheuta toimenpiteitä tai havaittavaa muutosta käytössä olevan järjestelmän toimintaan.



Kuva 26 NovAtel OEMV3-satelliittivastaanotin



Kuva 27 NovAtel ProPak V3 -kotelointi

Taulukko 8 NovAtel ProPak V3:n ominaisuudet

Fyysiset ominaisuudet	
Koko	185 x 160 x 71 mm
Paino	1000 g
Käyttövirta	+9V..+18V DC
Tyypillinen virrankulutus	2,8 W
Antenniliittimen ulosantojännite	5 V
Antenniliittimen maksimivirta	100 mA
Liittimet	
COM1	DB-9, uros
COM2	DB-9, uros
COM3/AUX	DB-9, uros
I/O	DB-9, naaras
Antenni	TNC, naaras
Virta	4-pin LEMO
Suorituskyky	
Kanavakonfiguraatio	14 GPS L1
	14 GPS L2
	6 GPS L5
	12 GLONASS L1
	12 GLONASS L2
	2 SBAS
	1 L-Band + Pseudoliitti
Mittaustaajuus	50 Hz

Aikatarkkuus, RMS	20 ns
Nopeustarkkuus, RMS	0,03 m/s
Ympäristörajoitukset	
Käyttölämpötila	-40 °C..+75 °C
Maksimikosteus (Ei-kondensoituva)	95 %
Vesitiivisyys	IEC 60529 IPX7
Pölytiivisyys	IEC 60529 IP6X
Noudattaa standardeja	FCC, CE

Satelliittivastaanotin kykenee toimimaan usean eri mallin määrittämällä ominaisuuksilla, koska laitteen omistaja kykenee itse päivittämään laitteen ominaisuuksiltaan edistyneempään malliin ostamalla tarvittavan lisenssin ja lataamalla sen laitteeseen COM-portin kautta. HEP-järjestelmässä käytettävän satelliittivastaanottimen malliksi on päivitetty L12LRV ja laiteohjelmistona eli firmwarena laite käyttää versiota 3.800S10. L12LRV-lisenssi on laajin mahdollinen pitäen sisällään muun muassa RTK-paikannustuen, raakadatan lähetyksen ja taulukossa 9 esitetyt tarkkuudet laitteen tukemille mittaustoiminnoille. (Model List for NovAtel Receivers 2010.) Laitteen käyttämä firmware puolestaan on NovAtelin kustomoitu pseudoliittituen sisältävä versio kaupallisesta versiosta 3.800.

Taulukko 9 L12LRV-lisenssin mukanaan tuomat tarkkuudet

Mittaus	Tarkkuus
Single Point L1	1,8 m
Single Point L1/L2	1,5 m
SBAS	0,6 m
DGPS	0,45 m
OmniSTAR VBS	0,7 m
OmniSTAR XP	0,15 m
OmniSTAR HP	0,1 m
CDGPS	0,6 m
RT-20	< 20 cm
RT-2	1 cm + 1 ppm

Kun laite on käytössä HEP-järjestelmän tukiasemassa, on laitteen COM2-portti kytketty radiomodeemin COM-porttiin RS-232-kaapelin välityksellä datan lähetystä varten, ja satelliittiantenni on kytkettynä laitteen TNC-antenniliittimeen kaapelin välityksellä. Virransyöttöä lukuun ottamatta laitteen muut kytkentäliittimet ovat käyttämättä. Järjestelmän suunnittelu- ja testausvaiheessa laite sai käyttövirtansa 12 Voltin ja 7 Ampeeritunnin akusta.

4.2.2 Satelliittiantenni

Satelliittiantennivaihtoehtoja järjestelmän käyttöön on kaksi eri hintaluokissa, NovAtel'in valmistama GPS-701 ja SANAV'in valmistama SM-19.

GPS-701 (Kuva 28) on korkeamman hintaluokan yksitaajuusantenni, joka hyödyntää niin sanottua PinWheel-tekniikkaa joka tarjoaa poikkeuksellisen vastustuskyvyn moniheijastumista vastaan. Matalista kulmista vastaanotetut satelliittisignaalit vaimenevat huomattavasti, ja tämä ominaisuus käytännöllisesti katsoen eliminoi signaalien heijastuksista johtuvat virheet. Toisaalta HEP-järjestelmään liittyen on otettava huomioon se, että pseudoliittisignaalit tyypillisesti vastaanotetaan juuri matalista kulmista, vaikkakin tyypillinen pseudoliitin sijainti 15–20 metrin korkeudessa on tarpeeksi signaalin vastaanottamiselle kyseisellä antennilla. Antennin ominaisuudet on esitetty taulukossa 10. Antenni on koteloitu kestävään ja vesitiiviiseen koteloon. (Laitinen & Granström 2010.)



Kuva 28 NovAtel GPS-701

Taulukko 10 NovAtel GPS-701:n ominaisuudet

Fyysiset ominaisuudet	
Koko	Halkaisija 185 mm, paksuus 69 mm
Paino	500 g
Käyttöjännite	+4,5..+18 V DC
Virrankulutus	35 mA (tyypillinen)
Liitin	TNC Naaras
Käyttölämpötila	-40 °C..+85 °C
Maksimikosteus	95% Ei-kondensoituva
Suorituskyky	
L1 3 dB kaistanpäästö	1588,5 ±23 MHz (tyypillinen)
Kaistan ulkopuolinen esto	30 dBc (tyypillinen)

LNA-vahvistus	29 dB (tyypillinen)
L1-vahvistus lakipisteessä	+5 dBic (minimi)
L1-Lisäkaistakerroin (lakipisteestä horisonttiin)	13 dB
Kohinaluku	2,0 dB (tyypillinen)
VSWR	≤ 2,0 : 1

SM-19 (Kuva 29) on huokeampi yksitaajuusantenni, joka on suunniteltu pääasiassa GPS-signaalin stabiiliutta silmällä pitäen ajoneuvojen sijainninmääritykseen ja navigointiin hankalissakin ympäristöolosuhteissa. Antennin ominaisuudet on esitetty taulukossa 11. Antenni on koteloitu vedenpitävään kotelointiin ja se on osoittautunut aiemmissa SSF:n projekteissa luotettavaksi. Antennin negatiivisena piirteenä on se, että matalista kulmista vastaanotettuja todennäköisesti heijastumisesta johtuvia signaaleja ei vaimenneta tai suodateta, jolloin ne saattavat aiheuttaa virhettä paikannukseen. (Laitinen & Granström 2010.)



Kuva 29 SANAV SM-19

Taulukko 11 SANAV SM-19 ominaisuudet

Fyysiset ominaisuudet	
Koko	58 x 48 x 15 mm
Paino	65 g
Käyttöjännite	+2,5..+3,3 V DC
Virrankulutus	5,5 mA ± 1mA @ 3,3 V
Liitin	SMA
Käyttölämpötila	-40 °C..+85 °C
Maksimikosteus	95% Ei-kondensoituva
Suorituskyky	
L1 3dB kaistanpäästö	1575,42 ±1,023 MHz (tyypillinen)

LNA-vahvistus	29 dB (tyypillinen)
L1-vahvistus lakipisteessä	+5 dBic (minimi)
Tehonvahvistus	15 dB (tyypillinen)
Kohinaluku	1,7 (maksimi)
VSWR	≤ 2,0 : 1

4.2.3 Radiomodeemi

Radiomodeemina järjestelmä käyttää sekä tukiasemassa että liikkuvassa vastaanotimessa Digi Internationalin valmistamaa XStream-radiomodeemiperheen mallia X24-009PKI-RA (Kuva 30), jonka tekniset tiedot on esitetty taulukossa 12. Laitteen vahvuuksia ovat riittävä kantama oikealla antennilla varustettuna, sopiva määrä valittavia hyppykanavia ja laitteen konfigurointimahdollisuus ohjelmallisesti modeemien konfigurointiin tarkoitettujen Hayes AT -komentojen tai sarjaportin Request To Send- eli RTS-signaalien avulla. Laite toimii lisenssivapaalla 2,4 Gigahertsin taajuuskaistalla ja käyttää niin sanottua Frequency Hopping Spread Spectrum- eli FHSS-taajuushyppelytekniikkaa eliminoidakseen muiden samalla taajuuskaistalla toimivien laitteiden häiriöt. FHSS perustuu taajuuden vaihtamiseen ennalta määritellyn algoritmin mukaan, joka on jokaiselle hyppykanavalle uniikki. Tämä mahdollistaa myös useamman XStream-radiomodeemijärjestelmän toiminnan samalla alueella toisiaan häiritsemättä, kunhan jokaisella radiomodeemijärjestelmällä on oma yksilöllinen taajuushyppelykanavansa. Taajuushyppelykanaviin perustuu myös useamman tukiaseman tilanteessa tarvittava liikkuvan vastaanottimen kuunteleman tukiaseman vaihto paremman signaalin omaavaan tukiasemaan. (XStream-PKG-R RS-232/485 RF Modem Product Manual V.5.x00 2006, 4–5.)



Kuva 30 Digi Internationalin 24XStream 009PKI-RA -modeemi 2.1 dB dipoliantennilla varustettuna

Taulukko 12 XStream-modeemin tekniset tiedot

24XStream 009PKI	
Kantama sisätiloissa	Noin 180 metriä
Kantama ulkona	Noin 16 kilometriä suurtehoantennilla, 5 kilometriä 2.1 dB dipoliantennilla
Taajuus	2,4 GHz
Datanopeus	9600 bps
Rajapinta	RS232/485
Hyppykanavia	7
Vastaanottimen herkkyys	-105 dB
Käyttölämpötila	-40 °C..+85 °C
Virransyöttö	7..18V DC
Antenniliitin	RPSMA
Antennin impedanssi	50 Ω

HEP-järjestelmässä radiomodeemin antenni on suoraan kytketty radiomodeemin RPSMA-liittimeen, ja radiomodeemin COM-portti on kytketty RS-232-kaapelilla satelliittivastaanottimen COM2-porttiin.

On huomioitavaa, että laitteen ilmoitettu datanopeus 9600 bittiä sekunnissa tarkoittaa nimenomaan läpisyöttönopeutta laitteen todellisen radiodata-

nopeuden ollessa 10 000 bittiä sekunnissa. Jäljelle jäävien 400 bitin käyttö liittyy laitteen sisäiseen dataviestipaketointiin, yhteydenavaukseen ja CRC-tarkistukseen, joista on kerrottu yksityiskohtaisemmin kappaleessa 4.3.3. (XStream-PKG-R RS-232/485 RF Modem Product Manual V.5.x00 2006, 5, 15.)

Radiomodeemiratkaisun ongelmana on laitteen kotelointi, sillä laajasta käyttölämpötilastaan huolimatta koteloinnilla ei ole tarvittavaa standardiin perustuvaa sähkölaitteen tiiviiden kertovaa Ingress Protection eli IP-luokitusta, eikä sovellu käytettäväksi ulkotiloissa tilanteissa joissa laite olisi täysin luonnonvoimien armoilla. Tästä syystä modeemeihin on valmistettava tilaustyönä paremmin sääolosuhteita kestävä vähintään IP 6.6 -luokituksen omaavat kotelot.

4.3 Laitteiston toiminta

4.3.1 Yleiskuvaus

Koko järjestelmää yleisesti ajatellen RTK-tukiasemaratkaisun tarkoituksena on lähettää liikkuville vastaanottimille oma pseudoetäisyys- ja kanta-aallonvaihemittausdatansa, jota käyttäen liikkuvat vastaanottimet laskevat omat sijaintinsa. Lisäksi tukiasema voi lähettää liikkuville vastaanottimille oman tunnetun sijaintinsa, jos tukiasemien sijainteja ei ole valmiiksi tallennettu liikkuvien vastaanotinten navigaatio-ohjelmistoon. Tarvittaessa näiden tietojen lisäksi myös tukiaseman vastaanottamia satelliittien efemeriditietoja voidaan lähettää liikkuvalla vastaanottimelle. Tämä toimenpide vaikuttaa lähinnä nopeuttamalla liikkuvan vastaanottimen validien efemeriditietojen kokoamisesta, kun vastaanottimella on satelliittisignaalin lisäksi toinen mahdollinen keino efemerididatan vastaanottamiseen. Käytännössä informaatio siirretään laitteiden välillä erilaisiksi lokiviesteiksi rakennettuna.

Viestit siirtyvät tukiasemalta liikkuville vastaanottimille radiomodeemien kautta, jotka on ohjelmoitu yleiseen lähetystoimintamuotoon eli niin kutsuttuun Broadcast Modeen; jokainen alueella toimiva vastaanottava modeemi johon on konfiguroitu sama hyppykanava Hopping Channel ja kohdeosoite Destination Address kuin lähettävässä modeemissa vastaanottavat datan, joten varsinaista pisteestä pisteeseen -yhteyttä modeemien välillä ei muodosteta. Tilanteissa, jossa käytössä on useita eri tukiasemia, määrittää liikkuva vastaanotin eri tukiasemien radiomodeemisignaalien voimakkuuksia seuraamalla parhaimman käytettävän tukiaseman, ja vaihtaa tarvittaessa tukiasemaa muuttamalla oman radiomodeeminsa konfiguraatiota niin, että sen hyppykanava vastaa halutun tukiaseman hyppykanavaa.

4.3.2 Satelliittivastaanottimen toiminnan kuvaus

Satelliittivastaanotin käyttää toimintaansa kaupallista NovAtelin laiteohjelmistoa, jonka toiminnan yksityiskohtaista kuvausta ei ole saatavilla. Korkealla tasolla yksinkertaistettuna laitteisto perustapauksessa vastaanot-

taa GPS-antenninsa kautta satelliitti- ja pseudoliittisignaalit, joista laskee pseudoetäisyydet ja kantoaallon vaihe-erot ja lähettää nämä tiedot liikkuville vastaanottimille mahdollisten konfiguroitujen sijaintitietojensa ja efemerididatansa kanssa.

Satelliittivastaanottimen, kuten muidenkin GPS-järjestelmän osien, sisäisessä toiminnassaan käyttämä aika on ilmaistu GPS-ajan muodossa, joka koostuu meneillään olevasta GPS-viikosta ja sekuntimäärästä, joka on kulunut kyseisen viikon alusta. GPS-aika alkaa viikosta 0, jonka alkuhetkeksi on määritelty 6.1.1980. Perinteisesti GPS-viikon esitykseen on varattu kymmenen bittiä, ja tästä johtuen virallinen GPS-viikko voi saada mahdolliset arvot välillä 0..1023, minkä jälkeen laskenta alkaa jälleen viikosta 0. Suuri osa moderneista satelliittivastaanottimista osaa käsitellä koko viikkonumeroa, jolloin vastaanottimen esimerkiksi 16-bittisen viikkonumeron kymmenen vähiten merkitsevää bittiä muodostavat perinteisen viikkonumeron. Sekuntimäärä voi saada arvot välillä 0..604799. (Hoffman-Wellenhof ym. 2001, 36; OEMV Family Firmware Version 3.700 Reference Manual Revision 7 2009, 32–33.)

Käynnistyessään laitteisto käy läpi useita GPS:n aikastatuksen tiloja, ja aikastatus on suoraan luettavissa laitteen lähettämässä viesteissä. Virran kytkemisen jälkeen laitteen aikastatus on UNKNOWN, jolloin vastaanottimella ei ole minkäänlaista arviota senhetkisestä ajasta; järjestelmä aloittaa laskemisen GPS-viikosta 0 ja sekunnista 0,0. Kun ensimmäinen efemeriditieto on saatu laskettua, asettuu järjestelmän aikastatus tilaan COARSE, joka vastaa ± 10 millisekunnin aikatarkkuuutta. Kun järjestelmä on saanut laskettua parhaimman mahdollisen paikka-arvion, alkaa laitteen kello mallintaa paikkavirhearviota ja vastaanottimen kellovirhearviota, ja kun järjestelmän kellomallinnus vastaa riittävästi kellon todellista käyttäytymistä, määritellään aikastatuksen tilaksi FINE, joka tarkoittaa ± 1 mikrosekunnin aikatarkkuuutta. Mikäli kellonkorjaus on päällä, tarkkenee aikastatus vielä muotoon FINESTEERING, jolloin kelloa päivitetään jatkuvasti mahdollisimman pienen etäisyysvirheen aikaansaamiseksi. Jos vastaanotin jostain syystä menettää toimintansa aikana paikkaratkaisunsa satelliittisignaalin katkeamisen johdosta, päivitetään aikastatukseksi tilanteesta kertova FREEWHEELING. (OEMV Family Firmware Version 3.700 Reference Manual Revision 7 2009, 31–32.)

4.3.3 Viestit ja protokollat

Tukiasemaratkaisun perustuessa kaupallisiin komponentteihin ja runsaasti käytettyyn teknologiaan, on järjestelmän käsittelemien viestien toteuttamiseen valmiita standardeja. Mahdollinen standardien käyttö takaa sen, että tulevaisuudessa mahdolliset järjestelmän komponenttien päivitykset toisiinsa onnistuvat ilman ongelmia. Toinen vaihtoehto on käyttää viestien toteuttamiseen vastaanotINVALMISTAJAN omaa viestimutoa, joka ei puolestaan ole yhteensopiva minkään muun valmistajan viestimutojen kanssa. Parhaimpana vaihtoehtona tarkasteltiin Radio Technical Commission For Maritime Services -komission määrittelemää standardia RTCM Recommended Standards for Differential GNSS Service, eritoten sen versiota 2.3, jonka määrittämät viestityypit RTCM3 ja joko RTCM1819 tai vaihtoehtoisesti

RTCM2021 olisivat sopineet tukiasemaratkaisuun. RTCM3-viesti pitää sisällään tukiaseman tiedot, ja RTCM1819 korjaamattomat pseudoetäisyydet ja kantoaaltovaiheet. RTCM2021 on sisällöltään muuten identtinen edellisen kanssa, mutta raakadatan sijaan lähettää vain pseudoetäisyyksien ja kantoaallon vaiheen korjausdatat. (RTCM Special committee no. 104 2001, 4.15–4.16, 4.40–4.58.)

Kokonaan standardoitujen viestityyppien käyttö osoittautui kuitenkin mahdottomaksi, sillä pseudoliitteja käytettäessä pseudoliittien lähettämä data ei näy standardimuotoisissa viesteissä. Tämä taas todennäköisesti johtuu siitä, että pseudoliittien käyttämät PRN-numerot 33–37 ja 64–119 poikkeavat satelliittipaikannusjärjestelmille varatuista PRN-numeroista ja standardimuotoisia viestejä käyttävä järjestelmä ei joko osaa käsitellä näitä signaaleja tai pitää niitä virheellisinä. Tästä syystä tukiasemalta lähtevät viestit jouduttiin toteuttamaan eri viestityyppien yhdistelmään, jossa tukiaseman sijaintitiedot ovat RTCM3-standardimuotoisia, mutta varsinainen mittausdata kulkee raakadatanä NovAtelin omassa viestim muodossa käyttäen RANGE-viestiä. Viestityyppien sekoittamisen mahdollistaa se, että NovAtelin oma viestimuo to on itsessään yhteensopiva standardimuodon kanssa, joten COM-portti määritettynä NovAtel-viestimuodolle osaa käyttää myös RTCM-viestejä ilman käyttäjältä vaadittavia toimenpiteitä.

RANGE-viestin sisältö on kuvattu taulukossa 13. Korkealla tasolla käsiteltynä se pitää sisällään tarvittavat havaintotiedot pseudoetäisyydestä ja kantoaallon vaihe-erosta jokaista laitteen havaitsemaa signaalia koskien siten, että tietoja voi käyttää hyväksi järjestelmän liikkuvassa vastaanottimessa. Viestin suositeltu lähetystaajuus on kerran sekunnissa. RANGE-viestin kokonaiskoko tavuina riippuu käytettävien havaintojen määrästä kaavan 4 mukaan, jossa H on viestin headerin koko, joka määräytyy käytetyn lokimuodon mukaan, ja $\#obs$ käytettävien havaintojen lukumäärä. RANGE-testilokiviesti on esitetty liitteessä 1. (OEMV Family Firmware Version 3.700 Reference Manual Revision 7 2009, 393–397.)

$$H + 4 + (\#obs * 44) \quad (4)$$

Taulukko 13 RANGE-viestin sisältö

Kentän numero	Sisältö	Koko (Tavua)	Yksikkö
1	Header		-
2	Havaintojen lukumäärä	4	Kpl
3	PRN	2	-
4	GLONASS-taajuus	2	
5	Pseudoetäisyys	8	Metriä
6	Pseudoetäisyyden standardipoikkeama	4	Metriä
7	Kantoaallon vaihe	8	-

8	Arvioitu kantoaallon vaiheen standard-ipoikkeama	4	Metriä
9	Välitön kantoaallon Doppler-taajuus	4	Hertsiä
10	Carrier to Noise-suhde	4	dB-Hz
11	Lukitusaika signaaliin	4	Sekuntia
12	Signaalin seurantastatus		-
13->	Seuraavien havaintojen tiedot		-
muuttuva	CRC	4	-

RTCM3-viestin sisältö on kuvattu taulukossa 14. Korkealla tasolla se pitää sisällään differentiaalisen tukiaseman koordinaatit WGS-84 ECEF -muodossa. RTCM-standardiviesteissä on viestityypin määrittämän loki-headerin lisäksi myös oma RTCM-headerinsa, jonka sisältö on esitetty taulukossa 15. RTCM3-viestin suositeltu lähetystaajuus on noin kerran kymmenessä sekunnissa, tosin eri tilanteissa tiheämpi taajuus voi olla tarpeen. RTCM3-viestin koko on binäärimuodossa headereiden kanssa 76 tavua eli 608 bittiä. RTCM3-testilokiviesti on esitetty liitteessä 2. (OEMV Family Firmware Version 3.700 Reference Manual Revision 7 2009, 441–442.)

Taulukko 14 RTCM3-viestin sisältö

Kentän numero	Sisältö	Koko (Tavua)
1	Header	H
2	RTCM -Header	24
3	ECEF X -koordinaatti	8
4	ECEF Y -koordinaatti	8
5	ECEF Z -koordinaatti	8
6	CRC	4

Taulukko 15 RTCM-viestin header

Kenttä	Nimi	Kuvaus
1	RTCM Message	Viestin tyyppi
2	Base Station ID	Tukiaseman tunniste
3	Modified Z-count	Aikatiedot
4	Sequence number	Sekvenssinumero
5	Length of frame	Kehyksen koko
6	Base Station health	Tukiaseman statustiedot

Liikkuvan vastaanottimen laskentayksikön suorittaman laskennan kannalta on myös hyödyllistä kyetä tarjoamaan sille tukiaseman havaitsemaa efe-

merididataa sisältävää NovAtelin omaa RAWEPHEM-viestiä. Tämä lokiviesti pitää sisällään satelliitin navigaatioviestin alikehysten 1–3 raa’at binääridatamuodot ilman pariteetti-informaatiota. Lisäksi viesti sisältää efemeriditiedot lähettäneen satelliitin PRN-numeron ja aikareferenssi-informaatiota. Lokiviestin sisältö on esitetty taulukossa 16. Myös RAWEPHEM-viestin koko on vakio, binäärimuotoisen headerin kanssa 134 tavua eli 1072 bittiä. Käyttötarkoituksestaan johtuen RAWEPHEM-lokia käytettäessä sen lähetystaajuus on noin muutaman kerran minuutissa. RAWEPHEM-testilokiviesti on esitetty liitteessä 3. (OEMV Family Firmware Version 3.700 Reference Manual Revision 7 2009, 405–406.)

Taulukko 16 RAWEPHEM-viestin sisältö

Kentän numero	Sisältö	Koko (Tavua)	Yksikkö
1	Header		-
2	Satelliitin PRN-numero	4	-
3	Efemeridin referenssi- viikkonumero	4	-
4	Efemeridin referenssiaika	4	Sekuntia
5	Ensimmäisen alikehyksen data	30	-
6	Toisen alikehyksen data	30	-
7	Kolmannen alikehyksen data	30	-
8	CRC	4	-

Tukiaseman satelliittivastaanotin tukee kolmea eri lokimuotoa: ASCII-muotoa, lyhennettyä ASCII-muotoa ja binääristä muotoa. ASCII-muotoiset lokit on tarkoitettu sekä ihmisen katsottaviksi että laitteiden väliseen viestintään. ASCII-lokit alkavat aina merkillä # ja ovat kooltaan vaihtelevan pituisia sisältämästään datasta riippuen. Eri kentät on erotettu toisistaan pilkulla (,) kahta poikkeusta lukuun ottamatta; headerin viimeisen kentän ja datan ensimmäisen kentän välissä on puolipiste (;), ja viimeisen datakentän jälkeen aina tähti (*). Loki loppuu 32-bittiseen CRC-tarkistussummaan ja sitä seuraaviin Carriage Return ja Line Feed -merkkeihin [CR][LF]. ASCII-muotoisten viestien rakenne ja header on esitetty taulukoissa 17 ja 18. (OEMV Family Firmware Version 3.700 Reference Manual Revision 7 2009, 21–22.)

Taulukko 17 ASCII-viestin rakenne

ASCII-viesti					
Header;	Datakenttä 1,	...	Datakenttä n	*CRC	[CR][LF]

Taulukko 18 ASCII-viestin header

Kenttä	Nimi	Kuvaus
1	Sync	Synkronointimerkki #
2	Message	Lokin tai komennon ASCII-nimi

3	Port	Lokin generoinut portti
4	Sequence #	Käytössä useissa toisiin liittyvissä lokeissa. Laskee alaspäin luvusta n-1, arvo 0 kertoo lokin olevan sarjan viimeinen
5	% Idle time	Prossessorin lyhyin idle-aika saman lokin eri generointikertojen välillä
6	GPS Time status	GPS:n aikatiedon laatu
7	Week	GPS:n viikkonumero
8	Seconds	Aika GPS-viikon alkamisesta millisekunnin tarkkuudella
9	Receiver Status	Vastaanottimen tila
10	Reserved	Varattu sisäiseen käyttöön
11	Receiver SW Version	Vastaanottimen ohjelmiston versio
12	;	Headerin lopetusmerkki ;

Binäärimuotoiset lokit on tarkoitettu yksinomaan laitteiden väliseen viestintään. Binäärilokeissa tieto on rakennettu huomattavasti tiiviimmäksi kuin ASCII-lokeissa, joten binäärisen lokin koko on huomattavasti ASCII-vastaavaa pienempi. Myös binäärimuotoinen loki pitää sisällään 32-bittisen CRC-tarkistuksen. Binäärimuotoisten lokien rakenne ja header on esitetty taulukoissa 19 ja 20. Binäärimuotoinen header pitää sisällään 3 synkronointitavua ja 25 datatavua, yhteensä 28 tavua eli 224 bittiä. (OEMV Family Firmware Version 3.700 Reference Manual Revision 7 2009, 23–25.)

Taulukko 19 Binäärimuotoisen viestin rakenne

Binäärinen viesti		
Header	Data	CRC

Taulukko 20 Binäärimuotoisen viestin header

Kenttä	Nimi	Kuvaus
1	Sync	Heksadesimaalinen 0xAA
2	Sync	Heksadesimaalinen 0x44
3	Sync	Heksadesimaalinen 0x12
4	Header Length	Headerin pituus
5	Message ID	Lokin tunniste
6	Message Type	Viestin tyyppi
7	Port Address	Porttiosoite
8	Message Length	Viestin sisällön pituus tavuina ilman headeria ja CRC:tä
9	Sequence	Käytössä useissa toisiin liittyvissä lokeissa. Laskee alaspäin luvusta n-1, arvo 0 kertoo lokin olevan sarjan viimeinen

10	Idle Time	Proessorin lyhyin idle-aika saman lokin eri generointikertojen välillä
11	Time Status	GPS:n aikatiedon laatu
12	Week	GPS:n viikkonumero
13	Seconds	Aika GPS-viikon alkamisesta millisekunnin tarkkuudella
14	Receiver Status	Vastaanottimen tila
15	Reserved	Varattu sisäiseen käyttöön
16	Receiver SW version	Vastaanottimen ohjelmiston versio

Abbreviated ASCII -eli lyhennetyt ASCII-muotoiset lokit ovat hyvin pitkälti ASCII-lokien kaltaisia, mutta ne on tarkoitettu yksinomaan ihmisten tarkasteltaviksi. Lokityypin tehtävänä on tehdä lokien silmämääräisestä tutkimisesta ja käskyjen antamisesta mahdollisimman helppoa. Data on järjestetty kentiksi välilyöntien ja pilkkujen erottamana, eikä tämä loki-muoto pidä sisällään CRC-tarkistusta käyttötarkoituksestaan johtuen. (OEMV Family Firmware Version 3.700 Reference Manual Revision 7 2009, 23.)

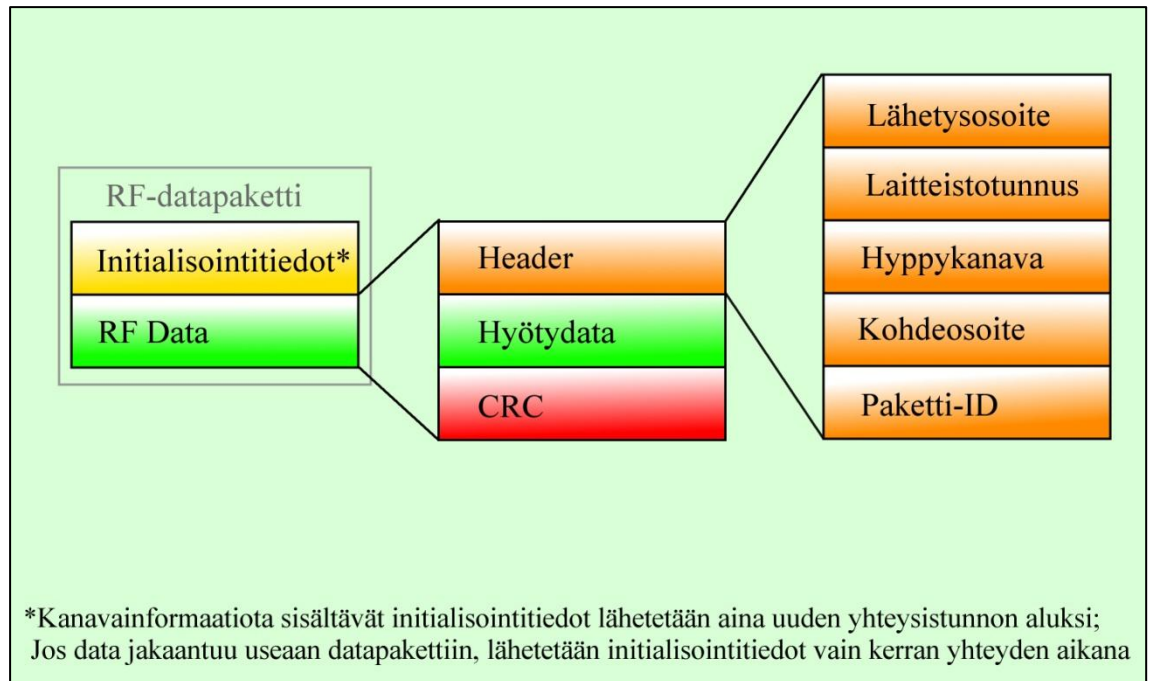
Tukiasemalta liikkuville vastaanottimille data siirtyy sarjamuodossa radiomodeemin välityksellä. Koska käytetty datanopeus on rajoitettu radiomodeemin osalta 9600 bitin läpisyöttöön sekunnissa, on syytä laskea tarkalleen kuinka suuria viestejä järjestelmä tulee generoimaan, ja kuinka suureen havaintomäärään järjestelmä rajoittuu datanopeuden rajoituksen takia. Kun binäärimuotoisen headerin kooksi tiedetään 224 bittiä, voidaan kaavan 4 avulla laskea binäärimuotoisen RANGE-viestin kokonaispituus eri havaintomäärillä. Kun otetaan lisäksi huomioon suurimman mahdollisen datakuormituksen tilanne, jossa järjestelmä lähettää samalla ajanhetkellä RANGE-viestin lisäksi sekä RTCM3-viestin – 608 bittiä – että RAWEPHEM-viestin – 1072 bittiä – muodostuu suurimmaksi sallituksi havaintojen määräksi 21 kappaletta, jolloin viestien kokonaiskooksi muodostuu yhteensä 9328 bittiä. Datakuormitukseltaan kevyimmässä mahdollisessa tilanteessa, jossa käytössä on pelkästään RANGE-viestin lähetys, nousee suurin sallittu havaintomäärä 26 kappaleeseen, jolloin RANGE-viestin kooksi muodostuu 9408 bittiä. Eri viestiyhdistelmien käytön tuottamat maksimihavaintomäärät ja lokien koot kyseisillä havaintomäärillä on esitetty taulukossa 21. Lokien koot yksityiskohtaisesti eri havaintomäärillä matalan ja korkean datakuormituksen tilanteissa on esitetty liitteessä 4.

Taulukko 21 Eri lokien käytön tuottama suurin sallittu havaintomäärä ja viestin koko

Käytettävät lokit	Suurin sallittu havaintomäärä	Koko suurimmalla havaintomäärällä, bittiä
RANGE	26	9408
RANGE + RTCM3	24	9312
RANGE + RAWEPHEM	23	9424

RANGE + RTCM3 + RAWEPHEM	21	9328
-----------------------------	----	------

Järjestelmän käyttämät XStream-radiomodeemit paketoivat datan omiksi radioviestipaketeiksi, joiden sisältö on esitetty kuvassa 31. On huomioitavaa että kuvassa esitetty CRC-tarkistus ei kykene pyytämään mahdollisen korruptoituneen datan uudelleenlähetyttä jos modeemeja ei ole konfiguroitu käyttämään molemminpuolista datayhteyttä, vaan korruptoitunut data pudotetaan eli jätetään huomiotta. Tämä on tilanne HEP-järjestelmässä, jossa lähettäjä- ja vastaanottajamodeemit ovat selkeästi eri laitteita. Viestin vastaanottava modeemi tutkii radiodatapaketin headerin määrittääkseen laitteistotunnuksen, hyppykanavan ja kohdeosoitteen ja päättelee näistä, onko viesti tarkoitettu sille. Jos yksikin arvo näistä kolmesta ei täsmää, jättää modeemi datan huomioimatta. Jos kaikki arvot täsmäävät, lähettää modeemi datan edelleen sarjaporttiin ja siitä kohdelaitteeseen, HEP-järjestelmän tapauksessa liikkuvan vastaanottimen laskentayksikköön. (XStream-PKG-R RS-232/485 RF Modem Product Manual V.5.x00 2006, 15.)



Kuva 31 XStream-radiodatapaketin sisältö

4.3.4 Konfigurointi

Tukiasemaratkaisun satelliittivastaanottimen konfigurointi tapahtuu NovAtelin omalla NovAtel CDU -ohjelmistolla ja sen komentorivillä (Kuva 32), jonka avulla pystytään myös tarkkailemaan laitteen sisäistä toimintaa, paikkaratkaisua ja havaittujen satelliittien statuksia ja mahdollisia virheitä. Ohjelmisto mahdollistaa laitteen konfiguroinnin myös graafisen käyttöliittymän kautta, mutta koska komentorivikäskyjen käyttö ja dokumentointi on huomattavasti graafista konfiguraatiota yksinkertaisempaa, käytetään projektissa yksinomaan komentorivikäskyjä. PC:n ja vastaanottimen välinen yhteys toteutetaan sarjaporttiliikenteellä siten, että PC:n COM-portti on kytkettynä satelliittivastaanottimen COM1-porttiin RS-232 -kaapelin välityksellä.



Kuva 32 NovAtel CDU -ohjelmiston päänäkymä

Koska tukiasemaratkaisussa satelliittivastaanottimen COM1-porttia käytetään laitteen konfigurointiin ja COM2-porttia varsinaiseen järjestelmän komponenttien väliseen yhteydenpitoon, tulee konfiguroinnissa jättää COM1-portin asetukset oletusasetuksiksi ja määrittää valittujen viestimuo- tojen tarvitsemat asetukset COM2-porttiin. Porttien konfigurointikäsky on muotoa ”INTERFACEMODE [Konfiguroitava portti] [Vastaanotettavien dataviestien muoto] [Lähetettävien dataviestien muoto] [Vastaus]”. Tu- kiasemaratkaisun tapauksessa COM2-portti tulee konfiguroida olemaan vastaanottamatta mitään ja lähettämään sekä RTCM-että NovAtel- muotoisia viestejä ilman vastauksia. Koska NovAtelin oma viestimuo- to on suoraan yhteensopiva RTCM-muotoisten viestien kanssa, käytetään lähe-

tettävien viestien muotona NovAtel:iä. On myös huomioitavaa että tarvittaessa käytettäviä satelliittivastaanottimen portteja voi muuttaa. (OEMV Family Firmware Version 3.700 Reference Manual Revision 7 2009, 135–139; OEMV Family Operation and Installation User Manual 2010, 60.)

Jokainen käytettävä pseudoliitti, tarkemmin sanottuna jokaisen pseudoliittin käyttämä PRN-numero, on määritettävä laitteessa manuaalisesti omalle kanavalleen, koska laitetta ei ole suoraan tarkoitettu pseudoliitteja käyttäviin järjestelmiin ja näin ollen se seuraa vain PRN-numeroita 1–32. Kanavan määrittäminen tietylle PRN-numerolle tapahtuu käskyllä ”ASSIGN [kanava] [PRN-numero]”. Konfiguraatiotesteissä käytettiin yhtä pseudoliittia, jonka PRN-numero 33 määritettiin satelliittivastaanottimen kanavalle 2. (OEMV Family Firmware Version 3.700 Reference Manual Revision 7 2009, 65–67.)

Koska satelliittivastaanotinta tullaan käyttämään luonteeltaan differentiaalisessa paikannusjärjestelmässä, on vastaanottimeen konfiguroitava sen tunnettu sijainti. Sijainnin konfigurointikäsky on muotoa ”FIX POSITION [Leveyspiiri] [Pituuspiiri] [Korkeus]”, jossa parametrit ovat WGS-84 ECEF-koordinaattimuotoa. Tässä tapauksessa laitteisiin konfiguroitiin SSF:n toimiston sijainti, joksi mitattiin WGS-84 ECEF -muodossa leveyspiiri 60.16804257, pituuspiiri 24.76679876 ja korkeus 10.420. (OEMV Family Firmware Version 3.700 Reference Manual Revision 7 2009, 115–118.)

Tärkeimmät paikannukseen vaikuttavat konfigurointiasetukset tehtiin itse lokiviestien generointiin. Lokiviestin generointikäsky on muotoa ”LOG [käytettävä portti] [Lokin nimi] [Lokin generoinnin aiheuttava tapahtuma] [Aikaväli]”. Lokin muoto määritellään heti lokin nimen perässä olevalla kirjaimella A eli ASCII, B eli Binary tai jättämällä kirjain pois jolloin käytetään lyhennettyä ASCII-muotoa. Tukiasemaratkaisun tapauksessa laitteen tulee generoida sekunnin välein satelliittimittausdataviestejä, ja tarpeen vaatiessa tukiasematietoviestejä sekä efemeriditietoviestejä. Tukiasematietoviestien vaadittu luontitiheys on periaatteessa vain noin 10–30 sekunnin välein, mutta koska HEP-järjestelmässä tietyissä tilanteissa liikkuva vastaanotin vaihtaa kuunneltavaa tukiasemaa, on tätäkin viestiä lähetettävä yhtä tiheästi satelliittimittausdataviestin kanssa, jotta välttytään tilanteelta jossa liikkuva laite kuuntelee yhtä tukiasemaa mutta luulee sen sijaitsevan toisen tukiaseman koordinaateissa. Kuten sanottua, efemeriditietoja sisältävää lokia käytettäessä sitä voidaan tarvittaessa generoida huomattavasti harvemmin kuin kerran sekunnissa, esimerkiksi 30 sekunnin välein. Koska raakalokien silmämääräinen tutkiminen ei tule olemaan tarpeen, käytetään lokien binäärimuotoja niiden huomattavasti kompaktimman koon takia. Edellä mainitut konfiguraatiot suoritetaan seuraavalla käskysarjalla:

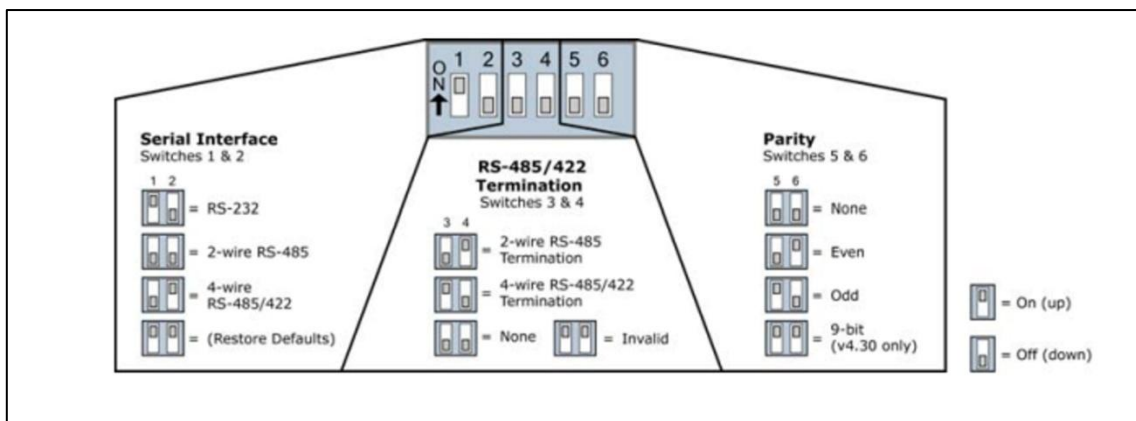
```
INTERFACEMODE COM2 NONE NOVATEL OFF
ASSIGN 2 33
FIX POSITION 60.16804257 24.76679876 10.420
LOG COM2 RANGE8 ONTIME 1
LOG COM2 RTCM3B ONTIME 1
LOG COM2 RAWEPHEMB ONTIME 30
SAVECONFIG
```

Koska mahdollisen virransaannin katkeamisen seurauksena vastaanotin menettää käyttäjän tekemät konfigurointiasetukset, on ne syytä tallentaa laitteen haihtumattomaan muistiin komentosarjan viimeisellä komennolla SAVECONFIG. Tällöin laite käynnistyessään hakee tehdasasetusten sijaan muistiin tallennetun konfiguraation. (OEMV Family Firmware Version 3.700 Reference Manual Revision 7 2009, 143–147; 182.) Jos järjestelmässä halutaan käyttää Fastraxin valmistamia satelliittivastaanottimia, käytetään RANGE-lokin tilalla Fastraxin lähes vastaavaa ja samat toiminnallisuudet tarjoavaa TRACK-lokia.

Tukiasematietoja sisältävän RTCM3-viestin lähetys ei tilanteesta riippuen tule olemaan pakollista, sillä järjestelmän käyttämien tukiasemien sijainnit on myös mahdollista tallentaa suoraan liikkuvien vastaanotinten suorittamaan navigaatio-ohjelmistoon, jolloin ohjelmisto tutkii aina hyppykanavaa vaihtaessaan ja näin toiselle tukiasemalle siirtyessään kyseistä hyppykanavaa vastaavan tukiaseman koordinaatit. Koska RTCM3-viestin koko on verrattain pieni 608 bittiä, ei sen käyttämisellä tai vaihtoehtoisella poistamisella ole suurta käytännön vaikutusta tukiaseman toimintaan; ilman RTCM3-viestiä suurin sallittu havaintomäärä kasvaa yhdellä. Järjestelmää konfiguroitaessa on kuitenkin kiinnitettävä huomiota siihen, että laitteisto toimii ongelmitta myös suurimmalla mahdollisella datakuormalla, ja tästä syystä konfiguraatiot on tehty olettaen, että sekä RTCM3-viestin että RAWEPHEM-viestin lähetys on käytössä.

Radiomodeemin konfigurointi tapahtuu niin sanotuilla Hayes AT -käskyillä, jotka on alun perin kehitetty 1970-luvun loppupuolella lyhyiksi tekstimuotoisiksi käskyiksi modeemien eri operaatioiden käskyttämiseen. Käskyjen antamiseen voi käyttää joko XStreamin omaa tuotesarjansa modeemien konfiguroimiseen tarkoitettua X-CTU -ohjelmistoa, tai mitä tahansa terminaalimulaattoria. XStream-modeemit toimivat kahdessa tilassa, joko datatilassa Data Mode jossa laite suorittaa normaalisti toimintojaan, tai komentotilassa Command Mode jossa laite on valmiina vastaanottamaan käskyjä. Datatilasta siirrytään komentotilaan antamalla käsky ”+++” yhden sekunnin tauolla ennen ja jälkeen käskyn antamisen, ja komentotilasta datatilaan käskyllä ”ATCN”. AT-käskyt ovat muodoltaan ”AT[Komento] [Parametri]”, ja ilman parametria annettu käsky palauttaa käskyn sillä hetkellä käytössä olevan parametrin. Useita käskyjä voidaan antaa samalla kertaa pilkulla erotettuna, jolloin pilkkua seuraavista käskyistä jätetään tunnistekirjaimet AT pois. (XStream-PKG-R RS-232/485 RF Modem Product Manual V.5.x00 2006, 22–23.)

Laitteen kyljessä on lisäksi kuuden DIP-kytkimen rivistö, joilla laitteen sarjaporttiliitäntä konfiguroidaan ja joiden asennon laite lukee aina käynnistyessään (kuva 33). HEP-järjestelmässä laite on konfiguroitu käyttämään RS-232 -liitäntää ilman pariteetintarkistusta, jolloin DIP-kytkimet on konfiguroitu järjestyksessä asentoihin 1,0,0,0,0,0. (XStream-PKG-R RS-232/485 RF Modem Product Manual V.5.x00 2006, 6–8.)



Kuva 33 XStream-radiomodeemin DIP-kytkinasetukset (XStream-PKG-R RS-232/485 RF Modem Product Manual)

Tukiasemaratkaisun käyttämään radiomodeemiin konfiguroidaan haluttu hyppykanava, tässä tapauksessa kanava 0. Hyppykanavan asetus tapahtuu komennolla ”ATHP”, jonka perään syötetään haluttu hyppykanava. Jos käytössä on useampi tukiasema, asetetaan jokaisen tukiaseman radiomodeemiin eri hyppykanava, jotta liikkuvat vastaanottimet voivat oman modeeminsa hyppykanavaa vaihtamalla vaihtaa seurattavaa tukiasemaa sen mukaan, minkä tukiaseman sijainti on kulloinkin optimaalisin liikkuvan vastaanottimen sijaintiin nähden. Lisäksi jokaiseen radiomodeemiin konfiguroidaan haluttu kohdeosoite, jonka tulee olla koko järjestelmän radiomodeemeissa sama. Tämä tapahtuu käskyllä ”ATDT”, jonka perään syötetään haluttu kohdeosoite, tässä tapauksessa 7. Käsky ”ATWR” tallettaa tehdyt konfiguraatiot laitteen muistiin siten, että aina käynnistyessään laite hakee muistista tehdasasetusten sijaan käyttäjän konfiguroinnin. Tukiaseman radiomodeemin konfigurointi tapahtuu seuraavalla komentosarjalla:

```
<1 sekunti taukoa>
+++
<1 sekunti taukoa>
ATHP0
ATDT7
ATWR
ATCN
```

Liikkuvan vastaanottimen puolella sama käskysarja ilman kohdeosoitetta kulloinkin sopivalla hyppykanavan numerolla suoritetaan ohjelmallisesti aina tukiaseman vaihdon yhteydessä. Käskynannon syntaksiin kuuluvat yhden sekunnin tauot eivät luo järjestelmän toimintaan keinotekoisia katkoksia, sillä modeemi toimii taukojen ajan normaalisti datatilassa ja vasta jälkimmäisen sekunnin kuluttua siirtyy komentotilaan. Vaihtoehtoisesti Liikkuva vastaanotin voi vaihtaa hyppykanavaansa käyttäen sarjaportin RTS-signaaleja, jolloin vaihto nopeutuu huomattavasti. Tällöin liikkuvan vastaanottimen radiomodeemi tulee ensin konfiguroida vastaanottamaan binäärikäskyjä komennolla ”ATRT1”. (XStream-PKG-R RS-232/485 RF Modem Product Manual V.5.x00 2006, 28–30, 39.)

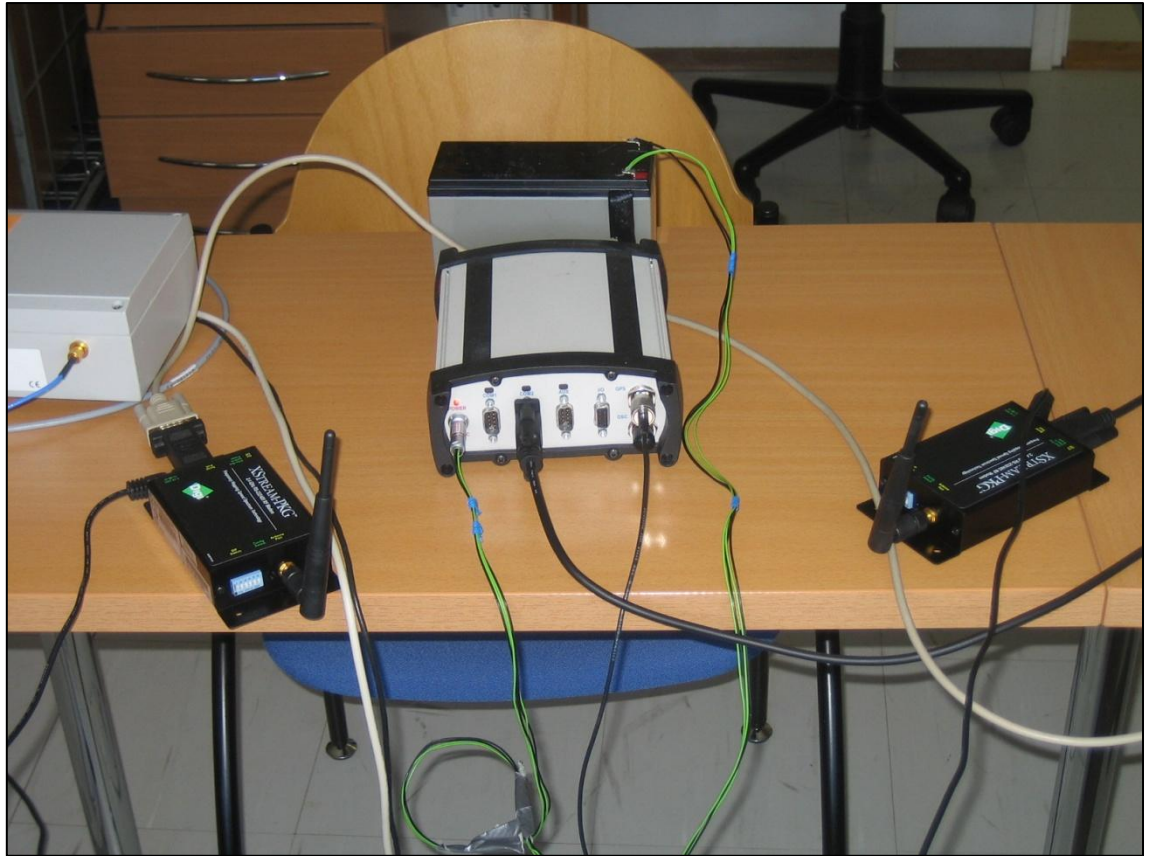
4.4 Tukiasemaratkaisun testaus

4.4.1 Testaus suunnitteluvaiheessa

Tukiasemaratkaisua testattiin samanaikaisesti sen suunnittelun ja toteutuksen ajan, jotta kaikki mahdolliset yhteensopivuusongelmat ja piilevät suorituskykyyn vaikuttavat ongelmat huomattaisiin ja saataisiin ratkaistuksi. Pääasiassa suunnitteluvaiheen testaus kuitenkin keskittyi kolmeen alla kuvattuun testitapaukseen, joista jokainen keskittyi tietyn ongelman tai uhkakuvan testaukseen.

Alustava testaus piti sisällään tukiaseman eri komponenttien keskinäisen yhteensopivuuden testausta. Ensimmäinen testauskokoonpano koostui pelkästään satelliittivastaanottimesta, GPS-antennista ja pseudoliitistä, ja tällä kokoonpanolla satelliittivastaanottimen toimintaa ja sen paikkaratkaisua sekä sen lähettämää tukiasemamittausten raakadataa eri viestimuodoilla tarkkailtiin PC:n välityksellä RS232-kaapelin kautta. Testi paljasti yhteensopivuusongelman käytettävän RTCM-viestistandardiversion ja pseudoliittien käyttämien PRN-numeroiden välillä, mikä pakotti järjestelmän käyttämään NovAtelin epästandardia viestimuotoa raakamittaustiedon lähettämiseen liikkuville vastaanottimille.

Seuraavan testin tarkoituksena oli todeta radiomodeemien käyttämä datanopeus riittäväksi tukiaseman raakadatan lähetykseen laskennan lisäksi myös kokeellisesti ja varmistua siitä, että modeemi ja satelliittivastaanotin olivat yhteensopivia keskenään. Testin kokoonpano piti sisällään edellisen testin kokoonpanon lisäksi kaksi radiomodeemia. Samalle hyppykanavalle konfiguroidut modeemit oli kytketty sekä satelliittivastaanottimen COM2-porttiin että tietokoneen COM-porttiin siten, että radiodatatie korvasi edellisen testin RS232 -kaapelin. Satelliittivastaanottimen lähettämää dataa tarkkailtiin PC:n avulla etsien merkkejä katkenneista viesteistä, joiden esiintyminen merkitsisi liian alhaista datanopeutta. Niitä ei kuitenkaan havaittu, ja testin tuloksena voitiin todeta, että laitteisto toimi odotetulla tavalla, ja että datanopeus oli riittävä. Tämän testin kokoonpano on esitetty kuvassa 34.



Kuva 34 Tukiaseman testaus kahdella radiomodeemilla

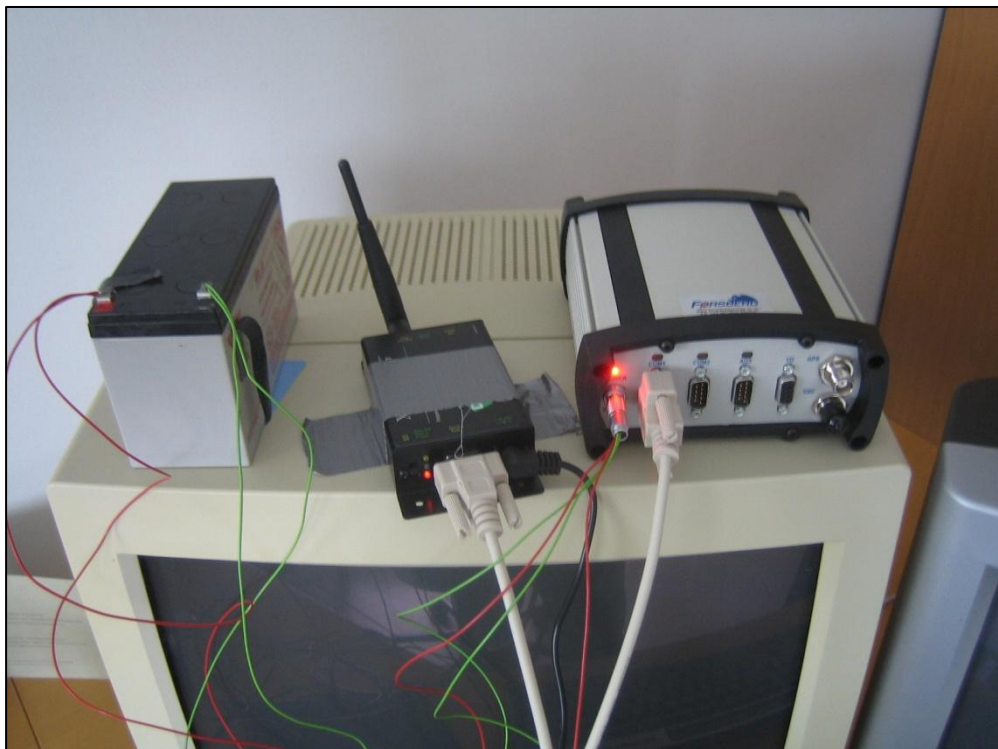
Kolmannen testin tarkoituksena oli varmistua siitä, että useampi kohdealueella sijaitseva tukiasema kykenisi lähettämään raakamittausdataa omien radiomodeemiensa kautta häiritsemättä toinen toistaan eri hyppykanavien ansiosta. Tässä testissä edellisen testin kokoonpanoon lisättiin toinen satelliittivastaanotin ja siihen liitettiin kolmas radiomodeemi, jonka käyttämä hyppykanava poikkesi ensimmäisen satelliittivastaanottimen radiomodeemin käyttämästä hyppykanavasta. Tämän jälkeen tietokoneeseen kytketyn radiomodeemin vastaanottamaa dataa tarkkailtiin ja sen hyppykanavaa vaihdettiin vastaamaan vuorotellen satelliittivastaanottimissa kiinni olleiden modeemien hyppykanavia, jotta mahdolliset häiriöt tai datavuodot väärästä laitteesta olisi havaittu. Testin tuloksena voitiin todeta, että hyppykanavilla toteutettu laitteiden erottelu toimi odotetulla tavalla, ja että useampi tukiasema kykenee toimimaan itsenäisesti toisiaan häiritsemättä.

4.4.2 Lopullinen testaus

Lopullinen testaus suoritettiin asentamalla yhteen SSF:n toimiston huoneista testijärjestelmä, joka koostui yhdestä liikkuvaa vastaanotinta jäljittelevästä satelliittivastaanottimesta, kahdesta tukiasemasta sekä liikkuvan vastaanottimen laskentayksiköstä. Laskentayksikkönä käytettiin kannettavaa tietokonetta, jossa navigaatio-ohjelmiston lähdekoodi sekä käännettiin että suoritettiin Cygwin-ympäristön alaisuudessa. Cygwin on eräänlainen Unix -emulaattori, joka mahdollistaa Unix -toiminnallisuuksien käyttämisen Windows -ympäristössä. Testin varsinaisena päätarkoituksena oli tes-

tata liikkuvan vastaanottimen navigaatio-ohjelmiston toimivuutta ja varmistua siitä, että ohjelmisto osaa tulkita lukemiaan radiomodeemin signaalivahvuuksia oikein ja niiden perusteella vaihtaa signaalin heiketessä liikaa tukiasemalta toiselle. Koska ohjelmisto näyttää testaus- ja debugvaiheessa ruudulla yksityiskohtaista informaatiota tukiasemalta ja liikkuvalla vastaanottimelta vastaanottamistaan dataviesteistä, soveltui testi kuitenkin hyvin myös itse tukiaseman toiminnallisuuden testaukseen, sillä ohjelma olisi käytössä paljastanut mahdolliset epänormaalit viestit, vikatilanteet tai piilevät yhteensopivuusongelmat.

Tukiasemat sijoitettiin toimimaan itsenäisesti eri puolille huonetta siten, että molemmat tukiasemat lähettivät radiomodeemiensa kautta dataa omilla hyppykanavillaan (kuva 35). Liikkuvana vastaanottimena toimiva satelliittivastaanotin liitettiin kannettavan tietokoneen COM-porttiin suoraan RS232-kaapelin kautta. Myös liikkuvan vastaanottimen radiomodeemi kytkettiin RS232-kaapelin kautta kannettavan tietokoneen toiseen COM-porttiin, jolloin tietokoneessa suoritettava navigaatio-ohjelmisto kykeni vastaanottamaan dataa liikkuvan vastaanottimen satelliittivastaanottimesta suoraan RS-232 -kaapelin välityksellä, ja valitsemaltaan tukiasemalta radiomodeemiensa kautta. Liikkuvan vastaanottimen navigaatio-ohjelmisto oli testausvaiheessa vielä keskeneräinen, ja ohjelmiston lähdekoodia muokattiin useita kertoja testauksen kuluessa.



Kuva 35 Toinen lopputestauksessa käytetyistä tukiasemista asennusvaiheessa

Testauksen tuloksena todettiin, että käytetty liikkuvan vastaanottimen navigaatio-ohjelmiston varhainen kehitysversio käyttäytyi odotetulla tavalla vaihtuen laskentayksikkönsä kiinnitetyn radiomodeemin hyppykanavaa ohjelmallisesti tarvittaessa. Navigaatio-ohjelmiston keskeneräisyydestä johtuen testiin ei kuulunut laitteiston keräämän datan jatkokäsittely ja sen perusteella sijaintiratkaisun laskeminen. Edellä kuvatun lopputestauksen

lisäksi tukiasemaratkaisua ja koko järjestelmää tullaan kevään ja kesän kuluessa testaamaan kokonaisvaltaisemmin ulkotiloissa järjestelmän käyttötarkoitusta ja lopullista käyttöympäristöä paremmin vastaavissa olosuhteissa pidemmälle kehitetyllä navigaatio-ohjelmistolla. Aikarajoitusten vuoksi kyseisten testien dokumentointi tai tulosten tarkastelu ei sisälly tähän opinnäytetyöraporttiin.

5 TULOKSET JA PÄÄTELMÄT

5.1 Lopullinen kokoonpano

5.1.1 Laitteisto ja liitännät

Tukiasemaratkaisun testaus todisti laitteistovalinnat ja eri komponenttien konfigurointiasetukset toimiviksi ja vaatimusmäärittelyiden mukaisiksi sekä yksittäisiä komponentteja että koko tukiasemaratkaisua koskien ja varmisti myös tukiaseman laitteiston toimivan odotetulla tavalla. Tukiaseman lopullinen laitteistokokoonpano komponentteittain on esitetty taulukossa 22.

Taulukko 22 Tukiaseman lopullinen laitteistokokoonpano

Komponentti	Laite	Vaihtoehto
Satelliittivastaanotin	NovAtel; esim. OEMV3-kortti ProPak 3 -kotelossa	Fastrax; ITRAX
Radiomodeemi	Digi International XStream	-
Radiomodeemiantenni	2,1 dB Dipoliantenni	-
GPS-antenni	NovAtel GPS-701	SANAV SM-19

Satelliittivastaanotin on liitetty COM2-portin kautta RS-232 -kaapelilla radiomodeemin COM-porttiin ja GPS-antenni satelliittivastaanottimen TNC-antenniliittimeen kaapelin välityksellä. Radiomodeemin antenni on kytketty suoraan radiomodeemin RPSMA-liittimeen. Tukiasemaratkaisun laitteistokokoonpano on esitetty kuvassa 36. Radiomodeemien koteloinnin tiiveyden ja kestävyysongelmat ratkaistaan valmistamalla tilaustyönä järjestelmän käyttämiin radiomodeemeihin vähintään IP 6.6 -luokituksen omaavat koteloinnit.



Kuva 36 HEP-järjestelmän tukiasemaratkaisun lopullinen laitteistokokoonpano; Satelliittiantenni, vastaanotin, radiomodeemi ja radiomodeemiantenni sekä tarvittavat johdot

5.1.2 Konfiguraatio

Tukiaseman satelliittivastaanotin on konfiguroitu generoimaan COM2-porttinsa kautta binäärimuotoisia RANGE-viestejä yhden sekunnin välein käyttäen porttidatamuotona NovAtelin omaa RTCM-yhteensopivaa muotoa. Jos järjestelmän käyttämien tukiasemien koordinaatteja ei tallenneta suoraan liikkuvien vastaanotinten navigaatio-ohjelmistoon, voi tukiasema lähettää lisäksi myös tukiaseman tiedot sisältävää RTCM3-viestiä. Tarvittaessa käytetään myös efemeridi- ja aikareferenssidataa sisältävää RAWEPHEM-viestiä, jota laite konfiguroidaan lähettämään esimerkiksi 30 sekunnin välein. Lisäksi laitteeseen on määritetty joka pseudoliitille oma kanavansa, ja laitteeseen on konfiguroitu sen oma tunnettu sijainti differentiaalisen toiminnan mahdollistamiseksi.

Tukiaseman radiomodeemi on konfiguroitu yleiseen lähetystoimintamuotoon jolloin laite ei muodosta pisteestä pisteeseen -yhteyttä eikä itse vastaanota radiodataa, vaan pelkästään lähettää sitä. Lisäksi laitteeseen on konfiguroitu haluttu hyppykanava ja kohdeosoite, joista hyppykanava on jokaisella tukiasemalla erilainen, mutta kohdeosoite järjestelmän kaikissa modeemeissa sama. Rajapintana laite on konfiguroitu käyttämään RS-232-liitäntää ilman pariteettitarkistusta.

Laitteiston radiodatanopeuden määrittelemä suurin sallittu havaintomäärä on kevyimmässä datakuormatilanteessa vain RANGE-viestejä käyttäen 26 kappaletta, ja raskaimmassa sekä RANGE-, RTCM3- että RAWEPHEM -viestejä käyttävässä konfiguraatiossa 21 kappaletta.

5.2 Parannusehdotukset

Suurin parannuskohta järjestelmässä olisi datan lähetys kokonaan standardimuotoisilla RTCM-viesteillä, sillä tämä takaisi pienemmät viestikoot sekä samalla tekisi järjestelmästä huomattavasti mukautuvamman järjestelmän jatkokehitystä ajatellen. Järjestelmä ei olisi enää sidottuna yhden valmistajan satelliittivastaanottimeen, vaan samoilla konfiguraatioasetuksilla voitaisiin tarvittaessa käyttää keskenään erimerkkisiä laitteita. RTCM-standardi kehittyy jatkuvasti, ja pseudoliittiopeeraatioita tukevan standardiversion ilmestyttyä laitteisto tulisi päivittää käyttämään sitä.

Toinen laitteiston suorituskykyyn ja eritoten toimintasäteeseen vaikuttava seikka olisi radiomodeemin käyttämän taajuuden ja lähetysantennin ominaisuuksien muuttaminen, mutta tämä toimenpide on sidottu laitteiston kohdealueen maantieteelliseen sijaintiin, sillä Euroopassa lainsäädäntö estää suuremman kantaman antavan 900 MHz taajuusalueen käytön, kuten myös suurtehoantennien asentamisen järjestelmään. Näillä muutoksilla järjestelmän tukiaseman ja liikkuvan vastaanottimen välinen toimintaetäisyys kasvaisi jopa yli 30 kilometriin optimiolosuhteissa.

LÄHTEET

Hoffman-Wellenhof, B., Lichtenegger, H. ja Collins, J. 2001. Global Positioning System Theory and Practice. Itävalta: Springer-Verlag WienNewYork.

Jahkola, M., Granström, J. ja Laitinen, H. 2010. HEP- Harbour Environment Pseudolites Feasibility Report version 1.1. Space Systems Finland. Sisäinen dokumentti.

Jeffery, C. 2010. An Introduction to GNSS. Kanada: NovAtel Inc.

Laitinen, H. 2010. HEP- Harbour Environment Pseudolites Product Requirement Document version 1.1. Space Systems Finland. Sisäinen dokumentti.

Laitinen, H. ja Granström, J. 2010. HEP- Harbour Environment Pseudolites System Design Document. Space Systems Finland. Sisäinen dokumentti.

Poutanen, M. 1998. GPS-paikanmäärittäminen. Helsinki: URSA.

RTCM Special committee no. 104. 2001. RTCM Recommended standards for differential GNSS service V2.3. USA: Radio Technical Commission for Maritime Services.

Strang, G. ja Borre, K. 1997. Linear Algebra, Geodesy and GPS. USA: Wellesey-Cambridge Press.

Van Sickle, J. 2001. GPS for land surveyors. Lontoo: Taylor & Francis.

GNSS World. 2010. Inside GNSS. Viitattu 22.2.2011. <http://www.insidegnss.com/gnssworld>

GPS Frequencies. 2009. The Satellite Encyclopedia. Viitattu 15.2.2011 www.tbs-satellite.com/tse/online/prog_gps_freq.html

GPS Image Library. 2010. Government information about the Global Positioning System and related topics. Viitattu 8.2.2011. <http://gps.gov/multimedia/images/>

GPS Satellite Outage Information. 2011. Analytical Graphics Inc. Developer Network. Viitattu 8.3.2011. <http://adn.agi.com/SatelliteOutageCalendar/SOFCalendar.aspx>

GPS Wing Reaches GPS III IBR Milestone. 2010. Inside GNSS. Viitattu 3.3.2011. <http://www.insidegnss.com/node/918>

Lockheed Martin Press Release. 2008. Lockheed Martin. Viitattu 28.2.2010.

http://www.lockheedmartin.com/news/press_releases/2008/515_ss_gps.html

Model List for NovAtel Receivers. 2010. NovAtel Inc. Viitattu 14.3.2011.

http://www.novatel.com/assets/Documents/Papers/NovAtel_Models.pdf

NASA Photo Gallery. 2009. National Aeronautics and Space Administration. Viitattu 29.1.2011. <http://history.nasa.gov/sputnik/gallerysput.html>

OEMV Family Firmware Version 3.700 Reference Manual Revision 7. 2009. NovAtel Inc. Viitattu 22.3.2011.

<http://www.novatel.com/assets/Documents/Manuals/om-20000094.pdf>

OEMV Family Operation and Installation User Manual. 2010. NovAtel Inc. Viitattu 22.3.2011.

<http://www.novatel.com/assets/Documents/Manuals/om-20000093.pdf>

What is GPS. 2010. Official U.S. Government information about the Global Positioning System (GPS) and related topics. Viitattu 5.1.2011.

<http://www.gps.gov/systems/gps/>

XStream-PKG-R RS-232/485 RF Modem Product Manual V.5.x00. 2006. Digi International. Viitattu 2.3.2011.

http://ftp1.digi.com/support/documentation/productmanual_xstream_pkg_rs232rs485rfmodem_v5.x00.pdf

RANGE- LOKIVIESTI

Kymmenen signaalihavaintoa.

ASCII- muodossa:

```
#RANGEA,COM1,0,62.0,FINESTEERING,1618,459740.000,00100000,  
5103,5817;10,21,0,20875417.318,0.046,-109701054.762239,0.011,-  
663.066,47.8,1872.830,18109c04,21,0,20875413.341,12.247,-  
85481327.198008,0.098,-  
516.676,6.0,1.660,11309c0b,33,0,306379516.403,0.032,-  
1.61003522483895e+09,0.006,-  
31.023,51.0,1207.030,8b679c44,7,0,24143293.794,0.046,-  
113224866.015557,0.011,995.367,47.8,2152.290,08009c64,29,0,2402379  
7.050,0.068,-112596890.411037,0.015,-  
3519.363,44.5,2141.350,18109c84,29,0,24023802.331,10.148,-  
98373453.754459,0.146,-  
2742.359,16.9,1.140,11309c8b,5,0,25073061.684,0.076,-  
118110827.358546,0.018,-  
3474.238,43.5,2151.270,18009ca4,26,0,23471093.648,0.045,-  
109692437.745334,0.012,1561.977,48.0,2142.616,18009cc4,15,0,246275  
49.727,0.068,-  
129418683.677939,0.017,2840.191,44.4,1518.726,18009d24,8,0,2555759  
4.089,0.100,-  
134306070.715895,0.023,2873.211,41.1,282.830,08009d64*6a61823c
```

Binäärimuodossa heksadesimaalina esitettynä:

```
AA44121C2B0002403801000095B45A0690BF0212000010000351C712  
07000000170000001BE2054BB3657341D1DFA43FF7A3772FBD7B99C  
145BDB53DC0AE5F44176BFF410AD7E340049C101817000000  
A1D7EB8FB46573413CA0C53F6CF957D96EDB93C19038D93D404C2  
E44E2EA0B429A9919400B9C301114000000956FC2C016D17341ADE  
DA73D7F32F30BD1089AC1AB25873C803BEDC4D95C2B4214DE484  
4249C0018200000001B6B9ED965B57541413D4C3D0055AC8F50D999  
C14F43183C004A34C5F5A33C4200208344849C00081F00000044AEE6  
1F64DC7541A092203D6A0ABDF08A0C9AC1DB0FE23B601512C5  
C7094542B8FE8244C49C001819000000C4B5F958BD897741A644403  
D2DC750749A409CC191BC043CC04FC4C405AF3E42664E8344249D0  
0081E00000024FE78CCAC2A7741CA378B3D3CCAF138B6C39BC1  
9A69493C8074404514D5314285AB5644A49D000898D20FE4
```

RTCM3- LOKIVIEСТИ

ASCII- muodossa:

```
#RTCM3A,COM1,0,65.0,FINESTEERING,1618,459726.000,0010  
0000,61e6,5817;3,0,4210,0,0,6,288831399.1775556206703186,13325579  
3.7712597399950027,550983920.7694861888885498*3ee4cb9d
```

Binäärimuodossa heksadesimaalina esitettynä:

```
AA44121C750002401E00000097B45A06E8BC071200001000E661C712  
66414340446042475962774D7144655A7C415C574A7944417B54544E5  
C64B7A02B5A
```

RAWEPHEM- LOKIVIEСТИ

ASCII- muodossa:

```
#RAWEPHEMA,COM1,29,90.0,SATTIME,1629,476610.000,004c0000,  
97b7,4807;1,1629,482400,8b09749b26279750fc3caf98c00503b06e3c7f33  
d64e75c600ffe9e337c3,8b09749b26aa4e04c333b443c754600417025b1bc  
20855a10ca69a75c67e,8b09749b272ffcab00b3a2f000b277173a1265723  
31fccaffa4944e0d18*11c4fbdd
```

Binäärimuodossa heksadesimaalina esitettynä:

```
AA44121C2900022066001D00AF140000C019350000004C00B797C712  
010000005D060000605C07008B09749B26279750FC3CAF98C00503B0  
6E3C7F33D64E75C600FFE9E337C38B09749B26AA4E04C333B443C7  
54600417025B1BC20855A10CA69A75C67E8B09749B272FFFCAB00B  
3A2F 000B277173A126572331FCCAFFA4944E0D18BB6BA09E
```

TUKIASEMAN BINÄÄRISTEN VIESTIEN KOOT ERI HAVAITOMÄÄRILLÄ

Havaintojen määrä	RANGE- viestin koko	RTCM3- viestin koko	RAWEPHEM- viestin koko	Koko yhteensä
1	608	608	1072	2288
2	960	608	1072	2640
3	1312	608	1072	2992
4	1664	608	1072	3344
5	2016	608	1072	3696
6	2368	608	1072	4048
7	2720	608	1072	4400
8	3072	608	1072	4752
9	3424	608	1072	5104
10	3776	608	1072	5456
11	4128	608	1072	5808
12	4480	608	1072	6160
13	4832	608	1072	6512
14	5184	608	1072	6864
15	5536	608	1072	7216
16	5888	608	1072	7568
17	6240	608	1072	7920
18	6592	608	1072	8272
19	6944	608	1072	8624
20	7296	608	1072	8976
21	7648	608	1072	9328
22	8000	608	1072	9680
23	8352	608	1072	10032
24	8704	608	1072	10384
25	9056	608	1072	10736
26	9408	608	1072	11088
27	9760	608	1072	11440