Tampereen yliopisto

Juuso Kankkunen

# HÄIVELENTOKONEEN HAVAITSEMINEN TUTKALLA

Kandidaatintyö
Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta
Tarkastaja: Taneli Riihonen
Joulukuu 2024

# TIIVISTELMÄ

Juuso Kankkunen: Häivelentokoneen havaitseminen tutkalla
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Sähkötekniikka
Joulukuu 2024

---

Tämän kandidaatintyön aiheena on häivelentokoneiden tutkahavainnointi. Häivelentokoneet ovat sotakäytössä olevia lentokoneita, joista on suunniteltu mahdollisimman vaikeasti havaittavia. Häiveeseen kuuluu muun muassa koneen äänen, lämmön ja tutkapoikkipinta-alan minimointi. Tässä työssä keskitytään vain tutkapoikkipinta-alaan. Ilmatorjunnan kannalta häive on haasteellista, sillä häivekoneiden ominaisuudet vaikeuttavat niiden havaitsemista ja seuraamista ilmatilassa, sekä niihin vaikuttamista. Tämän kandidaatintyön tavoitteena on selvittää, mitä eri tekniikoita voidaan tutkan näkökulmasta hyödyntää, jotta häivekoneiden teknologista etua saataisiin minimoitua ja ilmatilaa kyettäisiin puolustamaan tehokkaasti.
Häivelentokoneissa käytetään yleisesti kahta tekniikkaa tutkapoikkipinta-alan pienentämiseen: Muotoilua ja pinnoitusta. Muotoilun tavoitteena on heijastaa koneeseen osuvat tutkalähetteet poispäin niiden tulosuunnasta, kun taas pinnoituksen tavoitteena on absorboida koneeseen osuvat tutkalähetteet. Yhdessä nämä tekniikat pyrkivät siihen, että koneeseen osuvista radioaalloista mahdollisimman pieni osa heijastuu takaisin kohti tutkan vastaanotinta. Häivepinnoitteet ovat lähtökohtaisesti suunniteltu korkeataajuuksisia tutkia vastaan, jotta ohjuksien käyttö häivekoneita vastaan olisi mahdollisimman vaikeaa.
Erinäisillä tutkatyypeillä voidaan minimoida häivetekniikoiden vaikutusta tutkan näkemään tutkapoikkipinta-alaan. Monostaattisella tutkalla nähdään koneen kaikista pienin tutkapoikkipinta-ala, sillä häivekoneen muotoilu on parhaimmillaan sitä vastaan. Bi- ja multistaattisilla tutkilla voidaan minimoida koneen muotoilun vaikutusta tutkapoikkipinta-alaan, sillä häivekoneen muotoilussa ei voida estää heijastumisia suuntiin, joita ei etukäteen tiedetä. Myös passiivisella tutkalla voidaan saada bistaattista tutkaa vastaava tutkapoikkipinta-ala. Pinnoituksen tuoma tutkapoikkipinta-alan pienentyminen ei kuitenkaan muutu mono- ja bistaattisten tutkien välillä.
Eteenpäinsironta, eli Forward Scatter -tutkalla voidaan havaita häivekoneet bi- ja multistaattisia tutkiakin paremmin. Tämä perustuu eteenpäinsironnan -tutkapoikkipinta-alaan, johon vaikuttaa vain kohteen fyysinen koko, eikä häivetekniikoilla ole vaikutusta tähän. Siis, eteenpäinsirontatutkalla kyetään minimoimaan sekä häivekoneen muotoilun, että pinnoituksen vaikutus tutkapoikkipinta-alaan. Sen käytännön toteutuksessa on kuitenkin todella suuria haasteita johtuen tutkan hyvin kapeasta näkökentästä.
Mielenkiintoisena tulevaisuuden vaihtoehtona myös kvanttitutka saattaa mahdollistaa häivekoneiden paremman havaitsemisen, koska sillä kyetään poimimaan oma tutkakaiku huomattavasti kohinaisemmasta signaalista verrattuna klassiseen tutkaan.
Häivekoneita voidaan siis havaita jo nykyisellä tutkateknologialla ja häivekoneiden etua voidaan minimoida esimerkiksi bistaattisilla tutkilla. Siitä huolimatta häivekoneiden etu verrattuna perinteiseen lentokoneeseen on huomattava. Eteenpäinsirontatutkaa käytettäessä etua ei juurikaan ole, mutta tutkan toteutus käytännössä on todella vaikeaa.

Avainsanat: Tutkatekniikka, häiveteknologia, bistaattinen tutka, eteenpäinsirontatutka, ohjustutka, tutkapoikkipinta-ala, kvanttitutka.

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

# ABSTRACT

Juuso Kankkunen: Radar Detection of Stealth Aircraft
Bachelor's Thesis
Tampere University
Electrical Engineering
December 2024

---

The topic of this bachelor's thesis is the radar detection of stealth aircraft. Stealth aircraft are military planes designed to be as difficult to detect as possible. Stealth includes minimising the aircrafts noise, thermal signature and radar cross section. This thesis focuses only on radar cross section. From an air defence perspective, stealth presents a significant challenge, as the features of stealth aircraft complicate their detection, tracking, and engagement in airspace. The goal of this thesis is to explore the various radar techniques that can be used to minimize the technological advantage of stealth aircraft and enable effective air defence against stealth aircraft.
Stealth aircraft generally employ two primary techniques to reduce radar cross-section: shaping and coating. The goal of shaping is to reflect incoming radar signals away from their source, while the aim of coating is to absorb the radar signals. These techniques aim to make sure that as little of the radio waves hitting the aircraft as possible are reflected toward the radar receiver. Stealth coatings are primarily designed to counter high-frequency radars to make it particularly difficult to use missiles against them.
Different types of radars can lessen the impact of stealth technologies on the seen radar cross-section. Monostatic radars see the smallest radar cross-section of a stealth aircraft, as the aircraft's design is optimized to counter this type of radar. Bistatic and multistatic radars can minimize the effects of the aircraft’s shaping on the radar cross-section since it is impossible to prevent reflections in directions that cannot be predicted in advance. Passive radars can also see the bistatic radar cross-section of the target giving them a similar capability for detecting stealth aircraft. However, the reduction in radar cross-section achieved by the coating remains the same between mono- and bistatic radars.
Forward scatter radars can detect stealth aircraft even more effectively than bistatic and multistatic radars. This is because forward scatter radar cross-section depends only on the physical size of the target and is unaffected by stealth techniques. Forward scatter radars can minimize the effects of both shaping and coating on radar cross-section. However, implementing forward scatter radars in practice poses huge challenges due to their very narrow field of view.
In the future, quantum radars might enable better detection of stealth aircraft. Quantum radars can find their own radar echo from a noisier environment compared to classical radars which allows them to detect stealth aircraft more effectively.
In conclusion, stealth aircraft can already be detected with existing radar technology, and their advantages can be reduced using techniques such as bistatic radars. Nevertheless, stealth aircraft still hold a substantial edge over conventional planes. While forward scatter radars eliminate this advantage, their practical implementation is very challenging.

Keywords: Radar technology, stealth, bistatic radar, Forward scatter radar, missile radar, radar cross section, quantum radar

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin Originality Check service.

# TEKOÄLYN KÄYTTÖ OPINNÄYTTEESSÄ

Opinnäytteessäni on käytetty tekoälysovelluksia:

x Ei
☐ Kyllä

Ilmoitukseni mukaan olen käyttänyt opinnäytteessäni tutkielmaprosessin aikana seuraavia tekoälysovelluksia:

Tekoälysovellusten nimet ja versiot: [Listaa tähän kaikki tekoälysovellukset ja niiden versiot, joita olet käyttänyt tutkielmaprosessin aikana.]

Käyttötarkoitus: [Kuvaa tähän yksityiskohtaisesti, mihin tarkoitukseen ja miten tekoälyä on sovellettu opinnäytteeseen tutkielmaprosessin aikana.]

Osiot, joissa tekoälyä on käytetty: [Luettele tähän kaikki opinnäytteen vaiheet ja osiot, joissa tekoälyä on tutkielmaprosessin aikana käytetty.]

Olen tietoinen siitä, että olen täysin vastuussa koko opinnäytteeni sisällöstä, mukaan lukien osat, joissa on hyödynnetty tekoälyä, ja hyväksyn vastuun mahdollisista eettisten ohjeiden rikkomuksista.

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO ..... 1

2. TUTKATYYPIT ..... 3

2.1 Taajuusalueet ..... 3
2.2 Signaalimuoto ..... 5
2.2.1 Pulssitutka ..... 5
2.2.2 CW-tutka ..... 6
2.2.3 Kvanttitutka ..... 7

2.3 Tutkan suuntauksen tyyppi ..... 8
2.3.1 Mekaanisesti suunnattu tutka ..... 8
2.3.2 Elektronisesti suunnattu tutka ..... 8

2.4 Tutkajärjestelmän sijoittelu ..... 10
2.4.1 Monostaattinen tutka ..... 10
2.4.2 Bistaattinen tutka ..... 11
2.4.3 Multistaattinen tutka ..... 14

2.5 Tutkan alusta ..... 14
2.5.1 Maassa ja merellä ..... 14
2.5.2 Ilmassa ja avaruudessa ..... 15

3. HÄIVETEKNOLOGIA ..... 17

3.1 Tutkapoikkipinta-ala ..... 17
3.1.1 Muotoilu ..... 18
3.1.2 Pinnoitus ..... 20

3.2 Häivekoneen käyttö ..... 22
3.3 Häivekoneen oma tutka ..... 23

4. HÄIVEKONEEN HAVAITSEMINEN TUTKALLA ..... 25

4.1 Monostaattinen tutka ..... 25
4.2 Bistaattinen tutka ..... 27
4.3 Ohjustutka ..... 28
4.4 Multistaattinen tutka ..... 31
4.5 Forward Scatter -tutka ..... 31
4.6 Kvanttitutka ..... 34

5. YHTEENVETO ..... 35

6. LÄHTEET ..... 36

# LYHENTEET JA MERKINNÄT

| | |
|---|---|
| AESA | Active Electronically Scanned Array |
| AEW&C | Airborne Early Warning and Control |
| ARM | Anti-Radiation Missile |
| ARH | Active Radar Homing |
| ASRAAM | Advanced Short Range Air-to-Air Missile |
| AWACS | Airborne Warning and Control System |
| CW | Continuous Wave |
| ESA | Electronically Scanned Array |
| FMCW | Frequency Modulated Continuous Wave |
| FSCS | Forward Scatter Cross Section |
| FSR | Forward Scatter Radar |
| GPS | Global Positioning System |
| IEEE | Institute of Electrical and Electronics Engineers |
| ITU | International Telecommunication Union |
| LO | Low Observable |
| LPI | Low Probability of Intercept |
| MIMO | Multiple Inputs Multiple Outputs |
| MTI | Moving Target Indication |
| OTH | Over the Horizon |
| PESA | Passive Electronically Scanned Array |
| PRF | Pulse Repetition Frequency |
| RAC | Radar Absorbant Coating |
| RAM | Radar Absorbant Material |
| RCS | Radar Cross Section |
| RF | Radio Frequency |
| RWR | Radar Warning Receiver |
| SARH | Semi Active Radar Homing |
| SEAD | Suppression of Enemy Air Defences |
| TRM | Transmission Receiver Module. |

# 1. JOHDANTO

Häivekoneet ovat sotakäytössä olevia ilma-aluksia, joiden suunnittelussa on kiinnitetty erityistä huomiota niiden havaitsemisen vaikeuttamiseen etenkin tutkalla. Tutka on elektromagneettinen laite esineiden havaitsemista varten. Tutka lähettää elektromagneettisia aaltoja ja vastaanottaa niiden kaikuja kohteesta. Tutkalla voidaan määrittää esimerkiksi kohteen sijainti, nopeus ja etäisyys. Viime vuosikymmeninä häivekoneiden kehitys on ottanut suuria askeleita eteenpäin ja maailman armeijat ovat käyttäneet miljardeja häivekoneiden kehitykseen. Häivekoneiden määrä tulee vain kasvamaan tulevaisuudessa ja siksi niiden havaitsemiseen käytettävien laitteiden kehitys on tärkeää. Samalla kun häiveteknologia on kehittynyt, on tutkien ja muiden ilmatorjuntalaitteiden kehitys pyrkinyt seuraamaan mukana. Mediassa häivekoneista puhutaan usein “näkymättöminä” [1]. Samalla muun muassa Kiina ja Venäjä kertovat uusien tutkajärjestelmiensä olevan kykeneviä havaitsemaan parhaimmatkin häivekoneet [2].

Tämä kandidaatintyö on kirjallisuusselvitys häivekoneiden havaitsemisesta tutkalla. Tässä kandidaatintyössä perehdytään häiveteknologiaan ja sen kykyyn piilottaa ilmaalus vihollisen tutkalta, sekä nykyhetken ja lähitulevaisuuden tutkateknologian kykyyn havaita ja seurata häivekoneita. Työssä selvitetään, mitkä tekijät vaikuttavat häivekoneen havaitsemiseen ja minkälaisilla tutkilla tämä onnistuu parhaiten.

Häivekoneet toimivat kaikista parhaiten monostaattisia korkeataajuuksisia tutkia vastaan. Monostaattisella tutkalla häivekone voidaan havaita, mutta havaitsemisetäisyys on huomattavasti lyhyempi, kuin perinteistä lentokonetta havaittaessa. Käyttämällä bi- tai multistaattista tutkaa voidaan häivekoneita havaita kauempaa, sillä koneen muotoilulla ei ole niin suurta vaikutusta näitä tutkia vastaan. Bistaattisen tutkan erikoistapauksena on eteenpäinsirontatutka, eli forward scatter -tutka, jonka näkemä tutkapoikkipinta-ala on häivekoneen tapauksessa vieläkin suurempi, sillä vain koneen fyysinen koko vaikuttaa siihen. Eteenpäinsirontatutkalla voidaan siis havaita häivekone kaikista parhaiten, jos vain kone saadaan jotenkin osumaan tutkan näkökenttään. Eteenpäinsirontatutkan näkökenttä on todella kapea, mikä tekee siitä vaikean toteuttaa käytännössä, etenkin jos halutaan havaita kohteita suurella alueella. Suuren alueen havainnoinnissa bi- ja multistaattiset tutkat ovat parempia, sillä ne voidaan suunnata halutulla tavalla. Työssä käsitellään myös kvanttitutkia, jotka ovat vielä prototyyppi vaiheessa, mutta saattavat

mahdollistaa tulevaisuudessa häivekoneiden paremman havaitsemisen. Kvanttitutkan vahvuutena on oman signaalin poimiminen, kun kohinaa on paljon tai signaali on heikko ja normaalisti hukkuisi kohinan sekaan.

Työssä tarkastellaan myös ohjustutkia, koska ne ovat erityisen tärkeitä häivekoneisiin vaikuttamisessa. SARH-ohjukset toimivat bistaattista tutkaa vastaavalla periaatteella ja niiden kantamaa häivekoneita vastaan voidaan kasvattaa. Tähän vaaditaan, että kohdetta valaisevan lähettimen ja ohjuksen välille saadaan vähintään 20 asteen kulma.

Työn alussa luvussa 2 on pohjustusta ilmavalvontaan ja -torjuntaan liittyvistä tutkatyypeistä. Työssä käsitellään tutkien erilaisia taajuusalueita, signaalityyppejä, suuntaustapoja, sijoittelutapoja ja alustoja. Sitten luvussa 3 pohjustetaan häiveteknologiaa ja esitellään sen perustoimintaperiaatteet ja yleisesti käytetyt häivetekniikat. Häiveteknologioiden kappaleessa käsitellään tutkapoikkipinta-alaa, häivekoneen pinnoitusta ja muotoilua, sekä häivekoneen käyttöä. Lopuksi luvussa 4 perehdytään erilaisten tutkien kykyyn havaita häivekoneita ja vaihtoehtoihin, miten tutkalla havaittaisiin häivekoneita paremmin. Tässä kappaleessa käsitellään monostaattisia-, bi- ja multistaattisia-, eteenpäinsironta -, ohjus- ja kvanttitutkia.

# 2. TUTKATYYPIT

Tutkien kategorisointi voidaan tehdä monella eri perusteella. Koska jokainen tutka kuuluu useampaan alakategoriaan, johtavat kaikki kategorisointi tavat päällekkäisyyksiin. Tutkat voidaan ryhmitellä esimerkiksi taajuusalueen, signaalityypin, käyttötarkoituksen tai sijainnin perusteella, kuten seuraavissa aliluvuissa on kuvattu.

## 2.1 Taajuusalueet

Tutkan lähettämien radioaaltojen taajuudella on suuri merkitys tutkan ominaisuuksiin. Taajuus vaikuttaa muun muassa tutkan kokoon, kantamaan ja tarkkuuteen. Tästä syystä tutkan suunnittelussa on kiinnitettävä huomiota tutkan käyttötarkoitukseen ja sovittaa sen taajuus kyseiseen käyttötarkoitukseen sopivaksi. [3]

IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) on standardisoinut tietyt taajuusalueet tutkille ja antanut niille kirjain nimikkeet. Toinen yleisesti käytössä oleva taajuusalueiden standardisointi tapa on ITU:n (International Telecommunication Union) nimeämät taajuuskaistat. IEEE:n standardi koskee pelkästään tutkia, kun taas ITU:n standardi koskee langattomia tietoliikennesignaaleja. Alla taulukossa on esiteltynä molempien standardien mukaiset taajuusalueet. [4]

Taulukko 1. *IEEE:n ja ITU:n Radioaaltojen taajuusalueet. [4]*

| **IEEE Kirjainnimitys** | **IEEE Taajuusalue** | **ITU Taajuusalue** | **ITU-Kaista** |
|---|---|---|---|
| $HF$ | 3–30 MHz | | HF, High Frequency |
| $VHF$ | 30–300 MHz | | VHF, Very High frequency |
| $UHF$ | 300–1000 MHz | 0.3–3 GHz | UHF, Ultra-High Frequency |
| $L$ | 1–2 GHz | | |
| $S$ | 2–4 GHz | | |
| $C$ | 4–8 GHz | 3–30 GHz | SHF, Super High Frequency |
| $X$ | 8–12 GHz | | |
| $\mathrm{K_u}$ | 12–18 GHz | | |
| $K$ | 18–27 GHz | 30–300 GHz | EFH, Extremely High Frequency |
| $\mathrm{K_a}$ | 27–40 GHz | | |
| $V$ | 40–75 GHz | | |
| $W$ | 75–110 GHz | | |
| $mm$ | 110–300 GHz | 300–3000 GHz | - |

Mitä korkeampaa taajuutta tutka käyttää, sitä pienempää antennia voidaan käyttää, jolloin tutkan kokoa saadaan pienennettyä. Tutkan matala taajuus voi rajoittaa sen mahdollisia käyttökohteita, sekä alustoja, joihin se voidaan asentaa, koska pitkillä aallonpituuksilla antennin koko kasvaa suureksi. Antennin koko voidaan määrittää halutun taajuuden ja suuntauksen mukaan. Eri antennityypeillä voidaan kuitenkin saavuttaa hieman erikokoisia ja muotoisia, mutta samoilla taajuusalueella toimivia antenneja. [5]

Lyhyen aallonpituuden tutkilla on erinomainen tarkkuus ja pieni koko, mutta niiden kantama on verrattain heikko. Pitkän aallonpituuden, eli L-alueen tutkilla saavutetaan kaikista pisin kantama, mutta niiden tarkkuus ja resoluutio ei ole riittäviä kohteen seuraamiseen ja lukitsemiseen. Seuraamisella tarkoitetaan tiettyyn kohteeseen keskittymistä, jossa yleinen skannaaminen lopetetaan. Lukitsemisella taas tarkoitetaan tutkakeilan keskittämistä kohteeseen ohjuksen ohjaamista varten. Ensin kohde havaitaan, sitten sitä voidaan seurata ja kun halutaan ampua ohjus, kohde lukitaan. [3]

Kohteen lukitsemiseen ja ohjuksen ohjaamiseen on käytettävä tutkaa, jonka taajuudella voidaan saavuttaa hyvä resoluutio. Tutkan resoluutiolla tarkoitetaan sen kykyä erottaa eri kohteet toisistaan sekä kulman, että etäisyyden suhteen. Tutkanetäisyysresoluutio on käänteisesti verrannollinen tutkasignaalin kaistanleveyteen. Kaistanleveydellä tarkoitetaan signaalin ylä- ja alataajuuksien välistä eroa. Käytännössä kaistanleveys määrittää, kuinka laajalla taajuusalueella tutka toimii. Taajuus ja kaistanleveys ovat suoraan verrannollisia toisiinsa, jolloin korkeammilla taajuuksilla saavutetaan suurempi kaistanleveys. Tämän takia myös tutkan resoluutio paranee korkeammilla taajuuksilla. Ohjuksien kanssa käytetään yleensä vähintään X-alueen tutkia, jotta resoluutio on riittävä kohteeseen hakeutumiseen. [6]

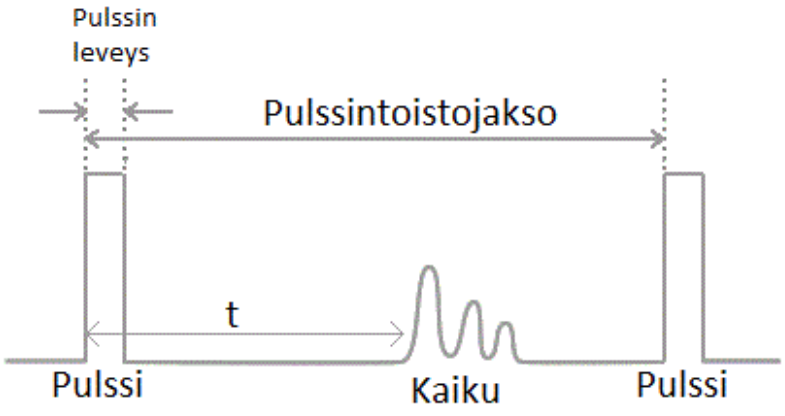
Suurimpana tekijänä tutkan kantamaan vaikuttaa tutkassa käytetyn antennin apertuuri. Apertuuri kertoo, kuinka suurelta alueelta antenni kykenee vastaanottamaan radioaaltoja. Merkittävästi apertuuriin vaikuttaa antennin fyysinen koko ja siten myös taajuus, mutta myös antennin muotoilulla voidaan vaikuttaa apertuurin kokoon. Koska radioaallot säteilevät antennista pallomaisesti, noudattavat ne käänteisen neliön lakia. Tällöin vastaanottavalla antennilla säteilyn teho pinta-alaa kohden on hyvin pieni. Pienikokoisempi antenni kattaa pienemmän pinta-alan, jolloin sen vastaanottama säteilyteho pienempi. Tämän takia korkeataajuuksisen ja yksiantennisen tutkan kantama jää lyhyeksi. Järjestelmän apertuuria voidaan kuitenkin kasvattaa rakentamalla fyysisesti pienistä antenneista suuri antenniryhmä, jolloin kokonaisuuden pinta-ala ja apertuuri on verrattavissa yhteen matalan taajuuden antenniin. Tällöin myös tutkan kantama on verrattavissa matalan taajuuden tutkaan. Radioaaltojen vaimentumiseen ilmakehässä vaikuttaa

tärkeimpänä tekijänä taajuus. Matalilla taajuuksilla radioaaltojen vaimeneminen on paljon heikompaa. Toisaalta ilmakehän vaikutus tulee merkittävissä määrin esille vasta mm-aalloilla, joten tutkien kannalta suurimpana tekijänä kantaman heikkenemiseen on antennin apertuuri. [7]

## 2.2 Signaalimuoto

### 2.2.1 Pulssitutka

Tutkat voidaan signaalimuodon perusteella jakaa karkeasti kahteen. Toinen näistä on pulssitutka, joka on nimensä mukaan tutka, jonka signaalimuotona käytetään pulsseja. Tutka lähettää tasaisin väliajoin pulsseja, joiden takaisinheijastumis aikaa mitataan. Näin voidaan määrittää kohteen etäisyys. Pulssit ovat hyvin lyhyitä aaltoja joko tasaisella tai muuttuvalla taajuudella. Pulssitutka mahdollistaa pitkän kantaman, sillä pulssit ovat hyvin lyhyitä, jolloin korkeasta tehosta huolimatta niiden kokonaisenergian määrä on suhteellisen pieni. Tähän vaikuttaa suuresti tutkan käyttämä pulssisuhde, joka käytännössä kertoo, kuinka suuren osan ajasta lähetin on päällä. Pulssitutkan keskimääräinen lähetysteho vastaa jatkuva-aaltoista tutkaa, mutta pulssien hetkittäisteho voi olla pulssisuhteesta riippuen moninkertainen verrattuna vastaavaan jatkuvasti lähettävään tutkaan. Pulssitutkan PRF (Pulse Repetition Frequency) kertoo, kuinka monta pulssia tutka lähettää sekuntia kohden. [8] PRF on pulssintoistojakson pituuden käänteisluku. Pulssisuhde taas saadaan pulssin keston ja pulssintoistojakson osamääränä. Kuvassa 1 on esitetty pulssitutkan signaali ja siihen liittyvät oleelliset termit. Kuvassa t:llä on merkitty tutkalähetteen takaisinheijastumiseen kuluva aika, minkä avulla kohteen etäisyys lasketaan.




***Kuva 1.*** *Pulssitutkan signaali. [9]*

Pulssitutkan alatyyppejä ovat muun muassa Doppler- ja MTI-tutkat. Doppler tutkalla mitataan kaiun kestoajan lisäksi pulssin taajuuden muuttumista, eli Doppler-taajuutta. Doppler-ilmiön mukaan, jos tutkan maali on liikkeessä, on heijastuvalla pulssilla hieman eri taajuus, tämä taajuuden muutos on riippuvainen tutkan ja kohteen välisestä suhteellisesta liikkeestä. Siis, sen perusteella voidaan laskea kohteen liikkumisnopeus hyvin tarkasti, kun tiedetään myös tutkan liikkeen suunta ja nopeus. Toisaalta ilman Doppler tutkaakin voidaan laskea kohteen nopeus vertaamalla useiden peräkkäisten pulssien etäisyysmittauksia. [8]

Myös MTI (Moving Target Indication) -tutka käyttää Doppler-ilmiötä liikkuvan kohteen määrittämiseen. MTI-tutkat käyttävät matalia taajuuksia ja niiden käyttötarkoituksena on vain löytää ja erottaa liikkuvia kohteita. MTI-tutkalla pystytään suodattamaan pois kaiut, joiden taajuus on pysynyt muuttumattomana, jolloin tutkan näytölle saadaan vain liikkuvat kohteet. [10]

### 2.2.2 CW-tutka

Kantoaaltotutka, eli CW (Continous Wave) -tutka on toinen perustutkatyypeistä. CW-tutka käyttää signaalinaan jatkuvaa aaltoa. Kaikista yksinkertaisin CW-tutkan tyyppi, lähettää jatkuvasti samanlaista signaalia samalla taajuudella ja vastaanottaa kaikua toisella antennilla. Koska lähetys on jatkuvaa, on antenneja oltava aina vähintään kaksi kappaletta. Lähetettävässä signaalissa ei ole minkäänlaista muutosta suhteessa aikaan, joten CW-tutkalla ei voida määrittää kohteen etäisyyttä. Kaikista yksinkertaisin CW-tutka kykenee siis kertomaan vain, että vastaanotetaanko kaikua vai ei. Jos antenni on suunnattu, voidaan silloin tietää, onko kyseisessä suunnassa mitään, mikä tuottaa kaiun. Jos kohde liikkuu tutkan näkökentän poikki, voidaan sitä seurata ja laskea sen kulmanopeus Tämä ei kuitenkaan itsellään ole kovin hyödyllistä. [11]

Taajuusmoduloitu kantoaaltotutka, eli FMCW (Frequency Modulated Continous Wave) -tutka on CW-tutkan tyyppi, jossa jatkuvaan signaaliin on lisätty muuttuva komponentti ajan suhteen, eli taajuus. Modulointi voitaisiin tehdä myös esimerkiksi amplitudin suhteen, mutta tutkissa käytetään lähes aina taajuusmodulointia. Kun taajuutta muutetaan jatkuvasti, voidaan lähetetyn ja vastaanotetun signaalin välistä viivettä mitata ajallisesti. Viiveen avulla voidaan laskea radioaaltojen kulkeman matkan pituus ja siten tietää kohteen etäisyys tutkasta. Taajuusmoduloinnilla tutkan kaistanleveyttä pystytään kasvattamaan vastaamaan käytetyn antennin kaistanleveyttä, jolloin tutkan etäisyysresoluutio paranee. [12]

SFCW (Stepped Frequency Continous Wave) -tutka on FMCW-tutkan erikoistapaus, jossa käytetään tiettyjä diskreettejä lähetystaajuuksia. Taajuuksien väliset erot ovat suuremmat, kuin FMCW-tutkalla. SFCW-tutkan avulla saadaan erikokoisten kohteiden etäisyydet mitattua tarkemmin, sillä erityisen pienet kohteet heijastavat matalataajuuksisia signaaleja huonosti. SFCW-tutkalla saavutetaan kapeampi hetkellinen kaistanleveys, mikä vähentää häiriötä vastaanottimessa. Tämä parantaa tutkan etäisyysmittausta ja tarkkuutta. Kun SFCW-tutkalla valaistaan kohdetta eri taajuuksilla, ei kohteen koolla ole suuresti merkitystä etäisyysmittauksen tarkkuuteen. SFCW-tutkat ovat kaikista yleisimmin käytössä maanalaisina tutkina (GPR, Ground Penetrating Radar). [13]

Doppler CW-tutka on CW-tutkan tyyppi, joka on tarkoitettu nopeuden mittaamiseen. CW- ja Pulssitutkat toimivat samalla toimintaperiaatteella, mutta CW-tutkan tapauksessa etäisyyttä kohteeseen ei välttämättä tiedetä, kun taas pulssitutkalla se on mahdollista laskea. Jos käytetään ei-moduloitua CW-tutkaa, on etäisyyttä mahdotonta selvittää, mutta lähetetyn ja vastaanotetun signaalin taajuuseroa, eli Doppler-taajuutta voidaan silti mitata. Jos CW-tutkalla halutaan mitata sekä nopeutta, että etäisyyttä on käytettävä moduloitua signaalia ja Doppleria. [11]

### 2.2.3 Kvanttitutka

Kvanttitutka on tutka, joka käyttää fotonien lomittumista. Lomittuminen on kvanttifysiikan ilmiö, jossa kaksi hiukkasta on yhteydessä toisiinsa riippumatta niiden välisestä etäisyydestä. Hiukkasten ollessa lomittuneita, voidaan yhden hiukkasen mitattavien ominaisuuksien, esimerkiksi värähtelysuunnan, perusteella välittömästi tietää fotoniparin toisen fotonin vastaavat ominaisuudet. [14]

Kvanttitutkassa käytetään hyväksi lomittumista. Kvanttitutka käyttää signaalinaan fotoneita. Tutkan lähettimessä luodaan lomittuneita fotonipareja. Parin toinen fotoni on niin sanottu signaalifotoni ja toinen on idler-fotoni. Tutkahavaintoa tehdessä idler-fotoni pidetään paikallaan ja signaalifotoni lähetetään kohti maalia. Jos signaalifotonien tiellä on jokin kohde, heijastuvat ne takaisin vastaanottimeen. Kun vastaanotettuja fotoneita verrataan idler-fotoneihin, nähdään ovatko ne lomittuneita. Jos vastaanotetut fotonit ovat idler-fotonien pareja, ovat ne osuneet kohteeseen. Kaikki vastaanotetut fotonit, joilla ei ole paria voidaan siis jättää huomiotta, jolloin tutkalla pystytään havaitsemaan vain halutut kohteet, eikä taustakohinalla ole suurta vaikutusta tutkan toimintaa. Koska kvanttitutkalla ei mitata vastaanotettavien radioaaltojen määrää, voidaan kvanttitutkalla havaita helpommin kohteita, jotka heikon tutkakaikunsa takia hukkuvat taustasäteilyyn normaalia tutkavastaanotinta käytettäessä. [15]

Kirjoitushetkellä kvanttitutkat ovat pitkälti teoreettisia ja vain muutamia prototyyppejä on olemassa, jotka lähinnä pyrkivät todentamaan kvanttitutkan teoriaa. Muun muassa Itävaltalainen tutkimusryhmä onnistui vuonna 2015 kehittämään kvanttitutkan version, jossa luotiin lomittuneita fotonipareja ja valaistiin kohdetta niiden avulla [16]. Myös Kiinalaiset tutkijat ovat rakentaneet kvanttitutkan prototyypin [17]. Valmiita järjestelmiä ei kuitenkaan vielä ole markkinoilla, joten kvanttitutkan todellinen potentiaali on vielä kyseenalainen.

## 2.3 Tutkan suuntauksen tyyppi

### 2.3.1 Mekaanisesti suunnattu tutka

Tutkalla etäisyyden määrittäminen on suhteellisen helppoa, mutta kohteen suunnan tarkka määritys on huomattavasti vaikeampaa. Yksi tapa ratkaista tämä ongelma on käyttää suuntaavaa antennia. Ympäristöä voidaan sitten skannata kääntämällä antennia. Usein antennin kääntäminen on toteutettu asentamalla se pyörivälle tai kääntyvälle alustalle, joka voi joko jatkuvasti pyöriä ja hakea kohteita tai seurata yksittäistä kohdetta. Monet tutkajärjestelmät koostuvat useasta antennista, jolloin yhtä voidaan käyttää kohteen hakuun ja toista seurantaan. [18] Tyypillisesti antennin keilan leveys on suuruusluokaltaan noin viisi astetta [19].

Mekaanisesti suunnattu antenni on suhteellisen hidas skannaamaan suuria alueita taivaasta. Antennin tarkkuus ja kulmaresoluutio ovat myös suhteellisen huonoja, sillä suunnattukin antenni vastaanottaa hieman signaaleja myös keilan sivusta, eikä sillä ole mitään tapaa tietää, mitkä signaalit tulevat suoraan edestäpäin ja mitkä keilan ulkopuolelta. Kohteen tarkan sijainnin määrittämisen kannalta on tärkeää, että antennin kulmaresoluutio on mahdollisimman tarkka ja antennin keila on mahdollisimman kapea, sillä muuten kohteen suunnan määrittäminen on hyvin epätarkkaa. [18]

### 2.3.2 Elektronisesti suunnattu tutka

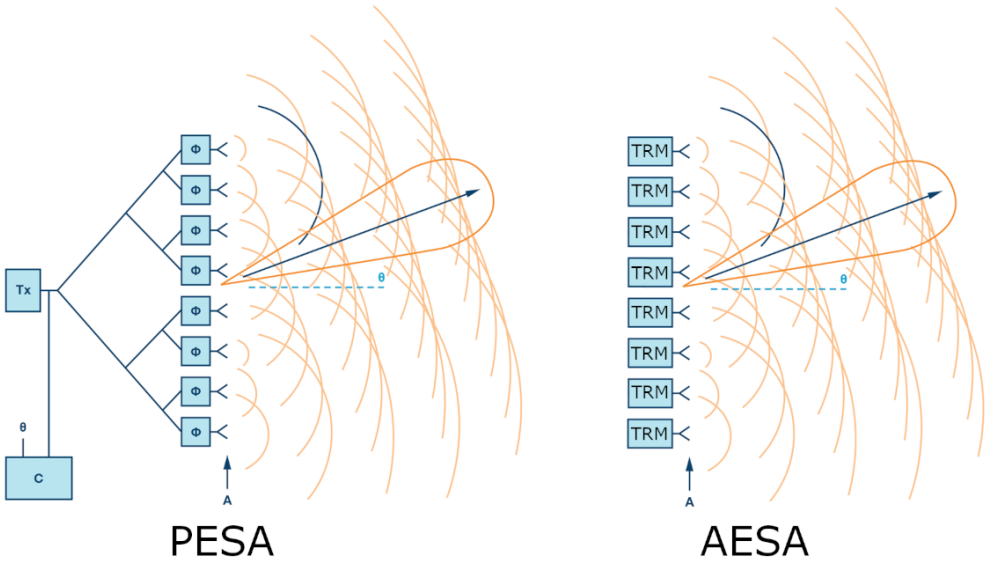
Elektronisesti suunnattu tutka, eli ESA (Electronically Scanned Array) -tutka käyttää antenniryhmää tutkan keilan suuntaamiseen. Elektronisesti suunnatun tutkan toiminta perustuu vierekkäisten antennien lähettämien signaaleiden väliseen vaihe-eroon, kuten kuvassa 2 on visualisoitu. Antenneista säteilevät radioaallot laajenevat pallomaisesti, jolloin vierekkäisten antennien lähetykset menevät päällekkäin. Jos nämä lomittain menevät radioaallot ovat samassa vaiheessa, vahvistavat ne signaalia siihen suuntaan

interferenssin avulla, jolloin tutkan keila suuntautuu vahvistavan interferenssin suuntaan. Antennien välille tarvittava vaihe-ero voidaan laskea kaavalla

$$\Delta\Phi = \frac{2\pi d sin\theta}{\lambda} \qquad (1)$$

jossa $\Delta\Phi$ on vierekkäisten antennien vaihekulmien ero, d on antennien välinen etäisyys, $\theta$ on keilan suunta asteina ja $\lambda$ on aallonpituus [20].

Tämä mahdollistaa tutkan suuntaamisen, ilman yhtäkään liikkuvaa osaa. Suuntaamisella on kuitenkin rajoitteensa, sillä antennit ovat aseteltu tasaiselle pinnalle, jolloin tutkan keila voidaan suunnata vain eteenpäin, tasaisen antennimatriisin näkökentän leveys on noin 90-140 astetta [21]. Jos halutaan skannata jokaiseen suuntaan, on antennimatriisin oltava käännettävissä. ESA mahdollistaa tutkan keilan välittömän suuntaamisen, jolloin koko näkökenttä voidaan skannata todella nopeasti. Keila voidaan uudelleen suunnata jokaisen pulssin välissä, joten skannauksen nopeuteen vaikuttaa oikeastaan vain tutkan PRF.




***Kuva 2.*** *ESA-tutkan antennien vaihe-eron avulla suunnattu tutkan keila. Antenneilla on PESA-tutkalla on yhteinen lähetin ja jokaisella antennilla on oma vaihemuunnin Φ. AESA-tutkalla jokaisella antennilla on oma lähetin-vastaanotin-moduuli eli TRM [22]*

PESA (Passive Electronically Scanned Array) -tutka on elektronisesti suunnatuista tutkista yksinkertaisin malli. PESA-tutkalla on yksi keskusyksikkö ja lähetin. Kaikkia antenneja ohjataan kerrallaan ja ne jakavat samalta lähettimeltä saadun signaalin. PESA-

tutkan jokainen antenni saa saman lähetinsignaalin. Jokaisella antennilla on oma vaihesiirrin, jolla lähetinsignaalille saadaan oikea vaihe, jotta keila saadaan suunnattua halutulla lailla. AESA (Active Electronically Scanned Array) -tutka on PESA-tutkaa kehittyneempi versio. AESA-tutka koostuu monista pienistä lähetin-vastaanotin-moduuleista, joita kutsutaan nimellä TRM (Transmitter Receiver Module). Jokainen TRM toimii itsenäisesti, kuten normaali tutka. AESA-tutkan TRM:t voivat operoida keskenään eri taajuuksilla ja TRM:ien muodostaman matriisin avulla voidaan elektronisesti muodostaa ja suunnata tutkan keila haluttuun suuntaan. TRM:ien eri taajuudet mahdollistavat useamman samanaikaisen keilan ja täten useamman kohteen seuraamisen tai usean ohjuksen samanaikaisen ohjaamisen. AESA-tutka kykenee myös hakemaan kohteita maasta ja ilmasta samanaikaisesti.[23]

AESA-tutkaa voidaan käyttää myös pelkkänä passiivisena vastaanottimena, jolloin se toimii elektronisena tukitoimena eli ESM:nä (Electronic Support Measure). ESM:n tehtävänä on paikantaa radioaaltojen tulosuunta. Tutkan TRM:t voidaan jakaa useampaan eri ryhmään ja eri ryhmillä voidaan suorittaa eri toimintoja, kuten aktiivista keilaamista tai passiivista kuuntelua. AESA-tutkat ovat suuntaamiseltaan ja muilta ominaisuuksiltaan täysin ylivertaisia verrattuna mekaanisesti suunnattuihin tutkiin, mutta AESA-tutka on rakenteeltaan todella paljon monimutkaisempi laite ja sen valmistaminen on vaikeampaa. AESA-tutkat ovat myös erittäin kalliita, joten ne soveltuvat parhaiten käyttökohteisiin, joissa useiden kohteiden samanaikainen seuraaminen ja nopea skannaaminen on ehdottoman tärkeää. [23]

AESA-tutkan alatyyppinä on LPI (Low Probability of Intercept) -tutka, joka on signaalityypiltänsä suunniteltu mahdollisimman vaikeasti paikannettavaksi. Niissä käytetään normaaliin tutkaan verrattuna heikompia lähetteitä ja suurempia taajuusalueita. [23] Sotakäyttöön suunnitellut lentokoneet on yleensä varustettu RWR (Radar Warning Receiver) -järjestelmillä, jotka tunnistavat, kun konetta valaistaan tutkalla. RWR:n toiminta perustuu toistuvien tutkapulssien vastaanottamiseen, jolloin signaalit erottuvat taustakohinasta. LPI-tutkalla pyritään hämäämään RWR:ää vaihtamalla pulssien taajuutta satunnaisesti. [24]

## 2.4 Tutkajärjestelmän sijoittelu

### 2.4.1 Monostaattinen tutka

Yleisin tutkajärjestelmän sijoittelun tapa on niin sanottu monostaattinen tutka, eli yksipaikkatutka. Tämä tarkoittaa, että tutkan vastaanotin ja lähetin sijaitsevat samassa

paikassa, tällaisen tutkan suurimpana vahvuutena on järjestelmän yksinkertaisuus, helppokäyttöisyys ja liikuteltavuus.

Monostaattisella tutkalla voidaan maalata ja havaita kohde käyttäen vain yhtä laitetta. Tutka kykenee havaitsemaan kohteita, jotka heijastavat siihen osuvat radioaallot suoraan takaisin niiden tulosuuntaan. Monostaattinen pulssitutka voidaan toteuttaa vain yhdellä antennilla, mutta usean antennin monostaattinen tutka on myös mahdollinen, kunhan antennit pysyvät lähellä toisiaan. CW-tutkan tapauksessa on tutkassa oltava kaksi erillistä antennia, tällöin toista käytetään lähettimenä ja toista vastaanottimena. [25]

Monostaattista tutkaa käyttäessä voidaan laskea kohteen etäisyys signaalien takaisinheijastumiseen kuluvan ajan perusteella. Koska lähettimen ja vastaanottimen etäisyys kohteeseen on yhtä suuri, saadaan kohteen etäisyys laskettua suoraan kuluneen ajan perusteella, kun tiedetään radioaaltojen nopeudeksi valonnopeus. Tällöin etäisyys kohteeseen on puolet heijastuneiden radioaaltojen kulkemasta kokonaismatkasta. [25]

Monostaattisen tutkan heikkoutena on koko järjestelmän helppo paikantaminen radioaalto-vastaanottimien avulla. Oikeastaan vain tutkan lähetin voidaan helposti paikantaa. Muut tutkan osat eivät lähetä radioaaltoja, joten niiden paikantaminen ei onnistu maalissa olevien vastaanottimien avulla. Monostaattisella tutkalla lähetin vaarantaa myös vastaanottimen ja tutkan alustana käytetyn ajoneuvon tai rakennuksen. ARM (Anti-Radiation Missile), eli tutkaan hakeutuva ohjus, seuraa radioaaltoja ja siten hakeutuu tutkan lähettimeen. Koska monostaattisella tutkalla vastaanotin on samassa paikassa kuin lähetin, on tutkaan hakeutuvalla ohjuksella helppo tuhota koko järjestelmä yhdellä kertaa. [26]

### 2.4.2 Bistaattinen tutka

Toisin kuin monostaattisen tutkan tapauksessa, bistaattisessa tutkassa lähetin ja vastaanotin ovat erillä toisistaan [6]. Bistaattisella tutkalla käytetään lähetintä valaitsemaan kohde ja toisaalla olevaa vastaanotinta havaitsemaan heijastuneet radioaallot.

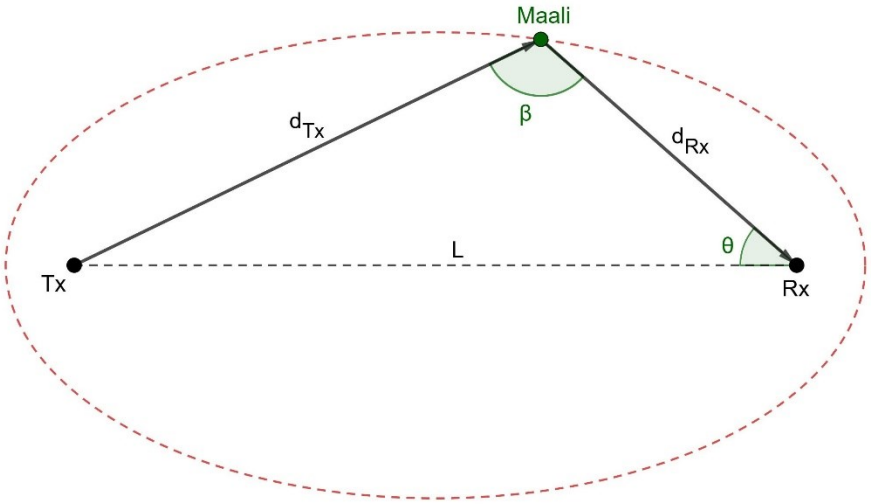
Bistaattinen tutka on vaikeammin liikutettavissa, koska sen osat ovat eri paikoissa. Tutkan tarkkuuden kannalta on myös ehdotonta, että sen osien sijainti suhteessa toisiinsa on tunnettu. Tämän lisäksi tutkan operoimiseen tarvittavan henkilöstön määrä on suurempi ja toiminnan koordinoiminen on vaikeampaa verrattuna monostaattiseen tutkaan.

Bistaattisen tutkan lähetin, vastaanotin ja maali muodostavat kolmion. Kun lähettimen ja vastaanottimen sijainnit, sekä vastaanotettujen signaalien tulosuunta on tunnettu,

voidaan maalin sijainti ja etäisyys laskea trigonometrian avulla. Jotta laskeminen onnistuu tarkasti, on vastaanottimen ja lähettimen sijainti suhteessa toisiinsa tunnettava tarkasti ja ne on synkronoitava keskenään, jotta heijastuvien radioaaltojen kulkema matka voidaan laskea. Bistaattisen tutkan etäisyyden laskeminen perustuu suoran ja kohteesta heijastuvan signaalin vastaanottamisen aikaeroon. Tämän perusteella voidaan laskea, kuinka paljon pidemmän reitin heijastunut signaali on kulkenut. Bistaattinen tutkajärjestelmä voidaan ajatella ellipsinä, jonka polttopisteinä ovat lähetin ja vastaanotin. Tällöin mitattu aikaero määrittää ellipsin koon. Kun tämän lisäksi tiedetään vastaanotetun signaalin tulokulma, voidaan kohteen sijainti määrittää tarkasti. Maalin etäisyys vastaanottimesta voidaan laskea kaavalla

$$d_{Rx} = \frac{\mathrm{D}^2 - L^2}{2\,(\mathrm{D} - L\,cos\theta)} \qquad (2)$$

jossa *L* on lähettimen ja vastaanottimen välinen etäisyys, θ on maalin suuntakulma vastaanottimesta katsottuna, D on bistaattinen etäisyys, eli $d_{Tx}$:n ja $d_{Rx}$:n summa. Lähettimen ja vastaanottimen välinen kulma maalista katsottuna on β [27]. Kulma β on nimeltään bistaattinen kulma [28]. Kun bistaattinen kulma on nolla, on kyseessä monostaattinen tutka. Kuvassa 3 on esitettynä bistaattinen tutkajärjestelmä.




***Kuva 3.*** *Bistaattisen tutkan lähettimen (Tx), vastaanottimen (Rx) ja maalin muodostama kolmio, sekä niiden avulla piirretty ellipsi.*

Bistaattisen tutkan synkronisointi voidaan tehdä esimerkiksi vastaanottimessa olevan toisen antennin avulla, joka on suunnattuna suoraan lähettimeen. Tällöin se vastaanottaa radioaallot suoraan lähettimestä. Kun toinen antenni on suunnattuna kohteeseen, voidaan antennien vastaanottamien signaalien välillä olevan viiveen avulla laskea kohteen etäisyys. Tämä vaatii kuitenkin suoran näköyhteyden vastaanottimen ja lähettimen välille. Synkronointi voidaan tehdä myös esimerkiksi valokaapelin avulla, jolloin

näköyhteyttä ei tarvita, mutta kaapelin rakentaminen pitkälle matkalle on epäkäytännöllistä, etenkin jos tutkajärjestelmää halutaan liikuttaa usein. [29]

Bistaattisen tutkan alatyyppejä ovat muun muassa passiivinen tutka ja eteenpäinsirontatutka, eli FSR (Forward Scatter Radar). Passiivisella tutkalla ei ole omaa lähetintä ollenkaan vaan se käyttää ulkopuolisia signaaleja, kuten TV- tai radiosignaaleja. Yleensä myös passiiviset tutkat käyttävät erillistä antennia kohdistettuna signaalien lähteeseen, jotta signaalien reitti voidaan laskea tarkasti. Tällöin tutkalla on oltava suora näköyhteys esimerkiksi TV-torniin. Teoriassa passiivinen tutka voi toimia ilmankin toista antennia. Jos lähete on digitaalinen, voidaan etäisyyttä mitata, mutta analogisella lähetteellä kohteen etäisyyden määrittäminen ole mahdollista yhdellä tutkajärjestelmällä. Kohteen suunta suhteessa tutkaan voidaan kuitenkin määrittää, kun käytetään suuntaavaa antennia tai antenniryhmää. Jos passiivisia tutkia on useita, voidaan niiden suuntatietojen perusteella kohteen tarkka sijainti määrittää. Passiivinen tutka on hyvin vaikeasti tuhottava, koska sitä ei voida antureiden avulla havaita ja se on muun muassa kokonaan suojassa tutkaan hakeutuvilta ohjuksilta, jotka hakeutuvat radioaaltojen lähetintä kohti. Passiivitutkan käyttämän signaalin lähetin voidaan kuitenkin tuhota, jolloin passiivitutka ei saa lähetettä ja sen toiminta keskeytyy. [30]

FSR:n tapauksessa kohde on lähettimen ja vastaanottimen välissä. Eli, kun bistaattinen kulma on lähes 180 astetta, on kyseessä FSR-tutka. Tällöin tutkan vastaanottimessa nähdään jatkuvasti häiriötön tutkalähete, kunnes niiden väliin lentää jotain, joka heijastaa radioaallot poispäin vastaanottimesta. FSR pyrkii siis havaitsemaan kohteen luoman “reiän” taivaalla. Tutkan toiminta perustuu Babinetin periaatteeseen, joka sanoo, että läpinäkymättömän objektin sirontakuvio on identtinen vastaavan kokoisen ja muotoisen reiän kanssa. FSR mittaa kohteeseen osuvien radioaaltojen eteenpäin siroutumista. Sirontakuvion perusteella voidaan määrittää kohteen sijainti ja koko. Eteenpäinsironta tutkapoikkipinta-ala, eli FSCS (Forward scatter cross section) määräytyy kohteen opasiteetin ja siluetin mukaan. Jos kohde on täysin läpinäkymätön, kuten ilma-alukset ovat, vaikuttaa vain koneen siluetti FSCS:n kokoon. [31]

FSR:llä on kuitenkin paljon heikkouksia, joista suurimpana on järjestelmän sijoittelun vaikeus. Jotta tutkasta on hyötyä ilmatilan valvonnassa, on joko lähettimen tai vastaanottimen oltava korkealla ilmassa tai avaruudessa, jotta kohteena oleva kone pääsee lentämään niiden väliin. Toisaalta FSR voi olla myös passiivinen, jos käytetään signaaleina esimerkiksi satelliittien signaaleja, mutta tällöin sirontakuvion määrittäminen on vaikeampaa, koska ei voida tarkalleen tietää satelliitin lähettämää signaalia. Signaalin selvittämiseen tarvittaisiin toinen vastaanotin, jolla olisi esteetön näköyhteys satelliittiin, jotta

se voisi vastaanottaa siroutumatonta signaalia. FSR:n näkökenttä on myös hyvin kapea, sillä se toimii vain, kun kohde on vastaanottimen ja lähettimen välissä. FSR:n näkökenttä määräytyy Fresnelin vyöhykkeen leveyden perusteella. Fresnelin vyöhyke kertoo, kuinka kaukana lähettimen ja vastaanottimen välisestä janasta kohde vaikuttaa vastaanotettuun signaaliin. Fresnelin vyöhykkeen leveyteen vaikuttaa taajuus, sekä etäisyydet lähettimen, kohteen ja vastaanottimen välillä. Jos kohde on lähettimen ja vastaanottimen välisen Fresnelin vyöhykkeen sisällä, voidaan se havaita FSR:llä [32]. FSR ei myöskään kykene suoraan määrittämään etäisyyttä kohteeseen.[33] Yksittäinen FSR ei siis ole kovin hyödyllinen, vaan niistä olisi muodostettava laajempi verkosto, jotta kohdetta voitaisiin seurata pidempiä matkoja.

### 2.4.3 Multistaattinen tutka

Multistaattisen tutkan toiminta on bistaattista tutkaa vastaava, mutta yhden vastaanottimeen sijaan se käyttää useampia vastaanottimia, jotka ovat hajautettu laajalle alueelle. Multistaattisen tutkan lähettimenä voidaan käyttää myös monostaattista tutkaa. Useiden vastaanottimien järjestelmässä suurimpana haasteena on jokaisen yksittäisen vastaanottimen synkronoiminen lähettimen kanssa, jotta saatu data on käyttökelpoista. Multistaattiset tutkat vaativat myös nopean ja luotettavan tietoliikenneyhteyden lähettimen ja vastaanottimien välille, jotta eri paikoissa vastaanotettujen signaalien luoma kokonaiskuva saadaan selville. [28]

MIMO (Multiple Inputs Multiple Outputs) -tutka on multistaattisen tutkan tyyppi, jossa käytetään useita lähettimiä. Tällöin kaikki lähettimet ovat synkronoitava keskenään, ja kaikki vastaanottimet on synkronoitava lähettimien kanssa. MIMO-tutka on siis todella monimutkainen järjestelmä, sen käyttö on vaikeampaa ja se on paljon kalliimpi. Koska MIMO:lla on useita lähettimiä, on kohteeseen osuvan säteilytehon määrä suurempi, jolloin myös saatavat kaiut ovat vahvempia. Useiden vastaanottimien ansiosta vastaanotettu kokonaisteho on myös suurempi. [28]

## 2.5 Tutkan alusta

### 2.5.1 Maassa ja merellä

Tutkia voidaan asentaa käyttökohteen mukaan moniin eri ajoneuvoihin. Usein tutkan alustana on jokin ajoneuvo tai laiva, mutta tutkat voivat olla myös kiinteitä. Matalan taajuuden tutkien koko kasvaa niin suureksi, että niiden asentaminen ajoneuvoon on epäkäytännöllistä. Tämän lisäksi matalan taajuuden tutkien kantama on todella pitkä, joten

niitä voidaan käyttää pitkän kantaman aikaisen varoituksen tutkina, jolloin niiden ei tarvitse liikkua. Esimerkiksi OTH (Over The Horizon) -tutka voi olla kiinteä. OTH-tutka on HF-alueen tutka, jolla saadaan jopa tuhansien kilometrien kantama heijastamalla signaalit ionosfäärin kautta, jolloin tutkalla voidaan nähdä kauas horisontin taakse [34].

Kaikenlaisia tutkia on asennettuna maalla ja vedessä kulkeviin ajoneuvoihin. Yleisiä esimerkkejä ovat pitkän kantaman varoitustutkat, hakututkat, sekä korkeamman taajuuden ilmatorjuntatutkat. Tutkan asentaminen ajoneuvoon mahdollistaa tutkan nopean liikkumisen ja siirtämisen paikasta toiseen, mikä mahdollistaa tutkan suojaamisen vihollisen hyökkäystä vastaan. Tutkia voidaan paikantaa niiden lähettämien radioaaltojen avulla ja lähetinhakeutuvat ohjukset kykenevät automaattisesti hakeutumaan lähettimeen ja tuhoamaan sen. Kun tutka on ajoneuvossa, voidaan ajoneuvo ajaa sopivaan paikkaan, käyttää tutkaa hetken aikaa, jolloin sen sijainti paljastuu. Sitten tutka voidaan sammuttaa ja ajoneuvo voidaan ajaa pois, jolloin tutkajärjestelmä on taas turvassa tutkaan hakeutuvilta ohjuksilta. Siksi on tärkeää, että tutkalla on kyky liikkua nopeasti. Nykyisin laivoissa käytetään usein suuria AESA-tutkia.

### 2.5.2 Ilmassa ja avaruudessa

Ilma-aluksissa käytetään useita erityyppisiä tutkia riippuen koneen tyypistä. Nykyaikaisissa hävittäjissä ja etenkin häivehävittäjissä käytetään pääosin AESA-tutkia. Hävittäjäkäytössä AESA-tutkien suurimpana vahvuutena on useampien keilojen luonti ja elektronisella keilaamisella saavutettu nopea skannaaminen. AESA-tutkalla voidaan seurata kaikkia tutkan näkökentän sisällä olevia kohteita samanaikaisesti. AESA-tutkaa voidaan käyttää myös passiiviseen kuunteluun, mikä mahdollistaa koneelle muiden tutkalähetteiden vastaanottamisen ilman, että sitä voidaan havaita ulkopuolisilla antureilla. [23]

Ohjuksissa käytetään korkean taajuuden tutkia, koska ohjukset ovat säteeltänsä pieniä ja siten rajoittavat antennin kokoa. Toisaalta korkeilla taajuuksilla saadaan myös parempi resoluutio ja tarkkuus, jolloin ohjus on helpompi ohjata kohteeseen. Ohjuksissa on usein pelkkä tutkavastaanotin ja kohteen maalaaminen tehdään käyttäen hävittäjän omaa tutkaa, tällaisia ohjuksia kutsutaan SARH-ohjuksiksi (Semi-Active Radar Homing). Ohjuksella voi olla myös oma lähetin, jolloin puhutaan ARH-ohjuksesta (Active Radar Homing). ARH-ohjuksen suurena etuna on sen kyky ohjautua maaliin, vaikka sen ampunut hävittäjä kääntäisi oman tutkansa pois kohteesta heti ohjuksen ammuttuaan. [35]

Ilmassa olevista valvontatutkista käytetään yleisesti nimeä AEW&C-tutka (Airborne Early Warning and Control). Näistä tunnetuin on Boeingin valmistama AWACS (Airborne

Warning and Control System). AEW&C-tutkalla voidaan havaita ja seurata useita kohteita samaan aikaan maassa merellä ja ilmassa. AEW&C-koneiden tehtävänä on seurata ilmatilaa, jakaa tietoa omille ja ylläpitää tilannekuvaa. [36] AEW&C-koneet on yleensä helppo tunnistaa niiden katolla olevan suuren tutkan perusteella, esimerkiksi kuvassa 4 näkyy Boeing E-3 Sentryn katolle asennettu AWACS-järjestelmän tutka.

***Kuva 4.*** *Yhdysvaltojen ilmavoimien Boeing E-3 Sentry. Koneeseen asennettuna AWACS-valvontatutka. [37]*

Myös avaruudessa on käytössä tutkia, mutta ne keskittyvät enimmäkseen sään ja kiinteiden kohteiden kuvantamiseen, eivät yksittäisten kohteiden seuraamiseen. Avaruudessa olevia tutkia ei siis yleisesti käytetä ilmatilan valvomiseen. [38]

# 3. HÄIVETEKNOLOGIA

Häiveteknologian perimmäisenä tarkoituksena on tehdä kohteesta mahdollisimman vaikeasti havaittava ja seurattava. Häiveestä ja sen eri osa-alueista puhuttaessa käytetään usein myös nimeä LO (Low observable). Häiveteknologia tai LO, on kattotermi kaikelle havaitsemisen vaikeuttamiseen pyrkivälle teknologialle. Häiveominaisuuksia voidaan asentaa laivaan, sukellusveneeseen, autoon, panssarivaunuun, ilma-alukseen tai mihin tahansa muuhun järjestelmään tai asiaan, joka halutaan tehdä vaikeasti havaittavaksi. Häiveteknologia voi tarkoittaa visuaalista naamiointia, lämpö- tai äänisignatuurin minimointia, lentokoneen tai laivan vanan eliminointia tai tutkapoikkipinta-alan minimointia.

Häiveen osa-alueista tutkapoikkipinta-ala on kaikista oleellisinta tutkalta piiloutumisessa. Tämä työ on rajattu koskemaan häivekoneiden havainnointia tutkalla, joten työssä keskitytään häiveen kannalta vain ilma-aluksiin ja niiden tutkapoikkipinta-alaan.

## 3.1 Tutkapoikkipinta-ala

Tutkapoikkipinta-alalla (RCS, Radar Cross Section) kuvataan esineen kykyä heijastaa radioaaltoja takaisin lähettimen tulosuuntaan. RCS:n yksikkönä on neliömetri $m^2$, mutta usein se ilmoitetaan logaritmisella asteikolla yksikössä dBsm. Käytännössä RCS:n koko määrittää sen, kuinka helposti kohde voidaan havaita monostaattisella tutkalla. RCS:n suuruuteen vaikuttaa koneen fyysinen koko, koneen heijastavuus ja koneen suuntaavuus. Julkisesti saatavilla olevat arvot tutkapoikkipinta-aloista ovat arvioita ja niiden suuruudet vaihtelevat todella paljon eri lähteissä. Normaalin hävittäjälentokoneen RCS on noin 5–15 $m^2$, kun taas häivehävittäjillä RCS on alle 0,01 $m^2$. Matkustajalentokoneella RCS on noin 60-100 $m^2$ ja fyysisesti samaa kokoluokkaa olevalla B-2 häivepommikoneella RCS on alle 0,01 $m^2$ [39] ja joidenkin väitteiden mukaan jopa 0,0001 $m^2$ [40].

RCS:n arvon perusteella voidaan verrata kohteen takaisinheijastumista suhteessa täydelliseen isotrooppiseen heijastimeen, kuten johtavaan palloon [41]. Esimerkiksi häivehävittäjä, jonka RCS on 0,1 $m^2$ näyttää tutkan näkökulmasta identtiseltä verrattuna heijastavaan palloon, jonka siluetin pinta-ala on 0,1 $m^2$.

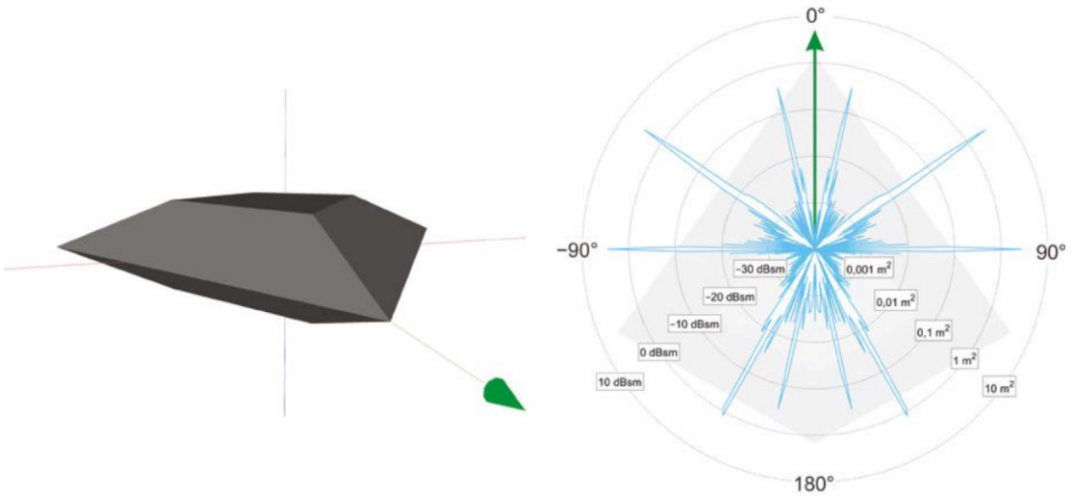
Pienen RCS:n omaavat lentokoneet ovat vaikeasti havaittavia tutkalla, koska osa tutkan lähettämistä radioaalloista eivät päädy vastaanottimeen. Täten tutka-anturit olettavat kohteen olevan pienempi, kuin mitä se todellisuudessa on. Pienen RCS:n omaavat

koneet pääsevät lentämään lähemmäs tutkaa ennen, kuin ne voidaan havaita. Lentokoneen tutkapoikkipinta-alaa voidaan pienentää muotoilun ja pinnoituksen avulla.

### 3.1.1 Muotoilu

Ilma-aluksen ulkomuodolla on merkittävä vaikutus RCS:n suuruuteen. Muotoilun tavoitteena on heijastaa koneeseen osuvat radioaallot poispäin niiden tulosuunnasta. Kun radioaallot heijastetaan poispäin lähettimesta, tutkan vastaanottimeen ei osu radioaaltoja, jolloin tutka ei kykene havaitsemaan konetta yhtä helposti. Kun puhutaan koneen tutkapoikkipinta-alasta, tarkoitetaan yleensä RCS:ää suoraan edestä katsottuna, mutta RCS voidaan mitata mistä vain kulmasta. Koneiden muoto on kuitenkin optimoitu edestäpäin tulevien radioaaltojen poispäin heijastamiseen ja siten eri kulmista mitattuna RCS:n arvo saattaa vaihdella huomattavan paljon. [39]

Ideaalisessa tapauksessa radioaallot heijastettaisiin ylöspäin, jolloin mikään muukaan vihollisen vastaanottimista ei voi havaita konetta, mutta käytännössä tämä on hyvin vaikeaa, etenkin jos lähettimet sijaitsevat maan pinnalla, jolloin osa radioaalloista osuu koneen alapintaan. Koneen epäsäännöllisen muotoilun takia RCS:n arvo vaihtelee paljon riippuen radioaaltojen tulosuunnasta [39]. Tämän takia koneelle mitataan eri suunnista RCS:n arvot, jolloin ne voidaan piirtää polaariseen RCS-diagrammiin, josta nähdään radioaaltojen tulosuunnan vaikutus. Kuvassa 5 oikealla on esimerkki RCS-diagrammista. Vastaava diagrammi voitaisiin tehdä myös kolmiulotteisena.




***Kuva 5.*** *Häiveteknisesti ideaalinen muoto ja sen RCS-diagrammi, jossa on esitettynä RCS eri suunnista S-taajuusalueella. Vihreä nuoli osoittaa koneen lentosuunnan. [42]*

Häivekoneiden muotoilussa voidaan nähdä muutamia yleisiä trendejä ja monet nykyaikaiset häivekoneet, etenkin häivehävittäjät, ovat hyvin läheisesti samannäköisiä keskenään, kuten kuvasta 6 voidaan nähdä. Moottorin ilmanotoille tehdään pitkät kanavat, jotta tutkalla ei saada suoraa näköyhteyttä moottorin siipiin. Häivekoneissa ei myöskään käytetä ulkoisesti kannettavia ohjuksia, pommeja tai polttoainetankkeja, koska ne väistämättä kasvattavat koneen RCS:ää. Häivekoneissa ei ole rinnakkaisia pintoja, ja 90 asteen sisäkulmia pyritään välttämään, koska suorat kulmat heijastavat radioaallot aina samassa tasossa. [43] Siksi niin sanotuissa viidennen sukupolven hävittäjissä käytetään ulospäin kallellaan olevia peräsimiä. Häiveteknisesti ideaalisesti muotoilulla koneella ei olisi peräsintä ollenkaan, mutta hävittäjien tapauksessa se on ohjattavuuden kannalta liian suuri kompromissi.

***Kuva 6.*** *Häivehävittäjien muotoilussa voidaan nähdä selkeitä yhtenäisyyksiä esimerkiksi nokkakartion, ilmanottoaukkojen, rungon muodon ja peräsimien suhteen. Yhdysvaltalaiset F-22 [44] ja F-35 [45], Venäläinen Su-57 [46], Kiinalaiset J-20 [47] ja J-35 [48], sekä Turkkilainen TAI TF Kaan [49].*

Toinen huomioitava asia häivekoneen suunnittelussa on ohjainpintojen liikkeen vaikutus RCS:n kokoon esimerkiksi Yhdysvaltojen ilmavoimien B-2 häivepommikone asetetaan vihollisen ilmatilassa tilaan, jossa koneen häiveominaisuudet maksimoidaan [50]. Tällöin koneen ohjauspintojen liikettä rajoitetaan, jotta RCS olisi vielä normaaliakin pienempi. Tämä kuitenkin heikentää koneen ohjattavuutta. B-2 pommikoneen ainoa puolustus on sen häive, joten ohjattavuuden heikkeneminen ei suuresti haittaa suoran lennon aikana.

Kuten aiemmin mainittiin, muotoilun kannalta on tärkeää huomata myös ohjuksien, lisätankkien ja pommitilan luukkujen avaamisen vaikutus tutkapoikkipinta-alaan. Kuvassa 7 on näkyvissä pommitila vasemmalla ja siipiin asennetut ulkoiset ripustimet oikealla. Serbiassa vuonna 1999 Yhdysvaltojen ilmavoimien F-117 pommikone ammuttiin alas, suurena osasyynä tähän oli koneen pommitilan luukkujen avaaminen. Pommitilan

suunnittelussa ei ollut huomioitu häiveominaisuuksia, joten heti luukkujen avautuessa koneen häiveominaisuudet heikkenivät huomattavasti, mikä mahdollisti ilmatorjuntatutkalle ohjuslukon saavuttamisen. [51]

***Kuva 7.*** *Yhdysvaltojen ilmavoimien F-22 pommitilan luukut auki (vas.) ja Yhdysvaltojen laivaston F-35 varustettuna ulkoisilla ripustimilla ja lyhyen kantaman ilmataistelu, eli ASRAAM-ohjuksilla. [52], [53]*

Häiveteknisesti ideaalinen muoto koneelle on deltoidi, joka esitettynä kuvassa 5. Ideaalisessa häivekoneessa ei ole erillisiä siipiä tai peräsintä ollenkaan, vaan koneen runko, siivet ja ohjainpinnat on kaikki integroitu yhteen. [42] Nykyisistä häivekoneista lähimpänä tätä on niin sanottu lentävä siipi konfiguraatio, jossa koneen runko on muodoltaan kolmiomainen ja toimii siipenä. Esimerkkinä lentävästä siivestä ovat B-2 ja B-21 Häivepommikoneet. Lentävällä siivellä on matala ilmanvastus verrattuna perinteiseen lentokoneeseen, mutta lentävän siiven haittapuolena on sen aerodynaaminen epästabiilisuus, mikä tekee manuaalisesti lentämisestä hyvin vaikeaa [54]. Toistaiseksi kaikki häivepommikoneet ovat kuitenkin lentäviä siipiä, niiden tapauksessa lentämisen vaikeus on kierretty tietokoneohjatulla lennonohjausjärjestelmällä. Lentävät siivet ovat ketteryyden kannalta huonoja, mutta pommikoneen tapauksessa kompromissi voidaan tehdä, koska pommikoneen ei tarvitse tehdä suuria ja nopeita liikkeitä, vaan se voi lentää pääosin suoraan.

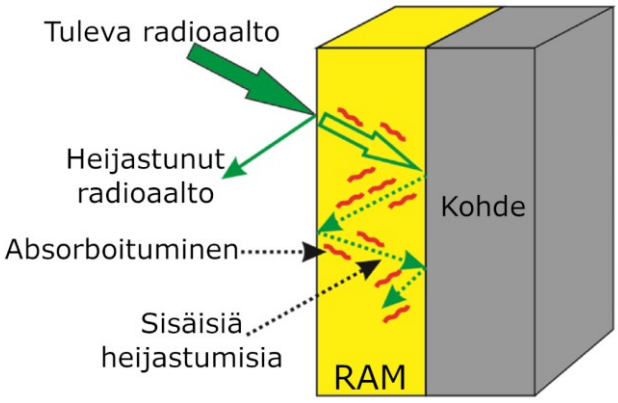
Koneen muodon suunnittelu on kompromissi pienen RCS:n ja hyvän ohjattavuuden välillä. RCS:ää pienentävät muotoiluelementit yleisesti ottaen heikentävät koneen hallittavuutta ja ketteryyttä.

### 3.1.2 Pinnoitus

Häivekoneen ulkopinnan tavoitteena on pienentää koneen heijastavuutta. Tähän voidaan käyttää useita erilaisia tekniikoita, pinta itsesään voi olla valmistettu radioaaltoja absorboivasta materiaalista tai siihen voidaan lisätä radioaaltoja absorboiva

maalipinnoitus. RAC (Radar absorbant Coating) lisätään häivekoneiden ulkopinnalle pienentämään koneen RCS:ää. Pinnoituksesta käytetään myös nimeä LO-pinnoite, sekä RAM (Radar absorbant Material). LO-pinnoituksen tavoitteena on absorboida siihen osuvat radioaallot, jotta ne eivät heijastuisi takaisin tutkan vastaanottimeen. Pinnoituksen toiminta perustuu sekä pinnan muotoihin, että materiaaleihin. LO-pinnoituksessa tulevien radioaaltojen energia muuttuu osin lämpöenergiaksi, jolloin heijastuvan energian määrä on pienempi. [55]

LO-pinnoitukset ovat yleensä valmistettu käyttäen metallia, metallipartikkeleita, johtavia polymeerejä tai dielektrisiä materiaaleja. Pinnoitteiden toiminta koostuu yleisesti kahdesta osasta, dielektrisestä häviöstä ja magneettisestä häviöstä. Dielektrisellä häviöllä tarkoitetaan dielektrisen materiaalin lämmitykseen kuluvaa energiaa, kun se on muuttuvassa sähkökentässä. LO-pinnoitteissa tähän tarkoitukseen voidaan käyttää esimerkiksi johtavia polymeerejä tai keraamisia materiaaleja. Magneettisella häviöllä taas tarkoitetaan muuttuvan magneettikentän aiheuttamaa johtavan materiaalin lämpenemistä. LO-pinnoitteissa tähän käytetään yleisesti pieniä metallipartikkeleita. Metallipartikkelit ovat sekoitettuna dielektrisen maalin joukkoon. Radioaaltojen osuessa pinnoitteeseen, ne läpäisevä maalin pinnan ja kulkevat maalipinnoitteen sisään. Radioaallot heijastuvat pinnoituksen sisällä useita kertoja ja samalla osa niiden energiasta lämmittää pinnoitetta. [56] Kuvassa 8 on esitetty RAM-pinnoituksen toimintaa.




***Kuva 8.*** *RAM-pinnoituksen toiminta [57]*

LO-pinnoitukset eivät kuitenkaan pysty täysin absorboimaan kaikkea säteilyä. Tämän lisäksi LO-pinnoitteet toimivat erityisen hyvin vain tietyillä taajuusalueilla. Pinnoitteen suunnittelussa voidaan vaikuttaa muun muassa partikkelien koolla siihen, millä taajuudella pinnoite toimii kaikista parhaiten. Koska ilmatorjunta- ja ohjustutkat käyttävät korkeita taajuuksia, ovat myös LO-pinnoitukset suunniteltu samoille taajuuksille.[56] Nykyisten häivekoneissa käytettyjen pinnoitteiden tarkat koostumukset ja absorbointikyvyt eivät

ole vapaasti saatavilla, mutta hyvä LO-pinnoite kykenee absorboimaan noin 70 % siihen osuvista radioaalloista [58].

Myös hiilinanoputkien käyttäminen LO-pinnoituksessa on mahdollista ja näin voidaan saavuttaa vielä paljon parempi absorbointikyky. Hiilinanoputkia kasvatetaan alustalle, jonka jälkeen niiden päälle lisätään epoksihartsi. Tällä tekniikalla on saavutettu X-taajuusalueella alle -13,3 dB:n heijastavuus käyttämällä kahden millimetrin paksuista pinnoitetta. -13,3 dB:n heijastavuudella yli 95 % pintaan osuvista mikroaalloista absorboituu. [59]

RAM-pinnoitus mahdollistaa aerodynaamisesti paremman muotoilun koneelle, koska se mahdollistaa häivemuotoilun kustannuksella tehtävät kompromissit, sillä muotoilun puutteita voidaan paikata pinnoituksella. Näin saadaan kone, joka on hyvin ohjattava, mutta jonka RCS pysyy erittäin pienenä. Teoriassa täydellinen LO-pinnoitus, joka absorboisi 100 % tulevista radioaalloista, mahdollistaisi minkä tahansa koneen muuttamisen häivekoneeksi, sillä muotoilulla ei olisi enää vaikutusta RCS:n suuruuteen.

RAM-pinnoituksen suurimpia heikkouksia ovat hinta, huolto ja vaikutus koneen maksiminopeuteen. LO-pinnoituksen ylläpito vaatii todella paljon työtä ja on hyvin kallista. Pinnoitus on huollettava ja korjattava usein ja esimerkiksi häivehävittäjän F-22 huollosta noin puolet käytetään LO-pinnoitteen ylläpitoon [60]. Lisäksi häivekoneita säilytetään käytön ulkopuolella ilmasto-ohjatuissa lentokonehalleissa, jotta pinnoitus säilyy mahdollisimman hyvänä. Yhdysvaltojen laivaston F-35C häivehävittäjien huippunopeudella kerrallaan lennettävää aikaa on rajoitettu, sillä pitkäkestoinen lentäminen suurilla nopeuksilla johtaa koneen pintalämpötilan kasvuun, jolloin LO-pinnoite voi vaurioitua tai lohkeilla, jolloin sen absorbointikyky heikkenee ja koneen RCS kasvaa [61].

## 3.2 Häivekoneen käyttö

Häivekoneen RCS:n suuruuden muuttuminen eri kuvakulmista katsottuna tarkoittaa, että kone on hyvä suunnata siten, että tulevat radioaallot osuvat koneeseen siinä kulmassa, missä RCS on kaikista pienin. Tämä voidaan saavuttaa suunnittelemalla lentoreitti vihollisen tutkien oletettujen sijaintien perusteella. Lentoreitin suunnittelussa on tärkeää, että pysytään mahdollisimman kaukana vihollisen tutkista ja pyritään pitämään kone siinä orientaatiossa, että sen kaikista pienin RCS osoittaa vihollisen tutkien suuntaan. Käytännössä on kuitenkin joskus lennettävä vihollisen tutkien ja ilmatorjunnan vaikutusalueen sisään. Tällöin on hyvä valita ennalta arvaamaton lentoreitti, jotta vihollisen ilmatorjuntatutkien on vaikea löytää kohdetta. Etenkin jos lentoja suoritetaan useiden päivien ja

viikkojen ajan, on syytä vaihtaa lentoreittiä päivästä toiseen. Aiemmin mainitun F-117 alas ampumisen toisena pääsyynä pidetään nimenomaan toistuvaa lentoreittiä. Koska NATO:n koneet lensivät toistuvasti samaa reittiä Serbian läpi, pystyi ilmatorjunta odottamaan, kunnes uusi kone lentäisi taas samasta kohdasta. [9]

Kolmantena pääsyynä Serbian alas ampumiselle pidetään NATO:n SEAD:in (Supression of Enemy Air Defenses), eli vihollisen ilmatorjunnan häirinnän puutetta. SEAD-koneiden tehtävänä on etsiä ja tuhota vihollisen tutka- ja IT-järjestelmiä käyttämällä Radioaalto vastaanottimia ja ARM:eja. SEAD:in puuttuminen mahdollisti jatkuvan ilmatorjuntatutkien käytön, ilman pelkoa tutkaan hakeutuvista ohjuksista. [51] Mahdollisesti Serbiassa luotettiin F-117 koneen häiveeseen hieman liiankin paljon, mikä mahdollisti vihollisselle sen havaitsemisen ja tuhoamisen. Häivekoneet eivät ole täydellisen näkymättömiä, joten niitä on hyvä käyttää osana suurempaa kokonaisuutta, johon kuuluu vihollisen tutkien sijaintien tiedustelu, sekä SEAD. Mitä kauemmin tutkaa voidaan vapaasti pitää päällä, sitä todennäköisempää on löytää maali. SEAD-koneiden paikalla olo pakottaa tutkalähettimien sammuttamisen. Tällöin tutkia voidaan pitää päällä vain hetkittäin suurella riskillä, mikä vielä korostaa häivekoneiden teknologista etua.

Häivekoneiden käytössä on myös huomioitavana kommunikoinnissa käytettyjen RF-signaalien lähetys. Jos kone lähettää RF-signaaleja, on se helppo havaita. Jos halutaan päästä vihollisen ilmatilaan huomaamatta, on noudatettava radiohiljaisuutta. RF-signaalit kertovat koneen karkean sijainnin, mikä voi helpottaa ilmatorjuntaa löytämään koneen tutkalla. Siksi osana häivekoneiden toimintaa on radiohiljaisuuden noudattaminen vihollisen ilmatilassa ja sen läheisyydessä.

Esimerkiksi B-2 pommikone kykenee vetämään antenninsa koneen sisään piiloon, kun se lähestyy vihollisilmatilaa. Tällöin tietyt kommunikaatiolinkit katkeavat ja kone ei emittoi mitään elektronisia signaaleja. [62]

## 3.3 Häivekoneen oma tutka

Häivekoneen tutkaa koskevat samat asiat, kuin RF-kommunikaatiota. Koneen oma tutka on pidettävä pois päältä, jotta vihollisen tutkavastaanottimet, eivät pysty havaitsemaan sen lähetystä. Häivehävittäjissä käytetään usein LPI AESA-tutkia. LPI-tutkia käytetään, koska sen signaalityyppi heikentää vihollisen RWR:n kykyä havaita ja kohdentaa sen lähettämiä radioaaltoja. Jolloin tarvittaessa tutkaa voidaan käyttää ilman, että oma sijainti paljastuu välittömästi. LPI-tutkienkaan paikantaminen ei ole mahdotonta, mutta se on perinteiselle RWR:lle vaikeaa taajuusvaihteluiden takia, mikä ainakin hidastaa

paikannusta. Tämän lisäksi AESA-tutkaa voidaan käyttää myös vastaanottimena, jolloin voidaan paikantaa vihollisen signaaleja, ilman omaa lähetystä, mikä on suuri etu häivekoneelle. [63]

Moderneja AESA-tutkia voidaan käyttää myös elektroniseen sodankäyntiin. Niillä voidaan muun muassa häiritä vihollisen tutkia ja tutkasignaaleja [63]. Tutkahäirintä perustuu tahalliseen radioaaltojen kohdistamiseen kohti vihollisen tutkan vastaanotinta. Radioaallot voivat olla satunnaista melua, jolla pyritään vaikeuttamaan kaiun ja taustan erotusta toisistaan [64]. Toinen tutkahäirinnän tapa on kohteena olevan tutkan lähettämien signaalien matkiminen. Tutkalle lähetetään vastaavanlaisia, mutta hieman muutettuja signaaleja, jolloin tutkan vastaanotin saa väärää tietoa kohteensa nopeudesta ja etäisyydestä tai vaihtoehtoisesti tutka voi nähdä useampia kohteita, joita ei oikeasti ole, jolloin todellisen kohteen määrittäminen on vaikeampaa. [65] Toisaalta häirinnän lähde on hyvin helppo paikantaa ja moni SARH-ohjus voi hakeutua häirintää tekevään koneeseen, joten häivehävittäjän kannalta tutkahäirintää ei kannata tehdä, kuin lyhyitä hetkiä ja vain jos sille on pakottava tarve.

# 4. HÄIVEKONEEN HAVAITSEMINEN TUTKALLA

Häiveteknologian kehittyessä lisää lähitulevaisuudessa on ilmatorjunnan kannalta ehdottoman tärkeää pystyä havaitsemaan häivekoneet ja kyetä vaikuttamaan niihin. Viimeisten vuosikymmenien ajan paras tapa ilma-alusten havaitsemiseen on ollut tutka, eikä muita yhtä hyviä ja tarkkoja tapoja ole näkyvissä lähitulevaisuudessakaan. Yleinen väärinkäsitys häivekoneisiin liittyen on luulo, että ne ovat näkymättömiä ja mediassakin voi nähdä puhuttavan näkymättömistä lentokoneista, kun tarkoitetaan häivekoneita. Häivekoneista käytetään myös nimitystä LO (Low observable) eli ”matala havaittavuus”, mikä on ehkä parempi termi, sillä se tekee selväksi, että häiveen tarkoituksena on havaitsemisen vaikeuttaminen. Toki ideaalinen häivekone olisi oikeasti tutkalle näkymätön, mutta nykyinen häiveteknologia ei sitä mahdollista.

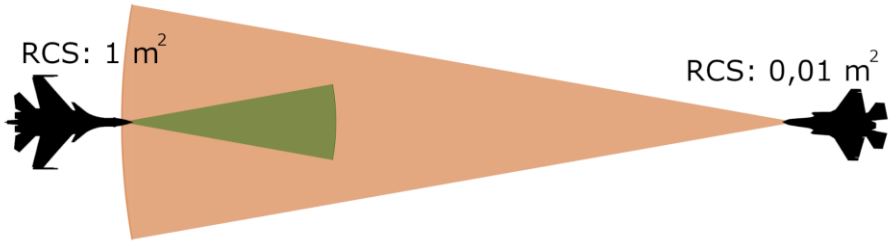
## 4.1 Monostaattinen tutka

Vaikka häivekoneet on suunniteltu pääosin monostaattiselta tutkalta piiloutumiseen, eivät ne silti ole näkymättömiä edes monostaattiselle tutkalle. Häivekoneet on suunniteltu priorisoimaan häiveominaisuudet korkeilla taajuuksilla, joten kaikista helpoin ja yksinkertaisin tapa havaita häivekoneita tutkien avulla on matalan taajuuden tutkien käyttäminen. Häivekoneet ovat normaaleihin ilma-aluksiin verrattuna vaikeammin havaittavia myös matalilla taajuuksilla, mutta eivät lähellekään näkymättömiä. Ilmatilan valvontaan matalan taajuuden tutkat ovat hyvä vaihtoehto, mutta niiden ongelmana on kohteeseen vaikuttaminen. Vaikka häivekone voidaan havaita ei se tarkoita, että se voitaisiin ampua alas.

Tutkien suorituskyky ilmoitetaan usein kertomalla millä maksimietäisyydellä tutka kykenee havaitsemaan tietyn kokoisen kohteen, esimerkiksi yhden neliömetrin RCS:n omaavan kohteen. Tämän tiedon avulla voidaan laskea myös muiden kokoisille kohteille havaitsemissetäisyys käyttämällä hyödyksi tutkayhtälöä. Tutkayhtälön mukaan tutkan kantama on verrannollinen RCS:n neljänteen juureen. [66]

Myös korkeammilla taajuuksilla voidaan havaita häivekoneita, jos kone on tarpeeksi lähellä tutkaa. Esimerkiksi Venäjän ilmavoimien Su-35 hävittäjässä käytössä olevalla Irbis-E X-alueen PESA-tutkalla on väitetysti kyky havaita 1 $m^2$ RCS:n omaava kohde noin 280 kilometrin päästä [67]. Edellä mainitun verrannollisuuden mukaan, kyseisellä tutkalla voidaan siis havaita F-35 hävittäjä, jonka RCS on noin 0,01 $m^2$, noin 90 kilometrin päästä, mikä on nykyaikaisen ilmataistelun kannalta suhteellisen lyhyt matka. Häivekoneet eivät

siis ole näkymättömiä edes korkeataajuuksisille monostaattisille tutkille, mutta häiveellä saavutettu etu ei-häivekoneeseen verrattuna mahdollistaa häivekoneelle vihollisen aikaisemman havainnoinnin, jolloin se voi ampua oman ohjuksensa ensin, ja mahdollisesti tuhota vihollisen jo ennen, kuin sitä itseään on havaittu. Tämä vaatii tutkan ja häivetekнologian lisäksi myös kantamaltaan vihollista paremman tai vähintään yhtä hyvän ilmasta-ilmaan ohjuksen. Kuvassa 9 on esitetty kahden hävittäjän kohtaaminen ja häiveen vaikutus tutkien havainnoimisetäisyyteen. Kuvan esimerkissä molemmilla koneilla on Irbis-E tutkan suorituskykyä vastaavat tutkat. Tällöin häivekone havaitsee vihollisen noin 190 km kauempaa. RCS:n pienentäminen yhteen sadasosaan, lyhentää havainnointi etäisyyttä noin yhteen kolmasosaan.




***Kuva 9.*** *Häivekone ja ei-häivekone vastakkain. Tutkakeilat esittävät havainnointietäisyyttä vihollisen RCS huomioiden.*

Monostaattisella tutkalla häivekoneen havainnointi etäisyyttä voidaan kasvattaa samalla tavalla, kuin muidenkin koneiden kohdalla, eli lähetystehoa ja apertuuria kasvattamalla. Pulssitutkan tapauksessa lähetystehoa voidaan kasvattaa hetkittäin muokkaamalla lähetettyjen pulssien kestoa tai tutkan pulssisuhdetta. Apertuurin kasvattamiseksi voidaan rakentaa suuri antenniryhmä tai -matriisi. Antenniryhmän kokoa rajoittavana tekijänä on kuitenkin kyky sijoittaa se järkevästi ajoneuvoon, jotta sen liikkuvuus voidaan säilyttää. Antenniryhmä voidaan suunnitella laajennettavaksi, tällöin ajoneuvon pysähtyessä antennit nostetaan pystyyn ja laajennetaan, jolloin apertuuria saadaan kasvatettua ja antenniryhmä on silti helposti liikutettavissa.

Ilma-aluksissa olevilla tutkilla tämä ei ole mahdollista, mutta muun muassa Su-35 hävittäjälle on suunniteltu AESA-tutkaa, joka olisi sijoitettuna koneen siipien sisälle siiven etureunaan [68]. Tämä mahdollistaisi koneen tutkan apertuurin kasvattamisen huomattavasti verrattuna koneeseen, jossa on vain nokkakartion sisälle sijoitettu tutka. Siipiin sijoitetut tutka voivat olla matalamman taajuuden tutkia verrattuna päätutkaan, jolloin kohteita voitaisiin hakea helpommin kahdella eri taajuusalueella. Keskimäärin hävittäjien AESA-tutkissa on noin 1000-1500 lähetin-vastaanotin moduulia [67], mutta ne ovat sijoitettuna hyvin pienelle alueelle nokka kartion sisään. Sijoittamalla lisää moduuleja siiville,

saadaan kasvatettua moduulien kokonaismäärää, sekä lähetystehoa. Siiville sijoitetut moduulit parantavat myös tutkan kulmaresoluutiota sivusuunnassa. Su-35 hävittäjässä moduuleja on kuitenkin vain yksi rivi, joten keilaus ei korkeussuunnassa onnistu ja pystysuuntainen kulmaresoluutio on heikko. Tämän vuoksi peräsimen yläreunoihin on asennettava erilliset antennit, jotka auttavat kohteen korkeuden määrittämisessä. [68]

## 4.2 Bistaattinen tutka

Yksi tapa, jolla häivekoneen havainnoimista kyetään helpottamaan, on bistaattisen tutkan käyttäminen. Koska bistaattinen tutka vastaanottaa epäsäännöllisessä kulmassa heijastuneita radioaaltoja, on mahdotonta muotoilla konetta siten, että bistaattiselta tutkalta voidaan piiloutua täydellisesti. Bistaattisen tutkan saavuttama hyöty pienenee, mitä lähempänä vastaanotin ja lähetin ovat toisiaan ja mitä kauempana kone on järjestelmästä. Toisin sanoen, jos bistaattinen kulma jää pieneksi, ei bistaattisen tutkan etu verrattuna monostaattiseen tutkaan ole yhtä merkittävä. Bistaattinen tutka on parhaimmillaan, kun maalin etäisyys sekä lähettimeen, että vastaanottimeen on lähes yhtä suuri. Tutkan vastaanotin on kuitenkin vaikea saada sijoitettua siten, että kone saadaan tutkajärjestelmän yläpuolelle, ellei kone ole syvällä omassa ilmatilassa. On tavoiteltavaa, että tutkajärjestelmä kykenisi havaitsemaan ja seuraamaan kohteita myös oman ilmatilan ulkopuolella yhtä laadukkaasti.

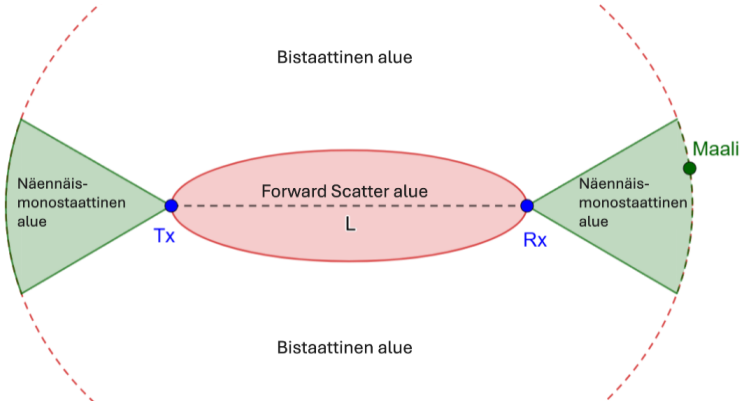
Jotta bistaattista kulmaa saataisiin kasvatettua, on vastaanotin ja lähetin vietävä kauas toisistaan, jolloin näköyhteys niiden välillä on vaikea saavuttaa ja valokaapelin rakentaminen kestää turhan pitkään ja on vaikeasti liikuteltava, joten olemassa olevien valokaapeliyhteyksien käyttäminen olisi tarpeellista. Toisaalta esimerkiksi GPS-satelliittien kautta synkronoiminen voisi olla parempi vaihtoehto. Valitettavasti GPS-synkronoiduilla bistaattisilla tutkilla on kuitenkin omat heikkoutensa. Koska alkuperäistä häiriötöntä signaalia ei saada vastaanottimelle on tutkalähetteen tarkka sisältö sovittava etukäteen ja signaalin on oltava näennäisesti satunnainen, jotta se voidaan luoda myös vastaanottimella. Myös lähetyksen ajankohta on sovittava etukäteen, jotta signaalien lentomatka voidaan määrittää mahdollisimman tarkasti. GPS-satelliittien avulla mitatun sijainnin tarkkuus voi olla muutamia metrejä, mikä aiheuttaa GPS-satelliitista saatuun aikaan virhettä noin 10-20 nanosekuntia per GPS-vastaanotin [69]. Tällöin signaalin lentoaikaan tulisi virhettä suurimmillaan muutamia kymmeniä metrejä, mikä on kuitenkin huomattavasti vähemmän, kuin antennin kulmaresoluution aiheuttama virhe.

Myös ilmassa voidaan käyttää bistaattisia tutkia. Etenkin jos käytetään useampia häivekoneita, on järkevää, että vain yksi niistä aktiivisesti lähettää signaaleita, koska

tutkalähetteet voivat paljastaa koneiden sijainnit. Kun muut lähistöllä olevat koneet sitten käyttävät tutkiansa vastaanottamaan tämän lähetyksen aiheuttamat kaiut, vastaa useiden hävittäjien muodostama kokonaisuus multistaattista tutkajärjestelmää. Toisena etuna on tutkaan hakeutuvan ohjuksen välttely, kun vain yksi kone lähettää kerrallaan signaalia, ovat muut koneet turvassa tutkaan hakeutuvilta ohjuksilta. Lähettävää konetta voidaan sitten suojella vaihtamalla, että mikä kone lähettää signaalia. Jos tutkaan hakeutuva ohjus on jo ammuttu ja se on lukittunut yhden koneen lähetykseen ja sitten lähettävää konetta vaihdetaan, ohjus menettää lähetteen, eikä enää kykene ohjautumaan kohti alkuperäistä kohdettansa.

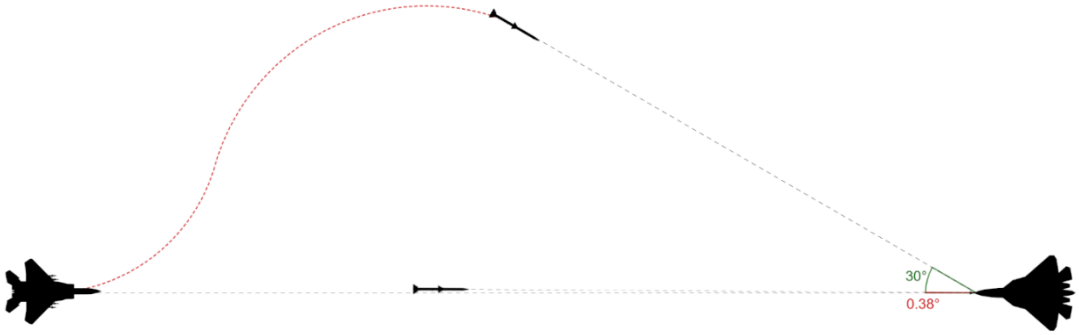
## 4.3 Ohjustutka

Bistaattisen tutkan periaatteella saadaan myös ratkaistua tutkaohjattujen ohjuksien käyttöön liittyviä ongelmia häivekoneita vastaan. Koska häivekoneet ovat suunniteltu ensisijaisesti monostaattista ja korkeataajuista tutkaa vastaan, on ohjusten käyttö niiden tuhoamisessa vaikeaa. SARH-ohjus toimii käytännössä bistaattisen tutkan vastaanottimena, sillä se käyttää sitä kantavan koneen tutkalähetettä. Vaikka tilanne vastaa osin bistaattista tutkaa, jää bistaattinen kulma ohjuksen tapauksessa todella pieneksi, joten vastaanottimen ja lähettimen eri sijainneista huolimatta on häivekoneen muotoilulla suuri vaikutus ohjustutkan näkemään RCS:ään. Kun bistaattinen tutka toimii pienillä bistaattisilla kulmilla, sanotaan sen olevan näennäismonostaattisella toiminta-alueella. Se, kuinka suuri tämä alue on, riippuu suuresti kohteen muodosta. Ilma-alusten tapauksessa se voi olla 20–30 astetta. Näennäismonostaattisella alueella, kohteen RCS vastaa monostaattisen tutkan näkemää RCS:ää. [27] Kuvassa 10 on esitetty bistaattisen tutkan eri toiminta-alueet.




***Kuva 10.*** *Bistaattisen tutkan toiminta-alueet.*

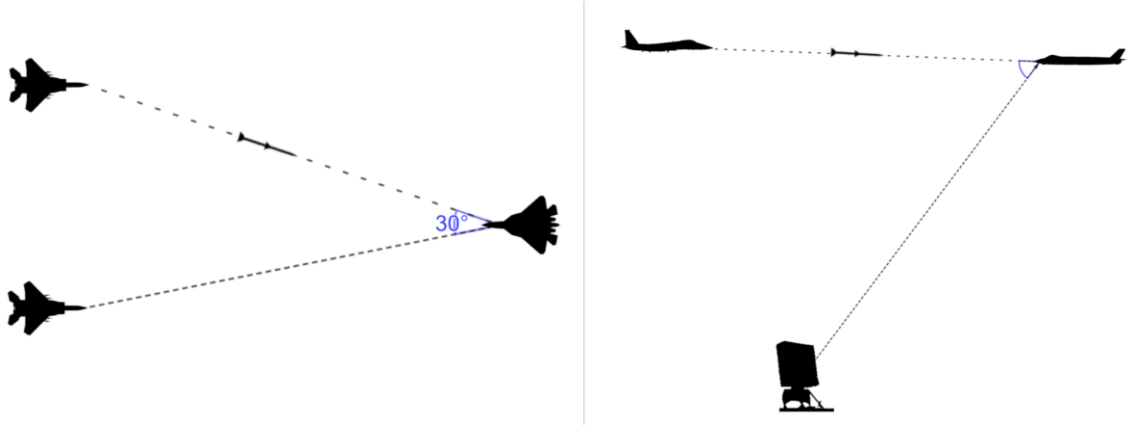
Ohjuksen lentoradan avulla voidaan yrittää kiertää tätä ongelmaa. Jos ohjus lentää suoraa kohteeseen, lentää se käytännössä suoraan sitä kantaneen koneen edessä, jolloin bistaattinen kulma on lähes nolla. Ohjus voidaan kuitenkin ohjelmoida lentämään kiertävää lentorataa siten, että se lähestyy kohdetta noin 20–30 asteen kulmassa suhteessa sitä kantaneeseen koneeseen, jolloin bistaattinen kulma on myös yli 20 astetta. Tämä on esitetty kuvassa 11. Ongelmana tässä on ohjuksen lentomatkan piteneminen ja ohjuksen on tiedettävä, kuinka kauas sivulle sen on lennettävä, jotta haluttu bistaattinen kulma saavutetaan, eli ohjus ei voi toimia täysin itsenäisesti vaan sen on kommunikoitava sitä kantavan koneen kanssa. Ylimääräisen etäisyyden lisäksi ohjus joutuu tekemään ylimääräisiä käännöksiä, mikä entisestään lyhentää sen kantamaa. Myös kantavan koneen ja kohteen välinen liike on huomioitava ohjuksen lentorataa määritettäessä.




***Kuva 11.*** *Ohjuksen vaihtoehtoinen lentoreitti, jolla bistaattista kulmaa saadaan kasvatettua. Suoraan lentävän ohjuksen bistaattiseksi kulmaksi jää lähes nolla, eli kyseessä on näennäisesti monostaattinen tutka, kun taas kiertävän ohjus näkee kohteen bistaattisen tutkapoikkipinta-alan.*

Ohjuksen ei tarvitse kuitenkaan tietää tutkalähetettä, joten sitä ei välttämättä tarvitse synkronoida lähettimen kanssa. Tämä mahdollistaa sen, että ohjuksen maalia voidaan valaista millä tahansa tutkalla, joka toimii samalla taajuusalueella ohjustutkan kanssa. Jos on käytössä useampi lentokone, voidaan esimerkiksi yhden koneen tutkalla valaista kohdetta ja ampua ohjus toisesta koneesta. Näin saadaan kasvatettua bistaattista kulmaa huomattavasti ilman, että ohjuksen tarvitsee kiertää. Mitä kauempana koneet ovat toisistaan, sitä suuremmaksi bistaattinen kulma kasvaa, mutta käytännössä kulmaa ei tarvitse kasvattaa yli edellä mainitun 20–30 asteen. Nykyaikaisilla hävittäjien tutkilla voidaan valaista häivekoneita reilun sadan kilometrin päästä, jolloin valaisevan koneen ja ohjuksen olisi oltava hieman yli 50 kilometrin päässä toisistaan saavuttaakseen 30 asteen bistaattisen kulman. Kuvassa 12 on esitetty tilanne, jossa toinen kone valaisee kohdetta ja toinen ampuu ohjuksen.

Edellä esitetty periaate voi toimia millä tahansa tutkalla, joka operoi samalla taajuusalueella ohjustutkan kanssa. Esimerkiksi maasta laukaistavaa ilmatorjuntaohjusta varten voidaan maali valaista lentokoneen tutkalla. Vastaavasti maassa olevalla tutkalla voidaan valaista kohde lentokoneesta ammuttua ohjusta varten, jolloin bistaattinen kulma saadaan pidettyä suurena ja häivekoneen muotoilun vaikutus tutkapoikkipinta-alaan saadaan nollattua, kuten on esitetty oikealla kuvassa 12. Toki on myös mahdollista, että sekä valaiseva tutka, että ohjus ovat maassa.




***Kuva 12.*** *Toisen koneen, tai maassa olevan tutkan avulla voidaan saavuttaa tarvittava bistaattinen kulma, jotta ohjus näkee kohteen bistaattisen RCS:n. Vasemmassa kuvassa vasemmalla alhaalla oleva kone valaisee kohdetta tutkallaan ja vasemmalla ylhäällä oleva kone ampuu ohjuksen. Oikeassa kuvassa massa oleva tutka valaisee kohteen ja lentokone ampuu ohjuksen.*

Oman lähettimen omaavilla ARH-ohjuksilla taas on huomattavasti vaikeampi tuhota häivekoneita, sillä ne käyttävät monostaattista tutkaa ohjautumiseen. Koska ohjus hakeutuu oman lähetteensä heijastukseen, näkee se aina kohteen monostaattisen tutkapoikkipinta-alan. Ohjuksen pienen koon takia, myös antennin apertuuri on pieni. Tämän takia ARH-ohjusten tutkien kantama on todella lyhyt. Tyypillinen ARH-ohjus kykenee havaitsemaan tutkapoikkipinta-alaltaan 1 $m^2$ kokoisen kohteen noin 10–20 kilometrin päästä, eli häivekone voidaan havaita vasta muutaman kilometrin päästä. Esimerkiksi AIM-120B alkaa käyttämään omaa tutkaansa vasta noin 20 kilometrin päässä kohteestaan, kun kohteena on tyypillinen hävittäjä [70]. Oletuksella, että tyypilliselle hävittäjälle RCS on noin 5 $m^2$, näkee kyseinen ohjus häivekoneen alle 5 km päästä. Joten ARH-ohjuksien tapauksessa vaihtoehdoksi jää päästä joko todella lähelle häivekonetta tai lähestyä sitä kulmasta, jossa RCS on suurimmillaan, jolloin ARH-ohjuksen tutkan kantama on hieman suurempi. Perinteisesti SARH-ohjuksiin verrattuna ARH-ohjuksen etuna on nimenomaan pidempi kantama, sillä ARH-ohjus voidaan ampua, vaikka kohdetta ei vielä nähtäisi tutkalla. Ohjus voidaan ohjata datalinkin avulla kohteen suuntaan ”sokeana”, kunnes ohjuksen oma tutka havaitsee kohteen. Toisena ARH-ohjuksen vahvuutena SARH-

ohjukseen verrattuna on sen kyky hakeutua kohteeseen, vaikka mikään muu lähetin ei enää valaise konetta, eli ohjus voi toimia täysin itsenäisesti laukaisun jälkeen. Perinteisiä koneita vastaan tästä on hyötyä, mutta häivekoneiden tapauksessa SARH-ohjuksen kyky kasvattaa bistaattista kulmaa pidentää niiden kantamaa huomattavasti ARH-ohjuksia pidemmäksi.

## 4.4 Multistaattinen tutka

Multistaattisen tutkan käyttö helpottaa häivekoneiden havaitsemista pidemmältä etäisyydeltä, sillä useiden vastaanottimien avulla todennäköisyydet sille, että vastaanottimiin heijastuu signaaleja kasvaa. Multistaattisella tutkalla saadaan paljon enemmän dataa, kuin bistaattisella tutkalla, mikä auttaa etenkin koneen seuraamisessa. Kun esimerkiksi koneen kääntyessä sen bistaattinen RCS muuttuu, voi bistaattisen tutkan kohdalla kone hetkellisesti olla vaikeammin havaittavissa tai jopa hävitä näkyvistä kokonaan. Useammilla vastaanottimella saadaan tasaisemmin dataa ja kohteen kääntyminen tai muu toiminta ei suuresti vaikuta vastaanotettuihin signaaleihin. Vaikka yksittäinen vastaanotin ei kykenisi havaitsemaan kohdetta, voidaan sitä silti seurata muilta vastaanottimilta saadun datan perusteella. Useiden vastaanottimien avulla kyetään siis rakentamaan tarkempi kokonaiskuva tilanteesta ja kohteen liikkeestä, sekä seuraamaan sitä paremmin. [28]

Myös passiivisten tutkien käyttö auttaa häivekoneiden havaitsemisessa samalla tavalla. Passiivisten tukien kohdalla kuitenkin ainoa tapa synkronoida signaali on toinen antenni, jolla on oltava suora näköyhteys lähettimeen, mikä rajoittaa passiivisten tutkien toimintaa. Kuitenkin mitä enemmän vastaanottimia saadaan käyttöön, sitä tarkemmin konetta voidaan seurata. Kokonaisuuden kannalta on myös tärkeää, että tutkien välinen datalinkki on nopea ja luotettava. Yksittäisellä tutkalla ei välttämättä kyetä seuraamaan häivekonetta, mutta jos kaikki omat tutkat alustasta ja tyypistä riippumatta saadaan kommunikoimaan keskenään, on seuraaminen paljon helpompaa. Kaikkien omien tutkien luoma verkko on kuitenkin hankalampi toteuttaa verrattuna yksittäisten erillisten tutkien operoimiseen.

## 4.5 Eteenpäinsirontatutka

Eteenpäinsirontatutka on potentiaalisesti kaikista paras tapa häivekoneen havaitsemiseen. FSR tutkan suurena vahvuutena häivekoneiden suhteen voidaan pitää sen

tutkapoikkipinta-alan määrittäviä tekijöitä. Kaavassa on esitetty FSR-tutkan poikkipinta-alan, eli FSCS:n lauseke

$$\sigma_{FSR} = \frac{4\pi A^2}{\lambda^2} \quad (3)$$

jossa λ on tutkan aallonpituus ja A on kohteen siluetin pinta-ala [31]. Kaava 3 pätee vain, kun bistaattinen kulma on lähellä 180 astetta. Kuvassa 10 on esitettynä bistaattisen tutkan FSR toiminta-alue. Kuten kaavasta 3 nähdään, FSR-tutkan tapauksessa vain ja ainoastaan käytetty taajuus ja koneen fyysinen koko vaikuttaa tutkapoikkipinta-alan suuruuteen. Siis koneen heijastuvuudella tai muotoilulla ei ole vaikutusta FSCS:n kokoon. Toisin sanottuna häivekoneissa käytetyt tekniikat RCS:n pienentämiseksi eivät vaikuta FSR-tutkaan millään tavalla. Jos FSR-tutkalta halutaan piiloutua, on koneen fyysisen koon pienentäminen ainoa passiivinen tapa pienentää sen FSCS:ää. Koneen suorituskykyvaatimusten takia koneen fyysisen koon pienentäminen ei kuitenkaan ole aina mahdollista. Etenkin koneen haluttu toimintamatka ja kannettavien ohjusten ja pommien määrä vaikuttaa koneen fyysiseen kokoon merkittävästi. Jotta saadaan, tarpeeksi pitkä kantama on koneen oltava niin iso, että sen tankkeihin mahtuu vaadittu määrä polttoainetta.

FSR:n toiminta perustuu kuitenkin siihen oletukseen, että kohteena oleva kappale on täysin läpinäkymätön, jolloin radioaallot heijastuvat poispäin koneeseen osuessaan. Oletuksena on myös, että kohde ei itsessään emittoi radioaaltoja. Eräs aktiivisen häiveen tekniikoista on tutkasignaalien aktiivinen kumoaminen. Se vaatii radiolähettimen asentamisen koneeseen, joka matkii tutkalta vastaanotettuja signaaleja ja lähettää vastaavat signaalit 180 asteen vaihe-erolla kohti vastaanotinta, jolloin signaalien välinen destruktiivinen interferenssi kumoaa tutkakaiun.[71] Samaa periaatetta voidaan käyttää myös FSR-tutkan tapauksessa, sillä erotuksella, että koneen pitäisi lähettää signaalit siten, että ne kulkisivat samaan suuntaa, kuin alkuperäinen tutkalähete. Aktiivinen signaalien kumoaminen on edelleen teoreettista, sillä tulevan signaalin mittaaminen amplitudin, taajuuden sekä vaiheen suhteen ja oman identtisen signaalin generoiminen kestää liian kauan, jotta tekniikkaa voitaisiin käyttää tehokkaasti.

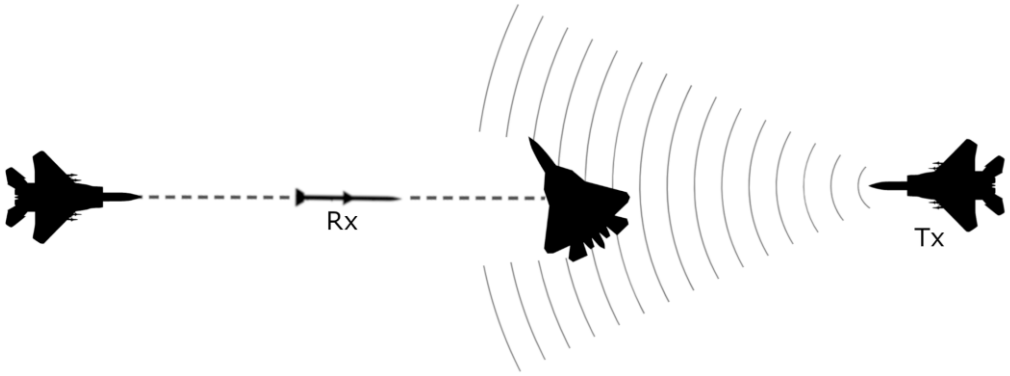
Nykyteknologialla signaalin kumoaminen onnistuu vain, jos tutkan lähettämä signaalin on etukäteen ennustettavissa, mutta siltikin koneen ja tutkan välisen etäisyyden muuttuminen ei olisi ennustettavissa, jolloin vaihekulma olisi väärä. Siis ainoaksi tavaksi jää tulevan signaalin mittaaminen ja vasta sen jälkeen voidaan lähettää oma signaali. Kuitenkin lähetettävän signaalin täytyy olla täydellisen identtinen tutkan signaalin kanssa ja vaihe-eron on oltava tasan 180 astetta, muuten heijastunutta signaalia ei saada

kumottua. Myös tutkan suunta on tiedettävä tarkalleen, viiveen on oltava minimaalinen ja koneen oma RCS on otettava huomioon lähetystehossa. [72] FSR:n tapauksessa myös koneen paksuus olisi huomioitava, jotta vaihekulma lähetettäessä on sama, kuin mikä alkuperäisen signaalin vaihe olisi ollut samassa kohdassa.

Kuten luvussa 2.4.2 mainittiin, FSR:llä on paljon heikkouksia, etenkin kohteen jatkuvan seuraamisen suhteen. FSR on erinomainen kohteen havaitsemisessa oman kapean näkökenttänsä sisällä ja sillä voidaan määrittää jopa kohteen muoto, mutta etäisyys- ja nopeusmittaukset eivät onnistu yksittäisellä FSR:llä, joten kohteen tuhoamisessa FSR-tutkasta ei ole suuresti apua.

Teorian tasolla FSR voisi olla käytössä myös ohjustutkissa. SAHR-ohjusta vastaavalla tavalla, kohde voitaisiin valaista erillisellä lähettimellä. Toisin kuin SARH-ohjukselle, FSR-ohjukselle kohde valaistaisiin takaapäin. Myös kohteeseen hakeutuminen olisi hieman erilaista verrattuna SARH-ohjukseen, sillä FSR:llä on vaikeaa määrittää kohteen suhteellista nopeutta. Tietoa nopeudesta käytetään SARH-ohjuksien lentoradan määrittämisessä [73], mutta teoriassa lentorata voidaan laskea ilmankin sitä. Ehtona on, että tiedetään kohteen suunta suhteessa ohjukseen ja sen kulmanopeus suhteessa ohjukseen, mitkä voidaan määrittää FSR:llä. Toisaalta ohjuksen tarkkuus heikkenee tämän takia jonkin verran.

Suurin ongelma FSR-ohjukselle olisi oman lähettimen vieminen kohteen taakse sen valaisemiseksi, mikä on suhteellisen haastavaa ja epäluotettavaa. Haasteena on Fresnelin vyöhykkeen pieni koko, mikä johtaa suuriin katvealueisiin. Eräänä vaihtoehtona olisi käyttää passiivista FSR:ää ohjuksessa, jolloin esimerkiksi tietoliikennesatelliittien signaaleja voitaisiin käyttää kohteen valaisuun. Kuitenkin satelliitin ja ohjuksen vastaanottimen välisen Fresnel vyöhykkeen halkaisija lentokoneiden lentokorkeudessa olisi suurimmillaankin noin sata metriä ja matalammilla korkeuksilla se vain pienenisi entisestään [32]. Vaikka tietoliikennesatelliitteja on useita satoja, on Fresnel vyöhykkeen halkaisija liian pieni, jotta FSR-ohjuksella olisi edellytyksiä olla luotettava. Siis, jokin toinen tapa kohteen valaisuun olisi keksittävä, jotta FSR-ohjuksesta tulisi käyttökelpoinen. Kuvassa 13 on havainnollistava esimerkki tapauksesta, jossa valaisu tehtäisiin toisen hävittäjän tutkalla, mutta käytännön tapauksessa tämä ei olisi ehkä ideaalinen vaihtoehto. Käytetyn kirjallisuuden perusteella FSR-ohjuksia ei ole tällä hetkellä markkinoilla. Tämän teoreettisen FSR-ohjuksen suurimpana vahvuutena olisi nimenomaan häivekoneiden tuhoaminen, koska häivetekniikoilla ei olisi juurikaan vaikutusta ohjukseen. Käytännön tasolla FSR-ohjus olisi kuitenkin erittäin vaikeasti toteutettavissa, mutta ajatuksena mielenkiintoinen ja aiheessa voisi olla potentiaalia syvällisempään perehtymiseen.




***Kuva 13.*** *FSR-ohjuksen toimintaperiaate. Kohde valaistaan ohjuksesta katsottuna kohteen takaa, jolloin ohjuksen vastaanotin toimii FSR:n tavoin. Käytännön toteutuksessa toisella koneella valaisu ei olisi välttämättä paras vaihtoehto*

## 4.6 Kvanttitutka

Tällä hetkellä kehityksessä olevat kvanttitutkat ovat eräs lähitulevaisuuden potentiaalisimmista vaihtoehdoista häivekoneiden havaitsemiseen ja seuraamiseen. Parhaatkin häivekoneet heijastavat aina pienen määrän radioaaltoja takaisin, mutta kun määrä saadaan tarpeeksi pieneksi, ei perinteinen radioaaltoja käyttävä tutka enää kykene erottamaan tutkakaikua taustakohinasta. Kvanttitutkan suurin vahvuus verrattuna perinteiseen tutkaan on nimenomaan oman signaalin erottaminen kohinasta huolimatta. Kvanttitutkalla kyetään siis paremmin löytämään oma lähete kohinan joukosta, vaikka heijastunut signaali olisi erittäin heikko. [15]

Kvanttitutkaa voitaisiin käyttää myös tutkapoikkipinta-alalta suurien kohteiden havaitsemiseen, mutta klassiseen tutkaan verrattuna se ei ole siinä oleellisesti parempi. Kvanttitutkasta saadaan siis hyötyä vain, jos kohina on signaalin suhteutettuna korkea. Kvanttitukan avulla havainnointia voidaan nopeuttaa jopa 20 % klassiseen tutkaan verrattuna. [74]

# 5. YHTEENVETO

Häivekoneiden suunnittelussa on haluttu tehdä koneista erityisen vaikeasti havaittavia tutkille. Etenkin monostaattista tutkaa vastaan häiveteknologialla saavutetaan merkittävä etu tutkan havainnointietäisyyttä lyhentämällä. Häivekoneet ovat parhaimmillaan monostaattisia ja korkeataajuuksisia tutkia vastaan, sillä niiden tärkein prioriteetti on olla mahdollisimman vaikeasti lukittava ohjustutkille, mutta myös muulta havainnoinnilta halutaan välttyä. Monostaattisen tutkan kykyyn havaita häivekoneita ei voida juurikaan vaikuttaa, mutta tutkajärjestelmän näkökulmasta on muutamia tekniikoita, joilla havainnointia voidaan helpottaa.

Bi- ja multistaattisilla tutkilla kyetään minimoimaan häivekoneen muotoilun vaikutus nähtävään tutkapoikkipinta-alaan, mikä helpottaa häivekoneiden havaitsemista. Toisaalta bi- ja multistaattiset tutkat ovat monimutkaisempia ja kalliimpia verrattuna monostaattisiin tutkiin. Myös passiivisella tutkalla voidaan minimoida häivekoneen muotoilun vaikutusta ja siten havaita ne helpommin. Eteenpäinsirontatutkalla taas kyetään minimoimaan myös häivekoneen pinnoituksen aiheuttama tutkapoikkipinta-alan pieneneminen, sillä FSR:n näkemään tutkapoikkipinta-alaan vaikuttaa vain kohteen fyysinen koko. FSR on kuitenkin käytännössä hyvin vaikea toteuttaa, sillä lähettimen ja vastaanottimen sijoittaminen on hankalaa, koska kohde on saatava niiden väliin. Tämän lisäksi sen näkökenttä on todella pieni, mikä johtaa suuriin katvealueisiin. Näistä syistä FSR on erinomainen häivekoneen havaitsemisessa, jos kone lentää juuri oikeasta kohdasta, mutta suuren alueen skannaaminen ja kohteen seuraaminen pitkiä matkoja on todella suuri haaste.

Ohjustutkat kärsivät häiveteknologiasta eniten, sillä ne käyttävät korkeita taajuuksia ja ovat luonnostaan monostaattisia. Juuri näissä olosuhteissa häivekoneet ovat parhaimmillaan. ARH-ohjuksilla tähän ei voida juurikaan vaikuttaa, mutta SARH-ohjuksilla voidaan SARH-ohjuksen bistaattisuuden vuoksi, niiden on mahdollista nähdä kohteen bistaattinen tutkapoikkipinta-alan muutamalla eri tavalla. Yhtenä vaihtoehtona on ohjuksen lentoreitin uudelleen ohjelmointi, jolloin ohjus käy kiertämässä sivulla, jolloin valaisevan lähettimen ja ohjuksen välille saadaan yli 20 asteen bistaattinen kulma. Toisena vaihtoehtona on käyttää erillistä tutkaa kohteen valaisemiseen, jolloin ohjuksen ja lähettimen kulma on automaattisesti tarpeeksi suuri ja ohjus voi lentää suoraan.

Häivekoneet eivät ole näkymättömiä, mutta niiden saavuttama etu on selkeä. Häivekoneet voidaan havaita myöhemmin ja niihin vaikuttaminen on vaikeampaa, mutta erinäisillä tutkateknologioilla se on kuitenkin mahdollista.

# 6. LÄHTEET


[1] M. Virtanen, ”Tutkassa näkymätön kone lennähti näytille Viroon - yksi viidestä vaihtoehdosta Suomen ilmavoimien uudeksi koneeksi”, Talouselämä. Viitattu: 17. lokakuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: https://www.talouselama.fi/uutiset/tutkassa-nakymaton-kone-lennahti-naytille-viroon-yksi-viidesta-vaihtoehdosta-suomen-ilmavoimien-uudeksi-koneeksi/6c208156-437f-3bc0-8ed7-47a2e2302b4d

[2] R. Meier, ”China claims to have ’radar’ that could detect F-22 stealth fighter”, Air Data News. Viitattu: 21. marraskuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: https://www.airdata-news.com/china-claims-to-have-radar-that-could-detect-f-22-stealth-fighter/

[3] ”What is a radar band and why is it important?”, Lockheed Martin. Viitattu: 17. lokakuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: https://www.lockheedmartin.com/en-us/news/features/2024/what-is-a-radar-band-and-why-is-it-important.html

[4] ”IEEE standard letter designations for radar-frequency bands”, *IEEE Std 521-2019 Revis. IEEE Std 521-2002*, ss. 1–15, helmi 2020, doi: 10.1109/IEEESTD.2020.8999849.

[5] V. F. Fusco, *Foundations of antenna theory and techniques*. Pearson Education, 2005.

[6] Institute of Electrical and Electronics Engineers, *IEEE standard radar definitions*. New York: IEEE, 2008.

[7] A. Saakian, *Radio wave propagation fundamentals, second edition*. Artech House, 2020.

[8] C. Alabaster, *Pulse doppler radar: principles, technology, applications*. Edison, NJ: SciTech Publishing, 2012.

[9] ”Radar Basics | FURUNO Technology | FURUNO”. Viitattu: 21. marraskuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: https://www.furuno.com/en/technology/radar/basic/

[10] A. Singh, V. Shah, ja A. Sarnaik, *Moving target indication radar*. GIAP Journals, 2015. [Verkossa]. Saatavissa: https://core.ac.uk/download/pdf/268005861.pdf

[11] M. Kronauge, *Waveform design for continuous wave radars*. Cuvillier Verlag, 2014.

[12] M. Jankiraman, *Design of multi-frequency CW radars*. SciTech Pub., 2007.

[13] C. Nguyen ja J. Park, *Stepped-frequency radar sensors: theory, analysis and design*, 1. p. teoksessa SpringerBriefs in Electrical and Computer Engineering. Cham: Springer International Publishing AG, 2016.

[14] Y. Tao, ”Quantum entanglement: Principles and research progress in quantum information processing”, *Theor. Nat. Sci.*, vsk. 30, nro 1, ss. 263–274, 2024, doi: 10.54254/2753-8818/30/20241130.

[15] R. G. Torromé, N. B. Bekhti-Winkel, ja P. Knott, ”Introduction to quantum radar”, 18. tammikuuta 2021, *arXiv*: arXiv:2006.14238. Viitattu: 28. lokakuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: http://arxiv.org/abs/2006.14238

[16] S. Barzanjeh, S. Pirandola, D. Vitali, ja J. M. Fink, ”Microwave quantum illumination using a digital receiver”, *Sci. Adv.*, 2020, doi: 10.1126/sciadv.abb0451.

[17] J. Trevithick, ”China reveals prototype configuration of jam resistant and counter-stealth ’quantum radar’”, The War Zone. Viitattu: 28. lokakuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: https://www.twz.com/24726/china-reveals-prototype-configuration-of-jam-resistant-and-counter-stealth-quantum-radar

[18] W.-K. Chen, *The electrical engineering handbook*, 1st ed. Amsterdam ; Elsevier Academic Press, 2005.

[19] ”Radar Basics | FURUNO Technology | FURUNO”. Viitattu: 25. marraskuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: https://www.furuno.com/en/technology/radar/basic/

[20] P. Delos, B. Broughton, ja J. Kraft, ”Phased array antenna patterns—part 1: linear array beam characteristics and array factor”. Viitattu: 25. marraskuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: https://www.analog.com/en/resources/analog-dialogue/articles/phased-array-antenna-patterns-part1.html

[21] C. Kopp, *Evolution of AESA radar technology*. Microwave Journal, 2012. Viitattu: 25. marraskuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: https://www.microwavejournal.com/articles/17992-evolution-of-aesa-radar-technology

[22] K. Benson, ”Phased array beamforming ICs simplify antenna design”. Viitattu: 28. lokakuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: https://www.analog.com/en/resources/analog-dialogue/articles/phased-array-beamforming-ics-simplify-antenna-design.html

[23] W. Yue ja C. Lanying, ”Status in U.S. AESA fighter radar and development trends”, teoksessa *IET International Radar Conference 2013*, huhti 2013. doi: 10.1049/cp.2013.0229.
[24] A. Denk, *Detection and jamming low probability of intercept (LPI) radars*. Monterey California. Naval Postgraduate School, 2006. Viitattu: 25. marraskuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: https://apps.dtic.mil/sti/citations/ADA456960
[25] N. J. Willis, *Bistatic radar*, 2nd ed., Corrected and Reprinted version. SciTech Pub., 2005.
[26] G. M. Siouris, *Missile guidance and control systems*. Springer Science & Business Media, 2006.
[27] M. I. Skolnik, *Radar handbook*, 3rd ed. McGraw-Hill Professional, 2008.
[28] V. S. Chernyak, *Fundamentals of multisite radar systems: multistatic radars and multistatic radar systems*. CRC Press LLC, 1998. [Verkossa]. Saatavissa: https://api.pageplace.de/preview/DT0400.9781351446426_A37628902/preview-9781351446426_A37628902.pdf
[29] M. Weiß, ”Synchronisation of bistatic radar systems”, [Verkossa]. Saatavissa: https://microsite.geo.uzh.ch/rsl-documents/research/SARlab/BistaticLiterature/Ver09/PDF/Wei04.pdf
[30] ”Radar versus stealth: passive radar and the future of U.S. military power”, [Verkossa]. Saatavissa: http://gbppr.net/kraken/Radar-vs-Stealth-Passive-Radar-Future.pdf
[31] J. I. Glaser, ”Bistatic RCS of complex objects near forward scatter”, *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vsk. AES-21, nro 1, ss. 70–78, 1985, doi: 10.1109/TAES.1985.310540.
[32] E. Biglieri, K. Wilson, ja S. G. Wilson, *Academic press library in mobile and wireless communications: transmission techniques for digital communications*. Elsevier Science & Technology, 2016.
[33] R. S. A. R. Abdullah, M. F. A. Rasid, M. W. Azis, ja M. Khalafalla, ”Target prediction in forward scattering radar”, teoksessa *2007 Asia-Pacific Conference on Applied Electromagnetics*, 2007, ss. 1–5. doi: 10.1109/APACE.2007.4603914.
[34] G. A. Fabrizio, *High frequency over-the-horizon radar: fundamental principles, signal processing, and practical applications*, 1st edition. teoksessa McGraw-Hill’s AccessEngineering. McGraw Hill Education, 2013.
[35] E. Markin, *Principles of modern radar missile seekers.* Artech House, 2022.
[36] ”Airborne Early Warning and Control System”. Viitattu: 2. joulukuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: https://www.defence.gov.au/defence-activities/projects/airborne-early-warning-control-system
[37] ”E-3 sentry awacs United States air”. Viitattu: 31. lokakuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: https://pixabay.com/photos/e-3-sentry-awacs-united-states-1747329/
[38] *Airborne and spaceborne radar systems*. Natural Resources Canada, 2015. Viitattu: 2. joulukuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: https://natural-resources.canada.ca/maps-tools-and-publications/satellite-imagery-elevation-data-and-air-photos/tutorial-fundamentals-remote-sensing/microwave-remote-sensing/airborne-and-spaceborne-radar-systems/9335
[39] K. Zikidis, A. Skondras, ja C. Tokas, *Low observable principles, stealth aircraft and anti-stealth technologies*. Journal of Computations & Modelling, 2014. [Verkossa]. Saatavissa: https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=6bcddefe9f5840199d193f78045a2a2eaec1dbe0
[40] R. Alderman, ”Radar cross section: the measure of stealth”. Viitattu: 18. marraskuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: https://militaryembedded.com/radar-ew/signal-processing/radar-cross-section-the-measure-of-stealth
[41] A. G. Bole, W. O. Dineley, ja A. Wall, *Radar and ARPA manual.*, 2nd ed / Alan Bole, Bill Dineley, Alan Wall. Elsevier Butterworth Heinemann, 2005.
[42] J. Jylhä, *Tutkapoikkipinta-alojen käsittely ja visualisointi*. 2019. Viitattu: 21. lokakuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: https://maavoimat.fi/documents/1951253/13454330/Vuosikirja+2019+-+Tutkapoikkipinta-alojen+k%C3%A4sittely+ja+visualisointi.pdf/fdc69441-5693-da22-86af-0853b12f4681/Vuosikirja+2019+-+Tutkapoikkipinta-alojen+k%C3%A4sittely+ja+visualisointi.pdf?t=1557218807000
[43] V. Kapur, *Stealth technology and its effect on aerial warfare*. teoksessa IDSA monograph series. New Delhi: Institute for Defence Studies and Analyses, 2014.
[44] ”Photos of F-22 Raptor flown by the USAF demonstration team”, Scenic Colorado Pictures | Colorado Photos & Prints for Sale. Viitattu: 24. marraskuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: https://www.coloradophotosource.com/project/photos-of-f-22-raptor-flown-by-the-usaf-demonstration-team/
[45] USAF, ”140310-F-NG006-007”. Viitattu: 3. joulukuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: https://www.af.mil/News/Photos/igphoto/2000783826/mediaid/5476720/

[46] ”Sukhoi pak fa”. Viitattu: 24. marraskuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: https://www.linkedin.com/pulse/sukhoi-pak-fa-nilson-bueno/
[47] ”Chengdu J-20A | China - Air Force | kuailedeann”, JetPhotos. Viitattu: 24. marraskuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: https://www.jetphotos.com/photo/11245836
[48] ”China : AVIC hints 3rd stealth fighter project ‘J-35’, planned for PLAN”, World Defense. Viitattu: 24. marraskuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: https://world-defense.com/threads/china-avic-hints-3rd-stealth-fighter-project-%E2%80%98j-35%E2%80%99-planned-for-plan.7490/
[49] ”TAI TF Kaan”, *Wikipedia*. 24. marraskuuta 2024. Viitattu: 24. marraskuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=TAI_TF_Kaan&oldid=1259362104
[50] W. I. Boring, ”Forget the B-2 bomber or F-35: next generation stealth might be a game-changer”, The National Interest. Viitattu: 25. marraskuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: https://nationalinterest.org/blog/buzz/forget-b-2-bomber-or-f-35-next-generation-stealth-might-be-game-changer-42132
[51] D. Cenciotti, ”The Aviationist - Automattic Inc.: 25 years ago today: an U.S. F-117 stealth jet is shot down over Serbia”, Newstex Trade & Industry Blogs. Viitattu: 22. lokakuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: https://www.proquest.com/docview/2990075924/citation/9F10274D8D494A14PQ/1
[52] US Air Force, *F-22 flyover*. 2010. Viitattu: 31. lokakuuta 2024. [Kuva]. Saatavissa: https://www.flickr.com/photos/usairforce/15528696863/
[53] L. Martin, *F-35B ASRAAM Live Fire*. 2017. Viitattu: 31. lokakuuta 2024. [Kuva]. Saatavissa: https://www.flickr.com/photos/lockheedmartin/35740457760/
[54] A. Hamada, A. Sultan, ja M. Abdelrahman, ”Design, build and fly a flying wing”, *Athens J. Technology Eng.*, elo 2018, doi: 10.30958/ajte.5-3-2.
[55] N. H. Faisal *ym.*, ”Thermal spray coatings for electromagnetic wave absorption and interference shielding: a review and future challenges”, *Adv. Eng. Mater.*, 2022, doi: 10.1002/adem.202200171.
[56] Z. Jia *ym.*, ”Progress in low-frequency microwave absorbing materials”, *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, 2018, doi: 10.1007/s10854-018-9909-z.
[57] F. Ruiz-Perez, S. M. López-Estrada, R. V. Tolentino-Hernández, ja F. Caballero-Briones, ”Carbon-based radar absorbing materials: A critical review”, *J. Sci. Adv. Mater. Devices*, 2022, doi: 10.1016/j.jsamd.2022.100454.
[58] T. Shao *ym.*, ”Ultra-thin and high temperature NiCrAlY alloy metamaterial enhanced radar absorbing coating”, *J. Alloys Compd.*, 2020, doi: 10.1016/j.jallcom.2020.154945.
[59] S.-H. Chen, W.-S. Kuo, ja R.-B. Yang, ”Microwave absorbing properties of a radar absorbing structure composed of carbon nanotube papers/glass fabric composites”, *Int. J. Appl. Ceram. Technol.*, 2019, doi: 10.1111/ijac.13192.
[60] ”F-22 Sustainment”, Lockheed Martin. Viitattu: 22. lokakuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: https://www.lockheedmartin.com/en-us/who-we-are/business-areas/aeronautics/sustainment/f-22-sustainment.html
[61] J. Keller, ”The F-35 still can’t go supersonic without compromising its critical stealth tech, and the Pentagon is OK with that”, Task & Purpose. Viitattu: 25. marraskuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: https://taskandpurpose.com/tech-tactics/f35-stealth-technology-deficiency/
[62] J. R. Chiles, ”The stealth bomber elite”, Smithsonian Magazine. Viitattu: 25. marraskuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: https://www.smithsonianmag.com/air-space-magazine/the-stealth-bomber-elite-315558/
[63] G. Reim, ”Raytheon, US Navy talk EA-18G’s AESA radar providing jamming boost”, Flight Global. Viitattu: 25. marraskuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: https://www.flightglobal.com/fixed-wing/raytheon-us-navy-talk-ea-18gs-aesa-radar-providing-jamming-boost/146886.article
[64] B. M. Pradko, ”Detecting radar spoofing and jamming”, 2022, [Verkossa]. Saatavissa: https://sites.tufts.edu/eeseniordesignhandbook/files/2022/05/Pradko__TechNote.pdf
[65] M. Annulli, ”Repeater jamming”, EMSOPEDIA. Viitattu: 25. marraskuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: https://www.emsopedia.org/entries/repeater-jamming/
[66] M. I. Skolnik, *Introduction to radar systems*. McGraw-Hill, 2001.
[67] C. Kopp, ”Flanker radars in beyond visual range air combat”, Air Power Australia, 2008. Viitattu: 16. marraskuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: https://www.ausairpower.net/APA-Flanker-Radars.html

[68] C. Kopp, ”Assessing the tikhomirov NIIP L-band active electronically steered array”, Air Power Australia, 2009. Viitattu: 18. marraskuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: http://www.ausairpower.net/APA-2009-06.html
[69] H. Chadsey, ”How bad receiver coordinates can affect GPS timing”, US Naval Observatory, 1996. Viitattu: 18. marraskuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: https://ntrs.nasa.gov/citations/19960042625
[70] S. French, *AIM-120 AMRAAM operations guide*. 2001. [Verkossa]. Saatavissa: https://www.e-haf.org/PublicFTP/BIBLIO8HKH/Weapons/f4_AIM-120.pdf
[71] B. Yang, W. Yang, W. Xiao, ja G. Chao, ”Active cancellation stealth technology analysis and verification in experiment”, Elsevier B.V, 2019. doi: 10.1016/j.procs.2019.01.199.
[72] P. Lacomme, J.-C. Marchais, J.-P. Hardange, ja E. Normant, *Air and spaceborne radar systems: an introduction*. William Andrew, 2001.
[73] N. F. Palumbo, R. A. Blauwkamp, ja J. M. Lloyd, ”Basic principles of homing guidance”, *Johns Hopkins Apl Tech. Dig.*, 2010.
[74] I. Fadelli, ”A quantum radar that outperforms classical radar by 20%”. Viitattu: 25. marraskuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: https://phys.org/news/2023-07-quantum-radar-outperforms-classical.html