

MAANPUOLUSTUSKORKEAKOULU

SATELLIITTITIEDUSTELU – Kuvaussatelliittien kehitys

Kandidaatintutkielma

Kadetti
Pauli Vallius

Kadettikurssi 93
ELSO-linja

Huhtikuu 2009

MAANPUOLUSTUSKORKEAKOULU

Kurssi	Linja	
Maavoimien kadettikurssi 93	ELSO-linja	
Tekijä		
Kadetti Pauli Vallius		
Tutkielman nimi		
Satelliittitiedustelu – Kuvaussatelliittien kehitys		
Oppiaine, johon työ liittyy	Säilytyspaikka	
Tekniikka	MPKK-kurssikirjasto	
Aika	Tekstisivuja	Liitesivuja
27.4.2009	26	1
TIIVISTELMÄ Tutkielmassa käsitellään optisen alueen kuvaussatelliitteja, joihin tutustutaan Yhdysvaltalaisen satelliittihistorian kautta alkaen ensimmäisistä sääsatelliiteista, joiden kuvista saattoi erottaa vain Maapallon pyöreän muodon ja pilvipeitteen. Tutkielma etenee yleisten teknisten ominaisuuksien ja käsitteiden esittelyn jälkeen kronologisesti alkaen siitä, mistä tarve satelliittitiedustelulle on kehittynyt edeten ensimmäisiin sotilaallisiin satelliittihankkeisiin 1960-luvulla. Tiedustelusatelliittien kehittyminen alkoi 60-luvulta ja siirryttäessä tarkastelussa kohti nykypäivää kaupallisia satelliittipalveluita ei voi ohittaa minkään satelliittialan palveluita tarkasteltaessa. Ei myöskään satelliittitiedustelun tapauksessa. Itseasiassa kaupallisten palveluiden kehittäminen ja käyttäminen näyttää olevan tulevaisuuden trendi. Tutkielmassa todetaan että optiikan ja sensorikennojen suhteen on saavutettu jonkinlainen maksimi tai vähintäänkin käyttäjän tarpeisiin nähden riittävä taso. Tulevaisuudessa tekniikan kehitys tulee keskittymään suorituskyvyn parantamiseksi tiedonsiirto-ominaisuuksien kehittämiseen ja tiedon käyttöön saantiin. Tällä hetkellä sensorijärjestelmät pystyvät tuottamaan suuremman määrän dataa, kuin on mahdollista saada avaruudesta käyttäjälle tarpeeksi nopeasti. Lisäksi muun tutkimuksen näkökulmasta parannusta voidaan olettaa mm. "kameran" ohjaustekniikkaan sekä kuvankäsittelyyn ja tulkintaan. Toinen kehittämisen kohde on selvästi järjestelmän käytön ylläpidon edullisuus. Enää ei ole tarpeellista pitää ensimmäisenä prioriteettina maksimaalista suorituskykyä, sillä riittävä taso on jo saavutettu ja monilta osin myös ohitettu. Tutkielman tuloksena todetaan nyt olevan tärkeää, että satelliiteilla saatava tuki saadaan ylipäätään käyttöön ja tämän olevan kustannuskysymys, johon satelliittipalveluiden kaupallistuminen on tuonut helpotusta.		
Avainsanat		
Kaukokartoitus, kuvaustiedustelu, kuvaussatelliitit, satelliitit, tiedustelusatelliitit		

KUVALUETTELO

Kuva 1 : Satelliittien kiertoradat	(kuva: Puolustusvoimat)	s. 6
Kuva 2 : Tiros-I – Ensimmäinen televisioitu kuva avaruudesta	[15]	s. 7
Kuva 3 : Tiros-III – kuva Esther hurrikaanista	[16]	s. 8
Kuva 4 : Corona-I – ensimmäisiä sotilastiedustelukuvia: pentagon	[17]	s. 14
Kuva 5: Corona-I – lentokone kaappaamassa kuvamoduulia	[17]	s. 16
Kuva 6: EurImage satelliittikuvien tiedostokokoja	[5]	s. 18
Kuva 7: EurImage satelliittikuvien hintoja	[5]	s. 20
Kuva 8: QuickBird satelliitin kuva Viennasta	[5]	Liite 1

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	s. 1
1.1 Rajaukset	s. 3
1.2 Näkyvyys ja resoluutio	s. 4
1.3 Satelliittien kiertoradat	s. 5
1.4 Ensimmäiset satelliitit	s. 7
2. KUVAUSSATELLIITTIN RESOLUUTIO	s. 9
3. SATELLIITTITIEDUSTELU	s. 14
3.1 Tiedustelusatelliittien synty	s. 16
3.2 Nykyinen satelliittitiedustelu	s. 18
3.3 Kaupalliset palvelut	s. 19
3.4 Mikrosatelliitit	s. 21
4. PÄÄTELMÄT	
4.1 Satelliittitiedustelu	s. 23
4.2 Kuvaussatelliittien kaupallisuus	s. 24
4.3 Satelliittitiedustelun vaatimukset	s. 25

LÄHTEET

VIITTEET

Satelliittikuva

Lyhenteet

ARS	Advanced Reconnaissance System
GLONASS	ГЛОбальная НАвигационная Спутниковая Система (GLObal Navigation Satellite System)
GEO	Geosynchronous Orbit
GPS	Global Positioning System
HEO	High Earth Orbit (tai joskus Highly Elliptical Orbit)
ICBM	Intercontinental Ballistic Missile
ISAR	Inverse Synthetic Aperture Radar
LEO	Low Earth Orbit
MEO	Medium Earth Orbit
NASA	National Aeronautics and Space Administration
SAMOS	Satellite and Missile Observation System
SAR	Synthetic Aperture Radar
TIROS	Television Infrared Observation Satellite
WGS	Wideband Global Satellite Programme

SATELLIITTITIEDUSTELU – KVAUSSATELLIITTIIEN KEHITYS

1 JOHDANTO

”Meitä tarkaillaan”: taistelukentän tuiskeessa tai sotaharjoituksessa taivaalle vilkaistessa sellainen tunne saattaa kädyä sotilaan kuin sotilaan mielessä. Satelliittitiedustelusta ja tiedustelusatelliiteista on saatavilla paljon erilaista tietoa, uskomuksia ja käsityksiä. Minkälaiset laitteet meitä taivaalta tarkkailevat, mistä kaikki alkoi ja mihin kehitys on menossa?

Taistelukenttien kenraaleilla on aina ollut tarve nähdä enemmän ja kauemmas. Jo 1700 luvun lopulla käytettiin ensimmäisiä kuumailmapalloja nostamaan tähystäjiä maanpinnalta ylös parempien tiedustelunäkymien toivossa. Ensimmäisessä maailmansodassa tähystäjät oli nostettu jo kilometrien korkeuksiin, lentokoneisiin Toisessa maailmansodassa oli lentokoneissa käytössä jo vartavasten koulutettua kuvaushenkilöstöä. Kuvaustehtäviin suunnitellut koneet kuten U-2 ja SR-71 tuottivat paljon aineistoa kylmän sodan alkuvaiheilta lähtien, mutta edelleen oli tarvetta laajemman aineiston keräämiseen. Ilmapuolustuksen kehittyminen oli tehnyt tiedustelulentäjien työstä erittäin vaarallista ja paikoin mahdotonta. Nähdäkseen enemmän täytyisi päästä korkeammalle: vuonna 1960 kenraalit saivat silmät avaruuteen.

Satelliittitiedustelusta ja kuvaussatelliiteista ei ole saatavilla teknistä perusteista tai vastaavaa ja peruskäsityksen hankkiminen satelliittikuvaustiedustelusta on työlästä. Aihetta sivuavaa teknistä materiaalia on paljonkin saatavilla erilaisten tutkimusten ja raporttien muodossa, jotka kukin käsittelevät aihetta omalta kannaltaan. Tietenkin aiheeseen soveltuva fysiikkaa selvittäviä teoksia on runsaasti löydettävissä. Satelliittitiedustelu mainitaan useassa teknisessäkin teoksessa, kuitenkin tietoa oikeista järjestelmistä ei ole helposti saatavilla ja varsinkin uusien ei-kaupallisten järjestelmien ominaisuuksien selvittäminen on enemmän tai vähemmän arviointia. Tässä tutkimuksessa faktoina esitetään vain luotettaviksi katsotuista lähteistä saatuja tietoja: Esimerkiksi kuvapalveluntarjoajalla on tiettyjä velvoitteita tuottaa sellaista materiaalia, jota ostajalle lupaa.

Satelliittitiedustelu saattaa olla läsnä missä taistelutilanteessa hyvänsä ja se muodostaakin tuntemattoman uhan kaikkialla, jota on vaikea arvioida realistisesti. On siis hyvin perusteltua selvittää satelliittitiedustelun, tässä tapauksessa yhden sen osa-alueen, kehittymistä, nykytilaa ja tulevaisuutta.

Tämän tutkimuksen tarkoituksena on luoda silmäys satelliittitiedusteluun kuvaussatelliittien kehittymisen kautta, pohtia tulevaa kehitystä ja samalla antaa lukijalle perusteita arvioida kuvaussatelliittien luomia mahdollisuuksia ja uhkia. Tutkielmassa ei päästä kovinkaan syvälle minkään teknisen ominaisuuden osalta, mutta kuten ylempänä mainittiin, on satelliitteihin, satelliittikuvaukseen, kaukokartoitukseen ylipäätään ja kuvankäsittelyyn omistautuneita teoksia yleisesti saatavilla. Toisesta näkökulmasta saman tasoisesti eri osa-alueita huomioiden on satelliitteja tarkastellut vuonna 2006 kadettialikersantti Saku Lipsonen tutkielmassaan Länsimaisten ja Venäläisten sotilassatelliittien yleinen rakenne ja suorituskyky. Jossa arvioidaan esimerkiksi kaupallistumisen vaikutuksia länsimaisten ja Venäläisten satelliittien rakentamiseen ja rakenteeseen ja näin ylläpidon ja kustannusten kautta käytettävyyteen. Lipsosen kanssa samaan suuntaan ennustavia tuloksia tämäkin tutkimus antaa, mutta eri näkökulmasta.

1.1 Rajaukset

Tutkimuksessa ei keskitytä sensoreiden tai viestijärjestelmien toimialueisiin tai eroihin sähkömagneettisen spektrin osalta, sillä näitä on käsitelty monissa muissa teoksissa. Jyri Kosolan ja Tero Solanteen Digitaalisessa taistelukentässä [12] on perustavalla tavalla ja monipuolisesti esitetty sähkömagneettiseen spektriin liittyvää tekniikkaa. Kirja käsittelee aihetta alkaen sähkömagneettisen säteilyn etenemisestä ilmakehässä edeten 80 sivuiseen tietoliikennejärjestelmälukuun käsitellen mm. signaaliteoriaa, linkkianalyysiä, yhteysvälivaimennusta, koodausta ja muuta oleellista samalla esitellen laskukaavojen pohjaa. Kosola & Solante jatkaa 120 sivuiseen sensorilukuun, joka käsittelee esimerkiksi tutkan rakennetta käsitellen monia ominaisuuksiin liittyviä kaavoja, yksittäisiä sensoreita, kuten valvonta- ja seurantatutkia, sekä näkyvänvalon ja infrapuna-alueen optisia laitteita. Kirja sisältää lisäksi liitteitä mm. antenneista ja säätelyn vaikutuksesta ihmiseen. Kosolan & Solanteen teoksessa esitetään lisäksi muutamia esimerkkejä satelliittien teknisen suorituskyvyn osalta, joita on hyödynnetty lukijan lukemassakin teoksessa. Myös satelliittijärjestelmien käytettävyyttä ja hankkimista Puolustusvoimien käyttöön on tutkittu: Esa Salmisen teoksessa Satelliittien hyväksikäyttö puolustusvoimissa [18]. Salminen esittää mm. asiantuntijakyselyn pohjalta tehdyn tuloksen, jonka mukaan luotettavuutta, taistelunkestävyyttä, suorituskykyä ja käytettävyyttä arvioiden satelliittijärjestelmä olisi lentokone- ja lennokkitiedustelua parempi järjestelmä sotilaallisen toiminnan havaitsemiseen yli 50km päästä. Salminen esittelee lyhyesti satelliittikuvauksen periaatteita, kuten landsatin käyttämiä maa-asemia ja kuvanmyyntiperiaatteita. Salminen ennustaa vuonna 2000, että seuraavan viiden vuoden aikana ”monikanavaiset instrumentit kehittyvät myös erotuskyvyltään 3 – 5 m:n luokkaan” ja näin onkin jo käynyt samoin kuin kaupalliset palvelut ovat yleistyneet. Muutoin Salminen keskittyy teoksessaan satelliittien käyttöön viestintätarkoituksissa. Kadettialikersantti Lipsonen taas on esitellyt tutkielmassaan ”Länsimaisten ja Venäläisten sotilassatelliittien yleinen rakenne ja suorituskyky” muun ohella esimerkillisesti muutamia länsimaisia (KH-12, Lacrosse, Magnum) ja Venäläisiä (Araks, Almaz ja Tzelina) tiedustelusatelliitteja, joten niitäkään ei tässä työssä tarkastella.

Tämä käsillä oleva kandidaatintutkielma rajoittuu optisen alueen kuvaussatelliitteihin, joiden tarkastelussa edetään kronologisesti ensimmäisistä sääsatelliiteista kohti nykyisiä ”kaupallisia tiedustelusatelliitteja”; matkalla sotilassaovelluksissa seurataan Yhdysvaltaista kehitystä.

1.2 Näkyvyys maasta avaruuteen

Näkyvyydestä puhuttaessa tarkoitetaan jonkin kohteen emission havaitsemista ja erottamista tarkkailijan asemasta. Näkyvyys eli säteilyn eteneminen on riippuvainen väliaineesta ja sen aiheuttamista vaimennuksista. Ilmakehän vaimennus tarkoittaa seuraavaksi käsiteltyjen ilmiöiden aiheuttamaa lisävaimennusta avaruus- ja maa-aseman välillä suhteessa tilanteeseen, jossa ilmakehää ei olisi. Sähkömagneettinen säteily vaimenee huomattavasti maan ilmakehän vaikutuksesta. Tarkemmin johtuen hapen, hiilidioksidin ja vesihöyryn resonanssitaajuuksista, molekyylien rotaatio- ja vibraatioabsorbtiosta (ip-alue), hapen O₂ ja otsonin O₃ elektronien virittymisestä korkeampaan energiatilaansa kaasumolekyylien sisällä (uv-alue). Vaimennusten väliin jää ikkunoita, joissa vaimennus on pieni. Näitä ikkunoita on välttämätöntä käyttää näkyvyyden saavuttamiseksi ja ne rajoittavatkin tiedustelujärjestelmien toiminnan tietyille taajuuksialueille. Radiotaajuuksilla ilmakehän vaimennukset ovat huomattavasti pienempiä. [12] [18]

Resoluutio

Resoluutiosta puhuttaessa ei aina ole selvää tarkoitetaanko sillä pienintä kuvasta erottuvaa yksityiskohtaa vaiko pienintä väliä, jossa kaksi kohdetta voidaan erottaa toisistaan. Kenties resoluutiosta puhuttaessa halutaan ymmärtää nämä käsitteet yhdistyneeksi. Resoluutio sana voikin tarkoittaa montaa toisistaan riippumatonta asiaa. Näyttölaitteen resoluutio tarkoittaa pikselien määrää, joka näyttölaitteessa on käytössä kuvan esittämiseen. Näyttölaitteen resoluutio ilmoitetaan mittoina: esimerkiksi 1920 x 1200. Kuvantoiston liittyen pikseleiden avulla ilmoitetaan myös kuvan sisältämien pikseleiden määrää pituusyksikkö kohti: esimerkiksi tulostimet kykenevät yleensä vähintään 300 dpi (dpi = dots per inch) tarkkuuteen. Optisella resoluutiolla tarkoitetaan kuvan erottelukykyä eli sitä kuinka pieniä yksityiskohtia kuvasta voidaan erottaa. Erottelukykyä puhuttaessa saatetaan tarkoittaa myös kykyä erottaa kaksi kohdetta toisistaan eli erotteluresoluutio (erottelukyky) olisi pienin etäisyys, jolla kaksi kohdetta voidaan erottaa toisistaan. Tutkielman osassa 2 alkaen sivulta yhdeksän tutustutaan resoluutioon laskuesimerkein hieman tarkemmin.

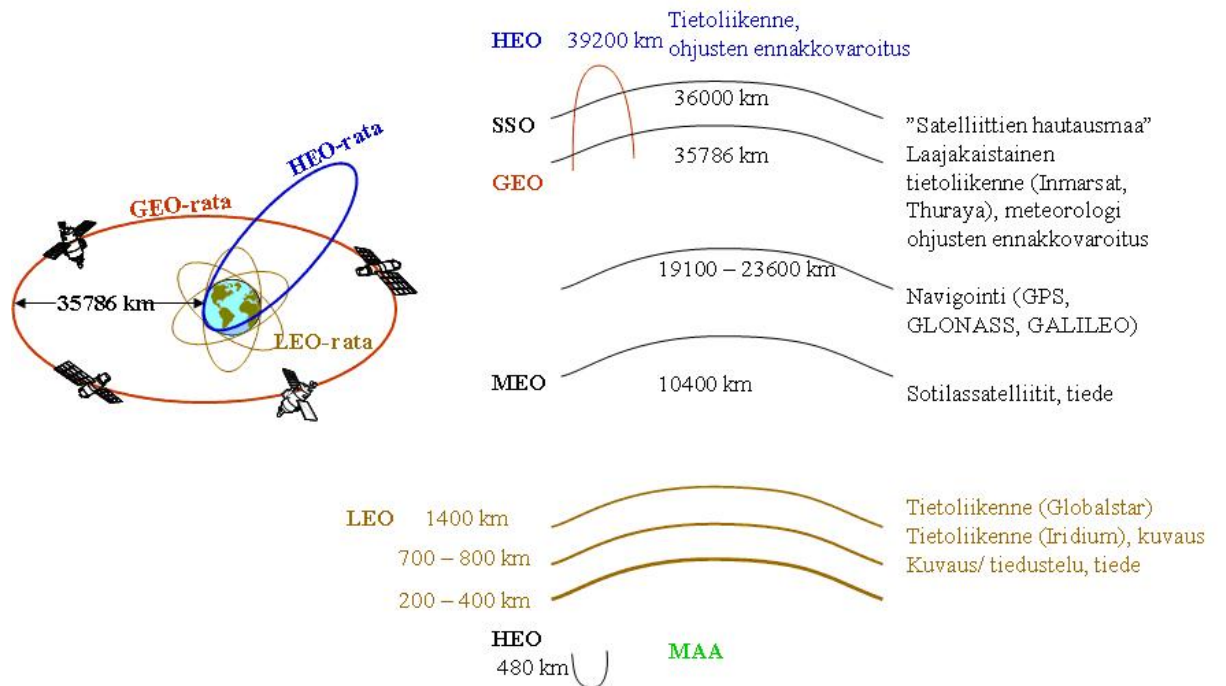
1.3 Satelliittien kiertoradat

Mitä lähempänä pintaa satelliitti kiertä maapalloa, sitä tiheämpi on ilmakehä ja sen myötä kitka, joka kuluttaa satelliittia ja näin lyhentää sen elinikää. Toisaalta matalalla lentävällä satelliitilla on parempi näkyvyys maanpinnalle, koska välimatka on huomattavasti pienempi myös yhteysvaimennus on pienempi. Kuitenkin tarkkailijan ollessa lähempänä on näkökenttä paljon rajoittuneempi. Suuren peittoalueen saavuttamiseen tarvitaan enemmän satelliitteja. Tulevaisuudessa on myös syytä huomioida vastasatelliittitoiminta ja todennäköisesti mitä alempana satelliitti on, sitä helpompi se on havaita ja saavuttaa vastasatelliittiaseella. Toisaalta taas matalalla lentävät satelliitit ohittavat tietyn maa-alueen todella nopeasti: esimerkiksi 280 kilometrin korkeudella lentävä satelliitti kiertää maapallon ympäri puolessatoista tunnissa. Suuri nopeus maanpintaan nähden aiheuttaa oman haasteensa viestiyhteyden muodostamiseen kohteen seuraamisen kannalta, sekä doppler-siirtymänä signaalissa.

Näitä matalimpia ratoja kutsutaan nimellä Low Earth Orbit (LEO) ja ne alkavat teoriassa maanpinnasta ja ulottuvat aina 2000 kilometriin asti. Suurin osa miehitetyistä avaruuslennoista on tehty LEO alueella. Lisäksi kuvaussatelliitit tyypillisesti käyttävät matalaa LEO rataa saavuttaakseen parhaan mahdollisen resoluution. Viestijärjestelmille tai muillekaan suurta peittoaluetta tarvitseville konstellaatioille LEO rata ei tule kysymykseen.

LEO-aluetta korkeammalla olevat radat jaetaan korkeuden 35 786 kilometriä mukaan joko sitä ylempänä oleviin tai sen alapuolella oleviin. Kyseinen korkeus on siitä merkityksellinen, että sillä ympyrärataa lentävät satelliitit ovat maanpinnalta katsoen paikallaan. Tätä maanpyörimiseen nähden synkronista rataa kutsutaankin nimellä Geostationary Orbit (GSO) tai elliptisen radan tapauksessa ja yleisemmin nimellä Geosynchronous Orbit (GEO). GEO-ratojen ehdottomia etuja ovat suuri peittoalue ja satelliittien pitkä elinikä. Satelliittin pysyessä paikallaan tai lähes paikallaan suhteessa maa-asemaan dopple-siirtymää ei synny ja tämä helpottaa yhteyden muodostamista. Kuitenkin valtava välimatka aiheuttaa signaaliin viivettä sekä suuren vaimennuksen. GEO rataa käyttävät pääasiassa tv- ja radioverkkojen satelliitit, kommunikaatiosatelliitit sekä sääsatelliitit.

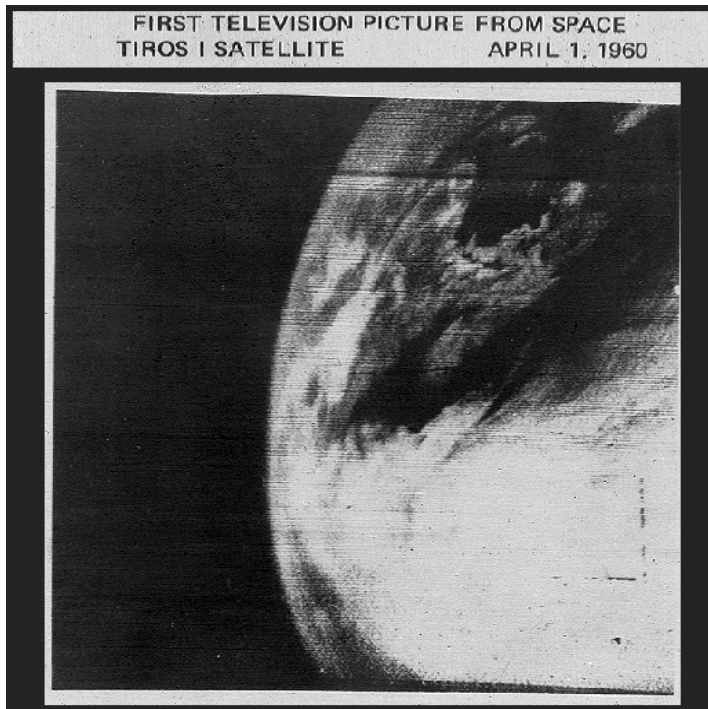
GEO ja LEO -ratojen välinen alue, 2000 – 36000 kilometriä, on nimeltään Medium Earth Orbit (MEO). MEO-radat ovat, kuten sijaintinsakin, kompromissi LEO ja GEO -ratojen ominaisuuksista eliniän, yhteysvälivaimennuksen, dopplersiirtymän, kiertoajan ja peittoalueen suhteen. Tunnistettavimmat MEO-ratojen järjestelmät ovat paikannusjärjestelmät GPS, GLONASS ja GALILEO.



Kuva 1 (Puolustusvoimat): Satelliittien kiertoradat

1.4 Ensimmäiset satelliitit

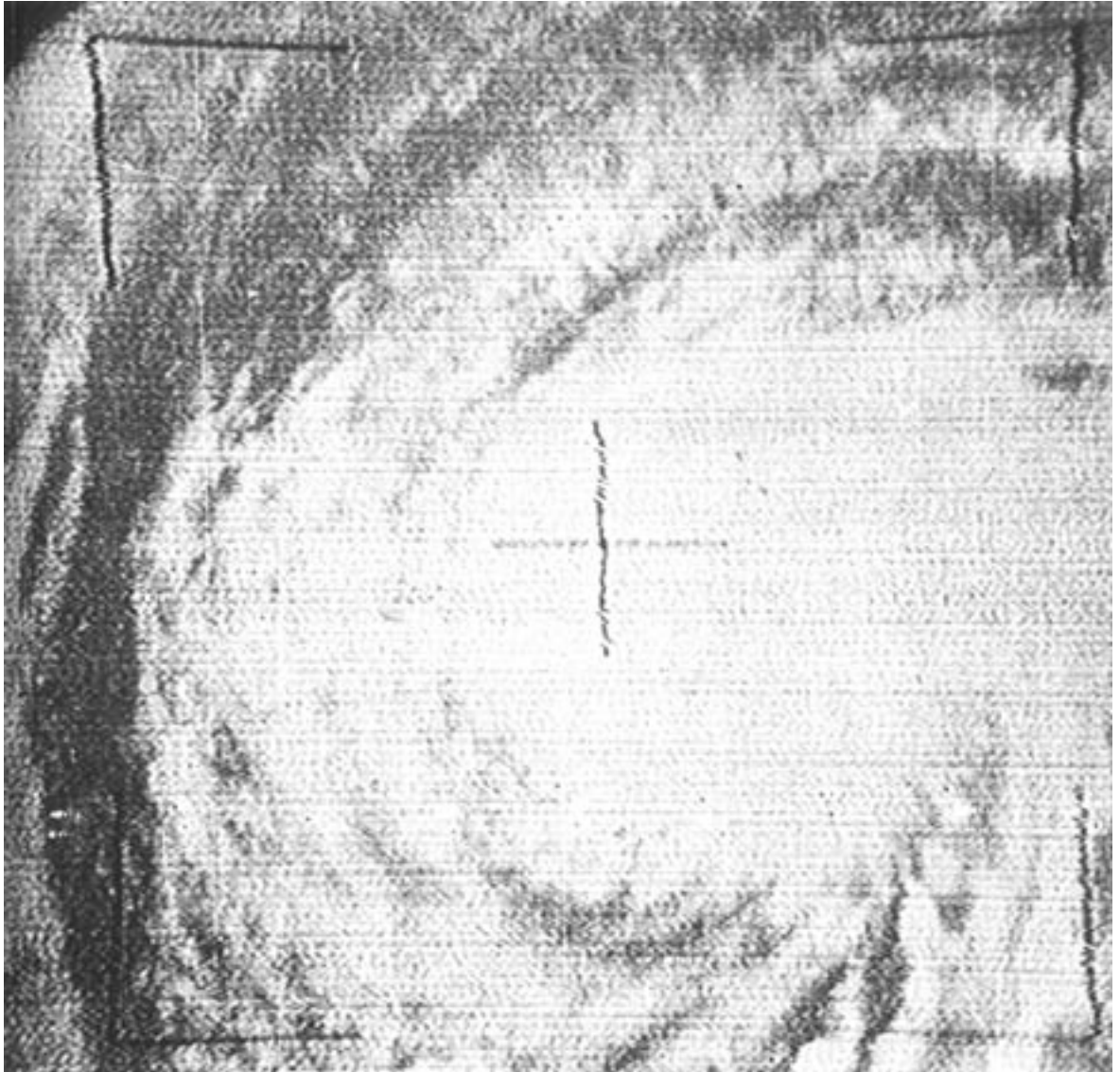
Tekokuiden käyttöä olivat visioineet tieteilijät ja tieteiskirjailijat jos vuosikymmeniä, kunnes elokuussa 1957 Neuvostoliitto laukaisi maata kiertävälle radalle ensimmäisen ihmisen tekemän laitteen: Sputnik-1. Useiden epäonnistumisten jälkeen Yhdysvallat sai ensimmäisen oman satelliittinsa, Explorer-1, kiertoradalle helmikuussa 1958.



Kuva 2 [15]: Tiros-I – Ensimmäinen televisioitu kuva avaruudesta

1960 onnistuttiin saamaan yhteys maasta maahan avaruuden kautta NASAn passiivisella Echo-1 satelliitilla. Samana vuonna Yhdysvallat sai jo ensimmäiset sotilastiedustelukuvansa vaikka vasta vuotta aikaisemmin oli saatu kaikkein ensimmäiset kuvat maapallosta Tiros-1 satelliitilla. Tiros-1, myöhemmin myös Tiros-2 ja -3, saivat kuvauskalustukseen vain kaksi tavanomaista tv-kameraa: laajakulman ja teleoptiikan. Kuvat tallentuivat magneettinauhalle, jolta ne lähetettiin maa-asetalle yli lennettäessä. Alus oli rotaatiostabiloitu ja sen täytyi hidastaa pyörimistään moottorien avulla, jotta se pystyi ottamaan kuvia. Lisäksi kuvia voitiin ottaa vain siltä osalta maapalloa, jonne aurinko paistoi (ja tietenkin vain silloin, kun kamera osoitti kohti maata). Tiros projekti oli NASAn ensimmäinen kokeilu käyttää satelliitteja hyödyksi maapallon tutkimiseen. (Yhteistyökumppanina oli tietenkin Yhdysvaltain armeija jo alusta alkaen.) Ajatuksena oli kuvata pilvien muodostelmia ja saada tietoja sääilmiöistä. Tiros-1 toimi vain 78 päivää, mutta se lähetti tuhansia kuvia pilvimuodostelmista. Projektia jatkettiin ja myöhempiin versioihin lisättiin enemmän aluksen hallintatekniikkaa, kuten

infrapunalla toimiva horisonttisensoori, magneettisuuntain, radiometrejä sekä elektroninen kello. Tiros-3 kuvasi monia vuoden 1961 trooppisia myrskyjä ja paikallisti esimerkiksi hurrikaani Estherin. Viimeisimmät Tiros satelliitit laukaistiin 1998 ja ne jatkavat toimintaansa edelleen. [14]

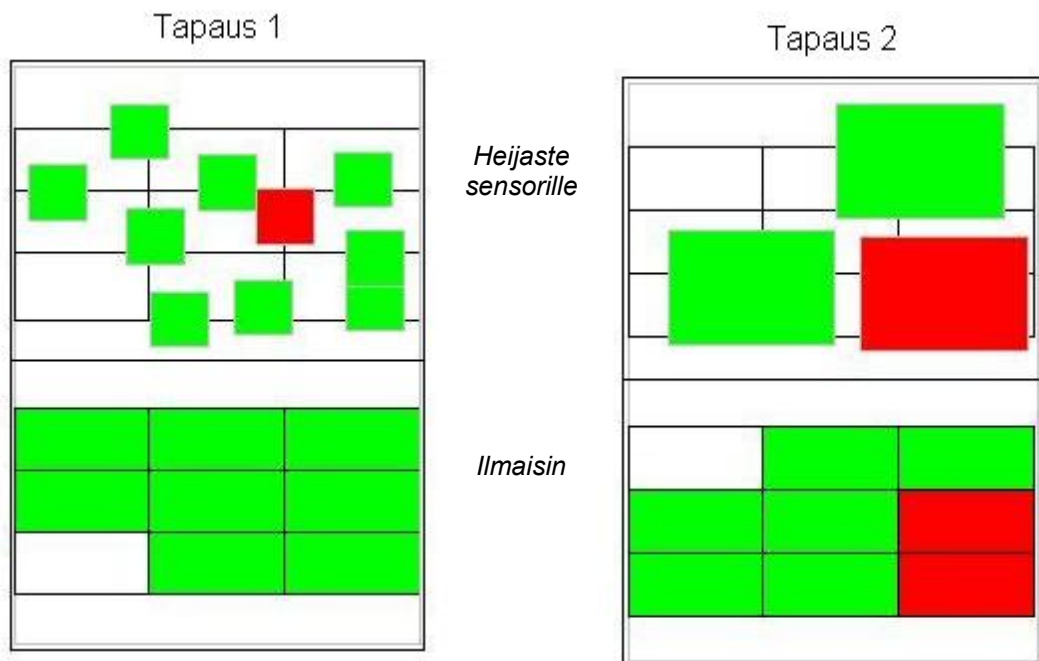


Kuva 3 [16]: Tiros-III – kuva Esther hurrikaanista

Echo-1 ”tiedonsiirtosatelliitti” oli halkaisijaltaan 30 metrinen metallisoitu mylar-muovipallo, joka toimi passiivisena säteilijänä 1600 kilometrin korkeudella. Echo-1 heijasti takaisin vain murto-osan lähetetystä säteilystä ja tämän takia maa-asetat tarvitsivat valtavan tehon (10 kW) ja suuret antennit. Satelliitti toimi metallisoidun pintansa ansiosta heijastimena myös näkyvällä aaltoalueella ja sen pystyikin havaitsemaan matalalta korkeudeltaan paljaalla silmällä. Nykyisenkaltaiseen tiedonsiirtoon oli vielä kuitenkin pitkä matka ja ensimmäinen häviöttömästi sähköisenä kuvia maahan lähettävä satelliitti laukaistaisiin vasta 16 vuotta myöhemmin. Kuitenkin jo vuonna 1963 laukaistua ensimmäistä GEO-satelliittia käytettiin 1964 Tokion olympialaisten televisioimiseen. [18]

2 Kuvaussatelliitin resoluutio

Nykyisin tarjolla olevat kuluttajatuotteet ovat jo osiltaan niin hyvälaatuisia, että tavallisten kameroiden ja kaukoputkien osia käyttämällä olisi teoriassa mahdollista saada avaruudesta asti hyvälaatuisia kuvia. Seuraavaksi on esitetty laskelmia avaruudesta maahan tarvittavan suurennoksen osalta. Järjestelmän valovoimaisuus, liikkeenkorjausjärjestelmät, ilmakedän epäpuhtaudet ja ylipäätään avaruuteen sijoittaminen jätetään huomiotta. Aluksi pohditaan sensorelementin merkitystä ja ensimmäisellä kaavalla lasketaan pienintä etäisyyttä, jolla kaksi kohdetta voidaan erottaa toisistaan. Toisessa vaiheessa arvioidaan vielä pienimmän kohten erottamiskykyä Rayleigh'n kaavalla. Siihen minkä kokoisia kohteita kuvasta voitaisiin tunnistaa vaikuttavat esimerkiksi erilaiset kuvankäsittelyohjelmistot. Seuraavassa esitetään sensorin kennon tarkkuuden merkitystä kohteen havaitsemisessa:



Jos havaittava kohde mahtuu ilmaisimatriisin pikselin sisälle, se ei välttämättä tule ilmaistuksi, sillä kohde ei aiheuta riittävän suurta herätettä pikselin ilmaisimelle tullakseen huomatuksi. Tässä kohteen koko tarkoittaa kohteen tietyn emission määrää pinta-alalla eli kohteen kokoa kyseessä olevan ”sensorin silmin”. Lisäksi kohde saattaa olla usean pikselin rajalla, jolloin sen aiheuttama ärsyke ilmaisinpikseliä kohti pienenee entisestään. Kohteen ollessa suurempi, kuin ilmaisimatriisin pikseli, se tulee ilmaistuksi, vaikka sen tarkkaa paikkaa ei vielä voitaisikaan ilmoittaa. Kuvien tapauksissa on 3x3 kokoinen sensori. Sensori toimii herkästi punaisen ja vihreän alueella, mutta saattaa ilmoittaa ruudun olevan myös tyhjä eli valkoinen.

Ensimmäisessä tapauksessa yksi punainen kohde on keskellä kahden pikselin rajaa, jolloin yksi pikseli rekisteröi vain puolet punaisen kohteen ärsykkeestä. Vihreän kohteen ärsykkeen määrä kummassakin punaista rekisteröineessä pikselissä on suurempi, joten ilmaisin näyttää vain vihreää ja ja yhdessä ruudussa valkoista, jossa ei ollut tarpeeksi kumpaakaan muuta. Tässä tapauksessa punaisen kohteen olemassaolo jää huomaamatta.

Toisessa tapauksessa kohteet ovat suurempia kuin yksi pikseli. Näin ollen ne tulevat väistämättä ilmaistuksi. Pikselin koko on kuitenkin vielä niin lähellä kohteen kokoa, että kohteen tarkkaa paikkaa ei voida ilmaista. Sensorille heijastuneen kuvan täytyy tietenkin olla tarkka, koska sensori vain rekisteröi tarjolla olevan tiedon.

Tiedustelusatelliitin erotteluresoluutio voidaan laskea seuraavasta kaavasta:

$$d_m = \frac{H_{sat.m}}{(F_m \cdot R_m)},$$

jossa $H_{sat.m}$ on satelliitin korkeus maanpinnasta, F_m on optiikan polttoväli ja R_m on sensorielementtien tiheys metriä kohti. [12]

Otetaan esimerkiksi Canonin valmistama järjestelmäkamera EOS 40D (hinta noin 900e), jonka sensorin tiedoiksi valmistaja ilmoittaa seuraavaa: 10.10 toimivaa megapikseliä ja kennon koko

22.2 x 14.8 mm. [1]

Sensorielementtien tiheys neliömetrillä siis:

$$\frac{10.10 \cdot 10^6}{(0.0222\text{m} \cdot 0.0148\text{m})} = 30740 \text{ miljoonaa } \frac{\text{kpl}}{\text{m}^2} \text{ eli } 175329 \frac{\text{kpl}}{\text{m}}, \text{ siis } \frac{1}{175329} = 5.7\text{um}$$

Optiikkaksi täytyy valita teleskooppioptiikka, jollaisia on tarjolla aina yli 4000mm polttovälille saakka. Otetaan kuitenkin Meade LX200R (hinta \$2699), jonka polttoväliksi valmistaja ilmoittaa 2000mm ja f/10. [13]Arvioidaan satelliitin kiertävän LEO-radalla 200km korkeudella joten tällöin saadaan erottelukyvksi:

$$d_m = \frac{(200 \cdot 10^3 \text{ m})}{(2\text{m} \cdot 175329)} = 0.57\text{m},$$

jos nostetaan satelliitin korkeutta pidempi-ikäiselle tasolle 600 km, saadaan erottelukyvyksi:

$$d_m = \frac{(600 \cdot 10^3 \text{ m})}{(2m \cdot 175329)} = 1.7 \text{ m}$$

Teoreettisesti paras saavutettavissa oleva sensorielementtien tiheys olisi kaksi kertaa aallonpituus eli näkyvän valon alueella 2 μm . Kuitenkin ylläkin käytetty noin 5 μm laatu lienee realistisempi ainakin tällä hetkellä. Hubble satelliitissa olevan kaukoputken polttoväli on 57.6m ja kiertoradan korkeus 559km. [22] Näillä tiedoilla saataisiin erottelukyvyksi:

$$d_m = \frac{(559 \cdot 10^3 \text{ m})}{(57.6 \text{ m} \cdot (\frac{1}{5 \cdot 10^{-6}}))} = 0.049 \text{ m}$$

joka siis tarkoitti kahden kohteen välistä pienintä etäisyyttä, jolla ne voidaan erottaa toisistaan.

Rayleigh kriteeri

$$\sin \theta = 1.220 \frac{\lambda}{D}$$

Missä θ on kulmaresoluutio, λ on aallonpituus ja D linssin halkaisija.

Jos halutaan arvioida pienimmän erotettavissa olevan kohteen kokoa, voidaan sitä arvioida käyttämällä Rayleigh'n kriteeriä, jossa huomioidaan empiiristen kokeiden pohjalta tehdyn arvioinnin avulla valon siroamisesta johtuvaa epätarkkuutta.

Rayleigh'n kriteerin mukaan f polttoväliselle optiikalle saadaan minimierottelukyvyksi Δl :

$$\Delta l = 1.220 \frac{f\lambda}{D}$$

Ilmakehä vaikeuttaa kuvaussatelliittien tehtävää samoin kuin teleskooppien, jolloin maksimikulmaresoluutiota voidaan arvioida kaavalla:

$$R = \frac{\lambda}{D}$$

missä R [rad], λ on aallonpituus ja D optiikan halkaisija.

Lasketaan aluksi käytetylle Meade LX200R kaukoputkelle optinen resoluutio eli minimi-

erottelukyky, kun $f = 2000\text{mm}$ ja D saadaan kun f luku on 10 eli $\frac{2000\text{mm}}{10} = 200\text{mm}$.

Valitaan aallonpituudeksi sinisen (475nm), vihreän (510nm) ja punaisen (650nm) keskiarvo 545nm eli keltavihreä:

$$R = \frac{545\text{nm}}{200\text{mm}} = 2,725 \cdot 10^{-6} \text{ rad}$$

200 km korkeudesta tämä tarkoittaisi metreissä optista resoluutiota r :

$$r = 200\text{km} \cdot \tan 2,725 \cdot 10^{-6} \text{ rad} = 0,55 \text{ m},$$

joka vastaa hyvin aikaisemmin saatua 0,57m erotteluresoluutiota.

600 km korkeudesta taas

$$r = 600\text{km} \cdot \tan 2,725 \cdot 10^{-6} \text{ rad} = 1,63 \text{ m},$$

joka sekin on lähellä aikaisemmin laskettua 1,7m.

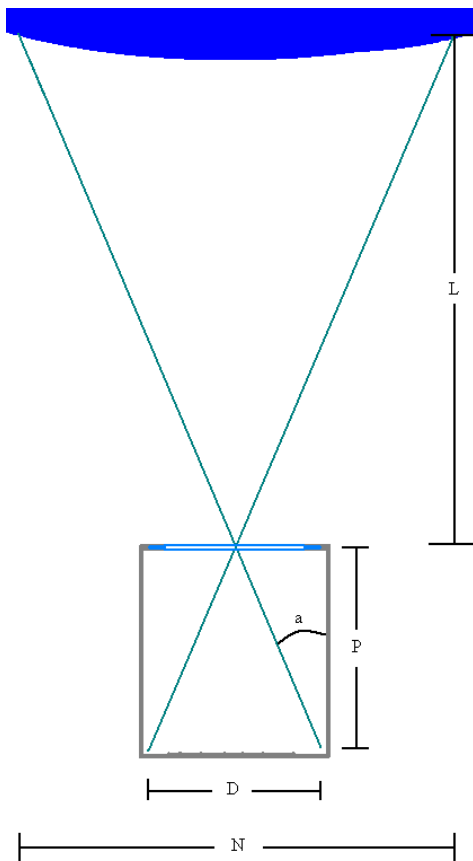
Hubble teleskoopin peilin halkaisija on 2,4m (vain 4% polttovälistä), joten sen optiseksi resoluutioksi saadaan keltavihreän valon taajuudella

$$R = \frac{545\text{nm}}{2,4\text{m}} = 2,27 \cdot 10^{-7} \text{ rad}$$

$$r = 600\text{km} \cdot \tan 2,27 \cdot 10^{-7} \text{ rad} = 0,13 \text{ m},$$

joka on jo merkittävästi suurempi, kuin aikaisemmin, optiikan polttoväliä, kennon elementtitiheyttä ja kohteen etäisyyttä käyttäen, laskettu 0,049m erotteluresoluutio. Meade kaukoputken linssi on 10% polttovälistä, joten Rayleigh'n kaava antaa sille tietenkin paremmat arvot kuin Hubblen tapauksessa: 5% tarkuudella samat tulokset pienellä 2000mm x 200mm teleskoopilla, mutta Hubblen tapauksessa Rayleigh'n kaava antoi jo 265% suuremman arvon. Miksi sitten käyttää suurta polttoväliä ja suurta linssiä? Yksi syy on avauskulma, joka vaikuttaa siihen, miten suuren alueen optiikka näkee. Vaikka optiikan

resoluutio olisikin hyvä ei otetusta kuvasta voida erottaa fyysisesti pieniä kohteita, jos todella suurelta alalta heijastetaan kuva tietyn kokoiselle ilmaisimatriisille. Parempi kuva saadaan, kun optiikka kuvaa täydellä tehollaan pienempää aluetta kerrallaan. Yksinkertaistetaan tilannetta siten, että optiikalle ilmoitetut tiedot tarkoittavat putken mittoja. (Todellisuudessa tietty polttoväli muodostetaan useammalla linssillä sen sijaan, että putki olisi niin pitkä.) Näin voidaan yksinkertaistaa optiikan rakenne ohueksi yksilinssiseksi, jolloin voidaan laskea avauskulma ja sen vaikutus optiikan näkemään alueeseen seuraavasti:



$\tan a = \frac{(\frac{D}{2})}{P}$, jolloin yhdenmuotoisuuden mukaan

$$\frac{(\frac{D}{2})}{P} = \frac{(\frac{N}{2})}{L}$$

Ratkaistaan N:

$$N = 2 \cdot \left(\frac{\frac{D}{2} \cdot L}{P} \right),$$

missä N on näkyvä alue etäisyydeltä L, P on putken pituus ja D on linssin halkaisija.

Näin Meaden 2000mm x 200mm kaukoputkella nähty alue 200 km korkeudesta olisi leveydeltään

$$N = 2 \cdot \left(\frac{\frac{0,2m}{2} \cdot 200 km}{2m} \right) = 20 km \text{ eli } 400 km^2$$

ja 600 km korkeudesta vastaavasti:

$$N = 2 \cdot \left(\frac{\frac{0,2m}{2} \cdot 600 km}{2m} \right) = 60 km \text{ eli } 3600 km^2,$$

kun taas Hubblen 57,6 m putkella ja 2,4 m peilillä saataisiin vastaavasti:

$$N = 2 \cdot \left(\frac{\frac{2,4m}{2} \cdot 200 km}{57,6m} \right) = 8,3 km \text{ eli vain } 69 km^2 \text{ ja } N = 2 \cdot \left(\frac{\frac{2,4m}{2} \cdot 600 km}{57,6m} \right) = 25 km \text{ eli } 625 km^2$$

Vaikka tämä onkin vain suuntaa antava arvio on kuitenkin selvää miksi pitkillä etäisyyksillä on pakollista käyttää suuria optiikoita.

3 Satelliittitiedustelu



Kuva 4 [17]: Corona satelliitin kuva Pentagonista

1950 luvun lopulla Yhdysvallat ja Neuvostoliitto kilpailivat muun ohella avaruuden valloittamisesta ja 1955 Yhdysvaltojen ilmavoimat alkoi virallisesti suunnitella kehittyneitä tiedustelujärjestelmää joka pystyisi tarkkailemaan jatkuvasti valittuja kohteita mistä tahansa maapallolta. Jonkinlaisen avaruusjärjestelmän suunnittelu oli alkanut vuonna 1946 julkaistuista suunnitelmista jotka kulkivat nimellä ”alustavia suunnitelmia kokeellisesta maailmaa kiertävästä avaruusalueesta”. Kun nämä suunnitelmat alkoivat muodostua projektiksi se kulki aluksi nimellä ARS (Advanced Reconnaissance System), myöhemmin nimellä SENTRY ja lopulta se sai nimen SAMOS (Satellite and Missile Observation System). Neuvostoliiton laukaistua onnistuneesti Sputnik I ja II satelliittinsa Yhdysvaltojen tarve tuottaa sotilaallisesti käytettävää kuvamateriaalia avaruudestakäsin kasvoi entisestään. SAMOS järjestelmän valmistumista, jonka tavoitteena oli satelliitti, joka skannaisi ottamansa kuvat ja lähettäisi ne sähköisesti maahan, alettiin epäillä ja niinpä 1958 presidentti Eisenhowerin luvalla käynnistettiin CIA johtoinen projekti, CORONA, tiedustelusatelliitin kehittämiseksi, joka palauttaisi ottamansa kuvat fyysisesti kuljetusmoduulissa maahan. 1960 luvulla SAMOS projekti sai väistyä ja CORONA-projektista tuli avaruustiedustelun johtotähti seuraavaksi kymmeneksi vuodeksi. [8]

Jo satelliittikauden alusta lähtien olisi ollut mahdollista tallentaa ja siirtää kuvia sähköisesti, mutta tallenteen ja siirto-ominaisuuksien taso ei ollut lähelläkään riittävää, jotta oltaisiin saavutettu hyödyllinen kuvanlaatu. 100 vuotta kehitetyn filmikuvauksen taso oli korkea ja tarvittavanlaatuisten optiikoiden valmistaminen oli mahdollista vaikkakin kallista, joten ongelmana jo alkuperäisistä suunnitelmista alkaen oli kuvatun materiaalin saaminen maanpinnalle. Tieteiskirjallista ratkaisua muistuttava rohkea valinta oli lopulta todellakin pudottaa kuvat kapselissa ilmakehään, josta lentokone poimi ne kyytiinsä. Näin mahdollistui erittäin hyvälaatuisen kuvamateriaalin saaminen tiedustelukäyttöön.

Aivan ensimmäisiä satelliittikuvia (Tiros) ei voida pitää satelliittitiedusteluna, mutta jo hyvin nopeasti satelliitit valjastettiin sotilaalliseen tiedusteluun. Corona satelliiteilla saatiin erittäin hyödyllistä kuvatieta. Ensimmäiset kuvat satelliiteilta saatiin 1959. 1960 televisiossa ensimmäisenä satelliittikuvana näytettyä kuvaa voitaneen pitää propagandana, joka vähätelisi uhkaa avaruudesta, sillä samana vuonna Yhdysvallat sai ensimmäiset sotilasiedustelukuvansa.

3.1 Tiedustelusatelliittien synty

Vuonna 1960 Yhdysvallat sai ensimmäiset satelliittitiedustelukuvansa Neuvostoliiton lentotukikohdasta Alaskasta Corona-projektin ”tehtävä 9009” onnistuttua. Kuvat otti kyytiin C-119 kuljetuslentokone kesken ilmalennon avoimesta perästäan laskuvarjolla laskeutuvassa moduulissa Tyynenmeren yllä.



Kuva 5 [17]: Lentokone kaappaamassa kuvamoduulia

Lockheed Missiles & Space Company rakensi Corona-satelliitteja, jotka lensivät 1971-1988 ja joista ensimmäiset myöhemmin nimettiin KH-4:ksi (KeyHole) [19]

KH-7 Gambit: Lensi 12.7.1963 – 4.6.1967, käytettiin tarkailemaan Neuvostoliiton ICBM (Intercontinental ballistic missile) komplekseja ja tutkia sekä muita ”ongelmallisia” paikkoja, sijainnin tai olosuhteiden puolesta, maailmalla. KH-7 korkean resoluution järjestelmä täydensi aikaisempaa Corona järjestelmää, jota käytettiin kohteiden havaitsemiseen ja suuren mittakaavan karttojen tekemiseen. KH-7 satelliitteja laukaistiin 38 joista 36 pääsi onnistuneesti radalle, jonka rata kulki niinkin alhaalta, kuin 137km. Tältä radalta järjestelmä pystyi saavuttamaan 0.5m erottelukyvyn. [10]

KH-9 järjestelmää, joka toimi 1973-1980, on pidetty Hexagon, Big Bird -sarjan korkean resoluution satelliitina, mutta NIMA (National Imagery and Mapping Agency) on ilmoittanut sen olleen matalan resoluution kartoitusjärjestelmä, joka keräsi kuvia ja paikantamiseen tarvittavaa dataa. [10] KH-11 oli ensimmäinen kuvaussatelliitti, joka lähetti kuvia maahan sähköisesti ilman häviötä laadussa. Ensimmäinen KH-11 laukaistiin vuoden 1976 lopulla.

KH-11 satelliitissa oli kehittynyt järjestelmä, joka peilejä liikuttamalla vähensi satelliitin paikan muutoksesta suhteessa kohteeseen aiheutuvaa sumenemista: kuva heijastettiin liikuvan peilin avulla digitaaliseen CCD kennoon, jonka avulla KH-11 lähes reaaliaikainen kuvanlaatu oli lähellä hitaasti maahan saatavien filmikameroiden kuvien laatua. KH-11 teoreettinen maksimierottelukyky oli 2m peilin johdosta tarpeeksi hyvä lukeakseen auton rekisterikilven. KH-11 kuvanlaatu oli niin edistyksellinen, että sen jälkeen ovat lähinnä kehittyneet enää käyttöikä, -varmuus ja -joustavuus sekä tiedonsiirtonopeus. [19]

3.2 Nykyinen satelliittitiedustelu

Yhdysvallat käyttää vuosittain 35-40 miljardia (US\$35 000 000 000 – 40 000 000 000) dollaria avaruuteen liittyviin tuotteisiin ja palveluihin, kun taas Euroopan vastaavat menot ovat seitsemän miljardia (US\$7 000 000 000) dollaria. Yhdysvallat käyttää edelleen eniten maailmassa rahaa avaruusprojekteihin ja se on yhä avaruusteknologian edelläkävijä. Kuitenkin on arvioitu, että vakoilusatelliitteihin vuosittain käytettävät varat laskivat vuodesta 2006 vuoteen 2007 1.1 miljardilla (US\$1 100 000 000) dollarilla ja tämän nähdään kertovan siirtymäajasta, jossa vanhoja järjestelmiä (KH Lacrose/Onyx) ei enää päivitetä, eikä uusi, FIA (Future Imagery Architecture), ole vielä käytössä. [9] [21]

in MB/km²

Product	Pan		MS		Pan-sharpened 3 bands		Pan-sharpened 4 bands	
Resolution	60 cm	70 cm	2.4 m	2.8 m	60 cm	70 cm	60 cm	60 cm
8 bits	3	2.2	0.75	0.55	8.5	6.3	11.3	8.4
16 bits	6	4.4	1.5	1.1	17	12.6	22.6	16.8

Kuva 6 [5]: WorldView-1 satelliitille ilmoitettuja kuvakokoja

Kuvattaessa suoraan ylhäältä WorldView-1 satelliitin muodostama yksi mustavalkoinen kuva on 16,5 km x 16,5 km kokoinen (noin 272 km²) ja kuvan resoluutio on 0,6m. [6]

Satelliittin suurimmaksi tiedonsiirtomiksi voitaneen ottaa Yhdysvaltojen uusin tietoliikennejärjestelmä Wideband Global Satellite Programme, joka on tarkoitettu sotilaskäyttöön. WGS:n koko tiedonsiirtokapasiteetiksi ilmoitetaan 3.6 Gbits/s eli 0.45 GB/s, joka on 461MB/s mikäli ”kilo” on 1024. [11]

Tietoliikenne yhteydessä kaistaa menee muuhunkin kuin pelkän hyötyinformaation siirtoon, mutta mikäli koko WGS:n tiedonsiirtokapasiteetti, 461 MB/s, käytettäisiin kuvan siirtämiseen saataisiin ylemmän taulukon 60 cm resoluution 272 km² kuville seuraavat koot ja siirtoajat:

MB / 272 km²

tuote	Pan	Pan – 3 bands	Pan – 4 bands
8 bits	816 MB	2312 MB	3074 MB
16 bits	1632 MB	4624 MB	6147 MB

Tästä voidaan päätellä ainakin se, että reaaliaikaiseen kuvansiirtoon ja siten vaikkapa liikkuvan kuvan näyttämiseen ei aivan kyetä parhaassakaan tapauksessa.

272 km² / s

tuote	Pan	Pan – 3 bands	Pan – 4 bands
8 bits	1,8 s	5,0 s	6,7 s
16 bits	3,5 s	10,0 s	13,3 s

3.3 Kaupalliset palvelut

Vuonna 2003 Yhdysvallat otti käyttöön uuden kaupallista avaruuskuvausta suosivan linjauksen: Commercial Remote Sensing Policy. Tämä lienee yksi keinoista, joilla Yhdysvallat pyrkii vaikuttamaan ja hallitsemaan kaupallisen elektroniikan osuutta satelliittitiedustelussa voidakseen myös kontrolloida sitä. Samana vuonna Yhdysvaltalainen NIMA (National Imagery and Mapping Agency) teki DigitalGloben kanssa viiden vuoden sopimuksen satelliittikuvista jonka arvo on enintään 500 miljoonaa dollaria (US\$500 000 000). [9]

15.5.2008 Japani ilmoitti sallivansa kaupallisten tiedustelusatelliittipalveluiden käytön sotilaallisissa operaatioissa. Lakimuutosta ei ole vielä ylimmältä taholta hyväksytty, mutta toteutuessaan tämä tulisi todennäköisesti kasvattamaan satelliiteissa tarvittavaan tekniikkaan kohdistettua mielenkiintoa ja myös rahamäärää. [7]

Ison-Britannian puolustusministeriö rahoitti äskettäin valmistuneen kokeellisen kehittyneen mikrosatelliitin, nimeltään TopSat (Tactical Optical Satellite), jonka kehittivät yhteistyössä QinetiQ ja SSTL (Surrey Satellite Technology Limited). TopSat painaa 150kg ja sen palvelut on nyt siirretty kaupalliseksi tarjonnaksi: Valmistajan ja palveluntarjoajan (QinetiQ) mukaan saatavilla on 17 x 17 km pankromaattista (mustavalkoista) 2,8 m erottelukykyistä ja 12 x 18 km moniväri (RGB) 5,6 m erottelukykyistä kuvaa. TopSat kiertää 600 km korkeudella. Sen sijaan, että sensorin peilit tai sensori liikkuisi suhteessa kuvattavaan kohteeseen, koko satelliitti seuraa liikkeellään kuvattavaa kohdetta ja parantaa näin kuvanlaatua. [20] [23]

GoogleMaps tarjoaa ilmakuvaa koko maapallosta: kuvat on otettu osin eri satelliiteilla, osin lentokoneista ja lähimmät maanpinnalta. Palvelusta on saatavilla ilmaisversio, joka tarjoaa vaihtelevaa kuvanlaatua alueesta riippuen: ”Kiinnostavimmat” kohteet on kuvattu jopa 0.5m resoluutiolla, kun taas syrjäisemmillä seuduilla jäädyään jopa niinkin kauas, kuin 250m resoluutioon. Parhaat kuvat on tilattu yksityisiltä tarjoajilta, kun taas huonoimmat on ostettu valtion järjestelmien vanhoista tietokannoista, kuten KH-7.

Yksi GoogleMaps:n satelliittikuvien tarjoajista on DigitalGlobe, joka tarjoaa palveluitaan kaikille maksaville asiakkaille. Tarjolla on lähes käsittelemätöntä dataa, joka sisältää vain kameralta saatuja tietoja kuvien yhdistämiseen ja virheiden korjaamiseen, sekä enemmän käsiteltyä dataa sensorikorjauksin, geometrisine korjauksineen ja paikkatiedoin varustettuna.

Laitteistonsa DigitalGlobe ilmoittaa tarjoavansa WorldView-1 satelliitilla (”maailman parasta”) 50cm ja lisäksi 60cm – 70cm resoluution mustavalkokuvaa. Lisäksi on saatavilla kuvaa luonnolisilla väreillä, väri-infrapuna ja nelitaajuus väreillä sekä 2,4 m – 2,8 m monitaajuuskuvaa (neljä taajuutta samassa datassa) QuickBird satelliitista. Minimitilauksen koko on 100 km²/tilaus ja maksimi taas 10 000 km²/tilaus. QuickBird laukaistiin lokaokuussa 2001 ja se kiertää 450 km korkeudella aurinkosynkroonisella radalla kiertoajan ollessa 93.5 minuuttia. Tallennuskapasiteettia sillä on 128Gbit. WorldView-1 satelliitti laukaistiin syyskuussa 2007 ja se kiertää 496km korkeudella aurinkosynkroonisella radalla kiertoajan ollessa 94.6 minuuttia. Tallennuskapasiteettia sillä on 2700Gbit. [2] [4] [5]

Pricing, \$US:

- The price of a CitySphere™ product depends on the size of the city (small – medium – large – very large), the continent and the product chosen (Basemap GIS or Basemap Advanced):

Continent	Product Basemap	CITY SIZE			
		SMALL <500 km ²	MEDIUM 501–1,000 km ²	LARGE 1,001–2,000 km ²	VERY LARGE >2,001 km ²
ASIA	GIS	2,700	6,900	13,500	25,200
	ADVANCED	3,300	8,300	16,100	30,300
EUROPE	GIS	2,400	6,300	12,200	23,000
	ADVANCED	3,000	7,600	14,700	27,500
MID-EAST & AFRICA	GIS	2,400	6,200	12,000	22,400
	ADVANCED	3,000	7,400	14,300	26,900
NORTH AMERICA	GIS	2,200	5,700	11,000	20,700
	ADVANCED	2,700	6,800	13,200	24,800
SOUTH AMERICA	GIS	2,400	6,200	12,000	22,400
	ADVANCED	2,900	7,400	14,300	26,900

Kuva 7 [5]: Eurimagen kuvien hinnoittelua

DigitalGlobe ei kuitenkaan suoraan myy materiaaliaan vaan ohjaa jälleenmyyjien luokse. Suomeen jälleenmyyjäksi ohjautui EurImage, joka sijaitsee Italiassa Roomassa. EurImage myy kuvia arkistosta alkaen \$17/ km² vähintään 25 km² kerralla, joka tekee minimitilaukseksi \$425. Tarjolla on myös valmiita ”kaupunkikuvastoja” 60 cm resoluutiolla ja 2,5 m tai paremmalla paikkatiedolla: esimerkiksi euroopan kaupungit koosta riippuen maksavat alkaen \$2400 8 bittisestä luonnonvärikuvasta ja päättyen \$27 500 16 bittiseen tarkennettuun nelitaajuuskuvaan. Helsingin pinta-ala on 686 km² josta maa-alaa 186 km² ja pienen Eurooppalaisen kaupungin (<500km²) hinta on \$2400. Uusilla QuickBird ja WorldView-1 järjestelmillä kuvien hinnat alkavat 16\$/km², kuitenkin vähimmäis otos on 16,5 km x 16,5 km, joka tekee minimitilaukseksi US\$4352. Kuvankaappauksen jälkeen kuvien toimittamiseen menee normaalisti viidestä kymmeneen päivää, mutta kiireiset tilaukset voidaan toimittaa 60 tunnissa (kaksi ja puoli päivää). Myynnissä on myös vanhoja arkistoja:

esimerkiksi 10 vuotta vanha 172.8 x 183 km ruutu Landsat-5 satelliitilta (mustavalko kuva 15m resoluutiolla) on saatavilla hintaan 425€/kpl. [3]

3.4 Mikrosatelliitit

Mikrosatelliiteilla viitataan pieniin satelliitteihin, joiden koko on vain murto-osan perinteisiin satelliitteihin verrattuna. Mikrosatelliitteja pidetään avaruuden pöytätietokoneina ja samanlaista kehitystä on odotettavissa. Pienet satelliitit hyödyntävät modernia kuluttajaelektroniikkaa, jonka laaja kysyntä on laskenut elektroniikan hintaa ja samalla tuonut luotettavuutta kuluttajatasen tuotteisiin. Kaupallisen elektroniikan kehittyminen on johtanut tilanteeseen, jossa pienet ja edulliset laitteet ovat saavuttaneet niin hyvän tason, että samaa tekniikkaa voidaan käyttää vaativissakin olosuhteissa, kuten avaruudessa; tietenkin oikein suunnitellusti. Pienet satelliitit eivät koskaan kykene kaikkiin tehtäviin, joissa suuret ovat omiaan, mutta tilannetta voitaneen verrata tietokoneiden kehittymiseen: Nykyisin kännykässä on enemmän tehoa, kuin pöytäkoneessa 10 vuotta sitten ja nykyisten pöytäkoneiden teho voidaan rakentaa erittäin pieneen kannettavaan tilaan. Kuitenkin oman aikansa supertietokoneet ovat aina omassa luokassaan, eikä niiden tehoihin kotikonstein päästä. Kuten kaupallisten laitteiden laskentateho ovat muutkin tekniset osat, kuten kuvasensorit ja viestijärjestelmät, kuitenkin jo ylänneet sille tasolle, että voidaan kysyä, onko enää tarpeellista lennättää avaruuteen aikamme superkalustoa? Joidenkin arvioiden mukaan pienet satelliitit voisivat tarjota erittäin hyvän hinta/laatu suhteen: 80% ominaisuuksista ja 10 % kustannuksista. [20]

Pienemmät satelliitit tarvitsevat vähemmän kehitystyötä, vain joitakin vuosia, ja niitä voidaan pienen massansa vuoksi laukaista useita, jopa kokonaisia järjestelmiä, kerralla. Myös tämä laskee kustannuksia ja on suuri etu verrattuna perinteisiin satelliittikonstellaatioihin, joiden kehittäminen on vienyt yli 10 vuotta ja satoja miljoonia dollareita. Koska pienemmät satelliitit tulevan halvemmiksi, voidaan niiden käyttöikä pitää lyhyenä, jolloin satelliittien korvaaminen ja päivittäminen tulee järkeväksi (ja ylipäättään mahdolliseksi). Tällöin myös osien suunnittelu helpottuu huomattavasti, kun niiden ei tarvitse kestää vuosikausien käyttöä haastavissa olosuhteissa. [20]

Britannian selvittäessä satelliittitiedustelujärjestelmän vaatimuksia pienet satelliitit tulivat kysymykseen taloudellisista ja poliittisista syistä: Isot satelliitit ovat todella kalliita, eikä niiden kehittämiseen syydetävää rahamäärää pidetä välttämättä kovinkaan hyväksyttävänä.

Teknisistä ominaisuuksista ensimmäisenä selvitettiin käyttäjän kannalta tarpeellisen resoluution, kattavuuden, kohteen ylitysajan (tiedon päivitettävyys) ja tiedon välitysajan suuruutta. Tutkimus osoitti, että tietoa tuottavan järjestelmän, ISTAR (= intelligence, surveillance, target acquisition and reconnaissance) ominaisuuksia tulisi arvioida erottelukyvyn lisäksi uudelleenvierailuajan perusteella. Selvityksen perusteella suurin osa käyttäjistä (ei vain sotilaalliset tahot) tyytyisi optiseen 1 – 1,5 m erottelukyvyn. Tässä suhteessa pienet satelliitit ovat etulyöntiasemassa, koska on halvempaa tuottaa 1 m erottelukyinen järjestelmä mikrosatelliiteilla, kuin suurilla, raskailla järjestelmillä. Toinen huomio oli, että paras tapa tuottaa kuvaa kattavalta alueelta sekä tarkkoja otoksia tietyiltä alueilta, on luoda järjestelmä, joka käyttää useaa erillistä sensoria, joilla varustetut satelliitit tukevat toisiaan: SAR-sensorin muodostamaa kattavaa kuvaa käyttävä satelliitti ohjaisi optista sensoria käyttävän satelliitin oikealle alueelle ja edelleen signaaleja poimiva satelliitti voisi ohjata kumpaa tahansa. Samalla tavoin ihminen kiinnittää huomionsa johonkin ensin kuulohavainnon, joka kattaa 360°, perusteella ja kerää tarkempia tietoja silmillään. TopSat oli ensimmäinen askel tähän suuntaan. [20]

4 PÄÄTELMÄT

4.1 Satelliittitiedustelu

Satelliittitiedustelu on siitä merkittävä uhka jokaiselle, että sitä voidaan tehdä missä tahansa ja milloin vain. Harvalla on käsitystä satelliittien todellisista ominaisuuksista ja niiden aikaansaamasta uhasta. Uhka-arvioissa satelliittitiedustelua ei osata ottaa huomioon lainkaan tai sitten satelliittien todetaan olevan uhkana kaikkialla kaikkina aikoina. Tarkastelemalla satelliittitiedustelun historiaa ja pohtimalla nykyisiä mahdollisuuksia, sekä taistelukentän vaatimuksia, on luotu mahdollisuudet arvioida satelliittiuhkan nykytilaa ja tulevaisuutta. Satelliitteja käytetään tiedustelutarkoituksiin hyvin laaja-alaisesti, joten on syytä edelleen pitää mielessä, että tähän tutkielmaan on valittu vain kapea osa satelliittitiedustelun kentästä. Näkyvänvalon alueen kuvaussatelliitit ovat yksinkertaisin ja vanhin avaruustiedustelumenetelmä (sekä yhä käytössä oleva), joten se osoittautui perustelluksi valinnaksi ensimmäisen tutkimuksen kohteeksi.

1950 – luvulta alkanutta avaruudenvallotusta oli mukana alusta lähtien kehittämässä kunkin mukana olleen valtion sotavoimat. Sotilassovellutuksena saatiin 1960, vain muutama vuosi ensimmäisen miehitetyn avaruuslennon jälkeen, jo ensimmäinen kohteentiedusteluun kykenevä kuvaussatelliitti. Menneessä 50 vuodessa kuvaussatelliittien kuvauskyky on kehittynyt yllättävän vähän. Menetelmät ovat muuttuneet, ja tietenkin kehittyneet, mutta varsinainen tuotos oli jo alkuvaiheissa melko hyvä. Ensimmäiset tiedustelusatelliitit toimivat filmikameran tavoin. Niissä oli optiikka, joka keräsi valoa filmille, joka täytyi tienkin kehittää. Jo 1970 – luvun loppupuolella siirryttiin yhä nykyisin käytössä olevaan menetelmään, jossa linssi kokoaa valoa elektroniselle kennolle, josta kuva tallentuu informaationa kovalevyille, jolta se siirretään sähköisesti (häviöttömänä) maa-asemalle työstettäväksi.

Filmiä käyttävissä järjestelmissä suurin haaste oli saada kuvat maanpinnalle käytettäväksi. Ensimmäisissä Yhdysvaltalaisissa suunnitelmissa oli tavoitteena järjestelmä, joka avaruudessa kehittäisi ja skannaisi ottamansa kuvat sekä sen jälkeen lähettäisi ne sähköisesti maa-asemalle. Tällaista järjestelmää ei koskaan saatu toteutettua. Toimivaksi osoittautui uskomattomalta kuulostava menetelmä, jossa filmikanisteri pudotetaan ilmakehään, josta sen poimii kyytiin erityisvälinein varustettu lentokone. Tämä ensimmäisenä ongelmia tuottanut

kohta on sama, joka on nykyjärjestelmien pullonkaulana: Satelliitin keräämää laadukasta kuva-aineistoa ei saada tarpeeksi tehokkaasti maahan hyödynnettäväksi.

Resoluutio eli kuvan erottelukyky oli jo filmijärjestelmissä hyvä: 2 – 5 metrin luokkaa. Käyttäjälle on tietenkin aina hyödyllistä nähdä enemmän, jotta virhearvioinneilta vältyttäisiin ja päätöksen teko olisi helpompaa. Mutta kun 1970 – luvun lopulla alettiin saavuttaa 0,5 metrin resoluutiota, ei ollut enää järkevää kehittää kuvanlaatua. Nykyisetkin järjestelmät tyytyvät tuottamaan useimmiten 0,5 – 2 metrin resoluution kuvia. Tämä on käyttäjän tarpeisiin nähden riittävä taso. Kuvaussatelliittien optiikat ovatkin jo suurimmat kehitysaskelensa ottaneet. Ne eivät tule nykyisistä enää juurikaan kehittymään. Samoin filmiä vastaavat kennot ovat niin suorituskykyisiä, ettei niidenkään osalta kehitystyötä tarvita. Nykypäivän ongelma on siis sama, mikä oli kuvaussatelliittien kehittäjillä: Downlink-yhteys, eli kuinka saada sensorin keräämä laadukas informaatio tarpeeksi tehokkaasti maa-asemalle käyttöön.

4.2 Kuvaussatelliittien kaupallisuus

Kuvaussatelliitteja tullaan yhä kehittämään ja viimeaikaisin kehitys on selvästi keskittynyt satelliittikuvapalveluiden saatavuuden helpottamiseen. Saatavuuden helppous tarkoittaa halpaa hintaa. Satelliittien kehittäminen on ollut rahakkaiden suurvaltojen yksinoikeus, mutta elektroniikan kehittyessä siitä on tullut edullisempää ja kevyempää. Nyt 2000 – luvulla on useita kaupallisia yrityksiä, jotka kilpailevat asiakkaista satelliittikuvamarkkinoilla. Kilpailu tarkoittaa keskittymistä laadun parantamiseen hintojen samalla laskiessa. ”Avaruusvaltiot” kuten Yhdysvallat, Japani ja Venäjä ovat tarkoituksella tukeneet kaupallista kehitystä, jotta pääsisivät osallisiksi yleisten markkinoiden aikaansaamasta kehityksestä ja tarjonnasta. Taka-ajatuksena jokaisella valtiolla lienee myös tietynlainen markkinoiden hallinta siltä osalta, jolta niitä kukin on tukenut.

Satelliitin vieminen kiertoradalle maksaa paljon rahaa. Mitä painavampi kuorma kiertoradalle täytyy saada, sitä enemmän kuluu polttoainetta ja sitä enemmän kuljetukselle tulee hintaa. Kaupallinen kehitys on tuonut mukanaan nimenomaan vaatimuksen edullisuudesta, joten kehitys on suuntautunut kevyempiin komponentteihin ja pienempiin satelliitteihin. Nykyisenkaltaisia 100 – 250 kg painoisia satelliitteja pystytään viemään kiertoradalle useita yhdellä kantoraketilla. Tästä johtuen useista satelliiteista koostuvien järjestelmien eli konstellatioiden ylläpitäminenkin on huomattavasti edullisempää: Satelliitteja voidaan

korvata pienemmillä kustannuksilla, joten niitä ei tarvitse suunnitella kestämaan kymmeniä vuosia. Tämä on todella edullista verrattuna ensimmäisiin usean tonnin painoisiin järjestelmiin, joiden oli toimittava jopa toistakymmentä vuotta. Ensimmäiset projektit olivat niin kalliita, että yksi epäonnistunut laukaisu saattoi tarkoittaa koko hankkeen epäonnistumista tai ainakin siirtymistä vuosilla eteenpäin.

Kuvaussatelliittien selvä kehityssuunta ovat kaupalliset mikrosatelliitit. Optiikat ovat jo pitkään olleet riittävällä tasolla samoin kuin sensorin tietoa keräävä osa: Sensori pystyy tuottamaan riittävän määrän informaatiota. Pienikokoisen satelliitin, jonka eliniäksi voidaan määrittää muutamia vuosia, suunnitteleminen, valmistaminen ja radalleen saattaminen on huomattavan edullista. Satelliitin tuottama datamäärä on valtava: kaikkea sen keräämää informaatiota ei pystytä reaaliajassa maa-asemalle lähettämään edes tämän hetken parhaalla järjestelmällä.

4.3 Satelliittitiedustelun vaatimukset

Nyt on kehityksessä suunnattava katse siihen, mitä satelliitin halutaan kertovan. Tietoa pystytään tuottamaan tarpeeksi edullisesti ja riittävä määrä, mutta kuinka siitä seulotaan ja valitaan käyttäjälle tarpeellinen osa. Käyttäjän on tiedettävä viive, jolla hän saa valitsemaltaan palveluntarjoajalta haluamansa alueen kuvat. Näin käyttäjä tietää minkä tason ratkaisuja ja siirtoja on kuvien perusteella mahdollista vielä tehdä. Pataljoonan komentajalle olisi taistelukentällä todellista hyötyä 0,5 m resoluution kuvasta tämän omalle hyökkäysuralle ryhmittyneestä vihollisen komppanian asemasta. Mutta onko tiedosta mitään hyötyä, jos se tulee komentajalle kolme päivää jäljessä? Luultavasti ei. Jopa taktisen tason päätöksiin riittävä kuvamateriaali on hyödytöntä, mikäli sitä ei saada käyttöön lähes viiveettömästi. Parhaassa tapauksessa näin hyvästä kuvasta olisi hyötyä jopa ryhmänjohtajalle, joka pystyisi erottamaan alueelleen suuntautuvat vihollisen panssarit. Näin nopeaan toimitukseen ei kuitenkaan kyetä. Ensin satelliitti on ohjattava halutun alueen yläpuolelle ja kun sensorin keräämästä valtavasta tietomäärästä on valittu käyttäjälle tarpeellinen osa, on sen jälkeen vielä muodostettava ehjä kuva. Esimerkiksi alueen päällä oleva pilvi on poistettava toisesta kulmasta saadulla materiaalilla. Taktisen tason tukemiseen kuvaussatelliitti ei siis vielä pysty. Tämän tason käyttölaitteiden kehittämistä tai edes suunnitelmia niiden kehittämiseksi ei ole aloitettu, joten tällaisia laitteita ei tulla käytössä näkemään lähitulevaisuudessa (ainakaan 20 vuoteen). Taktisen tason tuen toteuttamiseksi olisi käytössä oltava riittävän suuri konstellaatio, jotta vierailuajat halutuille, tai mille tahansa, alueille olisivat tarpeeksi pienet. Tämän toteuttaminen on tälläkin hetkellä mahdollista. Toiseksi täytyisi kehittää automaatiota

halutun alueen valintaan kuvastusta materiaalista ja kolmanneksi kuvankäsittelystä täytyisi tehdä niin automaattista, että käyttäjälle tarpeellinen kuva valmistuisi ilman erillistä ihmistyövoimaa. Tähän tuskin vielä pystytään. Kuvanmuodostuksessa operaattorilla on todennäköisesti vielä jonkinlainen rooli pitkään. Lisäksi on otettava huomioon mahdollinen tietotulva. Tietyn yhden alueen kuvaaminen ei välttämättä tuota liian suurta määrää informaatiota käsiteltäväksi eikä edes siirrettäväksi. Kyseessä on kuitenkin todennäköisesti kaupallinen palvelu, joten asiakkaita on useita, jolloin saattaa olla tarpeellista lähettää ja käsitellä tietoja jatkuvasti. Näin ollen satelliitti ei välttämättä pysty lähettämään tietoja käyttäjän sijaintiin välittömästi. Tämä ongelma ratkeaisi, mikäli satelliitti pystyisi reaaliajassa siirtämään kaiken keräämänsä tiedon käsiteltäväksi tai välitettäväksi. Mikäli reaaliaikaista kuvaa olisi mahdollista saada, voitaisiin käyttää vielä tarkempaa resoluutiota, jolloin jopa yksittäisen taistelijan olisi mahdollista hyötyä satelliitin informaatiosta: vaikkapa tutkailemalla omalle sektorille suuntautuvan vihollisen varustusta. Tähän tarvittaisiin tietenkin myös käyttäjäpuolen laitekehitystä ja koulutusta. Nämä ovat kuitenkin todellisuudessa hyvin kaukaisen tulevaisuuden visioita.

Nykyisellään kyetään kaupallisilla palveluilla noin kolmen päivän viiveeseen tiedon keräämisestä sen käyttöön saamiseen. Tämä mahdollistaa operatiivisen ja strategisen tason joukkojen siirtämisen ja suuntaamisen. Tähän toimintaan saatavilla oleva 0.5 m resoluutio on riittävä. Mikäli satelliittitukea haluttaan saada alemman tason käyttöön, on otettava huomioon edellä mainitut vaatimukset tiedon käyttöön saannin nopeuttamiseksi: Satelliittien määrä on oltava riittävä, satelliitti on kyettävä suuntaamaan riittävän tarkasti kohteeseensa, satelliitin keräämä informaatio on kyettävä siirtämään viiveettömästi maa-asemalle ja se on kyettävä analysoimaan lähes reaaliajassa.

LÄHTEET

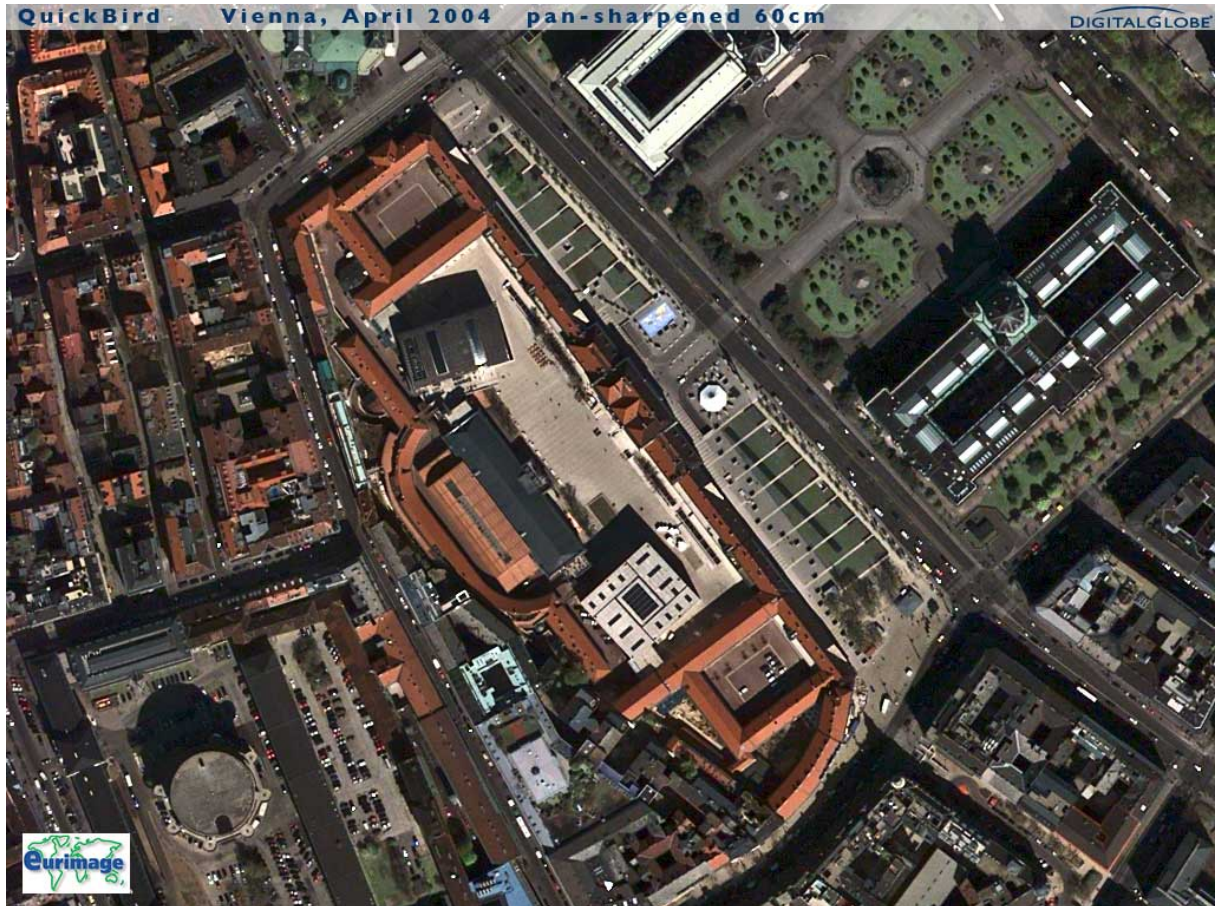
- [1] www.Canon.fi
Vierailtu 6.6.2008.
- [2] <http://www.digitalglobe.com/>
Vierailtu 12.8.2008.
- [3] http://www.eurimage.com/products/docs/eurimage_price_list.pdf
Vierailtu 12.8.2008.
- [4] <http://www.eurimage.com/products/wv-1.html>
Vierailtu 12.8.2008.
- [5] <http://www.eurimage.com/products/quickbird.html>
Vierailtu 12.8.2008.
- [6] <http://www.eurimage.com/products/docs/quickbird.pdf>
Vierailtu 26.4.2009.
- [7] Grevatt, Jon.
Japan moves to allow military use of space assets.
Jane's Defence Industry 16.5.2008.
- [8] <http://www.gwu.edu/~nsarchiv/NSAEBB/NSAEBB13/index.html>
Vierailtu 13.8.2008.
- [9] Hewish, Mark ja Kass, Lee.
Observation from orbit.
Jane's International Defence Review 1.12.2003.
- [10] Jane's Information Group.
US to declassify KH-7 and KH-9 spy satellite images.
Jane's Missiles and Rockets 1.10.2002.

- [11] Jane's Information Group.
Wideband Global Satellite Programme.
Jane's Military Communications 27.8.2008.
- [12] Kosola, Jyri ja Solante, Tero.
Digitaalinen taistelukenttä.
Maanpuolustuskorkeakoulu. Tekniikan laitos. toinen painos. 2003.
ISBN 951-25-1449-4
- [13] <http://www.meade.com/lx200-acf/index.html>
Vierailtu 17.12.2008.
- [14] <http://nasascience.nasa.gov/missions/tiros/?searchterm=tiros>
Vierailtu 16.12.2008.
- [15] http://www.nasa.gov/vision/earth/features/bm_gallery_3.html
Vierailtu 16.12.2008.
- [16] <http://history.nasa.gov/SP-168/section1.htm>
Vierailtu 16.12.2008.
- [17] <http://www.nro.gov>
Vierailtu 16.12.2008.
- [18] Salminen, Esa.
Satelliittien hyväksikäyttö puolustusvoimissa.
Maanpuolustuskorkeakoulu. Tekniikan laitos. 2000.
ISBN 951-25-1173-8
- [19] Sweetman, Bill.
Spy Satellites: The Next Leap Forward.
Jane's International Defence Review 1.1.1997.

- [20] Sweetman, Bill.
Satellite micro-revolution offers the potential for broader vision.
Jane's International Defence Review 1.9.2006.
- [21] Sweetman, Bill.
More funding for classified items.
Jane's Defence Weekly 15.2.2006.
- [22] http://en.wikipedia.org/wiki/Hubble_Space_Telescope
Vierailtu 1.3.2009.
- [23] www.QinetiQ.com
Vierailtu 5.6.2008.

LIITTEET

Liite 1 QuickBird satelliitin kuva, resoluutio 0.6m



Kuva 8 [5]: QuickBird satelliitin kuva Viennasta

Esimerkiksi vasemmassa alaosassa kuvaa olevilla parkkipaikoilla olevat autot voisi laskea, mutta jos autojen välissä olisi ihminen ei sitä erottaisi. Tästä voisi arvioida resoluution olevan ilmoitettua luokkaa.