

MAANPUOLUSTUSKORKEAKOULU

**KOHTEN TUNNISTAMINEN SUOMALAISESTA METSÄMAASTOSTA
SAR-TUTKASATELLIITILLA**

Pro gradu -opinnäytetyö

Yliluutnantti
Ismo Reunamäki

Sotatieteiden maisterikurssi 9
Maavoimien johtamisjärjestelmälinja

Huhtikuu 2020

MAANPUOLUSTUSKORKEAKOULU

Kurssi Sotatieteiden maisterikurssi 9	Linja Maavoimien johtamisjärjestelmä- linja
Tekijä Yliluutnantti Ismo Reunamäki	
Tutkielman nimi KOHTEEN TUNNISTAMINEN SUOMALAISESTA METSÄMAASTOSTA SAR-TUTKASATELLIITILLA	
Oppiaine johon työ liittyy Sotatekniikka	Säilytyspaikka Kurssikirjasto (MPKK:n kirjasto)
Aika huhtikuu 2020	Tekstisivuja 73 Liitesivuja 76
TIIVISTELMÄ <p>SAR-tutkasatelliittien etu tulee niiden mahdollisuudesta suorittaa tehtäviä sää- ja valo-olosuhteista riippumatta. Kohteet voivat paljastumisen välttämiseksi vielä käyttää suojautumisen keinona ympäristöä ja naamiointijärjestelmiä. Tutkimuksen tavoite on selvittää SAR-tutkasatelliittien suorituskykyä paikallistettaessa metsämaastoon sijoitettua kohdetta. Kohteen havaitsemista SAR-tutkasatelliitilla tutkittiin SAR-tekniikan ja avaruusmekanismien näkökulmasta.</p> <p>Menetelminä käytettiin kirjallisuustutkimusta, matemaattista analyysia ja määrällistä analyysia. Tutkimuksessa esitetään SAR-tutkien ominaisuudet ja niihin vaikuttavat muuttujat sekä avaruuden vaikutus järjestelmän toimintaympäristönä. Aineisto koostuu tutka-alan kirjallisuudesta ja kansainvälisistä tutkimuksista. Kirjallisuuslähteiden pohjalta luotiin matemaattinen analyysi, jonka avulla SAR-tutkasatelliittien ominaisuuksia tutkitaan kokonaisvaltaisesti. Tämän lisäksi SAR-dataa käytettiin määrällisen analyysin tekemisessä, jolloin tutkittiin SAR-tutkasatelliittien riippuvuussuhteita ja mahdollistettiin NIIRS-luokittelun tulkinta.</p> <p>Tutkimuksesta selviää, että SAR-tutkasatelliitit eivät nykyisellä suorituskyvyllään kykene tuottamaan selkeästi tunnistettavaa havaintoa kuorma-auton kokoisesta kohteesta metsän läpi. SAR-tutkasatelliitit eivät siis muodosta valtavaa tiedustelu-uhkaa metsässä sijaitseville kohteille. Tämä ei kuitenkaan poissulje niiden kykyä havaita avoimilla alueilla ja harvapuisissa metsissä sijaitsevia kohteita.</p> <p>Tutkimus keskittyy resoluution ja kuvan tulkinnan merkitykseen kohteen havaitsemisessa.</p>	
AVAINSANAT SAR-tutka, avaruus, satelliittikuvaus, kuvaustiedustelu, kuvantulkinta, resoluutio, maalittaminen	

KOHTEEN TUNNISTAMINEN SUOMALAISESTA METSÄMAASTOSTA SAR-TUTKASATELLIITILLA

Sisältö

1. JOHDANTO	1
1.1 Tutkimusaihe ja toimintaympäristö	1
1.2 Tutkimustehtävä ja menetelmä	2
1.3 Tutkimuksen keskeiset käsitteet, rajaukset ja menetelmät	3
1.4 Tutkimustilanne	6
2. SAR-TUTKATEKNIikka	8
2.1 Reaaliantennin ongelmat tutkakuvan muodostamisessa	8
2.2 Antennin pidentäminen doppler-ilmiön avulla	12
2.3 Synteettisen apertuurin muodostaminen	16
2.4 Epäfokusoidun ja fokusoidun SAR -tutkan resoluutio	18
2.5 Signaalin monikäsitteisyyden vaikutus mittausalueen leveyteen	21
2.6 SAR-tutkan kuvantamistavat ja integrointikulma	24
2.7 Tutkayhtälö	26
2.8 Puustosta ja maastosta johtuvat signaalin sironta sekä vaimeneminen	27
3. SATELLIITTITEKNIikka JA KIERTORATAMEKANISMIT	33
3.1 Kansainvälinen avaruusteollisuus	33
3.2 Satelliitin rakenne	33
3.3 Kiertoratamekaniikka	35
3.4 Kiertoradat	40
3.5 Alueellinen kattavuus ja ajallinen erotuskyky	43
3.6 SAR-tutkasatelliittien esittely	45
4. MAAKOHTEEN TUNNISTAMISEEN TARVITTAVA RESOLUUTIO	49
4.1 Dynaaminen maalittamisprosessi	50
4.3 Kvantulkinnan kriteerit	53
4.5 Kohde	57
4.6 Suomalainen metsä	58
4.7 GIQE (The General Image Quality Equation)	62
5. SAR-KUVIEN VERTAAMINEN JA RESOLUUTION TODENTAMINEN	64
6. JOHTOPÄÄTÖKSET	67
6.1 Tutkimuskysymykset	67
6.2 Pohdinta	69
6.3 Tulosten tarkkuuden arviointi	71
6.3 Ehdotukset jatkotutkimusta varten	72
LÄHTEET	
LIITTEET	

KOHTEEN TUNNISTAMINEN SUOMALAISESTA METSÄMAASTOSTA SAR-TUTKASATELLIITILLA

Kuvat

KUVA 1: SAR-TUTKASATELLIITTIIN LIITTYVÄ GEOMETRIA [6][11].	9
KUVA 2: SAR-TUTKAN PALAUTUVAN SÄTEILYN TALLENTAMINEN LIIKKEESSÄ [12].	14
KUVA 3: TUTKAKUVAN MUODOSTAMINEN DATAFILMILTÄ KUVAFILMILLE [12][18].	15
KUVA 4: SAR-TUTKALLA TARVITTAVA GEOMETRIA DOPPLER-TAAJUDEN LASKEMISEKSI [19].	15
KUVA 5: SYNTEETTISEN APERTUURIN MUODOSTAMINEN [11].	17
KUVA 6: KEINOTEKOISEN ANTENNIRYHMÄN KONSEPTI [20].	18
KUVA 7: SIVUSTAKUVAAVAN TUTKAN MONIKÄSITTEISYYDEN GEOMETRIA [20].	21
KUVA 8: SAR-TUTKASATELLIITEITTA KÄYTETYT YLEISIMMÄT KUVANTAMISTAVAT [6].	25
KUVA 9: SAR-TUTKAN INTEGRAATIOKULMAN MUODOSTUMINEN [26].	25
KUVA 10: ERILAISTEN KARKEUKSIEN VAIKUTUS SÄTEILYN SIRONTAAN [12].	28
KUVA 11: METSÄN KOLME SIRONNAN AIHEUTTAVAA TASOA [31].	30
KUVA 12: SATELLIITTIIEN KIERTORATOJEN ETÄISYYSEROT [54].	36
KUVA 13: ELLIPTINEN KIERTORATA.	36
KUVA 14: YMPYRÄN MUOTOISELLA KIERTORADALLA ETÄISYYDEN SUHDE SATELLIITIN NOPEUTEEN	37
KUVA 15: ETÄISYYDEN VAIKUTUS YHDEN RATAKIERROKSEN AIKAAN	38
KUVA 16: SATELLIITTIIEN KIERTORADAN EKSENTRISYYS 0,1 ASTEEN SIIRROIN 0:STA 0,9:ÄÄN [56].	38
KUVA 17: SATELLIITIN KIERTORADAN INKLIINAATIO [59].	39
KUVA 18: SATELLIITTI HEO-KIERTORADALLA. SAMAN MAA-ALUEEN KATTAMINEN HEO-KIERTORADOILLA OLEVIEN SATELLIITTIIEN KONSTELLAATIOILLA [72].	41
KUVA 19: ESIMERKKI POLAARISELLA KIERTORADALLA SIJAITSEVAN SATELLIITIN SIJAINNISTA MAAHAN NÄHDEN. PUNAISELLA ENSIMMÄINEN KIERTO JA Keltaisella KIERTORATASEKVENSIN SEURAAVAT VAIHEET. [73]	42
KUVA 20: AURINKOSYNKRONISELLA KIERTORADALLA RATATASO KIERTYY ITÄÄN NOIN ASTEEN VERRAN VUOROKAUDESSA, JOLLOIN SATELLIITTI YLITTÄÄ SAMAN KOHDAN MAASTA SAMAN PAIKALLISEEN AIKAAN [57].	42
KUVA 21: KIERTORADAN ETÄISYYDEN VAIKUTUS SATELLIITIN MAAKATTAVUUTEEN	43
KUVA 22: ALUEELLISEN EROTTelukyvyn SUHDE SATELLIITIN UUDELLEENVIERAILUAIKAAN [84].	45
KUVA 23: DYNAAMINEN MAALITUSPROSESSI [97].	52
KUVA 24: KUVAN TULKITSEMISEN PROSESSI [104].	54
KUVA 25: JOHNSONIN KRITERISTÖN METODI [107].	55
KUVA 26: SISU E11 8X8	58
KUVA 27: SUOMEN PUUSTOLAJIEN MÄÄRÄN KEHITYS VUOSINA 1920 - 2017 [114].	58
KUVA 28: METSÄNTIHEYDESTÄ JOHTUVA VAIMENNUS ERI KUVAUSKULMILLA 400MHZ JA 1300MHZ KESKITAAJUUKSILLA.	59
KUVA 29: KESKITEHO 1300MHZ:N TAAJUUDELLA METSÄÄ LÄPÄISTÄESSÄ	61
KUVA 30: ENNUSTETUN NIIRS-ARVON SUHDE TULKITTUUN NIIRS-ARVOON [117].	62
KUVA 31: NIIRS-ARVIKOOSTE.	66

KOHTEEN TUNNISTAMINEN SUOMALAISESTA METSÄMAASTOSTA SAR-TUTKASATELLIITILLA

Taulukot

TAULUKKO 1. MAANPUOLUSTUSKORKEAKOULULLA VALMISTUNEET AIHEESEEN LIITTYVÄT OPINNÄYTETYÖT. [8]	6
TAULUKKO 2. SAR-TUTKASATELLIITTIIEN KÄYTTÖTARKOITUKSIA JA TAAJUUKSIA [6].	8
TAULUKKO 3. KOLMEN ERI KUVAUSTAVAN RESOLUUTIOEROT. [8]	21
TAULUKKO 4: SENTINEL-1 -SATELLIITTIIEN TEKNISET TIEDOT [86][88]	46
TAULUKKO 5: TERRASAR-X -SATELLIITIN TEKNISET TIEDOT [89]	46
TAULUKKO 6: ICEYE -SATELLIITTIIEN TEKNISET TIEDOT [90]	47
TAULUKKO 7: ALOS - PALSAR -SATELLIITIN TEKNISET TIEDOT [92]	48
TAULUKKO 8: SOTILASTIEDUSTELUN KOHTEITA JA TUNNUSMERKISTÖÄ	51
TAULUKKO 9: SÄTEILYN VAIMENEMISKERTOIMET METSÄSSÄ	60

Lyhenteet ja käsitteet

Aallonpituus	Yhden sähkömagneettisen aaltoliikkeen pituus.
Apogeum	Satelliitin kiertoradan kaukaisin piste maasta.
Atsimuuttiresoluutio	Tutkan liikeradan suuntainen resoluutio.
C-taajuusalue (IEEE)	4 - 8 GHz taajuusalue.
DARPA	Defense Advanced Research Projects Agency. Yhdysvaltain asevoimien tutkimusorganisaatio.
Depolarisaatio	Sähkömagneettisen säteilyn polarisaatio voi muuttua sirotessa. Depolarisaatio kertoo kulmam muutoksen määrän suhteessa tulo-säteilyyn.
Doppler-taajuus	Liikkeestä johten tutkalle palautuva säteily havaitaan eri taajuudella. Doppler-taajuus on muuttunut taajuus.
Elevaatio	Maapisteen ja satelliitin välinen kulma maasta katsottuna.
ESA	European Space Agency. Euroopan yhteinen avaruusjärjestö.
FOPEN	Foliage Penetration. Kasvuston läpäisy.
GEO	(Geostationary Orbit) Geostationaarinen kiertorata.
GIQE	General Image Quality Equation. Laskentamalli NIIRS-arvon ennustamiseksi satelliittikuvasta.
GSD	Ground Sample Distance. Satelliittikuvassa kahden pikselin keskustojen välinen etäisyys toisistaan maanpinnalla.
HEO	Highly Elliptical Orbit. Korkeasti elliptinen kiertorata.
HF-taajuusalue	3 -30 MHz taajuusalue.
ICEYE	Suomalainen satelliittijärjestelmiä valmistava yritys.
Inkлинаatio	Kiertoradan ratatason astesuhde päiväntasaajaan.
Integraatiokulma	Kuvauskulma miltä matkalta SAR-tutka näkee kuvattavan alueen. Integraatiokulmaa voidaan kasvattaa pidentämällä synteettistä apertuuria tai muuttamalla kuvantamistapaa.
Koherenssi	Tilanne jossa sähkömagneettinen säteily on limittäin suhteessa toisiinsa. Sähkömagneettinen säteily on koherenttia keskenään, kun niiden faasit ovat samat. Tällöin niiden säteily ominaisuudet vastaavat toisiaan.
Kohina	Tutkan vastaanottimen havaitsemaa satunnaissignaalia, joka haittaa hyötysignaalin erottamista. Kohinaa syntyy tutkassa ja sen ympäristössä.
Konstellaatio	Usean satelliitin järjestelmä.
LEO	Low Earth Orbit. Lähellä maata oleva satelliitin kiertorata.
L-taajuusalue (IEEE)	1 -2 GHz taajuusalue.
MEO	Mid Earth Orbit. LEO- ja HEO-kiertoratojen välissä oleva kiertorata.
Nadiiri	Maan pinnan piste, joka sijaitsee suoraan satelliitin alapuolella.
NASA	National Aeronautics and Space Administration. Yhdysvaltain ilmailu ja avaruusjärjestö.
NATO	North Atlantic Treaty Organization. Pohjois-Atlantin liitto. Kansainvälinen poliittinen ja sotilaliitto.

NESZ	Noise Equivalent Sigma Nought. Arvo joka kuvaa SAR-tutkan herkkyyttä. Arvoa voidaan parantaa lisäämällä lähetystehoä tai poistamalla tutkan elektroniikasta johtuvaa kohinaa.
NIIRS	NATO Imagery Interpretability Rating Scale. NATO STAGA 7194 mukainen kuvan laadun arviointikriteeristö.
Off-nadiiri	Satelliitin kuvauskulma suhteessa sen nadiiriin. Elevaation vastakohta.
Optinen sensori	Sensori joka muuttaa näkyvää valoa sähkömagneettiseksi signaaleiksi.
Perigeum	Satelliitin kiertoradan lähin piste maasta.
Polarisaatio	Sähkömagneettisen säteilyn sähkökenttävektorin käyttäytyminen etenemissuunnassa. Polarisaatio kertoo miten säteily värähtelee.
Pulssi	Lyhyt sähkömagneettisen säteilyn purske.
Pulssikompressio	SAR-dataa kerätessä lähetyspulssin pituutta kasvatetaan, jotta huipputehoa voidaan pienentää. Takaisin heijastunut säteily johdetaan sovitetun suotimen läpi ja kompressoitetaan lyhyeksi pulssiksi. Tällöin etäisyysresoluutio säilyy hyvänä.
RCS	Radar cross-section. Tutkapoikkipinta-ala.
Retrogradinen	Satelliitin kiertorata, joka kiertää vastoin maan kiertosuuntaa.
SAR	Synthetic Aperture Radar. Synteettisen apertuurin tutka. Kaukokartoittamiseen suunniteltu järjestelmä, jolla voidaan tutkakuvaata maanpintaa. Tutkan liikkeen avulla kasvatetaan synteettisesti antenniryhmän kokoa, jolloin atsimuuttisuunnan resoluutio paranee.
ScanSAR	SAR-tutkan kuvantamistapa. Kuvauskulmaa muuttamalla kasvatetaan kuvausalueen kokoa resoluution kustannuksella.
SENTINEL-1	ESA:n hallinnoima SAR-tutkasatelliitti. Käytetään kaukokartoitukseen ja ympäristön seurantaan.
Sironta	Sironta on tutkan lähettämän sähkömagneettisen säteilyn heijastumista eri pinnoilta. Kohteen tutkapoikkinta-ala vaikuttaa kuinka suuri takaisinsirontakerroin sillä on.
SNR	Signaali-kohinasuhde. Luvulla kuvataan hyötysignaalin suhdetta tutkan havaitsemaan kohinaan. Laadukas signaali vaatii riittävän SNR-arvon. SNR:ään voidaan vaikuttaa muun muassa lisäämällä tutkan lähetystehoä tai parantamalla antennin vahvistusta.
Spotlight	SAR-tutkan kuvantamistapa. Keskittämällä tutkan säteily tietylle alueelle parannetaan kuvan resoluutiota kuvausalueen koon kustannuksella.
SSO	Sun Synchronous Orbit. Aurinkosynkroninen kiertorata. Satelliitti ylittää saman kohdan maasta karkeasti samaan kellonaikaan.
STANAG	Standardisation Agreement. NATO:n koalitiomaiden välinen vakiointisopimuksia, joiden tarkoituksena on parantaa yhteistyömaiden yhteistoimintaa.
Stripmap	SAR-tutkan kuvantamistapa. Yleisin kuvantamistapa jolloin tutkan keila osoittaa sivulle ja alas. Tällöin kuvausdataa tulee maasta kaistaleina.
Taajuus	Kuinka monta kertaa sekunnissa yksi sähkömagneettisen säteilyn aallonliike toistuu. Käytetty yksikkö on hertsi (Hz).

Taajuusalue	Taajuuksien luokittelu ala- ja ylätaajuuksien mukaisesti. Vaihtoehtoisesti taajuudet voidaan luokitella myös aallonpituuksien mukaan.
TERRASAR-X	Saksalainen SAR-tutkasatelliitti. Kykenee korkeanresoluution kuviin.
VHF-taajuusalue	30 - 300 MHz taajuusalue.
X- taajuusalue (IEEE)	8 - 12 GHz taajuusalue.

KOHTEEN TUNNISTAMINEN SUOMALAISESTA METSÄMAASTOSTA SAR-TUTKASATELLIITILLA

1. JOHDANTO

1.1 Tutkimusaihe ja toimintaympäristö

Avaruusvarustelu saavutti huippunsa kylmän sodan aikana, jolloin Yhdysvallat ja Neuvostoliitto kilpailivat avaruuden valloittamisesta. Kyseisenä aikana kehitettiin paljon uusia teknologioita, jotka ovat edelleen käytössä joko sellaisenaan tai kehitettyinä. Kilpavarustelu on 2000-luvulla saanut uutta vauhtia elektroniikan pienenentymisen johdosta. Tällä hetkellä sotilaskäytössä olevat satelliittijärjestelmät jakaantuvat enimmäkseen joko tiedustelu- tai tiedonsiirtosatelliiteiksi. Tämän tutkimuksen tarkoituksena on selvittää SAR-tiedustelututkasatelliittien suorituskykyä.

Tämä tutkimus toteutetaan tekniikan perspektiivistä. Tarkoituksena on selvittää millä teknisillä rajoituksilla SAR-tutkasatelliitilla otetusta kuvasta voidaan havaita valittu kohde metsämaastosta. Aiheeseen liittyvä tekniikkaa lähestytään SAR-tutkien ja satelliittijärjestelmien näkökulmasta. Näiden tekniikoiden liittyminen sähkömagneettiseen säteilyyn, metsän aiheuttamaan vaimenemiseen ja kuvan tulkitsemisen prosessiin rakentaa ilmiöpohjan tutkimukselle.

Yksi tutkimuksen tavoitteista liittyy kuvaustiedusteluun liittyvän resoluution tarkasteluun. Kuvaustiedustelulla pyritään saavuttamaan visuaalista tietoa vastustajasta. Se voi liittyä sijaintiin, vahvuuteen, materiaaliin tai esimerkiksi alueen infrastruktuuriin. Erottelukyky eli resoluutio vaikuttaa siihen kuinka hyvin kuvasta voidaan tunnistaa asioita. Huonomman erottelukyvyyn kuvista voidaan korkeintaan todeta, että alueella sijaitsee jotain, kun sen sijaan paremman erottelukyvyyn kuvista voidaan tunnistaa tarkkoja kohteita kuten kalustoa. Tarkemmilla kuvilla voidaan tehdä varmempia ja parempia päätöksiä. Sensorin etäisyys kuvattavasta kohteesta vaikuttaa sen teknisiin vaatimuksiin tarkkojen kuvien saamisessa. Tämän tutkimuksen tarkoituksena on selvittää raja-arvot resoluutiolle, jolloin kohde voidaan tunnistaa. Kohteeksi valitaan ajoneuvo, jonka perusteella voidaan luoda päätelmiä joukosta.

Tutkimusaihe on perusteltu siltä pohjalta, että sodankuva jatkaa kehittymistään suuntaan jossa kehittyneellä teknologialla saavutetaan etulyöntiasema vastustajasta. Tämän kehityspolun myötävaikuttajista löytyy monta eri haaraa, joista yksi liittyy asejärjestelmien siirtymiseen avaruuteen. Tutkimusaihepiiri on annettu Maanpuolustuskorkeakoulun toimesta. Tutkimuksen aihe tarkennettiin SAR-tutkasatelliitteihin.

Satelliittikalustolla on muuhun ilmatiedustelun materiaaliin verrattuna merkittäviä etuja. Ensimmäkin ne ovat avaruusasemia lukuun ottamatta miehittämättömiä, jolloin niiden rikkoutuminen ei aiheuta henkilövahinkoja. Toiseksi avaruudessa ei ole valtioiden välisiä rajoja. Tämä tarkoittaa sitä, että järjestelmä voi sijaita suhteessa maahan suoraan vieraan valtion yläpuolella eikä toimija silti riko kansainvälisiä sopimuksia. Kolmanneksi avaruus sijaintina tuo jonkinasteista suojaa. Satelliittijärjestelmiin on mahdollista vaikuttaa esimerkiksi kineettisin keinoin, mutta näiden järjestelmien hankkiminen vaatii huomattavasti enemmän resursseja kuin vastaavat ilmapuolustuksenjärjestelmät. Satelliitteja tutkivassa osiossa pyritään selvittämään, miten ratamekaniikka ja kiertoradat vaikuttavat kuvaustiedusteluun.

Ilmasta suoritettava kuvaustiedustelu voidaan karkeasti jakaa sensoriperusteisesti. Sensorioptiina pidetään optisia, elektro-optisia ja tutkasensoreita. Merkittävin suorituskyvyllinen ero on muodostunut optisten ja elektro-optisten sensorien kyvystä tuottaa parempaa resoluutiota. Tämä ei kaikilta osin pidä nykyään paikkaansa. Järjestelmien kehittymisen myötä tutkasatelliiteilla kyetään nykyään tuottamaan erittäin tarkkaa kuvamateriaalia. SAR-tutkan periaatteena on sen resoluution parantaminen sensorin liikkeen avulla. Tutkasatelliittien kyky toimia mikroaalto aallonpituuksilla mahdollistaa sen, että ne ovat osittain olosuhderiippumattomia. Tällöin kuvattavan alueen pilvisuus tai päivänvalo eivät vaikuta merkittävästi kuvan laatuun verrattuna optisiin ja elektro-optisiin sensoreihin.

Tässä tutkimuksessa selvitetään miten sähkömagneettinen spektri vaikuttaa SAR-tutkasatelliitin ominaisuuksiin. Yksi työn päätavoite on selvittää mikä taajuusalue mahdollistaa ilmakehän ja puuston läpäisyn siten, että takaisin heijastunut säteily ei vaimene liikaa palatessaan takaisin SAR-tutkasatelliitille. Hyötysäteilyn vaimentuessa liikaa tarkan erottelukyvyn muodostaminen ei välttämättä ole mahdollista.

1.2 Tutkimustehtävä ja menetelmä

Tutkimus on tehty tekniikantyönä, mutta lopputuloksena ei ole uusi järjestelmä tai laite. Tavoitteena on kasvattaa Puolustusvoimissa tietoa, miten avaruudesta käsin voidaan suorittaa tutkakuvaustiedustelua, miten siltä voisi suojautua ja parantaa meidän toimintatapamalleja.

Päätutkimuskysymys on:

- Mikä on SAR-tutkasatelliitin suorituskyky paikallaan olevan kohteen havaitsemisessa metsämaastossa?

Pääkysymyksen vastaus pohjustetaan hakemalla vastaukset tukikysymyksiin, jotka johdonmukaisesti ajavat tutkimusta vastaamaan tutkimustehtävään. Tukikysymykset ovat:

- Mikä on tarvittava spatiaalinen resoluutio kohteen havaitsemiseksi?
- Miten SAR-tutka toimii metsän ja sen läpi kuvantamisessa?
- Miten SAR-tutkasatelliitin kiertorataominaisuudet vaikuttavat kohteen havaitsemisessa?
- Mitkä SAR-tutkan ominaisuudet vaikuttavat sen resoluution muodostamisessa?

Varsinainen tutkimusongelma syntyy Suomen maantieteellisestä luonteesta. Suomen metsämaasto tarjoaa hyvän suojan optisilta ja elektro-optisilta sensoreilta suojautumiseen. Suomessa on myös haastavat sää- ja valaisuolosuhteet ilmasta kuvaamiseen. Suomen osuus avaruusjärjestelmissä on pääasiallisesti teollisuuden puolella, jossa yritykset tuottavat palveluita ja teknologiaa avaruudessa käytettäväksi.

1.3 Tutkimuksen keskeiset käsitteet, rajaukset ja menetelmät

Sotilaskontekstissa kuvaustiedustelun merkitys liittyy sen laatuun. Kuvan laatu liittyy sen tulkittavuuteen. Kuvien laatu paranee sen sisällön ja ominaisuuksien myötä. Kuvan informaation sisältö vaikuttaa mitä tulkintoja analyysoija voi tehdä siitä. Kuvan ominaisuuksista tässä tutkimuksessa keskitytään resoluutioon. Hyvä resoluutio mahdollistaa kohteiden erottelun kuvasta ja täten analyysin tekemisen. Kuvanlaatua ja tarvittavaa resoluutiota on tarkasteltu NIIRS-kriteeristön avulla. GIQE-laskentaa käytettiin vertailukohtana kuvanlaadun arvioinnissa.

Resoluution eli kuvan erottelukyvyn laadun perusteella kuvasta voidaan joko havaita tai tunnistaa asioita. Jos erottelukyky on huono, niin kuvasta voidaan havaita isoja kohteita kuten maaston muotoja, jokia tai kaupunkia, mutta ei pieniä kohteita. Hyvän erottelukyvyn kuvasta voidaan tunnistaa tarkkoja kohteita kuten ajoneuvoja tai henkilöitä. Kuinka hyvin kuvasta voidaan tunnistaa asioita, riippuu resoluutiosolun suhteesta kuvattavaan kohteeseen. SAR-tutkasatelliiteilla resoluutio riippuu sirontapisteen erottelukyvystä. Resoluutio tutkakuvissa paranee sitä mukaan mitä lähempänä olevia pisteitä voidaan erottaa toisistaan.

Resoluutiosolu on suorakaiteen muotoinen ja muodostuu atsimuuttiresoluutiosta ja pituussuunnan resoluutiosta. Näihin vaikuttaa sensorin ja sen alustan ominaisuudet joiden raja-arvoja tutkimuksessa pohditaan. [1]

SAR-tutka eli Synthetic Aperture Radar on tutkasensori, joka liikkeen avulla kykenee parantamaan kuvausominaisuuksia. Antennin pituus vaikuttaa kuvan erottelukykyyn ja SAR-tutkissa pystytään kohteen suhteen sivuttaisliikkeellä synteettisesti kasvattamaan synteettisesti antennin kokoa. Tutka lähettää useita sähkömagneettisia pulsseja ja vastaanottaa ne järjestyksessä jonka jälkeen eri vaiheen kuvat pulssikompressoitetaan eli yhdistetään tutkalla muodostaen tarkka tutkakuva. [2]

FOPEN tai FPEN (Foliage Penetration) on englannin kielen akronyyminä ja tarkoittaa tämän tutkimuksen yhteydessä tutkan kykyä läpäistä kasvillisuutta. Sotilaallisessa toimintaympäristössä maavoimat käyttävät puuston kasvillisuutta suojana ilmasta tähystämiseltä. Tutkan fysikaalisista ominaisuuksista riippuen kasvillisuuden läpi kyetään tunnistamaan jopa ajoneuvoja. VHF- ja UHF ovat olleet tällöin yleisesti käytettyjä taajuusalueita niiden ominaisuuksien vuoksi. [3]

Avaruus tuottaa omat haasteensa SAR-tutkalla kuvaamisessa. Ratakorkeus vaikuttaa sensorin etäisyyteen kuvattavasta kohteesta. LEO (Low Earth Orbit) radalla satelliitti saattaa olla 180 - 2000 km päästä maasta, mutta HEO (High Earth Orbit) satelliitti on jo yli 35000 km päästä kohteesta. Ratakorkeus ei ainoastaan vaikuta etäisyyteen, mutta myös satelliitin nopeuteen suhteessa kohteeseen. Inklinaatio on satelliitin kiertoradan ratatason astesuhde päiväntasaajaan. Inklinaatio vaikuttaa mitä alueita satelliitti kykenee kuvaamaan ja ajanjaksoon jolloin se voi kuvata niitä. [4] Tutkimus keskittyy satelliitteihin joten se ottaa huomioon olennaisesti vaikuttavat muuttujat. Ratamekaniikka vaikuttaa satelliittien ominaisuuksiin ja tässä tutkimuksessa keskitytään niihin jotka liittyvät kuvaamiseen liittyviin tekijöihin.

Tutkimuksen rajauksilla on pyritty pitämään se opinnäytetyön mittaraamisessa. Rajauksien tavoitteena on myös keskittyä tutkimusongelman ratkaisemiseen. Tutkimuksen kehys on rajattu seuraavasti:

- 1) Tutkimus koskee ainoastaan SAR-tutkasatelliitteja eikä muita kuvaussatelliitteja. Muiden kuvaussatelliittien materiaalia voidaan käyttää tukena havainnollistamisessa.
- 2) SAR-tutka voidaan asentaa erilaisiin lentäviin alustoihin, mutta tässä tutkimuksessa käsitellään ainoastaan satelliitteja. Muihin alustoihin asennettuja sensoreita voidaan käyttää tukena havainnollistamisessa.

- 3) Tutkaamalla voidaan havaita paikallaan tai liikkeessä olevia kohteita. Tässä tutkimuksessa ei oteta huomioon taktiikka ja aikaa, vaan kohde on absoluuttisesti paikallaan.
- 4) Kuvattavaksi kohteeksi on yksilöity kuorma-auto, koska sen oletetaan olevan maailmanlaajuisesti yksi asevoimien yleisimmistä ajoneuvoista. Tämä perustellaan sillä, että kaikki puolustushaarat ja aselajit tarvitsevat kalustonsiirtokykyä. Kuorma-auto on kustannustehokas tapa siirtää materiaalia asevoimissa maan päällä.
- 5) Sääolosuhteet huomioidaan, jos ne vaikuttavat SAR-sensorin säteilyn etenemiseen.
- 6) Tutkan kohteen havaitsemista tutkitaan avoimesta ja metsämaastosta.
- 7) Kuvamateriaalin tutkiminen on rajattu SAR-dataan. Muiden kuvaussatelliittien materiaalia käytetään tukena havainnollistamisessa.

Taajuusalueina käsitellään ne vaihtoehdot, jotka soveltuvat korkean resoluution kuvaustiedusteluun. Lisäksi taajuusalueista valitaan tarkasteluun ne taajuudet, joilla voidaan läpäistä kasvillisuutta. Kaistanleveyyttä ei rajata.

Tutkimusmenetelminä on käytetty kirjallisuustutkimusta, SAR-kuva-analyysiä ja matemaattista analyysiä. Lähdemateriaalista muodostetaan kirjallisuustutkimuksella tutkimusongelman käsittelemistä varten tarvittava teoria. Tarkoituksena on havainnollistaa tutkimusongelman mukaiset vaatimukset, joiden perusteella voidaan muodostaa tekniset vaatimukset järjestelmälle. Tutkimalla kirjallisuutta, tutkimuksia ja SAR-dataa voidaan selvittää tarvittavien ominaisuuksien raja-arvot kuorma-auton havaitsemiseen metsämaastosta. Määrällisen analyysin perustana toimii SAR-kuvien tulkitseminen matemaattisen analyysin tukemana. Lopputulosta voidaan pitää laadullisena, jota tukevat määrälliset elementit. [5]

Tutkimusmenetelmien valintaan on vaikuttanut julkisesti saatavilla olevien lähteiden määrä sekä Suomessa olevat mahdollisuudet aihepiirin tutkimuksen tekemiseen. Kirjallisuustutkimuksella saadaan merkittävästi luotettavaa tutkimusdataa aiheesta johtuen aihepiirin laajasta kansainvälisestä tutkimuksesta. Julkisista lähteistä saatavilla olevaa SAR-dataa voidaan käyttää tutkasatelliittien suorituskyvyn analysointiin. Matemaattinen analyysi on perusteltu menetelmä ottaen huomioon kotimaiset resurssit vastaavan tutkimuksen tekemiseen esimerkiksi kenttäkokeella.

Tutkimuksen toimintamalli on rakentaa tarvittava teoriapohja valitulla metodilla ja kasvattaa sitä aihealueiden välillä. Teorialuvuista muodostunutta tietoa käytetään matemaattiseen analyysiin, jonka pohjalta laaditaan SAR-datan arviointia varten vertailumalli. Muodostetun tutkimusdatan pohjalta laaditaan johtopäätökset. Analyysin avulla voidaan todentaa suuntaa antaneen tutkimushypoteesin toteutuminen ja tutkimuksen käyttömahdollisuuksien arviointi [7].

1.4 Tutkimustilanne

SAR-tutkakartoittaminen on laaja-alaisesti tutkittu aihe maailmalla. Tutkimukset jotka ovat julkisia ja ovat jaettuna ilmaiseksi tai maksullisissa tietokannoissa keskittyvät enimmäkseen siviilisektoria tukeviin aloihin. Sotilastutkimukset jotka sisältävät konkreettista teknistä tietoa ovat pääsääntöisesti salassa pidettyjä. Julkisten tutkimusten käytettävyys arvioidaan tutkimuskohteisesti. Julkinen SAR-data sisältää harvoin asejärjestelmiä, jolloin havaintoja joudutaan tekemään siviilirakenteista.

Tässä tutkimuksessa pyritään hyödyntämään laaja-alaisesti aiheeseen liittyviä tutkimuksia. Laaja-alaisuudella tarkoitetaan, että hyödynnetty materiaali voi olla tehty joko siviili- tai sotilassektorille. Näistä pyritään etsimään mahdollisimman nykyaikaiset ja päivitetty tutkimukset.

Maanpuolustuskorkeakoululla aihetta ei tutkijan mielestä ole käsitelty laajasti. Aihepiirin tutkimuksia on vähän ja ne keskittyvät enimmäkseen optisiin ja elektro-optisiin järjestelmiin. Aihetta on käsitelty tekniikan alan ulkopuolisissa opinnäytetöissä, joita tutkimuksen teknisen luonteen johdosta voitu paljoa hyödyntää.

Tutkimuksen otsikko	Tekijän nimi	Tutkinto-aste	Vuosi
Länsimaisten ja venäläisten sotilassatelliittien yleinen rakenne ja suorituskyky	Saku Lipsanen	SK	2006
Satelliittitiedustelu - kuvaussatelliittien kehitys	Pauli Vallius	SK	2009
Satelliittien hyödyntäminen merialueen valvonnassa	Pessi Pursiainen	SK	2011
Satelliittien hyödyntäminen merialueen valvonnassa	Markus Halme	SK	2012
Venäläisen satelliittitiedustelun suorituskyky	Sami Gustafsson	SK	2014
Kaupallisten kaukokartoitussatelliittien käyttö kuvaustiedustelussa	Tuomo Rusila	UPS	2004
SAR-satelliitin sotilaalliset käyttömahdollisuudet Suomessa	Pasi Tolvanen	EUK	2008
Ilmasta maahan - aseiden vaatima maali-tieto	Roivas Raine	EUK	2010
SAR-satelliittien hyödyntäminen merivalvonnassa	Jarmo Säkkinen	EUK	2011
Lentotukikohdan kuvaustiedustelu tiedustelusatelliitilla ja lentokoneella	Saku Lipsonen	SM	2008
Uhka avaruudesta - Satelliittien kyky ja rajoitteet havaita taistelualuksia Suomen rannikolla	Juuso Mikkola	SM	2016

Taulukko 1. Maanpuolustuskorkeakoululla valmistuneet aiheeseen liittyvät opinnäytetyöt. [8]

Taulukkoon listatuissa opinnäytetöistä ilmenevät seuraavat yleispiirteet. Ne käsittelevät aihepiiriä yleisellä tasolla eikä niitä ole rajattu koskemaan tarkasti jotain tiettyä teknistä ominaisuutta. Työt on pääosin tehty koskemaan merivoimien tai ilmavoimien toimintaympäristöä. Maavoimat voivat hyödyntää omassa tutkimustyössä näitä tutkimuksia, mutta eivät saa niistä suoraan omaan toimintaympäristöön hyödynnettävää tietoa. Pääosa opinnäytetöistä keskittyy optisiin ja elektro-optisiin sensoreihin sekä SAR-tutkia käsitelleet opinnäytetyöt eivät huomioi tekniikan kautta muodostuvaa suhdetta suorituskyykyyn. Juuso Mikkolan pro gradu -tutkielma on näistä tekniikan näkökannalta kattavin. Se käsittelee sensoritekniikkaa ja satelliittien ratamekaniikkaa kattavasti sekä käyttää tutkimusmenetelmänä laadullisten menetelmien lisäksi matemaattista analyysiä sekä simulointia. Viimeiseksi mainitusta työstä saa kattavan kuvan optisten ja elektro-optisten satelliittien suorituskyykyssä Suomen toimintaympäristössä, mutta SAR-tutkat on rajattu ulos kyseisestä tutkimuksesta.

2. SAR-TUTKATEKNIikka

2.1 Reaaliantennin ongelmat tutkakuvan muodostamisessa

Aktiivitutka on laite joka lähettää sähkömagneettista säteilyä, vastaanottaa sitä ja tulkitsee palautuneen sironnan. Tutkat voidaan jakaa kohteen havaitseviin ja kuvaaviin tutkiin. Yksinkertainen tutkajärjestelmä sisältää lähettimen, vastaanottimen, ilmaisimen ja antennin tai antenneja. Synthetic Aperture Radar eli SAR-tutka on ilma-alukseen asennettu sensori joka muodostaa maasta kaukokartoituskuva. Sen toimintaperiaate perustuu pulssitutkaan, joka ottaa useita mittaustuloksia kuvattavasta kohteesta. Kohde tarkoittaa perinteisesti tutkia käsiteltäessä yksittäistä tai useampaa maalia, mutta kuvaavissa tutkissa kohde voi olla alue. [9]

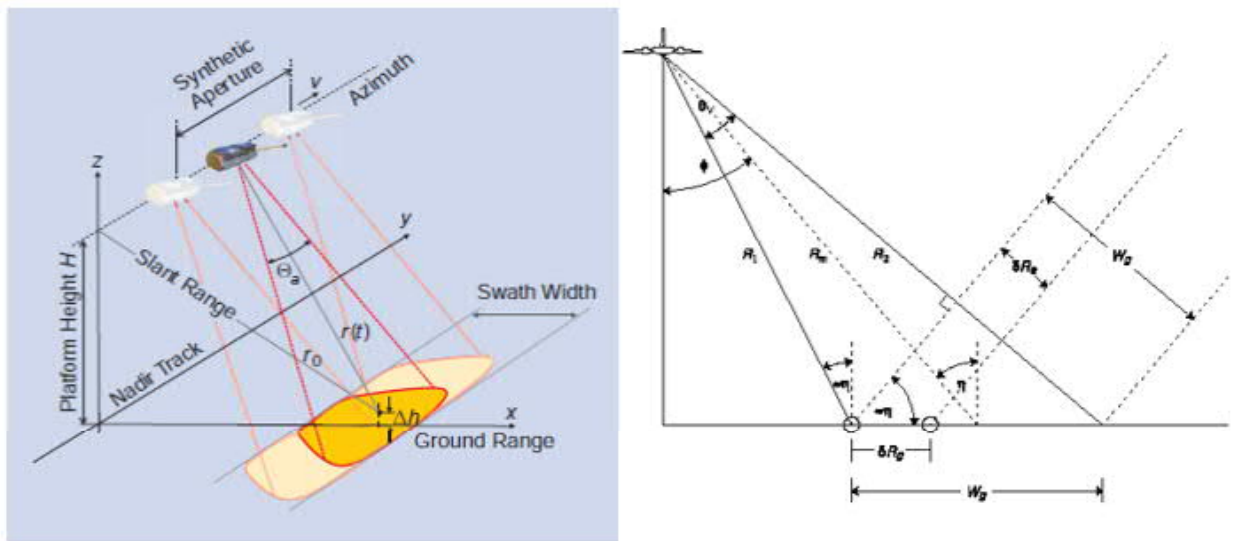
Optiset ja elektro-optiset sensorit käyttävät kuvaamiseen näkyvän valon ja infrapuna-aallonpituuksia. Tutkasensoreilla voidaan käyttää aikaisemmin mainittujen aallonpituuksien lisäksi radioaaltoja. Taulukosta 2 voidaan nähdä, miten SAR-tutkissa käytetään useita erilaisia sähkömagneettisen spektrin aallonpituuksia riippuen sen käyttötarkoituksesta. Ero optisiin ja elektro-optisiin sensoreihin syntyy kyvystä kuvata valo- ja sääolosuhteista riippumatta. Suomessa tällä on iso merkitys, sillä meidän maantieteellinen sijaintimme ja ilmastomme pienentävät näkyvää valoa hyödyntävien tiedustelusatelliittien käyttöikkunaa. Suomessa on loka-kuusta helmikuuhun huonoa, maaliskuusta huhtikuuhun sekä elokuusta syyskuuhun välttävää ja toukokuusta elokuun alkun hyvää aikaa satelliitista kuvaamiselle optisilla sensoreilla [8]. Mikroaaltojen aallonpituus mahdollistaa sen, että ne eivät vaimene ilmakehän, pilvien ja kosteuden vaikutuksesta säteillössään maahan ja heijastuessaan takaisin antennille. SAR-tutkassa voidaan käyttää myös VHF- ja UHF -alueen säteilyä esimerkiksi puuston latvuston läpäisemiseen, mutta sääolosuhteet vaikuttavat niiden toimintaan. [6]

TABLE 1. COMMONLY USED FREQUENCY BANDS FOR SAR SYSTEMS AND THE CORRESPONDING FREQUENCY AND WAVELENGTH RANGES. APPLICATION EXAMPLES ARE: 1) FOLIAGE PENETRATION, SUBSURFACE IMAGING AND BIOMASS ESTIMATION IN P- AND L-BAND; 2) AGRICULTURE, OCEAN, ICE OR SUBSIDENCE MONITORING IN L-, C-, S- AND X-BAND; 3) SNOW MONITORING IN X- AND KU-BAND; AND 4) VERY HIGH-RESOLUTION IMAGING IN X- AND KA-BAND. MOST USED FREQUENCY BANDS ARE L-, C- AND X-BAND.

Frequency Band	Ka	Ku	X	C	S	L	P
Frequency [GHz]	40–25	17.6–12	12–7.5	7.5–3.75	3.75–2	2–1	0.5–0.25
Wavelength [cm]	0.75–1.2	1.7–2.5	2.5–4	4–8	8–15	15–30	60–120

Taulukko 2. SAR-tutkasatelliittien käyttötarkoituksia ja taajuuksia [6].

SAR-tutka voi olla asennettuna lennokkiin, lentokoneeseen tai satelliittiin. Kuvassa 1 on havainnollistettu, miten SAR-tutkasatelliitti liikkuu suhteessa kuvattavaan kohteeseen. Ilma-alus kuvaa kohdetta sen yläpuolelta ja sivusta. Aluksen nopeus, korkeus ja suunta on vakioitu siten, että se mahdollistaa mahdollisimman hyvän tutkakuvamateriaalin keräämisen. Antennielementit vastaanottavat järjestyksessä lähetetyt sähkömagneettiset pulssit ja ne prosessoidaan yhdistetyksi tutkakuvaksi. Tekniikka perustuu sivukulmatutkan (side-looking airborne radar, SLAR) toimintaperiaatteeseen. SAR-sensorit ovat määritelmällisesti yksi SLAR -tutkan tyyppi. Merkittävin ero sensorityyppien välillä tulee doppler spektrin prosessointitavassa.[1]



Kuva 1: SAR-tutkasatelliittiin liittyvä geometria [6][11].

SLAR- tutkan eri suuntien resoluution muodostumista tarkastelemalla voidaan tehdä havainnot mitä SAR-tutkalla pyritään korjaamaan. Reaaliantennilla voidaan havaita, miten etäisyyden kasvaessa resoluutio huonontuu merkittävästi, jos antennin kokoon ei vaikuteta. Kuvattavan alueen resoluutiosolu muistuttaa suorakaidetta, jossa leveys muodostuu atsimuuttiresoluutiosta ja pituus etäisyysresoluutiosta. SLAR-atsimuuttiresoluutioon eli tutkan liikkeen suuntaiseen (atsimuuttitaso) erottelukykyyyn vaikuttavat etäisyys, aallonpituus ja antennin halkaisija. Etäisyysresoluutio riippuu pulssin pituudesta ja vastaanotetun säteilyn aikaviiveestä. [10]

Etäisyysresoluutio tarkoittaa minimi etäisyyttä jolla kaksi pistettä voidaan erottaa toisistaan tutkan ja kohteen välillä. Kahden pisteen erottelu etäisyysuunnassa onnistuu, jos etäisemmästä pisteestä takaisin heijastuvan säteilyn etureuna saapuu antennille myöhemmin, kuin lähemmästä pisteestä takaisin heijastuvan säteilyn takareuna. Tällöin tutka pystyy erottelemaan pisteet jotka ovat puolta pulssin pituutta etäämmällä toisistaan. [11]

Tutkan lähettämän pulssin kohteesta vastaanottamiseen kuluva aika saadaan kaavasta:

$$T = \frac{2r_0}{c}$$

T on pulssin matkaan kuluva aika, r_0 on tutkan etäisyys kohteesta ja c on pulssin nopeus (käytetään yleisesti valonnopeutta). Kaukokartoituksessa kuvataan aluetta, joten pulssit palaavat eri aikaan eri etäisyyksiltä olevista pisteistä. Pulssin pituus vaikuttaa säteilyn palaamiseen kuvattavan alueen eri pisteistä. Pulssin pituus saadaan kertomalla nopeus kestolla. Vastaanotettavat pulssit voivat mennä keskenään päällekkäin, ellei lähetetyn pulssin pituutta säädellä. [10]

Tarvittava erottelu ajansuhteen saadaan kaavalla:

$$Ero \geq \frac{c\tau}{2}$$

Kaavassa τ kuvaa pulssin kestoa. Palaavasta pulssista voidaan tulkita pituussuunnassa olevia kohteen eroja. Täten hyväksytään kaava kuvaamaan etäisyysresoluutiota, jolloin saadaan myös resoluutiosulun pitkittäissuuntainen resoluutio [10].

$$r_{0R} \approx \frac{c\tau}{2}$$

$$\text{Pituussuunnan resoluutio} \approx \frac{c\tau}{2\sin(\eta)}$$

Sinilause tulee off-nadir -kulmasta, joka muodostuu tutkan ja kuvattavan kohteen välille. Jos kuvauskulmaa ei huomioitaisi; laskettaisiin etäisyysresoluutiota suoraan antennin ja pisteen välille. Kuvassa 1 etäisyysresoluutio tutkan ja pisteen välillä on merkattu δR_e merkinnällä ja maan pisteiden välistä pituussuunnan resoluutiota δR_g merkinnällä.

Pituussuunnan resoluution laskemisesta voidaan myös havainnoida miksi SAR-tutka kuvaa sivusuunnassa. Jos kuvakulmaa siirretään suoraan koneen alapuolelle lähestyy kulma η lähestyy nollaa. Tällöin myös kaavan alaosa pienenee, jolloin resoluutio huononee. Suoraan tutkan alapuolella olevat pisteet ovat myös käytännössä saman etäisyyden päästä toisistaan, jolloin niitä on mahdotonta erotella toisistaan. [11]

Tutkassa käytetty kaistanleveys asettaa rajat pituussuunnan resoluutiolle. Etäisyysresoluution säilyttämisen vuoksi lähettimen kaistanleveyden tulee olla kääntein verrannollinen pulssin pituuteen nähden ($1/\tau$). Tällöin kaistanleveys asettaa rajan pituussuunnan resoluutiolle: [10]

$$P_r \approx \frac{c}{2\varphi}$$

Kaavassa φ kuvaa kaistanleveyttä. Esimerkiksi tutka jonka kaistanleveys on 600 MHz, pystyy teoriassa tuottamaan 25cm pituussunnan resoluutiota. Täten helpoin tapa saavuttaa parempaa resoluutiota pituussuunnassa on laajakaistaisten lähettimien ja vastaanottimien käyttö tutkissa. [10]

Atsimuuttisuunnan resoluution muodostumista tarkastelemalla voidaan havaita mitä teknisiä ongelmia SAR-tutkalla pyritään korjaamaan SLAR-tutkaan verrattuna. Reaaliantennia käyttäessä voidaan atsimuuttisuunnan resoluutio laskea seuraavalla tavalla [1]:

$$L_r \approx \frac{\lambda R_0}{D_a}$$

Kaavassa D_a kuvaa antennin halkaisijaa ja λ aallonpituutta ($\lambda = \frac{c}{\varphi}$ nopeutena käytetään valonnopeutta). Sovitaan tutkan ja kohteen väliseksi etäisyydeksi (R_0) 10km ja käytettävän antennin halkaisijaksi 2m. Tällöin 3,5GHz:lla aallonpituutta käyttäessä atsimuuttiresoluutio on noin 430 metriä. Kaavasta voidaan päätellä, että paremman erottelukyvyn saavuttaminen onnistuu pienentämällä aallonpituutta tai etäisyyttä, sekä suurentamalla antennia. Näihin kahteen ongelmaan SAR-tutkakuvaamisella pyritään vaikuttamaan.

Ensimmäinen ilmiselvä ongelma on antennin koon kasvattamisessa. Aikaisemman esimerkin tapauksessa, jos atsimuuttiresoluutiota haluttaisiin parantaa noin 8,5 metriin tulisi antennin halkaisijan olla melkein 100 metriä. Tällaisen antennin vieminen taivaalle tai avaruuteen aiheuttaa tietenkin paljon haasteita. Toinen vaihtoehto eli etäisyyden pienentäminen on ilmajärjestelmille helpompaa, mutta avaruusjärjestelmien kanssa joudutaan ottamaan huomioon kiertoratamekaniikka. Satelliittien kiertoradoista kerrotaan tarkemmin luvuissa 3.3 ja 3.4. Viimeisenä vaihtoehtona on aallonpituuden pienentäminen, mikä ei ole myös toivottavaa, koska lyhyemmät aallonpituudet vaimenevat sään ja ilmakehän vaikutuksesta. Liitteessä 1 on kuvattu eri aallonpituuksien vaimeneminen ilmakehässä. Ilmakehä asettaa rajat tiettyjen aallonpituuksien käyttämiselle tutkakuvaamisessa. [10][11]

2.2 Antennin pidentäminen doppler-ilmion avulla

Koska SAR-tutkat pitäisi saada liikkumaan lentokoneissa, satelliiteissa ja jopa lennokeissa, niin on antennin koko saatava sellaiseksi, että lavetit kykenevät kantamaan sen. Tällöin fyysisen reaali-antennin kokoon vaikuttaminen ei ole mielekäästä, mutta sen käyttökäyttöön voidaan tehdä muutoksia. Merkittävin ero pelkän reaali-antennin käyttöön tulee lähetettyjen pulssien määrän kasvusta. Doppler-ilmion periaatteiden avulla pulssit voidaan syntetisoida yhdeksi ka-peaksi keilaksi. [12]

Doppler-ilmiota kuvataan yleensä äänen korkeuden muutoksena ääntä päästävän kohteen liikkuessa suhteessa kuuntelijaan. Ilmiö pätee myös sähkömagneettista säteilyä tarkasteltaessa. Periaate dopplerin ilmiössä on vastaanotetun säteilyn havaitseminen eri taajuudella, mitä se on lähetettäessä ollut. Taajuus muuttuu kaavan: $f\Delta = f \frac{v+v_0}{v-v_s}$ mukaisesti [13]. Vastaanotettu taajuus ($f\Delta$) muuttuu, kun vastaanottaja ja lähettäjä liikkuvat suhteessa toisiinsa. Lähetystaajuus (f) kerrotaan lähettäjän (v_s) ja vastaanottajan (v_0) nopeuden muutoksen suhteessa valonnopeuteen (v).

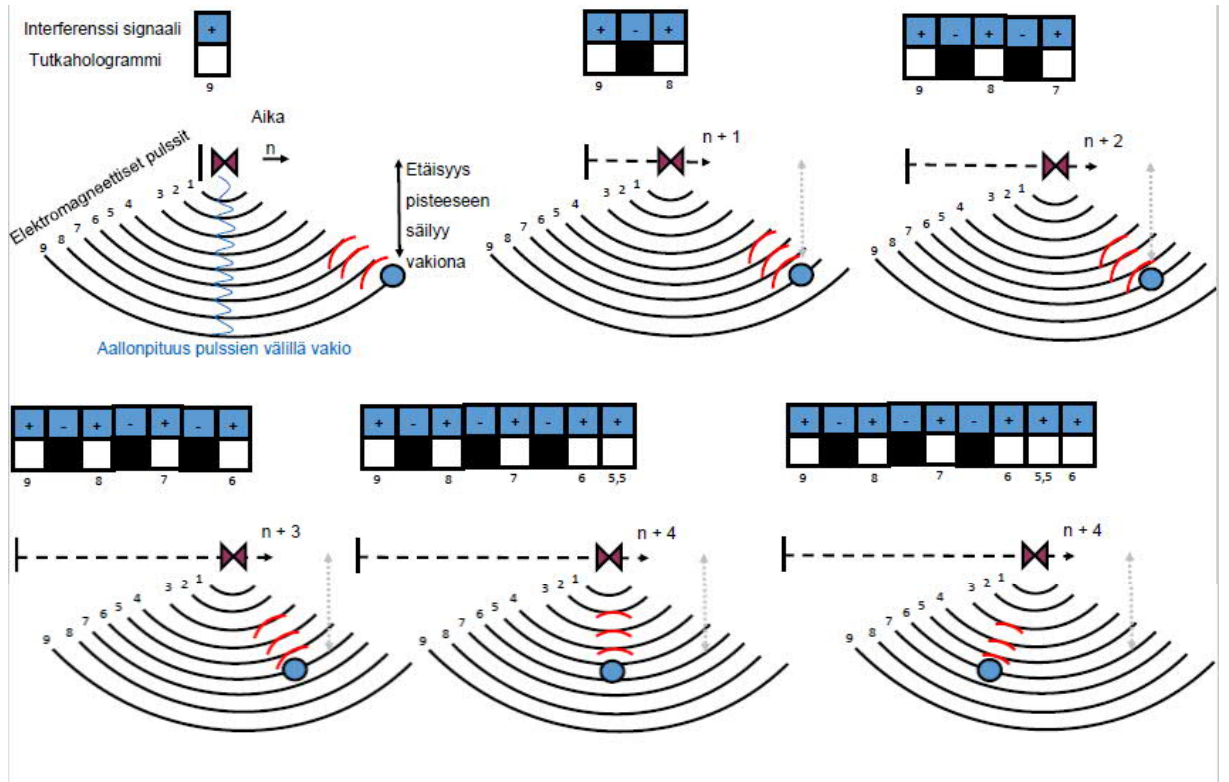
Kaksi atsimuuttitasossa kuvattavaa pistettä ovat eri etäisyyksillä toisistaan. Tällöin ne ovat myös eri kulmassa tutkan liikesuunnasta. Koska ne ovat eri etäisyyksillä ja eri kulmilla suhteessa SAR-tutkan anteeniin, niiden nopeudet ovat suhteessa siihen erilaiset. Erilaisten nopeuksien takia näiden kahden pisteen Doppler-taajuuden muutokset ovat erilaiset. Tällöin nämä kaksi pistettä voidaan erotella toisistaan. [11]

SAR-tutka muodostaa kuvan alueen eri pisteistä palautuvien sähkömagneettisten pulssien perusteella. Pisteistä palautuvat pulssit on kyettävä erottamaan toisistaan, jolloin tutka suunnattava sivusuunnassa kuvattavaan alueeseen. Kohtisuoraan alaspäin kuvatessa säteilyn monikäsitteisyys kasvaisi alustan sivuilla ja kuvan pulssien erottaminen toisistaan vaikeutuisi [14]. SAR-tutkakuvaamisen monikäsitteisyyttä käsitellään lisää alaluvussa 2.5. Alueen pisteitä kuvataan liikkeestä ja niistä palautuvaa säteilyä vastaanotetaan eri ajanhetkellä, jolloin antenni ”kasvaa” liikkeen ja useiden säteilypulssien avulla. SAR-tutkan optisen korrelaation metodilla voidaan kuvata, miten Doppler-ilmio havaitsee pisteet maasta. [12]

Optisen korrelaation metodissa tutkan palautuvat pulssit järjestään ”filmikelalle” tutkahologrammiksi. Ensimmäisenä oletuksena on, että SAR-tutkan liikkueessa lentävällä lavetilla, kohde alue pysyy paikallaan. Täten oletetaan, että tarkasteltava piste säilyttää saman etäisyyden tutkan lentorataan nähden. SAR-tutkan ohittaessa kuvattavaa aluetta se lähettää säännöllisin aikaväleihin useita pulsseja alueelle ja siellä olevat kohteet/pisteet heijastavat osan säteilystä takaisin (ks. Kuva 2). Pulssit koostuvat koherenteista mikroaalloista, joten niiden vaihe-ero, taajuus, amplitudi ja aaltomuoto säilyvät vakioituna [15]. Koherentit mikroaallot voivat interferoida keskenään jolloin yhdistynyt aalto on amplitudiltaan vahvempi (engl. constructive), heikompi (engl. destructive) tai säilyy samana [16].

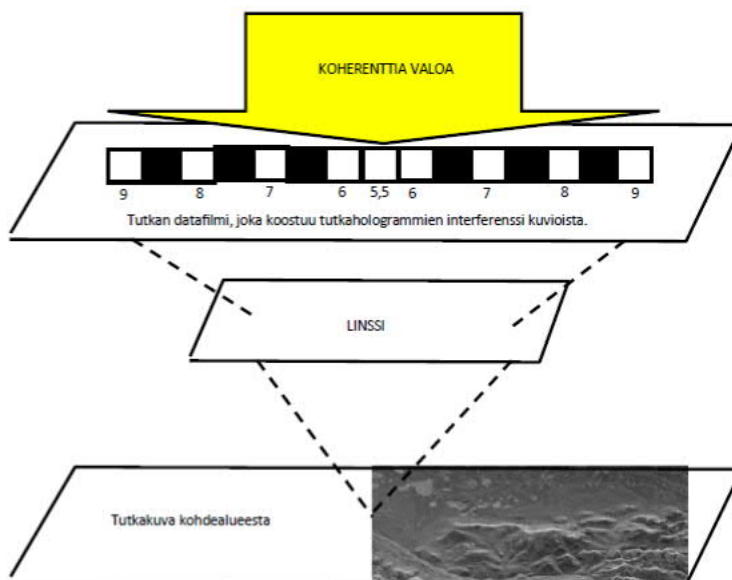
Pisteen tullessa antennin säteilyn kantamalle se heijastaa osan siitä takaisin antennia kohti. Piste on tutkaan katsottuna kokonaisluvullisen aallonpituusmäärän etäisyydellä tai niiden välissä. Kuvassa 2 piste on tutkan kantamalle tullessa ensin 9:än aallonpituuden päässä siitä. Tutkan liikkueessa piste siirtyy 8:an, 7:än, 6:en ja lopulta 5,5:en aallonpituuden päähän. Pisteen ollessa lyhimmän matkan päässä tutkasta se on kohtisuoraan tutkaan nähden. Tällöin se sijaitsee alueella mitä kutsutaan nolla Doppler-muunnoksen alueeksi. Doppler-taajuus kasvaa pistettä lähestyessä ja pienenee sen ohituksen jälkeen. [12]

Takaisin heijastunutta säteilyä verrataan pulssijonoon referointi aallonpituuksia. Tällöin heijastunut säteily ja referointi aallonpituuden interferoivat keskenään, joka voidaan tulkita tutkahologrammille. Vastaanotetun säteilyn ja referointi aallonpituuksien vastatessa toisiaan, amplitudi kasvaa ja piste näkyy kirkkaana kohtana tutkahologrammilla. Jos pisteestä heijastuneen säteilyn faasi ei vastaa referenssi taajuutta, amplitudi laskee ja piste näkyy tummana kohtana tutkahologrammilla. Seurattavasta kohteesta jää kuvan 2 mukaisesti tutkahologrammille kirkkaita ja tummia kohtia. Tutkahologrammeista koostuva datafilmi liikkuu suhteessa tutkan lavettiin samalla nopeudella. [12]



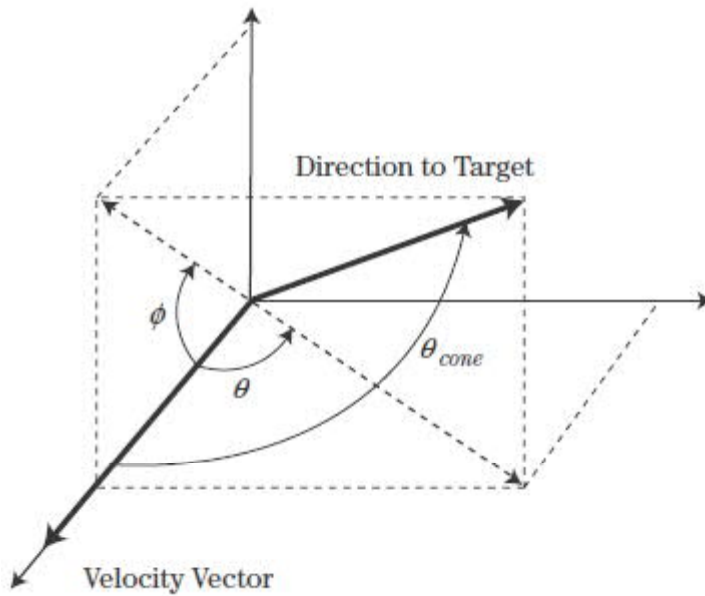
Kuva 2: SAR-tutkan palautuvan säteilyn tallentaminen liikkeessä [12].

Datafilmi valaistetaan koherentilla valolla. Koherentti valo voi olla esimerkiksi laservaloa [17]. Datahologrammin vaalentuneet kohdat toimivat itsenäisinä valon lähteinä linssille. Kuvan 3 esimerkissä koherentilla valolla valaistetaan datafilmi, joka koostuu useasta rinnakkaisesta interferenssikuvioista. Valo kulkee datafilmiltä linssille, josta se fokuoitetu tutkakuvan filmille. Kuvan 3 datahologrammin mikroaaltopulssit 9, 8, 7, 6 ja 5,5 risteävät pisteessä, jossa valojen aallonpituuden interferoivat amplitudia kasvattavasti. Niissä kohdissa valo fokuoitetu kohdetta muistuttavaksi kuvaksi. [12]



Kuva 3: Tutkakuvan muodostaminen datafilmiltä kuvafilmille [12][18].

SAR-tutka liikkuu kohteeseensa nähden yläviistossa kulmassa, jolloin etäisyys tutkan ja pisteen välillä muuttuu kahdella vektorilla. Tällöin taajuuden muutoksessa huomioidaan nopeusvektori ja tutkan sekä pisteen välinen (LOS, Line of Sight) vektori. Näiden kahden vektorin välinen kulma vaikuttaa taajuuden muutokseen. Kuvassa 4 on havainnollistettu vektoreiden väliset kulmat. Nopeus- ja LOS-vektorin välinen kulma voidaan jakaa vielä osiin nopeusvektorin mukaisesti, kuten kuvassa on esitetty. [19]



Kuva 4: SAR-tutkalla tarvittava geometria Doppler-taajuuden laskemiseksi [19].

Taajuuden muutos voidaan laskea kaavalla:

$$f_d = \frac{2v}{\lambda} \cos\theta_{cone}, \cos\theta_{cone} = \cos\theta \cos\phi$$

SAR-tutka kuvaa ilma-aluksesta sivusuunnassa maahan. Täten atsimuuttitaso tekee 90-asteen käännöksen ja muuttaa kyseisen kulman lausekkeen kosinista sinilauseeksi [19]:

$$\cos\theta_{cone} = \sin\theta \cos\phi, f_d = \frac{2v}{\lambda} \sin\theta \cos\phi$$

Jos korotuskulma on matala, niin edellistä kaavaa voidaan yksinkertaistaa:

$$f_d = \frac{2v}{\lambda} \sin\theta$$

Muuttuneen taajuuden avulla voidaan määrittää mistä palautunut signaali on tullut. Alaluvussa 2.1 saatiin kaavalla $T = \frac{2r_0}{c}$ pulssin matkaan käyttämä aika suhteessa etäisyyteen kohteesta. Samalla etäisyydellä ja keilan sisällä oleva toinen piste voidaan erotella, koska siitä palautuva säteily on eri taajuudella. Doppler-taajuuden muutoksen avulla atsimuuttitason koordinaatti saadaan kaavalla [11]:

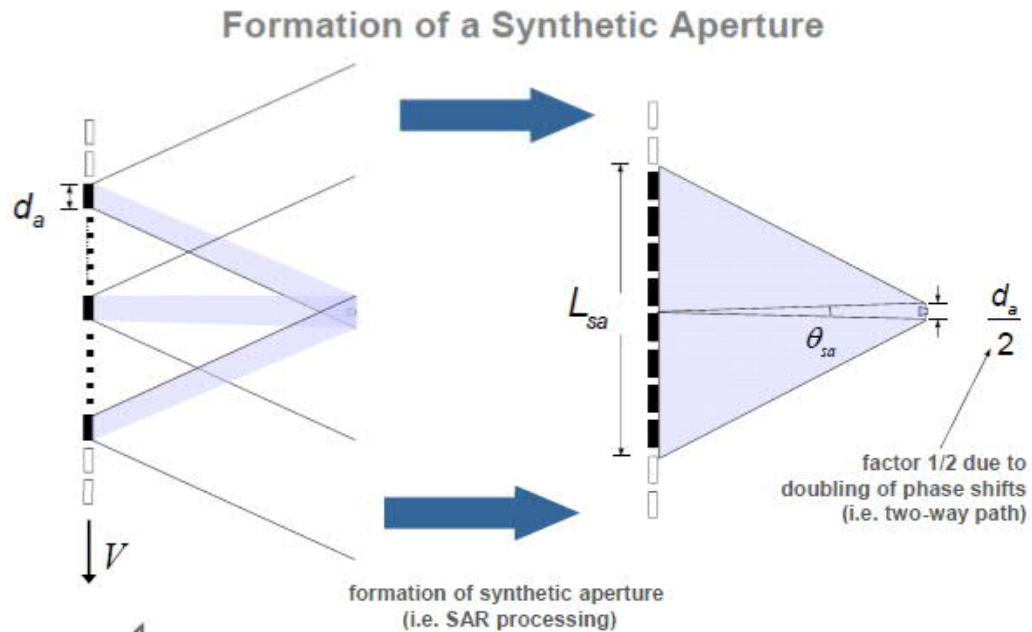
$$x_1 = \frac{f_{d1} \lambda r_0}{2v}$$

2.3 Synteettisen apertuurin muodostaminen

Kahdessa aikaisemmassa alaluvussa käsiteltiin SAR-tutkan tapaa erotella kuvattavasta alueesta pisteitä. Näitä ”säteilynäytteitä” otetaan useita kappaleita ohilennon aikana. Tutkalle palautunutta sähkömagneettista säteilyä käsittelemällä voidaan välttää perinteisen reaali-antennin resoluutio-ongelmat.

SAR-tutkasatelliittiin käyttäminen sotilastarkoituksessa asettaa sille suorituskykyvaatimuksia. Tutkan etäisyyteen ja aallonpituuteen ei välttämättä haluta vaikuttaa, koska toimintaympäristö ja suorituskykyvaatimukset määrittelevät niille rajat. Ratkaisuna antennin kokoa kasvatetaan keinotekoisesti. Yhdistämällä tutkakuva ja signaaliprosessointia saadaan muodostettua korkean resoluution kuvia [20].

Antennin koon keinotekoinen kasvattaminen perustuu vastaanotettujen pulssien tallentamiseen, järjestämiseen, yhdistämiseen ja prosessointiin. Liitteessä 2 on yksinkertaisesti kuvattu reaali-antenni ja SAR-antenniryhmien tapa vastaanottaa säteilyä ja yhdistää sitä. Erona näillä kahdella on, että SLAR antenniryhmän elementit ovat suoraan kytketty summaavaan moduuliin, kun SAR antenniryhmässä jännitteet tallennetaan muistipaikoille ja niihin lisätään vaihemuutos ennen summaamista. Liitteessä 2 esitetyssä SLAR -prosessoinnissa jokaisen antenniryhmän elementin vaiheviiveen tulee olla summauspisteellä (sigma) sama. Tämä tarkoittaa, että jokaisen elementin vastaava etäisyys kohteesta tulee olla sama. Välytyslinjojen viivettä muuttamalla saadaan haluttu lopputulos. SAR-prosessoinnissa vastaanotettuun jännitteeseen ja vaiheeseen tehdään vaihenmuutos riippuen elementtien etäisyydestä toisiinsa nähden. [20]



Kuva 5: Synteettisen apertuurin muodostaminen [11].

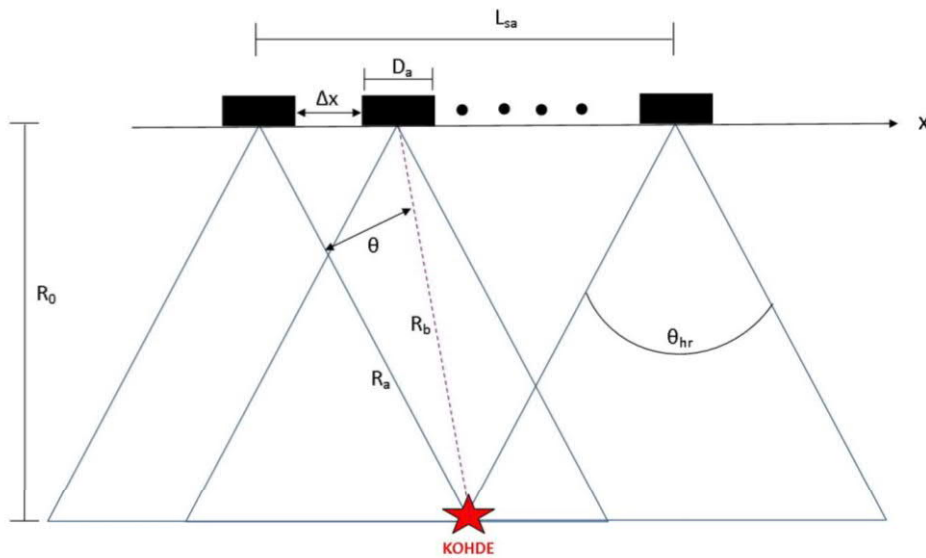
Kuvassa 5 on havainnollistettu, miten saman reaali antennin (d_a) muodostamat elementtien signaalit yhdistetään yhdeksi synteettiseksi antenniksi (L_{sa}). Kohteen ohi lentävä tutka lähettää useita pulsseja lyhyessä ajassa jolloin reaali antenni ”monistuu” ja synteettinen antennin leveys kasvaa. Otetaan esimerkiksi 300 m/s lentävä tutka, jonka pulssintoistotaajuus on 1000Hz, taajuus 10 GHz, pulssinpituus 100 ns ja tiedustelu etäisyys 15km kohteesta. Tällöin 50 lähetetyn pulssin kaiut summataan yhdeksi 15m pitkäksi synteettiseksi antenniryhmäksi jonka leveys on 15m. [1]

Signaalin prosessoinnilla voidaan vaikuttaa resoluutioon ja sen muodostamiseen tarvittavaan suorituskykyyn. Vastaanotettujen kaikkien käsittely voidaan erottaa fokuoituun ja epäfokuoituun tapaan. Epäfokusoidussa tavassa signaalin käsittelyssä vaihekorjaukset jätetään huomiotta. Fokusoidussa tavassa vastaanotettuun säteilyyn lisätään vaihekorjaus ennen faasiin lisäämistä. Epäfokusoidun signaalin prosessoinnin etuna on sen yksinkertaisuus, mutta tällöin kuvan laatu ja resoluutio heikkenevät. Fokusoidussa tapauksessa resoluutiosta saadaan parempaa ja lisäksi se on riippumaton etäisyydestä ja aallonpituudesta. [20]

2.4 Epäfokusoidun ja fokusoidun SAR-tutkan resoluutio

Aikaisemmissa alaluvuissa käsiteltiin SLAR ja reaali antennin resoluution muodostamista. Lisäksi niissä käsiteltiin, miten SAR-tutkan synteettinen aperttuuri muodostetaan keräämällä mitaustietoa lennon aikana. Kuten aikaisemmissa alaluvuissa todettiin, reaali antennilla tarkan resoluution saavuttamiseksi jouduttaisiin antennin pituutta kasvattamaan järjettömän kokoiseksi. Tämän alaluvun tarkoituksena on tarkastella, miten antennin pinta-alaan voidaan vaikuttaa resoluutiosta tinkimättä.

Aiemmassa alaluvussa todettiin tutkakuvan resoluutiosolun muodostuvan etäisyys ja atsimuuttiresoluutiosta. Pituussuunnan resoluutioon vaikuttaa enimmäkseen tutkan käyttämä kaistanleveys. Sama pätee edelleen SAR-tutkakuvaamisessa ja varsinaiset järjestelmien väliset suorituskykyerot muodostuvat pitkälti atsimuuttiresoluution tasosta. Riippuen käytetystä signaalin prosessoinnista atsimuuttiresoluutioon vaikuttavat antenniryhmän liike, antennin koko, antennin keilanleveys, etäisyys kuvattavasta kohteesta ja kuvaamistapa [20]. Tarkastelemalla näitä ominaisuuksia voidaan havaita, miten atsimuuttiresoluutio muodostuu synteettisessä apertuurissa.



Kuva 6: Keinotekoisen antenniryhmän konsepti [20].

Kuvassa 6 on havainnollistettu, miten SAR-tutka vastaanottaa sähkömagneettista säteilyä liikkeessä. θ_{hr} on antennin keilanleveys reaali antennissa, R on etäisyys kohteesta ja Δx kahden keinotekoisen antennielementin etäisyyden toisistaan. Liikkuessa kohteen ohi antennikeila vastaanottaa säteilyä ensin sen antennikeilan etu- ja lopuksi takalaidasta. SLAR-tutkan tapauksessa atsimuuttiresoluution määrittää täysin synteettisen aperttuurin kokonaispituus [20]:

$$L_{sa} = \theta_{hr} R_0$$

SAR-tutkan tapauksessa antennin tehokas keilanleveys saadaan kaavalla:

$$\theta_{hs} = \frac{a_{hs}\lambda}{2L_{sa}} \geq \frac{a_{hs}\lambda}{2(\theta_{hr}R_0)}$$

Kaavassa λ kuvaa aallonpituutta ja a_{hs} on kaventumismuuttujakerroin. Kaventumismuuttujalla voidaan säädellä antennilta lähtevää säteilyä. Tällöin säteilykeilan muotoa ja sen intensiteettiä eri keilan alueilla voidaan muuttaa. Kerrointa muuttamalla voidaan vaikuttaa antennikeilan sivukeilojen kokoon, lisätä keilan leveyttä ja vahvistuksen määrään [21]. Tavoitteena kerrointa muuttamalla voi olla esimerkiksi sivukeilojen poistaminen tai pienentäminen. Kerroin on 0,88, kun kaventumismuuttujaa ei ole tai synteettisen apertuurin tapauksessa sen koko mitalla on yhtäläinen painotus. Esimerkeissä yksinkertaisuuden vuoksi kerroin on 1, mutta oikeasti se on reaali- ja synteettisissä apertuureissa lähempänä 1,5 [20].

SAR-tutkalla kuvatessa säteily on kaksisuuntaista. Tämä tarkoittaa, että siihen tulee vaihemuutos antennilta kohteeseen mentäessä ja sieltä takaisin palatessa. Neliöllistä synteettisen apertuurin vaihemuutosta voidaan kuvata lineaarisesti doppler-muutoksen kaavalla [22]:

$$f_d = \frac{1}{2\pi} * \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{2v^2t}{\lambda R_0}$$

Kaavassa $\Delta\Phi$ on vaihemuutos, Δt ajanmuutos ja v kertoo tutkan nopeuden atsimuuttisuunnassa. Kuten reaali-antennin kanssa myös synteettisen apertuurin elementtien sijainti tulee tietää aallonpituuden murto-osassa. Lähetetyn ja vastaanotetun säteilyn etäisyys tiedetään sen matkaan kuluneen ajan vuoksi ja se painotetaan amplitudin ja vaihemuutoksen avulla jolloin eri vastaanotetut pulssit summaamalla saadaan tarkka tutkakuva. Käyttämällä yllä olevaa kaavaa avuksi voidaan arvioida fokusoidun synteettisen apertuurin atsimuuttiresoluutiota: [22]

$$r_{ap} = \frac{v}{B} = \frac{2\lambda R_0 v}{4v^2 t} = \frac{\lambda R_0}{2L_{sa}} = \frac{D_a}{2}$$

Yllä olevalla kaavalla saadaan likimääräisiä tuloksia ja tärkeimmät huomiot siitä saadaan synteettisen apertuurin ominaisuuksista. Esimerkissä ei myöskään ole huomioitu kaventumismuuttujakerrointa, jolla voisi olla vaikutusta teoreettiseen resoluutioon. Ensimmäinen huomio on, että paras teoreettinen resoluutio synteettisellä apertuurilla on puolet reaali antennin pituudesta. Toinen tärkeä huomio on, että etäisyys ja aallonpituus eivät vaikuta resoluutioon. Etäisyydestä ja aallonpituudesta riippumattomuudet johtuvat lähtökohtaisesti samasta syystä. Suurempi etäisyys kasvattaa suhteessa myös synteettisen apertuurin mitta ja pidemmällä aallonpituudella resoluutio säilyy samana, koska vastaava synteettisen apertuurin antennikaistan leveys pysyy vastaavana. [20]

SAR-tutkakuvauksesta saadaan epäfokusoitua lyhentämällä synteettistä apertuuria (L_{sa}) niin lyhyeksi, että elementtien välille syntyvää vaihe-eroa ei tarvitse korjata [20]. Oikealla mittausetäisyyden ja antenniryhmän pituuden suhteella saadaan liitteen 2 mukaisesti eri elementtien välityslinjojen pituudet samaksi. Tällöin kaikujen välinen vaihe on sama ja pulssit voidaan summata keskenään mittaustulokseksi [1]. Epäfokusoidun synteettisen apertuurin suurin mitta ja samalla paras mahdollinen atsimuuttiresoluutio saadaan kaavalla [20]:

$$L_{um} = \sqrt{\frac{R_0 \lambda}{2}} = \frac{R_0 \lambda}{2L_{um}} = R_{apu}$$

L_{um} on epäfokusoidun synteettisen apertuurin maksimipituus ja R_{apu} on likimääräinen atsimuuttiresoluutio. Tästä voidaan tehdä kaksi tärkeää huomiota. Ensimmäiseksi epäfokusoidun synteettisen apertuurin paras atsimuuttiresoluutio on sama kuin sen pituus. Toinen huomio on, että etäisyys kohteesta ja aallonpituus vaikuttavat saatavaan resoluutioon.

Nykyään SAR-tutkasatelliitit pääsääntöisesti luovat fokusoitua tutkakuvaa. Tällöin SAR-tutkasatelliitin täysipotentiali saadaan ulosmitattua. Epäfokusoitua SAR-tutkakuvaamista käytetään vain silloin, jos tuloksissa ollaan valmiita luopumaan paremmasta resoluutiosta. Tämä voi johtua esimerkiksi tarpeesta vapauttaa laskentatehoa signaalin prosessoinnista. Epäfokusoitu SAR-prosessointi ei sovellu korkean resoluution kuvien muodostamista varten. [23]

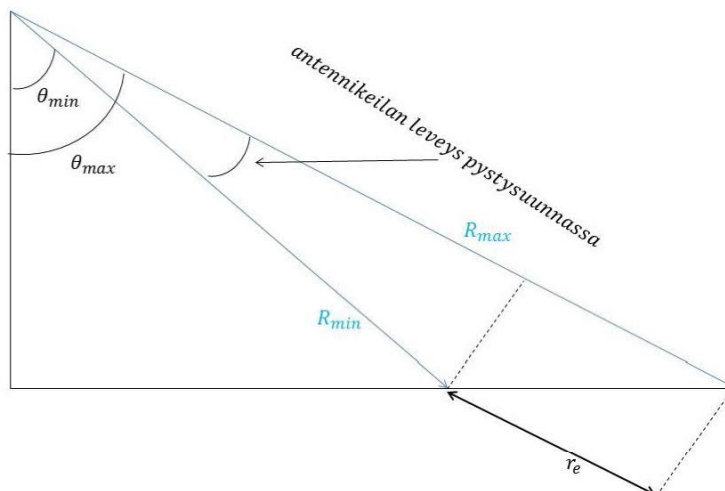
		$\lambda = 0,03\text{m}$									
		Da = 2m					Da = 10m				
Etäisyys	metriä	5000	10000	50000	100000	500000	5000	10000	50000	100000	500000
Reaaliantenni	$L_r \approx \frac{\lambda R_0}{D_a}$	75	150	750	1500	7500	15	30	150	300	1500
Epäfokusoitu SAR	$R_{apu} = \sqrt{\frac{R_0 \lambda}{2}}$	8,66	12,25	27,39	38,73	86,603	8,66	12,25	27,386	38,73	86,603
Fokusoitu SAR	$r_{ap} = \frac{D_a}{2}$	1	1	1	1	1	5	5	5	5	5

Taulukko 3. Kolmen eri kuvaustavan resoluutioerot. [8]

Taulukossa 3 on havainnollistettu, miten prosessointitapa vaikuttaa atsimuuttiresoluutioon. Siitä voidaan nähdä miten reaaliantennin tapauksessa kaikilla kolmella (aallonpituus, etäisyys, antennin koko) ominaisuudella on merkitystä atsimuuttiresoluutiossa. Epäfokusoidulla SAR:lla antennin halkaisijan merkitys häviää ja fokusoidulla SAR:lla ei ole merkitystä aallonpituudella tai etäisyydellä. Taulukosta voidaan myös havaita, että fokusoidulla SAR:lla antennia lyhentämällä saadaan parempaa atsimuuttiresoluutiota.

2.5 Signaalin monikäsitteisyyden vaikutus mittausalueen leveyteen

Avaruuteen sijoitettujen SAR-tutkasatelliitin etäisyys maapallosta on suuri, jolloin pulssintoistonepeudessa joudutaan huomioimaan siitä johtuvat haittavaikutukset. Riippuen etäisyydestä, pulssintoistotaajuudesta, kuvauskulmasta ja tutkan ominaisuuksista säteilykuvion sivukeiloista syntyvä kaiku voi häiritä pääkeilan tulosta[24]. Täten tutkalle suunnitellaan haluttu mittausalue ja resoluutio, jotka tukevat tutkasatelliitin muita ominaisuuksia. Kuvassa 7 on havainnollistettu sivusuunnasta SAR-tutkan säteilyn ääripäiden etäisyyden ero r_e .



Kuva 7: Sivustakuvaavan tutkan monikäsitteisyyden geometria [20].

Pulssintoistotaajuuden pääsääntöisesti määrittää kuvattavan alueen kohteiden etäisyys. Jos pulssintoistotaajuus on asetettu liian korkeaksi voi palaavan säteily mennä päällekkäin aikaisempien pulssien kanssa ja sen tulkinta vaikeutuu. Toistotaajuutta määrittää vaatimus siitä, että kaksi pulssia eivät voi samanaikaisesti myötävaikuttaa vastaanotetussa signaalissa [20]. Pulssintoistotaajuuden yli palaavia kaikuja kutsutaan moninkertaisesti kiertäneiksi kaiuiksi (multiple-time-around echoes). Pulssintoistotaajuuden ollessa liian suuri syntyy monikäsitteisyyttä etäisyyden mittauksessa ja moninkertaisesti kiertäneiden kaikujen määrä kasvaa. Liian pieni pulssintoistotaajuus synnyttää monikäsitteisyyttä atsimuutti suunnan mittauksissa, koska näytteenottoväli antennielementtien välillä kasvaa liian suureksi. [25]

Säteilykeilojen risteämisen välttämiseksi on kaksi sääntöä. Ensimmäiseksi antennielementtien keskinäisen välin tulisi olla pienempi kuin käytetyn aallonpituuden λ . Toiseksi SAR-tutkan nopeuden tulisi olla pulssintoistojen välillä pienempi kuin aallonpituuden puolikas. Ensimmäisen säteilykuvion risteämisen sivumaksimi ja positio saadaan kaavalla: [9][25]

$$\theta_g = \arcsin \frac{\lambda}{2d_e} \approx \frac{\lambda}{2d_e} = \frac{\lambda f_p}{2v}$$

Yllä olevassa kaavassa v kuvaa tutkan nopeutta, f_p pulssintoistotaajuutta ja $d_e = v/f_p$ kuvaa syn-teettisen apertuurin antennielementtien etäisyyttä toisistaan. Säteilykeilojen risteämisen välttämiseksi tulee $\theta_g \geq \theta_0$. Likimääräinen arvo nollakohdan kulman θ_0 positiolle saadaan λ/D_a . Tästä johdetaan pulssintoistotaajuudelle ehto: [25]

$$f_p \geq \frac{2v}{D_a} = \frac{v}{\delta_{cr}}$$

Yllä olevasta kaavasta voidaan huomata, että jos molemmat puolet jaetaan nopeudella (v) saadaan tulokseksi:

$$\frac{2}{D_a} = \frac{1}{\delta_{cr}}$$

Jolloin ehto pätee fokusoitua SAR käyttäessä ($r_{ap}=D_a/2$).

Pulssintoistotaajuuden käänneisluku vastaa alaluvussa 2.1 esitettyä pulssin kulkuaikaa antennista kohteeseen ja takaisin [20]. Kuten aiemmin todettiin liian suuri pulssintoistotaajuus lisää etäisyyden monikäsitteisyyttä jolloin yhdistämällä aiemmat kaavat saadaan: [9]

$$\frac{v}{\delta_{cr}} \leq f_p \leq \frac{c}{2r_e}$$

Suurin etäisyys jolta saadaan yksikäsitteisesti mitattavia tuloksia, saadaan kuvan 7 R_{\max} ja R_{\min} erotuksesta, jonka tulos on r_e . Itse tutkan etäisyys voi olla suurempi, sillä siihen vaikuttavat kuvauskorkeus, antennin keilanleveys pystysuunnassa ja mittauskulma [9]. Ehdot yhdistämällä saadaan kaava, jolla on helpompi tarkastella mittausetäisyyden ja erottelukyvyn riippuvaisuutta toisistaan:

$$\frac{r_e}{\delta_{cr}} \leq \frac{c}{2v}$$

Kaavan oikeaa puolta saadaan pienemmäksi käyttämällä optimoituja antennikuvioita. Tällöin antennien säteilykuviot vastaavat niiden oikeaa muotoa eikä noudata ideaalisäteilykuvioita. Säteilykuvion epävarmuustekijöiden takia kaavan oikea puoli jaetaan vielä kahdella: [9][25]

$$\frac{r_e}{\delta_{cr}} \leq \frac{c}{4v}$$

Signaalin monikäsitteisyyden vaikutusta antennin kokoon voidaan tarkastella käyttämällä kaavaa [20]:

$$\text{antennin koko neliöissä} = d_a h \geq \frac{4a_d v R_0 \tan \theta_{ka}}{\varphi} (a_{vr} a_{hr} k_e k_p)$$

Kaavassa esiintyvät selitteet ovat h (antennin korkeus), a_d (doppler-prosessointivakio), θ_{ka} keskimääräinen mittauskulma, a_{vr} (reaaliantennin pystysuunnan kaventumismuuttujakerroin), a_{hr} (reaaliantennin poikittaissuunnan kaventumismuuttujakerroin), k_r (etäisyys suunnan varmuustekijä), k_p (poikittaissuunnan varmuustekijä).

Doppler-prosessointivakio riippuu mitä prosessointia käytetään. Nollakompensaatio prosessoinnilla kantaallon taajuus muokataan nollataajuudeksi, jolloin yksi näyte tulee saada jokaiselta puolen antennin pituuden kuljetulta matkalta. Atsimuuttikompensaatiolla tarvitaan yksi näyte joka neljäs antennipituuden kuljetulta matkalta. Tällöin $a_d = 1$ nollakompensaatiolla ja 2 atsimuuttikompensaatiolla. [20]

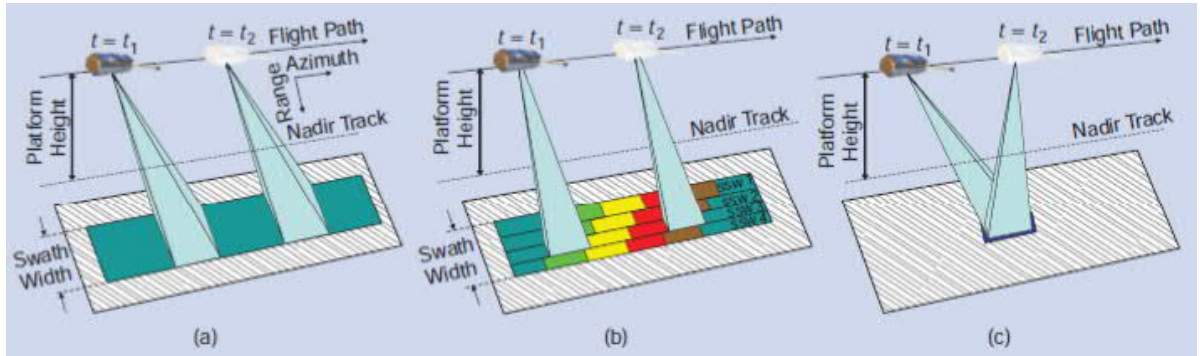
Varmuustekijöitä joudutaan käyttämään, koska reaali-antennin säteilyssä epätasaisista säteilykuvioista, voi kaikuja palata kaistanleveyden ulkopuolelta. Tällöin esimerkiksi liian pienelle kummalle osuneet kaiut, havaitaan suhteessa liian isolla teholla. Säteilykuvion epätasaisuutta rajoitetaan varmuustekijöillä. Varmuustekijän arvo on suurempi kuin 1 ja normaalisti 1,3 ja 1,6 välillä. [20]

Liitteessä 3 on laskuesimerkit, jossa on havainnollistettu miten monikäsitteisyys rajaa SAR-tutkan käyttöä etäisyyden ja antennin koon suhteen. Laskuesimerkin pinta-ala on minimi koko, jolla kyseisellä mittauskulmalla saadaan haluttua antennin poikkipituutta. Kuvauksulmaa pienentämällä voidaan merkittävästi vaikuttaa antennin kokoon. Lentokoneeseen tai lennokkiin sijoitettu SAR-tutkassa ei vastaavia ongelmia ole mitään tutkasatelliitissa, koska ilma-alusten nopeudet ovat merkittävästi pienempiä. Laskuista voidaan nähdä, miten mittausalue on laajojen alojen kartoittamista varten suhteellisen kapea. Tästä syystä SAR-tutkissa käytetään erilaisia kuvantamismodeja kasvattamaan mittausalaa ja resoluutiota.

2.6 SAR-tutkan kuvantamistavat ja integrointikulma

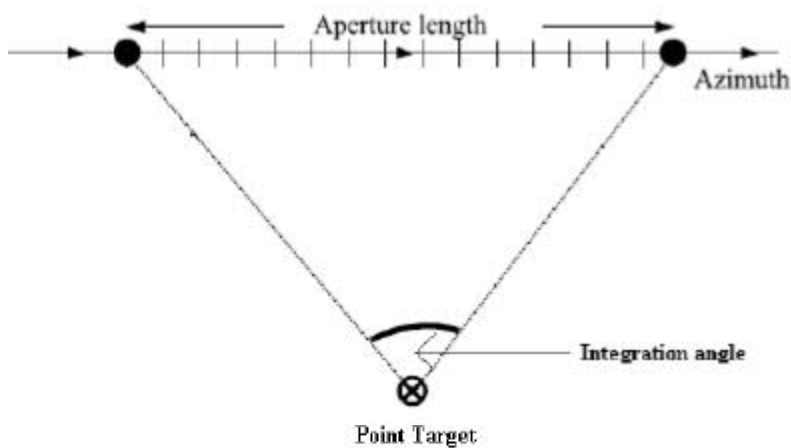
Aiemmissä alaluvuissa tarkasteltiin miten SAR-tutkan eri ominaisuudet vaikuttavat sen pituussunnan ja atsimuuttiresoluutioon. Synteettistä apertuuria kasvattamalla voidaan parantaa atsimuuttiresoluutiota. Erilaisilla kuvantamistavoilla voidaan vaikuttaa synteettisten apertuurin kokoon, joka vaikuttaa suoraan niin sanottuun integrointikulmaan, jonka avulla voidaan määrittää resoluution tarkkuus.

Kvantamistavan muuttaminen vaikuttaa normaalisti resoluutioon ja kuvattavaan alueen kokoon. Erilaisia kuvantamistapoja on esitetty kuvassa 8. Ensimmäinen kuvantamistapa (a) tunnetaan Stripmap-moodina. Tällöin tutkasatelliitti kuvaa yhtä kaistaletta jatkuvasti lentorataansa ja tutkan asetusten mukaisesti. Näin muodostuu SAR-datana yksi yhtenäinen kuvakaistale (engl. strip) joka mukailee satelliitin maan mukaista polkua. Seuraava kuvantamistapa (b) on ScanSAR-moodi. Tällöin kuvattun kaistaleen leveyttä kasvatetaan muuttamalla antennin kuvauksulmaa. Näin muodostetaan useampia limittäisiä kaistaleita halutusta alueesta. Tämä kuitenkin vaikuttaa atsimuuttiresoluutioon heikentävästi (ks. LIITE 4). Viimeistä kuvantamistapaa (c) kutsutaan Spotlight-moodiksi. Tällöin antennikeila suunnataan tietylle kohdistetulle alueelle, josta halutaan kuvamateriaalia. Tällöin ei saada jatkuvaa kuvamateriaalia, mutta atsimuuttiresoluutio parantuu synteettisen apertuurin kasvaessa. [6]



Kuva 8: SAR-tutkasatelliiteita käytetyt yleisimmät kuvantamistavat [6]

Integrointikulmalla atsimuuttiresoluution määrittäminen tulee mielekkääksi etenkin Spotlight-moodin ollessa käytössä. Laskentakaava voidaan johtaa pituussuunnan resoluution määrittämiseen käytetystä kaavasta. Integrointikulma muodostuu synteettisen apertuurin ja sirontapisteen välille (ks. Kuva 9)[26]. Sen avulla voidaan laskea apertuurin pituus, eli matka jolta SAR-tutka kerää sirontapistestä tietoa. [19]



Kuva 9: SAR-tutkan integraatiokulman muodostuminen [26]

Kantoaallon taajuuden ja integrointikulman tulosta saadaan likimäärällinen taajuuskaista. Johdattamalla pituussuunnan resoluution laskentakaavasta saadaan seuraavat tavat laskea atsimuuttiresoluutio: [19]

$$r_{ap} = \frac{c}{2B} = \frac{c}{2f\theta_{int}} = \frac{\lambda}{2\theta_{int}}$$

Spotlight-kuvantamistavalla SAR-tutkan sähkömagneettista säteilykeilaa ohjataan aluksen etupuolelle, jotta se osuu aikaisemmin kuvattavalle alueelle. Kohteen ohituksen jälkeen keilaa ohjataan kuvaamaan aluksen taakse, jotta mittaustuloksia saataisiin mahdollisimman pitkään kohdealueesta. Tällä tavalla Spotlight-moodissa voidaan kasvattaa integraatiokulmaa.

Integraatiokulman kasvattaminen siis pidentää synteettistä apertuuria. Tällöin virtuaalisen antennin koko suurenee ja atsimuuttiresoluutio paranee. SAR-tutkasatelliiteilla saadaan yleensä parasta resoluutiota erilaisilla Spotlight-moodeilla.

2.7 Tutkayhtälö

Tutkayhtälön merkitys SAR-tutkan toiminnassa korostuu, kun arvioidaan järjestelmän kykyä sen toimintaympäristössä. Tutkayhtälön avulla voidaan tarkastella säteilyn etenemistä ilmakehässä sekä arvioida esimerkiksi kuinka paljon säteily vaimenee sen palatessa tutkan antennille. Liitteen 1 kuvasta voidaan nähdä, miten HF ja mikroaaltotaajuus välillä ilmakehästä johtuva vaimennus on vähäistä, mutta korkeammilla taajuuksilla vaimeneminen kasvaa.

Kaksiulotteinen tutkakuva muodostetaan esittämällä alueen eri pisteistä vastaanotetut säteilyn tehot pikselimuodossa. Yleensä vastaanotettu säteilyn tehoarvo kvantisoidaan eli likiarvoistetaan biteiksi. Esimerkiksi RADARSAT kvantisoii vastaanotetun säteilyn 11:sta bitiksi. Yksinkertaistetusti tutkan vastaanottama teho voidaan kuvata seuraavalla tavalla: [12]

$$\begin{aligned} & \textit{Vastaanotettu teho} \\ & = \textit{Teho pinta - ala yksikköä kohden} * \textit{Kohteen tehokas sironta - alue} \\ & * \textit{Takaisin säteilyn sirontahävikki} * \textit{Antennin tehokas vastaanottoalue} \end{aligned}$$

Vastaanotettuun tehoon vaikuttaa täten alkuperäinen tehon määrä mikä saavuttaa kohteen, kohteesta johtuva säteilyn sironta ja kaikuja vastaanottavan antennin ominaisuudet. Säteilyn osuessa kohteeseen takaisinsirontaa tapahtuu eri suuntiin sen ympärille. Tällöin teho pinta-ala yksikköä kohden pienenee mitä etäämmällä kohteesta mennään. Tutkayhtälön avulla voidaan tarkastella tarkemmin, miten järjestelmän ja ympäristön muuttujat vaikuttavat tutkan toimintaan. [12]

SAR-tutkayhtälö voidaan esittää esimerkiksi seuraavassa muodossa [9]:

$$SNR_{kuva} = \frac{S(\textit{signaali})}{N(\textit{kohina})} = \frac{P_{ka} G^2 \lambda^3 \sigma^0 \delta_R}{2(4\pi)^3 R^3 k T_0 F v}$$

Kaava on avattu liitteessä 5. Atsimuuttisuunnan erottelukyky ei vaikuta tutkan signaali-kohinasuhteeseen [9]. Lentokoneeseen tai lennokkiin verrattuna satelliittiin asennettu SAR-tutka lentää nopeammin ja etäämmällä kohteesta. Tästä syystä satelliiteissa käytetään suurempia antenneja ja lähetystehoja [9]. Säteilyn monikäsitteisyyden takia satelliitteihin joudutaan myös asentamaan pinta-alaltaan suurempia antenneja. Satelliittien nopeuden ja maanpinnan laajemman kattavuuden takia niiden käyttötarkoitusta palvelee yleensä myös karkeampi resoluutio [20]. Täten etäisyyden kasvu kuvattavaan kohteeseen lisää vaatimuksia SAR-tutkasatelliitille.

Etäisyyden kasvu lisää kohinan vaikutusta, jolloin signaalin voimakkuutta voidaan lisätä kasvattamalla antennin vahvistusta tai lähetystehoa. Antennin pinta-alaa oikealla tavalla kasvattamalla voidaan lisätä sen vahvistusta, mutta samalla se heikentää esimerkiksi fokusoidun SAR-tutkan resoluutiota. Lähetystehojen kasvattaminen vaikuttavat satelliitin rakenteeseen ja elinkaareen.

2.8 Puustosta ja maastosta johtuvat signaalin sironta sekä vaimeneminen

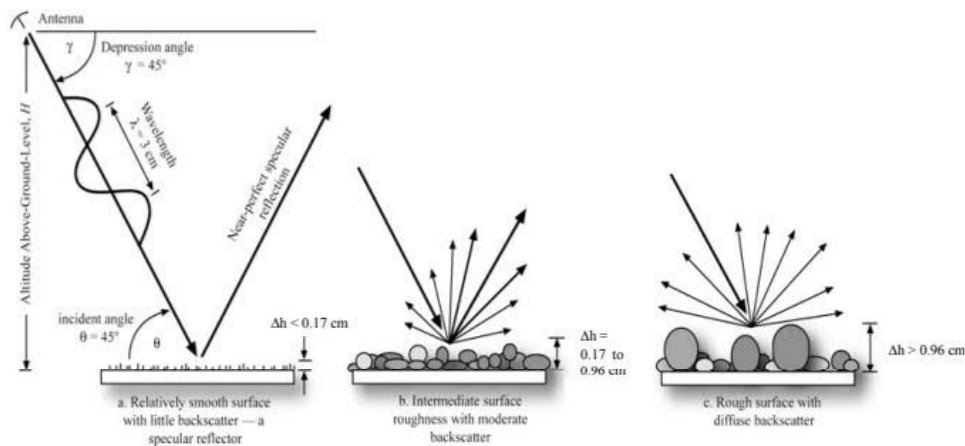
Tähän asti alaluvuissa on käsitelty SAR-tutkan ominaisuuksien vaikutusta resoluutioon. Kuvanlaatu ja tulkittavuus riippuvat hyvin paljon myös kohteen ja alueen ominaisuuksista, kuten sen ”karkeudesta” ja dielektrisyysvakiosta. Kuvaustulosta voidaan pyrkiä parantamaan muuttamalla tutkan aallonpituutta, off-nadir -kulmaa ja polarisaatiota. Näiden ominaisuuksien yhdistelmä vaikuttaa tutkalle palautuvan säteilyn sirontakertoimeen. Sirontakertoimen koosta riippuu, kuinka kirkkaasti eri pisteet näkyvät tutkakuvassa. [12]

Kuvattavan alueen karkeus vaikuttaa merkittävästi tutkalle palautuvan säteilyn määrään. Karkeudella tarkoitetaan alueen sisäisten muodostelmien kokoeroja: suuret erot vaikuttavat tutkan lähettämän säteilyn sirontaan. Karkeuden laatua kuvataan termeillä karkea, keskiverto ja sileä. Karkeuden mittakaavaa voidaan tarkastella mikro- (senttimetrit: lehdet, kivet, yms.), meso- (metrit: metsän latvusto, rakennukset, yms.) ja makroskaalalla (kokonaiset maa-alueet). [12]

Maaston suurempi karkeus aiheuttaa vahvemman sironnan säteilylle. Alueet, joissa sironta on suurta, näkyvät tutkalla kirkkaampina kuin ne alueet, joilta säteily heijastuu peilimäisesti pois. Kuvassa 10 on esitetty, miten karkeudeltaan eri asteiset pinnat heijastavat säteilyä. Rayleighin pinnan karkeuden kriteeriä voidaan käyttää arvioinnissa, miten resoluutiosolu näyttäytyy tutkakuvassa. Laskennassa käytetään tutkan aallonpituutta ja kuvauskulmaa. Tulokseksi saadaan arvio, mikä karkeusluokka saavutetaan eri sirontapisteiden korkeuksilla. Seuraavilla kaavoilla voidaan määrittää karkeusluokat: [12]

$$\text{Sileä: } h < \frac{\lambda}{25 \sin \gamma}, \quad \text{Karkea: } h > \frac{\lambda}{4,4 \sin \gamma}$$

Tutkakuvassa sileät pinnat näkyvät tummina, karkeat pinnat kirkkaina ja väliin jäävät alueet harmaan eri sävyinä. Liitteen 6 taulukossa on esitetty, miten erilaiset aallonpituudet ja kuvauskulmat vaikuttavat karkeusluokkaan. Liitteestä voidaan myös havaita, miten sama alue näyttää tutkakuvassa eri tavalla riippuen siitä, mitä aallonpituutta ja kuvauskulmaa käytetään. Kuvauskulman ja aallonpituuden kasvaessa matalammat kohteet havaitaan karkeampina. Ymmärrys SAR-tutkan konfiguraatiosta on edellytys kuvan tulkinneille.



Kuva 10: Erilaisten karkeuksien vaikutus säteilyn sirontaan [12]

SAR-tutka lähettää sähkömagneettisia pulsseja, joten heijastavien pintojen permittiivisyys ja sähkönjohtavuus vaikuttavat osittain säteilyn sirontaan. Yksi tapa mitata eri materiaalien kykyä eristää sähkömagneettisiakenttiä on dielektrisyysvakio. Kuivilla materiaaleilla arvo on matalampi kuin kosteilla. [27]

Materiaalin kosteus vaikuttaa siitä heijastuvaan säteilyn määrään. Sähkömagneettinen säteily läpäisee kuivan maan paremmin kuin kostean. Tällöin kostea maa heijastaa enemmän sähkömagneettista säteilyä [12]. Kosteuden "sijainnilla" on myös merkitystä. Maan pinnalla oleva kosteus näkyy tutkakuvassa kirkkaampana [12]. Myös käytetty aallonpituus vaikuttaa läpäisyn määrään. Kuitenkin kosteuden lisääntyessä maaperässä aallonpituuksien merkitys läpäisyssä vähenee. Puustossa latvuston kosteusprosentti vaikuttaa tutkalle palautuvan säteilyn määrään. Tiheät kosteat latvustot näkyvät yleensä selvästi SAR-tutkakuvissa. Jyrkemmät kuvauskulmat lisäävät tutkan herkkyyttä kasvillisuuden kosteudelle [12]. [28]

Kasvillisuuden ja eteenkin puuston vaikutus sähkömagneettisen säteilyn etenemiseen on merkittävää. Puuston vaikuttavia osia SAR-tutkakuvaamisessa ovat: [12]

- Latvuston kosteus
- Kasvillisuuden tyyppi
- Biomassan osatekijät (lehtilapa, lehtiruoti, lehtikanta, lehtisuonet)
- Latvuston rakenne (runko, oksien koko, miten lehdet ja oksat sijoittuvat kuvauskulmaan nähden)

Aiemmassa tutkimuksessa on keskitytty lähinnä kasvillisuuden ominaisuuksien selvittämiseen ja harvemmin siihen, mitä sen alapuolella sijaitsee. Tutkimuksessa on myös painotettu matalien taajuuksien käyttöä sekä tutkien asentamista lentokoneisiin tai lennokkeihin. Lehvästön ja oksien läpäisy on kuitenkin mahdollista riippuen käytetystä taajuudesta, polarisaatiosta ja kuvauskulmasta. Muun muassa lehvästön tiheys vaikuttaa siihen, miten sähkömagneettinen säteily vaihtelee eri polarisaatioilla [29]. [3]

Polarisaatiolla voidaan vaikuttaa puustosta palautuvan säteilyn kirkkauteen. Sähkömagneettisen säteilyn etenemistaso ilmoitetaan yleensä vertikaalina (V) tai horisontaalisena (H). Tutkakuviissa polarisaatio ilmoitetaan lyhenteillä, esimerkiksi HV = lähetys horisontaali, vastaanotto vertikaali. Tukan polarisaatio voidaan toteuttaa pääsääntöisesti neljällä tavalla. Yksittäispolarisoitunututka lähettää ja vastaanottaa sähkömagneettista säteilyä samalla polarisaatiolla. Ristipolarisoidussa tutkassa lähetys- ja vastaanottopolarisaatiot ovat vastakkaiset. Tuplapolarisoidussa tutkassa lähetys tapahtuu yhdellä polarisaatiolla, mutta vastaanotto molemmilla. Neliöpolarisoidussa tutkassa lähetyspolarisointia vaihdetaan pulssien välillä ja vastaanotto tapahtuu molemmilla polarisoinneilla. [30]

Polarisoinnin tyyppi näyttäytyy esimerkiksi siinä, miten erilaiset metsät havainnoidaan tutkakuvista. Yksittäispolarisoiduilla tutkakuvilla (HH ja VV) saadaan normaalisti kirkkaampia vastanteita latvustosta. Syynä tähän on latvuston pintasironna. Tällöin esimerkiksi lehtimetsät näkyvät helpommin tutkakuvassa. Havumetsissä sähkömagneettinen säteily heijastuu latvuston sisällä herkemmin, mikä johtuu tilavuussironnasta. Tällöin säteilyllä on suurempi todennäköisyys depolarisoitua. Tätä depolarisoitunutta energiaa voidaan mitata ristiinpolarisoidulla tutkalla. Multipolarisoiduissa tutkakuvissa voidaan kuvattavasta alueesta tehdä päätelmiä sironnan lisäksi palautuneen säteilyn polarisaation perusteella [30]. [12]

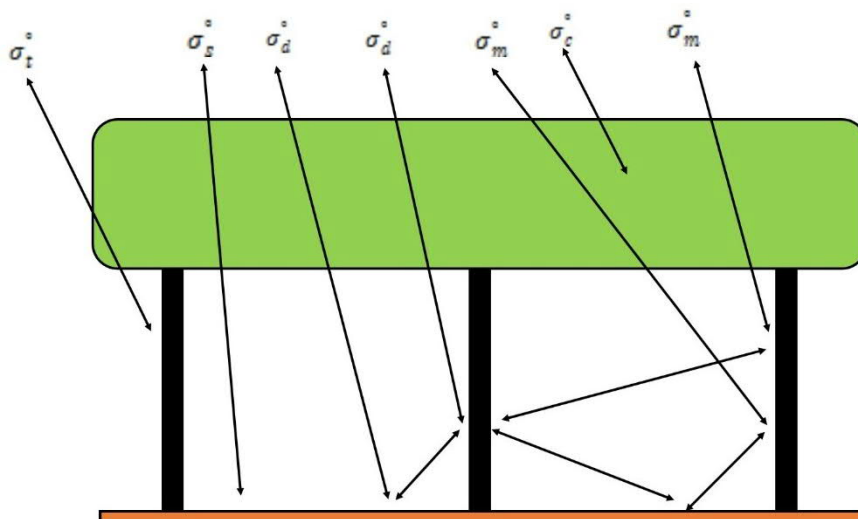
Puuston vaikutusta säteilyn sirontaan ja vaimenemiseen voidaan tarkastella kolmessa tason (latvusto, runko ja maa) vaikutuksesta sirontakertoimeen. Tutkalle palautuvaan sirontakertoimeen vaikuttaa: [12]

1. Kuvattavan alueen kasvillisuus. Esimerkiksi onko metsä havu- vai lehtimetsää ja kuinka korkeita puut ovat. Kuvattavan alueen karkeus vaikuttaa myös takaisinsirontaan.
2. Sähkömagneettisen säteilyn aallonpituus ja polarisaatio
3. Kasvillisuuden ja maan dielektrisyysvakio. Lehdissä oleva kaste ja kosteus kasvattavat dielektrisyysvakiota.

Kolmen tason tarkastelussa sähkömagneettinen säteilyn sirontaa tarkastellaan viidellä eri kerrotoimella (ks. Kuva 11). Kaikkien tasojen yhteisvaikutusta voidaan arvioida kaavalla: [31]

$$\sigma_w^\circ = \sigma_c^\circ + \tau_c^2 \tau_t^2 (\sigma_m^\circ + \sigma_t^\circ \sigma_s^\circ + \sigma_d^\circ)$$

Kaava perustuu Santa Barbara -malliin, jolla mallinnetaan latvuston sirontaa. Metsästä tutkaan palautuvan sirontakertoimen (σ_w°) määrittää: latvuston pinnan takaisinsironta (σ_c°), latvuston ja rungon lähetyskerroimet ($\tau_c^2 \tau_t^2$), latvuston ja maan välillä tapahtuva monitiesironta (σ_m°), puiden rungoista johtuva sironta (σ_t°), maasta johtuva sironta (σ_s°) ja tuplasironta joka syntyy rungon ja maan välille (σ_d°). [31]



Kuva 11: Metsän kolme sironnan aiheuttavaa tasoa [31]

Maanpinnan ominaisuuksilla on myös merkittävä rooli säteilyn sironnassa. Mitä karkeampi maanpinta on sitä suurempaa maasta johtuva sironta (σ_s°) on. Maanpinnan dielektrisyysvakio vaikuttaa säteilyn etenemiseen. Kuten aiemmin todettiin kuiva maa absorboi ja märkä maa heijastaa enemmän sähkömagneettista säteilyä. Maan kasvava dielektrisyysvakio kasvattaa σ_m° , σ_s° ja σ_d° sirontaa. [12]

Sähkömagneettisen säteilyn aallonpituus vaikuttaa miltä kasvillisuuden tasolta se heijastuu herkemmin takaisin. Yleisesti lyhyillä aallonpituuksilla (2 - 6 cm) latvuston pintasironta ja tilavuussironta ovat vahvempaa. Tällöin maanpinnalta ei saada paljoa kaikuja säteilystä. Pidemmällä aallonpituuksilla (10 - 30cm) päästään paremmin latvuston läpi. [32]

Polarisaation valinnalla voidaan myös vaikuttaa tutkalta lähtevän säteilyn läpäisykykyyn. Kuten aiemmin todettiin yksittäispolarisoidut tutkat saavat herkemmin vasteita pintasironnasta ja ristiin polarisoidut tilavuussironnasta. Yksittäispolarisoidulla säteilyllä päästään parempaan kasvillisuuden läpäisyyn [32]. Polarisoinnin vaikutusta kasvillisuuden läpäisyyn ja sirontaan on tutkittu useissa instansseissa, muun muassa Yhdysvaltojen asevoimat ovat tutkineet asiaa VHF, UHF ja L -taajuuskaistoilla [29][33][34].

Biomassan tiheys vaikuttaa tutkalle palautuvan säteilyn määrään. Dobson et al. tekemässä tutkimuksessa osoitettiin miten biomassan (rungot, oksat, havut, lehdet) määrä korreloi vahvasti sirontakertoimeen [35]. Samassa tutkimuksessa havaittiin, että noin 100-200 tonnia/hehtaari biomassan määrä mäntymetsässä kyllästää sirontakertoimen kasvun P- ja L- kaistoilla. Sironta kasvaa lineaarisesti biomassan kasvun mukaisesti. Säteilyn läpäisyn kannalta olennainen huomio on, että esimerkiksi maanpinnan kosteuden vaikutus sirontakertoimeen häviää latvuston biomassan ylittäessä 1,3 kg/m³ tiheyden [36].

Spaceborn Imaging Radar-C ja X-band Synthetic Aperture Radar (SIR-C, X-SAR) -tutkilla otetut kuvat Rondonian sademetsistä Brasiliassa havainnollistavat miten eri taajuudet ja polarisaatiot voivat vaikuttaa kuvan tulkittavuuteen (ks. LIITE 7). Kuvat ovat samaan aikeen otettuja samalta alueelta. Kuvista voidaan havaita esimerkiksi todella tiheän saderintama näkyminen tummana läikkänä X-SAR -kuvassa, mutta pidemmällä aallonpituuksilla se vaalenee ja häviää. Kyseessä on poikkeuksellisen rankka saderintama, koska tavallisesti myös X- ja C-kaistat eivät häiriinny sadepilvistä. Suuri kosteusprosentti latvustossa on syynä, että jokaisella kaistalla sademetsän latvusto näkyy erittäin kirkkaana. L-kaista joka läpäisee X- ja C-kaistoihin nähden syvemmälle, näyttää puiden latvuston erityisen kirkkaana johtuen puustossa tapahtuvasta tilavuussironnasta. Kuvissa on vertailun vuoksi Sentinel-1 satelliitilla otettu kuva samalta alueelta.

Kirjallisuuslähteiden perusteella voidaan siis päätellä, että käyttämällä pitkiä aallonpituuksia voidaan yrittää läpäistä latvustoa ja yrittää havaita niiden alla olevia kohteita. Kuten aiemmin todettiin aallonpituuden kasvattaminen kuitenkin heikentää pituussuunnan resoluutiota. Latvuston alla olevan maanpinnan ja kohteiden karkeus vaikuttaa siihen, miten latvuston läpi päässyt sähkömagneettinen säteily heijastuu takaisin tutkalle. Kosteuden vaikutus puissa todennäköisesti vaikeuttaa kohteiden havaitsemista.

Julkisista lähteistä ei löydy materiaalia, jossa olisi tarkasteltu SAR-tutkasatelliittien kykyä havaita kohteita latvuston läpi. Tutkijan aiheeseen liittyvät lähteet on toteutettu lentokoneesta kuvaamalla. Voidaan olettaa, että FOPEN SAR -tutkat ovat edelleen suorituskyvyltään niin merkittäviä, että asevoimat pitävät tutkimusta salassa.

3. SATELLIITTITEKNIikka JA KIERTORATAMEKANISMIT

3.1 Kansainvälinen avaruusteollisuus

Avaruusteollisuus tänään ja tulevaisuudessa kiinnostaa kasvavassa määrässä eri valtioita. Siitä saavutettavat hyödyt ovat yleensä strategisia tai taloudellisia. Avaruusteollisuus voidaan jakaa siviili-, puolustus-, tiedustelu- ja kaupalliseen sektoriin. Jokainen sektori toimii erillisenä osana, mutta jakaa tiettyjä asioita keskenään. Esimerkiksi kukin sektori tukeutuu samaan infrastruktuuriin (asiantuntijat, teollisuus pohja, jne.). Hyvin usein myös sektorit toimivat rinnakkain avaruudessa. Tiedustelu- ja puolustussektorit lukeutuvat esimerkiksi Yhdysvalloissa kansallisen puolustuksen toiminnaksi. Useimmat valtiot eivät erottele puolustus- ja siviilisatelliitteja vaan ne sisältävät rinnakkaisia toimintoja. [37]

Space Foundationin mukaan 2017 vuoden lopussa 72 valtion (19 näistä kuuluu European Space Agency:yn) hallintoa, yritystä tai korkeakoulua omisti yhden tai enemmän satelliitteja [37]. Liitteessä 8 on havainnollistettu 2018 lokakuun tilanteesta, miten satelliitit ja niiden käyttötarkoitukset ovat jakaantuneet valtioiden välillä. Aktiivisista satelliiteista noin puolet kuuluvat Yhdysvalloille, seuraavana tulevat Kiina ja Venäjä, jotka molemmat omistavat noin 10 prosenttia aktiivisista satelliiteista. Kaikista aktiivisista satelliiteista noin 15 prosenttia on julkisesti sotilaskäytössä. [38]

Satelliiteilla on erilaisia käyttötarkoituksia ja niiden rakenne on muodostettu niiden mukaisesti. Yleisimpiä käyttöalueita ovat: meteorologia, paikannus- ja sijaintipalvelut, sotilas- ja turvallisuuskäyttö, kommunikaatio, kaukokartoitus, kaupalliset kuljetukset ja avaruustutkimus [39]. Asevoimien hyödyntämät satelliitit ovat yleensä meteorologia-, paikkatieto-, kommunikaatio- ja kaukokartoitussatelliitteja. Muita satelliitteja mitä asevoimat käyttävät voivat olla esimerkiksi elektronisen sodankäynnin satelliitteja.

3.2 Satelliitin rakenne

Satelliitit rakennetaan niiden käyttötarkoituksen ja elinkaaren mukaisesti. Isompiin satelliitteihin voidaan luonnollisesti rakentaa enemmän ominaisuuksia, mutta niiden saattaminen avaruuteen menee kalliimmaksi. Käytettävät materiaalit ja komponentit vaihtuvat käyttötarkoituksen lisäksi myös kiertoradan mukaan.

Myös tekokuina tunnetut satelliitit ovat ihmisen valmistamia avaruusjärjestelmiä, jotka sisältävät erilaisia alijärjestelmiä riippuen niiden käyttötarkoituksesta. Alijärjestelmillä satelliitti kykenee esimerkiksi ottamaan kuvia, välittämään dataa, ohjautumaan, lataamaan omia akkuja ja suojaamaan itseään. Liitteestä 9 on kuva kuvaussatelliitin esimerkkirakenteesta. [40]

Satelliitin monet alijärjestelmät rakentuvat sen rungon eli ydinrakenteen ympärille. Ydinrakenne (englanniksi bus) on valmistettu yleensä korkealaatuisesta metallista tai komposiitista [42]. Ydinrakenteen kokoon vaikuttaa alijärjestelmien määrä ja laatu.

Satelliitit joutuvat toimimaan korkean säteilyn ja äärimmäisien lämpötilaolosuhteiden alla. Tällöin niihin asennetut järjestelmät suojataan passiivisin ja aktiivisin keinoin. Avaruudessa ei teoriassa ole lämpötilaa, koska tyhjiössä ei ole atomeita joiden välillä tapahtuisi energian siirtoa, mutta laskennallisesti avaruuden teoreettinen lämpötila on -270 celsiusta. Avaruuden kylmyydeltä ja auringon säteilystä johtuvasta lämmöstä voidaan suojautua esimerkiksi käyttämällä MLI-kerroksia (Multi-layered Insulation Blanket) [43]. Entisten lämpötilalta suojautumisen keinojen rinnalle kehitetään jatkuvasti uusia teknologioita. Varsinkin satelliittien pienentyessä haetaan materiaalien ominaisuuksista keinoja suojella satelliitteja avaruuden ympäristöltä [44].

Satelliittien toiminnallisuudet saavat virtansa akustosta. Akuston materiaali voi olla lithium-iona tai jopa ydinakusto riippuen satelliitin käyttötarkoituksesta ja elinkaaresta [45]. Satelliiteissa käytetään yleensä aurinkopaneeleita sähköntuottamiseen. Tämä on paljon tehokkaampaa verrattuna maanpäällä tuotettuun aurinkovoimaan, koska avaruudessa ilmakehä ei torju säteilyä. Satelliitteihin asennetut aurinkopaneelit on valmistettu yleensä piisoluista, jotka on peitetty ohuella lasilla, galliumarsenidilla tai muista puolijohde materiaaleista. Satelliitin sähköntarve riippuu miten sen järjestelmät käyttävät virtaa. Akkujen lataaminen onnistuu käytännössä jatkuvasti, mutta kaikkia laitteita ei tarvitse käyttää jatkuvasti. Lataaminen ei onnistu luonnollisesti maan ollessa satelliitin ja auringon välissä. Latausteho riippuu aurinkopaneelien määrästä. Esimerkiksi kansainvälisen avaruusaseman ISS:n 262400 aurinkopaneelin solua tuottaa 84 - 120 kilowattia (40 wattia per neliometri) virtaa [46]. [47][48]

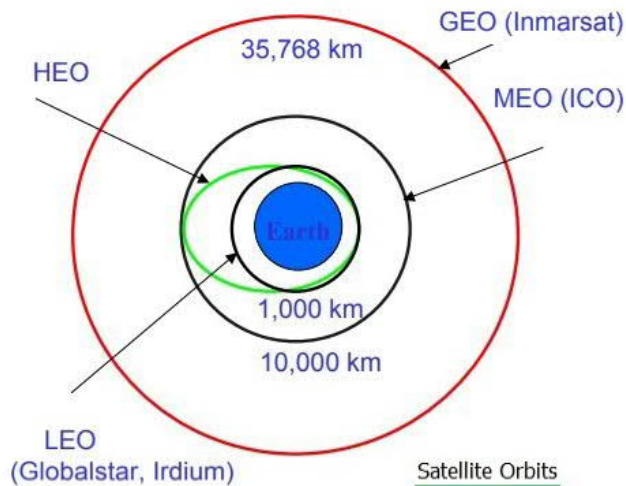
Satelliittien liikuttaminen avaruudessa onnistuu työntömoottoreilla. Työntömoottoreilla satelliitti voidaan korjata oikealle kiertoradalle, siirtää se toiselle kiertoradalle tai jopa väistää siihen kohdistuvia fyysisiä uhkia. Työntömoottorit toimivat yleensä yhdellä tai kahdella polttoaineella joista yleisin on MMH (monometyylihydratsiini). Satelliitin elinkaari päättyy yleensä samaan aikaan, kun sen polttoaine on loppunut. Satelliittien pienennettyä ja sähköntuotantokyvyn parantumisen myötä myös sähkökäyttöiset työntömoottorit ovat yleistymässä. Sähköisistä työntömoottoreista yleisimmät ovat tällä hetkellä Hall- ja ionityöntömoottorit. Jos satelliitit saavat tulevaisuudessa työntövoimansa sähköisistä työntömoottoreista, voidaan niihin lisätä enemmän hyötykuormaa, jonka polttoaine ja sen säiliö olisivat vieneet. [49][50]

Loppuihin alijärjestelmiin voi kuulua: kameroita, tutkia, viestintävälineitä ja tietokoneita. Sensorijärjestelmillä voidaan kuvata maapalloa tai tutkia avaruutta. Viestintävälineillä voidaan jakaa kerättyä dataa, välittää tietoa maapallon eri pisteiden välillä tai tuottaa paikkatietoa tarvitsijalle. Tietokoneilla ohjataan satelliitin toimintaa tai prosessoidaan kerättyä sensoridataa. Lisäksi koko satelliittijärjestelmään kuuluu yleensä myös maa-asemia, joilta voidaan valvoa ja ohjata satelliitin toimintaa. [51]

3.3 Kiertoratamekaniikka

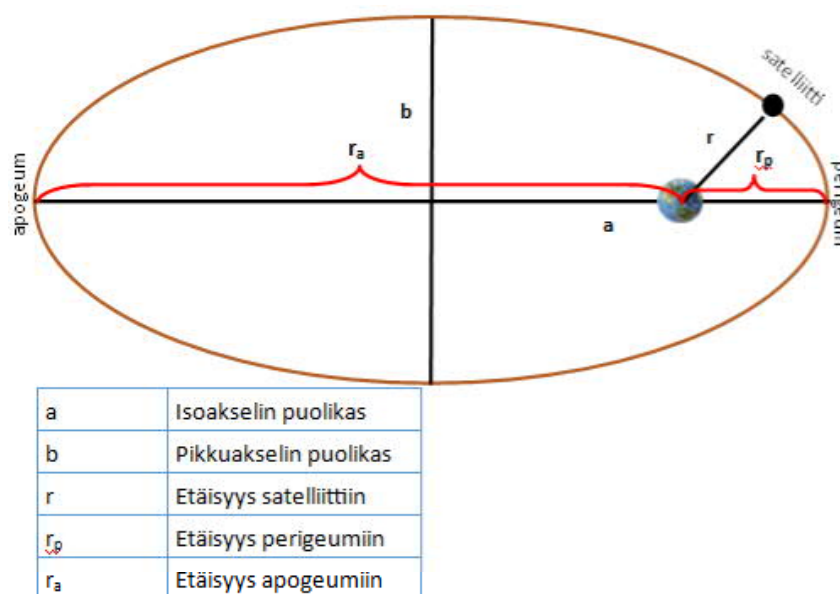
Reitti mitä satelliitti kiertää kutsutaan sen kiertoradaksi. Meidän käyttämät satelliitit kiertävät maata, joten niiden reitit tunnetaan yleisesti maan kiertoratoina. Satelliittia joka ei ole kiertoradalla, vaan suorittaa tehtävänsä jatkaen avaruuden syvyyteen kutsutaan luotaimeksi [40]. Satelliitti asetetaan sellaiselle maan kiertoradalla, joka tukee sen sensorien suorituskykyä ja tarkoitettua tehtävää. Kiertoradat eroavat toisistaan joko etäisyydessä, kiertoradan eksentrisyydestä tai radan inkliinaatiosta. [52]

Satelliitit harvoin liikkuvat täysin ympyränmuotoista rataa maata ympäri, vaan kiertoradat muistuttavat yleensä ellipsiä. Satelliitin kiertoradan kaukaisinta pistettä maasta kutsutaan apogeumiksi ja lähintä pistettä perigeumiksi [53]. Maan etäisyyden mukaan kiertoradat voidaan jakaa LEO (low Earth orbit), MEO (mid Earth orbit) ja GEO (geo-synkroninen) -kiertoratoihin [4]. Muut kiertoradoista käytetyt määritelmät ovat HEO (korkeasti elliptinen), SSO (aurinkosynkroninen), polaari ja Molniya-kiertoradat [53].



Kuva 12: Satelliittien kiertoratojen etäisyyserot [54].

Radan isoakselin puolikasta käytetään kuvaamaan elliptisellä kiertoradalla olevan satelliitin etäisyyttä maasta. Kuvassa 13 on havainnollistettu elliptisellä kiertoradalla kiertävä satelliitti. Ellipsin keskeltä on mitattu sen lyhin säde b , eli pikkuakselin puolikas ja pisin säde a , joka on isoakselin puolikas. Isoakselin puolikas on puolen matkan päässä etäisyydestä perigeumiin ja apogeumiin, tällöin $a = (r_p + r_a)/2$. Radan isoakselin puolikasta kutsutaan myös satelliitin keski-etäisyydeksi, mutta se on harhaanjohtava termi. Laskiessa keskiarvon eksentrisen anomalian mukaan saadaan isoakselin puolikas, mutta käyttämällä luonnollista anomaliaa saadaan pikkuakselin puolikas ja keskianomaliaa aikakeskiarvon [55]. Elliptisellä kiertoradalla satelliitin nopeus vaihtuu riippuen sen etäisyydestä maahan. [56]

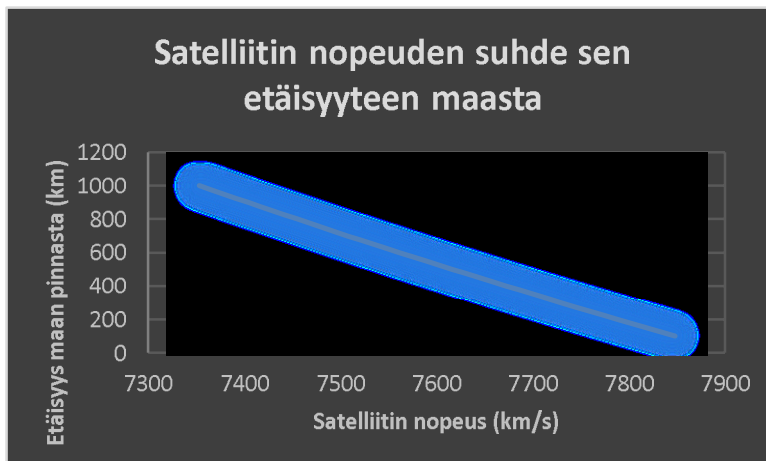


Kuva 13: Elliptinen kiertorata.

Satelliitin kiertonopeus on pitkälti riippuvainen sen etäisyydestä maahan. Maan vetovoima vaikuttaa seuraavalla tavalla kiertonopeuteen: [58]

$$v = \sqrt{\frac{G * M}{r}}$$

Kaavassa v on satelliitin kiertonopeus, G gravitaatiovakio, M kierrettävän kohteen massa ja r etäisyys kierrettävästä kohteesta. Tällöin jos satelliitin nopeutta halutaan vähentää, tulee se viedä etäämmälle kiertoradalle. Vaikka kaava pätee enimmäkseen pyöreisiin kiertoratoihin, niin voidaan sitä soveltaa myös elliptisiin kiertoratoihin. Kuvasta 14 voidaan nähdä etäisyyden vaikutuksen kiertonopeuteen.

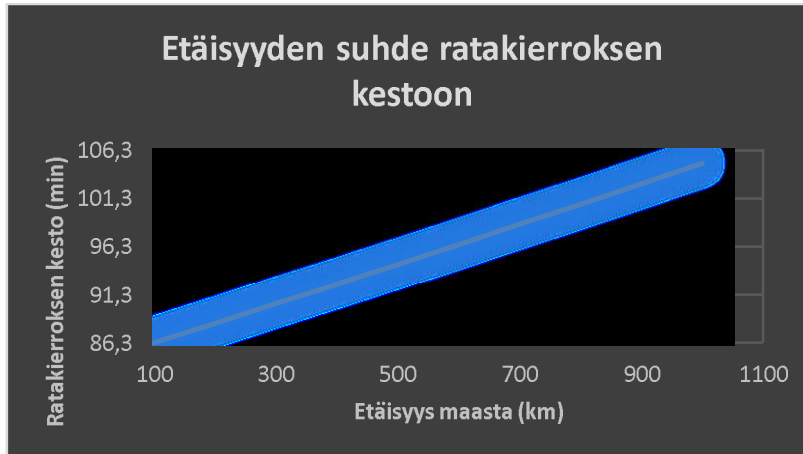


Kuva 14: Ympyrän muotoisella kiertoradalla etäisyyden suhde satelliitin nopeuteen

Toinen kiertoratojen etäisyyksistä muodostuva arvo on ratakierron keston kuluva aika. Ratakierron kesto voidaan laskea kaavalla: [58]

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{r^3}{GM}}$$

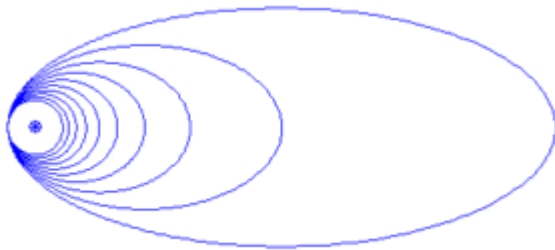
T on yhtälössä ratakierron kesto. LEO-radalla olevalla satelliitilla kierrosaika voi olla esimerkiksi 90 minuuttia, kun HEO-radalla olevalla satelliitilla noin 24 tuntia [4]. Ratakierron keston lyhentämiseksi tulee satelliitti tuoda lähemmäksi maata. Kuvassa 15 on havainnollistettu LEO-kiertoratojen etäisyyksien vaikutus ratakierron kesto.



Kuva 15: Etäisyyden vaikutus yhden ratakierroksen aikaan

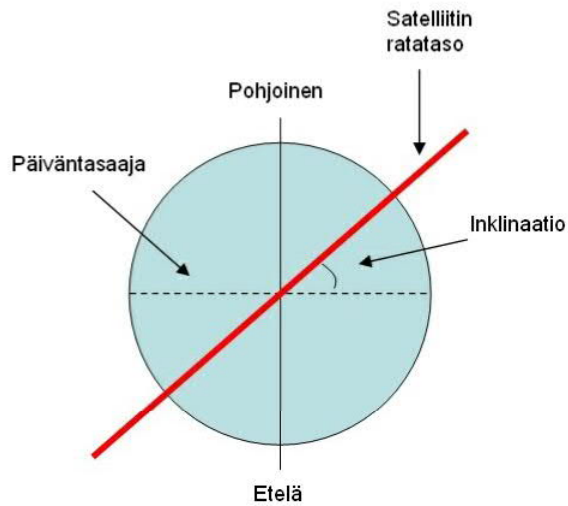
Kiertorataan vaikuttaa myös sen muoto ja kulmasuhde päiväntasaajaan. Kiertoradan eksentrisyys kuvaa kuinka elliptinen se on muodoltaan. Tämä on havainnollistettu kuvassa 16. Eksentrisyyden (e) lähestyessä 0 arvoa kiertorata saa enemmän ympyränmuotoisen muodon. Kasvaessa arvoa 1 kohti kiertorata saa enemmän elliptisen muodon. Eksentrisyyden voi laskea kaavalla:

$$e = \frac{r_a - r_p}{r_a + r_p}$$



Kuva 16: Satelliittien kiertoradan eksentrisyys 0,1 asteen siirtein 0:sta 0,9:ään [56].

Kiertoradan inkliinaatio on sen ratatason astesuhde päiväntasaajaan (ks. Kuva 17). Inkliinaation ollessa 0-astetta satelliitti kiertää maata päiväntasaajan mukaisesti länsi-itä suunnassa. Inkliinaation ollessa 90-astetta satelliitti kiertää maata sen pohjois- ja etelänapojen mukaisesti. Inkliinaation ollessa 90- ja 180-asteen välissä satelliitti kiertää maata retrogradisesti, eli vastoin maapallon omaa kiertosuuntaa. [4]



Kuva 17: Satelliitin kiertoradan inkлинаatio [59].

Satelliitin kiertoradan inkлинаatio määrittää sen maaradan (engl. ground track). Maarata on satelliitin sijainti suoraan maahan nähden. Täten inkлинаatio määrittää myös pitkälti mitä satelliitin sensorit näkevät maasta. Esimerkiksi osa 0-asteen inkлинаatiolla kiertävistä satelliiteista eivät kykene kommunikoimaan napapiireillä sijaitsevien kohteiden kanssa. Miltä leveyspiiriltä satelliitti asetetaan omalle kiertoradalle määrittää myös sen alimman inkлинаatioasteen. Leveyspiiriltä voidaan lähettää satelliitteja vain samalle tai korkeamman asteen inkлинаatiolle. Esimerkiksi satelliitti voidaan lähettää 0-asteen inkлинаation kiertoradalle ainoastaan päiväntasaajalta. [60]

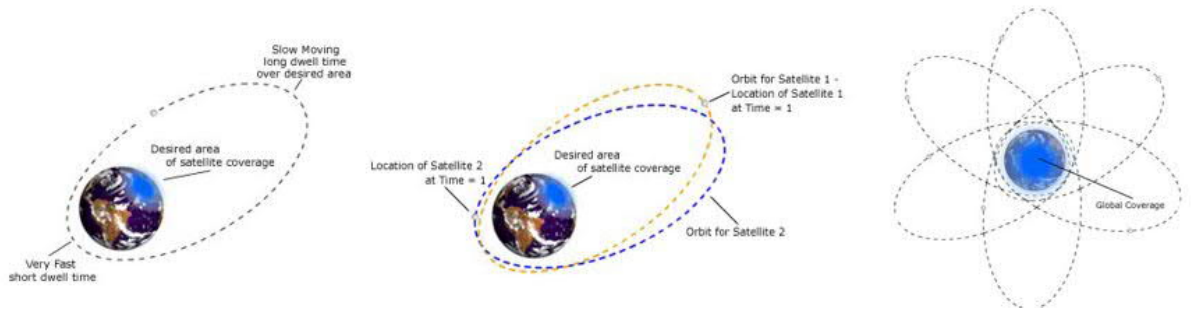
3.4 Kiertoradat

Low Earth orbit eli LEO-kiertorata käsittää niiden satelliittien kiertoradat, jotka ovat 160 - 1000 kilometriä maan pinnasta. Satelliitille lasketaan sellainen etäisyys, että normaali maan ilmakehän hidastaminen ei tiputa satelliittia alas [61]. Tällä kiertoradalla olevat satelliitit ovat usein kaukokartoitus- ja sotilaskäytössä [60][62]. Satelliitilta lähtevän ja sinne saapuvan säteilyn etenemisessä on vähiten viivettä, koska satelliitit ovat lähempänä maata. Etäisyys maahan on muihin kiertoratoihin nähden myös pienempi, joten säteily ei vaimene matkalla niin voimakkaasti [63]. Tällöin kyseiseltä kiertoradalta päästään matalammilla lähetystehoilla parempaan signaalivahvuuteen. [64]. Pienemmät lähetystehot mahdollistavat myös pienempien satelliittien käytön. LEO-kiertoradoilla olevat satelliittien materiaalit joutuvat lentonopeutensa takia suuremman kuormituksen alle. Atominen happi (enlg. AO, atomic oxygen) kuluttaa satelliitin pinta- materiaaleja ja voi pahimmillaan estää satelliitin tehtävän toteutumisen ajan kuluessa [65]. Tällä hetkellä maata kiertää 1468 satelliittia LEO-kiertoradalla. 2019 UCS pitämän tilaston mukaan LEO-kiertoradalla olevista satelliiteista 336 liittyy jollain tavalla tietoliikenteeseen ja 786 maan kuvantamiseen (437 optisen ja elektro-optisen alueen sekä 60 tutka-alueen kaukokartoittamissatelliittia) [66].

Mid Earth orbit (MEO) sijaitsee LEO- ja GEO-kiertoratojen välissä. MEO-kiertorata sijaitsee noin 2000 - 36000km maan pinnalta. Kyseistä kiertorataa käytetään enimmäkseen paikannusjärjestelmien satelliitteja varten [67]. Esimerkiksi Global Positioning Systemin (GPS) satelliitit sijaitsevat MEO-kiertoradoilla. GPS:n 24 satelliittia kiertää maapalloa 20200km etäisyydellä, kuudella eri kiertoradalla [68]. Kullakin kiertoradalla on neljä satelliittia ja ne kiertävät maapallon ympäri 12 tunnin aikana. MEO-kiertoradalla sijaitsee 132 aktiivista satelliittia. Näistä 110 satelliittia liittyy satelliittipaikannusjärjestelmiin [66].

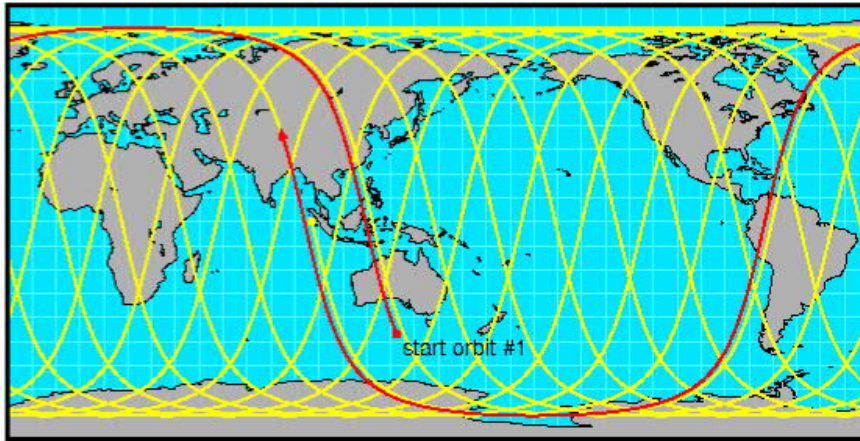
Geo-synkronisella (GEO) kiertoradalla sijaitsevat satelliitit ovat noin 36000km päässä maan pinnasta. Tämän kiertoradan erityispiirteenä on sillä olevien satelliittien kiertonopeus. Rata- kierroksen aika täsmää maan kiertoaikaa oman akselinsa ympäri (23 tuntia 56minuuttia), jolloin satelliitti on maahan suhteessa samalla sijainnilla. Geo-synkronista kiertorataa kutsutaan geostationääriseksi silloin, kun se on täysin pyöreä ja sijaitsee päiväntasaajan päällä [69]. Geostationäärisellä kiertoradalla sijaitsevien satelliittien etuna on, ettei niiden antennejä tarvitse paikantaa. GEO-kiertoradalla kiertää 562 aktiivista satelliittia [66]. Aktiivisista satelliiteista isoa osaa hyödynnetään viestiliikenteessä ja erityisesti satelliitti-TV ja -radiokäytössä [69]. [4]

Korkeasti elliptisen kiertoradan (eng. highly elliptical orbit, HEO) muoto on hyvin eksentrisen. Tällöin sen muoto muistuttaa ellipsiä. Kuten aiemmin todettiin, satelliitin kiertonopeus on riippuvainen sen etäisyydestä maahan, jolloin maata lähellä ollessa se liikkuu nopeammin ja kaukana hitaammin. Tällöin tietynlaisissa korkeasti elliptisissä kiertoradoissa satelliitti liikkuu hyvin hitaasti apogeessa, jolloin se kattaa maasta samaa aluetta pitkään. Kuitenkin siirtyessä perigeeseen satelliitti on maan vastakkaisella puolella. Täten jos kyseinen maan alue halutaan kattaa jatkuvasti, tulee satelliiteilla muodostaa jaksottainen konstellaatio (ks. Kuva 18). HEO-kiertoradat eivät ole sidottuna päiväntasaajaan, kuten geostationääriset kiertoradat. Tällöin maasta voidaan kattaa paremmin esimerkiksi pohjoisemmat ja eteläisemmät leveyspiirit [70]. Maat joilla on kaukokartoittamisen intressejä napapiirien alueilla (esim. Venäjä) käyttävät usein hyödyksi satelliiteissaan HEO-kiertoratoja. [71]



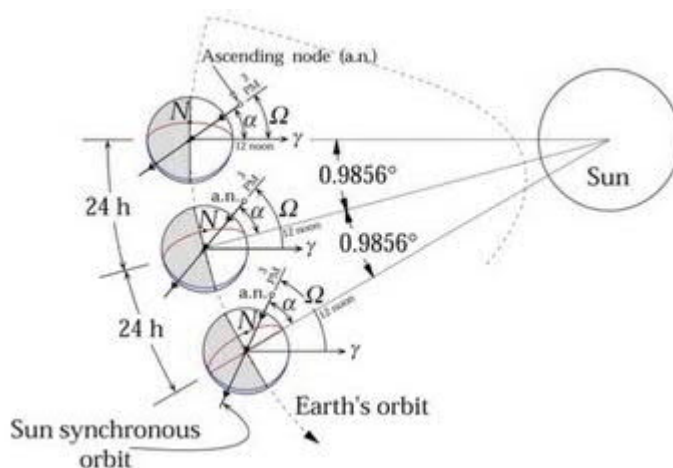
Kuva 18: Satelliitti HEO-kiertoradalla. Saman maa-alueen kattaminen HEO-kiertoradoilla olevien satelliittien konstellaatiolla [72].

Polaarisella kiertoradalla (engl. polar orbit) satelliitit kiertävät maata yleensä lähellä 90 asteen inkliinaatiota. Yli 66 asteen inkliinaatiolla maata kiertäviä satelliitteja kutsutaan polaarisisällä kiertoradalla kulkeviksi [59]. Tällöin satelliitin kiertorataa kulkee maan pohjois- ja etelänapoja yli. Yleensä napaoradot ovat muodoltaan pyöreitä tai hyvin matala eksentrisiä [73]. Kaukokartoituksessa käytetyt satelliitit ovat usein polaarisisällä kiertoradoilla, koska maan pyöriessä länsi-itäsuunnassa, ne kattavat melkein koko maapallon tietyn ajan sisällä (ks. Kuva 19) [52]. Matalalla polaarisisällä kiertoradalla kiertävällä satelliitilla menee noin 90 minuuttia yhteen kiertosykliin. Tällöin se näkee saman alueen maasta kaksi kertaa 24 tunnin aikana, kerran valoisalla ja kerran pimeällä [4]. Kaukokartoituksessa voidaan haluta, että satelliitti kiertää saman alueen samoissa valaisuolosuhteissa, jolloin satelliitti asetetaan aurinkosynkroniselle kiertoradalle.



Kuva 19: Esimerkki polaarisella kiertoradalla sijaitsevan satelliitin sijainnista maahan nähden. Punaisella ensimmäinen kierto ja keltaisella kiertoratasekvenssin seuraavat vaiheet. [73]

Aurinkosynkroninen kiertorata (engl. sun synchronous orbit, SSO) on erityinen polaarinen kiertorata. Ratatason inkliinaatio on päiväntasaajasta yli 90-astetta ja se kiertyy maapallon ympäri 360-astetta/365,26 päivällä, eli 0,9856 astetta vuorokaudessa [57][55]. Tästä johtuen satelliitti ylittää kiertoradallaan saman kohdan maasta karkeasti samaan kellon aikaan (ks. kuva 13). Kaikki aktiiviset aurinkosynkroniset satelliitit ovat myös LEO-kiertoradalla [66]. Aurinkosynkronisen kiertoradan etuna on, että sensoreista saadaan samalta alueelta 12 tunnein välein mitaustuloksia. Moni maata kuvaava satelliitti on aurinkosynkronisella kiertoradalla. Jotta satelliitti säilyisi kiertoradalla on sen säilytettävä etäisyytensä ja inkliinaationsa. Tällöin satelliitilla joudutaan usein tekemään korjaavia ohjausliikkeitä. [4]

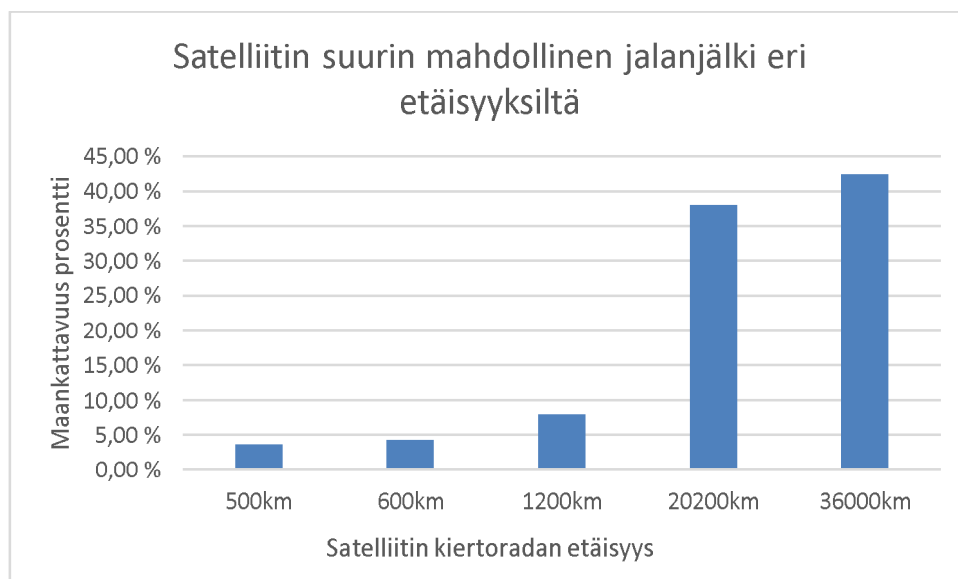


Kuva 20: Aurinkosynkronisella kiertoradalla ratataso kiertyy itään noin asteen verran vuorokaudessa, jolloin satelliitti ylittää saman kohdan maasta samaan paikalliseen aikaan [57].

3.5 Alueellinen kattavuus ja ajallinen erotuskyky

Satelliitin teoreettisen maksimi maakattavuuden määrittää pitkälti sen etäisyys maasta. Tätä aluetta, jonka satelliitti ”näkee” kutsutaan myös satelliitin jalanjäljeksi. Todellisuudessa suurin osa satelliiteista kattaa vain osan maan pinnasta. Maakattavuuden alue on satelliittikohtainen ja riippuu sen kiertoradan ominaisuuksista ja toimintatarkoituksesta. Maakattavuudella on merkitystä satelliitin viestijärjestelmien ja sensorien toiminnan kannalta. [74]

Maakattavuuden satelliittikohtaiset ääriarajat määrittyvät sen etäisyydestä ja maan horisontista. Mitä etäämmällä satelliitti sijaitsee maasta sitä pidemmälle horisonttiin se voi nähdä. Tällöin myös prosentuaalinen kattavuus kasvaa siirtyessä etäämmälle maasta. Liitteessä 10 on havainnollistettu, miten satelliitin etäisyydellä voidaan laskea prosentuaalinen maakattavuus. Kuvassa 21 voidaan nähdä, että esimerkiksi GEO-kiertoradalla lentävä satelliitti voi enimmillään nähdä melkein koko toisen puoliskon maapallosta. LEO-kiertoradoilla lentävät satelliitit sen sijaan voivat enimmilläänkin nähdä vain noin viisi prosenttia maapallon pinta-alasta. Se kuinka paljon satelliitit voivat enimmillään nähdä vaikuttaa osittain satelliittijärjestelmien rakenteeseen. Esimerkiksi 600 kilometrin LEO-kiertoradalla oleva satelliittikonstellaatio, jolla halutaan saavuttaa 100% maakattavuus samanaikaisesti, tarvitsee teoriassa noin 23 satelliittia kattamaan kaikki katveet. Tämä ei välttämättä tosiasiallisesti mahdollista satelliittien sensorien tai viestijärjestelmien täyttä toimintaa. Riippuen käytettävästä laitteesta, liian suuret off-nadir -kulmat voivat estää sen toimimisen. [75]



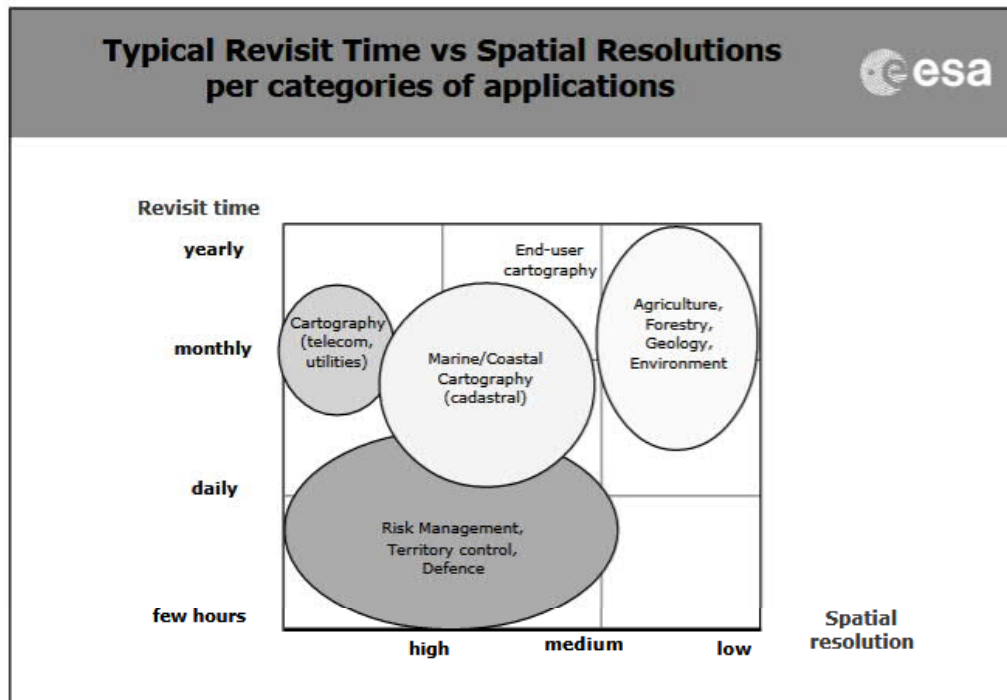
Kuva 21: Kiertoradan etäisyyden vaikutus satelliitin maakattavuuteen

Todellinen alue jonka satelliitti havaitsee maapallolta, määrittyy sen sensorien ominaisuuksien mukaan. Keilaus- tai kuvausalue (engl. swath) on pinta-ala alue minkä satelliitti ”näkee” maapallosta tietyllä ajanhetkellä. Tämä alue siirtyy satelliitin kiertäessä maapalloa. Satelliitin kiertoradan ominaisuudet vaikuttavat milloin satelliitti voi kuvata uudelleen samaa aluetta. Vaikka satelliitti siirtyy kiertoradallaan, niin samoja alueita voidaan kuvata aikaisemmin ohjaamalla sensoreita. [52]

Kuvausalueen koko ja kuvauskulma vaikuttavat kuvan resoluutioon. Kuvausalueen kokoa kasvattaessa muun muassa tutkakuvaussatelliiteilla joudutaan huomioimaan lentosuunnan resoluution heikkeneminen, jos sensorin ominaisuuksia ei optimoida laajemmalle alueelle [76][77]. Kasvattamalla kuvauskulmaa saadaan suurempia alueita kuvattua helpommin, mutta samalla kuvan laatu heikkenee. Kuvauskulman siirtyessä lähemmäksi horisonttia optisilla- ja elektrooptisilla sensoreilla vääristymien määrä kasvaa, sekä tutkakuvaussensoreilla signaalin monikäsitteisyyden aiheuttamat haitat kasvavat. [78]

Ajallinen resoluutio tarkoittaa kuinka kauan sensorilla kuluu aikaa, että se saa samasta alueesta kaksi tai useamman kuvaa. Kuvaustiheyteen vaikuttaa satelliitin kiertoradan ja sensorien ominaisuudet. Mitä tiheämmin aluetta voidaan kuvata, sitä parempi ajallinen resoluutio on. Satelliittien haasteena on saman alueen yllä uudelleen vierailu. Lentokoneilla ja lennokeilla voidaan normaalisti lyhyemmällä aikajänteellä lähteä uudelle tehtävä samalle alueelle, mutta satelliitit liikkuvat kiinteästi omilla kiertoradoillaan. Satelliittien uudelleen vierailuaika saman alueen yllä voi olla päiviä. Esimerkiksi satelliitti jonka sensorit optimoidaan kuvaamaan haluttua aluetta ja kiertää maata 800 kilometrin aurinkosynkronisella kiertoradalla, kuvaa saman pisteen maasta 4 päivän välein [79]. [80]

Ajallista resoluutiota voidaan siis parantaa valitsemalla tehtävälle sopiva kiertorata ja konfiguroimalla sensorit vastaamaan haluttua tavoitetta. Yleensä parantamalla ajallista resoluutiota heikennetään alueellista erottelukykyä. Esimerkiksi polaarisella LEO-kiertoradalla olevalla satelliitilla saadaan 1-2 päivän välein korkean alueellisen erottelukyvyn kuvia, kun taas geostationarisella kiertoradalla olevalla satelliitilla saadaan jatkuvasti samalta alueelta matalamman resoluution kuvia [81]. Ajallisen ja spatiaalisen resoluution suhde muuttuu yleensä käyttötarkoituksen mukaan (ks. Kuva 22). Satelliittien määrää kasvattamalla voidaan muodostaa konstellaatioita, jotka parantavat ajallista resoluutiota [82]. Satelliittikonstellaatioiden merkitys kasvaa, kun ajallista resoluutioita halutaan kasvattaa ilman, että alueellinen erottelukyky heikkenisi [83].



Kuva 22: Alueellisen erottelukyvyn suhde satelliitin uudelleenvierailu-aikaan [84].

Satelliitin on kyettävä välittämään saatu tieto tehtäväalueelta suoraan tai toisen satelliitin kautta halutulle maa-asemalle. Nopea datan välitys lisää satelliittijärjestelmiin kohdistuvia vaatimuksia. Esimerkiksi Iridium-satelliittiviestintäjärjestelmän 66 satelliitin konstellaatio kattaa 100-prosenttisesti koko maapallon kaikilla ajanhetkillä. Satelliitit muodostavat keskenään MESH-verkon ja kykenevät automaattisesti välittämään dataa toistensa välillä. Näin kattavan satelliittikonstellaation ylläpito ei ole edullista, sillä järjestelmän päivitys tulee maksamaan Iridiumille 2,9 miljardia Yhdysvaltojen dollaria. [85]

3.6 SAR-tutkasatelliittien esittely

Tässä tutkimuksessa on käytetty julkisesti saatavilla olevaa SAR-dataa. Esiteltäviksi satelliiteiksi ovat valikoituneet ne, joiden materiaalia on ollut saatavilla tutkimuksen teon aikana. Pääosin kaikki esimerkkien satelliiteista on suunniteltu muuhun kuin sotilaskäyttöön. Satelliitteja voidaan kuitenkin hyödyntää monialaisesti, jos niiden ominaisuudet tukevat sitä.

Sentinel-1 -sarjan satelliitit kuuluvat ESA:n hallinnoimaan Copernicus-ohjelmaan. Sarjaan kuuluu kaksi satelliittia (A ja B), jotka ovat ohjelman ensimmäiset aktiiviset satelliitit. Ne laskettiin vuosina 2014 ja 2015, josta lähtien ne ovat olleet aktiivisina. Satelliitit ovat varustettu C-taajuuskaistalla toimivilla tutkilla, jotka voivat toimia neljällä eri kuvausmoodilla. Sentinel-1A:n ja B:n odotetut elinkaaret ovat seitsemän vuotta. [86]

SENTINEL-1 A ja B	
Kiertorata:	Aurinkosynkroninen
Etäisyys maasta:	693 km
Laukaisumassa:	2300 kg (130kg polttoainetta)
Tutka:	C-taajuuskaista, keskitaajuus 5,405 GHz
Polarisaatiot:	VV+VH ja HH + HV
Off-nadir:	20 - 45 astetta
Suurin kaistanleveys:	100 MHz
Antennin koko:	12,3 x 0,821 m
Suurin lähetysteho:	4,2 kW [87]
Stripmap:	80 km kaistale 5x5 m resoluutiolla
IW-mode:	250 km kaistale 5x20 m resoluutiolla
EW-mode:	400 km kaistale 20x40 m resoluutiolla
Wave Mode:	20x20 km alueita 5x5 m resoluutiolla

Taulukko 4: SENTINEL-1 -satelliittien tekniset tiedot [86][88]

Sentinel-1 -satelliittit on suunniteltu käytettäväksi laajamittaiseen kaukokartoitukseen. Käyttöalueita ovat esimerkiksi merien ja jään tilan seuraaminen, maanviljely, metsätalous ja humanitäärinen apu. Kyseisiä satelliitteja ei ole varsinaisesti suunniteltu sotilaskäyttöön, mutta tietyiltä osin niitä voidaan hyödyntää siinä.

TERRASAR-X on Saksan siviiliavaruusohjelman satelliitti, joka laukaistiin vuonna 2007. Satelliitin tarkoituksena on tuottaa korkean resoluution tutkadataa tiedeyhteisön käyttöön. Tutka toimii X-taajuuskaistalla ja kykenee useaan eri kuvausmoodiin. Satelliitti on edelleen aktiivinen, vaikka se on ylittänyt odotetun elinkaarensa.

TERRASAR-X	
Kiertorata:	Aurinkosynkroninen
Etäisyys maasta:	514 km
Laukaisumassa:	1230kg (78kg polttoainetta)
Tutka:	X-taajuuskaista, keskitaajuus 9,65 GHz
Polarisaatiot:	Kaikki riippuen kuvausmoodista
Off-nadir:	15 - 60 astetta
Suurin kaistanleveys:	300 MHz
Antennin koko:	4,78 x 0,7 m
Suurin lähetysteho:	1,8 kW
Spotlight:	10 x 10 km alue 2m resoluutiolla
High-Res Spotlight:	5-10 x 5 km alue 1m resoluutiolla
Staring Spotlight:	Satelliitin jalanjälki 0,25m resoluutiolla
Stripmap	30 x 50 km 3m resoluutiolla
ScanSAR	100 x 150 km 18,5m resoluutiolla

Taulukko 5: TERRASAR-X -satelliitin tekniset tiedot [89]

TERRSAR-X -satelliitti tuottaa korkeimman resoluution kuvia, mitä julkisesti on saatavilla. Alun perin tarkkoja maa-analyysyjä varten suunnitellun satelliitin ominaisuudet soveltuvat myös sotilaskäyttöön. Vain yhdellä satelliitilla operoidessa saman alueen kuvia voidaan joutua odottamaan.

Suomalaisen ICEYE-yrityksen satelliitit on suunniteltu tuottamaan korkean resoluution tutka-kuvia maailmanlaajuisesti. Mikrosatelliiteilla on tarkoitus muodostaa konstellaatio, joka vähentää viivettä tutkakuvan saamisessa. Yrityksen tuotteet ovat maksullisesti kaikkien halukkaiden saatavilla. ICEYE:n satelliitit toimivat X-taajuuskaistalla ja käyttävät tällä hetkellä stripmap-sekä spotlight-kuvaamismodeja. Konstellaation ensimmäiset satelliitit laukaistiin vuonna 2018.

ICEYE X	
Kiertorata:	Aurinkosynkroninen
Etäisyys maasta:	570 km
Laukaisumassa:	85kg
Tutka:	X-taajuuskaista, keskitaajuus 9,65 GHz
Polarisaatiot:	VV
Off-nadir:	10 - 30 astetta Stripmap, 20 - 35 astetta Spotlight
Suurin kaistanleveys:	300 MHz
Antennin koko:	3,2 x 0,4 m
Suurin lähetysteho:	4 kW
Spotlight:	5 x 5 km alue 1m resoluutiolla
Stripmap	30 x 50 km alue 3m resoluutiolla

Taulukko 6: ICEYE -satelliittien tekniset tiedot [90]

Rakentamalla satelliiteista pienempiä saadaan niiden laukaisuhintaa laskettua. Tutkalla muodostettua dataa voidaan käyttää esimerkiksi sotilastarkoituksessa, jos kuvanlaatu kyetään säilyttämään riittävän hyvänä. Konstellaation ollessa valmis voidaan maailmanlaajuisesti saada kuvamateriaalia kolmen tunnin sisällä [90]. Typistetty viive kuvamateriaalin saamisessa mahdollistaa sen paremman käytön tiedustelussa ja päätöksenteossa.

ALOS-satelliitti oli Japanin JAXA:n (Japan Aerospace Exploration Agency) hallinnoima maata kartoittava satelliitti. Sen PALSAR-sensori tuotti L-taajuuskaistan kuvamateriaalia. SAR-dataa tuotettiin vuosien 2006 - 2011 välillä. ALOS - PALSAR ei ole enää aktiivinen, mutta sen tuottamaa dataa on julkisesti saatavilla. [91]

ALOS - PALSAR	
Kiertorata:	Aurinkosynkroninen
Etäisyys maasta:	691 km
Laukaisumassa:	4000 kg
Tutka:	L-taajuuskaista, keskitajuus 1,27 GHz
Polarisaatiot:	HH, VV, HH+HV, VV+VH,
Off-nadir:	8 - 60 astetta riippuen kuvausmoodista
Suurin kaistanleveys:	28 MHz
Antennin koko:	8,9 x 3,1 m
Suurin lähetysteho:	2 kW
Fine Beam	40 - 70 km kaistale 7 - 88 m resoluutiolla
ScanSAR	250 - 350 km kaistale 100m resoluutiolla
Polarimetry mode	30 km kaistale 30 m resoluutiolla

Taulukko 7: ALOS - PALSAR -satelliitin tekniset tiedot [92]

ALOS-satelliitin käyttötarkoituksena oli maan peitteisyyksien mittaaminen, onnettomuuksien seuranta ja resurssien kartoittaminen [91]. Kyseinen satelliitti valikoitui tutkimukseen johtuen sen käyttämästä taajuusalueesta ja SAR-datan saatavuudesta. PALSAR-sensorin tuotteet ovat resoluutioltaan merkittävästi heikompia verrattuna muuhun tutkimuksessa käytettyyn SAR-dataan. L-taajuuskaistan sensoreita voidaan kuitenkin yrittää käyttää latvuston alla olevien kohteiden havaitsemiseen.

4. MAAKOHTEN TUNNISTAMISEEN TARVITTAVA RESOLUUTIO

Satelliittikuvien käyttämistä sotilasoperaatioissa voidaan tarkastella sodankäynnin tasojen kautta. Nämä kolme tasoa ovat; strateginen, operatiivinen ja taktinen taso. Tässä tutkimuksessa ei keskitytä kuinka hyvin SAR-tutkasatelliitin tuottamaa tiedustelutietoa voitaisiin kullakin tasolla mahdollisesti käyttää. Tasojen avulla voidaan kuitenkin tarkastella muun muassa informaation määrää jota kuvamateriaalin tulisi pitää sisällään. Eri tasoilla voidaan tarvita erilaista resoluutiota ja aikajännettä kuvamateriaalin saamiseen. Tasot ovat myös riippuvaisia keskenään, joten jonkin osa-alueen laiminlyöminen haittaa toisen toimintaa. [93]

Sodankäynnin tasojen hierarkiassa strateginen taso on ylimpänä, operatiivinen keskellä ja taktinen taso matalimpana. Sodankäynnin kokonaisuus on sotilasstrategiaa. Se käsittää miten koko valtion voimavaroja (asevoimat, infrastruktuuri, talous, jne.) käytetään vastavoiman kukistamiseksi. Operatiivisella tasolla johdetaan asevoimia siten, että sillä on mahdollisuus luoda sotatoimien edellytykset. Tämä tarkoittaa taisteluiden johtamista ja keinoja joilla sotatoimialue vakautetaan. Operatiiviselta tasolta syntyy joukoille taktisen tason tehtäviä. Taktisella tasolla puolustushaarat johtavat omien joukkojen taistelua. Taktinen taso keskittyy taistelutoimintaan. Tällä tarkoitetaan miten aseellisella voimalla ja liikkeellä vaikutetaan suoraan viholliseen. [94]

Sotilaallinen havainnointi voidaan jakaa sodankäynnintasojen mukaisesti. Havainnointia toteutetaan maalta, mereltä, ilmasta ja avaruudesta käsin. Havainnoinnin keinoina on kaikki sähkömagneettisen spektrin sisältämät keinot aina optisesta havainnoinnista, elektroniseen tiedusteluun. Termillisesti tässä tutkimuksessa strategisella tasolla suoritetaan valvontaa, operatiivisella tasolla tiedustelua ja taktisella tasolla maalittamista. Havainnoinnin tasot ovat liitoksissa toisiinsa, koska kullakin niistä rakennettu tieto voi ohjata muiden tasojen toimintaa. Esimerkiksi taktisella tasolla muodostettu tarkka vihollistieto voi ohjata operatiivista tiedustelua vihollisen suuntaan tai jopa aiheuttaa operatiivisen liikkeen estämään vastustajan toimintaa. Satelliiteilla toteutetun tiedustelun on yleisesti mielletty käsittävän strategisen tason valvontaa. Satelliittien suorituskykyjen kehittymisen myötä niitä on alettu hyödyntämään enemmän myös muilla tasoilla. Taktisella tasolla pientä aikaviivettä ja tarkkaa resoluutiota voidaan hyödyntää suoraan toiminnassa. Osaa satelliittijärjestelmistä on kyetty hyödyntämään myös epäsuoran tulen tulenjohtamisen ketjussa. [95]

Seuraavissa alaluvuissa käsitellään vaatimuksia SAR-tutkalla muodostettavan kuvan tarkkuudesta, jolla voidaan suorittaa analyysejä sodankäynnin eri tasoilla. Tutkimus on rajattu keskittymään yhden kohteen havaitsemiseen. Se ei välttämättä anna pohjaa merkittävälle strategisille tai operatiivisille analyyseille, mutta on olennaista satelliitin suorituskyvyn arvioinnin kannalta. Suorituskyvystä voi tehdä johtopäätöksiä satelliittikuvien hyödyistä sodankäynnin kaikilla tasoilla. Vihollisen kohteita maalittaessa voidaan tutkasatelliitilta odottaa erilaista resoluutiotarkkuutta sekä tiedon tuottamisen nopeutta kuin strategisia ja operatiivisia valintoja tehtäessä.

4.1 Dynaaminen maalittamisprosessi

Satelliiteilla suoritettujen tiedustelujen ja maalittamisen tarkoituksena on tukea komentajan tarpeita konfliktissa. Kuvaustiedustelun tuloksia voidaan käyttää apuna selvittämään vastustajan aiheet. Tulokset syntyvät osana tiedusteluprosessia. Aluksi määritetään tiedon tarve ja paras tapa saavuttaa se. Tämän jälkeen tiedustelutehtävä suunnitellaan ja toteutetaan. Kerätty data tulkitaan ja analysoidaan, jonka perusteella vastustajaan kohdistetaan taktiset toimet. Strategisella tasolla voidaan kuvamateriaalissa usein tukeutua aikaisemmin kerättyyn dataan, mutta taktisella tasolla tarvitaan yleensä tuoretta tietoa, jota ei entuudestaan löydy. [96]

Tarkan informaation tuottamisella on merkittävä rooli onnistuneiden operaatioiden suorittamisessa. Tavoitteena on tuottaa tehokkaasti tietoa vastustajan sijainnista, määrästä, laadusta ja suuntautumisesta. Kuvaustiedustelua voidaan myös soveltaa omien joukkojen toiminnan tarkkailuun. Tehokkaaseen tiedusteluun ja maalittamiseen liittyy olennaisesti ajan käsite. Tässä opinnäytetyössä aikaa käsitellään perusteluna SAR-tutkasatelliittien mahdolliselle hyödyntämiselle operatiivisella ja taktisella tasolla. Ajan tarkastelu taktisessa kehyksessä on erillinen kokonaisuus opinnäytetyössä. SAR-tutkasatelliittien laatua voidaan kuitenkin arvioida niiden kyvyllä erotella yksittäisiä kohteita, sillä se on perusta sijainnin, määrän ja laadun määrittämiselle. [96]

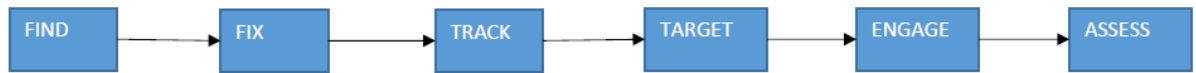
Sotilaskomentajien tarve tiedustelutiedolle määrittyy luonnollisesti annetun tehtävän mukaan. Tiedusteltavat kohteet vaihtelevat kooltaan ja ominaisuuksiltaan merkittävästi. Nämä vaikuttavat tiedusteluprosessin ensimmäiseen vaiheeseen, kun päätetään mitä tietoa haetaan ja millä tavalla. Alla olevassa taulukossa on kuvattu, mitä kohteita pääsääntöisesti operatiivisella ja taktisella tasolla tiedustellaan sekä mitä ominaisuuksia niistä voi löytyä. [96]

Tiedusteltava kohde	Tunnusmerkit, kohteet, tieto
Lentokentät	Lentokoneet, lennonjohto, viestijärjestelmät, kiitoradat, hävittäjäsuojat, huolto-ajoneuvot
Ohjusjärjestelmät	Ohjusputket, ohjuslavetit, ohjuksen tyyppi (maasta-ilmaan, jne.), ohjustäydennykset, tutkat, johtamispaikat, onko miehitetty, suojaus
Viesti- ja johtamispaikat	Johtamisajoneuvot, johtamispaikat, viestiasemat, antennit, tutkat, sähköntuotanto, suojauksen rakenne ja sijoittelu
Kasarmit ja tukikohdat	Kokoonpano, läsnä olevat joukot, ajoneuvot, asejärjestelmät, rakennukset, varastoalueet, suojaus
Varastointi ja huolto	Rakennukset, kontit, ajoneuvot, lastausmahdollisuudet, tiet, junaraiteet, vesi- ja sähköinfra
Sotilastoiminta	Mekanisoidut ja moottoroidut joukot, panssarikalusto, pioneerikalusto, tilapäissuojat ja -rakennelmat, suojuet, naamioidut kohteet, miinakentät, sulutteet
Maasto, reittitiedustelu	Kulkukelpoisuus, tiet, sillat, metsät, vesistöt, maastoprofiili, padot
Satamat	Laivat, veneet, sukellusveneet, laiturit, satamaterminaalit

Taulukko 8: Sotilastiedustelun kohteita ja tunnusmerkistöä

Tiedusteluprosessin ensimmäisessä vaiheessa tavallisesti päätetään, mitä tietoa tietyltä alueelta haetaan. Tunnusmerkistöä vastaavia kohteita havaittaessa analyysissä tehdään päätelmiä alueen tilanteesta, vihollisen tulevista aikeista ja omista toimintamahdollisuuksista. Oikeaan osuvan tulkinnan edellytyksenä on kuvien riittävä resoluutio ja informaatioisisältö. Dynaamisen maallittamisprosessin avulla voidaan tarkastella, miten kuvaustiedustelu etenee taktisella tasalla. [96]

Dynaaminen maalittamisprosessi kuvaa, miten joukko tai asejärjestelmä havaitsee ja valitsee kohteen sekä lopulta vaikuttaa siihen. Prosessi etenee vaiheittain tuottaen komentajalle tarvittavan tukimateriaalin. Maalittamisprosessilla voidaan kuvata myös yksittäisen joukon tai asejärjestelmän tapaa hakea maali ja vaikuttaa siihen. Vaiheiden järjestys on esitetty kuvassa 23. [97]



Kuva 23: Dynaaminen maalitusprosessi [97]

Dynaamisen maalittamisprosessin vaiheet ovat: Löytäminen - Orientoituminen - Seuraaminen - Maalittaminen - Tulenkäyttö - Arviointi. Ensimmäiset kaksi vaihetta vaativat sensorilta riittävää tarkkuutta kohteen tunnistamiseksi viholliseksi. Jos vaikutus halutaan kohdistaa vastustajan joukkoon, tulee vaiheiden välinen viive minimoida johtuen yksinkertaisesti kohteen mahdollisuudesta siirtyä pois asejärjestelmän ulottuvilta. Tällöin satelliitin välittämän tiedon reaaliaikaisuus on tavoiteltavaa. NASA ja ESA määrittävät kuvan toimittamisen lähes reaaliaikaiseksi viiveen ollessa alle kolme tuntia [98][99].

SAR-tutkasatelliitilta saadaan kuvamateriaalia vasta, kun se on prosessoitu valmiiksi. SAR-tutkan tuottama datavirta voi olla jopa 1 GB/s [100]. Tämän tietomäärän prosessoinnin nopeus ja satelliitin tiedonsiirron suorituskyky vaikuttavat päästäänkö järjestelmällä reaaliaikaisuuteen. Korkea resoluutio ja virheiden poistamien kuvasta esimerkiksi vaihtamalla kuvantamistapaa useamman näytteen moodiin voi lisätä myös prosessointiaikaa. SAR-tutkasatelliittien ominaisuudet vaihtelevat, mutta esimerkiksi Intian RISAT-2 kykenee tallentamaan kovalevyille 240 Gbit dataa ja välittämään sitä maa-asemille 620 Mbit/s nopeudella [101]. ESA:n Sentinel-1 -satelliitti tuottaa kolmella eri kuvantamismoodilla maasta 25 sekunnin datasiivuja, joiden koko on 2 Gbit [102]. Nykyaikaiset SAR-tutkasatelliitit kykenevät siis tuottamaan reaaliaikaista tutkakuvaa. Kuvanlaatu voi kuitenkin vaihdella merkittävästi, jos materiaali on tuotettu nopeasti.

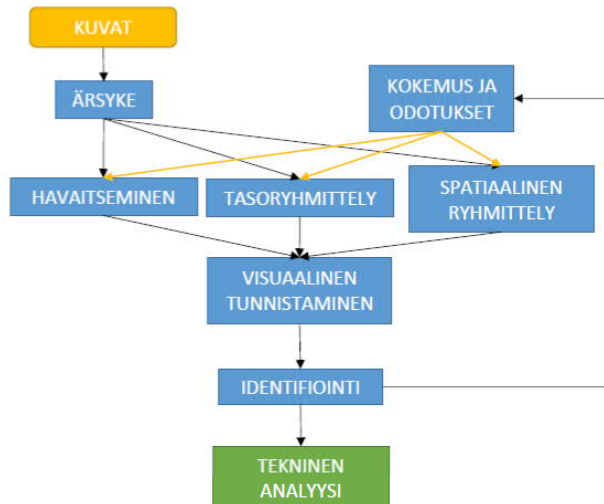
Vaikka kuvamateriaali voitaisiin siirtää satelliitilta maa-aseamalla reaaliaikaisesti, tulee se vielä välittää käyttäjälle. Tämän vaiheen siirtonopeuteen vaikuttavat maanpäälliset yhteydet. Tämän jälkeen kuvamateriaalista voidaan tehdä maalittamisprosessin mukaisesti analyysi. Analyysin kesto voi olla mitä tahansa minuuttien ja tuntien välillä. Kokonaisuudessaan kuvan siirtämiseen ja käyttäjään analyysiin on optimitilanteessa todennäköisesti kulunut vähintään 30 minuuttia. Tätä viivettä voidaan kuroa, jos tutkasatelliitin käytölle on tehty ennakoiva suunnitelma alueeseen sitoen. Tällöin resurssit voidaan kohdentaa ja materiaalin siirto tarvitsijalle nopeutuu. Dynaamisen maalittamisprosessissa kohteen tulisi myös pysyä jonkun asteisessa seurannassa sen aikana. 30 minuutin viive ei välttämättä tarkoita, että esimerkiksi johtamispaikka olisi siirtynyt alueelta pois. Asejärjestelmän kohdistaminen ja laukaiseminen riippuvat järjestelmästä ja sota-toimien tilasta.

4.3 Kuvantulkinnan kriteerit

Kuvan tulkitseminen on kriittisessä roolissa dynaamisen maalittamisprosessin analyysivaiheessa. Tulkittavuus on laatumääritelmä, joka kertoo kuinka hyödyllistä tietoa kuvasta saadaan päätöksenteon tueksi [103]. Käytännössä se tarkoittaa kohteiden löytämistä ja tunnistamista kuvista erilaisten menetelmien avulla.

Kuvan tulkitsemisen prosessissa syöteenä toimii kuva ja lopputuote riippuu tulkinnan tasosta. Prosessissa (ks. kuva 24) mallinnetaan, miten kuvamateriaalista analysoijan työllä muodostetaan kohteista lineaarisesti eri tason tulkintoja. Kohteen tunnistamisen asteet (havaitseminen - visuaalinen tunnistaminen - identifiointi - tekninen analyysi) ovat riippuvaisia kuvan laadusta ja analysoijan kokemuksesta. Liitteessä 11 on listattu mitkä muuttujat alueesta, kohteista ja analysoijasta vaikuttavat kohteen tunnistamiseen.

Prosessia ja muuttujia tarkastelemalla voidaan havaita, että tutkadataa analysoivalla henkilöllä on suuri rooli kohteen tunnistamisessa. Eteenkin SAR-tutkakuvia tarkasteltaessa on huomioitava analysoijan koulutus- ja kokemustausta. Tutkakuvan ominaisuudet eroavat merkittävästi optisen valokuvan ominaisuuksista. Esimerkiksi värin puute tutkakuvassa voi vaikuttaa analysoijan edellytyksiin tehdä tarkka tunnistus kohteesta. Liitteessä 12 on esimerkki, mitä tunnistetietoa saadaan optisesta ja SAR-tutkakuvasta värin nojalla. Tutkakuvista voidaan kuitenkin tehdä sellaisia päätelmiä, joita optisesta materiaalista ei kyetä tekemään. Esimerkiksi valokuvassa saatetaan havaita viljapelto, mutta tutkakuvassa säteily on läpäissyt kasvuston ja havainnut ajoneuvojen painaumet tai vanhat rakenteet pellon alta. Liitteessä 13 on esimerkki miten SAR-kuvasta voidaan havaita maanalaiset tunnelit.[104]



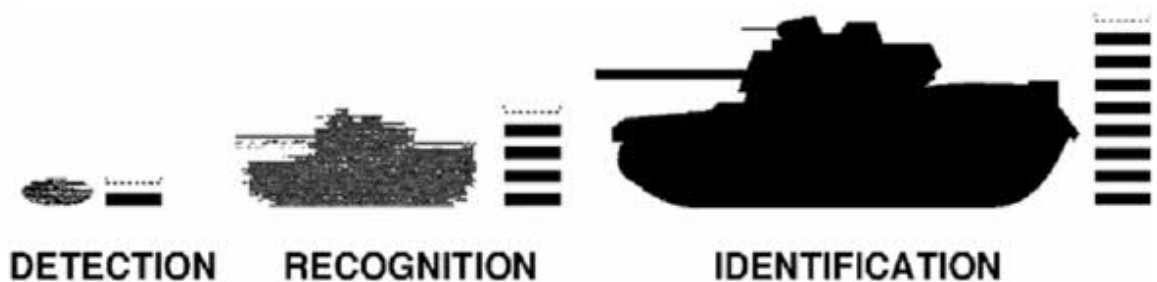
Kuva 24: Kuvan tulkitsemisen prosessi [104].

Kuvan tulkittavuuden määrittäminen ei ole yksinkertaista. Tarkkakin kuva voi olla tulkittavuudeltaan vaikea, jos sen informaatio sisältö ei aukea analysoijalle. Kuvasta tehtyjen tulkintojen tasot voidaan määrittää seuraavalla tavalla [104]:

- **Havainnointi:** Kohteen löytäminen kuvasta ilman sen tunnistamista. Esimerkiksi ajoneuvo tai ajoneuvoja tietyllä alueella.
- **Visuaalinen tunnistaminen:** Kohteesta voidaan erottaa sille ominaisia piirteitä. Esimerkiksi onko kyseessä kuorma-auto vai panssarivaunu, hävittäjä vai kuljetuslentokone.
- **Identifiointi:** Kuvasta voidaan erottaa tarkasti, mikä kohde on kyseessä. Esimerkiksi kohteesta voidaan tunnistaa, onko kyseessä Sisu E13 vai Sisu SA-150.
- **Tekninen analyysi:** Kohteesta voidaan erotella spesifejä ominaisuuksia. Esimerkiksi panssarivaunussa on reaktiivipanssari tai helikopteri on kalustettu AIM-9 Sidewinder -ohjuksilla.

Tutkakuvan tulkittavuuteen liittyy sen laatu, jota määrittävät sen tekniset ominaisuudet ja käytettävyys. Teknisiä ominaisuuksia ovat esimerkiksi GSD (Ground Sampling Distance), MTF (Modulation Transfer Function) ja SNR (Signal to Noise Ratio) [105]. Kuvien käyttäjät eivät välttämättä ymmärrä näiden teknisten arvojen vaikutusta esimerkiksi kuvan tulkittavuuteen ja käytettävyuteen. Tästä syystä on laadittu erilaisia standardeja helpottamaan käyttäjien toimintaa. Näihin standardeihin lukeutuvat esimerkiksi Johnsonin kriteeristö, STANAG 3769 ja STANAG 7194, joka tunnetaan myös NIIRS-skaalana (NATO Imagery Interpretability Rating Scale).

Johnsonin kriteeristö on yksi ensimmäisistä, parhaiten tunnetuista ja edelleen käytössä olevista tavoista määrittää kuvan laatua. John Johnson kehitti sen Yhdysvaltojen armeijalle 1950-luvulla optisten ja elektro-optisten sensorien suorituskyvyn arviointimenetelmäksi. Metodi oli yksinkertainen. Kohde vietiin radalla niin kauas, kunnes se kyettiin juuri ja juuri havaitsemaan. Viivakuviollinen taulu vietiin samalle näkökentälle. Taulun viivojen spatiaalitaajuutta kasvatettiin siten, että ne häidin tuskin erottuivat kohteen etäisyydeltä. Spatiaalitaajuus eli juuri erotettavien viivojen määrä kyseiselle kohteelle oli määritetty kenttäkokeiden avulla. Johnsonin kriteeristön laatutaulukko on kuvattu liitteessä 14. Taulukosta voi nähdä eri tulkittavuuden tasoille tarvittavan linjaparin (valkoinen - musta) määrän. Samaa menetelmää käytettiin kaikkien kuvan tulkittamisen tasoille (ks. kuva 25). [106]



Kuva 25: Johnsonin kriteeristön metodi [107]

Johnsonin kriteeristö on ollut pitkään käytössä optisten ja elektro-optisten sensorien arvioinnissa. Sitä on kuitenkin kritisoitu epätarkkuudesta. Kritiikki kohdistuu sellaisiin osiin, joita kriteeristössä vähätellään tai ei huomioida. Esimerkiksi seuraavia asioita ei huomioida: taustan sekavuuden astetta, mittaavan henkilön ominaisuuksia, sääolosuhteita, kohteen muotoa, kohteen sijaintia, värien vaikutusta, useiden kohteiden vaikutusta ja arviontiin annetun ajan vaikutusta. [106]

Johnsonin kriteeristö on kehitetty ja ollut käytössä laboratorio-olosuhteissa. Olosuhteet todellisessa maailmassa ovat merkittävästi erilaiset. Tällöin kriteeristön hyödyllisyyttä muuhun kuin yksittäisten sensorien arviointiin voidaan kritisoida. [106]

NATO on standardisoinut kuvan tulkittavuuden sen määrittämiseksi, ovatko kuvat tarpeeksi laadukkaita niiden analysoimiseksi. Kirjallisuudessa esiintyy vielä monissa paikoin vanha STANAG 3769, jonka on korvannut STANAG 7194. Liitteestä 14 löytyy molempien standardien esimerkit. Merkittävin ero näiden kahden standardin välillä on niiden tapa lähestyä tulkittavuutta. Vanhempi standardi nojaa Johnsonin kriteeristön tapaisesti minimiresoluutioon. Uudemmassa standardissa erotellaan ensinnäkin erilaiset sensorioptiot sekä jaetaan tulkittavuuden asteet kohteiden perusteella.

STANAG 7194 eli NATO Imagery Interpretability Rating Scale (NIIRS) on arviointiväline, jonka tarkoituksena on vakioida kuvien laadun arviointi tiedustelua varten. Sen tähtäimenä on helpottaa koalitiovaltioiden yhteistyötä sekä tiedon jakamista ja yhteensopivuutta niiden tiedustelu- ja valvontajärjestelmissä. Yhtenäisen arvioinnin ansiosta voidaan perustaa kuvakirjastoja, joista jäsenmaat voivat luotettavasti hakea dataa. [108]

NIIRS luokittelee jokaisen sensorityypin kohdalla kuvat niiden laadun mukaisesti 10 tasoluokkaan. Numeraalisesti ne on jaoteltu 0-9 välille, ja laatu paranee siirryttäessä kohti korkeinta luokkaa 9. NIIRS-aulukosta löytyy esimerkki liitteestä 11, joka sisältää tasoluokat ja niiden luokittelusisällöt. Liitteen versiossa on myös alkuperäisen standardin lisäksi kullekin tasolle arvio tarvittavasta resoluutiosta. Kyseisen arvion tuottamisesta on vastannut Federation of American Scientists (FAS). Arviointi tehdään useasta yksittäisestä kohdasta kuvaa ja näin saatujen tulosten keskiarvo kertoo kuvan laatuluokan. Kuvan kohteiden keskiarvottamisen lisäksi NIIRS noudattaa seuraavaa ohjetta luokittelussa: [108]

- Jos kuvan kaikki kohteet täyttävät tason 5 kriteerit ja lisäksi ainakin yksi kohteista täyttää tason 6 kriteerit, luokitellaan kuva NIIRS-tasolle 6.

- Jos kuvan kohteista suurin osa, mutta eivät kaikki, täyttää tason 5 kriteerit ja ainakin yksi kohde täyttää tason 6 kriteerit, luokitellaan kuva NIIRS-tasolle 5.

NIIRS-asteikko valikoitui tämän tutkimuksen kuvien arviointimenetelmäksi sen soveltuvuuden takia.

4.5 Kohde

Alaluvussa 4.1 ja taulukossa 4 käsiteltiin, mitä informaatiota mahdollisesti kuvaustiedustelulla pyritään saamaan. Erilaiset kohteet johtavat erilaisiin analyyseihin ja tarkemmalla tiedolla voidaan suorittaa tehokkaampia sotilasoperaatioita. Järjestelmän suorituskyvyllä ja tulosten tarkkuudella on myös merkitystä tiedusteluprosessin suunnitteluvaiheessa, kun tavasta tiedon hankkimiseksi päätetään. Tämän tutkimuksen lähtökohtana ei ole selvittää, mitä erilaisia tiedusteluoperaatioita SAR-tutkasatelliiteilla voidaan suorittaa. Tarkoituksena on arvioida niiden suorituskykyä rajatun esimerkin valossa, jolloin tiedusteltavaksi kohteeksi valitaan yleisesti eri kohteissa esiintyvä maavoimien elementti, kuorma-auto.

Maavoimien operaatioiden edellytyksenä on mahdollisuus kuljettaa joukkoja ja materiaalia maastossa. Kuorma-auto on yleisesti hyödyllinen ajoneuvo, koska sillä voidaan siirtää henkilöitä sekä ammuksia, ruokaa, vettä, polttoainetta ja muita hyödyllisiä tarvikkeita joukoille. Sotilaskuorma-autot suunnitellaan kestäväksi ja liikkumaan paremmin maastossa kuin niiden siviilivastineet. ResearchandMarkets.com:in mukaan kuorma-autojen valmistuksen odotetaan kasvavan neljänneksellä vuoteen 2027 mennessä johtuen nykyaikaisten maavoimien vaatimuksista. Kuorma-auto valikoitui tutkittavaksi kohteeksi sen esiintyessä yleisesti lähestulkoon kaikessa maavoimien sotilaallisessa toiminnassa. [109]

Tutkimuksessa arvioidaan suomalaisen SISU E11T-8x8 -kuorma-auton havaitsemista (ks. kuva 26). Valinnan perusteluna ovat kyseisen kuorma-auton ominaisuudet, jotka vastaavat tutkijan mielestä yleisesti muidenkin asevoimien käyttämiä kuorma-autoja. SISU soveltuu yleisesti eri aselajien tukeviin tehtäviin. SAR-tutkasatelliitilla kaksiulotteisia kuvia luotaessa kohteen pituus ja leveys vaikuttavat sen havaittavuuteen. Myös kohteen karheus vaikuttaa takaisinsirontaan, jolloin sen muodossa olevat korkeuserot näkyvät tutkakuvassa. Tämä tarkoittaa sitä, että esimerkiksi SISU E11 -kuorma-auton tapauksessa lavetin päällä oleva kontti voi vaikuttaa sen havaittavuuteen tutkakuvantamisessa. Arvioinnin yksinkertaistamiseksi tutkimuksessa keskitytään kohteen pituuteen ja leveyteen. SISU E11T-8x8 -sotilaskuorma-auton mitat ovat: pituus 8,57 metriä ja leveys 2,55 metriä. [110]

Tutkimuksessa käytetyt kuvat ovat julkisista lähteistä, joten varsinaisesti niistä ei kyetä arvioimaan tarkasti juuri kyseisen ajoneuvon havaittavuutta. Valittu kohde on kuitenkin luonteeltaan (mitat, muoto) niin yleinen, että kuvista tehtyjä havaintoja voidaan tietyillä asteilla yleistää. Arviointi perustuu kohteiden havainnointiin ja tunnistuksiin kuvista. Vertailua voi tapahtua täten esimerkiksi saman mallisten ja kokoisten kappaleiden välillä.

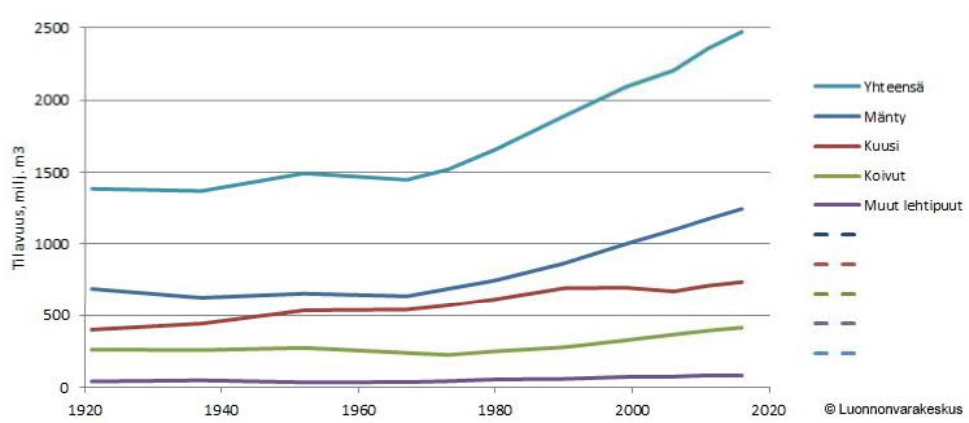


Kuva 26: SISU E11 8X8

4.6 Suomalainen metsä

Metsä on perinteisesti tarjonnut suojaa sotajoukolle tiedustelulta. Eteenkin tiheä latvusto tarjoaa näköesteen ilmasta tehdylle kuvaustiedustelulle. Optiseen ja elektro-optiseen tiedusteluun verrattuna tutkatiedustelulla voidaan yrittää läpäistä latvuston suoja. Suomessa esiintyy paljon erilaista metsää ja sen laatu vaihtelee alueittain. Metsätyyppi vaikuttaa sen tarjoamaan suojaan.

Suomen luonnonvarakeskuksen sekä maa- ja metsätalousministeriön mukaan Suomen maapinta-alasta noin 70% on metsää [111]. Puustosta noin 50% on mäntyä, 30% kuusta ja 16% koivua [112]. Metsän tilavuus ja laatu vaihtelevat Suomessa alueittain. Liitteessä 15 on havainnollistettu eri puulajien esiintyminen tilavuuden mukaan Suomessa. Kokonaisuutena kuvista voidaan päätellä, että eteläinen Suomi on pohjoista tiheimmin biomassan peitossa. Alla olevassa kuvassa on esitetty puustolajeittain tilavuuden muutos vuosien 1920 - 2017 välillä. Suomessa metsäpolitiikan tavoitteena on ylläpitää kestävästi metsien määrää tuleville sukupolville [113].

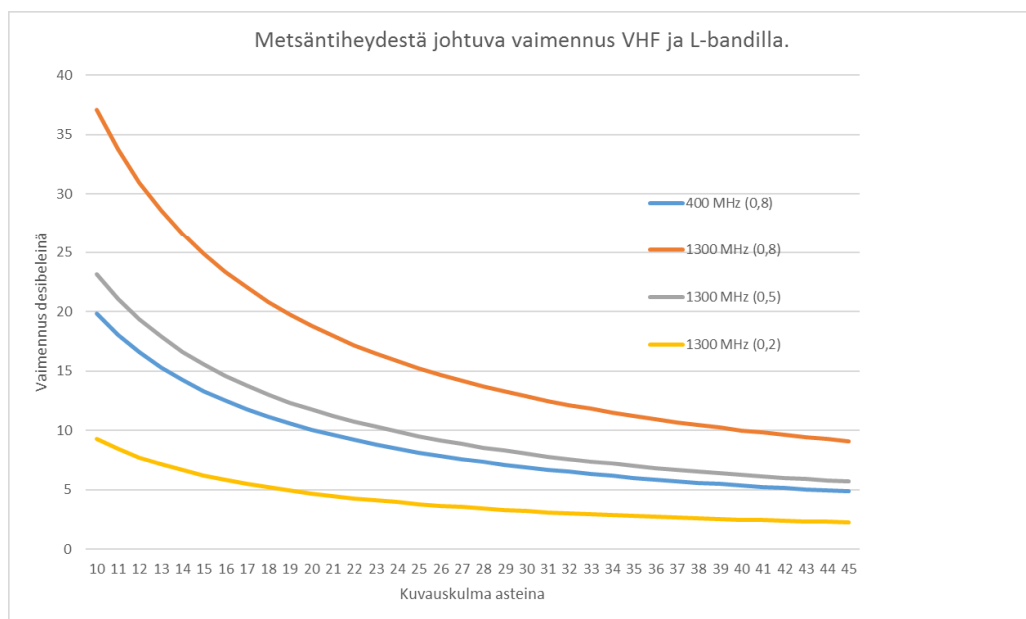


Kuva 27: Suomen puustolajien määrän kehitys vuosina 1920 - 2017 [114].

Puulajilla on peitteisyyden kannalta merkitystä. Esimerkiksi männyn ja kuusen latvuston tiheys suhteessa runkojen massaan eroaa merkittävästi toisistaan. Kuusipuissa yleisesti muodostuu enemmän massaa oksistoon suhteessa runkoon, mutta mäntyjen neulaset levittyvät suuremmalle pinta-alalle latvuston huipulla.

SAR-tutkasatelliitteja käytetään paljon metsätutkimuksessa. Se liittyy yleensä metsätalouteen tai ympäristön tutkimiseen, jossa pääasiallisesti pyritään selvittämään metsien sen hetkistä määrää tai muutosta. Tällöin sähkömagneettisen säteilyn ei välttämättä tarvitse läpäistä latvustoa, vaan pinta- ja volyyymisironnan avulla selvitetään biomassan määrää. Tästä syystä metsään liittyvissä SAR-tutkimuksissa yleisimmät käytössä olevat taajuusalueet ovat C- ja L-taajuuskaisat. Julkisia aineistoja, joissa SAR-tutkan avulla on tutkittu biomassan alla olevia kohteita, on heikosti saatavilla. [12]

Latvustossa tapahtuvan pinta- ja volyyymisironnan vähentyessä pienenee myös signaalin vaimeneminen. Luonnollisesti tiheät metsät aiheuttavat enemmän vaimennusta kuin harvat metsät. DARPA:n (Defence Advanced Research Projects Agency) rahoittamassa ja MIT:n (Massachusetts Institute of Technology) toteuttamassa tutkimuksessa selvitettiin VHF- ja UHF-taajuusalueiden kahdensuuntaista vaimenemista kasvuston läpi. Niiden pohjalta valmistettiin empiirinen malli, jonka avulla voidaan arvioida vaimenemisen määrää eri kuvauskulmilla ja taajuuksilla (ks. Kuva 28). [115]



Kuva 28: Metsäntiheydestä johtuva vaimennus eri kuvauskulmilla 400MHz ja 1300MHz keskitäajuuksilla.

Mittaukset toteutettiin neljän vuoden välillä viidessä eri osavaltiossa. Tutkaheijastimet asennettiin latvuston alapuolelle metsiin, joissa kasvoi sekä lehti- että havupuita. Sensoreissa käytettiin VHF, UHF, C- ja L-taajuuskaistoja HH- sekä VV-polarisoinneilla. Maa-alueen kauttaaltaan kattavassa empiirisessä mallissa huomioitiin ainoastaan yhtenäiset metsät. Yllä olevassa grafiikassa on käytetty lähteenä Yhdysvalloissa toteutettua tutkimusta, jossa arvioitiin myös metsän tiheyden asteen vaikutusta. [115][29]

Vaimennusta voidaan arvioida kaavalla: [115]

$$Vaimennus = \frac{\alpha(f_c)^\beta}{\sin(\theta)}$$

Kertoimien arvot saadaan alla olevasta taulukosta. Arvot tulevat HH ja VV polarisointien prosentuaalisista pisteistä. Laskennoissa on käytetty 50% mediaani arvoa. [115]

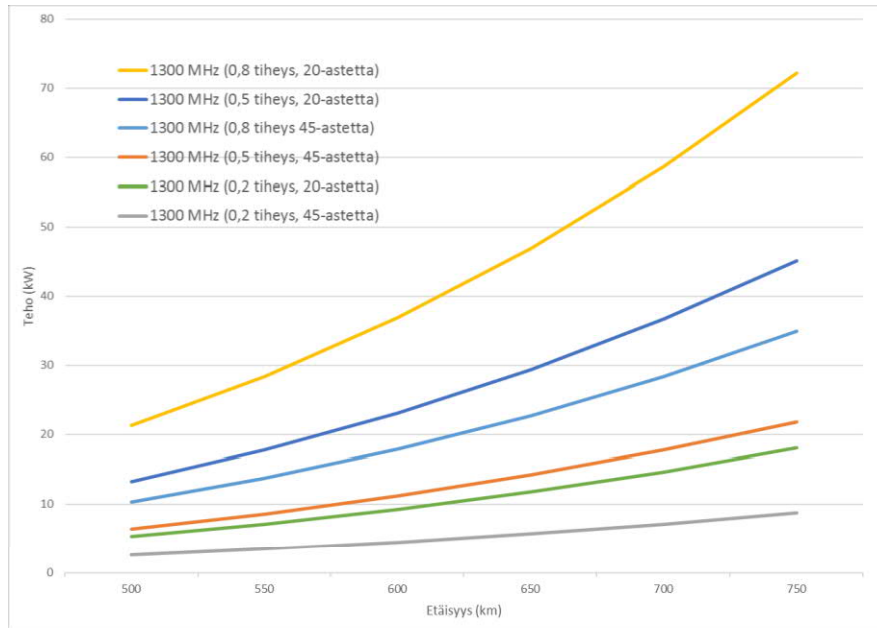
Pol.	20 %		50 %		80 %	
	α	β	α	β	α	β
HH	0,08	0,59	0,18	0,53	0,19	0,56
VV	0,21	0,47	0,3	0,47	0,32	0,5

Taulukko 9: Säteilyn vaimenemiskertoimet metsässä

Metsän tiheyden D_f vaikutus kertoimeen α : [29]

$$\alpha_{DF} = D_f \alpha$$

Metsän tiheyden ja vaimennuksen vaikutusta SAR-tutkasatelliitin ominaisuuksiin voidaan arvioida käyttämällä tutkayhtälöä. Tarvittava keskiteho voi osittain määritellä tutkan ja satelliitin ominaisuuksia. Tehon hallinnalla voidaan muun muassa vaikuttaa satelliitin elinkaareen ja hintaan. Kuvassa 29 on esitetty, miten kuvauskulma ja metsän tiheys vaikuttavat tarvittavaan keskitehoon. Kuvaa tulkittaessa kannattaa huomioida, että etäisyyden kasvamisella on merkittävä vaikutus tehotarpeen lisääntymiseen.



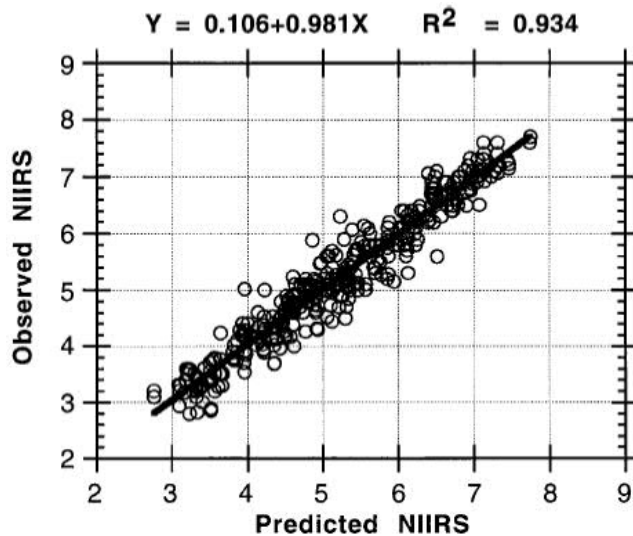
Kuva 29: Keskiteho 1300MHz:n taajuudella metsää läpäistäessä

Kuvista 28 ja 29 voidaan havaita, miten kuvauskulman kasvattaminen vähentää vaimennusta ja tällöin myös vähentää tehon tarvetta. Kuvauskulmassa on huomioitava, että kyseessä ei ole off nadir -kulma, vaan kulma satelliitin tasosta. Tiheydellä on myös merkittävä vaikutus säteilyn vaimenemiseen. Kuvauskulma luonnollisesti vaikuttaa läpäistävän biomassan määrään ja suoremilla kuvauskulmilla voidaan vähentää volyyymisironnan määrää.

Kuvan 29 laskennan tuloksia joudutaan arvioimaan kriittisesti, sillä säteilyn läpäisyn arviointiin käytetty empiirinen malli on alun alkaen kehitetty mittauksilla, jotka on suoritettu lentokoneista. Toisekseen tiheyden vaikutusta kertoimiin on arvioitu puhtaasti simuloimalla. Laskennassa käytettyä tutkayhtälöä on muokattu siten, että kohinassa huomioidaan metsän ja avoimen tilan vaimennukset. Tutkajärjestelmän tuottamaa vaimennusta ei ole huomioitu. Antennin vahvistus on optimoitu 1300 MHz taajuudelle ja 1,125 m² antennille. Tutkapaikkipinnassa on käytetty laskennallista arviota lava-autosta [25]. Vaikka suoritettussa laskennassa on muutamia sen luotettavuutta heikentäviä muuttujia, voidaan tuloksia pitää havainnollistavina. Liitteessä 24 on havainnollistettu, miten laskentaa on suoritettu Excel -ohjelmistolla.

4.7 GIQE (The General Image Quality Equation)

The General Image Quality Equation (GIQE) on Yhdysvaltojen Image Resolution Assessment and Reporting Standards (IRARS) -komitean laatima työkalu, jonka avulla voidaan ennustaa kuvamateriaalin NIIRS-taso. Laadun arviointi tulee vastaan muun muassa sensorien ominaisuuksia suunniteltaessa, jolloin valmistajat tähtäävät tiettyihin NIIRS-arvoihin. GIQE ennustaa kuvan NIIRS-tason käyttäen sen kuvasuhdetta, terävyyttä, resoluutiota ja SNR-suhdetta. Kvantulkin tapahtuu lähtökohtaisesti ihmisten toimesta, joten GIQE:n kehittämisessä oli apuna kuvantulkinnan ammattilaisia tuottamassa vertailudataa arviointimenetelmälle. Malli validoitiin käyttämällä 359:ää NIIRS-arvioitua valokuvaa. Ennustettujen NIIRS-arvojen ja tulkittujen NIIRS-arvojen kuvaajasta (ks. Kuva 30) voidaan havaita, että ennustetut arvot ovat hyvin lähellä tulkittuja arvoja. [117]



Kuva 30: Ennustetun NIIRS-arvon suhde tulkittuun NIIRS-arvoon [117].

GIQE-mallia on pääsääntöisesti käytetty optisten ja elektro-optisten kuvamateriaalien arvioinnissa. Sen käyttöä SAR-tutkien arvioinnissa on tutkittu, mutta täysin validoitua mallia ei ole. Tässä tutkimuksessa käytetään sovelletusti yksinkertaistettua GIQE-mallia. Arviot ovat puhtaasti teoreettisia ja niihin tulee suhtautua tarvittavalla kritiikillä. Yksinkertaistettu NIIRS-arvio saadaan laskentakaavalla: [105]

$$NIIRS = A_{sys} - a * \log_{10}(GSD) + b * \log_{10}(RER) - 0,344/SNR$$

A_{sys} -arvo saadaan sensoriperusteisesti. Optisille järjestelmille A_{sys} -arvo on 10,251 ja infrapunajärjestelmille 10,751 [105]. Tutkimuksessa on suhteutettu A_{sys} -arvo tutkajärjestelmille ja mitoitettu myös kuvaamaan tutkijan kykyä tulkita tutkakuvia, jolloin laskennassa käytetty arvo on 10. Ground Sampling Distance (GSD) on vierekkäisten pikselien keskustojen välinen

etäisyys tuumissa. GSD vastaa 72 prosenttia arviotuloksesta [105]. Tässä tutkimuksessa on käytetty SAR-metadatatusta saatua pikselien välistä arvoa. Relative Edge Response (RER) on kuvan sumearvo. RER vastaa 20 prosenttia arviotuloksesta [105]. Laskennassa on käytetty kaikkien kuvien kohdalla arvoa 0,7. SNR vastaa ainoastaan 1 prosenttia arviotuloksesta [105]. Kertoimet a ja b ovat riippuvaisia RER-arvosta ja sen ollessa 0,7 käytetään a:ssa arvoa 3,16 ja b:ssä arvoa 2,817.

5. SAR-KUVIEN VERTAAMINEN JA RESOLUUTION TODENTAMINEN

SAR-tutkakuvan käytettävyyden todettiin aiemmin olevan riippuvainen sen tulkittavuudesta. Tässä luvussa on arvioitu julkisista lähteistä saatua SAR-dataa ja niiden tulkittavuutta käyttäen likimääräistä GIQE-arviointia ja kuvantulkintaan NIIRS-kriteereitä. Tuloksiin tulee suhtautua tarpeellisella kriittisyydellä huomioiden käytetty GIQE-työkalu ja tutkijan ammattitaito tutkakuvan tulkinnessa.

Kuvat arvioitiin seuraavalla menettelyllä:

1. QIGE- laskenta käyttäen alaluvun 4.7 GIQE laskentatapaa
2. SNAP-työkalulla SAR-georeferointi
3. Informaation keruu alueesta muista lähteistä (esim. Google Earth)
4. Arvioitavien kohteiden valinta
5. NIIRS-arviointi merkatuista kohteista STANAG 7194 mukaisesti
7. Tulosten vertailu (GIQE arvio vs. tulkinta vs. lähteen arvot)

SAR-datan käsittelyssä käytettiin SNAP 7.0 -ohjelmistoa. ESA vastaa ohjelmiston kehittämisestä. Ohjelmisto on ensisijaisesti suunniteltu käsittelemään ESA:n SENTINEL-sarjan satelliittien kuvamateriaalia, mutta siihen on luotu työkalut muiden tuottajien materiaalin käsittelyyn. Satelliiteilla tuotetut kuvat ovat pääsääntöisesti suurikokoisia ja sisältävät paljon dataa, joten vastaavan työkalun käyttö on esimerkiksi SAR-datan kanssa pakollista. Datan käsittelyn jälkeen kuvia pystytään tallentamaan pienempinä otoksina. SNAP 7.0. on vapaasti saatavilla ESA:n omilta sivuilta. [118]

Kaikki tutkimuksessa käytetty SAR-data on kerätty julkisista lähteistä. Dataa kerättiin suoraan tuottajien sivustoilta ja tietokannoista. ICEYE:n ja TERRASAR-X -satelliittien dataa voitiin ladata suoraan verkosta tuottajien omilta sivuilta [119][120]. Lisäksi SENTINEL, TERRASAR-X ja ALOS PALSAR -satelliittien dataa ladattiin ESA:n Copernicus Open Access Hub:ista, Alaska Satellite Facility:sta ja ESA:n Third Party Mission tietokannasta [121][122][123]. Tietyn alueen tarkkoja kuvia halutessa joudutaan normaalisti maksamaan kuvan tuottajalle palkkio. Tutkimuksen luonteen takia julkisen SAR-datan avulla voitiin tehdä riittävät johtopäätökset.

GIQE-laskentaa varten käytettiin SAR-metadatatista saatuja arvoja. GSD-arvo voidaan yrittää mitata pikselien keskustojen väliltä käyttäen ohjelmiston omaa työkalua, mutta laskennassa käytetään ohjelmiston tarjoamaa mediaaniarvoa (ks. kuva 1, LIITE 16). SNR-arvo saadaan SNAP-työkalulla SAR-metadatatista. Laskennassa käytetään saatua nimellistä SNR-arvoa (ks. kuva 2, LIITE 16). Nimellinen SNR on sensorin tavoiteluku, johon se pyrkii tutkimuksen aikana. Laskennan tuloksena saadaan arvio mahdollisesta NIIRS-tasosta.

SAR-dataa käsitellään sen tulkittavuuden helpottamiseksi. Aluksi kuvamateriaali georeferoidaan. Kuva asetetaan UTM/WGS 84 -karttaformaattiin ja orientoidaan tutkijalle helposti seurattavaan muotoon (ks. kuvat 3 ja 4, LIITE 16). Tällöin karttapohjoinen vastaa napapohjoista ja kuvamateriaalia on helpompi verrata esimerkiksi muihin karttapalveluihin.

Kuvattava alue on yleensä selvästi merkattu julkaisijan palvelussa. Tarvittaessa voidaan kuitenkin tukeutua SNAP:n työkaluihin ja selvittää kuvan sijainti (ks. kuvat 5 ja 6, LIITE 16). Tämä helpottaa muun muassa muihin lähteisiin vertaamista.

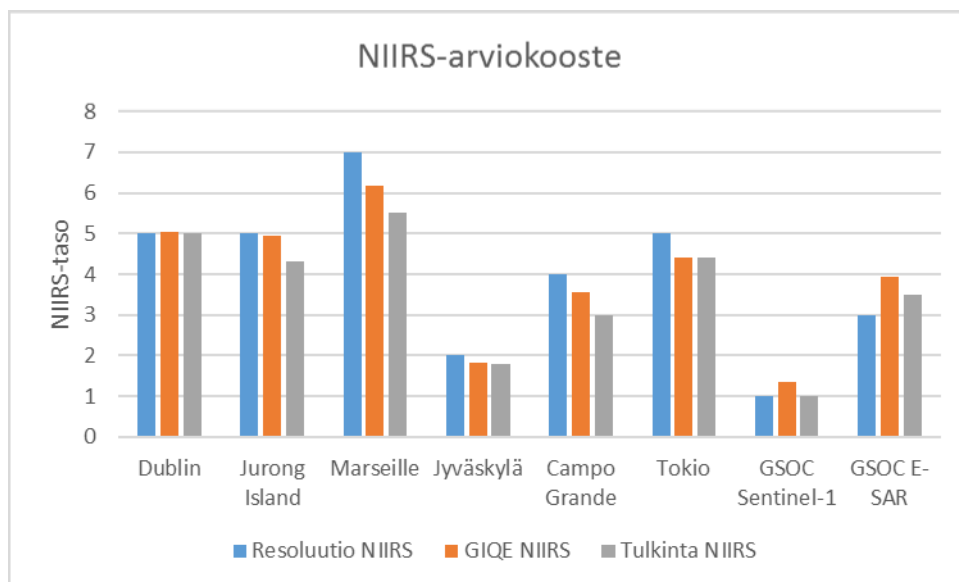
Arviointikortille kirjattiin myös SAR-metadatatista resoluutio, keskitaajuus ja kaistanleveys (ks. kuvat 7, 8 ja 9, LIITE 16). Myös polarisaatio ja kuvantamistapa ovat kirjattuina arviointikorttiin. Nämä tiedot saadaan myös metadatatista, mutta ne ovat yleensä selvästi kirjattuna joko kuvan tiedostonimessä tai julkaisusivustolla.

Kuvista tehdyt arviot sijaitsevat liitteiden 17 ja 23 välillä. Jokaisen liitteen ensimmäisellä sivulla löytyy arviointikortti, josta ilmenevät kuvan perustiedot. Arviointikortin loppuun on merkitty liitteen 14 mukainen NIIRS-taso, GIQE-laskennallinen NIIRS-taso ja tutkijan tulkintaan perustuva NIIRS-taso. Tämän jälkeen on esitetty arvioitu kuvamateriaali.

SAR-datasta tehdyn arvioinnin perusteella voidaan puuston suojasta havaita seuraavat asiat. Puuston suoja vaikuttaa kaikilla taajuuskaistoilla. Varsinaisesti kohteiden havaitsemiseen puuston latvuston alta ei voi saada varmuutta. Satelliittien etäisyydestä ja puustosta tapahtuvasta sironnasta johtuen palautuva säteily on vaikeasti tulkittavaa. Harvapuuisilla alueilla havaitseminen voi joskus onnistua.

NIIRS-tasolla 6 tulisi pystyä koon ja muodon puolesta tunnistamaan kuorma-auto. Tämä todennäköisesti onnistuu myös kokemattomalta tulkitsijalta, mutta teknisiä tarkennuksia varten tarvitaan enemmän kokemusta. Kuorma-auton havaitsemiseksi tarvitaan tutkijan kokemuksesta vähintään NIIRS-taso 3. Tällä tasolla kohde voi olla myös samaa kokoa ja muotoa muistuttava. Tällöin kohteen on sijaittava avoimella alueella ja tulkitsijalla tulee olla riittävästi ennakkotietoa alueesta.

Eri NIIRS-tasolle on annettu FAS:n toimesta myös resoluutioarvio. Kuorma-auton havaitsemiseksi resoluution tulee olla vähintään 2,5m. Tällöin alueesta johtuvaa häiriötä ei saa kuvassa olla paljoa. SNR-suhde oli noin 25 dB:iä kuvissa joissa suhteellisen varmoja havaintoja kyettiin tekemään.



Kuva 31: NIIRS-arviokooste

Kuvassa 31 on esitetty kuvaajana miten eri laadun arviointiarvot eroavat toisistaan. Kyseisellä otannalla GIQE-laskennalla ja FAS:in resoluutioon perustuvalla arvolla ei muodostu suurta eroa. Keskihajonta mittausten välillä vaihteli likimääräisesti 0,02 - 0,60 välillä. Pienellä otannalla todettuna GIQE-laskentaa voidaan käyttää kuvanlaadun ennustamiseen myös SAR-tutka-kuvissa.

6. JOHTOPÄÄTÖKSET

6.1 Tutkimuskysymykset

Tutkimuksen pääkysymykseen etsittiin vastauksia seuraavilla tukikysymyksillä:

- Mikä on tarvittava spatiaalinen resoluutio kohteen havaitsemiseksi?
- Miten SAR-tutka toimii metsän ja sen läpi kuvantamisessa?
- Miten SAR-tutkasatelliitin kiertorataominaisuudet vaikuttavat kohteen havaitsemisessä?
- Mitkä SAR-tutkan ominaisuudet vaikuttavat sen resoluution muodostamisessa?

SAR-tutkakuvaamisessa voidaan parantaa kuvan resoluutiota vaikuttamalla tutkan ominaisuuksiin. Suurentamalla kaistanleveyttä voidaan parantaa pituussuunnan resoluutiota. Korkealaatuisissa tutkakuvissa käytetään usein 300 MHz:n kaistanleveyttä, jolloin pituussuunnan resoluutio on yleensä alle metrin luokkaa. Atsimuuttisuunnan resoluutioon vaikutetaan kasvattamalla tutkan synteettistä apertuuria. Fokusoitua SAR-prosessointia käyttäessä antennin lyhentäminen parantaa resoluutiota. SAR-tutkasatelliittien nopeuden ja etäisyyden takia joudutaan antennin koossa huomiomaan palautuvan sironnan monikäsitteisyys. Tällöin antennia ei voida äärettömästi lyhentää signaalin erottelun takia. Atsimuuttiresoluutiota voidaan parantaa lyhentämällä aallonpituutta ja kasvattamalla integraatiokulmaa.

Integraatiokulmaan vaikutetaan vaihtamalla SAR-tutkasatelliitin kuvaustapaa. Kuvantamistavat varioituvat pääsääntöisesti Stripmap, ScanSAR ja Spotlight -moodien eri versioina. Spotlight-moodi soveltuu parhaiten korkean resoluution tutkakuvien muodostamista varten. Tällöin kuitenkin kuvausala pienenee. Nykyaikaiset X-kaistalla otetut korkean resoluution Spotlight-kuvat ovat resoluutioltaan noin 0,25-1 metriä ja kattavat noin 5x5 neliökilometrin alueen. Koska säteilyä ohjataan kohdistetulle alueelle, jää sen ulkopuolella olevat asiat kuvantamatta.

Ympäristöllä on suuri merkitys kohteen havaitsemisessa SAR-tutkasatelliitilla. Kuvaa tulkittaessa alueen karkeus saattaa vaikuttaa esimerkiksi siihen, voiko kohteen erottaa muista sitä muistuttavista kohteista. Suuret karkeuserot kohteen ja sen ympärillä olevan alueen välillä ovat kohteen havaitsemista helpottava tekijä. Ajoneuvo on huomattavasti helpompi havaita tyhjältä parkkipaikalta, kuin esimerkiksi täynnä kojuja olevalta torilta.

Suomessa merkittävä osa ympäristöstä ovat metsät. Lisäksi rakennetuilla alueilla sijaitsee puistoja, jotka ovat ainakin osin puuston peitteessä. Puuston laatu, tiheys ja siinä oleva kosteuden määrä vaikuttavat sähkömagneettisen säteilyn sirontaan. Mäntymetsässä biomassan kasvaminen vaikuttaa lineaarisesti sironnan kasvuun aina 100-200 tonnia/hehtaari asti. Kosteuden määrä latvustossa kasvattaa sirontaa, jolloin sen alapuolella olevien kohteiden sironnan merkitys laskee. Myös maaperän kosteus vaikuttaa sirontaan, mutta metsän tiheyden ylittäessä 1,3 kg/m³ maaperän kosteudella ei ole enää merkitystä. Biomassan määrä vaikuttaa suoraan tutkan säteilyn läpäisykykyyn. Suomessa metsän biomassan määrä kasvaa etelä- ja kaakkoisalueilla. Tällöin läpäisevän SAR-tutkan suorituskyky paranee teoreettisesti pohjoisemmilla leveyspiireillä.

Metsän latvuston läpäisemiseen voidaan vaikuttaa vaihtamalla tutkan aallonpituutta, kuvauskulmaa ja polarisaatiota. Lyhyillä aallonpituuksilla latvustosta ja rungosta johtuva pinta- sekä tilavuussironta ovat voimakkaampia kuin pidemmällä aallonpituuksilla. Pidemmällä aallonpituuksilla saadaan siis enemmän sirontaa latvuston alapuolelta. Läpäisevissä tutkissa käytetään normaalisti L-taajuuskaistaa. Kuvauskulmalla on merkittävä vaikutus säteilyn läpäisyyn. Loivemmillä kuvauskulmilla latvustossa tapahtuva volyymsironta kasvaa, jolloin SAR-tutkalle palaavan säteilyn vaimennus kasvaa. Jyrkemmillä kuvauskulmilla päästään parempaan pituussuunnan resoluutioon ja pienempään metsästä johtuvaan vaimenemiseen. Polarisaation valinnalla voidaan vaikuttaa tutkan herkkyyteen havaita läpäisyä säteilyä. Yksittäispolarisoidulla tutkalla (HH, VV) päästään parempaan latvuston läpäisyyn verrattuna ristiin polarisoituihin tutkiin.

SAR-tutkasatelliitin toiminnassa on huomioitava sen kiertoradan vaikutukset. Kiertoradan ominaisuuksista etäisyys ja inkliinaatio vaikuttavat satelliittitutkakuvantamisessa. Korkea etäisyys ja nopeus suhteessa kuvattavaan kohteeseen lisäävät satelliitin tehovaatimuksia. Tiettyyn resoluutioon tähdätessä muokattavaksi jäljelle jäävä ominaisuus tutkalla on sen lähetysteho. Lähetystehon lisääminen vaikuttaa satelliitin rakenteeseen ja kasvattaa sen kokoa ja hintaa. Inkliinaatio vaikuttaa SAR-tutkakuvantamisessa ajalliseen resoluutioon. Yleensä SAR-tutkasatelliitit ovat aurinkosynkronisella kiertoradalla. Tällöin ne ovat noin 97-98 asteen inkliinaatiolla ja LEO-kiertoradalla. Tämä tarkoittaa, että samalta alueelta voidaan saada kuvaustuloksia 12 tunnin välein. Ajallista resoluutiota voidaan pienentää merkittävästi muodostamalla satelliiteista konstellaatioita. Tällöin useampia satelliitteja asetetaan samalle kiertoradalle, jolloin satelliittijärjestelmän aikaviive kuvantamisessa pienenee. Konstellaatioiden hinta nousee satelliittien määrän lisääntymisen myötä.

Kuvaustehtävä asettaa vaatimukset SAR-tutkakuvan informaatioisisällölle ja riippuu vallitsevasta tilanteesta sekä siitä, millä sodankäynnin tasolla kuvia tullaan hyödyntämään. Resoluution parantuessa voidaan havaintojen lisäksi tehdä kohteista tunnistuksia. Tällöin analyysin tuloksena voidaan jopa paikallistaa tietty joukko tarkasti alueelle. Havaintojen perusteella voidaan esimerkiksi tehdä johtopäätöksiä alueella olevan joukon koosta. Kuvaustehtävä siis määrittää pitkälti mistä alueesta kuva otetaan ja mitä kohteita kuvasta pyritään erittelemään. Saatu informaatioisisältö vaikuttaa kuinka helposti kuvasta voidaan tehdä tulkintoja.

Kuvaustehtävän laatu vaikuttaa maalittamisprosessille varattuun aikaan. Maalittamisprosessin vaiheiden väliä kaventamalla voidaan parantaa mahdollisuutta vaikuttaa kohteeseen. SAR-tutkakuvantamisessa voidaan päästä reaaliaikaisuuteen kuvan tuottamisessa loppukäyttäjälle, mutta tällöin signaalin prosessointia kevennetään kuvan laadun kustannuksella.

Kuvien tulkittavuus paranee mitä selkeämpiä ja tarkempia ne ovat, jolloin myös niiden käyttökelpoisuus lisääntyy. Resoluutio on siis tärkeä ominaisuus, mutta ei ainoa kuvan tulkittavuuteen vaikuttava muuttuja. Kuvan laatua voidaan luokitella eri arviointikriteerien perusteella. Tällöin kuvat voidaan luokitella niiden laadun perusteella ja helpottaa tulkitsijoiden työtä. GIQE-laskennalla voidaan yrittää ennustaa kuvan laatua.

SAR-tutkakuvien tulkitseminen vaatii koulutusta ja kokemusta. Hyvissä olosuhteissa kuvattujen yksinkertaisten kohteiden havaitseminen onnistuu melko harjaantumattomaltakin tulkitsijalta, mutta tarkkojen analyysien tekeminen vaatii kohteiden tuntemusta ja ammattitaitoa käsitellä SAR-dataa. NIIRS-kriteereillä kuorma-auto kyetään havaitsemaan tason 3 kuvasta ja tunnistamaan tason 6 kuvasta. Resoluutioperusteisesti jopa tason 7 kuvista voi silti olla todella vaikea tehdä tunnistuksia tai jopa havaintoja, jos kuvamateriaalissa on paljon häiriötä tai tulkitsijalla ei ole tarpeeksi informaatiota.

6.2 Pohdinta

Päätutkimuskysymys oli:

- Mikä on SAR-tutkasatelliitin suorituskyky paikallaan olevan kohteen havaitsemisessa metsämaastossa?

SAR-tutkasatelliittien merkittävin hyöty verrattuna optisiin ja elektro-optisiin satelliitteihin on niiden kyky tuottaa kuvamateriaalia riippumatta sää- tai valaisuolosuhteista. Tällöin havaittavien kohteiden on turvauduttava maaston antamaan suojaan tai turvallisiin jaksoihin, jolloin satelliitti ei kykene kuvaamaan aluetta.

Suomessa asevoimat voivat tukeutua metsän suojaan tiedustelun vaikeuttamiseksi. Puuston latvusto tarjoaa tehokkaan suojan SAR-tutkasatelliitteja vastaan. Latvuston aiheuttama pinta- ja volyyimisirona estää pääsääntöisesti sen alapuolella olevien kohteiden havaitsemisen. Aallonpituutta kasvattamalla päästään parempaan läpäisyyn, mutta tällöin resoluution heikkeneminen estää suurimman osan kohteiden havaitsemisesta. Latvuston läpäiseminen aiheuttaa myös tutkalähettimelle teknisiä vaatimuksia esimerkiksi kasvavan lähetystehon muodossa. Näiden teknisten vaatimusten täyttäminen voi olla liian kallista tai pienentää satelliitin elinkaarta.

Kuvan tulkitseminen tutkakuvasta perustuu tunnettujen muotojen etsimiseen kuvatulta alueelta. Avoimilla alueilla ja etenkin ”homogeenisilla” maastoalueilla kohteet erottuvat selvästi lyhyemmällä aallonpituuksilla. Valemaaleja valmistamalla voidaan pyrkiä hämäämään tutkakuvista tehtäviä tulkintoja. Valemaalien tutkavasteen tulisi tällöin kuitenkin vastata oletettavia asejärjestelmiä. Tutkaheijastimia käyttämällä voi olla mahdollista luoda oikeanlaisia vasteita, joilla SAR-tutkakuvan tulkitseminen hankaloituu tai aiheuttaa vääriä tulkintoja.

Laajojen alueiden seuraaminen onnistuu Stripmap-kuvausmoodilla. Nykyisten SAR-tutkasatelliittien tarjoamalla resoluutiolla voidaan tällöin tehdä avoimilla alueilla olevista kohteista havaintoja. Spotlight-moodia voidaan käyttää, kun halutaan saada tietyltä alueelta tarkempia tunnistuksia. Rajallisen kuvausalueensa takia Spotlight-moodin käyttäminen taktisessa kehityksessä vaatii käytännössä esitiedustelutietoja. Niiden perusteella tiedustelutehtävä voidaan rajata halutulle noin 5x5 neliökilometrin alueelle. Tiedot sotilaskohteet voivat helposti profiloitua tällaisiksi alueiksi, joita valitaan tarkemmalla kuvausmoodilla kuvattaviksi. Tällaisia ovat esimerkiksi tunnetut lentokentät, satamat ja sotilastukikohdat.

Yksittäinen aurinkosynkroniselle kiertoradalle asetettu SAR-tutkasatelliitti kykenee kuvaamaan samaa aluetta noin 12 tunnin välein. Aikaväli mahdollistaa joukkojen siirtämisen suojaisesti. Jatkuvaan valvontaan satelliiteilla päästään rakentamalla niistä konstellaatioita. Tällöin kustannukset kasvavat suhteessa satelliittien määrään. Yritykset, kuten suomalainen ICEYE, pyrkivät valmistamaan SAR-tutkasatelliiteista mikrosatelliitteja, jolloin kustannuksia saadaan alenemaan. Mikrosatelliittien suorituskyky riittää maakohteiden havaintojen ja tunnistusten tekemiseen avoimessa maastossa.

SAR-tutkakuvaaminen on ollut jo monta vuosikymmentä tutkittua tekniikkaa. Viime vuosien kehitys juontuu pitkälti laitteiden kasvaneesta laskentakyvystä, jolloin tutkasignaalia voidaan käsitellä monimutkaisemmilla algoritmeilla. Tällöin kuvien tarkkuus on parantunut. FOPEN-tutkien kehittäminen jatkuu edelleen ja tutkimus keskittyy todennäköisesti lennokki- tai lentokonealustoilla suoritettavaan SAR-tutkakuvaamiseen. Lähitulevaisuudessa tutkakuvaaminen tulee edelleen olemaan ainoa keino paikallistaa kohteita kasvuston läpi.

Kuvan tulkitsijoiden rooli kasvaa tulevaisuudessa järjestelmien kehittymisen myötä. Tiedustelutiedon muodostaminen kuvamateriaalista nojautuu vahvasti tulkitsijan kokemukseen ja koulutukseen. Tarkkojen tutkakuvien rinnalla joudutaan käsittelemään epätarkkoja kuvia, joissa tutkan ominaisuuksia muuttamalla on tavoiteltu puuston läpäisyä. Kuvan laskennallisen laadun laskiessa vain korkeatasoinen analysoija voi saada niistä esiin tarvittavaa tietoa.

6.3 Tulosten tarkkuuden arviointi

Tämän opinnäytteen luonne on teoreettinen. Tutkimusmenetelmät valikoituivat johtuen aiheen laajasta teoriataustasta, mutta juuri puuston alla sijaitsevien kohteiden havaitsemiseen liittyvien tutkimusten vähäisyydestä. Menetelmien soveltaminen SAR-tutkasatelliitteihin mahdollistaa ilmiöiden havainnollistamisen, mutta tarkka tutkimustulos vaatisi kenttäkokeita.

General Image Quality Equation -työkalua käytetään pääasiallisesti optisten kuvien laadun arvioinnissa. SAR-tutkakuville sen käyttäminen ei ole vielä yleistä, mutta aiheesta tehdään tutkimusta. Näihin dokumentteihin tutkijalla ei ollut pääsyä maksumuurin takia. Tässä opinnäytetyössä käytetty GIQE-laskennan malli soveltui tarpeellisilta osin kuvien laadun arviointiin. Mallin antamat tulokset olivat lähellä resoluution ja tulkinnan NIIRS-tasoa. GIQE:n soveltuminen kaikkien tiedustelukuvien nopeaan luokitteluun olisi kiinnostava tutkimusaihe.

Tutkimuksessa esitettyjä laskelmia SAR-tutkasatelliitin puuston läpäisystä voidaan pitää enintään teoreettisina. Alkuperäinen kenttäkoe suoritettiin Yhdysvalloissa ja mittaukset toteutettiin huomattavasti matalammilta korkeuksilta. Mäntypuiden laatu jouduttiin karkeasti yleistämään yhdysvaltalaisien ja suomalaisten lajien välillä. Tässä tutkimuksessa ei korreloitu etäisyyden kasvua, vaan laskennassa käytettiin kenttäkokeiden arvoja. Laskennan tulokset kuitenkin havainnollistavat, kuinka etäisyyden ja puuston tiheyden kasvu vaikeuttavat merkittävästi SAR-tutkasatelliiteilla tehtävää kuvaamista.

SAR-datan muokkaaminen analysoitavaan muotoon vaatii materiaalista riippuen useita vaiheita ja aikaa. Datan muokkaaminen on pakollista, jotta siitä saadaan muodostettua tulkittavaa kuvamateriaalia. Työvaihe itsessään edellyttää erityisosaamista ja sillä vaikutetaan suuresti siihen, minkälaisia tulkintoja kuvasta voidaan tehdä. Myös tutkan ja sen lavetin tuntemus auttavat tulkitsijaa tekemään johtopäätöksiä kuvamateriaalista. Dataa käsiteltäessä kuvan resoluutio voi huonontua riippuen siitä, mitä toimintoja sille tehdään. Kuvan tulkittavuus voi kuitenkin parantua esimerkiksi häiriöiden poistamisen myötä. Tutkimuksen tekijä on perehtynyt itseopiskellen SAR-datan käsittelyyn julkisesti löydettävien tulkintaoppaiden ja ohjeiden avulla. Puolustusvoimat tarjoaa koulutusta alalle, johon tutkimuksen tekijä ei tutkintorakenteen vuoksi kyennyt osallistumaan. Kuvien arvioinnissa huomioitiin tutkijan koulutuksen puute.

Tutkimuksessa käytetty SAR-data on pääsääntöisesti kaikille julkisesti saatavilla, mutta etenkin korkean resoluution dataa ei ole paljoa tarjolla. Suurin osa julkisesta materiaalista on Stripmap-moodilla kuvattua. Tällöin resoluutio ei yleensä riitä kohteen havaitsemista varten. Kuvaineiston vertaaminen korkean resoluution optisten satelliittien materiaaliin ei juuri ole mahdollista. Tämä johtuu SAR-datan vähyydestä ja optisen datan riippuvuudesta sääolosuhteista. Vaikka samalta ajankohdalta löytyisi optista kuvamateriaalia voi se usein olla käyttökelvotonta kohteiden vertailuun esimerkiksi pilvien takia. Tällöin useat tutkijan tekemistä tulkinnoista jäävät varmistamatta. Ainoa täysin varma ratkaisu välttää tämä ongelma on toteuttaa kenttäkokeet sensorille. Teoreettisessa tutkimuksessa on hyväksyttävä mahdolliset virheet havainnoissa ja huomioitava ne luotettavuudessa.

6.3 Ehdotukset jatkotutkimusta varten

Tutkimus keskittyi SAR-tutkasatelliitilla saavutettavaan resoluutioon ja onko kyseisillä järjestelmillä mahdollista havaita kohteita suomalaisesta metsämaastosta. Havaintojen tai tulkintojen perusteella ei pohdittu, miten taktisessa kehyksessä joukon koko, laatu ja suuntaus tai operaation aikakehys mahdollisesti vaikuttaisivat sen havaittavuuteen. Tutkimuksen aihepiiri sisältää paljon eri tieteenalojen tutkimuspolkuja. Vaikka tekniikan osuus on merkittävä SAR-tutkasatelliittien suorituskyvyn arvioinnissa, voidaan aihepiiriä pitää myös mielenkiintoisena muun muassa taktiikan ja sotilaspedagogiikan näkökulmista.

Alla on tutkijan laatima esimerkkilista aihepiiriin liittyvistä mielenkiintoisista tutkimusehdotuksista:

- Satelliittikuvien luokittelun helpottaminen GIQE-laskennalla
- Lennokkiin ja lentokoneeseen asennetun SAR-tutkan kyky havaita tutkaheijastin metsästä

- SAR-tutkakuvaamisen häiritseminen elektronisen vaikuttamisen menetelmin
- SAR-tutkakuvaamisen havaitseminen elektronisen tiedustelun menetelmin
- SAR-tutkalavetin kustannustehokas valinta suhteessa resoluutioon ja/tai viiveeseen
- ”Reealiaikaisen” SAR-tutkasatelliitti konstellaation vaatimukset
- Viive korkean resoluution SAR-tutkakuvaussuorituksesta käyttäjälle tuotettavaan kuvamateriaaliin

SAR-tutkimuksia, joissa tutka on asennettuna lennokkiin, voidaan etenkin pitää mielenkiintoisena. Lennokit tarjoavat tiedustelulle nopean ja suhteellisen edullisen keinon tuottaa tietoa ja juuri SAR-teknologia avaa mahdollisuudet toimia sää- ja valaisuolosuhteista riippumatta. Puuston läpäisevien suorituskykyjen tutkiminen on myös mielenkiintoista johtuen maamme metsäisyydestä.

Puolustusvoimissa tehtävässä satelliittitutkimuksessa voidaan pitää oleellisena saavutetun suorituskyvyn suhdetta taloudellisiin panostuksiin. Satelliittijärjestelmien kustannusten takia ne yleensä ovat useiden toimijoiden käytössä. Korkean resoluution kuvat tarjoavat käyttöarvoa myös muille viranomaisille ja teollisuudelle. Koska sama järjestelmä tuottaa palveluita usealle taholle, myös kustannukset jakautuvat niiden kesken. Palvelusopimus, jossa asiakas ei ole järjestelmän omistaja, voi tarjota ratkaisuja myös puolustusvoimien satelliittitiedusteluun.

LÄHTEET

- [1] Kosola, J., Solante, T. *Digitaalinen taistelukenttä - Informaatioajan sotakoneen tekniikka*. 3. painos. Helsinki: Maanpuolustuskorkeakoulu, Sotatekniikan laitos, 2013. 491 s. ISBN 978-951-25-2503-4. [viitattu 9.11.2018]. Saatavissa: <http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/94298/DigTstK%203.%20painos%20verkkoversio.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- [2] Vehmas, R. *Liikekompensaatio- ja autofokusmenetelmät SAR- ja ISAR-tutkien signaalinkäsittelyssä*. 1. painos. Ylöjärvi: Puolustusvoimien tutkimuslaitos, 2016. 112 s. ISBN 978-951-25-2717-5. [viitattu 43413]. Saatavissa: <https://puolustusvoimat.fi/documents/1951253/2815786/PVTUTKL+Julkaisu+3.pdf/d91230f8-2eff-4ca8-a2ea-81c0cfaa5b14/PVTUTKL+Julkaisu+3.pdf>
- [3] Ravenscroft, B. *Foliage Penetration SAR (FOPEN SAR)*. Yhdysvallat: The University of Kansas. [viitattu 9.11.2018]. Saatavissa: [https://people.eecs.ku.edu/~cal-len58/826/826_Ravenscroft-Foliage_Penetration_SAR_\(FOPEN-SAR\).pptx](https://people.eecs.ku.edu/~cal-len58/826/826_Ravenscroft-Foliage_Penetration_SAR_(FOPEN-SAR).pptx)
- [4] Riebeek, H. *Catalog of Earth Satellite Orbits*. Yhdysvallat: NASA, Earth Observatory, 2009. [viitattu 9.11.2018]. Saatavissa: <https://earthobservatory.nasa.gov/Features/OrbitsCatalog>
- [5] Lappalainen, E. Jormakka, J. *Tekniset tutkimusmenetelmät Maanpuolustuskorkeakoululla*. 1. painos. Helsinki: Edita Prima Oy, 2004. 154 s. ISBN 951-25-1540-7.
- [6] Moreira, A., Prat-Iraola, P., Younis, M., Krieger, G., Hajnsek, I. and Patahanass, P. *A Tutorial on Synthetic Aperture Radar*. IEEE Geoscience and remote sensing magazine. 2013. Vol. 4, s. 12 - 25. [viitattu 28.11.2018]. Saatavissa: http://www2.geog.ucl.ac.uk/~mdisney/teaching/PPRS/PPRS_7/esa_sar_tutorial.pdf
- [7] Hirsijärvi, S., Remes, P. & Sajavaara, P. *Tutki ja kirjoita*. 20. painos. Porvoo: Kirjayhtymä Oy, 2015. 464 s. ISBN 978-951-31-4836-2.
- [8] Mikkola, J. *Uhka avaruudesta - Satelliittien kyky ja rajoitteet havaita taistelualuksia Suomen rannikolla*. Pro gradu. Helsinki, 2016. Maanpuolustuskorkeakoulu, Sotatekniikan laitos. 80 s.
- [9] Klemola, O., Lehto, A. *Tutkatekniikka*. 3. Painos. Helsinki: Hakapaino Oy, 2006. 275 s. ISBN 951-672-278-4.
- [10] Brown, M., Porcello, L. *An introduction to synthetic-aperture radar*. IEEE Spectrum. 1969. Vol. 6, s. 52 -62. [viitattu 3.7.2019]. Saatavissa: <https://ieeexplore-ieee-org.mp-envoy.csc.fi/document/5213674>.

- [11] University of Zurich. *Theory of Synthetic Aperture Radar*. Sveitsi: Atlantis Scientific Inc, 1997. [viitattu 8.1.2020]. Saatavissa: http://www.geo.uzh.ch/~fpaul/sar_theory.html
- [12] Jensen, J. *Remote Sensing of the Environment*. 2. painos. Yhdysvallat: Pearson Education, Inc., 2007. 592 s. ISBN 0-13-188950-8.
- [13] Physclips. *Electromagnetic radiation, the Doppler effect, exoplanets and cosmology*. Australia: School of Physics, Sydney, 2019. [viitattu 3.1.2020]. Saatavissa: <https://www.animations.physics.unsw.edu.au/jw/electromagnetic-radiation-doppler.htm>
- [14] ESA. *Remote sensing and SAR radar images processing*. Eurooppa 2019, European Space Agency. Luentomateriaali. 42 s. Saatavissa: https://earth.esa.int/c/document_library/get_file?folderId=226458&name=DLFE-2127.pdf.
- [15] Wikipedia. *Koherenssi (fysiikka)*. Suomi: Wikipedia The Free Encyclopedia, 2018. [viitattu 6.1.2020]. Saatavissa: [https://fi.wikipedia.org/wiki/Koherenssi_\(fysiikka\)](https://fi.wikipedia.org/wiki/Koherenssi_(fysiikka))
- [16] Wikipedia. *Wave interference*. Englanti: Wikipedia The Free Encyclopedia, 2019. [viitattu 6.1.2020]. Saatavissa: https://en.wikipedia.org/wiki/Wave_interference
- [17] Math/Science Nucleus. *Applied Science - Technology (5A)*. Yhdysvallat: msnucleus.org, 2019. [viitattu 6.1.2020]. Saatavissa: https://www.msnucleus.org/membership/html/k-6/as/technology/5/ast5_1a.html
- [18] ICE-EYE, *iceye_x1_1st_image.jpg*. Suomi 2018, Space Finland. Kuva. Saatavissa: http://spacefinland.fi/wp-content/uploads/2018/01/iceye_x1_1st_image.jpg.
- [19] Richards, M., Scheer, J., Holm, W. *Principles of Modern Radar*. 1. painos. Yhdysvallat: SciTech Publishing, Inc., 2010. 1124 s. ISBN 978-1-891121-52-4. [viitattu 7.1.2020]. Saatavissa: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.702.8870&rep=rep1&type=pdf>
- [20] Ulaby, F., Long, D. *Microwave Radar and Radiometric Remote Sensing*. 1. Painos. Yhdysvallat: The University of Michigan Press, 2014. 983 s. ISBN 978-0-472-11935-6.
- [21] Antarctic Impulsive Transient Antenna. *Antenna introduction / basics*. University of Hawaii at Manoa: Department of Physics and Astronomy. 2019. Vol. 1, s. 8. [viitattu 19.7.2019]. Saatavissa: <https://www.phys.hawaii.edu/~anita/new/papers/militaryHandbook/antennas.pdf>.

- [22] Watts, S. *Synthetic Aperture Tehniques*. Tutorial Meeting on Digital Signal Processing for Radar and Sonar Applications. 1990. Vol. 1, s. 23. [viitattu 18.7.2019]. Saatavissa: <https://ieeexplore.ieee.org/document/202646>.
- [23] Katoch, A., *Synthetic-Aperture Radar (SAR) Basics*. Yhdysvallat 2019, Scribd. Oppituntimateriaali. 93 s. Saatavissa: <https://www.scribd.com/presentation/443618369/826-SAR-basics-F15>.
- [24] Currie, A. *Synthetic Aperture Radar*. Electronics & Communication Engineering Journal. 1991. Vol. 3, s. 159 - 170. [viitattu 1.8.2019]. Saatavissa: <https://ieeexplore.ieee.org/document/84360>.
- [25] Skolnik, M. *Introduction to Radar Systems*. 2. painos. Singapore: McGraw-Hill Book Co., 1980. 581 s. ISBN 0-07-Y66572-9.
- [26] Rahman, S. *Focusing Moving Targets Using Range Migration Algorithm in Ultra Wideband Low Frequency Synthetic Aperture Radar*. Pro gradu. Ruotsi, 2010. Blekinge Institute of Technology. 53 s.
- [27] ESA: Earth Online. *Radar Course 2*. Eurooppa: European Space Agency, 2020. [viitattu 19.2.2020]. Saatavissa: https://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-operational-eo-missions/ers/instruments/sar/applications/radar-courses/content-2/-/asset_publisher/qIBc6NYRXfnG/content/radar-course-2-parameters-affecting-radar-backscatter
- [28] Gorrab, A., Zribi, M., Baghdadi, N., Lili-Chabane, Z., Mougenot, B., *Multi-frequency analysis of soil moisture vertical heterogeneity effect on radar backscatter*. Tunisia 2014, ATSIP 2014. Tutkimus. 7 s. Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/269303662_Multi-frequency_analysis_of_soil_moisture_vertical_heterogeneity_effect_on_radar_backscatter.
- [29] Davis, M. *FOPEN Radar Design For Sparse Forest Surveillance*. Yhdysvallat 2016, 2016 IEEE Radar Conference (RadarConf). Tutkimus. 6 s. Saatavissa: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7485324>.
- [30] Earthwide Communications LLC, *Discover the Benefits of Radar Imaging*. Yhdysvallat 2012, Earthwide Communications LLC. Esite. 4 s. Saatavissa: http://www.intelligence-airbusds.com/files/pmedia/edited/r15796_9_eij_radarimagery_finalarticle.pdf.
- [31] Kasischke, E., Bourgeau-Chavez, L. *Monitoring South Florida wetlands using ERS-1 SAR imagery*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 1997. Vol. 63, s. 281-291. [viitattu 19.2.2020]. Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/265567893_Monitoring_South_Florida_wetlands_using_ERS-1_SAR_imagery/link/54f9a0b10cf210398e991567/download.

- [32] ESA: earthnet online. *ASAR Handbook: 1.1.2 Scientific Background*. Eurooppa: European Space Agency, 2014. [viitattu 20.2.2020]. Saatavissa: <https://earth.esa.int/handbooks/asar/CNTR1-1-2.html#eph.asar.ug.choos.sci.imgint.geochar.scatter>
- [33] Davis, M. *Multichannel L-band Radar Detection of Fixed and Moving Targets In Sparse Foliage*. Yhdysvallat 2016, DARPA. Tutkimus. 5 s. Saatavissa: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8059128>.
- [34] Manavalan, R. *Review of synthetic aperture radar frequency, polarization, and incidence angle data for mapping the inundated regions*. Journal of Applied Remote Sensing. 2018. Vol. 12(2), s. 021501-1 - 021501-15. [viitattu 20.2.2020]. Saatavissa: <https://www.spiedigitallibrary.org/journals/journal-of-applied-remote-sensing/volume-12/issue-02/021501/Review-of-synthetic-aperture-radar-frequency-polarization-and-incidence-angle/10.1117/1.JRS.12.021501.full?SSO=1>.
- [35] Dobson, M., Ulaby, F., LeToan, T., Beaudoin, A., Kasischke, E., Christensen, N. *Dependence of Radar Backscatter on Coniferous Forest Biomass*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 1992. Vol. 30(2), s. 412-415. [viitattu 20.2.2020]. Saatavissa: <https://ieeexplore.ieee.org/document/134090>.
- [36] Wang, Y., Davis, F., Kasischke, E., Effects of variation in soil moisture on ERS-1 SAR backscatter. Yhdysvallat 1994, *Center for Remote Sensing and Environmental Optics, University of California at Santa Barbara*. Tutkimus. 4 s. Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/3605854_Effects_of_variation_in_soil_moisture_on_ERS-1_SAR_backscatter.
- [37] Space Foundation. *Intro to Space Activities*. Yhdysvallat: Space Foundation, 2019. [viitattu 23.11.2019]. Saatavissa: <https://www.spacefoundation.org/what-we-do/government-and-policy/intro-to-space-activities/>
- [38] Buchholz, K. *The Countries with the Most Satellites in Space*. Saksa: Statista, 2019. [viitattu 23.11.2019]. Saatavissa: <https://www.statista.com/chart/17107/countries-with-the-most-satellites-in-space/>
- [39] Logdson, J. *Space Exploration*. Yhdysvallat: Encyclopaedia Britannica, 2019. [viitattu 23.1.1.2019]. Saatavissa: <https://www.britannica.com/science/space-exploration>
- [40] URSA. *Mikä on satelliitti?* Suomi: SatelliittiOpas, 2010. [viitattu 18.12.2019]. Saatavissa: <https://www.ursa.fi/wiki/SatelliittiOpas/Satelliitti>
- [41] The University of Texas. *Satellite Structure*. Yhdysvallat: ARTEMIS, 2019. [viitattu 18.12.2019]. Saatavissa: <http://research.ae.utexas.edu/artemis/satellite.php>

- [42] Brown University. *13 Things: Materials*. Yhdysvallat: Joukowsky Institute for Archaeology & the Ancient World, 2009. [viitattu 18.12.2019]. Saatavissa: https://www.brown.edu/Departments/Joukowsky_Institute/courses/13things/7661.html
- [43] ESA. *Thermal Control*. Eurooppa: European Space Agency, 2019. [viitattu 18.12.2019]. Saatavissa: http://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/Thermal_Control
- [44] Moon, M. *NASA's new satellite radiator is a work of art*. Yhdysvallat: Engadget, 2018. [viitattu 18.12.2019]. Saatavissa: https://www.engadget.com/2017/02/01/nasa-origami-satellite-radiator/?guccounter=1&guce_referrer=aHR0cHM6Ly93d3cuZ29vZ2xlLmNvbS8&guce_referrer_sig=AQAAAEt_gKND8pV6dMUsta53VO4mdn-wephdD4fYezk7WsjZnanDpHQjC2GTZRouIkzGe92H0l_e09fggnsMoXb1dLAEH-bQmvUjTOhouhKMK_WxA-Y9uQR3SQTfB8zey5IgR8RmJ8LNOSUeOf2oCQ06R1BB47oOM_CbQ8OWj2gJVT o4qx
- [45] Dudley, G., Verniolle, J. *Secondary Lithium Batteries for Spacecraft*. Eurooppa: ESA Bulletin Nr. 90, 1997. [viitattu 18.12.2019]. Saatavissa: <http://www.esa.int/esapub/bulletin/bullet90/b90dudle.htm>
- [46] Garcia, M. *About the Space Station Solar Arrays*. Yhdysvallat: NASA: International Space Station, 2017. [viitattu 19.12.2019]. Saatavissa: https://www.nasa.gov/mission_pages/station/structure/elements/solar_arrays-about.html
- [47] Team 3 Power System. Yhdysvallat: Georgia Tech, 2015. [viitattu 19.12.2019]. Saatavissa: <http://propagation.ece.gatech.edu/ECE6390/project/Sum2015/team3/PowerSystem.html>
- [48] Ost, I. *Space-Based Solar vs. Conventional Solar – How Are They Different?* Yhdysvallat: solar.com, 2018. [viitattu 19.12.2019]. Saatavissa: <https://www.solar.com/learn/space-based-solar-vs-conventional-solar-how-are-they-different/>
- [49] Purdue School of Aeronautics and Astronautics. *Satellite Propulsion*. Yhdysvallat: Purdue University, 1998. [viitattu 19.12.2019]. Saatavissa: <https://engineering.purdue.edu/~propulsi/propulsion/rockets/satellites.html>
- [50] Levchenko, I., Xu, S., Bazaka, K. *Small thrusters for small satellites: trends and challenges*. Yhdysvallat: The Space Review, 2019. [viitattu 19.12.2019]. Saatavissa: <https://www.thespacereview.com/article/3637/1>

- [51] Space Foundation Editorial Team. *Components of a Satellite*. Yhdysvallat: Space Foundation, 2019. [viitattu 19.12.2019]. Saatavissa: https://www.spacefoundation.org/space_brief/satellite-components/
- [52] Natural Resources Canada. *Satellite Characteristics: Orbits and Swaths*. Kanada: Natural Resources Canada, 2015. [viitattu 19.12.2019]. Saatavissa: <https://www.nrcan.gc.ca/maps-tools-publications/satellite-imagery-air-photos/remote-sensing-tutorials/satellites-sensors/satellite-characteristics-orbits-and-swaths/9283>
- [53] Braeunig, R. *Orbital Mechanics*. Yhdysvallat: Rocket & Space Technology, 2015. [viitattu 20.12.2019]. Saatavissa: <http://www.braeunig.us/space/orbmech.htm#position>
- [54] RF Wireless World. *GEO vs MEO vs LEO vs Molniya satellite*. Intia: RF Wireless World, 2018. [viitattu 2.1.2019]. Saatavissa: <http://www.rfwireless-world.com/Terminology/GEO-satellite-vs-MEO-vs-LEO-vs-Molniya-satellite.html>
- [55] Wikipedia. *Semi-major and semi-minor axes*. Yhdysvallat: Wikipedia The Free Encyclopedia, 2019. [viitattu 30.12.2019]. Saatavissa: https://en.wikipedia.org/wiki/Semi-major_and_semi-minor_axes#Average_distance
- [56] Andoya Space Center. *Introduction of the six basic parameters describing satellite orbits*. Norja: NAROM, 2018. [viitattu 20.12.2019]. Saatavissa: <https://www.narom.no/undervisningsressurser/sarepta/rocket-theory/satellite-orbits/introduction-of-the-six-basic-parameters-describing-satellite-orbits/>
- [57] Curtis, H. *Orbital Mechanics for Engineering Students*. 3. painos. Yhdysvallat: Butterworth-Heinemann (Elsevier), 2010. 741 s. ISBN 978-0-08-097747-8. [viitattu 27.12.2019]. Saatavissa: https://books.google.fi/books?hl=fi&lr=&id=2U9Z8k0TITYC&oi=fnd&pg=PP1&dq=orbital+mechanics&ots=CFXUGGjHul&sig=H4SNGcWOSyIV-_RkrbOss7iI75s&redir_esc=y#v=onepage&q=sun&f=false
- [58] Zeleny, E. *Orbital Speed and Period of a Satellite*. Yhdysvallat: Wolfram Demonstrations Project, 2011. [viitattu 20.12.2019]. Saatavissa: <https://demonstrations.wolfram.com/OrbitalSpeedAndPeriodOfASatellite/>
- [59] URSA. *Satelliitin radan ominaisuuksia*. Suomi: SatelliittiOpas, 2010. [viitattu 20.12.2019]. Saatavissa: <https://www.ursa.fi/wiki/SatelliittiOpas/Radat>
- [60] Wright, D., Grego, L., Gronlund, L. *The Physics of Space Security*. 1. painos. Cambridge: NASA, 2005. 192 s. ISBN 0-87724-047-7. [viitattu 20.12.2019]. Saatavissa: <https://www.ucsus.org/sites/default/files/2019-09/physics-space-security.pdf>

- [61] Angelo, J. *The Dictionary of Space Technology*. 2. painos. Yhdysvallat: Fitzroy Dearborn Publishers, 1999. 487 s. ISBN 1-57958-149-8.
- [62] ESA. *Types of orbits*. Eurooppa: European Space Agency, 2019. [viitattu 20.12.2019]. Saatavissa: http://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Transportation/Types_of_orbits
- [63] Marttinen, A. *Satelliittimaa-aseman paikanvalinta*. Diplomityö. Espoo, 2010. Aalto Yliopisto. 81 s.
- [64] Joint Publication 3-14. *Space Operations*. 1. painos. Yhdysvallat: US Joint Force Development, 2018. 86 s. [viitattu 20.12.2019]. Saatavissa: https://www.jcs.mil/Portals/36/Documents/Doctrine/pubs/jp3_14.pdf
- [65] Reddy, M. *Effect of low earth orbit atomic oxygen on spacecraft materials*. Journal of Material Science. 1995. Vol. 30, s. 281-307. [viitattu 21.12.2019]. Saatavissa: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00354389>.
- [66] Union of Concerned Scientists. *UCS Satellite Database*. Yhdysvallat: Union of Concerned Scientists, 2019. [viitattu 21.12.2019]. Saatavissa: <https://www.ucsusa.org/resources/satellite-database>
- [67] EMEA Satellite Operators Association. *Satellite Orbits*. Belgia: ESOA, 2019. [viitattu 21.12.2019]. Saatavissa: <https://www.esoa.net/technology/satellite-orbits.asp>
- [68] Jane's. *Global Positioning System (GPS)/Navstar constellation*. Yhdysvallat: Jane's Space Systems and Industry, 2018. [viitattu 15.1.2019]. Saatavissa: https://janes.ihs.com/Janes/Display/jsd_0062-jsd_
- [69] Tutorialspoint. *Earth Orbit Satellites*. Intia: Satellite Communication Tutorial, 2019. [viitattu 21.12.2019]. Saatavissa: https://www.tutorialspoint.com/satellite_communication/satellite_communication_earth_orbit_satellites.htm
- [70] Asmus, V., Dyaduchenko, V., Nosenko, Y., Polishcuk, G. Selin, V. *A highly elliptical orbit space system for hydrometeorological monitoring of the Arctic region*. WMO Bulletin. 2007. Vol. 56, s. 293-296. [viitattu 23.12.2019]. Saatavissa: <https://public.wmo.int/en/bulletin/highly-elliptical-orbit-space-system-hydrometeorological-monitoring-arctic-region>.
- [71] Poole, I. *Highly Elliptical Satellite Orbits*. Yhdistynyt kuningaskunta: electronicsnotes, 2019. [viitattu 23.12.2019]. Saatavissa: <https://www.electronics-notes.com/articles/satellites/basic-concepts/highly-elliptical-orbit-heo.php>

- [72] Dept. of Physics and Astronomy. *Types of orbits*. Yhdysvallat: Iowa State University, 2001. [viitattu 23.12.2019]. Saatavissa: http://www.polaris.iastate.edu/EveningStar/Unit4/unit4_sub3.htm
- [73] Monteverdi, J. *Polar Orbiting Environmental Satellites (POES)*. Yhdysvallat: San Fransisco State University, 2019. [viitattu 23.12.2019]. Saatavissa: http://tornado.sfsu.edu/geosciences/classes/m407_707/Monteverdi/Satellite/PolarOrbiter/Polar_Orbits.html
- [74] Maini, A., Agrawal, V. *Satellite Technology: Principles and Applications*. 2. painos. Intia: John Wiley & Sons Ltd., 2011. ISBN 9780470711729. [viitattu 1.1.2019]. Saatavissa:
https://books.google.fi/books?hl=fi&lr=&id=agEihCtoYq4C&oi=fnd&pg=PA1&dq=Satellite+Technology+:+Principles+and+Applications&ots=q5Yd-MrFKtc&sig=_7p1N2LoF_M2JX5cp2oMU2CFMOY&redir_esc=y#v=onepage&q=Satellite%20Technology%20%3A%20Principles%20and%20Applications&f=false
- [75] Cakaj, S., Kamo, B., Lala, A., Rakipi, A. *The Coverage Analysis for Low Earth Orbiting Satellites at Low Elevation*. (IJACSA) International Journal of Advanced Computer Science and Applications. 2014. Vol. 5, s. 6-10. [viitattu 30.12.2019]. Saatavissa: https://thesai.org/Downloads/Volume5No6/Paper_2-The_Coverage_Analysis_for_Low_Earth_Orbiting_Satellites_at_Low_Elevation.pdf
- [76] Freeman, A., *On Ambiguities in SAR Design*. Yhdysvallat, Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology of Technology. Tutkimus. 4 s. Saatavissa: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.424.2154&rep=rep1&type=pdf>.
- [77] Emery, W. *Introduction to Satellite Remote Sensing*. 1. painos. Yhdysvallat: Elsevier, 2017. 860 s. ISBN 978-0-12-809254-5. [viitattu 2.1.2020]. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/swath-width>
- [78] Harrison, B.A., Jupp, D.L.B., Lewis, M.M., Forster, B.C., Mueller, N., Smith, C., Phinn, S., Hudson, D., Grant, I., Coppa, I. *CRCSI (2016) Earth Observation: Data, Processing and Applications*. Volume 1A: Data—Basics and Acquisition. 1. painos. Australia: Australia and New Zealand CRC for Spatial Information, 2018. 248 s. ISBN 978-0-9943019-2-5. [viitattu 1.1.2020]. Saatavissa: <http://www.crcsi.com.au/assets/Consultancy-Reports-and-Case-Studies/Earth-Observation-reports-updated-Feb-2019/Vol1A-low-res-27MB.pdf>

- [79] Xin, L., Maocai, W., Guangming D., Xiaoyu, C. *A Novel Technique to Compute the Revisit Time of Satellites and Its Application in Remote Sensing Satellite Optimization Design*. International Journal of Aerospace Engineering. 2017. Vol. 2017, s. 9. [viitattu 2.1.2020]. Saatavissa: <https://www.hindawi.com/journals/ijae/2017/6469439/>.
- [80] Natural Resources Canada. *Temporal Resolution*. Kanada: Natural Resources Canada, 2015. [viitattu 2.1.2020]. Saatavissa: <https://www.nrcan.gc.ca/maps-tools-publications/satellite-imagery-air-photos/remote-sensing-tutorials/satellites-sensors/temporal-resolution/9365>
- [81] NOAA's Satellite Operations Team. *NOAA's Geostationary and Polar-Orbiting Weather Satellites*. Yhdysvallat: University of Colorado, 2019. [viitattu 2.1.2020]. Saatavissa: <http://paos.colorado.edu/~fasullo/1060/resources/satellites.html>
- [82] Small, C., Okujeni, A., van der Linden, S., Waske, B. *Remote Sensing of Urban Environments*. Comprehensive Remote Sensing. 2018. Vol. 6, s. 96-127. [viitattu 2.1.2020]. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978012409548910380X>.
- [83] Bussy-Virat, C., Ruf, C., Ridley, A. *Relationship between temporal and spatial resolution for a constellation of GNSS-R satellites*. JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN APPLIED EARTH OBSERVATIONS AND REMOTE SENSING, CYGNSS SPECIAL ISSU. 2018. s. 1-10. [viitattu 2.1.2020]. Saatavissa: http://clasp-research.engin.umich.edu/missions/cygnss/reference/cygnss-mission/JSTARS-2018_Bussy-Virat_et_al_GNSS-R_Spatial-Temporal-Res.pdf.
- [84] Ciccolella, A., *MISSION ANALYSIS ASPECTS FOR EARTH OBSERVATIONS MISSIONS*. Eurooppa 2010, European Space Agency. Luentomateriaali. 29 s. Saatavissa: <https://www.summerschoolalpbach.at/docs/2010/lectures/Ciccolella.pdf>.
- [85] Jane's. *Iridium/Iridium NEXT constellation*. Yhdysvallat: Space Systems and Industry, 2018. [viitattu 2.1.2020]. Saatavissa: https://janes-ihs-com.mp-envoy.csc.fi/Janes/Display/JSD_0200-JSD_
- [86] ESA. *Sentinel-1*. Eurooppa 2013, European Space Agency. Tekniset tiedot. 2 s. Saatavissa: http://esamultimedia.esa.int/docs/S1-Data_Sheet.pdf.
- [87] Snoeji, P., *Internal and External Calibration of the Sentinel-1 CSAR*. Eurooppa, European Space Agency. Oppituntimateriaali. 23 s. Saatavissa: http://sarcv.ceos.org/site_media/media/documents/2_PaulSnoeij-Internal_External_Cal_Sentinel-1_2010_UZH.pdf.

- [88] ESA. *SAR Instrument*. Eurooppa: European Space Agency, 2020. [viitattu 3.4.2020]. Saatavissa: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-1-sar/sar-instrument>
- [89] AIRBUS. *TerraSAR-X Image Product Guide*. Saksa 2015, Airbus Defence and Space. Esite. 24 s. Saatavissa: https://www.intelligence-airbusds.com/files/pmedia/public/r459_9_20171004_tsxx-airbusds-ma-0009_tsx-productguide_i2.01.pdf.
- [90] ICEYE. *SAR Product Guide*. Suomi 2019. Esite. 34 s. Saatavissa: <https://www.iceye.com/hubfs/Downloadables/ICEYE-SAR-Product-Guide-2019.pdf>.
- [91] ASF. *ALOS PALSAR - about*. Yhdysvallat: Alaska Satellite Facility, 2020. [viitattu 3.4.2020]. Saatavissa: <https://asf.alaska.edu/data-sets/sar-data-sets/alos-palsar/alos-palsar-about/>
- [92] Kramer, H. *ALOS (Advanced Land Observing Satellite) / Daichi*. Eurooppa: European Space Agency, 2020. [viitattu 3.4.2020]. Saatavissa: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/a/alos>
- [93] Kenttäohjesääntö Yleinen 2015, HK514. Helsinki: Pääesikunta, Suunnitteluosasto, 2014. 60s.
- [94] Rekkedal, M. *Nykyaikainen sotataito: Sotilaallinen voima muutoksessa*. 4. painos. Suomi: Maanpuolustuskorkeakoulu Helsinki, 2013. 593 s. ISBN 951-25-1734-5. [viitattu 10.1.2020]. Saatavissa: https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/93813/Nykyaikainen_sotataito_verkkoversio_2013.pdf;jsessionid=116030E602480C065BA47582C79CED0C?sequence=2
- [95] Wong, W., Fergusson, J. *Military Space Power: A Guide to the Issues*. 1. painos. Yhdysvallat: Greenwood Publishing Group, 2010. 158 s. ISBN 978-0-313-35681-0. [viitattu 10.1.2020]. Saatavissa: <https://books.google.fi/books?id=GFg5CqCo-jqQC&pg=PA55&lpg=PA55&dq=strategic+level+use+of+satellite&source=bl&ots=mEnPY-Zwr80&sig=ACfU3U0KAHsODldd2bcurvVbt9Qlzech3A&hl=fi&sa=X&ved=2ahUKEwjE5KLwxvjmAhiYsKHVnXD-IQ6AEwE3oECACQAQ#v=onepage&q=strategic%20level%20use%20of%20satellite&f=false>
- [96] Oxlee, G.J. *Aerospace Reconnaissance*. 1. painos. Yhdistyneen Kuningaskunnat: Brassey's (UK) Ltd., 1997. 206 s. ISBN 1-85753-1388.
- [97] Headquarters Department of Army. *The Targeting Process*. Yhdysvallat 2010, Headquarters Department of Army. Kenttäopas. 164 s. Saatavissa: <https://www.globalsecurity.org/military/library/policy/army/fm/3-60/fm3-60.pdf>.

- [98] NASA. *Near Real-Time versus Standard Products*. Yhdysvallat: National Aeronautics and Space Administration, 2019. [viitattu 16.1.2020]. Saatavissa: <https://earth-data.nasa.gov/earth-observation-data/near-real-time/near-real-time-versus-standard-products>
- [99] ESA: Sentinel Online. *Definitions*. Eurooppa: European Space Agency, 2019. [viitattu 16.1.2020]. Saatavissa: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/definitions>
- [100] Clemente, C., di Bisceglie, M., Di Santo, M., Ranaldo, N., Spinelli, M. *PROCESSING OF SYNTHETIC APERTURE RADAR DATA WITH GPGPU*. 2009 IEEE Workshop on Signal Processing Systems. 2009. Vol. 1, s. 309 - 314. [viitattu 17.1.2020]. Saatavissa: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5336272>.
- [101] Jane's. *RISAT (Radar Imaging Satellite series)*. Yhdysvallat: Space Systems and Industry, 2017. [viitattu 17.1.2020]. Saatavissa: https://janes-ihs-com.mp-en-voy.csc.fi/Janes/Display/JSD_A220-JSD_
- [102] ESA: Sentinel Online. *Product Slices*. Eurooppa: European Space Agency, 2019. [viitattu 17.1.2020]. Saatavissa: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar/data-formats/product-slices>
- [103] Kreitmair, T., *A short overview on imagery interpretability rating scales*. Alankomaat 2014, NATO Communications and Information Agency, Joint Intelligence Surveillance and Reconnaissance Interoperability, The Hague. Tutkimus. 4 s. Saatavissa: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6866680>.
- [104] Lohmann, P., Jacobsen, K., Pakzad, K., Koch, A., *COMPARATIVE INFORMATION EXTRACTION FROM SAR AND OPTICAL IMAGERY*. Saksa 2020, Institute of Photogrammetry and GeoInformation (IPI), University of Hannover. Tutkimus. 7 s. Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/228981286_Comparative_Information_Extraction_from_SAR_and_Optical_Imagery.
- [105] Ali, M., Eltohamy, F., Salama, G. *Estimation of NIIRS for High Resolution Satellite Images Using the Simplified GIQE*. International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering. 2016. Vol. 4, s. 8043 - 8048. [viitattu 30.1.2020]. Saatavissa: http://www.ijirce.com/upload/2016/may/47_Estimation.pdf.
- [106] Donohue, J., *INTRODUCTORY REVIEW OF TARGET DISCRIMINATION CRITERIA*. Yhdysvallat 1991, PHILLIPS LABORATORY AIR FORCE SYSTEMS COMIMAND HANSCOM AIR FORCE BASE, MASSACHUSETTS. Tutkimus. 35 s. Saatavissa: <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a254954.pdf>.

- [107] Holst, G., *What is V50?* Yhdysvallat 2018, SPIE.DIGITAL LIBRARY. Kuva. Saatavissa: https://www.spiedigitallibrary.org/ContentImages/Proceedings/10625/106250U/FigureImages/00015_PSIDG10625_106250U_page_3_2.jpg.
- [108] National imagery interpretability rating scales (NIIRS), STANAG 7194 (edition 1). Belgia: NATO Standardization Agency, 2009. 17s.
- [109] Research and Markets. *Global Military Truck Market is Projected to Grow from 15,677 Units in 2019 to 20,171 Units by 2027, at a CAGR of 3.2%*. Irlanti: ResearchandMarkets.com, 2019. [viitattu 24.2.2020]. Saatavissa: https://www.researchandmarkets.com/reports/4847014/military-truck-market-by-application?utm_source=dynamic&utm_medium=GNOM&utm_code=5jcn8k&utm_campaign=1335364+-+Global+Military+Truck+Market+is+Projected+to+Grow+from+15%2c677+Units+in+2019+to+20%2c171+Units+by+2027%2c+at+a+CAGR+of+3.2%25&utm_exec=anwr281gnomd
- [110] Jane's. *Sisu E11T-8 × 8/1850 + 3750 + 1400 19,700 kg High Mobility Tactical Vehicle (HMTV)*. Yhdysvallat: Land Warfare Platforms: Logistics, Support & Unmanned, 2019. [viitattu 24.2.2020]. Saatavissa: <https://janes.ihs.com/Janes/Display/jmvl9096-jlsu>
- [111] Kokkonen, M. *Suomen metsävarat*. Suomi: Maa- ja metsätalousministeriö, 2019. [viitattu 24.2.2020]. Saatavissa: <https://mmm.fi/metsat/suomen-metsavarat>
- [112] METLA. *Suomi: Euroopan metsäisin maa*. Suomi: Metsäntutkimuslaitos, 2013. [viitattu 24.2.2020]. Saatavissa: <http://www.metla.fi/suomen-metsat/>
- [113] Maa- ja metsätalousministeriö. *Metsätalouden kestävyys*. Suomi: Maa- ja metsätalousministeriö, 2020. [viitattu 25.2.2020]. Saatavissa: <https://mmm.fi/metsat/metsatalous/metsatalouden-kestavyys>
- [114] Luonnonvarakeskus. *Puuston määrä (miljoonaa kuutiometriä) puulajeittain vuosina 1921–2017*. Suomi 2018, VMI-ryhmä, LUKE. Kuva. Saatavissa: <https://www.luke.fi/tietoa-luonnonvaroista/metsa/metsavarat-ja-metsasuunnittelu/metsavarat/>.
- [115] Bessette, L.A., Ayasli, S., *Ultra-Wideband P-3 and CARABAS II Foliage Attenuation and Backscatter Analysis*. Yhdysvallat 2001, MIT Lincoln Laboratory. Tutkimus. 6 s. Saatavissa: <https://ieeexplore.ieee.org/document/923005>.
- [116] Maver, L., Erdman, C., Riehl, K. *National Image Interpretability Rating Scales*. Yhdysvallat: FAS: Intelligence Resource Program, 1998. [viitattu 15.2.2019]. Saatavissa: <https://fas.org/irp/imint/niirs.htm>

- [117] Leachtenauer, J., Malila, W., Irvine, J., Coldburn, L., Salvaggio, N. *General image-quality equation: GIQE*. Applied Optics. 1997. Vol. 36(32), s. 8322-8328. [viitattu 4.3.2020]. Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/5588510_General_image-quality_equation_GIQE.
- [118] The SNAP Team. *SNAP 7.0 released*. Eurooppa: European Space Agency, 2020. [viitattu 5.3.2020]. Saatavissa: <https://step.esa.int/main/snap-7-0-released/>
- [119] Airbus Defence and Space. *Sample Imagery*. Yhdysvallat: Airbus, 2020. [viitattu 18.3.2020]. Saatavissa: <https://www.intelligence-airbusds.com/en/8262-sample-imagery>
- [120] ICEYE. *Example SAR data from ICEYE*. Suomi: ICEYE, 2020. [viitattu 18.3.2020]. Saatavissa: <https://www.iceye.com/downloads/datasets>
- [121] Copernicus Open Access Hub. Eurooppa: European Space Agency, 2020. [viitattu 18.3.2020]. Saatavissa: <https://scihub.copernicus.eu/>
- [122] ASF. *Vertex*. Yhdysvallat: Alaska Satellite Facility, 2020. [viitattu 18.3.2020]. Saatavissa: <https://search.asf.alaska.edu/#/>
- [123] ESA. *TPM Online Access List*. Eurooppa: European Space Agency, 2020. [viitattu 18.3.2020]. Saatavissa: <https://tpm-ds.eo.esa.int/collections/>
- [124] Collins, A. *RADAR SATELITE IMAGE REVEALS THE FULL GEOLOGICAL EXTENT OF GIZA'S CAVE UNDERWORLD*. Yhdysvallat: www.andrewcollins.com, 2020. [viitattu 24.3.2020]. Saatavissa: <http://www.andrewcollins.com/page/articles/geology.htm>
- [125] Institut für Hochfrequenztechnik und Radarsysteme. *DLR Site at Oberpfaffenhofen, Germany*. Saksa: DLR, 2020. [viitattu 31.3.2020]. Saatavissa: https://www.dlr.de/hr/en/DesktopDefault.aspx/tabid-4698/7782_read-12248/gallery-1/gallery_read-Image.32.5313/
- [126] Horn, R. *E-SAR – The Airborne SAR System of DLR*. Saksa: DLR, 2020. [viitattu 31.3.2020]. Saatavissa: https://www.dlr.de/hr/en/desktopdefault.aspx/tabid-2326/3776_read-5679/
- [127] Maj, K., Pabisiak, P., Stepień, G., *DETECTION AND IDENTIFICATION OF OBJECTS IN APPLICATIONS OF GIS*. Puola 2008, GIS Ostrava 2008. Raportti. 10 s. Saatavissa: http://gisak.vsb.cz/GIS_Ostrava/GIS_Ova_2008/sbornik/Lists/Papers/104.pdf.

- [128] Moreira, A., *Synthetic Aperture Radar (SAR): Principles and Applications*. Kreikka 2013, Harokopio University. Luentomateriaali. 62 s. [viitattu 3.7.2019]. Saatavissa: <https://earth.esa.int/documents/10174/642943/6-LTC2013-SAR-Moreira.pdf>.