

SATELLIITTIJÄRJESTELMÄT – SUOMENKIN ULOTTUVILLA?

Yleisesikuntaeverstiluutnantti, Tekniikan lisensiaatti Esa Salminen

JOHDANTO

Avaruuden käyttö on muodostumassa erilaiseksi kuin mitä se oli 40 vuotta sitten. Kylmä sota on päättynyt ja kaupallinen avaruusteollisuus on tullut entistä realistisemmaksi ja lähemmäksi tavallista ihmistä. Erityisesti suurvallat panostavat tänä päivänä valtavia rahasummia erilaisten avaruudessa toimivien järjestelmien kehittämiseen. USA on suunnittelemassa avaruus-WAN:ia (Wide Area Network). Sen tarkoituksena on tarjota jatkuva ja globaali runkoverkko mille tahansa datasiirrolle. Avaruusteknologia halpenee olennaisesti ja satelliiteista on tulossa massatuote.

Satelliittinavigointi- ja paikantamisjärjestelmistä on tulossa yhä varmempia uuden maailmanlaajuisen GNSS (A Global Navigation satellite System) -järjestelmän myötä. Kaukokartoituksessa on jo saatu 1 metrin resoluutiolla olevia kaupallisia satelliittikuvia. Näin on päästy lähelle samaa tarkkuutta kuin tiedustelusatelliittien kuvilla. Myös pienillä eurooppalaisilla valtioilla, kuten Suomella, on hyvät mahdollisuudet Euroopan Avaruusjärjestön ESAn ja Euroopan Unionin puitteissa lähteä mukaan avaruustoimintaan.

Vaikka painopiste on kaupallisissa järjestelmissä, ei sotilassovelluksiakaan unohdeta. Sotilaalliselta kannalta tarkasteltuna satelliittijärjestelmien katsotaan tänä päivänä tarjoavan muun muassa tiedonsiirtoyhteyksiä kentällä oleviin sotilasjoukkoihin, tarkkoja säätietoja toiminta-alueesta, tarkkoja paikantamis- ja navigointimenetelmiä niin henkilöstölle kuin erilaisille ase- ym. järjestelmille (sis. etsintä- ja pelastusoperaatiot), tiedustelutietoja naamioiduista kohteista, vastapuolen käyttämistä viestiyhteyksistä sekä tutka- ja asejärjestelmistä sekä perustan ohjusten ennakkovaroitusjärjestelmille. Voidaan todeta, että avaruus on tuonut neljännen ulottuvuuden aikaisempien maa-, meri- ja ilmailuulottuvuuden joukkoon.

HISTORIAALLINEN TAUSTA

Avaruuden hyödyntämistä on suunniteltu aina toisen maailman sodan päätymisestä alkaen. Kuitenkin vasta vuonna 1957 päästiin konkreettisiin toimiin, kun Neuvostoliitto laukaisi ensimmäisen satelliitin 4. lokakuuta 1957.

Sputnik 1 painoi 83 kiloa, josta ns. hyötykuormaa oli 9 kg. Seuraava satelliitti Sputnik 2 laukaistiin jo kuukauden päästä edellisestä ja matkustajana oli Laika niminen koira. Kokonaispaino oli kasvanut 508 kiloon. Satelliitissa oli myös kamera, joka aloitti samalla uuden aikakauden sotilastiedustelussa. [Dutton 1990]

Amerikkalaiset kehittivät samoihin aikoihin omia satelliittejaan ja ensimmäinen onnistunut laukaisu tehtiin 30. tammikuuta 1958, jolloin 4,8 kg painava Explorer-1 satelliitti laukaistiin Jupiter-raketilla avaruuteen. Ensimmäinen amerikkalainen sotilassatelliitti oli 18.12.1958 laukaistu SCORE (Signal Communication by Orbiting Relay Equipment) –tietoliikennesatelliitti. Avaruuden hyödyntäminen pääsi tosissaan käyntiin helmikuussa 1959, jolloin perustettiin ARPA (Advance Research Project Agency) –projekti. Tämän projektin myötä Yhdysvallat onnistui elokuussa 1960 kuvaamaan satelliitista Neuvostoliittoa ja lähettämään filmin kapselissa alas maahan. Vuodesta 1961 alkaen on Yhdysvallat säännöllisesti kuvannut Neuvostoliittoa satelliiteista. [Dutton 1990]

Passiivisten tietoliikennesatelliittien jälkeen seuraavan kehitysvaiheen siviilipuolella muodostivat aktiiviset Telstar-satelliitit vuonna 1962. Tuolloin satelliitissa oli vastaanotto- ja lähetysantennit, jotka suunnattiin maahan. Lähetysteho satelliitissa oli 2 W ja taajuusalue 6000 MHz. Satelliitin rata oli elliptinen ja korkeus vaihteli 900 kilometristä 5600 kilometriin. [Anon. 1980]

Heinäkuussa 1963 saatiin ensimmäinen satelliitti geosynkroniselle radalleen, joka oli 33 asteen kulmassa päiväntasaajan tasoon nähden. Tämä satelliittisarja mahdollisti jatkuvien yhteyksien mahdollisuuden kaikkialle. Tätä käytettiin hyödyksi myös televisioitaessa Tokion olympialaisia vuonna 1964. [Anon. 1980]

Elokuussa 1964 perustettiin kansainvälinen järjestö Intelsat (International Telecommunications Satellite Consortium), jonka tehtävänä oli ja on edelleen hoitaa maailmanlaajuisesti tietoliikennesatelliittiyhteyksiä. Suomi liittyi järjestöön vuonna 1972. Jäsenmaat omistavat yhdessä satelliitit laitteineen ja niiden ohjaukseen tarvittavat maa-asemat. Sen sijaan liikennettä välittävät maa-asemat ovat eri valtioiden ja valtioryhmien omistuksessa. Suomen, Ruotsin, Norjan ja Tanskan yhteinen maa-asema sijaitsee Tatumissa Ruotsissa, josta Suomen osuus on kymmenesosa. [Anon. 1980]

Suomessa on Teknillisen Korkeakoulun Metsähovin radiotutkimusasemalle rakennettu Teknillisen Korkeakoulun, Soneran ja Yleisradion yhteistyönä tietoliikennesatelliittien vastaanottotutkimuksia varten maa-asema. Tutkimukset koskevat erityisesti yli 10 GHz:n taajuusalueen soveltuvuutta pohjoisilla leveysasteilla. [Eskelinen 1981]

Intelsat-satelliittisarja aloitti tietoliikenteen välittämisen Euroopan ja Pohjois-Amerikan välillä 1965. Neuvostoliito sai vuonna 1967 oman Molnija-järjestelmänsä, jolla välitettiin puhelin- ja televisio-ohjelmia eri puolille maata. [Anon. 1980; Eskelinen 1981]

1970- ja -80-luvuilla siirryttiin suorituskykyisiin satelliitteihin. Tällöin tehtiin kokeita LEO (Low Earth Orbit) -radalla olevilla satelliiteilla, mutta kaupallisuus ajoi kuitenkin GEO (Geostationary Orbit) -radoille. Tekniikan kehittymisen myötä siirryttiin 1990-luvulla LEO-radoilla olevien satelliittien hyödyntämiseen.

Vuonna 1990 arvioitiin noin 40 % taivaalla olevista satelliiteista olevan tiedusteluun liittyviä.

AVARUUDEN HYÖDYNTÄMINEN SIVIILISEKTORILLA

Suomessa on siviilisektorilla lähdetty voimakkaasti mukaan avaruustoimintaan merkittävimpinä alueina avaruustiede, kaukokartoitus, satelliittitietoliikenne, navigointi ja paikannus sekä avaruuslaitteiden valmistus. Kauppa- ja teollisuusministeriön yhteydessä toimiva avaruusasiain neuvottelukunta on määrittänyt uudeksi avaruuspoliittisen strategian tavoitteeksi lisätä avaruusalan menetelmien ja tekniikan käyttöönottoa, eri hallinnonalojen yhteistyötä sekä tehostaa tutkimustiedon hyödyntämistä ja tukea yritystoiminnan kehittämistä. [Ahola 1998]

Avaruusalan toiminnalle on luonteenomaista laaja kansainvälinen yhteistyö. Suomen kannalta keskeisiä organisaatioita ovat Euroopan avaruusjärjestö ESA (European Space Agency) sekä Euroopan Unioni, jonka puiteohjelmiin avaruustoiminta sisältyy.

Avaruustoiminta on murrosvaiheessa ja painopiste on siirtymässä tieteellisestä tutkimuksesta kaupallisille markkinoille ja satelliittien hyödyntämiseen yhteiskunnan eri osa-alueilla. Euroopan Unioni ja ESA ovat avaruusstrategiassaan tähdentäneet Euroopan strategista tärkeyttä globaaliin, itsenäiseen ja luotettavaan ympäristön tarkkailuun ja hallinnointiin, vaaran tarkkailuun sekä siviilisuojaan ja turvallisuuteen. Tämän johdosta Euroopan komissio ja joukko avaruusyhdistyksiä ovat käynnistäneet GMES (Global Monitoring for Environment and Security)-hankkeen vuonna 1998. Siinä on tarkoitus antaa tiedollinen ja tekninen tuki palvelemaan parempaa ympäristön hallintaa ja turvallisuutta erityisesti maapallon seurannalla ja informaatioyhteiskunnan teknologioilla. [Anon. 2001a]

GMES on kunnianhimoinen konsepti, jossa sovitetaan yhteen poliittiset tarpeet ja ympäristö sekä turvallisuusasiat käyttäen apuna tämän päivän teknologiaa ja mm. kaukokartoitussatelliitteja. GMES vetää mukaansa Euroo-

pan komission, Euroopan avaruusjärjestön ESAn, Euroopan ympäristöjärjestön, avaruusjärjestöjä, teollisuutta, kansallisia viranomaisia ja tiedeyhteisöjä. Tavoitteena on tarjota korkea tasoista palvelua, jossa hyödynnetään pääosin jo olemassa olevaa tietoa, jota saadaan mm. ERS, Envista, Meteosat ja SPOT-satelliiteista. GMES:n mahdollisia sovellusalueita ovat Euroopan maanpinnan muutosten tarkkailu ja ympäristön merkitys, kasvillisuuden, valtamerien ja ilmaston seuranta sekä turvallisuuspuolella riskienhallintajärjestelmät (tulvat, metsäpalot ym.) ja kriisienhallinnassa ja humanitaarissa avussa käytettävät järjestelmät. [Anon. 2001a]

GMES:n tavoite vuosina 2001-2003 on tarjota selvityksiä ja vastauksia avainkysymyksiin tekniikasta, sosioekonomiasta, tieteestä ja GMES:n institutionaalisesta luonteesta. Vaikka GMES rakennetaan pitkälti olemassa ollevalle tiedolle tarvitaan edistyneen infrastruktuurin ja palvelujen kehittämiseen rahaa, joka pyritään saamaan sekä julkiselta että yksityiseltä sektorilta. [Anon. 2001a]

TIETOLIIKENNESATELLIITIT

Satelliittien kiertoradat

Satelliitit luokitellaan niiden käyttämän ratakorkeuden mukaan. **Geostationaarilla radalla (GEO, Geostationary Orbit)** kiertävät satelliitit ovat 35 680 km:n (22300 mailia) korkeudella ja pysyvät maahan nähden likimain paikallaan. GEO-satelliiteilla on suuri peittoalue (ei napa-alueita). Haittapuolena on suuresta etäisyydestä johtuvat siirtoviive ja -häviöt. [Anon. 1999] Radalla on yli 300 sotilas- tai yksityistietoliikennesatelliittia. Niiden korkeuden ansiosta niillä kyetään kattamaan lähes puolet koko maapallosta ja niillä ei esiinny doppler-siirtymää. [Newman 1999]

Geostationaarisen radan haittapuolia ovat suuresta etäisyydestä aiheutuva vapaan tilan vaimennus ja napa-alueiden jääminen katvealueelle sekä puhe- ja linliikenteessä havaittava radioaallon kulkuajasta johtuva viive.

Matalaratasatelliitit (LEO, Low Earth Orbit) ovat noin 600 - 1100 km:n korkeudella olevilla radoilla [Pisacane & Moore 1994]. LEO-satelliitit ovat helpommin laukaistavia kuin GEO-satelliitit, mutta lyhytikäisempiä. LEO-satelliitit ovat vain lyhyen aikaa näkyvissä (10-20 min.) ja ne ovat varsin lähellä maata. Niiden läheisyydestä johtuen niiden peittoalue on selvästi pienempi kuin GEO-satelliittien. Näistä seikoista johtuen LEO-satelliittijärjestelmät vaativat kymmeniä satelliitteja. Esimerkkinä Teledesic on suunnitellut laukaisevan 288 satelliittia [Anon. 1998a]. Lisäksi tarvitaan monimutkainen kontrollijärjestelmä, koska joudutaan tekemään kanavanvaihtoa satelliittien välillä (handover). Lyhyestä yhteysetäisyydestä johtuen, siirtoviiveet ja pää-

telaitteitten teho vaatimukset ovat huomattavasti pienempiä kuin GEO-järjestelmissä, mutta doppler-siirtymä aiheuttaa ongelmia. LEO-radalla on pääsääntöisesti kuvaussatelliitit sekä tietoliikennesatelliitit (Iridium, Globalstar). [Newman 1999; Anon. 1999]

Laaja satelliittien välinen verkko vaatii mutkikkaan valvonta ja hallintajärjestelmän, mikä lisää toiminnan epävarmuutta. Koska järjestelmä vaatii runsaasti satelliitteja tulee niiden laukaiseminen kalliiksi. Kolmas heikkous GEO-satelliittijärjestelmään verrattuna on LEO-satelliittien datanopeuksien matalampi suoritusarvo. LEO-satelliittien etuna on yhteyden nopeus. Viive jää alle 1 ms.

MEO-satelliittijärjestelmä (Medium Earth Orbit) on edellisten välimuoto. Ratakorkeus vaihtelee 10400 -20200 km välillä pysyen kuitenkin koko ajan samalla etäisyydellä maapallosta [Newman 1999; Anon.]. MEO-järjestelmällä saadaan maailmanlaajuinen peitto vähemmällä satelliittimäärällä kuin LEO-järjestelmällä, eikä kanavanvaihtoa tarvita niin usein. Siirtoviiveet ovat noin 100 ms. MEO-ratojen ongelmana on ollut ns. van Allenin säteilyvyöhykkeet, jotka ovat haitanneet kyseisille radoille lähetettyjen satelliittien toimintoja. Vasta viime aikoina, kun on opittu rakentamaan säteilysietoisempaa mikroelektronikkaa, on tällekin alueelle voitu lähettää satelliitteja. [Tauriainen 2000]

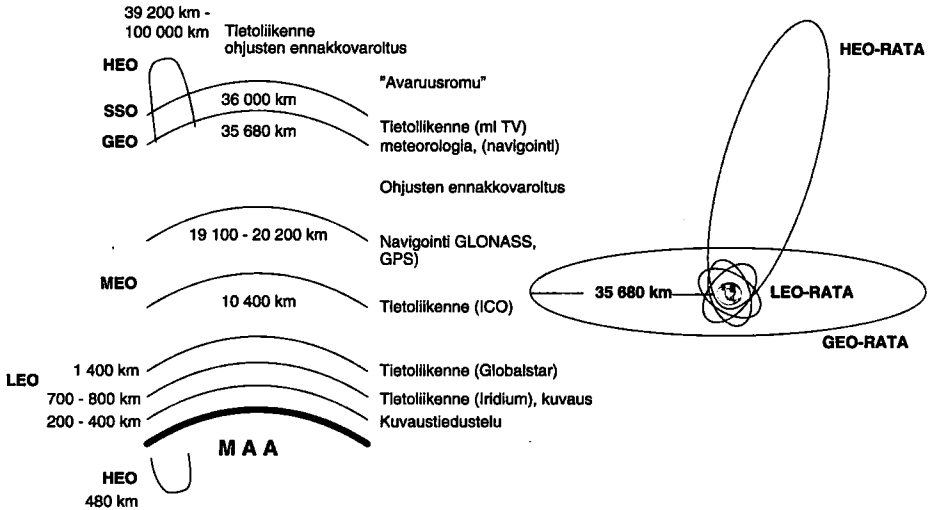
ICO-tietoliikennesatelliitit toimivat 10390 km:n korkeudella. GPS (Global Positioning System) järjestelmän 27-satelliittia lähettävät navigointisignaaleja maahan 20200 km:n korkeudelta. [Newman 1999; Anon. 2000c]

SSO (Supersynchronous Orbit) rata toimii noin 200 käytöstä poistetun satelliitin hautausmaana. Kyseinen rata on geostationaarisen radan ulkopuolella 36 000 km:n korkeudella. [Newman 1999]

HEO (Highly Elliptical Orbit) satelliitit kiertävät ellipsin muotoista rataa, jolloin lähimmillään ne ovat 480 km:n korkeudella maasta ja kauimmillaan 39 200 – 100 000 km:n etäisyydellä. Satelliitit voivat viipyä pitkän aikaa tietyllä osaa maapallon pintaa ja pyyhkäistä nopeasti uudelle kierrokselle. [Newman 1999; Tauriainen 2000]

Tietoliikennesatelliittien käyttämät taajuudet [Dutton 1990; Ricci 1986]

Tietoliikennesatelliittien käyttämiä taajuuskaistoja on kolme: UHF (300 MHz – 3 GHz), SHF (3 – 30 GHz) ja EHF (30 – 300 GHz). Jokaisella näistä on omat etunsa ja haittansa, jotka pitää ottaa huomioon. Kaikkia käytössä olevia taajuuksia pitää koordinoita. Tätä tehtävää hoitaa YK:n alaisen järjestön ITU:n (International Telecommunications Union) yksi alajärjestö, the International Frequency Registration Board.



KUVA 1: Satelliittien radat ja niiden käyttö

UHF

UHF-taajuudella antennin säteilykeilan leveys on kääntäen verrannollinen taajuuteen. Käytännössä tämä merkitsee, että mitä korkeampaa taajuutta käytetään, sitä kapeampi säteilykuviio syntyy. UHF-taajuudet ovat niitä matalimpia taajuuksia, joita satelliittiyhteyksillä käytetään. Tärkein etu on se, että tämä mahdollistaa halvan ja pienikokoisen (kannettava) päätelaitteen käytön. Antennit tuottavat leveän säteilykeilan, jolloin satelliitin jatkuva seuranta on suhteellisen helppoa. Taajuuksien kapea valikoima merkitsee, että interferenssi (= halutun signaalin vastaanotossa ilmenevä häiriö, joka johtuu muista signaaleista tai kohinoista) voi aiheuttaa ongelmia. Alueen rajallisuudesta johtuen sillä on myös hankala toimia häirintää vastaan.

SHF

SHF-alue on yleisimmin käytetty satelliittitietoliikenteen alue. Uplink (maasemalta satelliittiin oleva yhteys) taajuuksina käytetään usein 7,9 – 8,4 GHz ja downlinkillä (satelliitista maa-asemaan) vastaavat taajuudet ovat 7,25 – 7,75 GHz. Korkeamman taajuusalueen käyttö tarjoaa useita huomattaviakin etuja. Korkeammat taajuudet mahdollistavat kapeamman säteilykeilan muodostamisen ja siten satelliitin EIRP:n (Effective Isotropically Radiated Power) lisäämisen, mikä käytännössä tarkoittaa satelliitin tehon keskittämistä pienemmälle alueelle. Lisäksi ko. taajuusalueella kyetään tarjoamaan suurempi kapasiteetti, jolloin päästään riittävään kaistaleveyteen. Tämä mahdollistaa myös joitakin häirinnän vastaisia toimenpiteitä. Heikkoutena SHF-alueella on ilmakehän aiheuttama vaimennus.

EHF

EHF-alueen uplinkit toimivat 43,5 – 45,5 GHz:n ja downlinkit 20,2 – 21,2 GHz:n alueella. Tällä taajuusalueella saavutetaan erittäin suuri kaistanleveys, mikä mahdollistaa suuret datanopeudet ja huomattavat mahdollisuudet häiriönpoistoon. Alueella voidaan käyttää erittäin suuria antennin vahvistuksia, mikä helpottaa ohjattavien sädekeilojen käyttöä. Tämän taajuusalueen teknologia on edelleen kehitystyön alla ja näin ollen laitteet ovat varsin kalliita, jolloin tämä rajoittaa taajuusalueen käytön lähinnä sotilaallisiin tarkoituksiin. Toinen heikkous on ilmakehän aiheuttama suuri vaimennus, mikä osin johtuu myös pilvistä ja sateista.

Eräs tärkeä tekijä, kun puhutaan pitkistä yhteyksistä, on satelliitista toiseen menevät linkkiyhteydet. Aiemmin ei kyseisiä järjestelmiä ollut, mutta tänä päivänä ne toimivat. Tällöin ei puhelujen tarvitse tulla välillä maahan vaan voidaan toimia sellaisilla taajuusalueilla, jotka ovat turvallisia. Esimerkkinä on 60 GHz:n alue, jossa signaali ei juuri etene ilmakehässä johtuen niiden ”imeytymisestä” happimolekyyleihin.

Kaupalliset satelliittijärjestelmät

Tähän vuoteen asti melkein kaikki satelliittitietoliikennepalvelut tarjottiin Geostationaarisen radan (GEO) satelliiteilla. Vuoden 1998 lopusta alkaen puhelin ja muita palveluita on tarjottu (kännykän kokoisella puhelimella) matalan kiertoradan satelliiteilla (LEO = Low Earth Orbit). Ensimmäisenä tuli Motorolan Iridium, joka otettiin operatiiviseen käyttöön syyskuussa 1998. Heikon menestyksen johdosta yhtiö meni konkurssiin. Vuoden 2001 keväällä Iridium sai uuden omistajan ja siihen tehtiin joitakin muutoksia, joilla mahdollistettiin mm. GSM:n ja DECT-puhelujen liittäminen samaan käsipuhelimeen. Vuonna 2000 tulivat Globalstar (LEO; 44 satelliittia) ja ICO Global [Anon. 2000b] sekä muut niin kutsutut isot-LEO:t. ICO Global Communications:sta voidaan mainita, että se tulee toimimaan 10 satelliitilla, jotka ovat ns. middle-earth-orbit (MEO)-radalla [Anon 2000c]. Se tarkoittaa, että satelliitit ovat 10 355 km:n korkeudella ja ne on sijoitettu kahdelle eri radalle. Järjestelmään kuuluu 12 maa-asemaa, jotka ovat kytketty toisiinsa.

Suomen puolustusvoimilla ja rauhanturvajoukoilla on myös erilaisia satelliittipuhelimia lähinnä kokeilu (mm. Iridium ja Globalstar) ja varokäytössä (mm. Inmarsat).

IRIDIUM

Iridium-järjestelmään kuuluu 11 maa-asemaa, jotka yhdistävät satelliittiverkon maanpäällisiin televerkkoihin. Iridium-satelliitteja on 780 kilometrin korkeudella yhteensä 72 kpl, joista 66 on operatiivisessa toiminnassa ja 6 varalla.

Kapeakaistatekniikkaan perustuva järjestelmä salli vuonna 1998 vain puhelut. Vuonna 2000 kyettiin yhdistämään 73 000 satelliittipuhelua kerralla. Jatkossa verkon suunniteltiin välittävän myös fakseja, sähköpostiviestejä sekä muuta dataa.

Koska satelliitit ovat matalalla radalla, ei lähettimissä tarvita suuria tehoja. Tämä on mahdollistanut päätelaitteen koon pienentämisen kännykkäkokoon. Hyvänä puolena on myös lähes viiveetön, noin 3 ms, tiedonsiirto. Kännykkä on monipuolinen siinä mielessä, että satelliittiyhteys korvautuu maanpäällisellä verkolla aina, kun sellainen on saavutettavissa. Suomessa verkkoyhtiö on tehnyt yhteistyösopimukset Radiolinjan, Telian ja Soneran kanssa.

Iridium-satelliittiyhteys toimii vain, mikäli soittajalla on suora näköyhteys taivaalle. Se ei siis toimi sisätiloissa. Sen sijaa kännykän sisartuote eli haku-laite toimii myös sisällä. Iridiumia on suunniteltu mm. lentokoneisiin, laivoihin ja alueille, jonne ei ole muita yhteyksiä. [Suominen 1998; Astikainen 2000; Anon. 2000f]

Globalstar

Globalstar-järjestelmä käsittää 48 LEO-radalla (ratakorkeus 1414 km = 876 mailia) olevaa aktiivista satelliittia ja 4 varasatelliittia. Näillä saadaan peitettyä 80 % maapallon pinta-alasta. Kattamatta jää lähinnä napa-alueet. Kuusi satelliittia on sijoitettu kahdeksalle eri kiertoradalle.

Globalstar-satelliittipalvelu aloitti Suomessa toiminnan Radiolinjan välityksellä huhtikuun alusta vuonna 2000. Järjestelmä on liitetty GSM-järjestelmään siten, että siellä, missä GSM ei kuulu, puhelin ottaa yhteyden satelliitin kautta. Puhelut ohjataan suoraan lähimpään maatumiasemaan, jossa tapahtuu teknisesti monimutkainen puhelun prosessointi ja reititys. Puhelimet ovat joko kaksi tai kolmitoiminteisia. Kaksitoimisissa on GSM ja satelliitti yhdistetty samaan. Puhelimien valmistajina ovat Ericsson ja Telit. Kolmitoiminnepuhelimia, joissa on yhdistetty CDMA-salaus (Code Division Multiple Access), AMPS (Advanced Mobile Phone System, Pohjois-Amerikan analoginen matkapuhelinverkko) ja satelliitti, tekee Qualcomm. [Anon. 2000b]

ICO

ICO-järjestelmä otettiin käyttöön syksyllä 2000. Suomen operaattorina toimii Radiolinja. Sillä voidaan välittää digitaalista ääntä, dataa ja fakseja 14,4 kbps:n nopeudella. Järjestelmän antennit toimivat S-alueella muodostaen 162 samanaikaista keilaa mahdollistaen 4500 puhelua. [Anon 1998d] Järjestelmällä on kaksi etua muihin vastaaviin järjestelmiin verrattuna: Keskimääräinen korotuskulma käyttäjältä satelliittiin on korkea, jolloin rakennusten tai muiden esteiden aiheuttamat estot minimoidaan. Satelliittien hitaat kiertono-

peudet mahdollistavat niiden näkymisen pitkään, jolloin muun muassa minimoidaan puhelujen katkeamiset. [Anon. 2000c]

Inmarsat

Esimerkki GEO-satelliittijärjestelmästä on INMARSAT (International MARitime SATellite Organisation). Alunperin merenkulun viestiyhteyksiä hoitamaan perustettu järjestö on laajentanut palvelujaan myös maa- ja lentoliikenteeseen. Suomi kuuluu myös kyseiseen järjestöön. Inmarsat käyttää useita geostationaarisella radalla olevia satelliitteja, jotka kattavat neljä valtamerialuetta ja tarjoavat näin ollen maailmanlaajuisia tietoliikennepalveluja liikkuville käyttäjille.

Käyttötarkoituksen mukaan Inmarsat tarjoaa erilaisia viestintäpalveluja ja -järjestelmiä. Nykyisillä järjestelmillä on tunnuksinaan A, B, C, D+, E, mini-M, Aero, ja P. Tavallisen puhelinliikenteen lisäksi Inmarsat välittää mm. telex-, fax-, ja dataliikennettä sekä ns. "High-speed data"-palvelua. [Anon. 2000d]

Laajakaistaiset satelliittijärjestelmät

Koska nykyiset sotilaalliset laajakaistasatelliitit eivät kykene vastaamaan kaistaleveysvaatimuksia, sotilaspuoli on kiihtyvällä vauhdilla ottamassa kaupallisia satelliittiyhteyksiä käyttöön. Käyttämällä kustannustehokkaampia kaupallisia ja koko maapallon kattavia satelliitteja kyetään täydentämään sotilasatelliittijärjestelmiä. [Barret 1998]

Siinä, missä teknologia keskittyy kaupallisen käytön lisäämiseen, kykenee sotilaspuoli hyödyntämään satelliittien suurinopeuksisia datayhteyksiä alueilla, missä yhteyksien rakentaminen on mahdoton tai vaikea rakentaa maan päällisesti. Laajakaistaiset liittännät ovat välttämättömiä tuettaessa tulevaisuuden sodankäyntijärjestelmiä maalla, merellä ja ilmassa. Lounais-Aasiassa tai Euroopassa sotilasjoukot pystyvät hyödyntämään kaupallisia satelliittipalveluja käytettäessä suurinopeuksisia Internet-liittymiä, videojakelua, etäopiskelua tai telelääkintää luokittelemattomassa ympäristössä.

Kaikki pääavaruusteollisuuden valmistajat ovat esitelleet laajakaistaisia multimediajärjestelmiä. Lähtökohtana on, että laajakaistaiset satelliittijärjestelmät mahdollistavat internet-yhteyksien rakentamisen. Satelliittiyhtiöt ovat järjelleet, että esimerkiksi nopean internet-yhteyden vaatiman kaapelin rakentaminen tiheimpien asutuskeskusten ulkopuolelle ei ole taloudellisesti kannattavaa. Tällöin ratkaisuksi saattaa nousta satelliittiyhteydet.

SPACEWAY on yksi uusimmista maailmanlaajuisista laajakaistasatelliittipalveluista on suunniteltu otettavan käyttöön vuonna 2002. Sen on suunnitel-

tu tarjoavan vähintään 1,544 Mbps lähetystä äänestä suurinopeuksiin internetiin ja videoon. [Anon 2000g]

Sotilaalliselta kannalta tarkasteltuna tämä lisätty kapasiteetti tarjoaa potentiaalisesti kaupallisen taajuuskaistan rajoittamattoman käytön mm. valvontakuvien jakamiseen, maali-informaatioon ja taisteluvaurioiden arviointidatan lähettämiseen. Samalla kyetään varmistamaan sotilaalliseen toimintaan liittyvä maailmanlaajuinen yleisradiojärjestelmä.

SOTILASTIETOLIIKENNESATELLIITIT

Sotilastietoliikenteessä on monia päivittäisiä tekijöitä, jotka eivät välttämättä vaadi mil-speksattuja satelliittikanavia. Vuonna 1997 Yhdysvaltain puolustusministeriö arvioi omaa sotilassatelliittiverkkoaan DSCS:ää (Defence Satellite Communication System). Raportissa tuli esille, että kyseisenä vuonna USA:n sotilashallinto maksoi 200 miljoonaa dollaria kaupallisten satelliittiyhteyksien käytöstä. Tämä tarkoitti, että sähköpostin (e-mail) lähettäminen joukoille kaupallisella satelliitilla tuli halvemmaksi kuin omalla järjestelmällä.

DSCS

Operatiivisessa käytössä olevista järjestelmistä amerikkalaisten DSCS (Defence Satellite Communications System) on tarjonnut arvokkaita laajakaistaisia tietoliikenneyhteyksiä Yhdysvaltojen asevoimille, valtiolle ja muille hallituksen valitsemille tahoille ympäri maapalloa 1960-luvulta lähtien. Nykyään järjestelmä käyttää kahden tyyppisiä satelliitteja: DSCS II ja DSCS III.

DSCS II muodostuu neljästä satelliitista, joista kaksi on aina samalla radalla. Jokainen satelliitti on sylinterin muotoinen ja ne käyttävät pyörimistä stabilointiin säilyttääkseen oikean suuntansa. Antennijärjestelmä käsittää laajakaistaisen torviantennin sekä kaksi kapeakaistaista lautasantennia. Aurinkopaneelit, jotka on kierretty satelliitin ympärille, tuottavat 535 W:n tehon. Satelliitti pystyy tarjoamaan 1300 kaksisuuntaista puhekanavaa tai 100 Mbit/s:n datakanavan. [Dutton 1990]

DSCS III painaa kaksi kertaa enemmän kuin DSCS II eli reilut 1000 kg ja on muodoltaan kuutiomainen. Stabilointiin käytetään uudenaikaista kolmiakselista järjestelmää, mikä mm. mahdollistaa aurinkopaneelien suuntaamisen paremmin kohti aurinkoa. Tällä järjestelyllä satelliitti pystyy tuottamaan noin 1100 W:n tehon. [Dutton 1990]

Vaikka DSCS III:lla on samanlainen tiedonsiirtokyky kuin II-versiolla, on se teknologisesti selvästi edellä etenkin, kun puhutaan ECCM (electronic counter-countermeasures) -piirteistä. Antennijärjestelmät sisältävät edistyneitä monikeilaisia linssianteenneja, jotka pystyvät ottaman vastaan 61 erillistä keilaa/sädettä. Niissä on myös 19-keilan lähetysantennit. Näiden anten-

nien säteilykuvioita kontrolloidaan maasta, jolloin kyetään muodostamaan tarvittavat kuviot valitulle alueelle. Samalla luodaan antennin nollakohta haluttuun suuntaan, millä väistetään häirintää. Sotilaskäytössä olevat satelliitit on myös kovetettu ydinsäteilyn vaikutuksia vastaan. Vaikka kyseinen kovettaminen ei suojaa suoraa hyökkäystä vastaan, kyetään sillä torjumaan avaruudessa tapahtuneen ydinräjähdysten aiheuttama EMP (Electromagnetic Pulse) -pulsseja. Toinen tärkeä tekijä DSCS III:lla on sen pitkä elinikä, joka on 10 vuotta. Tämä puolestaan vähentää järjestelmän operatiivisia kustannuksia. Vanhemman sukupolven DSCS II –satelliitin ikä on vain 5 vuotta.

Skyenet

Maailman ensimmäinen geostationarisella radalla ollut sotilastietoliikennesatelliitti oli englantilaisten vuonna 1969 laukaisema Skynet-1. Sen maksimi teho oli 3 W ja se tarjosi 23 puheyhteyttä tai 250 sähkötyskanavaa. Satelliitti toimi 5 vuotta, jonka jälkeen se ajettiin geostationarisen radan ulkopuolelle satelliittien hautausmaalle eli SSO-radalle (Supersynchronous Orbit), joka on 36000 km:n korkeudella.

Skynet-1 korvattiin uusilla järjestelmillä ja 1980-luvun lopulla päästiin Skynet-4 satelliittiin, jonka kehittyneimmillä versioilla toimitaan tänä päivänä. Maapallo katetaan kolmella geostationarisella radalla toimivalla Skynet-4 satelliitilla. Kunkin paino on yli 670 kg ja jokainen pystyy tarjoamaan valtavan tiedonsiirtokyvyn: 4 SHF-kanavaa (7,2 – 8,4 GHz), 2 UHF-kanavaa (250 – 312 MHz) ja kokeellinen EHF-vastaanotin tutkimuksia varten 43 – 45 GHz:n alueella. Uudet yli 6 metriä pitkät aurinkopaneelisiivet synnyttävät yli 1300 W:n tehon, joka mahdollistaa satelliitin operatiivisen iän kasvattamisen 7 vuoteen.

Sotilastietoliikennesatelliiteissa suuri huomio on laitettu suojautumiseen elektroniselta uhalta. Englantilaisten Skynet-4:ssä SHF-alueelle on rakennettu monimutkaisia järjestelmiä mm. antennisuunnan nollaamiseen ja lähetysantennien kokoonpanoon liittyen. Järjestelmässä käytetään neljää antennin kuuluvuusalue kuviota. Maata peittävä keila on osin merivoimien käytössä, kun laajakaistainen palvelu tarjotaan RAF:lle (Royal Air Force) ja Pohjois-Atlantin merivoimille. Kapeakaistainen palvelu on Euroopassa olevilla joukoilla ja pistemäinen keila on käytössä Keski-Euroopassa erityisesti maavoimien taktisilla joukoilla, joilla on kannettavat päätelaitteet. UHF-kanavat on suunniteltu palvelemaan sukellusvenettä. Uusimpana tekniikkana on hajaspektritekniikka, jolla on toteutettu kaksi häirinnän hyvin kestävä erikoiskanavaa. Hajaspektritekniikkaa käytetään myös satelliittien kontrollointijärjestelmissä (seuranta-, telemetria- ja komentoyhteydet).

Skynet-4:ssä kyetään prosessoimaan signaaleja. Tämä on erillään hajaspektrivastaanotimesta. UHF, SHF- ja EHF-vastaanottimet toimivat läpinäkyvinä transpondereina, jotka pelkäästään ottaa signaalit vastaan maasta, muuttavat taajuuden, vahvistavat ne ja lähettävät edelleen eteenpäin. Transponderi toimii lineaarisesti: mitä voimakkaammat signaalit on otettu vastaan sitä suuremmalla voimalla signaali työnnetään transponderista ulos ja sitä suuremmalla voimalla signaali lähetetään downlinkillä alas maahan. Tämä mahdollistaa sen, että suuritehoinen päätelaite voi torjua transponderin tehon muille käyttäjille ja asettaa järjestelmän avoimeksi interferenssille. Skynet-4:ssä vastatoimeksi on tehty toimiminen maalla olevan suljetun kontrollisolmun kautta, jonka läpi kaikki liikenne kulkee. Skynet:n kontrolliasema sijaitsee Hampshirissa ja vaikka se on suojattu suojavallilla räjähdyksiä vastaan ja laajalla EMP-suojalla, on se kuitenkin järjestelmän haavoittuvin paikka. Tämän takia liikkuvaa kontrolliasemaa on suunniteltu ja sitä ollaan ottamassa käyttöön. [Dutton ym. 1990]

Milstar

Amerikkalaisten Milstar (Military Strategic Tactical and Relay) –satelliittiohjelma syntyi vuonna 1981. Se suunniteltiin tarjoamaan maailmanlaajuinen, erittäin hyvin häirinnän kestävä ja muutenkin hyvin selviytyvä suuren tiedonsiirtokyvyn omaava satelliittitietoliikennejärjestelmä.

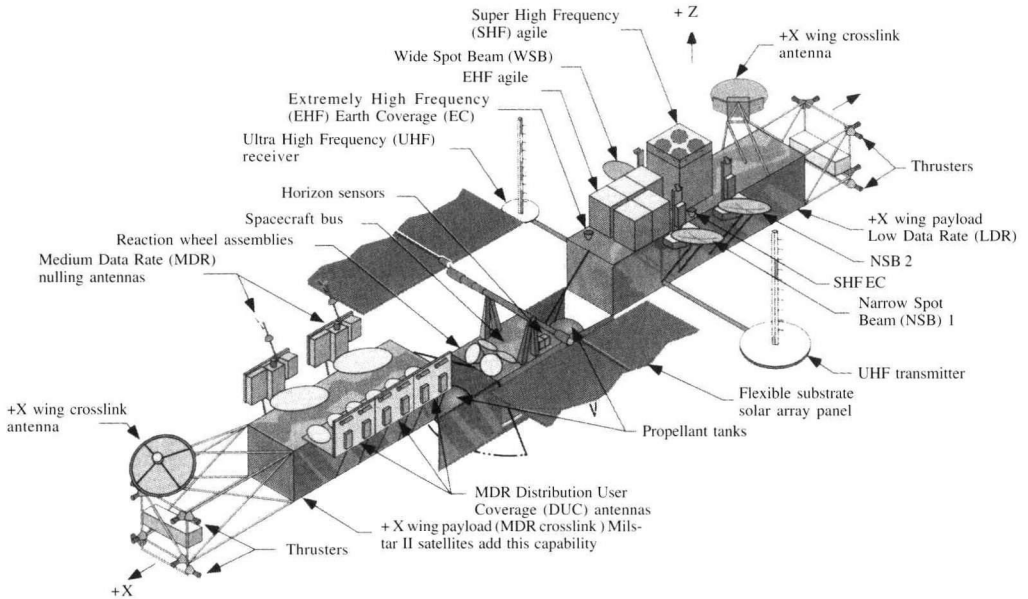
Häirinnän estämiseksi Milstariin on suunniteltu omat vastatoimenpiteet. EHF-taajuusalueella toimii 44 GHz:n uplink, SHF-alueella 20 GHz:n downlink ja satelliitissa tapahtuvaa prosessointia on lisätty. Elektroniset komponentit on kovetettu ydinräjähdysten varalle ja tekniikka, jota on käytetty suojaamaan laseraseiden iskuja, suojaa samalla ECM:ltä (Electronic Countermeasure) ja fyysiseltä iskulta. Jokaisessa (= 4 kpl) satelliitissa, jotka toimivat geostationaarisella radalla, on myös satelliitista satelliittiin oleva linkkiyhteys 60 GHz:n taajuudella. Tämä vähentää riippuvuutta maa-asemiin. On ennustettu, että kyseisiä satelliittilinkkejä käyttämällä satelliitti pystyy toimimaan 6 kuukautta ilman maa-aseman tukea. [Anon. 1999h, Dutton ym. 1990]

Milstarin antennirakennelmat on rakennettu siten, että ne mahdollistavat lähetteen vastaanoton yhdestä monista pistekeiloista. EHF-taajuusalue mahdollistaa hyvin kapean keilan muodostamisen MMIC (Monolithic Microwave Integrated Circuit) –tekniikkaa hyväksikäyttäen. Tämä tekniikka mahdollistaa tietyn lähettimen valitsemisen häirintätilanteessa. 20 GHz:n downlink käyttää myös kehitettyä antennia, joka kykenee erittäin nopeaan säteilykeilahypintään ja tilayhdistelmään. Tiedonsiirrossa itsessään käytetään hajaspektritekniikkaa, mikä tekee häirinnän vaikeaksi. [Anon. 1999h, Dutton ym. 1990]

EHF-taajuuksien käyttö tarjoaa myös maa-asetalle etuja. Erityisesti se mahdollistaa pienillä antennilla suuren EIRP:n (Effective Isotropically Radiated Power) saamisen. Esimerkiksi Yhdysvaltojen laivasto on kehittänyt 60 cm halkaisijaltaan olevan antennin laivoihin ja 31 cm antennin periskooppiasenteisena osittain sukelluksissa olevaan sukellusveneeseen. [Anon. 1999h, Dutton ym. 1990]

Milstar tarjoaa päästä päähän yhteyksiä joko yksi- tai kaksisuuntaisena, yleisradiolähetystä, raportointia, datan ja kuvan siirtoa sekä henkilöhakua. Järjestelmä (Milstar I LDR) on ollut operatiivisessa käytössä vuodesta 1996 lähtien. LDR –hyötykuorman datanopeudet vaihtelevat 75 bit/s (data) – 2400 bit/s (ääni/data). Kanavia on käytössä 192, joista 100 on 2400 bit/s. Vuonna 2002 on suunniteltu laukaistavan neljä Milstar II MDR –satelliittia. Näiden datanopeudet tulevat muodostumaan 4,8 kbit/s (ns. hidas data) – 1,544 Mbit/s (ns. nopeadata). MDR kanavia tulee olemaan 32 kpl. Seuraavankin sukupolven edistysellinen EHF-satelliitti on jo suunnittelupöydällä. Työnimeksi se on saanut Pathfinder ja tiedonsiirtokapasiteetti tulee olemaan 8 Mbit/s. Kuvassa 2 on periaatekuva Milstar –satelliitista.

DARPA (US Defence Advanced Research Project Agency) rahoittaa tutkimusta, joka tähtää laseryhteyksien käyttöön satelliittiyhteyksillä. Mikäli tässä



Kuva 2: Milstar [Anon. 1999h]

onnistutaan, kyetään toimimaan erittäin korkeilla taajuuksilla, mikä mahdollistaa suurien siirtonopeuksien käytön. Lisäksi laserilla saadaan aikaan erittäin kapea keila. Esimerkiksi geostationaariselta radalta maahan oleva keila on alle 500 metriä halkaisijaltaan, jolloin signaalin sieppaaminen ja häirintä on erittäin vaikeaa. [Dutton ym. 1990]

NATO:n satelliittitietoliikennejärjestelmä

Natolla on ollut vuodesta 1970 lähtien oma satelliittitietoliikennejärjestelmä, joka suunniteltiin diplomaattien ja sotilaiden käyttöön. Tarkoituksena järjestelmällä on lähinnä luoda yhteydet Yhdysvaltojen ja muiden Nato-maiden välillä. Viimeisimmät NATO-4 satelliittiversiot vastaavat pitkälti Skynet-4 satelliittia. [Dutton ym. 1990]

Molniya

Neuvostoliitto ampui ensimmäisen Molniya-satelliitin vuonna 1965. Tämän jälkeen maa on laukaissut pitkälti toista sataan alusta ylläpitääkseen Orbita-tietoliikennejärjestelmää. Molniya-1 järjestelmä suunniteltiin pääosin tukemaan hallitusta ja sotilasyhteyksiä. Tämän päivän Molniya-3 -sarjan satelliitit toimivat korkeammalla taajuusalueella ja niillä on lisäksi kyky välittää värillistä TV-kuvaa. Kokonaisuudessaan Molniya-satelliitit tarjoavat TV-kuvaa, puheluita ja sähkötysviestien välittämistä. Päämaa-asemia on noin 100 ja pienempiä asemia noin 1000. Molniya-3s:n kautta muodostettiin myös toinen Washingtonin ja Moskovan välillä olevista kuumista linjoista. Toinen on toteutettu Intelsatin kautta. Tänä päivänä kuuma linja on muodostettu Gori-zont-nimisen venäläisen satelliitin kautta joskin Molniyan kautta on varmentava yhteys. [Dutton ym. 1990,]

SATELLIITTIPOHJAISSIA PAIKANTAMIS- JA NAVIGOINTIJÄRJESTELMIÄ

GPS-järjestelmä

Eräs tärkeimmistä satelliittisovelluksista tänä päivänä on satelliittipaikanusjärjestelmä Navstar GPS (Global Positioning System), joka on yhdistetty myös mm. Inmarsat-palveluihin. Yhdysvaltain puolustusministeriö on sijoittanut yli 10 miljardia dollaria GPS-järjestelmään, jossa korkeilla maata kiertävillä radoilla on 21 primäärisatelliittia sekä kolme varasatelliittia. Satelliittiratoja on kuusi ja ratakorkeus on noin 20 200 km. Satelliitin kiertoaika on 12 tuntia ja kerrallaan on aina näkyvissä 4 satelliittia, joiden avulla paikantaminen tapahtuu. [Anon 1989; Poutanen 1999; Kalliomäki ja Mannermaa 1996]

GPS:n toimintaperiaate on hyvin yksinkertainen. Paikanmääritys toteutetaan kolmiomittausperiaatteella (ns. kaarimittaus), jossa oma paikka voidaan

laskea trigonometrian avulla mittaamalla etäisyydet useaan (4) satelliittiin. Laskenta perustuu radioaallon vaihe-eromittaukseen. Lisäksi tarvitaan tarkkoja kelloja (kulkuaikojen mittausta) sekä tieto ionosfääriin ja ilmakehän aiheuttamista muutoksista. Yhdysvaltain puolustusministeriön määrittämällä käyttäjillä oli salainen apukeino (koodi), jolla kyettiin poistamaan ministeriön tekemät tahalliset kellovirheet. Sen tarkoitus oli estää mahdollista vihollista käyttämästä GPS:ää taktillisiin sotilaallisiin tarkoituksiin. Presidentti Clinton poisti kuitenkin kesällä 2000 ko tahallisen kellovirheen, mikä mahdollistaa varsin tarkan paikantamisen kaikille tänä päivänä. Tyypilliset havaitut virhelähteet muodostuvat satelliittikellosta (<1m), ratatiedosta (<1m), vastaanottimista (<2m), ionosfääristä ja ilmakehästä (<4m). [Anon 1989; Poutanen 1999; Kalliomäki ja Mannermaa 1996]

Differentiaalinen GPS-järjestelmä (DGPS)

Maailman merillä on ollut käytössä radionavigoinnissa Decca-, Loran C ja Omega-järjestelmiä, jotka ovat tukeutuneet radio- ja tutkamajakoihin riittävän paikantamistarkkuuden saamiseksi. Vuonna 1996 Suomessa otettiin virallisesti käyttöön DGPS-järjestelmä (Differential Global Positioning System). Tuolloin Yleisradio toi markkinoille FOCUS-järjestelmänsä. Kun pelkällä GPS-järjestelmällä päästiin siviilikäytössä (kellovirheen ollessa päällä) noin 20-100 metriin riippuen laitteesta niin DGPS-sovellutuksella epätarkkuudet voitiin pienentää niin, että tarkkuus oli neljä, jopa kaksi metriä 95 prosenttia ajasta. [Anon. 1996b]

Ideana järjestelmässä on, että DGPS-asema (esim. yleisradioasema) ottaa vastaan GPS-satelliitin lähettämän informaation, tekee korjaavat laskelmat (oma paikka on tarkasti tiedossa) ja lähettää DGPS-korjaukset käyttäjälle.

GLONASS

GLONASS (Globalnaya Navigatsyonnaya Sputnikovaya Sistema) on Neuvostoliiton aikana aloitettu satelliittinavigointiin tarkoitettu ja pitkälti GPS:n kaltainen järjestelmä, joka valmistui vasta vuonna 1996. Se käsittää 24 satelliittia kolmella ratatasolla, joiden inkliinaatio on 64,8 astetta. Rata on hieman pienempi kuin GPS:llä ja korkeus merenpinnasta on noin 19100 km ja kiertoaika 11 h 15,7 min. Nykyisten satelliittien elinikä on noin viisi vuotta.

Suurin ero GPS:ään on satelliittien lähettämässä signaalissa. Glonass lähettää signaalia myös kahdella taajuudella, mutta jokaisella satelliitilla on oma taajuutensa. Jokainen satelliitti lähettää samaa kahta koodia. Niissä ei ole ollut tahallaan aiheutettua kellovirhettä. GLONASSin avulla päästään alle 10 metrin paikannustarkkuuteen yhdelläkin vastaanottimella.

GLONASS-satelliittien seuranta-asemia on vain entisen Neuvostoliiton alueella, joten satelliittien ratatiedot ovat GPS:ään verrattuna epätarkempia. Vuon-

na 1997 oli jo saatavissa ensimmäiset vastaanottimet, jotka havaitsivat sekä GPS- että GLONASS-satelliitteja. [Poutanen 1999]

Maailmanlaajuinen satelliittinavigointijärjestelmä GNSS (Global Navigation Satellite System)

Euroopan Unioni ja Euroopan avaruusjärjestö ESA on kehittämässä eurooppalaista satelliittinavigointijärjestelmää GPS:n vastineeksi. USA:n ja Venäjän yhteistyöhaluttomuus on kuitenkin vaikeuttanut uuden järjestelmän yhteensovittamista GPS- ja GLONASS –järjestelmiin. Suurimpia ongelmia ovat taajuushallintaan liittyvät kysymykset ja Euroopan onkin lähdeittävä suunnittelussaan puhtaasti eurooppalaisesta järjestelmästä. Käytännössä tämä tarkoittanee sitä, että GNSS-järjestelmä, joka on ristitty Galileoksi, ei tule toimimaan samoilla taajuuksilla GPS:n ja GLONASSin kanssa. Järjestelmien yhteensopivuus voidaan kuitenkin toteuttaa vastaanottimissa. [Anon. 2000a]

Vuoden 2000 aikana on tarkoitus tehdä suunnitelmat valmiiksi ja vuonna 2005 olisi tarkoitus aloittaa Galileo-palvelut. Operatiiviseen käyttöön järjestelmä on suunniteltu saatavan vuonna 2008. Tuolloin järjestelmä käsittäisi 20 MEO-radalla olevaa satelliittia ja kolmesta kahdeksaan GEO-satelliittia.

KAUKOKARTOITUSSATELLIITIT

Kaukokartoituksella tarkoitetaan lähinnä ilmasta tapahtuvaa maapallon tilan seurantaa ja kartoittamista. Kartoitus toteutetaan yleensä lentokoneesta tai satelliitista. Mikäli halutaan jatkuvaa tietoa, ainoa mahdollisuus on käyttää maapalloa ympäröivällä radalla olevaa kaukokartoitussatelliittia. [Hyypä & Hallikainen 1991]

Kaukokartoitussatelliittien toiminta perustuu siihen, että jokaisella havaintokohteella on oma sähkömagneettinen spektrin vaste, joka koostuu tämän absorboiman (säteilyn energia pienenee kulkiessaan aineen läpi), sirottaman (säteilyn kulkusuunta muuttuu väliaineessa) ja emittoiman (kohde säteilee energiaa) säteilyn muodostumasta kokonaisuudesta. Kaukokartoitus perustuukin juuri näiden sähkömagneettisen säteilyn ilmiöiden mittaamiseen ja analysointiin. Kohteiden emissio-, absorptio- ja sirontaominaisuuksiin vaikuttaa taajuus, minkä vuoksi eri aallonpituusalueita voidaan käyttää erilaisten kohteiden havainnointiin. [Hyypä & Hallikainen 1991]

Kohteet voidaan tunnistaa satelliiteissa olevien instrumenttien avulla. Instrumentteja ovat erilaiset kamerat, radiometrit ja tutkat.

Kaukokartoituksella saadaan selville mm. maalla ja merellä olevia kohteita, tuulen nopeus, ilman saasteita (mm. haitallisia kaasuja), kasvituhoja, metsä- ja luonnonpalojen aiheuttamia tuhoja, vesien saastumista, jäätilanteita, metsä-

profiileja (mm. metsätyyppi, puumäärä, puuston pituus sekä metsätuhoalueet), satelliittikartoja, maan pintakerroksen rakenne, lumen vesiarvoja, teillä tapahtuva liikenteen ruuhkautuminen sekä perusteita teiden suunnitteluun, rakentamiseen ja kunnostamiseen (maaston korkeus, kasviston, pintamaalajien ja tien rakennusmateriaalin kosteus, rakentamisprojektin seuraaminen, sortumien ja tulva-alueiden havainnointi). [Hyypä & Hallikainen 1991]

Tänä päivänä on jo uusia ilmaisimia, joiden kuva-aineisto on sekä geometrisesti että radiometrisesti huomattavasti nykyistä parempaa. Maastoerotuskyky paranee nykyisestä noin 6 metrin erotuskyvystä noin 1 metrin erotuskykyyn, jolloin kuitenkin kuva-alue usein kapenee. Tarkkaa informaatiota saa tänä päivänä käyttöönsä muutkin kuin tiedustelusatelliittien valmistamiseen kykenevät suurvallat, koska kuvat ovat tulleet kaupallisesti saataville. Ongelmaksi saattaa muodostua se, miten tiedon jakelupolitiikkaa säädellään. Tutkatekniikan kehittyessä paranee myös pilvisen sään ja pimeyden aikainen havainnointi.

Resoluutio

Yksi tärkeä tekijä kaukokartoitus- ja tiedustelujärjestelmiä tarkasteltaessa on resoluutio. Jos todetaan, että resoluutio on 1 metri, se tarkoittaa, että järjestelmä ei voi erottaa kahta esinettä toisistaan, jos ne ovat lähempänä toisiaan kuin 1 m. Tämä selittää, miksi pienet kohteet joskus näyttävät epäselviltä. Sen sijaan suotuisissa oloissa sähkölinja kyetään erottamaan 20 metrin resoluutiolla. Mitä parempi resoluutio, sitä yksityiskohtaisempaa tiedustelutietoa voidaan kerätä. Usein puhutaan viidestä eri tarkkuustasosta: havaitseminen, (yleinen) tunnistus, identifiointi (tarkka tunnistus), kuvaus, tekniset tiedot. [Dutton ym. 1990; Bongi ym. 1999]

Sen mukaan, miten tarkka ilmaisuus halutaan, tulee valita käytettävä sensori. Mikäli halutaan senttimetriluokkaa oleva resoluutio, pitää tänä päivänä käyttää optista aluetta. Tiedustelulaitteen resoluutiokyky on suoraan verrannollinen tulevan signaalin aallonpituuteen ja kääntäen verrannollinen keräävän kojeen (linssi tai antenni) aukon läpimittaan. Näin ollen matalan (=hyvän) resoluution saamiseksi tulee optiset sensorit, linssin halkaisija tai antennin leveys tehdä niin suureksi kuin mahdollista.

Seuraavaan taulukkoon on koottu erilaisten kohteiden havaitsemiseen ja tunnistamiseen tarvittavaa resoluutiota metreinä [Dutton ym. 1990; Bongi ym. 1999]:

KOHDE	Tarkkuuden taso [metriä]				
	Havaitseminen	Yleinen tunnistus	Tarkka tunnistus	Kuvailu	Tekniset tiedot
SILTA	6	4,5	1,5	1	0,3
LENTOTUKIKOHTA	6	4,5	3	0,3	0,15
RAKETINHEITIN	1	0,5	0,15	0,05	0,03
LAIVA	15	4,5	0,15	0,05	0,04
SUKELLUSVENE (pinnassa)	7,5	4	0,15	0,05	0,025
LENTOKONE	4,5	1,5	0,15	0,05	0,03
AJONEUVO	1,5	0,5	0,15	0,05	0,03
TUTKA-ASEMA	3	1	0,3		
RADIOASEMA	3	1,5	0,3		
MAANTIE	6	4,5	1,5		

Taulukko. Erilaisten kohteiden havaitsemiseen ja tunnistamiseen tarvittava resoluutio metreinä

SATELLIITTIKUVAT

Satelliittikuvien työstäminen käyttökelpoiseen muotoon vaatii omat toimensa. Digitaalisesta tiedosta muodostettua kuvaa voidaan käsitellä monella tavalla ja moniin eri tarkoituksiin. Kuvia voi koota suuremmiksi kokonaisuuksiksi tai pilkkoa osiin. Niihin voi yhdistää myös muita digitaalisessa muodossa esitettyjä aineistoja kuten karttoja tai suunnitelmapiirroksia. Uuden kuvan tiedot voidaan näin ollen asettaa vanhan tiedon päälle, jolloin kuvankäsittelymenetelmillä voidaan havaita mm. tapahtuneet muutokset. [Vuorela 2001]

Satelliittikuvien käyttö riippuu mm. kuvien teknisistä ominaisuuksista (resoluutio, kuvakoko,jne), kuvien saatavuudesta (satelliitin rata ja ohjelmoitavuus), hinnasta, kuvaformaatista ja niiden käytettävyydestä eri ohjelmistoissa. Usein miten satelliittikuvaukset on tilattava etukäteen. [Vuorela 2001]

Ensimmäinen 1 metrin resoluutiolla (pankromaattinen kuva) kuvaava kaupallinen satelliitti oli amerikkalainen Ikonos, joka laukaistiin 24.9.1999. Vaikka kyseinen satelliitti laukaistiin em. päivänä, saatiin ensimmäiset kuvat vasta 45 vuorokautta myöhemmin johtuen Kosovon taisteluista. Syynä oli Yhdysvaltojen kansalliset edut, jonka johdosta kuvien jakamista viivytettiin.

Kuvien minimihinta Suomessa vuonna 2001 oli noin 42000 mk, jolla sai kaksi 11 km x 11 km kuvaa. Parhaimmillaan Ikonos-kuvan voi Suomessa saada noin kuukaudessa, mutta optisessa kuvauksessa pilvisuus saattaa asettaa rajoituksia. Lisäksi on muistettava se, että kuvauskulmat ovat melko viis-



Kuva 3: Keravan keskusta 1-metrin resoluutiolla (© Space Imaging 2000, SIE/Novosat Oy)

toja eli n. 40° nadiirista (90° eli kohtisuoraan alaspäin on nadiirikuvaus). Tällöin voi olla ongelmia mm. teiden havaitsemisessa metsäisessä maastossa. [Vuorela 2001]

Kuvassa 3 on Ikonos-satelliitin ottama kuva Keravan keskustasta. Suomessa kuvia välittää Novosat Oy.

Israelilaisen tiedustelusatelliitin OFEQ-3:n pohjalta rakennettujen Eros-satelliittien kuvat ovat tulossa kaupalliseen tarjontaan. Eros A1:n laukaisu tapahtui 5.12.2000, joten ensimmäiset kuvat ovat saatavilla kesän 2001 aikana. Satelliitti on kevyt ja se pystyy kääntymään 45 astetta mihin suuntaan tahanan-

sa, jolloin se voi ylilennolla kuvata useita alueita. Elinikä odotetaan olevan vähintään 4-vuotta. Resoluutio kameralla on 1,8 metriä kuvalinjan ollessa 12,5 km leveä. 12,5 km x 12,5 km kuva tulee maksamaan vähän yli 10000 mk. Minimitilaushintaa ei ko kuville ollut vahvistettu kesään 2001 mennessä. Myöhemmin (2003 ?) laukaistavan Eros B-sarjan satelliittien resoluutio tulee olemaan 0,82 m ja kamera mahdollistaa kuvauksen myös heikossa valossa. Datansiirtonopeudet Eros A:lla on 70 Mbit/s ja Eros B:llä 280 Mbit/s. Vuoteen 2005 mennessä on tavoitteena laukaista kaikkiaan kahdeksan Eros-satelliittia. Suomen alueen kuvien vastaanotto tapahtuu Kiirunassa Pohjois-Ruotsissa. Novosat saa kuvat muutaman tunnin kuluessa vastaanotosta. [Vuorela 2001]

Vuoden 2001 aikana amerikkalaiset pyrkivät laukaisemaan QuickBird 2 –satelliitin. Sen resoluutioksi on ilmoitettu mustavalkoiselle (Pan) 0,61 m ja värikuvalle (monikanavainen) 2,5 m [Belov 2001].

Venäläisillä on myös omat kuvaussatelliittinsa, joskin Suomen osalta kaikkia kuva-aineistoja ei ole ollut säännöllisesti saatavilla. Monet venäläisten instrumentit ovat alun perin analogisia (tallennus valokuvausfilmille, joka pudotetaan laskuvarjolla maahan). Teknisesti kuvat ovat kuitenkin hyviä. Esimerkiksi KVR-1000 –mustavalkokuvissa erotuskyky on ollut jo pitkään 2 – 3 metriä kuva-alan ollessa 40 km x 40 km. Suomessa venäläisiä satelliittikuvia välittää edelleen Novosat Oy. [Vuorela 2001]

Vanhempia satelliitteja ovat mm. intialainen IRS-satelliitti, joka välittää 5,8 metrin resoluutiolla olevaa mustavalkokuvaa. Jatkossa Intia suunnittelee 2,5 m resoluutiolla olevaa satelliittia vuoden 2001 lopulla. Esimerkiksi Intian armeija suunnittelee käyttävänsä uutta järjestelmää mm. rajanvalvontaan. Ranskalaisen Spot-satelliitin lähettämän kuvan erotuskyky on 10 m. Vuonna 2002 ranskalaiset ovat suunnitelleet laukaisevansa yhdessä Belgian ja Ruotsin kanssa Spot 5-satelliitin, jonka resoluutioksi on ilmoitettu 2,5 m ja 5 m (pankromaattinen). Amerikkalaisten Landsat välittää 15 metrin resoluutiolla olevaa kuvaa. SAR-tutkaan perustuva Euroopan avaruusjärjestön ERS-satelliitti pystyy keräämään aineistoa myös pimeällä ja pilvisellä säällä. Erotuskyky on 15 – 30 m kuvakoon ollessa 100 km x 100 km. Paljon käytetty tutkasatelliitti on kanadalainen Radarsat, jolla päästään 10 m erotuskykyyn kuvasivun ollessa 50 km. [Vuorela 2001]

TIEDUSTELUSATELLIITTIJÄRJESTELMÄT

Sotilastiedustelu on kautta aikojen ollut yksi satelliittien tärkeimmistä tehtävistä. 40 % kaikista laukaistuista satelliiteista lasketaan palvelleen tiedustelua. Satelliitteja pidetään myös strategisesti tärkeinä. Tällä hetkellä avaruudessa eri kiertoradoilla arvioidaan olevan yli 2300 satelliittia, joista vähintään 750 oletetaan olevan puhtaasti sotilaallisessa käytössä. Sen jälkeen, kun neuvostoliittolaiset vuonna 1960 ampuivat alas Gary Powers:n U2 ilma-aluksen, ainoa tarkka keino kerätä tietoa neuvostoliittolaisten mannerten välisistä ballistisista ohjuksista (= ICBM, Intercontinental Ballistic Missiles), oli tiedustelusatelliitit. Myöhemmin, kun useita eri SALT-sopimuksia (Strategic Arms Limitation) allekirjoitettiin, tiedustelusatelliitit olivat päävälineitä sopimusten todentamisessa. [Dutton ym. 1990]

Avaruuteen perustuva kuvaustiedustelu on yleisesti ottaen palvellut politiikan tekijöitä ja byrokraatteja, ei kenraaleja. Presidentit Eisenhower ja Kennedy olivat onnellisia, jos näkivät satelliittikuvan kaksi viikko sen ottamisen jälkeen. 1970-luvulla satelliitit aloittivat lähettää kuvia suoraa avaruudesta kuten TV-kuvaa. Lopputulos oli kallis. KH-11 ja uudemman sukupolven tiedustelusatelliitit maksoivat yli miljardi dollaria kappale ja uudet lähetettiin avaruuteen muutaman vuoden kuluttua edellisen eliniän loppua. Mutta ydinfilosofia oli, että sitä tarjottiin politiikan tekijöille strategisena aseena enemmän kuin taktisena välineenä. Näin ollen taistelukentän tiedustelu tuli vasta toissijaisena. Kenraali Schwarzkopf nurisi sitä, että hän ei saanut ensisijaisena käyttäjänä Persianlahden sodan aikana satelliittikuvia.

Nykyiset vakoilusatelliitit kykenevät havaitsemaan mm. yksittäisen auton. Ongelmana on, että tällöin kuvattava alue on hyvin suppea eli esimerkiksi autojen pysäköintialue. Tällä hetkellä hankaluutena on myös uusien kuvien saantiin kuluva aika. Esimerkiksi Landsat-satelliitti käy samassa paikassa vain kerran 17 päivässä.

Avaruudesta tapahtuva tiedustelu kattaa tänä päivänä monta elektromagneettisen spektrin osa-alueita kuten infrapuna-, ultravioletti-, radio- ja tutka-
taajuudet sekä optiset aallonpituudet.

Optinen ja infrapuna-alueen tiedustelu

Tyypillinen optisessa eli näkyvän valon alueen tiedustelussa käytetty satelliittirata on elliptinen, jolloin perigeumi on noin 150 km:n korkeudella ja apogeumi 400 km:n korkeudella. Kuva otetaan luonnollisesti silloin kun satelliitti on matalimmillaan. Koska valaistusolot ovat tärkeä tekijä, kyetään mahdollinen kuvausajankohta määrittelemään. Ilmakehästä johtuva vastus

kuitenkin johtaa siihen, että kyseisten satelliittien elinikä jää varsin lyhyeksi. [Dutton ym. 1999; Bongi ym. 1999]

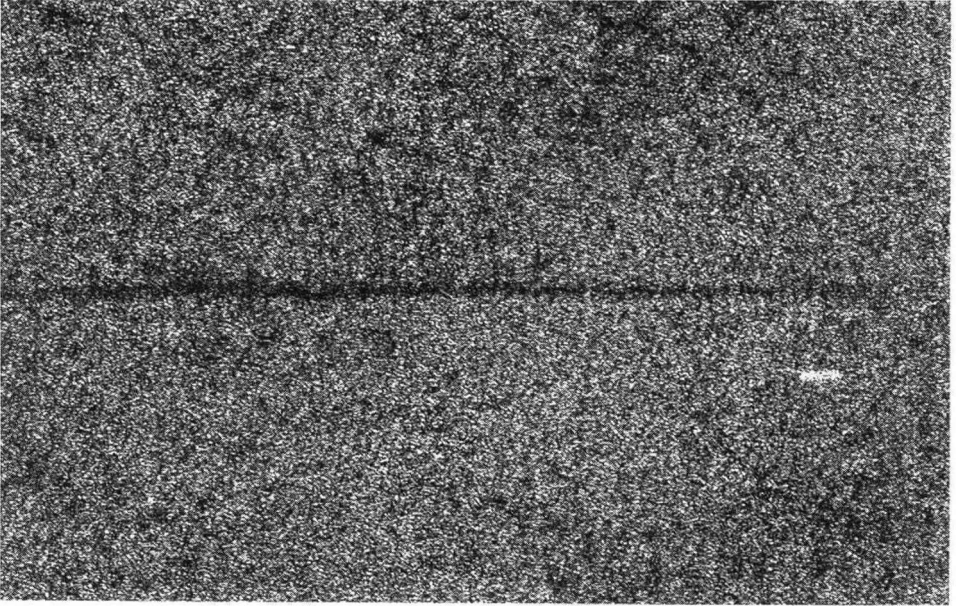
On olemassa lisäksi hankalammin erottuvia kiertoratoja, joita optiset tiedustelusatelliitit käyttävät kuten 350 km:n korkeudella maata kiertävät satelliitit. Usein puhutaan aurinkosynkronisesta kiertoradasta. Tällöin kuvaussatelliitit kiertävät polaarisisäisillä radoilla (= läheltä pohjois- ja etelänapaa), jotka kiertyvät hitaasti niin, että radan taso on aina kohti aurinkoa vuoden ajasta riippumatta. Aurinkosynkroniset satelliitit ovat varsin pitkäikäisiä. Niitä käytetään siviilipuolella mm. kaukokartoituksiin ja meteorologisiin tutkimuksiin. Pitkäikäisyydestä johtuen näissä käytetään usein elektro-optisia sensoreita, jotka lähettävät saadun tiedon radiolinkkien avulla. Toinen mahdollisuus on käyttää filmiä ja pudottaa se sopivassa kohdassa maahan kehitettäväksi.

Tosiasiassa on, että edellä mainituilla kiertoradoilla satelliitin kiertoaika on noin 90 minuuttia. Lisäksi on muistettava, että satelliitin kiertorata pysyy koko ajan samassa suunnassa, kun maapallo kiertyy alapuolella. Tämä tarkoittaa, että satelliitti ylittää saman pisteen kahdesti vuorokaudessa – toisen päiväsaikaan ja toisen pimeällä. Vielä kun lasketaan, että Euroopassa taivas on pilvetön vain 20 % ajasta (vuodesta) niin, avaruudesta saatavia optisia kuvia ei kannata käyttää taktisessa mielessä vaan lähinnä strategisen suunnittelun apuna. Strategista suunnittelua tukee myös filmille kuvaaminen. Toimenpide vie oman aikansa, kun rulla pudotetaan maahan kehitettäväksi ja tulkittavaksi. [Bongi ym. 1999]

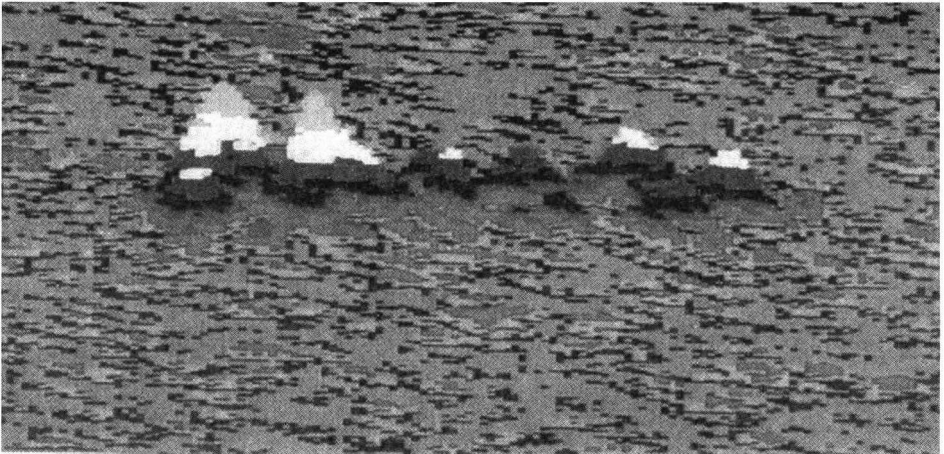
Lähi-infrapuna-alueella tiedustelu on mahdollista pimeällä ja ohuen pilvi-verhon läpi. Toimittaessa pidemmällä infrapuna-aalloilla, resoluutio tulee huomommaksi eikä tällöin ole saatavissa optisen alueen senttimetritarkkuutta. Infrapunajärjestelmiä käytetään erityisesti silloin, kun halutaan erottaa lämpimiä kohteita kylmästä taustasta.

Tutkatiedustelu

Optisten järjestelmien resoluutio on tänä päivänä muutaman senttimetrin luokkaa. Valitettavasti pilvet ja pimeys estävät optisen tiedustelun. Infrapuna-alueelle siirtyminen laajentaa kuvausmahdollisuuksia, mutta raskaat pilvet ovat sillekin esteenä. Nämä ongelmat voidaan pitkälti poistaa siirryttäessä tutkatiedusteluun, joka pystyy tehokkaaseen toimintaan 24 tuntia vuorokaudessa. Avaruuspuolella tutkakuvauksella on kuitenkin kaksi murhetta. Ensimmäinen on riittävän hyvän resoluution aikaan saaminen. Esimerkiksi Lacrosse-satelliitti (viimeisin laukaisu todennäköisesti vuonna 1996) käyttää kuvaavaa SAR-tutkaa (Synthetic Aperture/Array Radar eli synteettisen antennin tutka), jonka alueellinen erotuskyky on noin yksi metri. Toinen ongelma kohdistuu riittävän tehon saamiseen satelliittiin. Avaruuspuoleiset tutkajärjestelmät vaa-



Kuva 4: SAR-tutkakuva rahtilaivan vanasta [Dutton ym. 1990]



Kuva 5: Kolmiulotteinen tutkak kuva [Dutton ym. 1990]

tivat joko uuden tyyppistä tutkaa tai ydinreaktoria voimanlähteeksi. Molemmat vaihtoehdot ovat tänä päivänä käytössä. [Anon. 1999f]

Jotta 250 km:n korkeudella lentävästä satelliitista saadaan 1 metrin resoluutiainen kuva tarvitaan optisen alueen (aallonpituus $0,5 * 10^{-6}$ m) kuvausjärjestelmään 12 cm:n halkaisijaltaan oleva linssi. Infrapuna-alueella ($10 * 10^{-6}$ m) sama resoluutio saavutettaisiin 2,5 m:n linssillä. Tutka-alueella antennin pitäisi olla 7,5 km pitkä, mikä fyysisesti rakennettuna on mahdoton toteuttaa. SAR-tekniikalla kyetään ikään kuin huijaamaan tutkaa käyttämällä antennin liikettä hyväksi. Satelliittiin sijoitettu synteettisen aukon tutka (SAR) muodostaa laskennallisesti suhteellisen pitkän "virtuaaliantennin", jolloin tutkan sivusuunnan resoluutio saadaan erittäin pieneksi. Tämä, yhdistettynä lyhyiden pulssien tai pulssikompression avulla saavutettavaan pieneen etäisyysresoluutioon, tarjoaa erittäin hyvät ominaisuudet mm. kuvan muodostukseen ja kiinteiden maalien tunnistamiseen. [Dutton ym. 1990]

Järjestelmien tietojenkäsittely kehittyi tulevaisuudessa. Jo nyt on esitetty menetelmiä, joilla lentokoneesta käsin voidaan SAR-tutkalla päästä jopa 15 cm:n erottelukykyyntä taistelukentän valvonnassa ja tunnistaa automaattisesti esim. suhteellisen samannäköiset panssaroidut ajoneuvotyypit toisistaan.

SAR-kuvalla (kuva 4) voidaan havaita myös rahtilaiva syntyneen vanan johdosta. Aluksen kuvassa on poikkeama, koska SAR-prosessi olettaa kohteen olevan paikallaan. Laivan ja vanan välinen etäisyys on verrannollinen aluksen nopeuteen.

Kuvassa 5 on käytetty kolmiulotteista tutkakuvaa, jolloin kyetään saamaan yksityiskohtaisempaa tietoa laivan piirteistä. Tästä voidaan erottaa mm. siviili ja sotilasalukset toisistaan.

USAn tiedusteluohjelma

Yhdysvaltojen tiedustelusatelliittiohjelmassa viitataan usein Key Hole (KH) -ohjelmaan. Se sai alkunsa 1960-luvun alussa, jolloin ensimmäinen KH-1 satelliitti otettiin käyttöön. Viimeisintä tekniikkaa edustaa KH-11, jota käytettiin mm. Persianlahden sodassa. Satelliitti välittää digitaalisia kuvia maahan relesatelliitin välityksellä. [Bongi ym. 1999, Anon.1999d]

KH-11:n kehittynyt versio tunnetaan myös nimellä KH-12. Tämä kykenee kuvamaan CCD-ilmaisimella yhtä tarkkoja kuvia kuin aiemmin kuvattiin filmille. Lisäksi se pystyy siirtämään lähes reaaliajassa 10 cm resoluution kuvia maahan. Satelliitissa on sensori myös lähi-infrapuna-alueella ja termisellä ip-alueella. Pimeällä tapahtuvaa kuvaamista varten on todennäköisesti valonvahvistin. Satelliitti pystyy muuttamaan myös rataansa tarpeen mukaan ja se voi pudottautua jopa 120 km:n korkeudelle tarkempien kuvien saamiseksi. [Bongi ym. 1999]

Huolimatta KH-12:n eduista, se ei kykene näkemään pilvien läpi. Tähän tarkoitukseen kehitettiin Lacrosse-satelliitit, joiden synteettisen apertuurin tutkien kuvien resoluutioiden arvioidaan olevan parempi kuin 1 metri. Tällä tarkkuudella kyetään seuraamaan perussotilasyksiköitä ja ohjusten siirtämiseen käytettäviä ajoneuvoja. On selvää, että näin tarkassa resoluutiossa kuvattava alue muodostuu varsin kapeaksi eli käytännössä muutamia kymmeniä kilometrejä. [Bongi ym. 1999]

Venäjän tiedusteluohjelma

Neuvostoliiton ensimmäinen kuvaussatelliitti Zenit-2 (Kosmos-4) laukaistiin vuonna 1962. Sen toiminta-aika oli 8 vuorokautta ja kameralla kyettiin kuvaamaan 1500 kuvaa 60 x 60 km:n alueelta. Kamera ja kuvat palautettiin kapselissa maahan kuvauksen jälkeen. [Tielinen 1999]

KH-11:ta vastaava satelliitti oli Jantar-4KS1 (Terilen), jonka käyttö alkoi vuonna 1982. Toiminta-aika oli noin vuosi ja satelliitissa oli useita pieniä kapsелеita filmien palauttamiseksi. Ratakorkeus vaihteli 180 – 270 km:iin. Viimeksi laukaistun satelliitin toiminta-aika loppui heinäkuussa 1999. Venäläisen tiedon mukaan Jantar-4KS1:n digitaalisen informaation saaminen käyttökelpoiseen muotoon kesti noin yhden vuorokauden. [Anon. 1999i]

Kuudennen sukupolven satelliitti on todennäköisesti Orlets-1, jonka toiminta-aika on ollut 60 – 123 vuorokautta. Rata on vaihdellut 160 – 300 km:iin. Kuvat on palautettu maahan useilla filmikapseleilla. [Tielinen 1999]

Uusimman eli seitsemännen sukupolven satelliitista käytetään nimeä Arkon-1. Satelliitin ratakorkeus on 1500 – 2800 km ja kiertoaika on 130 minuuttia. Kuvausjärjestelmä on varustettu 27 metrin optisella polttovälillä ja sen erottelukyky on 2 – 5 metriä. Kuvattava alue on 30 km leveä ja se pystyy kuvaamaan 1000 km sivussa olevia kohteita. Kuvien siirto maahan tapahtuu digitaalisesti. [Tielinen 1999, Anon. 1999j]

Eurooppalaiset tiedustelujärjestelmät

Ranskalaiset käyttävät samoja satelliitteja sekä siviili että sotilastarkoitukseen. SPOT-satelliitit tuottavat kaupalliseen tarkoitukseen mm. pankromaattista (mustavalkoista) kuvaa 10 metrin resoluutiolla. Viimeisin versio Spot-4 laukaistiin vuoden 1998 alkupuolella. Tätä parempaan tulokseen eli 1 metrin resoluutioon ccd-ilmaisimella päästään Helios-satelliitilla, joka on tarkoitettu yksinomaan sotilaalliseen tiedusteluun. Helios-1 laukaistiin 1995. Ranskan lisäksi hankkeessa on mukana Italia ja Espanja. Myös Saksaa on yritetty saada mukaan Helioksen 2. version kehittelyyn, jossa resoluutio olisi 0,5 m ja se sisältäisi myös infrapunasensoreita. Toistaiseksi tässä ei olla onnistuttu, koska Saksan ehtona on johtoasema Horus-SAR –tutkasatelliitin kehityshank-

keessa. Tämä hanke tunnetaan myös nimellä Osiris ja se on suunniteltu laukaistavan vuonna 2005. [Bongi ym. 1999, Anon. 1999b]

Elektronisen tiedustelun satelliitit

Elektroninen tiedustelu avaruudesta on periaatteessa yksinkertaisin tehtävä, mitä satelliitilla voi olla. Siihen tarvitaan vain herkkä radiovastaanotin sekä nauhuri. Järjestelmä voidaan ohjelmoida esimerkiksi niin, että se nauhoittaa vain lentäessään kohdealueen yli. Seuraavan kerran, kun satelliitti lentää oman alueen yli, nauhoitettu data voidaan lähettää alas analysoitavaksi. Koska avaruudessa ei ole rajoja, laitteella voidaan salakuunnella ilman, että tilanne muodostuu poliittisesti kiusalliseksi. Käytännössä avaruusperustaiset tiedustelujärjestelmät täydentävät muilla keinoilla saatua tiedustelutietoa. [Dutton ym. 1990]

Neuvostoliitolla on ollut vuodesta 1967 lähtien elektronisen tiedustelun (ELINT, Electronic Intelligence) satelliitteja. Niiden kiertoradat ovat olleet elliptisiä radan korkeuden vaihdellissa 260 – 860 km. Uusin neljännen sukupolven Tselina-2 –satelliittijärjestelmä otettiin käyttöön vuonna 1985. Viimeisin satelliitti on laukaistu vuonna 1998. Satelliitin rata on melko pyöreä ja sen korkeus on noin 850 km. Kierrosaika on 102 minuuttia ja rata toistuu 14 kierroksen jälkeen eli 24 tunnin välein. Venäjällä on kuitenkin ollut vaikeuksia viime aikoina järjestelmän ylläpitämisessä ja vuonna 1999 arvioitiin järjestelmässä olevan vain 1 – 2 satelliittia. [Tielinen 1999]

Yhdysvalloilla on vastaavanlainen SIGINT (Signals Intelligence) –satelliittijärjestelmä, jonka koodinimi on Rhyolite. Rhyolite-tyyppinen satelliitti kiersi geostationaarisella radalla 1970-luvun lopulta alkaen ja siinä oli erityisen suuret vastaanottoantennit, jotta se erotti heikotkin signaalit. Samasta järjestelmästä on käytetty myöhemmin koodinimeä Aquacade. Rhyolite tiedusteli lähinnä VHF- ja UHF-alueen radiolähetteitä. 1978 on tullut seuraavan sukupolven SIGINT-satelliitti ja se sai aluksi koodinimen Chalet ja myöhemmin Vortex. Tammikuussa 1985 laukaistiin seuraava satelliitti, joka sai koodinimen Magnum ja myöhemmin nimi muutettiin Orioniksi. Kolmannen luokan satelliitti tunnettiin ensin JUMPSEAT-nimisenä ja myöhemmin TRUMPET:na. [Dutton ym. 1990]

Vaikka SIGINT-satelliittien laukaisut 1990-luvulla ovat olleet hämärän peitossa, voidaan olettaa, että Yhdysvallat kykenee, mikäli se vain haluaa, sieppaamaan matkapuhelimien ja esim kaupunkialueella käytettävien mikroaaltolinkkien signaalit missä tahansa maapallolla.

Järjestelmällisen COMSAT ILC (Communications Satellite International Leased Carrier) tietoliikenteen keräämisen Yhdysvallat aloitti vuonna 1971. Tähän tarkoitukseen rakennettiin kaksi asemaa, joilla kerättiin tietoa kaupalli-

sista Intelsat-satelliiteista. Kaupallisten satelliittien järjestelmälliseen tiedusteluun (=ILC) keskityttiin vuosina 1985-95, jolloin tämä liitettiin myös ECHELON-tiedustelujärjestelmään.

PÄÄTÄNTÄ

Tietoliikennesatelliittien käyttö on ollut kaupallista toimintaa jo 15 vuotta. Paikantamiseen liittyvät satelliittisovellukset tulivat yleisille markkinoille noin 5 vuotta sitten. Kaukokartoituksen kaupallistaminen on alku vaiheessa, mutta näyttäisi siltä, että 5 - 10 vuoden kuluessa siitäkin muodostuu massamainen tuote.

Suuntauksena on kehittää yhä kevyempiä satelliitteja. Mitä kevyempi satelliitti on, sitä matalammalla radalla se pystyy operoimaan ja mm. sitä tarkkaresoluutioisempaa aineistoa se pystyy tuottamaan.

Uudenaikaiset sotilassatelliittijärjestelmät tulevat näyttelemään erityisesti suurvaltojen yhteydenpidossa suurta merkitystä, kun kyseessä on erittäin tärkeät yhteydet. EHF-taajuuksien, antennien sähköisen nollaamisen ja hajapektritekniikan käyttö, prosessoinnin lisääminen satelliitissa sekä satelliitista satelliittiin olevien linkkiyhteyksien käyttö tulevat vaikeuttamaan vastustajan pääsyä satelliittiyhteyksille.

Sotilaalliselta kannalta tarkasteltuna tietoliikennesatelliittijärjestelmien etuna ovat mm. se, että yhdellä satelliitilla voidaan kattaa koko operaatioalue, verkko on nopea toteuttaa ja sillä on joustava rakenne, asemilla voi olla suuri liikkuvuus ja yhteydet eivät ole riippuvaisia maasto-olosuhteista (käytännössä oltava kuitenkin näköyhteys taivaalle), viestit voidaan toimittaa useaan paikkaan samanaikaisesti ja järjestelmä on helposti liitettävissä muiden kansallisuuksien tiedonsiirtojärjestelmiin.

Sotilassatelliittitiedustelu ei ole pelkästään maanpinnan kuvaamista satelliitista optisilla kameroilla. Sitä tullaan täydentämään ei taajuusalueilla toimivilla instrumenteilla kuten entistä tarkkaresoluutioisimmilla tutkilla. Näiden rinnalla käytetään myös elektronista tiedustelua.

Kylmän sodan loputtua ei ole enää samalla tavalla tarvetta kehittää sotilassatelliittijärjestelmiä kuin ennen. Sotilaskäytössäkin turvaudutaan entistä enemmän kaupallisiin tietoliikenne- ja kaukokartoitus (tiedustelu) –satelliittijärjestelmiin etenkin kun salausjärjestelmät ja satelliittikuvien tarkkuus paranevat. Kaupallisillakin kaukokartoitussatelliiteilla päästään jo 1 metrin resoluutioon. Edellä mainittu ei kuitenkaan tarkoita, että sotilassatelliittijärjestelmistä luovutaan. Niiden kehittämällä ja käytöllä tulee olemaan oma tärkeä osansa uudessa tietosodankäynnissä.

Suomen kannalta tarkasteltuna on tärkeää tietää satelliitteihin liittyvät mahdollisuudet ja tunnistaa mahdolliset uhat, mitkä liittyvät satelliittien käyttöön. Niin kauan kuin Suomi itse ei operoi satelliitteja, ei voida olla varmoja niiden käytettävyydestä esimerkiksi kriisin aikana. Samoin on tiedostettava se uhka, joka Suomeen kohdistuu avaruudesta muun muassa tiedustelun muodossa. On tärkeä tuntea miten satelliitit toimivat, jotta osaa varautua niiden käyttöön.

Uudet satelliittijärjestelmät tarjoavat uusia standardeja liittyen kapasiteettiin, aikaan ja joustavuuteen. Tasapaino täytyy muodostaa reaaliaikaisten yhteyksien, lähetyksien haavoittuvuuden ja täysimääräisen turvallisuuden puuttumisen välille. Siinä vaiheessa kun täysin turvallinen satelliittipuhelin tulee saataville, sotilashenkilöt - tiedustelujoukosta monikansallisiin rauhanturvaajiin - voivat olettaa saavansa täyden edun näiden uudesta kyvystä.

LÄHTEET

- Ahola, Kimmo. 1998. Esitelmä sotatekniikan päivillä: Yhteistyöllä ovet auki uusiin maailmoihin – kokemuksia Eurooppalaisesta avaruusyhteistyöstä ESAssa. Puolustusvoimien Koulutuksen Kehittämiskeskus 27.10.1998.
- Andergård, Bo, ins.: Inmarsat palvelut. Viestimies 3/94.
- Anon. 1980. Otavan Suuri Ensyklopedia, osa 15. Keuruu: Kustannusosakeyhtiö Otava. 1980. ss. 6096-6097. ISBN 951-1-05078-8.
- Anon. 1989. GPS, A guide to next Utility-Trimble Navigation, USA, 1989.
- Anon. 1996a. Finnyards – Matra Marconi, satelliittiseminaariaineisto. 21.11.1996.
- Anon. 1996b. Fokus-palvelu. Yleisradion esite 1996.
- Anon. 1998a. Euroopan Komission tiedonanto neuvostolle, Euroopan parlamentille, talous- ja sosiaalikomitealle sekä alueiden komitealle, KOM(98) 29 lopullinen, 21.1.1998.
- Anon. 1998b. Jane's Defence weekly vol. 30, 26 August 1998 issue no 8. New Space Race Special Report
- Anon. 1998c. Euroopan Komission tiedonanto neuvostolle, Euroopan parlamentille, talous- ja sosiaalikomitealle sekä alueiden komitealle, KOM(98) 29 lopullinen, 21.1.1998.
- Anon. 1998d. Signal, October 1998. RKA: Middle-of-the-High-Road Orbiters Aim for Mobile Telecommunications.
- Anon. 1998e. Sotatekninen arvio ja ennuste - osa 1, 31.5.1998, Kaukokartoitus.
- Anon. 1998f. Strategic Assessment 1998, Engaging Power for Peace, Institute for National Strategic Studies, National Defence University. USA.
- Anon. 1998g. Strategic Assessment 1998. Institute for National strategic Studies, National Defence University. USA 1998.
- Anon. 1999a. Avaruustoiminta Suomessa, Kansallinen strategia ja kehittämisen tavoitteet. Kauppa- ja teollisuusministeriön neuvottelukuntaraportteja 1/1999. Avaruusasian neuvottelukunta.
- Anon. 1999b. Helios. [viitattu 9.9.1999]. Saatavissa muodossa: [Http://www.fas.org/spp/guide/france/military/imint/index.html](http://www.fas.org/spp/guide/france/military/imint/index.html).
- Anon. 1999c. IEEE Military Communications Conference Proceedings, MILCOM 1999. CD-ROM. ISBN 0-7803-5541-5.
- Anon. 1999d. KH-12 Improved Crystal. [viitattu 25.8.1999]. Saatavissa muodossa: <http://www.fas.org/spp/military/program/imint/kh-12.htm>.
- Anon. 1999e. Kosmos 2344 is Arkon-1.[viitattu 3.9.1999]. Saatavissa muodossa: <http://www.users.wineasy.se/svengrahn/histind/Recces/Arkon.htm>.
- Anon. 1999f. Lacrosse / Vega. 25.8.1999. Saatavissa muodossa: <http://www.fas.org/spp/military/program/imint/lacrosse.htm>.
- Anon. 1999g. MILCOM 1999, Unclassified Panel Sessions, Oct. 31 – Nov.3,1999, Atlantic City, NJ. CD-ROM.
- Anon. 1999h. Milstar-esite, Lockheed Martin Missiles & Space, Milsatcom Program Office, USA, 1999.
- Anon. 1999i. Soviet/Russian reconnaissance satellites. [viitattu 3.9.1999]. Saatavissa muodossa: <http://www.users.wineasy.se/svengrahn/histind/Recces/Recces.htm>.

Anon. 1999j. Spy Satellites. [viitattu 3.9.1999]. Saatavissa muodossa: <http://www.satellite.eu.org/sat/vsohp/spysat.html>.

Anon. 1999k. Spy satellites enter new dimension. [viitattu 3.9.1999]. Saatavissa muodossa: <http://www.msnbc.com/news/185953.asp>.

Anon. 1999l. Sotatekninen arvio ja ennuste 2001. Pääesikunnan teknisen kehittämissosaston vuonna 1999 julkaisema CD-ROM-levyke.

Anon. 1999m. Via Satellite 1999. Military satcom. Phillips Business Information Inc. USA.

Anon.2000a. Eurooppalainen Galileo ja GPS eri järjestelmiksi ? Avaruus uutiset 1/2000.

Anon.2000b. Globalstar. [viitattu 10.4.2000]. Saatavilla www-muodossa http://www.globalstar.com/en/support/t_03.html, http://www.globalstar.com/en/about/a_03.html ja <http://www.globalstar.com/en/about/index..html>.

Anon.2000c. Ico. [viitattu 12.4.2000] Saatavilla www-muodossa :<http://www.ico.com/system/spaceseg.htm>. ja <http://ico.com/system/home.htm>.

Anon.2000d. Inmarsat. . [viitattu 4.7.2000]. Saatavissa www-muodossa: <http://www.inmarsat.org/newsroom/facts/genfac.html>.

Anon. 2000e. Interception Capabilities 2000. [viitattu 13.6.1999]. Saatavissa muodossa: <http://www.iptvreports.mcmail.com/ic2kreport.htm>.

Anon. 2000f. Iridium. Iridium. Saatavissa www-muodossa: <http://iridium.com/discover/explore/products/docs/scansat7701.html>. [viitattu 13.4.2000], :<http://iridium.com> [viitattu 1.7.2000] ja: <http://iridium.com/discover/explore/products/docs/scansat7701.html> [viitattu 13.4.2000].

Anon. 2000g. Spaceway. [viitattu 1.7.2000]. Saatavissa www-muodossa: <http://spaceway.com/about/over..htm>. ja <http://spaceway.com/spaceway.htm>

Anon. 2001a. Commission of the European communities, Commission staff working paper, Joint document from Commission servicedes and the European Space Agency, A European Approach to Global Monitoring for Environment and Security (GMES). Brussels, 19.6.2001, SEC(2001) 993.

Anon. 2001b. Sotatekninen arvio ja ennuste STAE 2001, Pääesikunnan tekninen kehittämissosasto 1999. CD-ROM.

Astikainen, Arto. 2000. Konkurssiin menneet Iridium-satelliitit toimivat yhä. Helsingin Sanomat. 30.3.2000.

Barrett, Danelle, Lt. USN: Commercial Satellite Constellation offers potential military benefits. Signal, November 1998.

Belov, Taina, Novosat-uutisia 4/2001. 26.6.2001.

Bender, Bryan. MILSATCOM system is accelerated by DoD. Jane's Defence Weekly 26 April 2000, s.6.

Bongi, Toni, Hartikainen, Jari, Hallenberg, Ilkka, Härkönen, Seppo, Kaurila, Timo, Kiiski, Eero, Käyhkö, Kimmo, Merikoski, Jukka, Määttä, Risto, Mursu, Jarkko, Oksanen, Jari, Raerinne, Paavo, Røyti, Jukka, Salonen, Pasi P., Terho, Liisa, Kosovon sodan opit kokonaismaanpuolustuksemme ja kriisinsietokykymme kannalta tarkasteltuna; Nykyaikaisen aseiden tuho vaikutus ja tehokkuus. Puolustusvoimien Teknillinen Tutkimuslaitos. 30.9.1999.

Calcutt David & Tetley Laurie: Satellite communications, principles & applications. Great Britain 1994.

- Dutton, Lyn, de Garis, David, Winterton, Richard, Harding, Richhard, Military Space. 1990. Brassey's, Bpcc Wheatons Ltd. Great Britain. ISBN 0-08-037347-X.
- Eskelinen, Pekka. 1981. Tietoliikennesatelliitit. Insinööritieto Oy, Helsinki. 132 s. ISBN 951-793-386-X.
- Hakalahti, Hannu: Elektrobat toimittaa tietoliikennelaitteistoja ESAn satelliittimaa-aseille. Avaruusutiset 5/98.
- Henttu. P. & Lehtoranta, V.K.GPS, Maailmanlaajuinen satelliittinavigointijärjestelmä. Opas uuteen aikaan 1993.
- Hyypä, Juha – Hallikainen, Martti. Teknillisen Korkeakoulun Avaruustekniikan laboratorion opetusmoniste: Ympäristön havainnointi ja luonnonvarojen kartoitus kaukokartoitusmenetelmin. Raportti A7, syyskuu 1991.
- Kalliomäki, Kalevi, Mannermaa, Jari. 1996. Tutkimus ja skenaario GPS-navigointijärjestelmän käytettävyydestä Suomen olosuhteissa. MATINEN raporttisarja A, 1996/5.
- Kuusisto, Rauno, maj.: MILCOM 97. Viestimies 1/98.
- Newman, Richard J. 1999. The New Space Race. U.S.News & World report. November 8. ss. 30 – 38.
- Nicholas Franks, Matra Marconi Space: Defence Systems International, Autumn 98, Farnborough International 98.
- Panula-Ontto, Esa, DI TEKES. haastattelu 27.7.1999.
- Peltonen Petri ja Ahola Kimmo, TEKES: Yhteistyöllä ovet auki uusiin maailmoihin -kokemuksia eurooppalaisesta avaruusyhteistyöstä ESAssa. Esitelmä Sotatekniikan päivillä Tuusulassa 27.10.1998.
- Pisacane & Moore 1994, Pisacane, Vincent L. ja Moore C. 1994. Fundamentals of Space-systems, Oxford University Press. New York 1994.
- Poutanen, Markku. 1999. GPS-paikanmääritys. Ursan julkaisu 64. 2.painos.
- Raivio, Jarmo: Iridium-satelliittipuhelimesta tuli kaupallinen katastrofi. Helsingin Sanomat 8.7.1999.
- Ricci, Fred J. US. Military Communications, A C3I Force Multiplier. 1986. Computer Science Press. USA. ISBN 0-88175-016-6.
- de Selding, Peter B.: French seek to speed Helios data transfer. Defence News, June 21, 1999.
- de Selding, Peter B.: WEU unveils satellite plan. Defence News, November 16-22, 1998.
- Suominen, Heli: Motorolan uhkarohkea satelliittihanke. Helsingin Sanomat, 23.8.1998.
- Tauriainen, Simo. 2000. Haastattelu aiheesta Satelliittien käyttö. 2.5. ja 4.7.2000.
- Tielinen, Harri: Venäjän avaruus- ja ohjustorjuntajärjestelmien nykytila, STYX-tutkimusryhmä. 16.9.1999.
- Vuorela Arto, Vihjeanalyysi – menetelmä muutosseurantaan ja karttatietokantojen ajantasaistukseen. Novosat Oy raportti. 3.1.2001.
- Wik Manuel: Satellitkommunikation för svenska försvaret. Ruotsin kuningkaallisen sotatieteen seuran seminaarijulkaisu. 1993.

Abstract**SATELLITE SYSTEMS — AVAILABLE FOR FINLAND?**

Esa Salminen, Lieutenant Colonel G.S., Lic.Tech. (i.e. PhD EE)

The use of space is different comparing to what it was 40 years ago. The cold war has ended and the commercial space industry has become more realistic and closer to ordinary people. Especially major space powers invest large amounts of money in developing different space-based activities today. Space technology is becoming cheaper and satellites are turning into a mass-produced article.

Small European countries like Finland also have good opportunities to join the space activities within the European Space Agency (ESA) and the European Union. GMES (Global Monitoring for Environment and Security) was launched in 1998 by the European Commission and a group of Space Agencies. GMES is a concept in which the scientific knowledge and technological facilities are provided to improve the monitoring of environmental and security issues. This is done with the help of information society technologies and Earth observation technologies, e.g. observation satellites.

As far as this year almost all satellite communications services were offered by satellites from the Geostationary orbit. Since the end of 1998 LEO (Low Earth Orbit) and MEO (Middle Earth Orbit) satellites have provided telephone and other services. First came Iridium (1998) and later Globalstar and ICO Global (2000).

As the present-day military satellites (DSCS, Milstar, Skynet) cannot respond to today's radio bandwidth requirements, the military side is increasingly using commercial satellite connections. The main difference between civil and military satellites is the usability under electronic threat.

One of the most important navigation systems is GPS (Global Positioning System). Its accuracy was improved by building the Differential GPS-system and now the accuracy of navigation is up to 2 meters instead of 20 to 100 meters. Glonass is the equivalent of GPS in Russia. The European Union and ESA are planning a new Global Navigation Satellite System (GNSS) which is called Galileo.

Remote sensing means mainly monitoring and mapping of the globe from the air. The principle of remote sensing is based on the fact that every object has its own response of electromagnetic spectrum, which is composed of the object's absorption or scattering or emission. Today the remote sensing from space covers many parts of the electromagnetic spectrum: infra-red, ultra vio-

let, radio and radar, as well as optical wavelengths. Active instruments like radars and passive instruments like cameras, scanners and radiometers are used.

The first satellite taking 1 meter resolution satellite pictures was Ikonos (USA). The aim is to send other similar satellites before the end of the year 2001. These are called EROS A1 (Israel) and QuickBird 2 (USA). The Russians have their own commercial satellites like KVR-1000, which have a 2 - 3 meter resolution.

Military reconnaissance has been one of the most important tasks for satellites. 40 % of all satellites which have been launched have served military reconnaissance.