

Elias Kokko

DRONEJEN TORJUNTA TUTKATEKNIIKALLA

Kandidaatintyö
Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta
Tarkastaja: Taneli Riihonen
Toukokuu 2022

TIIVISTELMÄ

Elias Kokko: Dronejen torjunta tutkatekniikalla
Tampereen yliopisto
Tietotekniikan tutkinto-ohjelma
Kandidaatintyö
Toukokuu 2022

Miehittämättömät lennokit, eli dronet, ovat luoneet uudenlaisen uhan niiden yleistymisen myötä. Droneja voidaan käyttää esimerkiksi vakoiluun tai salakuljetukseen, ja etenkin muu lento- liikenne on altis lennokeilla tehtävälle häirinnälle. Uhan torjumiseksi tarvitaan siihen sopivia menetelmiä ja laitteita, muun muassa dronetutkia. Tutkia voidaan käyttää sellaisenaan dronejen havainnointiin, tai ne voivat olla osana muuta järjestelmää, jonka tehtävänä on luvattoman lennokin torjuminen.

Tämän kandidaatintyön aiheena on luvattomien dronejen torjunta, ja se on rajattu dronejen tutkavalvontaan. Työssä käsitellään tutkan käyttöä ja toimintaa dronejen havainnoinnissa, ja muut valvontamenetelmät, kuten optinen ja akustinen valvonta, on rajattu työstä pois. Kandidaatintyön tavoitteina on perehtyä tutkatekniikkaan sekä dronejen asettamiin vaatimuksiin tutkavalvonnan näkökulmasta. Toisena tavoitteena on tutustua markkinoilla oleviin dronetutkiin sekä niiden ominaisuuksiin. Tarkoituksena on ymmärtää dronejen tutkauksen keskeisimmät menetelmät, siihen liittyvät haasteet sekä eroavaisuudet perinteisten kohteiden tutkauksesta.

Kandidaatintyö on jaettu kahteen osaan. Ensimmäisessä osassa perehdytään tutkan tavoitteisiin, tutkajärjestelmiin sekä tutkatekniikoihin. Edellisten lisäksi tutustutaan myös muihin tutkausprosessiin vaikuttaviin tekijöihin, kuten erilaisiin dronejen ominaisuuksiin sekä valvontaympäristöihin. Tarkasteltavia ympäristöjä ovat maastot, urbaani ympäristö sekä lentokentät. Kunkin ympäristön ominaispiirteitä analysoidaan ja niiden mahdolliset vaikutukset dronevalvontaan käydään myös läpi.

Toisessa osassa tehdään markkinakatsaus eri dronetutkavalmistajien tuotteisiin, jossa perehdytään niiden sisältämään tekniikkaan sekä ominaisuuksiin. Tuotteita on yhteensä viisi kappaletta, ja ne on valittu sattumanvaraisesti. Markkinakatsauksessa eri valmistajien tuotteita vertaillaan keskenään muun muassa suorituskyvyn suhteen. Kutakin tuotetta markkinoidaan nimenomaisesti dronejen valvontaan, jolloin ne ovat vertailukelpoisia keskenään.

Dronetutkajärjestelmät ovat pääsääntöisesti tarkoitettu viranomais- ja sotilaskäyttöön. Sen vuoksi tietoja tutkien tarkemmista teknisistä yksityiskohdista ei ole saatavilla, eikä niiden hinnoittelu ole myöskään julkista tietoa. Kaupallisten tutkien tekniset tiedot ja ominaisuudet ovat valmistajiensa ilmoittamia, ja tässä työssä tehty vertailu perustuu näihin tietoihin. Vertailussa ilmeni yhtäläisyyksiä eri tutkien välillä muun muassa käytetyissä tekniikoissa sekä taajuusalueissa ja eroavaisuuksia atsimuutin kattavuuksissa sekä tutkajärjestelmien painoissa.

Avainsanat: drone, lennokki, UAV, tutka, pulssitutka, CW, FMCW, valvonta, tutkapaikkipinta-ala, RCS, mikro-Doppler, häiveteknologia

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. TUTKAN TOIMINTA DRONEVALVONNASSA.....	3
2.1 Dronetutkan tavoitteet.....	3
2.2 Tutkatekniikka.....	4
2.3 Tutkajärjestelmät dronejen havainnoinnissa.....	7
3. DRONE TUTKAMAALINA.....	12
3.1 Tutkapaikkipinta-ala	12
3.2 Mikro-Doppler	16
3.3 Liikkeen seuranta.....	17
4. DRONETUTKAT ERI YMPÄRISTÖISSÄ	19
4.1 Havainnointi eri ympäristöissä.....	19
4.2 Tutkajärjestelmien käyttö eri ympäristöissä.....	20
4.3 Dronevalvonta lentokentillä	21
5. MARKKINARATKAISUT	22
5.1 Käytetyt tekniikat.....	22
5.2 Toteutukset.....	23
5.3 Keskeisimmät erot markkinoiden tuotteissa	24
6. YHTEENVETO.....	27
LÄHTEET.....	29

LYHENTEET JA MERKINNÄT

AOA	Angle of Arrival
CHIRP	Compressed, High-Resolution Pulse
CW	Continuous-Wave
FMCW	Frequency-Modulated, Continuous-Wave
IFF	Identification Friend or Foe
LOS	Line of Sight
PRF	Pulse Repetition Frequency
PRI	Pulse Repetition Interval
PSR	Primary Surveillance Radar
RAM	Radar-Absorbing Material
RCS	Radar Cross Section
SSR	Secondary Surveillance Radar
UAV	Unmanned Aerial Vehicle

1. JOHDANTO

Miehittämättömien ilma-alusten määrä on kasvanut nopeasti, ja ne ovat yleistyneet niin kuluttaja- kuin viranomaiskäytössäkin. Näitä ilma-aluksia, eli droneja, on saatavilla useissa eri hintaluokissa ja niiden koko, paino, ja ominaisuudet vaihtelevat merkittävästi. Tyypillinen varuste droneissa on videokamera, joka lähettää reaaliajassa videokuvaa sitä lennättävälle henkilölle, ja sitä voidaan myös tallentaa. Osa droneista on pieniä, alle kämmenen kokoisia, ja osa huomattavasti suurempia, jotka pystyvät kantamaan mukanaan kuormaa. Miehittämättömät, aseistetut lennokit ovat myös yleistyneet nykyaikaisessa sodankäynnissä. Ne ovat osoittautuneet tehokkaiksi sekä verrattain edullisiksi laitteiksi, joiden teknologinen kehitys on ollut nopeaa kahdenkymmenen viime vuoden aikana.

Lennoikkien edullinen hinta, helppokäyttöisyys sekä edellä mainitut ominaisuudet luovat niistä uudenlaisen turvallisuusrisikin. Pienikokoiset dronet ovat vaikeasti havaittavissa, ja niitä voidaan käyttää muun muassa laittomaan vakoiluun. Suurempia dronelennokkeja voidaan käyttää myös esimerkiksi huumeiden salakuljetukseen, sillä lennoikkien kantamat voivat olla useita kilometrejä.

Turvallisuusalalle on syntynyt uusia toimijoita, joiden pääasiallinen liike- ja tuotekehitystoiminta perustuu dronelennokkien torjuntaan. Alan yritykset ovat kehittäneet erilaisia järjestelmiä, jotka havaitsevat luvattomalla alueella lentävät lennokit ja torjuvat ne joko kineettisiä tai radioteknisiä ratkaisuja käyttäen. Dronejen torjuntaan käytettävät järjestelmät ovat kalliita, ja ne ovat pääasiassa tarkoitettu sotilas- sekä viranomaiskäyttöön.

Tässä työssä käsitellään miehittämättömien ilma-alusten havaitsemiseen tarkoitettuja tutkajärjestelmiä. Dronejen valvonnassa voidaan käyttää tutkien lisäksi myös akustiikkaan ja optiikkaan perustuvia valvontajärjestelmiä, mutta ne on rajattu tästä työstä pois. Kandidaatintyössä tehdään myös katsaus alan yritysten tarjoamien ratkaisujen teknisiin ominaisuuksiin tutkavalvonnan osalta.

Tämä kandidaatintyö on jäsennelly seuraavalla tavalla: toisessa luvussa käsitellään lennoikkien valvonnassa käytettävien tutkien tekniikkaa sekä erilaisia tutkajärjestelmiä. Kolmannessa luvussa perehdytään tutkamaalien, eli dronejen, keskeisiin ominaisuuksiin. Ominaisuuksia tarkastellaan tutkan näkökulmasta, miten esimerkiksi koko ja materiaalit vaikuttavat kohteen havaittavuuteen. Luvussa neljä käsitellään erilaisia valvottavia

ympäristöjä, niiden ominaispiirteitä sekä niiden luomia haasteita. Viidennessä luvussa perehdytään ja vertaillaan eri turvallisuusalan yritysten markkinaratkaisuja dronevalvonnassa. Viimeisessä luvussa esitetään yhteenveto työn johtopäätöksistä sekä havainnoista.

Työssä perehdyttiin erilaisiin tutkateknikoihin sekä niiden etuihin ja rajoitteisiin. Markkinakatsauksessa oli huomattavissa erityisesti kahden tekniikan suosio yritysten tuotteissa; kaikissa vertailluissa tuotteissa käytettiin joko pulssi- tai FMCW-tekniikkaa. Käytetyn tutkatekniikan lisäksi eri toteutuksien välillä oli yhtäläisyyksiä käytetyissä tutkajuusalueissa, suurin osa toimi joko X- tai Ku-taajuusalueilla. Suurimmat eroavaisuudet eri tutkajärjestelmien välillä liittyivät joko niiden painoon tai atsimuutin kattavuuteen.

2. TUTKAN TOIMINTA DRONEVALVONNASSA

Dronejen, kuten myös muunkin ilmailuliikenteen valvontaan voidaan käyttää tutkia. Niiden avulla lentävä alus voidaan havaita, paikantaa ja sen liikettä voidaan seurata valvottavalla alueella. Fyysisen tutkan lisäksi keskeinen osa ovat myös erilaiset ohjelmistot, jotka yhdessä tutkan kanssa muodostavat tutkajärjestelmän. Olennaisia eroja eri tutkajärjestelmien välillä ovat käytetyt tutkatekniikat sekä ohjelmistojen ominaisuudet.

Tässä luvussa perehdytään dronetutkan keskeisiin tavoitteisiin dronevalvonnan kannalta sekä eri tutkatekniikoiden ja järjestelmien ominaisuuksiin ja niiden eroihin. Edellisten ymmärtäminen on oleellista arvioitaessa erilaisia markkinaratkaisuja sekä erilaisten ympäristöjen vaikutuksia niiden toimintaan.

2.1 Dronetutkan tavoitteet

Dronetutkan perimmäisenä tavoitteena on havaita valvottavalla alueella lentävät lennot. Tutkan valvoma alue jakautuu matriisiksi, ja kutakin matriisin ruutua kutsutaan koriksi. Jokainen kori on yksilöity, eli ne ovat erotettavissa toisistaan. [26] Kohteen lentäessä valvottavalla alueella se asettuu aina jonkin korin alueelle, ja mikäli tältä alueelta tuleva kohteen heijastuman teho on tarpeeksi suuri, se tulkitaan havainnoksi. Etenkin suuret kohteet voivat olla samanaikaisesti usean korin alueella, jolloin jokaisesta saadaan havainto, ellei sitä erikseen prosessoida näkyväksi vain yhdessä.

Havaitsemisen lisäksi tutkalla halutaan myös saada tietoa lennokin ominaisuuksista, kuten sen painosta ja koosta. Esimerkiksi droneja valmistavan DJI:n valikoiman pienin drone on halkaisijaltaan 213 millimetriä ja painaa 249 grammaa [1], ja suurin halkaisijaltaan 1133 millimetriä ja painaa 10 kiloa, maksimikuorman kanssa 15,5 kiloa [2]. Lennokin fyysisten tietojen avulla voidaan arvioida, pystyykö se esimerkiksi kameran lisäksi kantamaan muuta kuormaa ja täten luomaan uhan esimerkiksi räjähteiden tai salakuljetuksen avulla.

Yksittäisen lennokin sijaan dronet voivat myös lentää parvessa, jossa voi olla tuhansia lennokkeja [3]. Usean dronen muodostama parvi luo uudenlaisen haasteen tutkalle, jonka tavoitteena on tunnistaa jokainen parvessa lentävä alus mahdollista torjuntaa var-

ten. Jo yli sadan pienen, nopeasti liikkuvan dronen parvi voi olla liian haastava perinteisille tutkajärjestelmille [4]. Tutkatekniikka usean kohteen samanaikaisessa tunnistamisessa on kehittynyt juuri dronetutkien myötä.

Havaitsemisen lisäksi oleellinen tieto on lennokin sijainti kartalla. Kaksiulotteisen matriisin perusteella voidaan määrittää kohteen suunta ja etäisyys. Tutkan lähettämä radioaalto heijastuu lennokista takaisin tutkaan, ja tähän kuluneesta ajasta voidaan määrittää sen etäisyys, kun tiedetään, että radioaalto kulkee valonnopeutta [24]. Lennokin sijainnin määrittäminen tutkalla on tehokas tapa verrattuna muihin menetelmiin, sillä radioaallot kulkevat esimerkiksi sumun läpi, jolloin määrittäminen on mahdollista tehdä, vaikka suoraa näköyhteyttä kohteeseen ei olisi. [5]

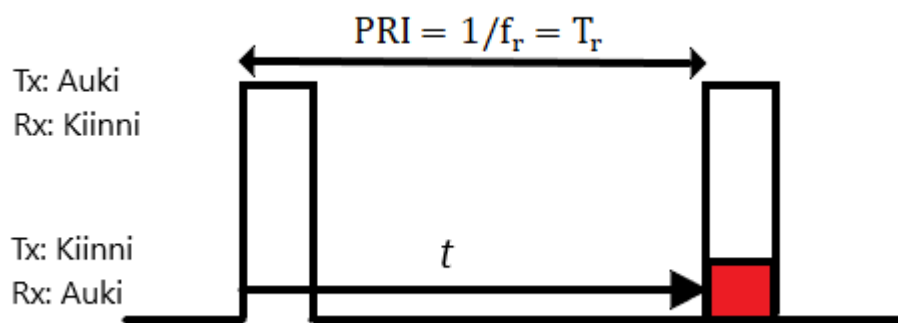
Liikkuvia kohteita tutkatessa on oleellista, että myös liikkeen suunta ja nopeus voidaan määrittää. Perinteisellä tutkalla, joka määrittää kohteen etäisyyden ja sijainnin, voidaan määrittää myös liike tutkimalla peräkkäisten määritettyjen sijaintitietojen muutoksia. Lennokin nopeuden määrittäminen vaatii Doppler-ilmiön hyödyntämistä, johon tarvitaan Doppler-tutkaa. [5] Sähkömoottorien ansiosta dronet kykenevät nopeisiin nopeudenmuutoksiin [6], jolloin liikkeen määrittäminen on kriittistä. Sen merkitys korostuu, kun tutka on osana muuta torjuntajärjestelmää, joka torjuu dronen esimerkiksi ampumalla.

2.2 Tutkatekniikka

Tutkan toiminta perustuu sen jatkuvasti lähettämiin radioaaltoihin, jotka heijastuessaan kohteesta takaisin tutkaan antavat tarvittavat parametrit haluttujen tietojen laskemiseksi. Tällaisesta tutkasta käytetään lyhennettä PSR (Primary Surveillance Radar). Tutkattava kohde voi myös kommunikoida tutkan kanssa lähettämällä sille tietoa itsestään transponderin avulla, jolloin tutkalla voidaan yksilöidä taivaalla lentävät kohteet. Tällaisesta tutkasta käytetään lyhennettä SSR (Secondary Surveillance Radar). [7] Sotilaskäyttöön tarkoitetuissa droneissa on usein IFF-transponderi (Identification Friend or Foe), jolla voidaan erottaa vihollisen lennokit omista lennokeista [8]. Kuluttajakäyttöisissä droneissa transpondereita ei yleensä ole, mutta niitä myydään erillisinä komponentteina jälkiasennusta varten [9]. Tällä hetkellä Suomen lainsäädäntö ei myöskään vaadi niiden käyttöä droneissa, mutta sääntely voi muuttua tulevaisuudessa lennokkien nopean yleistymisen seurauksena.

Vaikka kaikkien tutkien toiminta perustuukin radioaaltoihin, niitä voidaan kategorisoida sen perusteella, miten niitä käsitellään. Pulssitutkissa radioaallot lähetetään tutkan lähettimestä pulsseina. Radioaaltojen pulssimaisuus mahdollistaa myös korkeatehoisen

lähettimen käytön, jota käyttämällä voidaan kasvattaa tutkan valvontaetäisyyttä. Korkeatehoinen signaali ei saa häiritä tutkan vastaanotinta, ja tämä voidaan toteuttaa sammuttamalla vastaanotin pulssin lähetyksen ajaksi. Pulssin lähetettyään lähettin suljetaan ja vastaanottimen kanava avataan. Lähettimen ja vastaanottimen toiminta on havainnollistettu kuvassa 1, missä Tx kuvaa lähettintä ja Rx vastaanotinta. Vuorottelun ansiosta häiriötä ei synny, mutta valvottavalle alueelle syntyy tietyn etäisyyden päähän sokea piste. Sen kohdalla sijaitsevasta lennokista heijastuneet radioaallot osuvat tutkan vastaanottiin juuri silloin, kun se on kiinni. Tämä on nähtävissä kuvasta 1, kun kohteesta tullut heijastuma (punainen neliö) on pulssin lähetyksikunnan kanssa päällekkäin.



Kuva 1. Pulssin viipeen mittaaminen [10, mukailen]

Pulssin toistoväli eli PRI (Pulse Repetition Interval) kuvaa kahden lähetettävän pulssin välillä olevaa aikaa. PRI:stä määräytyy tutkan käyttömäärä (engl. duty cycle), joka vastaa sitä, kuinka pitkään tutka on sokea. [26].

Pulssitutkilla on myös lähettimen ja vastaanottimen välisestä vuorottelusta johtuva minimietäisyys, jota lähempänä olevia kohteita se ei kykene havaitsemaan. Lähetetyn signaalipulssin tulee vaimentua tarpeeksi ennen vastaanottimen avaamista häiriön välttämiseksi. Minimietäisyys R_{min} voidaan laskea kaavalla

$$R_{min} = \frac{c(\tau + T_{tr})}{2} \approx \frac{c\tau}{2}, \quad (1)$$

jossa T_{tr} on signaalin vaimenemisesta aiheutuva viive, ja τ on lähetettävän pulssin pituus. Viive on kuitenkin usein merkittävästi pienempi verrattuna pulssin lähetykseen kuluvaan aikaan, jolloin se voidaan jättää huomioimatta ja tehdä edellä näkyvä pyöristys. [10]

Pulssitutkan lähettämät pulssit ovat keskenään samanlaisia, eli niitä ei voida erottaa toisistaan. Tutkan käytön kannalta tämä tarkoittaa sitä, että vanhemman pulssin heijastumia ei voida erottaa uudemman pulssin heijastumasta, jolloin pulssitutkalle määräytyy

maksimietäisyys kohteen tunnistamiselle [27]. Pulssin taajuus PRF (Pulse Repetition Frequency) voidaan laskea PRI:n avulla kaavan

$$PRF = \frac{1}{PRI} \quad (2)$$

mukaisesti. Maksimietäisyys määräytyy PRF:n mukaan, ja se voidaan laskea kaavalla

$$R_{max} = \frac{cPRI}{2} = \frac{c}{2PRF}, \quad (3)$$

jossa R_{max} on tutkan maksimietäisyys. [26] Mikäli maksimietäisyyden ulkopuolelta havainnoidaan kohteita, pulssien heijastumien järjestys sekoittuu ja tällöin havainnon sijaintitieto ei pidä enää paikkaansa.

Toinen tutkatyyppi on jatkuva-aaltainen tutka, lyhyemmin CW-tutka (continuous-wave). CW-tutkan lähetin lähettää radioaaltoja jatkuvasti, ja niiden vastaanottaminen tapahtuu samanaikaisesti lähetyksen kanssa. Sen lähettämiä radioaaltoja ei amplitudi- eikä taajuusmoduloida, eli ne pysyvät vakioina. Kun lähetetty signaali osuu liikkuvaan kohteeseen, sen heijastaman radioaallon taajuus muuttuu Doppler-efektin myötä ja täten muuttuneesta taajuudesta voidaan määrittää kohteen nopeus. [11] Mikäli lähetetyn ja heijastuneen signaalin taajuudessa ei ole muutosta, ei tutka pysty päättelemään kohteesta mitään. Toisin sanoen, mikäli drone on liikkeessä, se voidaan CW-tutkalla havaita ja sen nopeus voidaan määrittää, mutta sen sijainti pysyy tuntemattomana. [12]

Kolmas käytetty tutkatyyppi on FMCW-tutka (frequency-modulated continuous-wave) eli taajuusmoduloitu jatkuva-aaltainen tutka. Kuten CW-tutkassa, FMCW-tutkassa myös radioaaltoja lähetetään jatkuvasti, eli signaalien lähetys ja vastaanotto tapahtuu samanaikaisesti. Tällöin etäisyyden mittausta ei tehdä pulssitutkan tapaan sammuttamalla lähettintä vastaanoton ajaksi, jolloin lähellä, alle 100 metrin päässä olevia kohteita, voidaan myös havaita [25]. FMCW-tutka lähettää radiosignaaleja, joiden taajuus vaihtelee useimmiten lineaarisesti. Heijastuneen signaalin taajuus on matalampi tai korkeampi kuin lähetetyn signaalin, ja tämä ero on havaittavissa tutkalla. Kohteen etäisyys voidaan määrittää vertailemalla heijastuneen signaalin sekä lähetetyn signaalin välistä viivettä. [13] FMCW-tekniikalla toimiva tutka pystyy samanaikaisesti mittaamaan kohteen etäisyyttä sekä nopeutta, ja sillä ei ole vastaavaa minimietäisyyttä kohteen tutkaukselle kuten pulssitutkassa.

Tutkalla on käyttämästään tutkatekniikasta riippumatta sille ominainen tutkataajuus. Taajuudet on jaettu tutkataajuusalueisiin, jotka on nimetty kirjaintunnuksin.

Taulukko 1. Tutkan eri taajuusalueet ja niitä vastaavat taajuudet [56]

Tutkan taajuusalue	Taajuus (GHz)
Ka	26,5–40
K	18–26,5
Ku	12,5–18
X	8–12.5
C	4–8
S	2–4
L	1–2

Taulukkoon 1 on kirjattu tutkien käyttämiä eri taajuusalueita ja niitä vastaavat taajuudet. Taulukosta huomataan, että etenkin korkeammilla taajuusalueilla taajuuskaistat ovat leveitä. Ne eivät välttämättä ole kokonaan tutkien käytössä, vaan käytettävä kaista määrätty viranomaisen sääntelyn perusteella.

Yksi oleellisimmista ominaisuuksista, johon dronetutkien toiminta perustuu, on mikro-Doppler-efekti. Doppler-efekti itsessään ilmenee, kun elektromagneettinen signaali heijastuu liikkuvasta kohteesta. Heijastuessaan liikkuvasta kohteesta sen taajuus muuttuu, riippuen liikkuuko kohde tutkaa kohti vai poispäin tutkasta. [14] Tämän taajuuseron perusteella voidaan laskea kohteen nopeus. Mikäli kohteessa on muun liikkeen lisäksi myös värähtelevää liikettä, se aiheuttaa vielä suurempaa taajuusmodulaatiota. Pyörivä liike aiheuttaa lisäksi sivuaaltoja heijastuneeseen, Doppler-siirtyneeseen radioaaltoon. [15] Koska mikro-Doppler -efekti aiheutuu pyörivästä liikkeestä, sitä voidaan hyödyntää etenkin dronetutkissa, sillä droneissa on usein yksi tai useampia pyöriviä roottoreita. Efektin avulla voidaan yksilöidä ja tehdä päätelmiä tutkattavan dronen tyypistä ja ominaisuuksista.

2.3 Tutkajärjestelmät dronejen havainnoinnissa

Tutkalaite on usein osana laajempaa järjestelmäkokonaisuutta, jotka eroavat toisistaan käyttötarkoituksesta riippuen. Kaikille dronetutkajärjestelmille on keskeistä, että niillä voidaan havaita valvottavalla alueella lentävä lennokki, mutta laitteistosta ja ohjelmistosta

riippuen sen kyky paikantaa ja seurata kohdetta vaihtelevat [16]. Lisäksi paikannustarkkuuksissa on eroja järjestelmien välillä.

Keskeinen jako eri tutkajärjestelmien välillä on erittely laitteiston perusteella monostaattisiin ja bistaattisiin järjestelmiin. Monostaattisissa järjestelmissä tutkan samaa antennia käytetään radioaaltojen lähettämiseen ja vastaanottamiseen, tai erilliset antennit ovat hyvin lähellä toisiaan [17]. Monostaattisen järjestelmän antenni siis vuorottelee signaalin lähettämisen ja vastaanottamisen välillä. Aiemmin esitelty pulssitutka on esimerkki monostaattisesta tutkasta. Tutkajärjestelmiä suunniteltaessa hyödynnetään tutkayhtälöä, jossa lasketaan vastaanottavaan antenniin palaavaa tehoa P_r :

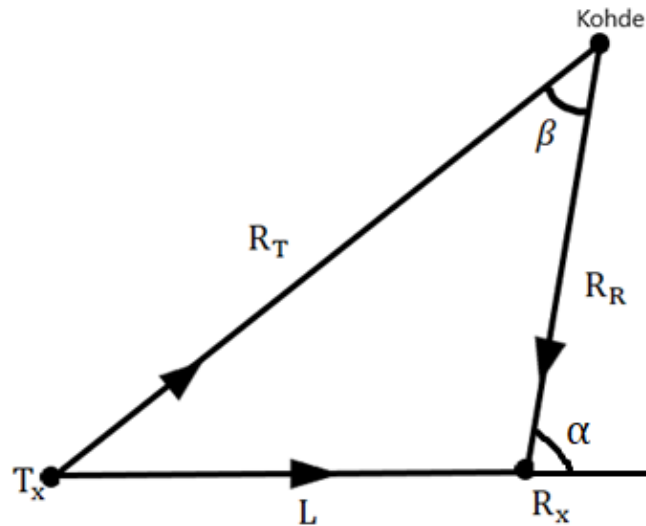
$$P_r = \frac{P_t G_t}{4\pi R^2} \times \frac{\sigma}{4\pi R^2} \times A_e, \quad (4)$$

jossa R on etäisyys tutkasta ja P_t tälle etäisyydelle säteilyn teho antennivahvistuksella G_t . Kohteen tutkapaikkopinta-alaa neliömetreinä kuvaa σ ja A_e on vastaanottavan antennin efektiivinen pinta-ala. [29] Yhtälön avulla voidaan laskea maksimietäisyys tutkan toiminnalle, mutta sillä voidaan myös tutkia muun muassa eri antennivahvistuksien vaikutusta järjestelmään.

Bistaattisen tutkajärjestelmän tutkassa on kaksi antennia, joista toista käytetään signaalien lähettämiseen ja toista vastaanottamiseen. Lähetin ja vastaanotin sijaitsevat usein antenniensa yhteydessä. Lähetin-antennipari ja vastaanotin-antennipari sijaitsevat kuitenkin erillään toisistaan, ja yhdessä kohteen kanssa ne muodostavat bistaattisen kolmion, josta kohteen sijainti voidaan määrittää. [18] Multistaattinen järjestelmä on variaatio bistaattisesta järjestelmästä, ja siinä tutkalaitteisto koostuu kolmesta tai useammasta komponentista. Esimerkiksi vastaanottavia antennia vastaanottimien kera voi olla useita yhtä lähetintä kohden tai toisinpäin. Bistaattisten ja multistaattisten järjestelmien etuna on mm. parempi sopeutuvuus eri ympäristöihin verrattuna monostaattiseen järjestelmään, sillä lähettäjiä ja vastaanottimia voi hajauttaa valvottavalle alueelle. Komponenttien asettelu ei kuitenkaan voi olla täysin mielivaltaista, vaan vastaanottimen täytyy olla tietoinen lähettimen etäisyydestä. Tämä onnistuu joko suoralla vastaanottimen ja lähettimen välisellä näköyhteydellä (LOS, line-of-sight), tai täsmälleen samaan aikaan synkronisoiduilla kelloilla. [19] Bistaattisilla ja multistaattisilla järjestelmillä voidaan saada myös tarkempia tietoja tutkattavan dronen ominaisuuksista.

Bistaattisen tutkajärjestelmän muodostamasta bistaattisesta kolmiosta voidaan määrittää kohteen sijainti geometrian avulla. Kuvassa 2 näkyy miten lähettimen T_x ja vastaanottimen R_x välissä on suora linja L , jonka etäisyys tunnetaan. Paikantaakseen kohteen lähetetyn signaalin kulkeman matkan ($R_T + R_R$) pituudesta tarvitaan arvio, joka saadaan

ajan perusteella. [19] Lisäksi, kulmasta β tarvitaan arvio, joka saadaan mittaamalla vastaanottiin saapuva AOA (angle of arrival). Kulman arviointi voidaan tehdä tarkastelemalla saapuvien signaalien vaihe-eroja ja vertaamalla näitä tunnettuun referenssikulmaan α .



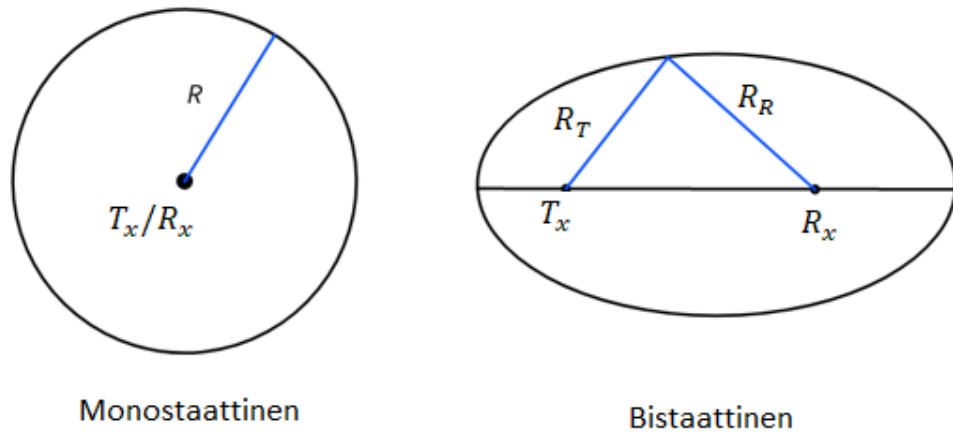
Kuva 2. Bistaattinen kolmio [19, mukailten]

Monostaattisessa tutkassa kolmiota ei ole, vaan heijastuma palaa takaisin vastaanottiin samassa linjassa lähettimestä lähetetyn signaalin kanssa. Tällöin etäisyyden määrittäminen tapahtuu mittaamalla lähetetyn signaalin ja heijastuman välistä viivettä. Viive mitataan lähetetyn pulssin nousevasta reunasta, joka on havainnollistettu kuvassa 1. Kun se on saatu mitattua, voidaan laskea kohteen etäisyys R kaavalla

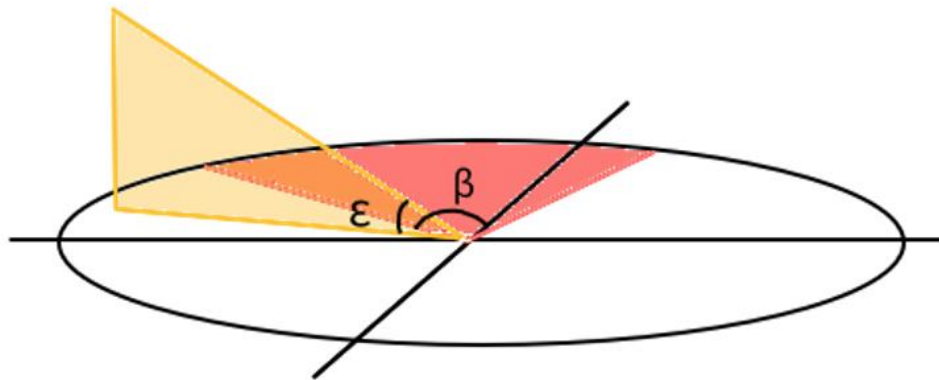
$$R = \frac{ct}{2}, \quad (5)$$

jossa t on mitattu viive lähetetyn signaalin ja heijastuman välillä. Bistaattisen tutkan tavoin myös monostaattisessa tutkassa AOA-tieto on kriittinen. Ilman arviota kulmasta kummassakaan tutkatyypissä kohteen suuntaa ei voida selvittää, jolloin se voidaan paikantaa bistaattisessa järjestelmässä ellipsin kehälle ja monostaattisessa järjestelmässä ympyrän kehälle tarkan sijaintitiedon sijaan.

Kuvassa 3 on havainnollistettu kohteen mahdollinen sijainti ilman kulmatietoa eri järjestelmillä. Monostaattisessa järjestelmässä lähetin ja vastaanotin ovat ympyrän keskipisteessä, ja kohde sijaitsee jossain säteen R etäisyydellä. Bistaattisessa järjestelmässä lähetin ja vastaanotin ovat ellipsin polttopisteitä isoakselilla. Koska etäisyyksien R_T ja R_R summa tunnetaan ja se pysyy vakiona, piirtyy kohteen mahdollisesta sijainnista ellipsin muotoinen kuvio.



Kuva 3. Monostaattisen ja bistaattisen järjestelmän geometriaa



Kuva 4. Atsimuutti ja korkeuskulma

Tutkajärjestelmää suunniteltaessa on myös huomioitava käytettävän tutkan ominaisuudet sekä valvottavan alueen laajuus. Jokaisella tutkalla on atsimuutti, joka on suunnan horisontaalinen leveys. Se siis ilmaisee sen horisontin leveyden, jota tutka kykenee valvomaan. Atsimuutti voi olla esimerkiksi yhdellä antennilla 90° , mutta yhdistämällä neljä antennia eri suuntiin voidaan saada täysi 360° kattavuus [49]. Sama kattavuus voidaan myös saavuttaa pyörittämällä antennia akselinsa ympäri. Edellä mainitut tekijät tulee ottaa huomioon, jotta tutkalla saadaan katettua koko se alue, jota halutaan valvoa.

Atsimuutin lisäksi jokaisella tutkalla on sille ominainen korkeuskulma, joka myös vaikuttaa sen valvontakykyyn. Korkeuskulma lasketaan vaakasuorasta tasosta ylöspäin, jolloin se vaikuttaa kuinka lähellä olevia kohteita tutka kykenee havaitsemaan kohteen korkeudesta riippuen. Tutkan korkeuskulman arvo voi olla esimerkiksi 60° tai 90° [49, 50]. Kuvassa 4 on havainnollistettu atsimuutin ja korkeuskulman käsite. Atsimuuttikulma on merkitty kuvaan kirjaimella β ja korkeuskulma kirjaimella ε .

Yksi tutkan oleellisista ominaisuuksista on sen resoluutio. Tutkan resoluutiolla tarkoitetaan sen kykyä erottaa kohteita toisistaan sekä niiden liikkeiden muutoksia. Resoluutio koostuu kahdesta osasta, mikro-Doppler-resoluutiosta sekä spatiaalisesta resoluutiosta. Mikro-Doppler-resoluutio liittyy tutkan kykyyn erottaa muutoksia kohteen liikkeessä ja värähtelyssä, kun taas spatiaalinen resoluutio liittyy tutkan kykyyn erottaa useita kohteita toisistaan, kun ne sijaitsevat fyysisesti toistensa lähellä. Spatiaalinen resoluutio kytkeytyy suoraan tutkan käyttämään kaistanleveyteen, joka ilmenee myös kaavasta

$$\Delta R = \frac{c}{2B}, \quad (6)$$

jossa ΔR on pienin etäisyys, jolloin tutka kykenee erottamaan kohteet toisistaan ja B on tutkan kaistanleveys [31]. Mikro-Doppler-resoluutio puolestaan perustuu tutkan päivitystaajuuteen. Mitä suurempia muutokset liikkeen suuruudessa ja suunnassa ovat, sitä suurempaa päivitystaajuutta tarvitaan niiden seuraamiseksi. [32] Tutkajärjestelmän parempi resoluutio edesauttaa lennokin tarkempaa tunnistamista ja seurantaa, mutta se asettaa korkeampia vaatimuksia järjestelmälle muun muassa laskentatehon suhteen.

Dronetutkajärjestelmiä käytetään erilaisissa sovelluskohteissa, joilla kullakin on eritasoisia vaatimuksia järjestelmän suhteen. Edistyksellisimpiä tutkajärjestelmiä ovat sotilaskäytössä olevat järjestelmät, joissa tutka on osana muuta puolustusjärjestelmää. Sotatoimialueella liikkuvat dronet tuhoetaan usein kineettisellä voimalla, joten paikannustarkkuus sekä kohteen seuranta ovat kriittisiä ominaisuuksia puolustuksen kannalta. Esimerkiksi puolustusratkaisuja valmistava Raytheon Missiles & Defence -yrityksen KuRFS-järjestelmässä käytettävä tutka koostuu useasta pienestä antennista paremman keilamuodostuksen takia, ja käytettävä taajuus on tavanomaista korkeampi, 12–18 GHz [20]. Edellisten avulla tutkan resoluutiota saadaan parannettua, jolloin lennokki voidaan torjua puolustusjärjestelmän aseilla tehokkaammin. Ympäristöissä, joissa ei tarvita aseellista puolustusjärjestelmää, voidaan käyttää yksinkertaisempia tutkajärjestelmiä. Esimerkiksi vankiloiden valvontaan käytettävissä dronetutkajärjestelmissä on samoja ominaisuuksia kuin sotilaskäyttöisissä, mutta ne ovat vaatimattomampia. Esimerkiksi Robin radarin Elvira-tutka käyttää 8–12 GHz:n taajuutta [23], jolloin resoluutio on heikompi kuin Raytheonin järjestelmässä, mutta silti käyttötarkoitukseensa riittävällä tasolla. [21, 22]

3. DRONE TUTKAMAALINA

Dronet eroavat merkittävästi muista perinteisistä tutkattavista kohteista, jonka takia niiden havaitseminen on hankalaa. Ne lentävät matalalla ja suhteellisen hitaasti, ja ne kykenevät myös leijumaan paikallaan. Droneilla ja linnuilla puolestaan on tiettyjä yhtäläisyyksiä, vaikkakin niiden lentoradat poikkeavat toisistaan. Dronen ominaisuuksien tunteminen on tärkeää, jotta oikeanlaisten tutkajärjestelmien kehittäminen olisi mahdollista.

3.1 Tutkapoikkipinta-ala

Tutkapoikkipinta-ala eli RCS (Radar Cross Section) kuvaa kohteen havaittavuutta tutkalla, suurempi arvo tarkoittaen parempaa havaittavuutta. Se perustuu kohteen heijastavuuteen, eli siihen miten tutkan lähettämät radioaallot heijastuvat kohteesta takaisin tutkaan. Siihen vaikuttavat fyysisen koon lisäksi lennoksissa käytetyt materiaalit sekä sen muodot [30]. Täten erilaisilla droneilla on erilaiset tutkapoikkipinta-alat, ja ne voidaan erottaa sen perusteella toisistaan.

Kohteesta riippuen RCS-arvot voivat erota suuresti toisistaan. Erilaisten kohteiden tutkapoikkipinta-aloja on esitelty taulukossa 2.

Taulukko 2. Tutkapoikkipinta-aloja eri kohteilla [34]

Kohde	RCS [m ²]	RCS [dB]
lintu	0,01	-20
ihminen	1	0
moottorivene	10	10
auto	100	20
kuorma-auto	200	23
tutkaheijastin	20379	43,1

Eri kohteet heijastavat siihen osunutta sähkömagneettista säteilyä eri tavoin, jolloin kullekin kohteelle muodostuu oma, yksilöity RCS-profiili.

Matemaattisesti tutkapaikkipinta-ala σ on määritelty seuraavasti:

$$\sigma = \lim_{R \rightarrow \infty} 4 \pi R^2 \frac{|E_s|^2}{|E_i|^2}, \quad (7)$$

jossa R on etäisyys kohteesta ja E_i ja E_s ovat saapuvan (incident) ja siroavan (scattered) sähkökentän voimakkuudet [13].

Kuluttajakäytössä olevat dronet ovat samaa kokoluokkaa lintujen kanssa. Niiden tutkapaikkipinta-alat ovat myös hyvin lähellä toisiaan, joka selviää taulukosta 3.

Taulukko 3. Lintujen ja dronejen tutkapaikkipinta-aloja [38, mukailleen]

Kohde	RCS [dBm ²], 24 GHz	RCS [dBm ²], 94 GHz
DJI Phantom 3 Standard	-20	-20
DJI Inspire 1	-15	-15
Savannikotka	-19	-19
Kalliohuuhkaja	-21	-20,5

Tutka ei pysty tutkapaikkipinta-alan perusteella erottamaan onko alueella lentävä kohde lintu vai lennokki käytetystä taajuudesta huolimatta. Erottelun tekemiseen vaaditaan siis lisäksi mikro-Doppler-ominaisuuksien hyödyntämistä. Puolestaan helikopterin tutkapaikkipinta-ala on vierintäkulmasta riippuen välillä 10,41 dBm² - 40,81 dBm² [39]. Merkittävästi suurempi runko ja metalliset rakenteet luovat suuren eron dronen ja helikopterin tutkapaikkipinta-alojen välille, joten tutka kykenee tekemään erottelun sen perusteella.

Tutkapaikkipinta-alaan vaikuttavat tutkajärjestelmän (monostaattinen vai bistaattinen) ja sen käyttämän taajuuden lisäksi erityisesti dronen muoto ja siinä käytetyt materiaalit. Useimmat dronet on valmistettu muovista tai hiilikuiduista, mutta niissä voidaan myös käyttää metalliosia. Taulukkoon 4 on kirjattu, miten havaittu tutkapaikkipinta-ala muuttuu metallipropellin ja hiilikuitupropellin välillä eri taajuuksilla.

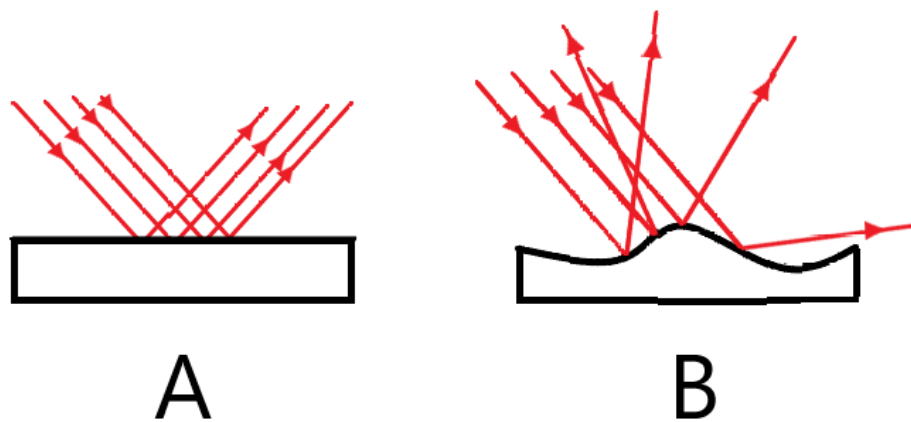
Taulukko 4. Tutkapaikkipinta-alan vaihtelu eri materiaaleilla ja taajuuksilla [35]

Materiaali	RCS [dB], 1,5 GHz	RCS [dB], 2,5 GHz	RCS [dB], 5,5 GHz
Hiilikuitu	-23,0	-18,3	-26,0
Metalli	-20,1	-17,9	-24,2

Taulukosta 4 voidaan havaita, että hiilikuitupropellilla on pienempi tutkapaikkipinta-ala kaikilla eri taajuuksilla. Tämä tekee dronejen havaitsemisesta entistä haastavampaa verrattuna muihin metallisiin lennokkeihin.

Tietyn kohteen tutkapaikkipinta-alan arvo ei ole pelkän koon ja materiaalien määrittämä vakio, vaan tutkan ja kohteen välisellä atsimuuttikulmalla ja korkeuskulmalla on suuri merkitys RCS-arvoon. Esimerkiksi helikopterin peräroottorin RCS-arvoa kasvattava vaikutus voi jäädä mitättömäksi, mikäli tutka-aallot osuvat siihen pystysuoraan [39]. Tämän takia saman kohteen RCS-mittauksien arvot voivat olla moninkertaisia toisiinsa nähden kulmasta riippuen.

Niin kuin sotilaslentokoneissa, myös miehittämättömissä taistelulennokeissa voidaan hyödyntää häiveteknologiaa. Häiveteknologialla tarkoitetaan eri keinoja muuttaa kohde vaikeasti havaittavaksi tai kokonaan näkymättömäksi erilaisilta tutkilta. Oleellisimpana osana häiveteknologiaa on lennokin muotoilu, mutta myös pintamateriaaleilla on vaikutusta. Tavoitteena on, että lennokkiin osunut signaali ei heijastu takaisin tutkan vastaanottavan antennin suuntaan. Täten häivelennokki on muotoiltu siten, että se olisi mahdollisimman tasainen, eikä siinä ole ulokkeita tai muita vastaavia tutkapaikkipinta-alaa lisääviä osia.



Kuva 5. Sähkömagneettisen säteilyn heijastuminen erilaisilta pinnoilta [36 mukailen]

Kuva 5 havainnollistaa tutkan lähettämien radioaaltojen käyttäytymistä erilaisilla pinnoilla ja samalla muotoilun merkityksen häivedroneissa. Kuvassa 6 on Northrop Grummanin X-47B-drone, jonka muotoilussa on huomioitu häiveominaisuudet.



Kuva 6. X-47B häivedrone [37, © Northrop Grumman]

Häivelennokin tasaisilta pinnoilta heijastuvat signaalit eivät siroa ympäriinsä, jolloin sen havaitseminen monostaattisella tutkalla on haastavaa. Erityisen tärkeää muotoilussa on huomioida, ettei tutka-aallot heijastu takaisin samaan suuntaan niiden tulosuunnan kanssa. Bistaattisilla, ja etenkin multistaattisilla tutkajärjestelmillä pois päin heijastuneiden säteiden havaitseminen on todennäköisempää, sillä vastaanottava antenni on erillään lähettimestä ja vastaanottimia voi olla järjestelmästä riippuen useita eri paikoissa.

Muotoilun lisäksi lennokin RCS-arvoa voidaan pienentää myös absorboivilla pinnoitteilla, josta käytetään lyhennettä RAM (Radar-Absorbing Material). Pinnoitemateriaaleja on useita erilaisia, mutta niille yhtenäisiä ominaisuuksia ovat korkea permittiivisyys ja permeabiliteetti. Pinnoitteeseen osuvat aallot absorboituvat sen materiaaleihin lämpönä. [45] RAM:in toimivuus riippuu tutkan käyttämästä taajuudesta, eli yhdellä tietyllä materiaalilla ei voi torjua kaikkia tutkajuuksia.

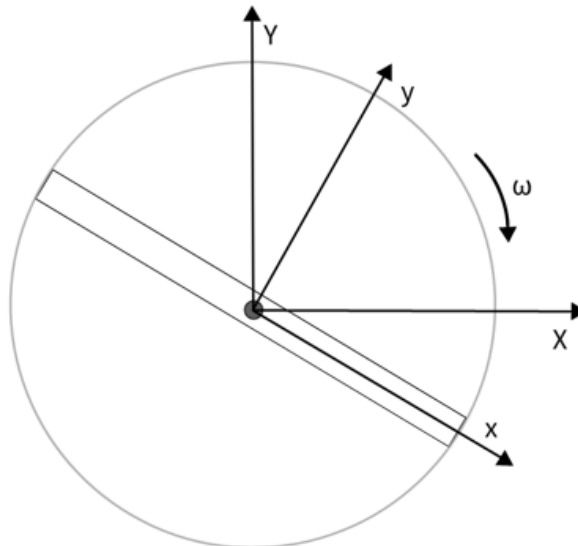
Tutkapoikkipinta-alat ovat yksilöllisiä jokaiselle kohteelle. Mikäli jonkin dronemallin RCS tunnetaan entuudestaan, alueella lentävä lennokki voidaan tunnistaa kyseiseksi malliksi vertailemalla näiden datoja keskenään. Täten korostuu erilaisten dronetietokantojen merkitys lennokkeja tutkatessa. Esimerkiksi Aalto-yliopisto yhdessä UCLouvain-yliopiston ja New Yorkin yliopiston kanssa ovat keränneet mittausdataa useasta eri kuluttajakäyttöön myytävistä droneista tietokantaan [42]. Mittausdata on avoimesti saatavissa tutkavalvontajärjestelmien kehitystä varten.

3.2 Mikro-Doppler

Kuten luvussa 2.1 mainittiin, dronejen tutkimukseen liittyy olennaisena osana mikro-Doppler-ilmiö. Mikro-Doppler on ilmiö, jossa kohteen värähtely tai pyörivä liike indusoi sille ominaista taajuusmodulaatiota kohteesta heijastuviin radioaaltoihin. Indusoitunut taajuusmodulaatio näkyy tutkassa sivuaaltoina alkuperäisen Doppler-siirtymän yhteydessä [15]. Koska useimmat dronet toimivat propelleilla, mikro-Doppler-ilmiön suurimpana aiheuttajana dronejen tapauksessa ovat pyörivät roottorit. Roottoreiden indusoima mikro-Doppler-taajuus voidaan laskea kaavalla

$$f_d = \frac{2f}{c} [\vec{\omega} \times \vec{r}], \quad (8)$$

jossa \vec{r} on tutkan ja kohteen välinen suhteellinen siirtymä, $\vec{\omega}$ on propellin kulmanopeus ja f on tutka-aallon taajuus [40].



Kuva 7. Propellin liike kaksiulotteisessa tasossa

Kuvassa 7 on havainnollistettu propellin liike kaksiulotteisessa tasossa sekä kulmanopeuden käsite. Tutkan omaa koordinaatistoa vastaavat referenssikoordinaatit (X, Y), ja kohteen omia koordinaatteja (x, y) vertaamalla näihin referenssikoordinaatteihin voidaan määrittää tutkan ja kohteen välinen suhteellinen siirtymä \vec{r} [32].

Aiemmassa luvussa todettiin, että erottelua dronen ja lintujen välillä ei voida tehdä pelkän tutkapoikkipinta-alan perusteella, vaan siihen vaaditaan myös mikro-Doppler-ilmiön tarkastelua. Lintujen lentotapaan kuuluu joko siipien räpyttely tai liitäminen, jotka molemmat poikkeavat propellien avulla liikkuvan dronen lentotavasta. Tämä on myös havaittavissa vertailemalla niiden välisiä mikro-Doppler-mittauksia. University College Londonin tuottamassa tutkimuksessa eri lintujen sekä dronen mikro-Doppler-siirtymiä mitattiin ja mittausten diagrammeja vertailtiin keskenään [41]. Siinä erot diagrammien välillä ovat

niin selkeät, että erottelu dronen ja linnun välillä voidaan tehdä visuaalisesti tarkastelemalla.

Mikro-Doppler-ilmiötä voidaan myös hyödyntää kohteiden erottelun lisäksi myös lennokin ominaisuuksien arviointiin. Yksi arvioitavista kohteista on lennokin kantama kuorma, ja kuorman vaihtelu näkyy muutoksina mikro-Doppler-diagrammeissa. Samaisessa UCL:n tutkimuksessa vertailtiin mikro-Doppler-siirtymiä kuormattoman ja 500 gramman kuormauksella varustetun dronen välillä [41]. Näiden diagrammien väliset erot eivät ole yhtä selkeät kuin edellä, vaan luokittelun tekemiseen tarvitaan muita keinoja visuaalisen erottelun sijaan.

Diagrammeista saadun datan analysointiin voidaan käyttää erilaisia matemaattisia menetelmiä, kuten pääakselihajotelmaa tai kohteen painopisteen arviointia. Valitun menetelmän lisäksi myös käytetyllä tutkalaitteistolla on vaikutusta arvioinnin onnistumisprosenttiin. UCL:n tutkimuksessa kuormallisen ja kuormattoman dronen luokittelun onnistumisprosentti vaihteli 71 % ja 96,9 % välillä käytetystä menetelmästä ja laitteistosta riippuen [41].

3.3 Liikkeen seuranta

Aiemmassa luvussa listattiin tutkan eri tavoitteita, joista yksi oli dronen liikkeen seuranta. Sen pieni koko ja tehokkaat sähkömoottorit mahdollistavat erityisen ketterän liikkumisen verrattuna muihin lentäviin kohteisiin, ja liikettä voidaankin käyttää hyödyksi kohteen tunnistuksessa. Toisaalta lähes rajoittamaton liikkuvuus asettaa uudenlaisia vaatimuksia tutkalle.

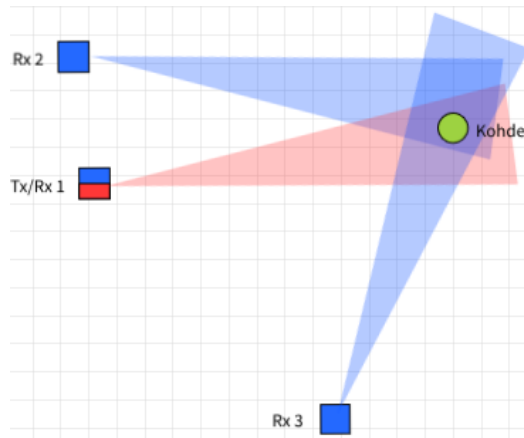
Rootoreidensa avulla drone kykenee leijumaan paikallaan, johon useimmat linnut eivät pysty. Kohteen lentorataa tarkastellessa leijumisen perusteella voidaan kategorisoida, onko kyseessä mahdollisesti lintu vai drone. Leijumisen aikana drone pysyy paikallaan, eli siitä ei aiheudu Doppler-siirtymää. Tämä on myös havaittavissa kaavasta

$$f_d = \frac{2V_r f_{tx}}{c}, \quad (9)$$

jossa f_d on Doppler-siirtymä, V_r kohteen nopeus ja f_{tx} lähetetyn signaalin taajuus, ja nopeuden ollessa nolla myös Doppler-siirtymä on nolla [10, s. 46]. Kuten luvussa 2.2 esitettiin, tämä koituu ongelmaksi etenkin CW-tekniikkaan perustuvissa tutkissa, sillä sen toiminta perustuu juuri Doppler-ilmiön havainnointiin.

Kohteen sijainti ja samalla sen lentorata voidaan määrittää bistaattisen kolmion lisäksi myös sen mikro-Doppler-ominaisuuden perusteella. Käytettävän järjestelmän on oltava multistaattinen, jossa on lähettimen lisäksi ainakin kaksi erillään olevaa vastaanotinta.

Mikro-Doppleriin perustuvan määrittämisen etuna on se, että siihen ei tarvita AOA-tietoa.
[46]



Kuva 8. Multistaattinen järjestelmä lentoradan määrittämiseen mikro-Dopplerin avulla
[46 mukailen]

Kuvassa 8 on esimerkkijärjestelmä, jonka avulla lentorata voitaisiin määrittää bistaattisen kolmion sijaan mikro-Doppler-ominaisuuteen perustuen. Haittapuolena on rajattu alue, sillä kohteen täytyy sijaita lähettimen ja vastaanottimen keilan leikkauspisteessä, jotta määrittäminen voitaisiin tehdä.

4. DRONETUTKAT ERI YMPÄRISTÖISSÄ

Tutkattavista lennokeista löytyy useita eri variaatioita fyysisten ja teknisten ominaisuuksien suhteen, jotka tulee huomioida tutkajärjestelmää suunniteltaessa ja valitessa. Tutkamaalin lisäksi myös ympäristöllä on suuri vaikutus järjestelmän toimintaan. Valvottavia alueita löytyy niin kaupungeista kuin maastosta, ja nämä kohdistavat erilaiset vaatimuksensa käytettävälle systeemille.

4.1 Havainnointi eri ympäristöissä

Useista kaupungeista löytyy monia kielto- ja rajoitusalueita, joilla droneja ei saa lennättää. Kaupunkialueilla sijaitsee usein valtion rakennuksia, joita halutaan suojella dronejen luomilta turvallisuushilta. Esimerkiksi Helsingissä Kruununhaan alue on kokonaisuudessaan kieltoaluetta [43], ja siellä sijaitsevat muun muassa Säätytalo ja sisäministeriön päätoimipaikka.

Urbaaneille alueille on tyypillistä tiheään rakennetut korkeat rakennukset. Yhtenä haasteena on tutkan lähettämien radioaaltojen heijastuminen takaisin vastaanottimeen rakennusten julkisivuista samoin kuin tutkattavasta kohteesta. Se on ongelma etenkin matalalla lentävien kohteiden havainnoinnissa.

Radioaallot heijastuvat kohtaamastaan pinnasta, jolloin valvottavalla alueella olevat esteet aiheuttavat myös haasteita. Rakennusten suorat kulmat rajaavat tehokkaasti valvottavaa aluetta osiin, jolloin sinne syntyy katvealueita. [47] Radioaallot eivät pääse eteneeseen katvealueille, jolloin se on tutkavalvonnan ulottumattomissa.

Samaan radioaaltojen käyttäytymiseen perustuu myös tutkavarjostus. Tutkavarjostuksessa valvottavalla alueella oleva este toimii kilpenä radioaalloille, jolloin sen takana olevaa tilaa ei voida valvoa. Tutkavarjostusta ilmenee etenkin ympäristöissä, joissa on korkeuseroja, kuten juuri esimerkiksi kaupungeissa rakennuksien välillä.

Kaupunkien ja muun rakennetun ympäristön lisäksi myös maastoalueilla on dronevalvontaa. Esimerkiksi rajanylityspaikoilla ja raja-alueilla yleisesti voidaan käyttää tutkia len-

nokkien havaitsemiseen. Lisäksi etenkin sotilaskäytössä dronevalvonta voidaan pystyttää väliaikaisesti esimerkiksi tuliasemien tai tukikohdan läheisyyteen, ja nykyaikaiset sotalaivat ovat varustettu tutkilla, joilla voidaan havaita myös droneja.

Valvottavia maastoalueita on useita erilaisia, mutta ne kaikki poikkeavat huomattavasti urbaanista ympäristöstä dronevalvonnan kannalta. Tyypillisesti maastoalueilla on vapaampi tila, eivätkä katve- ja tutkavarjostusongelmat ole yhtä suuressa roolissa kuin kaupungeissa. Maaston ja kaupungin lisäksi myös meri- ja järviaalueilla on tarvetta dronevalvonnalle, sillä lennokin kantama voi olla useita kilometrejä rannikolta vesistölle.

4.2 Tutkajärjestelmien käyttö eri ympäristöissä

Edellä esiteltyjen ympäristöjen asettamiin vaatimuksiin voidaan sopeutua erilaisin menetelmin. Haasteisiin voidaan vastata esimerkiksi tutkajärjestelmässä käytetyn laitteiston avulla. Etenkin urbaanissa ympäristössä multistaattisella järjestelmällä on selkeä etu verrattuna muihin järjestelmiin. Lähettimiä sekä vastaanottimia voidaan sijoittaa suhteellisen vapaasti siten, että alueella olevia katvealueita ja tutkavarjostuksen rajoittamia sektoreita voidaan myös valvoa.

Tutkalähetintä- ja vastaanotinta sijoittaessa tulee huomioida valvottavalla alueella olevat esteet. Tämän takia etenkin kaupunkiympäristössä tutkat on sijoitettu mahdollisimman korkealle, yleensä korkeiden rakennusten katoille. Vastaavasti myös puisessa maastossa puun rungot sekä lehdet muodostavat tutkavarjostumia, jonka vuoksi lähetin pitää sijoittaa puuston yläpuolelle esimerkiksi maston avulla.



Kuva 9. Maston avulla kohotettu dronetutka [48, © Northrop Grumman]

Kuvassa 9 on yksi toteutusratkaisu tutkan sijoittamiseksi tarpeeksi korkealle ympäröivään maastoon nähden. Tutkan sijoittamiseen tarpeeksi korkealle maasto-olosuhteissa tarvitaan usein apuvälineitä, kuten mastoja, mikä on haasteellisempaa verrattuna kaupunkiympäristöön, jossa tutka voidaan sijoittaa katolle tai esimerkiksi lyhtypylvääseen.

4.3 Dronevalvonta lentokentillä

Lentokentät ovat erityisen herkkiä droneilla tehtävälle häirinnälle, ja sen takia siellä on käytössä erilaisia tutkajärjestelmiä lennokkien havaitsemiseksi. Vaikka lennokit eivät olisikaan varustettu räjähteillä tai muilla aseilla, ne ovat silti vaaraksi lentokoneille muun muassa törmäysriskin takia. Sen vuoksi kiitoratoja joudutaan sulkemaan, mikäli droneja havaitaan lentävän niiden lähistöllä.

Yksi suurimmista droneilla tehdyistä häirintätapauksista tapahtui Lontoossa Gatwickin lentokentällä joulukuussa 2018, kun kaksi dronea lensi lentokentän ilmatilassa ilman lennonjohtajan lupaa. Lentokenttä jouduttiin sulkemaan havaintojen takia, ja sen seurauksena yli tuhat lentoa peruttiin. [51] Dronehavaintoja on tehty myös suomalaisilla lentokentillä, esimerkiksi toukokuussa 2021 Helsinki-Vantaalla, mutta se ei johtanut yhtä mitaviin toimenpiteisiin kuin Lontoossa [52].

Lentokenttä on ympäristönä lähes rajoittamaton tila. Kentät ovat tyypillisesti erittäin suuria, jolloin siellä tarvitaan mahdollisesti useampia tutkalähettämiä ja -vastaanottimia, jotka kattavat koko kentän sekä sitä ympäröivät alueet. Suurimmat rajoitteet lentokentillä käytettäviin tutkiin liittyvät niiden käyttämään taajuuteen, sillä alueella on muita radiosignaaleja, joita ne eivät saa häiritä. Lentokenttä onkin kyseisen rajoitteen takia poikkeustapaus verrattuna muihin ympäristöihin.

Lentokentällä on useita eri taajuuksia, joita käytetään eri käyttötarkoituksiin. Radiotaajuuksia käytetään muun muassa lennonjohdon ja pilottien väliseen kommunikaatioon. Nämä taajuudet vaihtelevat, Suomessa aluelennonjohdon taajuudet vaihtelevat välillä 121,300 MHz – 136,650 MHz [53]. Tutkat toimivat pääsääntöisesti gigahertsitaajuuksilla, jolloin päällekkäisyyksiä puhetaajuuden kanssa ei ilmene. Lentokonetutkat sen sijaan toimivat S- ja L-taajuusalueella [54], mikä täytyy huomioida dronetutkia käytettäessä. Lentokentille tarkoitettut dronetutkat toimivatkin usein X-taajuusalueella [55], jonka taajuudet ovat huomattavasti korkeammalla kuin S- ja L-taajuusalueiden taajuudet, ja näin ollen ne eivät aiheuta häiriötä toisilleen.

5. MARKKINARATKAISUT

Tarve torjua droneja on tuonut markkinoille useita eri toimijoita, jotka valmistavat erilaisia puolustusratkaisuja, joissa tutka on pääroolissa tai ainakin osana muuta järjestelmää. Tässä luvussa tehdään katsaus markkinoilla oleviin ratkaisuihin, muun muassa toteutus-
tapojen ja käytettyjen tekniikoiden osalta. Lennokkien tutkaukseen tarkoitettut järjestelmät ovat pääsääntöisesti tarkoitettu sotilas- ja viranomaiskäyttöön, eikä niitä markkinoita yksityisille toimijoille. Näin ollen esimerkiksi hintatietoja, tai tarkempia teknisiä yksityiskohtia etenkin sotilaskäyttöön tarkoitetuista järjestelmistä ei aina ole saatavilla.

5.1 Käytetyt tekniikat

Luvussa 2 esiteltiin eri tekniikoita, joihin tutkan toiminta voi perustua. Pulssi-, CW- ja FMCW-tekniikoilla on kullakin omat etunsa ja heikkoutensa, ja valittu tekniikka määrittelee tutkan kyvyt ja rajoitteet esimerkiksi valvontaetäisyyden ja usean kohteen samanaikaisen tutkauksen suhteen. Joissakin dronetorjuntajärjestelmissä tutkan kanssa yhteistyössä voi toimia muita laitteita, esimerkiksi kamera, jolla voi myös olla vaikutusta tutkassa käytettävän tekniikan valintaan suunnitteluvaiheessa.



Kuva 10. Meteksan-yhtiön valmistama Retinar Far-AD-pulssitutka [57, © Meteksan Savunma]

Kuvassa 10 on Meteksanin valmistama Retinar Far-AD-dronetutka, jonka käyttämä tekniikka perustuu pulsseihin. Pulssien ansiosta sen valvontaetäisyys on muihin tutkiin verrattuna suhteellisen pitkä, yli viisi kilometriä. Minimietäisyys kohteiden havaitsemiselle

Retinar Far-AD-tutkalla on 100 metriä. [57] Pitkä valvontaetäisyys on eduksi etenkin laajoilla ja esteettömillä alueilla, kuten lentokentillä ja valtioiden rajoilla.

Useat dronevalvontaan valmistetut tutkat käyttävät pulssien sijasta FMCW-tekniikkaa, jolloin valvottava alue on yhtenäinen eikä minimietäisyyden suhteen ole rajoitteita. FMCW-tutkalla määritelty kohteen etäisyys on tarkka, ja matalatehoiset radioaallot mahdollistavat tutkan käytön esimerkiksi kaupunkiympäristössä siten, että se ei ole vaaraksi ihmisille. Valvontaetäisyys on tällöin kuitenkin pienempi kuin korkeatehoisempia pulsseja käyttäessä.



Kuva 11. Blighter-yhtiön valmistama A800-tutka [58, © Blighter]

Kuvassa 11 on Blighterin valmistama dronetutka, joka perustuu FMCW-tekniikkaan. A800-tutkan valvontaetäisyys on kolme kilometriä, joka on merkittävästi lyhyempi kuin Retinar Far AD -tutkassa. A800 pystyy myös havaitsemaan 700 kohdetta samanaikaisesti, jolloin se soveltuu droneparven havaitsemiseen ja sen koon määrittämiseen [58].

Markkinakatsauksessa tutkituissa dronetutkajärjestelmissä yksikään ei käyttänyt jatkuva-aaltoista, eli CW-tekniikkaa. Syynä on todennäköisesti se, että CW-tekniikkaan perustuvalla tutkalla ei voida määrittää kohteen etäisyyttä, vaan sitä voidaan hyödyntää vain kohteen liikkeen havaitsemiseen sekä sen nopeuden määrittämiseen. Lisäksi näiden tietojen määrittäminen voidaan tehdä vain yhdestä kohteesta, ja edellisten rajoitteiden nojalla se ei ole soveltuva useimpiin dronetutkien käyttökohteisiin.

5.2 Toteutukset

Eri valmistajat ovat toteuttaneet tutkan toiminnallisuuksia erilaisilla ratkaisuilla. Eroavaisuuksia löytyy käytetyn tutkatekniikan lisäksi myös fyysisistä ominaisuuksista, kuten esimerkiksi liikuteltavuudesta tai antennien suuntauksista.

Yksi näkyvimmistä eroista eri dronetutkajärjestelmien välillä on niiden alusta. Keskeinen jako eri tutka-alustojen välillä on jako liikkuviin sekä kiinteisiin alustoihin. Liikkuva-alustaiset tutkat on usein rakennettu joko ajoneuvoon tai perävaunuun, jolloin sen kuljettaminen esimerkiksi maastoon on helppoa. Kuvassa 12 on esimerkki ajoneuvon perään kytkettävästä ja liikutettavasta Sentinel-tutkasta.



Kuva 12. Raytheon Technologies-yhtiön valmistama perässä vedettävä Sentinel-tutka. [59, © Raytheon Technologies]

Kiinteäalustaiset tutkat sijaitsevat tukijalkojen, maston tai muun vastaavan rungon varassa. Esimerkiksi lentokentillä sekä kaupunkialueilla tutkat usein sijoitetaan kiinteisiin paikkoihin. Kuvan 11 A800-tutka on esimerkki tukijalkojen varassa seisovasta dronetutkasta.

Tutkien välillä on myös eroja kaistanleveyden prosessoinnissa, joka vaikuttaa tutkan resoluutioon. Valitun kaistanleveyden lisäksi pulssitutkissa voidaan hyödyntää CHIRP-pulsseja (Compressed, High-Resolution Pulse). Kompressoidussa pulssissa yhdistetään edut sekä pitkistä että lyhyistä pulsseista, jolla tutkan resoluutiota saadaan parannettua. [60]

5.3 Keskeisimmät erot markkinoiden tuotteissa

Dronetutkien eri käyttäjäryhmät, käyttöympäristöt sekä vaatimukset määräävät järjestelmien ominaisuudet sekä niiden keskeisimmät eroavaisuudet. Tässä luvussa perehdytään tuotteiden teknisten sekä fyysisten ominaisuuksien eroihin.

Tällä hetkellä markkinoilla on pääsääntöisesti kahdenlaisia dronetutkia: pulssitutkia sekä FMCW-tutkia. Tutkia markkinoidaan käytettäväksi keskenään samankaltaisissa tehtä-

vissä sekä ympäristöissä, ja niiden suurin käytännön eroavaisuus on valvontaetäisyydessä. Markkinakatsauksessa perehdyttyjen tutkien valvontaetäisyydet olivat kolmen ja kahdeksan kilometrin välillä, eli niissä voi olla moninkertaisia eroja merkistä ja mallista riippuen [58, 61].

Suurin osa tutkista toimii samoilla tutkataajuusalueilla. Käytetyimmät taajuusalueet dronetutkissa ovat perinteisiä tutkia korkeampia, joko X- tai Ku-taajuusalueita. Suuremmilla taajuuksilla saadaan parempi tutkaresoluutio ja sillä voidaan havaita paremmin pienempiä kohteita, joka selittää kyseisten taajuusalueiden käytön markkinoilla olevissa tuotteissa.

Valvontaetäisyyden lisäksi toinen ominaisuus, josta löytyy suurta vaihtelua eri dronetutkien välillä on atsimuutin suuruus. Pienimmät atsimuuttikulmat markkinoiden tuotteissa ovat 90° [49], joka on tyypillisimpiin käyttötarkoituksiin ja ympäristöihin liian pieni. Suurimmassa osassa tuotteissa sen kattavuus onkin joko 180° tai 360°. Täysi 360° asteen kattavuus on saavutettu joko yhdistelemällä useita antennia [49] tai pyörittämällä yhtä antennia akselinsa ympäri [50].

Markkinoilla olevat dronetutkat jakautuvat alustansa perusteella liikkuviin ja kiinteisiin järjestelmiin, ja näiden alakategorioiden tuotteissa on selviä eroja järjestelmien painoissa. Raskaat järjestelmät voivat painaa yli 70 kg [23], ja kevyemmät noin 25 kg [50]. Raskeammassa tutkajärjestelmissä on usein paremmat valvontaominaisuudet, ja kevyempien etuna on helppo liikuteltavuus esimerkiksi väliaikaista valvontaa varten.

Taulukko 5. Tutkajärjestelmiä ja niiden ominaisuuksia [23, 50, 57, 58, 49]

Merkki / Malli	Tekniikka	Taajuusalue	Valvontaetäisyys	Atsimuutti	Paino
Robin Radar / Elvira	FMCW	X	5 km	360°	72 kg
Robin Radar / Iris	FMCW	X	5 km	360°	25 kg
Meteksan Savunma / Retinar Far-AD	CHIRP-pulssi	Ku	5,2 km	360°	40 kg
Blighter / A800	FMCW	Ku	3 km	90°	31 kg
Rada / MHR	Pulssi	S	5 km	90°	30 kg

Taulukkoon 5 on listattu markkinoilla olevia tuotteita sekä niiden ominaisuuksia. Taulukon arvoja tarkasteltaessa konkretisoituu erot ja samankaltaisuudet eri tuotteissa; valvontaetäisyydet ovat suhteellisen lähellä toisiaan, mutta atsimuuteissa ja painoissa on suuria vaihteluita.

6. YHTEENVETO

Tässä kandidaatintyössä perehdyttiin aluksi dronetutkien tekniikkaan. Eri tutkatekniikoiden ymmärtäminen on tarpeellista tutkajärjestelmän ominaisuuksia arvioitaessa, sillä järjestelmän rajoitteet ja suorituskyky perustuu pitkälti käytettyyn tekniikkaan. Pulssi- ja FMCW-tekniikoiden käytännön eroavaisuudet näkyvät muun muassa valvontaetäisyydessä sekä valvottavan alueen yhtenäisyydessä (minimietäisyydet ja sokeat pisteet). Tekniikoiden lisäksi työssä tutustuttiin mono- bi- ja multistaattisiin järjestelmiin sekä niiden toimintaan tutkavalvonnassa.

Lennoikkien tutkauksessa hyödynnetään tiettyjä fysiikan ilmiöitä, joiden avulla tutkakohdeesta saadaan enemmän tietoa. Yksi näistä ilmiöistä on mikro-Doppler, jonka käsite avattiin yksityiskohtaisemmin kandidaatintyössä. Sen avulla lennokit voidaan erotella muista samankokoisista kohteista, kuten linnuista. Mikro-Doppler-siirtymiä analysoimalla voidaan myös tutkia, onko drone kuormattu esimerkiksi räjähteillä.

Tutkausprosessissa olennaisena osana on luonnollisesti myös kohteen, eli dronen ominaisuudet. Dronen havaittavuutta kuvataan RCS-arvolla, joka määräytyy sen radioaaltoja heijastavien ominaisuuksien mukaan. Suurimmat RCS-arvoon vaikuttavat tekijät ovat kohteen koko, muotoilu sekä käytetyt materiaalit. Työssä käsiteltiin myös häiveteknologiasia ja sen sisältämiä tekniikoita RCS-arvon pienentämiseksi.

Työssä käsiteltiin myös erilaisia ympäristöjä, joissa dronevalvontaa suoritetaan. Eri ympäristöillä on niille ominaisia piirteitä, jotka asettavat omat vaatimuksensa käytettävälle tutkajärjestelmälle. Esimerkiksi urbaanissa ympäristössä on usein tutkavarjostumia ja katvealueita, joihin täytyy varautua laitteistotasolla hyödyntämällä multistaattisia järjestelmiä. Maasto-olosuhteissa on tyypillisesti rajoittamattomampi tila verrattuna kaupunkiin, mutta valvottavat alueet ovat usein laajoja. Ne vaativat erityistä suorituskykyä muun muassa valvontaetäisyyden suhteen. Kolmas käsitelty valvontaympäristö on lentokenttä, jossa fyysisten ominaisuuksien lisäksi on myös taajuusrajoitteita, jotka täytyy huomioida dronetutkaa käytettäessä.

Miehittämättömien lennoikkien aiheuttamat häiriöt ja vaaratilanteet, sekä niiden kasvanut käyttö nykyaikaisessa sodankäynnissä tekevät tämän työn aiheesta ajankohtaisen. Dronejen yleistymisen on tuonut markkinoille toimijoita ja tuotteita, jotka ovat erikoistuneet lennoikkien torjuntaan. Työssä käytiin läpi erilaisia markkinaratkaisuja ja niiden omi-

naisuuksia vertailtiin keskenään. Suurimmat yhtäläisyydet tuotteiden välillä olivat käytetyissä taajuusalueissa sekä tutkatekniikoissa, ja suurimmat eroavaisuudet atsimuuttien kattavuuksissa sekä tutkajärjestelmien painoissa.

LÄHTEET

- [1] DJI. DJI Mini 2 Specs. URL: <https://www.dji.com/fi/mini-2/specs> (viitattu 24.02.2022)
- [2] DJI. DJI Matrice 600 PRO Specs. URL: <https://www.dji.com/fi/matrice600-pro/info#specs> (viitattu 24.02.2022)
- [3] Guinness World Records. Most Remote Controlled Multirotors/Drones Airborne Simultaneously. URL: <https://www.guinnessworldrecords.com/world-records/373319-most%20unmanned-aerial%20vehicles%20uavs-airborne%20simultaneously%2005-kg-or-less> (viitattu 25.02.2022)
- [4] Robin Radar. Why Traditional Radar Isn't Effective at Tracking Drones. URL: <https://www.robinradar.com/press/blog/why-traditional-radar-isnt-effective-at-tracking-drones> (viitattu 25.02.2022)
- [5] Smith M. How Radar Works: Why Radio Waves Enable Us to See Objects Far Beyond Our Human Senses. *How It Works Magazine*. 2022:46–.
- [6] DJI. DJI FPV Specs. URL: <https://www.dji.com/fi/dji-fpv/specs> (viitattu 26.02.2022)
- [7] Meikle H. *Modern Radar Systems*. Norwood: Artech House; 2008:1–3.
- [8] Raytheon. Identification Friend or Foe. URL: <https://www.raytheon.com/uk/capabilities/products/identification-friend-or-foe> (viitattu 01.03.2022)
- [9] Unmanned Tech. Ping RX ADS-B Receiver for UAV's. URL: <https://www.unmannedtechshop.co.uk/product/ping-rx-ads-b-receiver-for-uavs/> (viitattu 01.03.2022)
- [10] Alabaster C. *Pulse Doppler Radar: Principles, Technology, Applications: Principles, technology, applications*. Raleigh: The Institution of Engineering and Technology; 2012:25-29.
- [11] Kronauge M. *Waveform Design for Continuous Wave Radars*. Göttingen, Germany: Cuvillier Verlag; 2014:15-20.
- [12] Fang J, Meng H, Zhang H, Wang X. A Low-cost Vehicle Detection and Classification System based on Unmodulated Continuous-wave Radar. In: *2007 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference*. IEEE; 2007.
- [13] Jankiraman M. *FMCW Radar Design*. Norwood, Massachusetts: Artech House; 2018:19-20.
- [14] Chen, V. C. *The Micro-Doppler Effect in Radar*. Norwood: Artech house; 2019:1-20.

- [15] Kim Y, Nazaroff M, Oh D. Extraction of Micro-Doppler Characteristics of Drones Using High-Resolution Time-Frequency Transforms. *Microwave and Optical Technology Letters*. 2018;60(12):2949–54.
- [16] Skolnik, M. I. Radar. *Encyclopedia Britannica*. URL: <https://www.britannica.com/technology/radar> (viitattu 05.03.2022)
- [17] Fourikis N. *Advanced Array Systems, Applications and RF Technologies*. San Diego: Academic Press; 2000:41-44.
- [18] Willis N, Griffiths H. *Advances in Bistatic Radar*. Stevenage: The Institution of Engineering and Technology; 2007:3-5.
- [19] Willis NJ. *Bistatic Radar*. 2nd ed., Corrected and Reprinted Version. Raleigh, NC: SciTech Pub.; 2005:1-10.
- [20] Raytheon Missiles & Defence. KuRFS: Ku-band Radio Frequency System. URL: <https://www.raytheonmissilesanddefense.com/what-we-do/counter-uas/sensors/kurfs> (viitattu 06.03.2022)
- [21] Citizendium. IEEE Frequency Bands. URL: https://en.citizendium.org/wiki/IEEE_frequency_bands (viitattu: 06.03.2022)
- [22] Robin Radar. Why Drone Detection is Essential for Prison Security. URL: <https://www.robinradar.com/press/blog/why-drone-detection-is-essential-for-prison-security> (viitattu 06.03.2022)
- [23] Robin Radar. Elvira. URL: <https://www.robinradar.com/elvira-anti-drone-system?hsLang=en> (viitattu 06.03.2022)
- [24] Kingsley S, Quegan S. *Understanding Radar Systems*. Raleigh: The Institution of Engineering and Technology; 1999.
- [25] Anghel A, Vasile G, Cacoveanu R, Ioana C, Ciochina S. Short-range Wideband FMCW Radar for Millimetric Displacement Measurements. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*. 2014;52(9):5633–42.
- [26] Ilioudis C. *Introduction to Radar Signal Processing*. University of Strathclyde. URL: <https://udrc.eng.ed.ac.uk/sites/udrc.eng.ed.ac.uk/files/attachments/Introduction%20Radar%20signal%20processing.pdf> (viitattu 16.03.2022)
- [27] Knott EF, Shaeffer JF, Tuley MT. *Radar Cross Section*. 2nd ed., corr. reprinting. Raleigh, NC: SciTech Pub.; 2004:1-11.
- [28] Cooper KB, Durden SL, Cochrane CJ, Rodriguez Monje R, Dengler RJ, Baldi C. Using FMCW Doppler Radar to Detect Targets up to the Maximum Unambiguous Range. *IEEE geoscience and remote sensing letters*. 2017;14(3):339–43.
- [29] Skolnik M. *Radar Handbook, Third Edition*. New York: McGraw-Hill Publishing; 2008:1.4
- [30] Semkin V, Haarla J, Pairo T, Slezak C, Rangan S, Viikari V, et al. Analyzing Radar Cross Section Signatures of Diverse Drone Models at mmWave Frequencies. *IEEE access*. 2020;8:48958–69.

- [31] Wiley RG. ELINT : The Interception and Analysis of Radar Signals. Boston: Artech House; 2006:13-14
- [32] Chen V., Li F, Ho S-S, Wechsler H. Micro-Doppler Effect in Radar: Phenomenon, Model, and Simulation Study. IEEE transactions on aerospace and electronic systems. 2006;42(1):2–21.
- [33] Knott EF, Shaeffer JF, Tuley MT. Radar Cross Section. 2nd ed., corr. Reprinting. Raleigh, NC: SciTech Pub.; 2004:17-18.
- [34] Skolnik MI. Introduction to Radar Systems. 3rd ed. New York (NY): McGraw-Hill; 2001:44
- [35] Ritchie M, Fioranelli F, Griffiths H, Torvik B. Micro-Drone RCS Analysis. In: 2015 IEEE Radar Conference. IEEE; 2015. p. 452–6.
- [36] Davis C. Reflection. University of Louisville Department of Physics. URL: https://www.physics.louisville.edu/cldavis/phys299/notes/lo_reflection.html (viitattu 25.03.2022)
- [37] Northrop Grumman. Photo Release -- U.S. Navy/Northrop Grumman X-47B Demonstrator Receives Popular Science "Best of What's New" Award. URL: <https://news.northropgrumman.com/news/releases/photo-release-u-s-navy-northrop-grumman-x-47b-demonstrator-receives-popular-science-best-of-what-s-new-award> (viitattu 25.03.2022)
- [38] Rahman S, Robertson DA. In-flight RCS Measurements of Drones and Birds at K-band and W-band. IET radar, sonar & navigation. 2019;13(2):300–9.
- [39] Zhou Z, Huang J. Influence of Rotor Dynamic Scattering on Helicopter Radar Cross-Section. Sensors (Basel, Switzerland). 2020;20(7):2097–.k
- [40] Li J, Liu X, Li Y, Liangliang Z. The Influence of Different Factors on Rotor's Micro-Doppler Effects. In: 2019 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium - China (ACES). Applied Computational Electromagnetics Society; 2019. p. 1–2.
- [41] Ritchie M., Horne C., Peters N. Radar UAV and Bird Signature Comparisons with Micro-Doppler. Department of Electronic and Electrical Engineering, University College London, UK.
- [42] Semkin V, Haarla J, Pairo T, Slezak C, Rangan S, Viikari V, et al. Analyzing Radar Cross Section Signatures of Diverse Drone Models at mmWave Frequencies. IEEE access. 2020;8:48958–69.
- [43] Finlex. Valtioneuvoston Asetus Ilmailulta Rajoitetuista Alueista. URL: <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2014/20140930> (viitattu 31.03.2022)
- [44] Robert C. Beason, Tim J. Nohara, Peter Weber. Beware the Boojum: Caveats and Strengths of Avian Radar. Human-Wildlife Interactions. 2013;7(1):26
- [45] Kumar N, Vadera SR. Stealth Materials and Technology for Airborne Systems. In: Aerospace Materials and Material Technologies. Singapore: Springer Singapore; 2016. p. 519–37.

- [46] Hoffmann F, Ritchie M, Fioranelli F, Charlish A, Griffiths H. Micro-Doppler Based Detection and Tracking of UAVs With Multistatic Radar. In: 2016 IEEE Radar Conference, RadarConf 2016. 2016.
- [47] Tahmoush D, Silvius J, Bender B. Radar Surveillance in Urban Environments. In: 2012 IEEE Radar Conference. IEEE; 2012. p. 0220–5.
- [48] Northrop Grumman. Counter Unmanned Aerial Systems (C-UAS). URL: <https://www.northropgrumman.com/what-we-do/land/counter-unmanned-aerial-systems-c-uas/> (viitattu 19.04.2022)
- [49] Rada. MHR Multi-Mission Hemispheric Radar. URL: <https://www.rada.com/products/mhr> (viitattu 19.04.2022)
- [50] Robin Radar. Iris. URL: <https://www.robinradar.com/iris-counter-drone-radar> (viitattu 19.04.2022)
- [51] Shackle S. The Mystery of the Gatwick Drone. The Guardian. URL: <https://www.theguardian.com/uk-news/2020/dec/01/the-mystery-of-the-gatwick-drone> (viitattu 19.4.2022)
- [52] Söderkultalahti S. Drone Aiheutti Vakavan Vaara-tilanteen Helsinki-Vantaalla. Iltä-Sanomat. URL: <https://www.is.fi/digitoday/art-2000008112202.html>
- [53] Air Navigation Services Finalnd Oy. Suomen Ilmailukäsikirja. URL: https://www.ais.fi/aip_archive/aip30JAN2020/fi/index.htm (viitattu 19.04.2022)
- [54] Federal Aviation Administration. Airport Surveillance Radar (ASR-11). URL: https://www.faa.gov/air_traffic/technology/asr-11/ (viitattu 19.04.2022)
- [55] Robin Radar. MAX. URL: <https://www.robinradar.com/max-avian-radar-system?hsLang=en> (viitattu 19.04.2022)
- [56] Michael Parker. Chapter 18 - Radar Basics. In: Digital Signal Processing 101. Second Edition. Elsevier Inc; 2017. p. 231–40:231
- [57] Meteksan Savunma. Retinar FAR-AD Drone Detection Radar. URL: <https://www.meteksan.com/en/products/perimeter-surveillance-systems/retinar-far-ad-drone-detection-radar> (viitattu 24.04.2022)
- [58] Blighter Surveillance Systems. A800 3D Multi-Mode Radar. URL: <https://www.blighter.com/products/a800-3d-multi-mode-radar/> (viitattu 24.04.2022)
- [59] Raytheon Technologies. Sentinel Radar. URL: <https://www.raytheonmissilesanddefense.com/what-we-do/counter-uas/sensors/sentinel-radar> (viitattu 25.4.2022)
- [60] Kim B, Park J, Park S, Kim T, Jung D, Kim D, et al. Drone Detection with Chirp-Pulse Radar Based on Target Fluctuation Models. ETRI journal. 2018;40(2):188–96.
- [61] Aartos. Aartos Radar Detection. URL: <https://drone-detection-system.com/sensor-types-overview/detection-radar/> (viitattu 26.4.2022)