



**TAMPEREEN
AMMATTIKORKEAKOULU**

TUTKINTOTYÖRAPORTTI

GPS-JÄRJESTELMÄN RAKENNE JA TOIMINTAPERIAATE

Juha Valkama

Tietojenkäsittelyn koulutusohjelma
Huhtikuu 2006
Työn ohjaaja: Paula Hietala

TAMPERE 2006



Tekijä(t)	Juha Valkama	
Koulutusohjelma(t)	Tietojenkäsittely	
Tutkintotyön nimi	GPS-järjestelmän rakenne ja toimintaperiaate	
Työn valmistumis- kuukausi ja -vuosi	Huhtikuu 2006	
Työn ohjaaja	Paula Hietala	Sivumäärä: 34

TIIVISTELMÄ

Elektroniikkateollisuuden tuotteiden halpeneminen ja saatavuuden paraneminen on tuonut nopeasti kasvavan ryhmän uusia paikannuspalveluiden käyttäjiä. Suurin osa heistä käyttää näitä palveluja osana jokapäiväisiä toimintojaan, kuten autolla ajamisen tai lenkkeilyn yhteydessä. Järjestelmän helppokäyttöisyys voi luoda käyttäjälle näennäistä turvallisuuden tunnetta, jolla voi pahimmassa tapauksessa olla kohtalokkaita seurauksia esimerkiksi käytettäessä paikannuspalveluja avomeriveneilyssä tai pitkillä erävaelluksilla.

Tämän työn tavoitteena on tuoda peruskäyttäjälle valmiudet ymmärtää amerikkalaisen GPS-järjestelmän toimintaa pintaa syvemmillä ja taitotietoa mahdollisten vikatilanteiden ratkaisemiseen. Selvitän työssä GPS-järjestelmän kehityksen nykymuotoonsa ja sen teknisten ratkaisujen toiminnan satelliiteista paikantimiin.

Lähdemateriaalina käytän pääosin suomenkielistä kirjallisuutta. Apuna on jonkin verran myös englanninkielistä materiaalia kirja- sekä online-muodossa. Suomenkielisestä materiaalista käytän pääosin Markku Poutasen ja Samuli Miettisen kirjoja, jotka ovat jo vuosia tuoneet suomalaisille GPS-järjestelmää tutuksi.

Työssä sain mielestäni hyvin käsiteltyä GPS-järjestelmän perusominaisuudet ja sen kehityksen nykymuotoonsa, vaikka aihe sinänsä on hyvin asiantuntijakeskeinen. Osa radanmäärittämisestä ja signaalimodulaation muodostamisesta on melko matemaattisia, ja tästä johtuen näin järkeväksi tutkintotyöni tavoitteita silmällä pitäen esittää tekniset ratkaisut selkeästi vain periaatetasolla.

Osatavoitteenani oli laatia tutkintotyöstä sellainen, että sitä voitaisiin käyttää paikannuspalveluja käsittelevien opintojaksojen tukimateriaalina. Uskon, että materiaalista on hyötyä monille vasta-alkajille ja myös vähän pidemmälle ehtineille GPS-harrastajille.



Author(s)	Juha Valkama	
Degree Programme(s)	Business Information Systems	
Title	The structure and operating principle of the GPS system	
Month and year	April 2006	
Supervisor	Paula Hietala	Pages: 34

ABSTRACT

The becoming of the products of the electronics industry cheaper and the improvement of the availability have brought the new users of the location services of the group which grows fast. The majority of the users use location services as a part of they everyday features as driving or jogging. Because the system is easy to use user can create feeling of the security which fateful results can include in the worst case when location services are for example used in a boating in open sea or with long lot wanders.

The objective of this work is to bring the readiness to understand the action of the GPS-system deeper than the surface to the end user by utilizing the data which has increased, and the understanding of possible faults and the solving of them. I study the development of the GPS-system in the work to its present format and from the satellites of the action of the technical solutions of the system to the locators.

I use the own standardization documents of the construction worker of the system as source material and some English material also. I use from the material in Finnish mainly Markku Poutanen's and Samuli Miettinen's books which have brought the GPS-system already for years to Finnish ones familiar.

It was possible well to deal with the basic attributes of the GPS-system in the work, in my opinion, and to its present format of its development. Due to the scope of source material I had to simplify technical solutions and attributes a little. The starting point for the degree working also was the fact that it could be utilized as support material in study modules which regard location services. I believe that there are advantages to many from the material for the beginners and GPS-also to the ones which had had time little to a large extent, to the enthusiasts.

Sisällysluettelo

1	JOHDANTO	5
2	KESKEISET KÄSITTEET JA TERMIT	6
3	NAVIGOINNIN HISTORIA JA KEHITYS.....	7
3.1	Latitudi purjehdus.....	7
3.2	Longitudi purjehdus.....	8
3.3	Radiomajakat	8
3.4	Satelliittien tuleminen paikannuskäyttöön.....	9
3.5	Venäjän GLOSNASS-järjestelmä	11
3.6	Euroopan vastaus Yhdysvalloille ja Venäjälle	11
3.7	Seuraava sukupolvi.....	12
4	GPS-JÄRJESTELMÄ.....	13
4.1	Järjestelmän osat.....	13
4.1.1	Satelliitit	13
4.1.2	Valvonta	15
4.1.3	Käyttäjät	16
4.2	Paikannuksen perusperiaatteet.....	17
4.2.1	Kolmiomittaus	17
4.2.2	Radiosignaalin etäisyys ja atomikello	18
4.3	Eri karttajärjestelmät ja koordinaatistot.....	19
5	TIEDONSIIRTO GPS-JÄRJESTELMÄSSÄ.....	21
5.1	Virhelähteet tiedonsiirrossa	21
5.1.1	Virhe katvealueilla.....	21
5.1.2	Ilmakehä virhelähteenä.....	22
5.1.3	Satelliiteissa ilmenevät rata- ja kellovirheet.....	22
5.1.4	Paikantimen aiheuttamat virheet	23
5.1.5	Sotilaallinen häirintä.....	23
5.2	Signaalin rakenne	24
5.2.1	Kantoaalto ja signaalin modulointi.....	25
5.2.2	PRN-koodi	26
5.2.3	C/A- ja P-koodi.....	27
5.3	Navigointiviesti	29
5.3.1	Telemetry (TLM)- ja datan ikä (HOW) bitit	30
5.3.2	Lohko 1 – Satelliitin kello ja status	30
5.3.3	Lohko 2 & 3 – Satelliitin ratatiedot	31
5.3.4	Lohko 4 & 5 – Satelliitin almanakkatiedot.....	32
6	TYÖN POHDINTA JA ARVIOINTI	33
	LÄHTEET.....	34

1 Johdanto

Tietoyhteiskunnassa teknologian kehitysvauhti on nopeaa. Markkinoille tulee jatkuvasti uusia laitteita ja järjestelmiä. Nykyajan ihminen huomaa usein käyttävänsä laitteita, joiden toimintatapa jää hyvinkin epäselväksi. Ongelmia aiheuttavat myös viat joihin keskivertokäyttäjän on hyvin vaikea reagoida. Nykyteknologiassa on myös paljon hyviä puolia. Se antaa ihmisille mahdollisuuden suorittaa esimerkiksi matemaattisia laskutoimituksia monikertaisesti verrattuna tavanomaiseen ”kynä ja paperi” -tekniikkaan. Uusi teknologia helpottaa päivittäisten asioiden hoitamista entistä enemmän sähköistyvässä yhteiskunnassamme.

Ihmiselle on kehittynyt voimakas tarve tiedostaa tilanteensa ja asemansa mahdollisimman tarkasti. Tämä ilmenee taskussa äänitelevänä matkapuhelimenä tai taskutietokoneena. Myös lompakon lukemattomat eri kulku-, sekä magneettinauhakortit vahvistavat saman ilmiön. Markkinoille on alkanut virrata myös siivikäyttöön tarkoitettuja paikannussovelluksia, jotka omalta osaltaan täydentävät ihmisen tarvetta tiedostaa asemansa. Kyseiset sovellukset houkuttelevat yksinkertaisuudellaan ja helppoudellaan uusia käyttäjiä jo.

Aina kun uutta teknologiaa valjastetaan arkikäyttäjän tarpeisiin, sen käyttööntymisestä tehdään mahdollisimman johdonmukainen ja yksinkertainen käyttö, jotta mahdollisimman suuri epähomogeeninen käyttäjäkunta osaisi toimia uuden teknologian parissa. Usein uusista teknologioista on tarjolla niukasti materiaalia tai se on pirstoutunut useisiin teoksiin ja medioihin. Tästä perusideasta sain aiheen tutkintotyöhöni, joka käsittelee GPS-paikannusjärjestelmän kehitystä nykymuotoonsa, sekä sen sanomaliikennettä, joka kulkee paikannussatelliitin ja päätelaitteen välillä. Yleensä GPS-laitteiston käyttäminen ei vaadi käyttäjältään teknistä osaamista eikä pienessäkään määrin navigointitaitoa. Käytön helppous ja laitteiston suuri tarkkuus aiheuttaa useissa käyttäjissä voimakasta turvallisuuden tunnetta, joka voi vikatilanteessa muodostua kohtalokkaaksi. Pelkästään paikannuslaitteen antaman tiedon väärin tulkitseminen voi aiheuttaa vakavan vaaratilanteen, jos laitteistoa käytetään esimerkiksi pitkillä erävaelluksilla tai avomeriveneilyssä.

Toivon tutkintotyöni auttavan uusia innostuneita GPS-teknologian käyttäjiä tutustumaan laitteistoon ”pintaa syvemältä” ja GPS:n toimintaan jo entuudestaan tutustuneiden henkilöiden tietojen täydentämistä tämän hetken laitteistojen tasolle. Materiaalin kirjoittamisessa lähdin liikkeelle ajatuksesta, että sitä voisi käyttää oppimateriaalina tai täydentävänä osana aiheeseen liittyvissä opintokokonaisuuksissa.

2 Keskeiset käsitteet ja termit

C/A – koodi = Coarse Acquisition Code. Siviiliosan PRN-koodi.

DGPS = Differential Global positioning system. Paikannuspalvelu, joka käyttää satelliittien paikannustiedon lisäksi virheenkorjaukseen erillistä maa-asemilta tulevaa yhteyttä.

GPS = Navigation system using Timing and Ranging (NAVSTAR) Global Positioning System (GPS). Etäisyyksiin ja ajan mittaukseen perustuva maailman laajuinen paikannusjärjestelmä.

Ionosfääri = Ilmakehän kerros, joka alkaa 50km ja ylettyy 400km korkeuteen. Sisältää pääasiassa ionisoituneita hiukkasia

Kolmiomittaus = Tuntemattoman pisteen sijainnin määrittäminen kolmiulotteisessa ympäristössä käyttämällä hyväksi kolmen tunnetun pisteen koordinaatteja.

Latitudi = leveyspiiri ilmaisee sijainnin suhteessa päiväntasaajaan, siitä pohjoiseen tai etelään.

Longitudi = pituuspiiri ilmaisee paikan sijainnin itä-länsisuunnassa, suhteessa Lontoon kautta kulkevaan 0-meridiaaniin.

Modulaatio = Tekniikka, jolla muokataan signaalin taajuutta tai amplitudia toisella signaalilla.

Navigointi = laivan, veneen tai lentokoneen sijainnin määrittäminen reitin valitsemiseksi. Nykyaikana tarkoittaa myös yksittäisen henkilön harrastamaa paikannääritystä.

P – koodi = Precision Code. Sotilaalliseen käyttöön tarkoitettu GPS-signaali. Signaali on salattu, ja sen vastaanottamiseen tarvitaan erikoisvastaanotin.

PRN – koodi = Pseudo Random Noise Code. Signaalin koodausmenetelmä, joka muodostetaan tarkasti tunnetusta bittikuviosta. Jokaisella satelliitilla oma yksilöllinen PRN – koodi

SA = Selective Availability. Tahallisen häirinnän tekninen menetelmä. Siviilien käytössä olevaa paikannuspalvelun tarkkuutta huononnetaan.

Troposfääri = Ilmakehän alin kerros, joka alkaa maasta ja ylettyy 50km korkeuteen. Tässä ilmakerroksessa sijaitsee suurin osa sääilmiöistä.

3 Navigoinnin historia ja kehitys

Ihmisellä on luultavasti jo ihmiskunnan syntyhetkestä lähtien ollut tarve kävelyretkillään yksinkertaista keinoa käyttäen määrittää oma sijaintinsa. Varsinainen sijainnin määrittäminen on niin perustavaa laatua oleva ongelma, että kaikki ”järjestelmät” muinaisesta ajasta tähän päivää ovat kärsineet erilaisista paikanustarkkuuteen liittyvistä ongelmista. (Henttu & Lehtoranta 1993:10.)

Ihmisen alkaessa tutkia omaa ympäristöönsä ”matkailijat” merkitsivät kulkureitinsä yleensä kiviä pinoamalla. Suurta ongelmaa tuotti löytää lumeen hautautuneet sekä sateen huuhtomat merkit muiden merkkien joukosta. (Henttu & Lehtoranta 1993:10.) Muita hyväksi todettuja merkintä tapoja olivat polkujen pilkkotaminen eli puiden kylkiin pilkkojen lyöminen.

Vanhan totutun järjestelmän suurin ongelma tuli esille, kun ihminen myöhemmin ryhtyi laajentamaan elinpiiriään ja aloitti maailman merien valloittamisen. Ei ollut mitään maantieteellisiä merkkejä, joita olisi voinut käyttää kiinnekohtina pitkillä purjehduksilla. (Miettinen 1998:14.) Ainoat asiat, joihin voitiin luottaa, olivat taivaankappaleet (aurinko päivällä ja tähdet yöllä). Ongelmaksi muodostui tähtien kaukainen sijainti. Tähdet näyttävät oikeastaan aivan samalta mistä tahansa tarkastellessa. Ainoana keinona käyttää taivaankappaleita hyväksi olivat erittäin huolelliset mittaukset.

Kehittyneimmilläkin tähtisuunnistuslaitteilla (eli ”astro”) voitiin kertoa sijainti vain likimääräisesti eli n. 2 kilometrin tarkkuudella. Valitettavasti sekään tarkkuus ei aina riittänyt, kun esimerkiksi täytyi löytää satama yöaikaan. (Henttu & Lehtoranta 1993:11.)

Varsinaisesti ensimmäinen ihminen, jonka tähtinavigointivälineistä on tehty kirjallisuuteen merkintä, oli kreikkalainen Odysseus. Homeroksen mukaan Odysseusta vankinaan pitänyt nymfi Kalypso neuvoi 15 vuoden harharetkille erehtynyttä ja kotiin matkaavaa Odysseusta yksinkertaisesti pitämään yöllä Otava vasemmalla puolella ja aamunkoitteessa jatkamaan purjehdusta kohti nousevaa aurinkoa. Tästä voidaan päätellä, että Odysseuksen kotisaari sijaitsee jossakin idän suunnassa. (Miettinen 1998:14.)

3.1 Latitudi purjehdus

Latitudipurjehdus kehittyi Välimeren maissa foinikialaisten toimesta, joita sanottiin maailman parhaiksi merenkulkijoiksi ja kauppiaiksi. Avain latitudi- eli leveyspiiri purjehdukseen on pohjantähden tunteminen. (Miettinen 1998:15.)

Varsinainen latitudi- eli leveyspiiripurjehduksen idea on varsin yksinkertainen. Ensin lähtösatamasta purjehditaan joko pohjoiseen tai etelään halutulle korkeu-

delle. Seuraavaksi laivan kurssi käännetään länteen tai itään ja pidetään taivaankappaleista Pohjantähti samalla korkeudella kunnes on saavuttu määränpäähän. Kyseinen purjehdustekniikka toimii hyvin suhteellisen pienellä ja suljetulla meri-alueilla, kuten Välimerellä. Siirryttäessä suurempien merien purjehtijoiksi oli keksittävä parempi ja tarkempi menetelmä, koska pienikin virhe suuntimassa voi aiheuttaa pisimmillä matkoilla useiden tuhansien kilometrien heiton määränpäässä. (Miettinen 1998:15.)

3.2 Longitudipurjehdus

Perusedellytys longitudin määrittämisessä on tarkalleen saman kellonajan tunteminen lähtö- sekä määränpäässä. Tämän vuoksi longitudipurjehdus oli mahdollista ennen heilurikellon keksimistä ja myös sen jälkeenkin, koska usein heiluvassa laivassa heilurikellot edistivät, jättivät tai pysähtyivät kokonaan. Ilmapaineella ja maapallon alueittain vaihtelevalla painovoimakentällä on myös oma osansa heilurikellojen epätarkkuuteen. (Miettinen 1998:17.)

Longitudin määrittelemisessä lähtökohtana täytyy selvittää jonkin tunnistettavan taivaankappaleen korkeuskulma horisontista ja kirjaamalla muistiin sen täsmällinen havaintoaika. Tätä havaintosuuretta käytetään hyväksi pidettäessä veneen suuntimaa oikeana. Mitattava taivaankappale voi olla aurinko, kuu, Jupiter, Mars, Venus tai jokin muu noin 60 kiintotähdessä. Yksinkertaisinta on mitata auringon korkeus täsmälleen keskipäivällä. Helpommaksi asian tekee, jos mittaus suoritetaan pohjoisella pallonpuoliskolla, koska aurinko paistaa täsmälleen etelästä. Kesä- ja talviajan vaihtaminen eli tunnilla eteen- tai taaksepäin kellon aikaa siirrettäessä aurinko siirtyy 15 asetetta. Kaikista näistä arvoista on olemassa yhteenvetoja, joita tähtitieteilijät ovat julkaisseet taulukkomuodossa jo vuodesta 1767. Maailman käytetyimpänä taulukkokokoelmana voidaan pitää The Nautical Almanac, jonka oikeellisuudesta vastaa kuninkaallinen ”almanakkavirasto”. (Miettinen 1998:19.)

Tähtinavigoinnin taulukot löytyvät tätä nykyä myös erilaisista ohjelmoitavista laskimista, tietokannoista sekä paikannusohjelmistoista. Ne ovat helpottaneet olennaisesti niiden ammattilaisten töitä, joiden tehtävänä päivittäin määrittää taivaankappaleista laivojen, lentokoneiden ja avaruusalusten sijaintia. (Miettinen 1998:19.)

3.3 Radiomajakat

Seuraava merkittävä askel kronometrin (mekaaninen kello) käyttöönoton jälkeen (hieman yli sata vuotta) oli italialais-englantilaisen Marconin vuonna 1908 onnistunut radiosanoman lähettäminen Atlantin valtameren yli. Tämän seurauksena radioaaltoja alettiin sovittamaan paikantamisen ja suunnistamisen apuvälineeksi. Käytännössä 1910-luvulta lähtien on rakennettu radiosignaaleihin perus-

tuvia paikannusjärjestelmiä, jotka ovat osittain käytössä yhä edelleenkin. Meriliikenteessä käytetyimmät radiosuunnistusjärjestelmät olivat Decca, Loran ja Consol, jotka palvelivat pääasiassa sotalaivoja ja kaupallista meriliikennettä. Sijainnin määrittämisessä vastaanotin valitsee sopivimmat radiomajakat, joiden signaaleja se käyttää hyväksi laskutoimituksissa. Radiomajakoiden sijainnit täytyy olla tarkasti tiedossa, jotta radiomajakoilta tulevaa synkronoitua signaalia voidaan käyttää. Vastaanottimessa oleva prosessori laskee havaintojen vaihe-eron perusteella sijaintikäyriä, joista leikkauskohdat osoittavat aluksen sijainnin. Kyseistä tekniikka kutsutaan myös nimellä hyperbelinavigaatio. (Miettinen 1998:20.)

Ilmailussa vastaavasti käytetään VOR-asemia, jotka lähettävät tunnistussignaalia ja myös suunnan mukaan vaiheeltaan muuttuvaa signaalia. VOR-järjestelmään voi myös liittää DME-systeemi, jolla paikannussignaalista voidaan lisätietona saada myös etäisyys kyseiseen lähetinasemaan. (Miettinen 1998:20.)

Käytännössä radiosuunnistusjärjestelmät ovat melko tarkkoja radiomajakoiden vaikutusalueella. Ongelmana voidaan pitää radiomajakoiden vaikutusalueita, jotka kattaa useasti vain kapean kaistan rannikosta. Maapallon pinta-alasta on vain hyvin pieni osa radiomajakoiden peittoaluetta. Esimerkkinä voidaan ottaa Suomen merialueilla toimiva Decca, joka kantaa rannikosta n. 100–150 kilometrin etäisyydelle. Vastaavasti Loran-C (”Long Range Navigation”) on tarkoitettu laajemmille vesialueille, mutta senkään kantomatka ei yllä kuin 600–700 kilometriä rannikosta. Mannerten välisessä lentoliikenteessä on käytetty Consol-järjestelmää, jonka kantavuus oli jopa 2500–3000 kilometriä. Radiosuunnistuksen tarkkuus vaihtelee suuresti avaruuden ja maan ilmakehän ajoittaisten häiriöiden vuoksi muutamista sadoista metreistä, jopa muutamisiin kilometreihin. (Miettinen 1998:21.)

3.4 Satelliittien tuleminen paikannuskäyttöön

Satelliittien avulla tapahtuva paikannus ei ole kovinkaan tuoretta tekniikkaa kuten helposti voitaisiin luulla. Satelliittiavusteinen paikannusjärjestelmä ideoitiin jo 1940-luvulla. Hankkeiden suurin hidaste oli avaruus- ja tietotekniikan kehittymättömyys. 1950-luvulla ollut Vietnamin sota vauhditti suuresti jo käynnistettyjen hankkeiden läpiviemistä. (Miettinen 2002:18.)

Ensimmäiset varteenotettavat hankkeet olivat 1960-luvulla aloitetut Yhdysvaltain laivaston TIMANTION ja ilmavoimien 621B. Molempien hankkeiden tarkoituksena oli luoda passiivisesti satelliitteja hyväksikäyttävä järjestelmä. (Poutiainen 1999:19) Maailmanlaajuisen paikannusjärjestelmän varsinainen ensiaskel otettiin, kun yhdysvaltain puolustusministeriö (Department of Defence, DoD) vuonna 1973 teki päätöksen, jossa aikaisemmat laivaston TIMANTION ja ilmavoimien 621B-ohjelmat keskeytetään ja tilalle alettiin kehittää uutta globaalia järjestelmää pohjautuen vanhoihin järjestelmistä saatuihin kokemuksiin.

Uuden järjestelmän tavoitteisiin kuului kehittää aseiden suuntaamista ja joukkojen ohjaamista avustava palvelu, jonka tarkoituksena olisi tuoda reaaliaikaista ja tarkkaa paikannustietoa kaikkialle maailmassa. Järjestelmän pääasiallinen käyttökohde oli täysin sotilaallinen, joten luonnollisesti tavoitteena oli luoda vihollisen häirintää kestävä järjestelmä. Ilmakehän ja avaruuden paikalliset häiriöt eivät myöskään saaneet aiheuttaa häiriötä järjestelmään. Tarkkuusvaatimus järjestelmälle oli yhden kanavan paikantimissa (multiplex receiver) 22 metriä vaakasuunnassa ja 28 metriä pystysuunnassa. (Miettinen 2002:20.)

Uusi järjestelmä haluttiin mahdollisimman nopeasti käyttöön, joten siihen sijoitettiin rahaa säästelemättä. Elettiin 1970-lukua, jolloin Yhdysvallat ja Neuvostoliitto liittolaisineen tukivat jatkuvasti kiihtyvää asevarustelua. Tärkeintä oli, että suurvallalla on selvä sotilaallinen etumatka kilpailijoihinsa. Tuhannet tukikohdat Yhdysvalloissa ja Neuvostoliitossa olivat valmiudessa uusin hyvin kehittynein asejärjestelmin. Ilmatiloja vartioivat useat ydinaseita kuljettavat B-52 pommikoneet. Näitä uusia asejärjestelmiä varten tarvittiin koko maailman kattava, reaaliaikaista paikannustietoa toimittava ja kaikissa olosuhteissa toimiva paikannusjärjestelmä. Yhdysvallat sijoittivat paikannusohjelmaansa n. 20 miljardia dollaria ja sai vuonna 1978 laukaistua ensimmäisen sukupolven Navstar I -satelliitin. Vuoteen 1985 mennessä taivaalle oli ammuttu ensimmäisen sukupolven satelliitteja neljä kappaletta, joista viimeinen oli toiminnassa vielä kesällä 1995. (Miettinen 1998:26.)

Ohjelman seuraava vaihe käynnistyi vuonna 1979. Tällöin toisen sukupolven satelliitteja (Block II) alettiin valmistamaan. Ensimmäinen uuden sukupolven satelliiteista päästiin laukaisemaan radalleen useiden viivästymisten jälkeen vasta kymmenen vuoden kuluttua. Vuosina 1989 - 1993 laukaistujen viiden Block II -satelliitin jälkeen talvella 1993 järjestelmää ohjaava Yhdysvaltain ilmavoimien avaruustoimintojen yksikkö AFSC (U.S. Air Force Space Command) ilmoitti järjestelmän olevan alustavassa operatiivisessa valmiudessa (Initial operational capability, IOC). (Poutanen 1999:19.)

Kahta vuotta myöhemmin kesäkuussa 1995 AFSC ilmoitti GPS-järjestelmän olevan sotilaallisista toiminnoiltaan testattu ja operatiivisesti täysin valmis (Full operation capability, FOC). Tällöin käytössä oli 24 toisen sukupolven Block II/A -satelliittia, joiden määrä kattoi koko maapallon 24 tuntia vuorokaudessa. (Miettinen 2002:20.)

Tällä hetkellä GPS-järjestelmän käytöstä vastaa Yhdysvaltain ilmavoimien avaruushallinto (USAF Space System Division). Toimintojen käytännön koordinoi ja on JPO (Navstar GPS Joint Program Office) ja siviilikäytön yhteysvirastona toimii Liikenneministeriö (Department of Transport, DoT). (Miettinen 2002:20.)

3.5 Venäjän Glonass -järjestelmä

Neuvostoliitto aloitti toisen maailmansodan jälkeen kilpavarustelun, johon kuului maailmanlaajuinen järjestelmä, jolla voitaisiin saada reaaliaikaista tietoa ohjusjärjestelmien suuntauksessa. Neuvostoliiton satelliittipaikannusjärjestelmä perustui melkein täysin Yhdysvaltain kehittämään GPS-järjestelmään. Glonass:n pääjohtokeskus on Moskovassa ja ohjausasemat Pietarissa, Tarnopolissa Ukrainassa, Jeniseiskissä Länsi- ja Itä-Siperian rajalla sekä Komsomolska-na-Amuressa Venäjän Kaukoidässä.

Venäjällä on ollut suuria teknisiä ja taloudellisia vaikeuksia oman järjestelmänsä ylläpidossa. Venäjä on yhteensä lähettänyt avaruuteen arviolta 100 satelliittia, joista 14 on tällä hetkellä toiminnassa. (Glonass History 2006)

Neuvostoliiton hajottua on järjestelmää ja paikantimia kehitetty pääosin kansainvälisellä rahoituksella, josta johtuen on saatavilla laitteita, jotka tukevat sekä Yhdysvaltaista että Venäläistä signaalia. Laitteet ovat tosin niin kalliita, että niitä pystyvät ostamaan ainoastaan suuret kansainväliset yritykset ja niiden tutkijat. (Miettinen 2002:23.)

3.6 Euroopan vastaus Yhdysvalloille ja Venäjälle

Aikaisemmin kaikki paikannuspalveluihin liittyvät järjestelmät ovat olleet Yhdysvaltain ja Venäjän hallinnon määräysvallassa, josta hyvänä esimerkkinä voidaan pitää häirintää, joka siviilisovelluksissa huonontaa paikannustarkkuutta noin 300 metriin. Myös paikka paikoin Yhdysvallat olivat ”sammuttaneet” tiettyjen alueiden paikannuspalvelut siviilikäytöstä. Tällainen riippuvuus Yhdysvaltain ja Venäjän sotilaallisista järjestelmistä vaikuttaa suoranaisesti Euroopan turvallisuuteen ja satelliittipaikannusta käyttävien palvelujen suunnitteluun.

Euroopan unioni päätti aloittaa keväällä 1999 Galileoksi ristityn satelliittipaikannusjärjestelmän suunnittelun eurooppalaiseen avaruustutkimusjärjestöön (ESA) kuuluvien 14 jäsenmaan liikenneministereiden kanssa. Projektin varsinaiseen kehitysvaiheeseen varattiin 235 miljoonaa euroa. Ensimmäinen kahdesta koesatelliitista, GIOVE A, laukaistiin 28. joulukuuta 2005, jotta järjestelmän radiotaajuus pysyy voimassa. Alun perin järjestelmän piti olla toimintavalmiina 2008, mutta valmistuminen on viivästynyt vuoteen 2010. Valmiin järjestelmän pitäisi koostua 30 satelliitista ja 3 varasatelliitista. (Galileo 2006)

Euroopan ilmoittaessa suunnitelmistaan perustaa oma satelliittinavigointijärjestelmä Yhdysvallat alkoi nopeasti tehdä muutoksia omaan GPS-järjestelmäänsä, jotta ei menettäisi suurta osaa jo olemassa olevista asiakkaistaan. Kaikkien yllätykseksi toukokuussa 2000 GPS:n SA-häirintä suljettiin ja GPS:n tarkkuus parani suorastaan hämmästyttävän tarkaksi.

3.7 Seuraava sukupolvi

Tulevaisuus näyttää, mihin suuntaan satelliittinavigointi on kehittymässä, mutta viimeisimpiä merkkejä seuratessa ei voi olla huomaamatta yhä nopeampien ja tarkempien teknologiaratkaisujen olevan tulossa markkinoille. Myös järjestelmien rakentamisen ja ylläpidon rahoitus on monessa tapauksessa kysymysmerkki. Tällä hetkellä satelliittiavusteiset navigointijärjestelmät ovat täysin ilmaisia käyttäjille sekä yksityisellä että yritys-/yhteisösektorilla. Luultavasti uusi, kalliimpi ja parempi teknologia tuo tähän muutoksen mahdollisen käyttömaksun muodossa.

4 GPS -järjestelmä

Satelliittinavigoinnin perusteiden ymmärtäminen vaatii myös varsinaiseen teknologiaan tutustumisen. Monesti on helpompi hallita kokonaisuus kun on tietoinen sen osatekijöistä. Varsinaiseen ”nippelitiedon” tasolle ei tarvitse mennä. Jo pelkästään teknisten ratkaisujen ymmärtäminen periaatetasolla luo hyvän pohjan järjestelmän kokonaisuuden ymmärtämiseen. Kokonaisuuden hahmottuessa myös erilaiset paikannuksessa tapahtuvat virheet ja epätarkkuudet selittyvät helpommin.

4.1 Järjestelmän osat

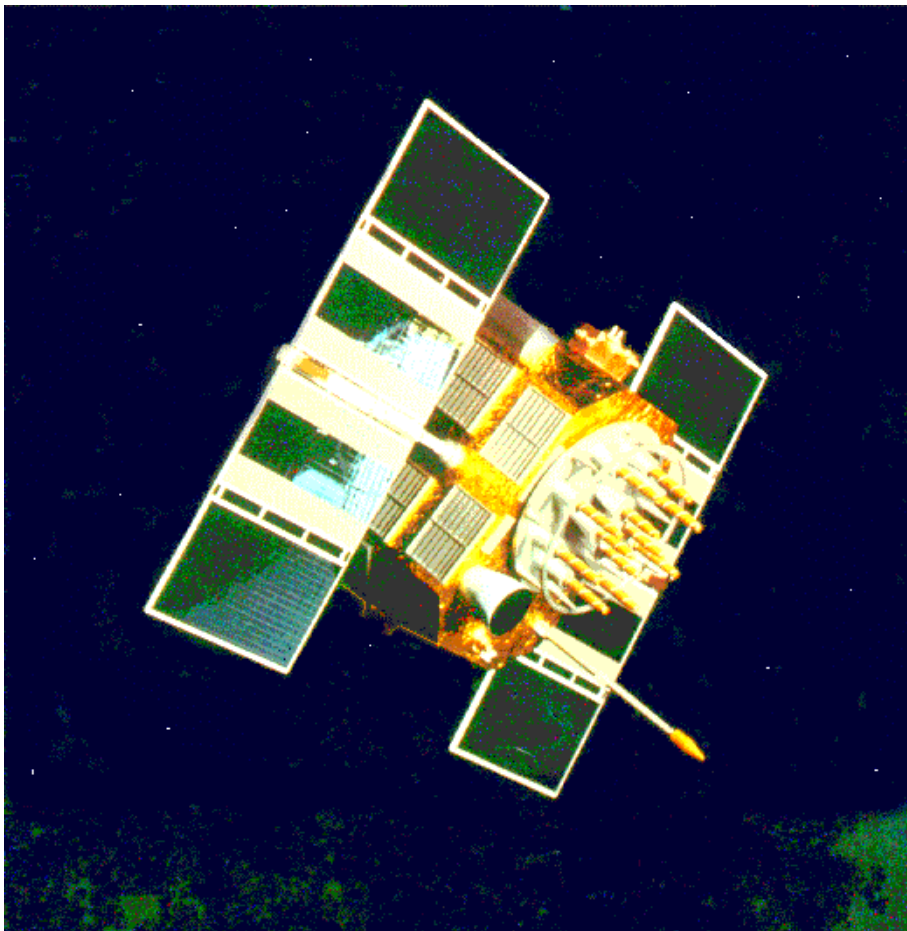
Järjestelmä on tarkoituksella jaettu sen loogisen ymmärtämisen takia kolmeen osaan: satelliitit (käytetään myös nimeä ”avaruusosa”), valvonta (eri maa-asetat) ja loppukäyttäjän paikantimet. Jokainen lohko itsessään sisältää valtaavan määrän tietoa, joiden läpikäyminen on loppumaton urakka, joten päätin ottaa esille tärkeimmät seikat, jotka vaikuttavat loppukäyttäjän kykyyn hallita hankkimansa paikannuslaitteiston käyttö ja sen oikeanlainen toiminta eri tilanteissa.

Jokaisella järjestelmän osalla on oma tehtävänsä, jotka voidaan esittää seuraavalla tavalla:

1. satelliitit
 - paikannuksen kiintopisteitä (tähtien korvikkeita)
 - sijaintitietojen lähettäminen paikantimiin (kaikkialle maailmaan)
 2. maa-asetat
 - järjestelmän valvonta ja ohjaus
 - navigaatioviestien päivitys (paikannuslaskelmissa tarvittavat tiedot)
 3. käyttäjä
 - satelliiteista tulevan tiedon vastaanotto
 - sijainnin laskeminen tulevan tiedon pohjalta
 - navigointiohjeiden välitys käyttäjälle
-

4.1.1 Satelliitit

Viimeisen 25 vuoden aikana avaruuteen on laukaistu useita teknologialtaan eritasoisia satelliitteja. Tämän hetken järjestelmällä on käytössä toisen sukupolven Navstar GPS/Block II/IIA -satelliitteja 28 kappaletta ja varalla 4 kappaletta (Katso kuva 1 & 2.). Satelliittien suurella määrällä pyritään varmistamaan täysin aukoton verkko maapallon joka kolkkaan. Järjestelmän toiminnan kannalta täytyy joka hetkellä horisontin yläpuolella ja taivaan näkyvällä osalla olla vähintään 3 satelliittia.



Kuva 1. Navstar GPS/Block II/IIA -satelliitti
(<http://www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/gps/gif/sv3.gif>)

NAVSTAR GPS/BLOCK II -SATELLIITTI
Valmistaja: Rockwell International
Paino: 1,665 kg (laukaisupaino)
Koko: 5,3m (aurinkopaneelit avoinna)
Aurinkopaneelit: 2 kpl piipaneleita
Lähetystaajuuudet: 1572,42 ja 1227,60 MHz (L-taajuuudet)
Vastaanottotaajuus: 1783,74 Mhz
Voimanlähde: 710W
Kellot: 2 kpl cesium ja 2 kpl rubidium -kelloja
Toiminta-aika: 7,5 vuotta (suunniteltu)
Kiertoradan korkeus: 20183 km
Nopeus kiertoradalla: 3,874 km/s eli lähes 14,000km/h

Kuva 2. Tekniset tiedot GPS-satelliitista.

Satelliitit sijoittuvat kuudelle eri kiertoradalle, joissa kussakin liikkuu 4 satelliittia peräkkäin. Peräkkäisten satelliittien väli on 60 astetta. Vastaavasti kiertoratojen kaltevuuskulma on 55 astetta. Täten satelliittien kiertoradat eivät ulotu 55 leveyspiiriä lähemmäksi napa-alueita. Satelliittien korkeudesta johtuen signaalien kantavuus kattaa myös kyseiset katveeseen jäävät alueet. Jokainen satelliitti kiertää maan 2 kertaa vuorokaudessa. (Miettinen 2000:28.)

Kyseinen järjestely turvaa sen, että koko ajan joka puolella maapalloa on käytävissä vähintään 3 satelliittia horisontin yläpuolella. Uusi teknologia mahdollistaa, jopa 12 yhtäaikaisen signaalin rinnakkain käsittelyn. Tällä seikalla saadaan loppukäyttäjien paikantimet huomattavasti tarkemmiksi ja nopeammiksi. Tavanomaisesti käytössä on 7-8, hyvässä tapauksessa 9-10 ja parhaimmillaan 12 satelliittia. (Miettinen 2000:29.)

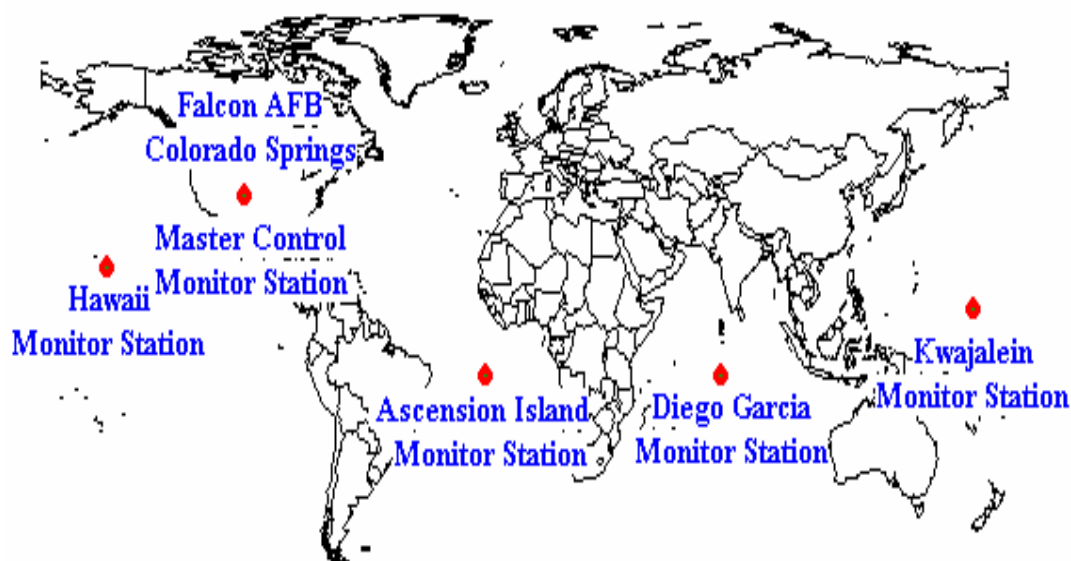
Reaaliaikaisen satelliittitilanteen ja niiden statuksen voi käydä tarkastamassa internet osoitteesta: <http://www.navcen.uscg.gov/ftp/gps/status.txt> . Kyseistä sivustoa ylläpitää U.S. Coast Guard Navigation Center, joka on GPS-järjestelmän virallinen ylläpitäjä. Saman sivuston kautta voi myös raportoida ongelmista, joita GPS-järjestelmässä esiintyy.

4.1.2 Valvonta

GPS-paikannusjärjestelmän ylläpidosta huolehtii Yhdysvalloissa sijaitseva Master Control Station (Colorado Spring), sekä viisi eri puolille, lähellä maapallon päiväntasaajaa, sijoitettua miehittämätöntä valvonta-asemaa (Havaiji, Colorado Springs, Kwajalein Tyynellä Valtamerellä, Diego Carsia Intian Valtamerellä,

Ascension Atlannilla) (Katso kuva 3.). Keskusvalvonta-aseman tehtävä on kerätä korjattuja satelliittien ratatietoja itsenäisiltä valvonta-asemilta ja näillä muutujilla korjatut navigointiviestit ladataan uudestaan satelliitteihin. Vaikka satelliittien radat on laskettu niin tarkoin kun nykytietämys sallii, niihin vaikuttaa esimerkiksi kuun ja auringon vetovoima, sekä auringon säteilypainne, joita on lähes mahdoton esittää täsmällisesti matematiikan avulla. Tästä johtuen navigaatioviestien päivityksiä pitää syöttää aika-ajoin järjestelmään, jotta sen tarkkuus pysyisi sallitussa rajoissa.

Ratatietojen lisäksi korjauksia tehdään ionosfääriparametreihin. Ionosfääriparametreilla tarkoitetaan maan ilmakehän muutoksista aiheutuvia signaalien vääristymistä sekä hidastumista. Ilmakehässä on kaksi kerrosta, jotka vaikuttavat todennäköisimmin GPS-järjestelmän signaaleihin. 50-400 kilometrin korkeudella oleva ionosfääri, sekä lähempänä maan pintaa sijaitseva troposfääri. Käytännössä ilmakehän virheet ovat onneksi vain 4 metrin luokkaa, ja ne tulevat esille vasta ammattikäyttöön suunnitelluista paikannussovelluksissa.



Kuva 3. Valvonta-asemat ympäri maapallon
(<http://www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/gps/gif/gpscont.gif>)

4.1.3 Käyttäjät

Käyttäjät-osalla tarkoitetaan GPS-vastaanottimen omistajaa tai järjestelmää, joka hyödyntää satelliiteilta saatavaa tietoa. GPS-järjestelmän tuottamista tiedoista pääosin käytössä ovat tarkka aika, nopeus ja sijainti (XYZ-akselisto). Vastaanotinta valittaessa on hyvin tärkeää kiinnittää huomiota ominaisuuksiin,

joiden tulisi olla käyttökohteen mukaan valittu. Hyvänä esimerkkinä voidaan pitää suuren tarkkuuden vaativia geodeettisia mittauksia. Geodeettisissa mittauksissa poikkeaman pitää olla huomattavasti alle 3 metriä, joten ainoaksi vaihtoehdoksi jää käyttää vastaanotinta, joka kykenee differentiaaliseen mittaukseen (DGPS). DGPS-tekniikan perusajatus on kumota paikannustarkkuuteen vaikuttavat häiriöt kommunikoimalla reaaliaikaisesti maa-asemien kanssa ja saaden niistä korjauskertoimia olosuhteiden mukaan.

Tällä hetkellä peruskäyttäjän integroidun GPS-vastaanottimen hinta liikkuu 100 - 500 eurossa (<http://www.lohennette.fi>). Hintaluokan alkupäässä ovat laitteet, joiden vastaanotto rajoittuu satelliiteista saatavien perustietojen esittämiseen käyttäjälle pääosin numeerisessa muodossa. Vastaavasti hintaluokan yläpäässä ovat laitteet, jotka ovat jo varustettu hyvin suorituskykyisellä mikroprosessorilla ja tehokkaalla käyttöliittymällä. Täten mahdollistetaan monen uuden ominaisuuden mukaantulo kasvaneen laskuoperaatioiden määrän ansiosta. Hyvinä esimerkkeinä näistä ominaisuuksista on graafinen värinäyttö karttaohjelmiseen, kompassi, parantunut tarkkuus ja www-yhteys päivityksiin.

Saatavana on myös joukko ”passiivisia moduuleita”, joiden tarkoitus on ainoastaan ottaa vastaan satelliiteilta saatua dataa ja siirtää se haluttuun laitteeseen. Itselläni on ollut jo muutama vuosi käytössä HAICOM HI-203E (80e), jota käytän kannettavan tietokoneen COM-portin välityksellä. Laitteen vastaanotokyky vastaa täysin kalliimpien integroitujen vastaanottimien ominaisuuksia, mutta kuitenkin hinta on vain murto-osa siitä. Tietokoneen hoitaessa laskutoimitukset saadaan moduulista hyvin kevyt järjestelmältään ja edullinen.

4.2 Paikannuksen peruseriaatteet

Toiminnaltaan GPS-järjestelmä on helppo omaksua, koska se on melko yksinkertainen periaatteellisella tasolla. Toimintaperiaatteeltaan paikanmääritys nojautuu pääasiassa kolmeen perusasiaan:

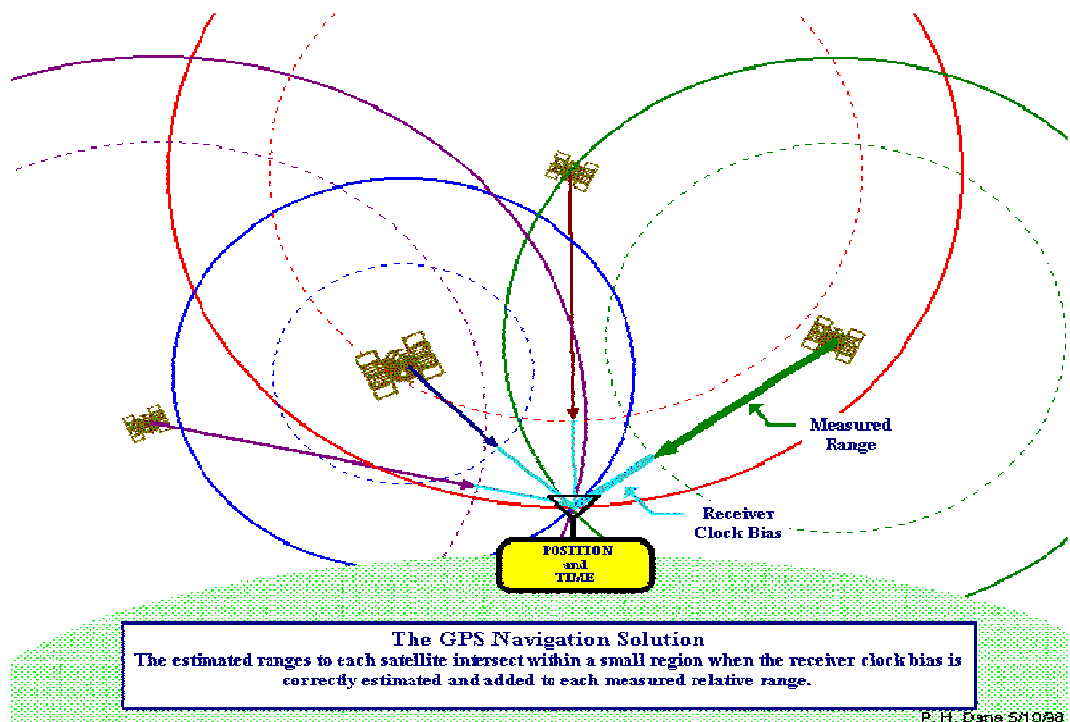
1. Satelliittien ja paikantimen välisen etäisyyden avulla tehty kolmiomittaus eli trilateraatio.
2. Radiosignaalin etäisyys, joka saadaan mittaamalla sen kulku-aika.
3. Tarkan kellon (atomikello), jonka avulla saadaan laskettua tarkka etäisyys.

Varsinaiseen paikkatietoon vaikuttaa myös joukko erilaisia ns. häiriötekijöitä. Osa häiriöistä on tarkoituksella luotu ja osa luonnon aiheuttamaa. Hyvänä esimerkkinä ihmisen aiheuttamasta häiriöstä voidaan pitää sotilaallista SA-koodia. Kyseisen koodin tarkoitus on tahallisesti heikentää siviilikäytössä olevien paikantimien tarkkuutta. Tarkkuusheikennys on luokkaa 10 m. SA-koodin

valvonta ja heikennystaso on täysin Yhdysvaltain armeijan hallussa. Vastavasti luonto aiheuttaa myös häiriöitä GPS-järjestelmään. Tästä esimerkkinä voidaan ottaa monitieheijastus. Monitieheijastus nimensä mukaisesti sekoittaa signaalia heijastamalla tasaisista pinnoista kuten kallio tai vaikka tyynen järven pinta. Mitä lähempänä horisonttia tuleva signaali on sitä helpommin signaali siitä heijastuu. Heijastumasta aiheutuva paikannuksen heikkeneminen on luokkaa 10–20 m. (Miettinen 2002:51.)

4.2.1 Kolmiomittaus

Koko GPS-paikannusjärjestelmä perustuu satelliittietäisyyksiin. Käytännössä tämä tarkoittaa pääasiassa avaruusgeometrian peruseriaatteiden soveltamista. Määrittäessä kolmiulotteisessa tilassa oleva sijainti, täytyy tuntea ennalta vähintään kolmen kiintopisteen sijainti ja etäisyys. Tuloksena saadaan kaksi sijaintia. Päättelämällä kyseisestä vastauksesta voidaan huomata, että toinen vastauksista on joko todella kaukana avaruudessa tai maakuoren sisällä ja toinen vastaanottimen paikka maapallon pinnalla. Käytettäessä neljää tunnettua pistettä sijainnin määrittämisessä lopputuloksesta saadaan yksiselitteinen eikä päätteilyä tarvitse suorittaa. Kuvassa 4 on esitetty kolmiomittauksen tulokset ennen väriin vastauksien poissulkemista.



Kuva 4. Kolmiomittauksen kaikki tulokset
(<http://www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/gps/gif/figure09.gif>)

4.2.2 Radiosignaalin etäisyys ja atomikello

Satelliitin ja vastaanottimen etäisyys saadaan laskettua käyttämällä hyväksi fyysikan peruskaavaa:

$$\text{etäisyys (s)} = \text{nopeus (v)} \times \text{aika (t)}$$

Kun tiedetään radioaallon nopeus tyhjiössä (300 000 km/s) ja matkaan kulunut aika, joka saadaan atomikelloista, voidaan määrittää kohteen etäisyys tarkasti. (Nurmi & Varsila.1990.)

Radiosignaalin suuri nopeus vaikeuttaa ajanottoa, jos esimerkiksi satelliitti on suoraan yläpuolella (lyhin matka) signaalin kulkuaika on n. 70 ms (0,07 s) luokkaa. Jo pienikin mittarivirhe voi aiheuttaa suuria heittoja paikannustarkkuudessa. Esimerkiksi 1 ms poikkeama ajan mittauksessa aiheuttaa paikanmäärittämiseen n. 300 km virheen. Tästä johtuen GPS-järjestelmän kellojen täytyy olla todella tarkkoja (Taulukko 1). Tällä hetkellä satelliiteissa ja maa-asemissa käytetään Cesium-atomikelloa, joka pystyy kahden ja puolen tunnin aikavälillä toimimaan nanosekunnin tarkkuudella (0,000 000 001 s).

Taulukko 1: eri tekniikalla toteutettujen kellojen suhteellisia tarkkuuksia ja taajuuksia (Poutanen 1999: 50)

Oskillaattorityyppi	Taajuus (Ghz)	Tarkkuus	1ns virhe
kvartsikide	n. 0.005	$10 \cdot 10^{-9}$	1 s
rubidium	6.834682613	$10 \cdot 10^{-12}$	15 min
cesium	9.19263177	$10 \cdot 10^{-13}$	2.5 h
vetymase	1.420405751	$10 \cdot 10^{-15}$	11 vrk

4.3 Eri karttajärjestelmät ja koordinaatit

Jotta GPS-järjestelmää voisi hyödyntää täysipainoisesti, on siitä saatavaa tietoa voitava verrata johonkin jo olemassa olevaan. Tässä tapauksessa tieto, johon saatavaa paikkatietoa verrataan, on eri karttaprojektioissa olevat koordinaatit. Useimmiten kyseisen tiedon sovittaminen ei ole kovinkaan helppoa, koska käytössä on monta eri koordinaattijärjestelmää (Map Datum). Yleisimmiksi koordinaatistojärjestelmiksi täällä Suomessa voidaan sanoa suomalaista KKJ -

karttakoordinaatistojärjestelmää ja kansainvälistä WGS84 (World Geodetic System 84) -järjestelmää.

Syynä monen eri koordinaattijärjestelmän käyttöön on maapallon epäsymmetrisyys. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että kun maapallon kupera pinta yritetään kuvata mahdollisimman tarkasti tasaisessa muodossa, se aiheuttaa paikoin epätarkkuuksia. Suomessa käytetty kuvaus (projisointi) on 1920-luvun alkupuolelta oleva Gauss-Krugerin menetelmä.

GPS-järjestelmän loppukäyttäjien kannalta tärkein asia koordinaatistoissa on niiden tietojen yhteen sovittaminen. Toisin sanoen tiedon muuntaminen järjestelmästä toiseen. Kyseiset toimenpiteet ovat lähes poikkeuksetta hieman matemaattisia. Lisätietoa muunnoksista ja koordinaattikonverttereita löytyy esimerkiksi, lähteestä: http://www.cosports.com/tools/gps_coords.htm.

5 Tiedonsiirto GPS -järjestelmässä

Tämän luvun tarkoituksena on tutustuttaa GPS-järjestelmän tiedonsiirtoon. Ennen varsinaista navigointiviestin tutkimista halusin käydä tarkemmin lävitse signaalin rakenteen, sekä siihen vaikuttavat virhelähteet.

GPS-järjestelmän käyttäjäkunnan kaksijakoisuuden vuoksi tarkastelen asiaa tavallisen käyttäjän kannalta sotilaallisen järjestelmän käyttäjän sijasta. Ero ei ole periaatteessa suuri, mutta sotilaallisen järjestelmän täysipainoinen tarkasteleminen on vaikeaa, koska kyseisestä järjestelmästä ei ole kovinkaan tarkkaa tietoa tarjolla yksityishenkilöille. Tästä huolimatta yritän selvittää sotilaallisen soveluksen erot perinteiseen GPS-järjestelmään periaatetasolla.

5.1 Virhelähteet tiedonsiirrossa

Vaikka paikannuspalvelun kehittämiseksi on käytetty suuria määriä rahaa sekä uusinta teknologiaa, on silti virhelähteitä, joita ei voida poistaa. Vaikka virhelähteiden poisto ei täysin onnistuisikaan, voidaan ne silti ottaa huomioon ja saada lopputulos erittäin lähelle todellista arvoa.

Tilanteissa, joissa paikannustarkkuuden täytyy olla todella suuri, voidaan virhelähteiden vaikutus lähes poikkeuksetta minimoida tai jopa poistaa. Tämä toimenpide vaatii kalliiden lisälaitteiden ja lisäominaisuuksien käyttöä, joka usein on tavallisen käyttäjän ulottumattomissa. Mutta jo virhelähteiden tuntemisella ja niiden huomioon ottamisella voi tavallinenkin käyttäjä saada paikannustarkkuutensa parantumaan sekä muuttumaan luotettavammaksi.

5.1.1 Virhe katvealueilla

Yleisin virhelähde, johon GPS-järjestelmän käyttäjä törmää on ns. katvealue. GPS-järjestelmän käyttämä radiosignaali ei läpäise kiinteitä esteitä kuten kallio, mäet, talot, tiheät puut ja auton kori. Kyseinen virhelähde huomataan yleisesti paikantimen alkaessa hidastua tai hukatessa kokonaan signaalin. Metsässä liikuttaessa tilanne voidaan korjata siirtymällä vapaampaan maastoon, jossa on mahdollisimman suuri näkyvyys taivaalle. Eniten ongelmia aiheuttavat paikantimet, joita käytetään suurkaupunkien keskustoissa. Hyvänä esimerkkinä voidaan mainita takseissa oleva paikannusjärjestelmä, joka auttaa asiakkaiden noudossa ja kuljetuksessa. Usein kaupunkien keskustat ovat hyvin tiheään rakennettujen korkeiden talojen aluetta. Tässä ympäristössä on hyvin vaikeaa saada paikannusjärjestelmää toimimaan tarpeeksi luotettavasti ilman lisäantennin sijoitusta auton katolle.

Monitieheijastus luetaan yleensä myös katvealueiden ongelmaksi. Tällä tarkoitetaan tilanteita, joissa signaali pääsee heijastumaan jonkun kiinteän kohteen kautta paikantimen antenniin. Kiinteillä kohteilla tarkoitetaan yleensä kallioita, talojen katoja tai seiniä. Tämän virhelähteen neutralisoimiseksi on siirryttävä paikkaan, jossa heijastavia pintoja ei ole tai käyttämällä uudempia paikantimia, joissa on käytössä kehittyneempi signaalinkäsittelytekniikka ja antenni, joka pienentää heijastusvaikutusta.

5.1.2 Ilmakehä virhelähteenä

Jotta signaali pääsisi kulkemaan satelliitilta käyttäjän paikantimeen, sen täytyy kulkea n. 20 000 km matka halki ns. väliaineen. Tämä ”väliaine” muodostaa monimutkaisen kokonaisuuden, joka täytyy ottaa huomioon paikannustietoa korjatessa. Ilmakehä voidaan jakaa GPS-järjestelmää häiritsevien kerrosten mukaan kahteen osaan: **ionosfääriin ja troposfääriin**.

Ionosfäärillä tarkoitetaan ilmakehän kerroksia, jotka ulottuvat 50 kilometristä aina 1000 kilometriin asti. Huomattavin häiritsevä tekijä ionosfäärissä on se sisältämä suuri määrä varautuneita hiukkasia. Tässä tapauksessa huomattavin ryhmä on elektronit. Elektronien tiheys on suoraan verrannollinen kyseisessä kerroksessa tapahtuvan signaalin vääristymiseen. Elektronitiheyttä on tutkittu eri vuorokauden, vuoden sekä auringon aktiivisuuden aikana ja tultu siihen tulokseen, että esimerkiksi päiväaikaan elektronitiheys on 5 kertaa suurempaa kuin yöaikaan ja tästä johtuen vuoden pimeimpinä kuukausina elektronitiheys on neljäsosa vastaavasta tilanteesta valoisaan aikaan verrattuna. Auringon ollessa aktiivisimmillaan hiukkastiheys on 4 kertaa suurempi vastaavaan passiiviseen tilanteeseen. Edellä mainituista seikoista johtuen kyseistä kerrosta kutsutaan myös GPS-signaalin kannalta dispersiiviseksi eli signaalin vaihe- ja ryhmänopeus ei ole enää sama. Käytännössä ionosfäärin aiheuttama kulkumatkan virhe on noin metristä kymmeneen metreihin. (Poutanen 1999:117.)

Troposfääri on ilmakehän alin kerros, joka on pääasiassa täynnä vesihöyryä ja muita epäpuhtauksia. Höyrypitoisuuden mukaan kerros jaetaan kahteen osaan: 90 % kuivakerrokseen ja 10 % kosteakerrokseen. Satelliitin ollessa lähellä horisonttia kulkumatkaan tuleva virhe kasvaa (kulkumatka alimmassa kerroksessa pitenee). Kyseinen kerros on erittäin haitallinen tarkkuusmittauksissa, koska sitä on lähes mahdotonta huomioida virheenkorjauksessa. Tämän kerroksen virhevaikutus signaalin kulkumatkaan on kahden metrin luokkaa. (Poutanen 1999:117.)

5.1.3 Satelliiteissa ilmenevät rata- ja kellovirheet

Tämä virhelähde on tavallisen käyttäjän kannalta asia, jota ei voi huomioida paikannustietoja käsitellessä. Kun puhutaan satelliittien radoissa tapahtuvista muutoksista, niiden tutkiminen on haastavaa. Radanlaskussa täytyy ottaa huo-

mioon mm. planeettojen vetovoimien aiheuttamat häiriöt, maapallon massapainojakauma, auringon säteilypaino ja aurinkotuuli. Huonona puolena satelliitin ratavirheissä on se, että niitä ei voida korjata jälkikäteen. Ratavirheiden ilmetessä GPS-järjestelmän maaorganisaatio alkaa muuttaa satelliiteista lähtevien paikannustietojen korjauskertoimia. Tämä luonnonilmiöistä lähtöisin oleva virhelähde aiheuttaa noin metrin virheen satelliitin sijainnissa. (Poutanen 1999:105.)

Todella tarkoista atomikelloista huolimatta satelliittien ajoituksessa esiintyy myös virheitä. Yleisin nykyaikana satelliiteissa oleva atomikellon oskillaattorin tyyppi on cesium. Cesium oskillaattorin luoma virhe on 1 nanosekunnin luokkaa kahden ja puolen tunnin aikajaksolla. Nanosekunnin ero vaikuttaa lopputuloksessa noin 30 cm verran. Kellovirheen korjauksessa pätee sama seikka, kun ratavirheissä: varsinaista kelloa ei siirretä, vaan satelliitille siirretään tieto, joka kertoo kuinka paljon väärässä sen kello on. Tämän tiedon mukaan satelliitti koodaa lähetetyn signaalin aikajakson. (Poutanen 1999:50.)

5.1.4 Paikantimen aiheuttamat virheet

Paikantimen aiheuttamat virheet ovat käyttäjän kannalta harmillisia. Tietyt ominaisuudet on lisätty laitteeseen jo sen valmistusvaiheessa ja harvoin kyseistä laitetta pystyy enää jälkikäteen päivittämään. Yleensä peruspaikantimissa käytetään kvartsikidettä, jonka tarkkuuden ero satelliiteissa olevaan cesiumoskillaattoriin on huomattava. Saman nanosekunnin virheen, jonka cesium saa aikaan kahdessa tunnissa, ilmenee kvartsioskillaattorilla varustetuissa paikantimissa yhdessä sekunnissa. Tästä johtuen tarkemman paikannuksen vaativissa kohteissa käytetään ulkopuolista taajuuslähdettä tasaamaan huonon vakio-oskillaattorin luotettavuutta. Käytettäessä esimerkiksi vetymase-oskillaattoria päästään vastaanottimessa kellovirheestä eroon lähes kokonaan (1 ns virhe / 11 vrk). Vastaavasti toinen tarkkuutta huonontava seikka on matemaattisten laskutoimitusten lopputuloksien pyöristäminen. Kyseinen laskutoimitusten pyöristäminen ilmenee lopputuloksessa yleensä pieninä tai selkeän suurina virheinä. Suuret virheet on helppo huomata lopputuloksessa. Vastaavasti pienemmät virheet muuttavan vain vähän lopputulosta ollen hankalammin havaittavissa ja tästä johtuen paikannuksen luotettavuus kärsii. (Miettinen 2000:55.)

5.1.5 Sotilaallinen häirintä

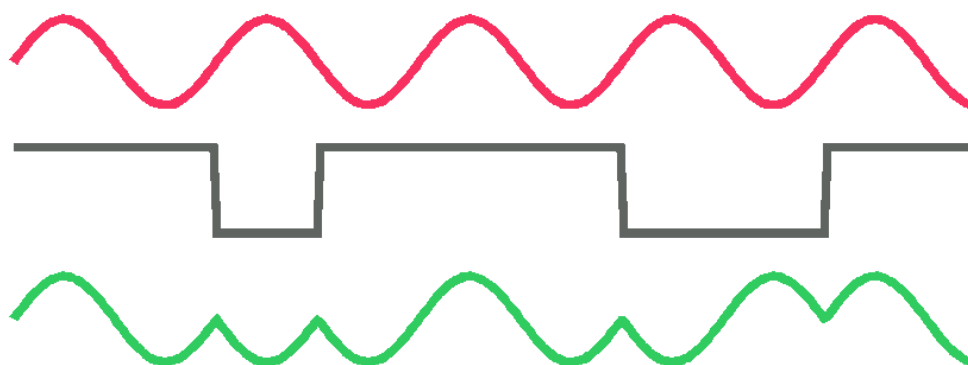
Sotilaallisella häirinnällä tarkoitetaan tarkoituksenmukaisen virheen lisäämistä paikannussignaaliin. Tämä tunnetaan toiselta nimeltään *rajoitettu saatavuus*, SA (Selective availability). Järjestelmän tarkoitus on huonontaa tai jopa poistaa siviilikäyttöön tarkoitettu paikannuspalvelu kohdennetusti koskien tiettyä aluetta. Paikannustarkkuuden huonontaminen saadaan aikaan satelliittien kellot ja rata-tietoja muuttamalla. Signaalien tahallinen huonontaminen vaikuttaa käytännössä paikannustulokseen noin 30 metriä. (Poutanen 1999:111.)

Kuten edellä huomataan, käytännössä signaalissa on kaksi toisestaan poikkeavaa kantaaltoa L1 ja L2. L1-kantaalto on tarkoitettu siviilikäyttöön ja vastaavasti L2-kantaalto sotilaallisiin sovelluksiin. Signaalin rakenteen monimutkaisuuden pääsyy on sen käyttö sotilaallisissa tarkoituksissa. Järjestelmän täytyy toimia yksisuuntaisesti eli käyttäjä ei kommunikoi satelliittien kanssa. Sen sotilaallisella puolella oleva algoritmin on oltava mahdollisimman salattu.

5.2.1 Kantaalto ja signaalin modulointi

Kantaaltoa käytetään apuna tilanteissa, jossa analogista tai digitaalista tietoa täytyy kuljettaa läpi analogisen yhteyden esimerkiksi ilmatien. Haluttu siirrettävä tieto moduloidaan kantaaltoon. Toisin sanoen kantaallon tehtävänä on toimittaa sähköinen viesti vastaanottajalle. GPS-järjestelmässä vastaavanlainen yhteys on analoginen satelliitin ja vastaanottimen välissä.

Moduloinnissa ideana on ns. upottaa siirrettävä signaali kantaallon sisään. Kantaalto on mitoitettu siten, että sen kulkemalla matkalla siihen kohdistuisi mahdollisimman vähän häiriöitä (vääristymiä) ja se olisi mahdollisimman kustannustehokas signaalia lähettävien ja vastaanottavien laitteiden kannalta. (Wikipedia 2006)



Kuva 6. GPS-järjestelmässä tapahtuvan modulaation periaate (Poutanen 1998)

Kuvassa 6 ylimpänä on haluttu alkuperäinen kantaalto, joka ei sisällä vielä mitään informaatiota. Keskimmäisenä kuvassa on digitaalinen koodipätkä, joka halutaan moduloida kantaaltoon. Alimpana kuvassa on edellisten kahden signaalin modulaatio. Toimintaperiaatteeltaan digitaalisen koodisignaalin muuttaessa tilaa 0:sta 1:ksi tai 1:stä 0:ksi kantaallon vaihe muuttuu 180° .

5.2.2 PRN -koodi

PRN lyhenne tulee sanoista Pseudo Random Noise. Kuvaavin käänös suomenkieleen olisi ”näennäissatunnainen koodi”. PRN-koodia käytetään GPS-järjestelmässä satelliitin ja vastaanottimen välisen signaalin aikaeron selvittämiseen. Paikannusjärjestelmän toiminnan kannalta yksi tärkeimmistä asioista on saada satelliitti ja sen signaalia vastaanottava paikannin tahdistumaan keskenään tarkalleen samalla ajan hetkellä. Koko järjestelmän toiminta perustuu äärimmäisen tarkkaan ajoitukseen.

PRN-koodi on nerokas keksintö, joka mahdollistaa pientehokäytön. Sen signaalin voimakkuus on alle LF (low frequency) -radiotaajuusalueen normaalin taustakohinan (kuva 7.), joten se tekee GPS-signaalista varsin taloudellisen verrattuna esimerkiksi tv-signaaliin. Signaalia vastaanottavissa laitteissa on esimerkiksi huomattava ero antennien koossa. Tv- tai satelliittivastaanotossa antennit ovat yleensä melko suuria ja tästä johtuen niitä ei voida käyttää yleensä kannettavissa laitteissa. Toisin taas paikantimissa antenni on käytännössä noin muutaman sentin mittainen ja se on yleensä integroitu kokonaan laitteen sisään. Pelkästään tällä seikalla saadaan laitteista pienikokoisia ja kevyitä käsitellä. Toisaalta taas GPS-signaalin tietosisältö on vain murto-osa tv-signaalista, joten sitä ei voida hyödyntää suurien tietomäärien siirrossa.



Kuva 7. Tyypillinen PRN-koodi radiosignaalisssa.

PRN-koodin toiminta perustuu täysin sen tuntemiseen jo ennalta. Koodia olisi muissa tilanteissa mahdotonta löytää summittaisen taustakohinan joukosta ja ns. lukkiutua siihen. Signaalin tahdistus alkaa prosessilla, jossa vastaanotin vertaa satelliitilta saatua signaalia jo ennalta tunnettuun (jokaisella satelliitilla yksilöl-

linen koodi) ja etsii yhteneväisyyksiä. Kun täydellinen yhteneväisyys saavutetaan signaaleiden aikaero tulkitaan ja tulosta käytetään etäisyyden laskemisessa. (Henttu & Lehtoranta 1993:64.)

5.2.3 C/A – ja P -koodi

Kun puhutaan C/A- tai P- koodista tarkoitetaan edellä käsiteltyjä PRN-koodeja, joista ensimmäinen on tarkoitettu siviilikäyttöön ja jälkimmäinen sotilaskäyttöön. Koodien tietosisällössä ei käytännössä ole mitään eroa, mutta vain C/A-koodin algoritmi on julkinen, joten sitä voidaan käyttää ainoastaan siviileille tarkoitetuissa paikantimissa. Varsinaisesti kummatkaan koodeista eivät sisällä mitään informaatiota, vaan ovat ainoastaan pseudosatunnaisia sekvenssejä, joita käytetään hyväksi ajoituksen määrittämisessä.

Signaalien ja siihen moduloitujen koodien on oltava monimutkaisia, jotta ne luotettavuudeltaan kelpaisivat myös sotilaskäyttöön. Luotettavuutta lisää myös järjestelmän yksisuuntainen ominaisuus. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että satelliitti toimii ainoastaan lähettimenä ja paikannin vastaanottimena.

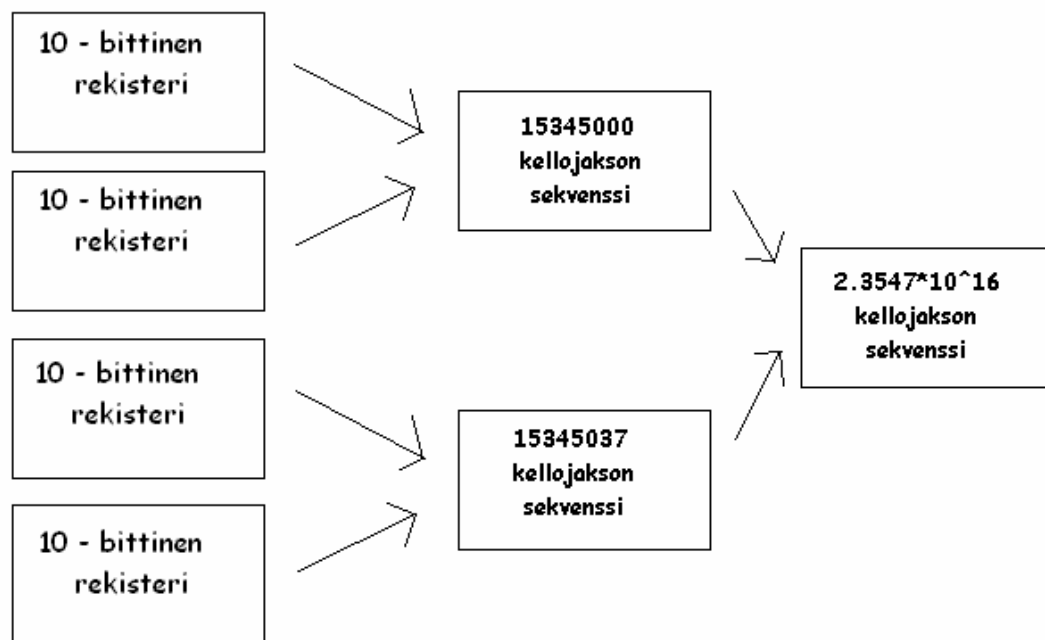
C/A- ja P-koodi tuotetaan käyttämällä ns. takaisinkytkettyä siirtorekisteriä (Kuva 8). Rekisterissä alkutilanteessa on kymmenen alkiainen sekvenssi 0011010111. Jokaisella kellojaksolla sekvenssiä siirretään yhden bitin oikealle ja ns. ylimääräinen bitti laitetaan muistiin. Vastaavasti vasemmalle saatava korvausbitti lasketaan mielivaltaisesta alkioparista, tässä tapauksessa pareista 4 ja 5. Laskentaoperaationa on joko yhteenlasku tai Xor-operaatio. Tietyn kellojakso määrän täyttyessä ylimääräisistä biteistä koostuva koodipätkä moduloidaan kantaaltoon PRN-koodin ominaisuudessa.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Koodi
Alkutila	0	0	1	1	0	1	0	1	1	1	0
1. tila	1	0	0	1	1	0	1	0	1	1	1
2. tila	1	1	0	0	1	1	0	1	0	1	1
3. tila	1	1	1	0	0	1	1	0	1	0	1
4. tila	0	1	1	1	0	0	1	1	0	1	0
5. tila	1	0	1	1	1	0	0	1	1	0	1
6. tila	1	1	0	1	1	1	0	0	1	1	0

Kuva 8. Takaisinkytketty siirtorekisteri.

C/A-koodi tuotetaan esimerkin kaltaisella 10-bittisellä siirtorekisterillä. Summattavien alkioparien valinta riippuu täysin satelliitista. C/A-koodin kokonaispituus on 1023 kellojaksoa. Ajallisesti sekvenssi toistuu aina millisekunnin välein.

P-koodin muodostaminen C/A-koodiin verrattuna on tehty huomattavasti monimutkaisemmaksi armeijasovellusten vaatimien salauksien vuoksi. P-koodissa käytetään C/A-koodista poiketen 4:ä eri rekisteriä (Kuva 9). Ensimmäisen kahden rekisterin kombinaatiosta saadaan 15345000 kellojaksoa kestävä sekvenssi, jonka ajallinen jakso on 1,5 sekuntia. Vastaavasti kombinaatio tehdään myös kahdelle viimeiselle rekisterille ja tulokseksi saadaan poikkeuksellisesti 15345037 kellojaksoa. Seuraavaksi edellä mainitut yhdistelmät kombinoidaan keskenään ja saadaan $2,3547 \cdot 10^{14}$ bitin sekvenssi, jonka ajallinen jakso on 266,4 vuorokautta. Lopuksi vielä 266,4 vuorokauden mittainen jakso pilkotaan pienemmäksi 37:ään yhtä suureen osaan, joita kutsutaan GPS-viikoiksi. Vastaanottimen tahdistus tapahtuu käyttämällä lähettimessä olevaa laskuria, joka ilmoittaa 1,5 sekunnin välein GPS-viikon alusta kuluneiden 1,5 sekuntisten määrän. Ilman lähettimen laskuria vastaanottimen olisi mahdotonta lukkiutua luotettavasti signaaliin. (Pratt, Bostian ja Allnut 2003:469.)



Kuva 9. P-koodin muodostus.

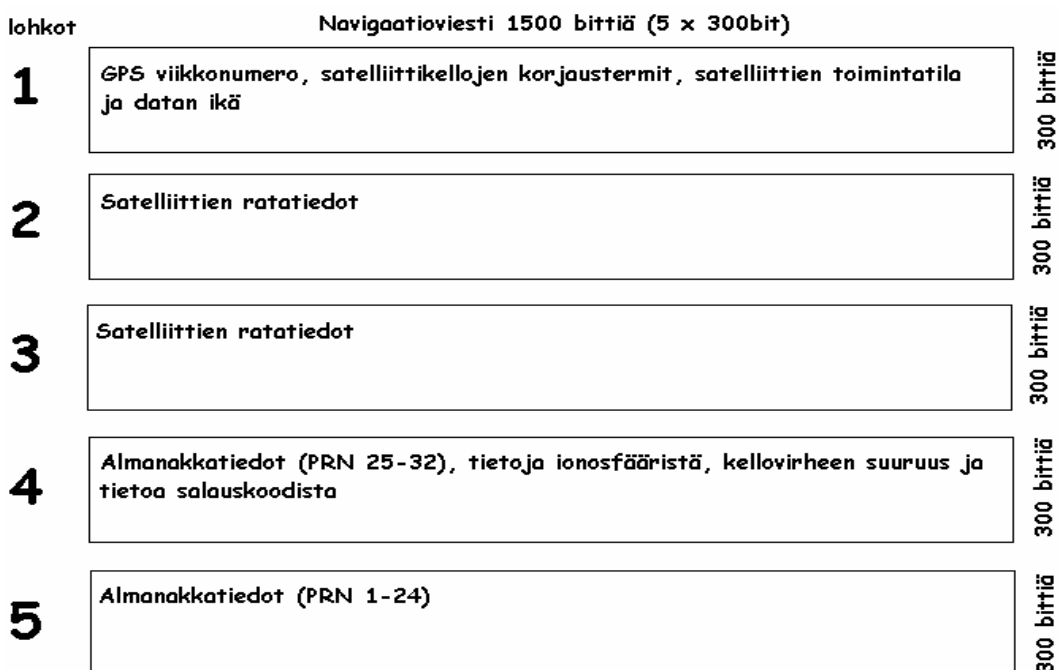
Varsinainen P-koodin muodostustapa tunnetaan, mutta ennen sen lähettämistä siihen lisätään vielä tuntematon W-koodi, jonka tuottamistapa ei ole julkista tie-

toa. Lopputuloksena saada kryptattu P-koodi, jota kutsutaan toiselta nimeltään Y-koodiksi. (Poutanen 1999:120)

5.3 Navigointiviesti

Aikaisemmissa kappaleissa olen käsitellyt ainoastaan asioita, jotka liittyvät GPS-järjestelmän tekniisiin ominaisuuksiin ja tiedonsiirtotekniikkaan. Jotta paikannusjärjestelmän toiminta olisi kattavasti esitelty, käsitelen vielä järjestelmän siirtämän datan rakenteen, joka on toiminnan kannalta hyvin keskeinen osa. Satelliiteista paikantimiin tiedonsiirto hoidetaan pääosin navigointiviesteillä. Navigointiviestit sisältävät kaikki järjestelmän toiminnan kannalta tärkeät tiedot kuten satelliitin tila, PRN-tunnistusketju, satelliittien sijainti ym. Ilman navigointiviestin onnistunutta vastaanottamista ei järjestelmästä ole käyttäjälle mitään apua.

Navigointiviesti koostuu 1500 bitin jaksosta. Kyseinen 1500 bitin jakso on jaettu vielä selvyuden kannalta viiteen alalohkoon, jossa kussakin kymmenen 300 bitin sanaa (Kuva 10). Lohkot 1,2 ja 3 lähetetään kertaalleen 30 sekunnin välein ja lohkot 4, sekä 5 käytännössä 25 kertaa. Yhden lohkon lähettämiseen kuluu aikaa 6 sekuntia, joten täydellisen navigointiviestin vastaanottoon kuluu 12,5 minuuttia. (Pratt, Bostian ja Allnut 2003:473.)



Kuva 10. Navigointiviestin rakenne.
(<http://www.navcen.uscg.gov/pubs/gps/sigspec/gpssps1.pdf>)

5.3.1 Telemetry (TLM) - ja datan ikä (HOW) bitit

Navigointiviestin jokainen lohko ja sivu alkavat telemetry (Telemetry Word) ja datan ikä (Hand Over Word) kentillä. Kyseisiä kenttiä seuraavat varsinaiset datat (8 sanan mittaiset).

Navigointiviestin aloittavan telemetry-osuuden tarkoitus on helpottaa vastaanotimen synkronoitumista navigointiviestiin, joka mahdollistaa datan analysoimisen. Välittömästi telemetry-kentän jälkeen tulevan datan ikä -kentässä sijaitsee ns. Z-laskuri. Laskurin tehtävänä on ilmoittaa P-koodin tulkitsemiseen vaadittava aloituskohta ja koodin sen hetkinen ikä GPS-viikkoina.

5.3.2 Lohko 1 – Satelliitin kello ja status

Ensimmäisestä navigointiviestin lohkoista löytyy pääosin satelliitin ja paikantimen välisen yhteyden synkronoimiseen tarvittavia tietoja. Tärkeimpinä niistä voidaan mainita PRN-koodin numero, GPS-viikko ja kellojen korjaustiedot (Kuva 11). Kentästä löytyy myös muita tärkeitä tietoja, kuten satelliitin tilaa kuvaava bittijono

0 = kaikki navigointidatat ovat kunnossa

1 = jotkin tai kaikki navigointidatat ovat virheellisiä.

PRN number for data	2
Week number.....	797
Predicted user range accuracy	32
Health of satellite	0
L1 - L2 Correction term	9.31323E-10
Issue of clock data	224
Time of clock data	240704
Clock offset	-0.000158074
Clock drift	-2.50111E-12
Rate of clock drift	0

Kuva 11. Malli GPS-satelliitin kello parametreista
(<http://www.navcen.uscg.gov/pubs/gps/sigspec/gpssps1.pdf>)

5.3.3 Lohko 2 & 3 – Satelliitin ratatiedot

Toisen ja kolmannen lohkon sisältö on huomattavan asiantuntijakeskeinen (Kuva 12). Sen sisältää kaiken tiedon satelliitin radasta. Ratatiedoista paikannin laskee satelliitin tarkan sijainnin virheettömän lopputuloksen aikaansaamiseksi. Etäisyyden mittayksikkö on metri ja kulman mittayksikkö on radiaani. Kentässä on myös tarkistusbittejä, joiden lopputuloksesta varmistetaan datan virheettömyys.

PRN number for data	2	Corrected Mean Motion (rad/sec)	0.000145859
Issue of ephemeris data	224	Computed Mean Motion (rad/sec)	0.000145854
Semi-Major Axis (meters)	2.65603E+07	Argument of perigee (rad)	-2.56865
C(ic) (rad)	1.88127E-07	Rate of right ascension (rad/sec)	-8.43857E-09
C(is) (rad)	-1.00583E-07	Right ascension @ ref time (rad)	1.75048
C(rc) (meters)	321.656	Sqrt (1 - e ²)	0.999903
C(rs) (meters)	87.6875	Sqr root semi-major axis, (m ^{1/2})	5153.67
C(uc) (rad)	4.36418E-06	Reference time ephemeris (sec)	240704
C(us) (rad)	2.70829E-06		
Mean motion difference (rad/sec)	5.04521E-09		
Eccentricity (dimensionless)	0.0139305		
Rate of inclination angle (rad/sec) ..	4.11089E-10		
Inclination angle @ ref. time (rad) ..	0.950462		
Mean Anomaly at reference time (rad) .	-2.62555		

Kuva 12. Malli GPS-satelliitin ratatieto parametreista
(<http://www.navcen.uscg.gov/pubs/gps/sigspec/gpssps1.pdf>)

5.3.4 Lohko 4 & 5 – Satelliitin almanakkatiedot

Navigointiviestin neljäs ja viides lohko (Kuva 13) sisältävät mm. tietoja ionosfääristä, kellovirheen suuruuden, almanakkatiedot ja mahdollisuuden lisätiedoille. Lisätieto kentän suuruus on 22 kpl 8-bittistä ASCII-merkkiä. Kenttää voidaan käyttää hyväksi esimerkiksi jonkin kansallisen tiedon välitykseen.

```
PRN number for data ..... 1
Health of SV ..... 0
Reference Week of Almanac ..... 797
Eccentricity ..... 0.00346661
Corr: inclination angle (rad) ... 0.00388718
Mean Anomaly @ ref time (rad) ... 2.79387
Argument of Perigee (rad) ..... -1.31888
Rate right ascension (rad/sec) .. -8.01176E-09
Right ascension @ ref time (rad) -0.296182
Sqrt semi-major axis (m1/2) .... 5153.58
Clock correction term 1 ..... 0.000148773
Clock correction term 2 ..... 7.63976E-11
Reference time almanac ..... 466944
Semi-Major Axis (meters) ..... 2.65594E+07
Corrected Mean Motion (rad/sec) . 0.000145862
Inclination angle (rad) ..... 0.95469
```

Kuva 13. Malli GPS-satelliitin almanakkatiedoista
(<http://www.navcen.uscg.gov/pubs/gps/sigspec/gpspsps1.pdf>)

6 Työn pohdinta ja arviointi

Idea työhön lähti alkujaan tarpeesta saada helppokäsitteinen ja kattava materiaali GPS-paikannuksen nykytilasta ja sen perustoiminnasta. Vieraskielistä materiaalia löytyi reilusti, mutta kotimaista sen sijaan aika niukasti. Huomasin, että kotimaisen materiaalin sisältö oli hyvin hajanaista ja osittain jopa virheellistä. Osa kirjoista käsitteli vain tiettyä aihealuetta suppeasti tai oli kirjoitettu hyvin matemaattisesti. Näihin seikkoihin nojautuen päätin tehdä tutkielmatyylisen tutkintotyön, jota voisi myös käyttää apuna GPS-järjestelmiä sivuavissa opintojaksoissa tukimateriaalina.

Lähdemateriaalia hankkiessani ja taustatyötä tehdessäni huomasin monen kirjan sekä sähköisen julkaisun olevan joitain vuosia vanhoja, mutta tietojen itsessään vieläkin paikkaansa pitäviä. Tästä pystyin päättelemään, että itse järjestelmän toiminnan kannalta tärkeitä peruseräiteitä ei vuosien saatossa ole juurikaan muutettu. Käytössä on pääosin muuttumattomana kerran hyväksi koettu tekninen ratkaisu. Lähdemateriaalin sisältö oli pääosin aika matemaattinen, mutta tunnen kuitenkin päässeeni hyvin käsiksi GPS-järjestelmän ”sielunelämään” kyseisten teoksien avulla.

Työn kirjoittaminen oli kovin haastavaa. Käytännössä oli pitänyt suunnitella ja rajata työn aihepiiri huolellisemmin. Tutkintotyön eri aihealueista oli hankalaa kirjoittaa yleisellä tasolla menemättä liian yksityiskohtaisiin ratkaisuihin. Useasti huomasin kirjoittaessani, että käsittelyssä oleva asia rönsyilee liian pitkälle varsinaisesta aiheesta tai muuttuu liian vaikeaselkoiseksi. Aikataulullisesti työ venyi myös jonkin verran. Alkuperäisen suunnitelman mukaisesti minun olisi ollut tarkoitus valmistua 2005 kesäksi, mutta muutaman mutkan jälkeen valmistumiseni sijoittuu kevääseen 2006.

Pidin tätä tutkintotyötä joka tapauksessa mielenkiintoisena ja haastavana. Opin työtä tehdessäni etukäteissuunnittelun tärkeyden ja aikataulujen tekemisen, sekä ennen kaikkea niistä kiinni pitämisen. Tutkintotyöni positiiviseksi puoleksi voidaan lukea myös se, että tämä työ antoi minulle uutta intoa paikannusta hyödyntäviin harrastuksiini.

Lähteet

Kirjat

Henttu Pekka – Väinö Lehtoranta 1993. GPS-Maailmanlaajuinen satelliittinavigointijärjestelmä. Vaviprop Oy. Domus-Offset Oy.

Miettinen Samuli 1998. GPS vie vaivatta perille. Kustannusosakeyhtiö Ajatus. Gummerus Kirjapaino Oy:Jyväskylä.

Miettinen Samuli 2002. GPS käsikirja. Genimap. Karisto Oy: Hämeenlinna.

Poutanen Markku 1999. GPS-paikanmäärittäminen. URSA. Karisto Oy:Hämeenlinna.

Pratt Timothy – Bostian Charles W. – Allnut Jeremy E. 2003. Satellite Communication. John Wiley & Sons. United States of America.

Nurmi Uuno & Varsila Hannes 1990. Teknillisen opiston fysiikka I. Kymdata:Kotka.

www-sivut

Navstar 1995. Global Positioning System Standard Positioning Service Signal Specification [online][viitattu 8.2.2006]. Saatavilla [www-osoitteessa http://www.navcen.uscg.gov/pubs/gps/sigspec/gpssps1.pdf](http://www.navcen.uscg.gov/pubs/gps/sigspec/gpssps1.pdf)

GPSy 2005. The Global Positioning System (GPS) Resource Library [online][viitattu 9.5.2005]. Saatavilla [www-osoitteessa http://www.gpsy.com/gpsinfo/](http://www.gpsy.com/gpsinfo/).

Glonass History 2006. Coordinational Scientific Information Center [online][viitattu 12.3.2006]. Saatavilla [www-osoitteessa http://www.glonass-center.ru/hist_e.html](http://www.glonass-center.ru/hist_e.html)

Galileo 2006. Europa Energy and Transportation [online][viitattu 12.3.2006]. Saatavilla [www-osoitteessa http://europa.eu.int/comm/dgs/energy_transport/galileo/index_en.htm](http://europa.eu.int/comm/dgs/energy_transport/galileo/index_en.htm)

Wikipedia 2006. Wikipedia Modulaatio [online][viitattu 12.3.2006]. Saatavilla [www-osoitteessa http://fi.wikipedia.org/wiki/Modulaatio_%28elektroniikka%29](http://fi.wikipedia.org/wiki/Modulaatio_%28elektroniikka%29)
