



OULUN YLIOPISTO  
UNIVERSITY of OULU

KONETEKNIIKAN KOULUTUSOHJELMA

# **Tutkasensori ja häiveet osana sensorijärjestelmiä**

Juho Latvakoski

# TIIVISTELMÄ

Tutkasensori ja häiveet osana sensorijärjestelmiä

Juho Latvakoski, 2431910

Oulun yliopisto, Konetekniikan koulutusohjelma

Kandidaatintyö 2018, 36 s.

Työn ohjaaja: Yrjö Louhisalmi

Tämän tekniikan kandidaatintyön tavoitteena on opiskella sensorijärjestelmien, tutkasensorin sekä häiveteknologian perustoimintaperiaatteet. Lisäksi tavoitteena on muodostaa käsitys näiden teknologioiden kehitysnäkökulmista ja haasteista tulevaisuudessa. Työ toteutetaan käyttämällä kirjallisia lähteitä sekä muita saatavia verkkolähteitä.

Työn tuloksena voidaan todeta, että sensorijärjestelmien, tutkasensoreiden ja häivetekniikan perustoimintaperiaatteet ovat olleet tunnettuja jo pitkään, mutta erityisesti autonomisten ja älykkäiden järjestelmien kehitys lisää aiheena olevien teknologioiden kehitystä tulevaisuudessa. Toisaalta kehitys tuo myös haasteita kuten eettiset, lainsäädännölliset sekä kyberturvallisuuden ongelmat.

*Asiasanat: tutkat, järjestelmät, häirintä, teknologinen kehitys*

## **ABSTRACT**

Radar sensor and stealth technology as part of sensor systems

Juho Latvakoski

University of Oulu, Degree Programme of Mechanical Engineering

Bachelor's thesis 2018, 36 p.

Supervisor: Yrjö Louhisalmi

Goal of this bachelor's thesis is to study the principle of sensor systems, radar sensor and stealth technology. On top of that the goal is to constitute an understanding of development and challenges of these technologies in the future. The work will be carried out using book sources and other online sources.

It is stated as a result that the principle of sensor systems, radar sensor and stealth technology have been known for a long time but especially the development of autonomous and intelligent systems increase the development of these technologies in the future. On the other hand side the development brings challenges as ethical, legislation and cyber security problems.

*Keywords: radars, systems, stealth technology, technological development*

## ALKUSANAT

Tämän tekniikan kandidaatintyön tarkoituksena on perehtyä tarkemmin sensorijärjestelmiin sekä yksittäisistä sensoreista tutkasensorin toimintaan. Työssäni perehdyn myös tutkakuvan häirintään häivetekniikan keinoin sekä pyrin selvittämään millaisia teknisiä ratkaisuja nykyaikaisilla ilma-, maa- ja merialuksilla on häivyttää tutkajälki. Lisäksi työn tarkoituksena on muodostaa käsitys tulevaisuuden kehitysnäkymistä tutka-, sensori-, sekä häiveteknisten laitteiden osalta, sillä teknologian kehitys on nopeaa erityisesti autonomisten järjestelmien ja koneälyn kehittymisen myötä.

Oulu 2.3.2018

*Työn tekijä* <- pyyhi pois ja kirjoita oma nimesi **k ä s i n.**

Juho Latvakoski

# SISÄLLYSLUETTELO

<b>JOHDANTO</b>	<b>7</b>
<b>2 Sensorijärjestelmät</b>	<b>8</b>
2.1 Sensori	8
2.2 Sensorifuusio	8
2.3 Datafuusio	9
3.1 Tutka mittausvälineenä	9
3.1.1 Tutkataajuusalueet	10
3.2 Tutkien jaottelu	12
3.2.1 Mono-, bi- ja multistaattiset tutkat	12
3.2.2 Ensiö- ja toisiotutkat	13
3.2.3 Mekaaniset-, elektroniset-, sekä hybriditutkat	13
3.3 Tutkasensorin toiminta	14
3.3.1 Pulssitutka	14
3.3.2 CW-tutka	16
3.4 Tutkien näyttötyypit	18
<b>4 Häivetekniikka</b>	<b>18</b>
4.1 Häiveteknologian keinot tutka-alueella	19
4.1.2 Kohteen muotoilu	19
4.1.3 Absorptiomateriaalit	20
4.2 Vastahäivetekniikka	22
<b>5 Tulevaisuuden kehitysnäkymiä</b>	<b>23</b>
5.1 Sensori- ja datafuusio	23
5.1.1 Esimerkki: AAWA -projekti	23
5.2 Tutkat	25
5.3 Häiveteknologian kehitys	26
<b>6 Johtopäätökset ja pohdinta</b>	<b>28</b>
6.1 Kehitysnäkökulmia	28
6.2 Tulevaisuuden kehityksen haasteet	29
<b>YHTEENVETO</b>	<b>31</b>
<b>LÄHDELUETTELO</b>	<b>34</b>

## **MERKINNÄT JA LYHENTEET**

AAWA      Advanced Autonomous Waterborne Applications

AESA      Activate Electronically Scanned Array

AESA      Activate Electronically Scanned Array

AFC      Automatic Frequency Control

AIS      Automation Identification System

CW      Continous wave

DSP      Digital Sigal Processor

FM      Frequency Modulation

GNSS      Global Navigation Satellite System

HF      High Frequency

IMU      Inertial Measurement Unit

ITU      International Telecommunication Union

LiDAR      Light Detection And Ranging

RaDAR      Radio Detecting And Ranging

RAM      Radar Absorbing Material

RAS	Radar Absorbing Structures
RCS	Radar Cross Section
SAR	Synthetic Aperture Radar
SSR	Secondary Surveillance Radar
TRC	Technology Research Center
VHF	Very High Frequency
PPI	Pixels Per Inch

# 1 JOHDANTO

Tällä hetkellä erilaiset tutkat ovat tärkeimpiä ilma- ja meriliikenteen valvontavälineitä ja ne ovat hyvin olennainen osa erilaisia koneteknisiä ja mekatronisia laitteita sekä sensorijärjestelmiä. Erityyppisten tutkien avulla voidaan seurata kaukasiakin kohteita sekä mitata esimerkiksi nopeuksia silloinkin, kun muiden sensoreiden käyttö on esimerkiksi huonojen sääolojen vuoksi lähes mahdotonta. Erityyppisiä sensoreita yhdistämällä voidaan luoda toimivia sensorijärjestelmiä, joiden yhteydessä puhutaan termeistä sensori- sekä datafuusio.

Sotateknologiassa pyritään pysymään tutkien sekä erilaisten valvontajärjestelmien näkymättömissä ja nykyinen häivetekniikan valtava kehitys on tuonut haasteita sekä kohteiden havaitsemiselle että tunnistamiselle. Tämän tekniikan kandidaatintyön aiheena on tutkasensori ja häiveet osana sensorijärjestelmiä. Aihevalinnan takana on kirjoittajan oma mielenkiinto erityisesti sotatekniikkaan, joissa erilaiset tutka-, sensori- sekä häivetekniset järjestelmät ovat merkittävä osa koneteknisiä laitteita.

Tekniikan kehitys on tällä hetkellä nopeaa. Aiheena olevien tutka-, sensori-, ja häiveteknologian perusmenetelmät ovat olleet tuttuja jo pitkään ja niihin on saatavilla opiskelumateriaaleja. Kirjoittajan tavoitteena on näissä puitteissa huolellinen perehtyminen. Uusi tutkimus ja pohdinta aihepiiriin liittyen on kuitenkin paikallaan, sillä erityisesti erilaisten autonomisten järjestelmien ja koneälyn kehityksen myötä tutka-, sensori- sekä häiveteknologia kehittyvät nopeasti tulevaisuudessa. Kyseiset teknologiat ovat uusia ja kehityksen osalta on myös puhuttu koneiden intuitiivisesta kyvystä oppia.

Tutkielmatyön rakenne etenee siten, että ensimmäisessä osiossa käydään läpi sensorijärjestelmä yksittäisestä sensorista sensorifuusioon sekä datafuusio. Toisessa osiossa aiheena on tutkasensori ja sen toiminta. Tutkatekniikan osalta käydään läpi tyypillisimmät versiot pulssi- sekä kantoaaltotutkista ilman ilmaisuteorian tarkkaa läpikäyntiä. Kolmannessa osiossa käydään läpi tutkien häirintää häiveteknologian



keinoin. Tulevaisuuden kehitysnäkymiä -osiossa käydään läpi kehitysnäkymiä sekä esitellään muutamia esimerkkitaupauksia järjestelmistä ja niiden kehityksestä. Viimeisessä luvussa on vuorossa johtopäätökset sekä pohdintoja ja näkemyksiä tulevaisuuden teknisestä kehityksestä ja niiden haasteista, joihin vaikuttavat erityisesti autonomia ja koneälyn kehitys.

## **2 Sensorijärjestelmät**

### **2.1 Sensori**

Yksittäisen sensorin ja sensorijärjestelmien toiminta yleisesti ottaen perustuu havaittavan kohteen heijastamaan tai kohteen itsensä lähettämään fysikaalisen suureen vastaanottamiseen ja tulkintaan. Suureita, joita mitataan voivat olla esimerkiksi magneettisuus, paine tai mekaaninen aaltoliike. Sähkömagneettista säteilyä lähettäviä sensoreita ovat esimerkiksi tutkasensori, erilaiset optroniset sensorit, lämpösensorit, laser sekä näkyvän valon sensorit. Yksittäisistä sensoreista keskityn tämän työn puitteissa pääasiassa tutkasensorin toimintaan. (Kosola & Solante 2013: 165)

### **2.2 Sensorifuusio**

Sensorifuusio on termi, joka tarkoittaa eri sensoreilta tulevan tiedon avulla tehtävää päättelyä kohteesta ja sen toiminnasta. Se pitää sisällään kohteen luokittelun, käyttäytymisen aikahistoriassa sekä korreloinnin, joka tarkoittaa havaintojen liittämistä yhteen kohteesta. Tiedon avulla voidaan muodostaa mahdollisimman kattava tilannekuva esimerkiksi ilma-avallonnasta tai etsiä yksittäisiä kohteita ja seurata niitä. (Kosola & Solante 2013: 168-169)

Eri sensoreilta saatavia tietoja yhdistelemällä voidaan saada aikaan havaintoja, jotka saattaisivat jäädä yksittäiseltä sensorilta havaitsematta. Sensorifuusion tarkoituksena on

luoda mahdollisimman laaja ja tilannetietoinen sekä ajanmukainen kuva toimintaympäristöstä, jonka seurauksena päätöksenteko on helpompaa. Sensorijärjestelmän kohteen havaitsemiseen tarvittava aika on riippuvainen järjestelmän käyttäjän lisäksi yksittäisen sensorin resoluutiosta ja näkökentästä sekä kohteen kontrastista. Eli käytännössä useamman erityyppisen sensorin antamaa tietoa yhdistetään samalle näytölle, joka helpottaa laitteen ohjaajan päätöksentekoa. (Kosola & Solante 2013: 168-171)

## 2.3 Datafuusio

Terminä datafuusio tarkoittaa samaan aihealueeseen liittyvien tietoaineistojen yhdistämistä, jolloin eri lähteiden kautta saadut tiedot tukevat toisiaan. Sensorit tuovat havaintotietoja ja ennalta luotujen mallien avulla havainnoista tehdään päätelmiä. Datafuusio sisältää sensorifuusion, tilannearvion, uhka-arvion ja päätöksenteon tukemisen. Koko järjestelmän on pystyttävä hyvin nopeasti käsittelemään epävarmaa sekä epäilyttävää ja mahdollista väärää tietoa. Datafuusio on hyödyllinen erityisesti niissä tapauksissa, kun tieto on epävarmaa ja siinä saattaa olla häiriötekijöitä. Sen avulla voidaan havaita tilanteita ja pieniäkin kohteita ympäristöstä, jotka muuten saattaisivat jäädä havaitsematta. (Kari ym. 2008: 103; Kosola & Solante 2013: 171 )

Käytännössä datafuusiossa laite siis käyttää omia sensoreitaan aktiivisesti, yhdistää tietoa ja tekee omia ratkaisujaan saatavan tiedon perusteella sekä näin helpottaa toimijan päätöksentekoa.

# 3 Tutkasensori

## 3.1 Tutka mittausvälineenä

Tutkasensori (RaDAR, Radio Detecting And Ranging) on radioaaltojen avulla tehtävä havainnointiin ja etäisyyden mittaukseen kehitetty laite. Alunalkaen se on ollut

perinteinen paikkatietoilmaisin eli tieto kohteesta ja sen paikasta kuvaruudulla on ollut riittävä. Nykyisin havaitsemiseen liittyvät tasot ovat havaitseminen, paikantaminen, luokittelu ja kohteen tunnistus eli tutka havaitsee ja paikantaa jotain, luokittelee sen esimerkiksi lentokoneeksi ja tunnistaa lentokoneen tyypin. (Klemola & Lehto 1998: 15; Kosola & Solante 2013: 167, 173)

Tutkasensorin toiminnan perusajatus on sähkömagneettisen säteilyn suuntaus ja lähetys kohti kohdetta. Säteily heijastuu kohteesta ja se vastaanotetaan antennin avulla. Vastaanotettuun säteilyyn perustuen saadaan määritettyä kohteen suunta- ja etäisyystiedot. (Klemola & Lehto 1998: 15; Kosola & Solante 2013: 167, 173)

### 3.1.1 Tutkataajuusalueet

Tutkatekniikkaa sovelletaan yleisesti laajalla taajuusalueella. Useimmiten tutkat toimivat taajuusalueilla 1-40 GHz, mutta eri taajuusalueiden käyttö on mahdollista muutamista megahertseistä (MHz) näkyvän valon ja ultraviolettisäteilyn alueille asti. Tällä hetkellä käytössä on toisesta maailmansodasta kehityksensä saaneet kaksi tapaa jakaa sekä nimetä taajuusalueet. Toinen on toisessa maailmansodassa sodan voittaneen lännen käyttämä jako ja toinen on NATO:n taajuusjako. Yleiskäytäntönä on merkitä taajuusalueita kirjaimilla. (Klemola & Lehto 1998: 19; Kosola & Solante 2013: 171 )

Taulukko 1. Tutkien taajuusalueet ja nimeämiskäytännöt (Kosola & Solante 2013: 65-66).

Lännessä käytetty taajuusjako	NATO:n taajuusjako
P 230 MHz - 1 GHz	A 0 - 250 MHz
L 1 - 2 GHz	B 250 - 500 MHz
S 2 - 4 GHz	C 500 - 1 GHz

C 4 - 8 GHz	D 1 - 2 GHz
X 8 - 12 GHz	E 2 - 3 GHz
Ku 12 - 18 GHz	F 3 - 4 GHz
K 18 - 26.5 GHz	G 4 - 6 GHz
Ka 26.5 - 40 GHz	H 6 - 8 GHz
	I 8 - 10 GHz
	J 10 - 20 GHz
	K 20 - 40 GHz
	L 40 - 60 GHz
	M 60 - 100 GHz

Tutkataajuusalueiden käyttö perustuu maapallollamme olevaan kolmen aikavyöhykkeen jakoon. ITU (ITU, International Telecommunication Union) eli kansainvälinen televiestintäliitto jakaa taajuuksia näille alueille eri tarkoitusten mukaisesti. Näin ollen esimerkiksi NATO:n B-taajuusalueella toimiva tutkajärjestelmä ei voi käyttää koko B-alueen kaistaa. (Kosola & Solante 2013: 66 )

Suomessa yleisesti viestintävirasto julkaisee ajankohtaiset taajuusjakomääräykset verkkosivuillaan. Niissä on jaettu käytettävissä olevat taajuusjaot käyttölaitteen mukaan. Taajuusjakomääräyksistä varatut taajuusalueet esimerkiksi erilaisten tutkasovellusten ja sotilaslaitteiden käyttöön löytyvät viestintäviraston verkkosivuilta. (Viestintävirasto 2018)

## 3.2 Tutkien jaottelu

Tutkia voidaan jakaa useiden eri periaatteiden mukaan. Jako voidaan toteuttaa vastaanottimien sijoituspaikkojen, niiden lähettämän kaikupulssin, antennin ohjaukseen perustuen tai niiden toimintaperiaatteen avulla. Sotakniikassa tutkat voidaan jakaa käyttökohteidensa mukaan valvontaan, seurantaan, tulenjohto- ja ennakkovaroitustoimintaan liittyviin tutkiin sekä erilaisiin hakupää-, sää-, navigaatio- ja kartoitustutkiin. (Klemola & Lehto 1998: 16-18; Kosola & Solante 2013: 174-176)

### 3.2.1 Mono-, bi- ja multistaattiset tutkat

Tutkat voidaan jakaa lähettimen ja vastaanottimen sijoituspaikkojen mukaisesti. Mono- eli yksipaikkatutkassa sekä lähetin- että vastaanotin ovat yhdessä ja samassa paikassa muodostamassa laitekokonaisuutta, jolloin ne voidaan synkronoida. Näin pulssin kulkuajan eli etäisyyden mittaus esimerkiksi laskuripiirin avulla onnistuu. (Klemola & Lehto 1998: 17; Kosola & Solante 2013: 174)

Bistaattisessa eli kaksipaikkaisessa tutkassa lähetin ja vastaanotin ovat puolestaan sijoitettu erillisiin paikkoihin. Kaksipaikkaisen tutkan etuna on huono häirittevyys esimerkiksi elektronisen sodankäynnin avulla, koska vastaanotin on passiivinen eli se ei säteile energiaa ympäristöön. (Klemola & Lehto 1998: 17; Kosola & Solante 2013: 174)

Multistaattinen tutka- eli monipaikkainen tutka on vielä laajennettu versiointi bistaattisista tutkista, sillä siinä lähetimet ja vastaanottimet muodostavat kokonaisjärjestelmän. Multistaattisen tutkan avulla voidaan tehdä mittauksia horisontin taakse sekä sen häirintä on hankalaa. Sen suurin haaste on kuitenkin tietojen sykkronointi. (Klemola & Lehto 1998: 17)

### 3.2.2 Ensiö- ja toisiotutkat

Tutkat voidaan jaotella myös niiden lähettämän kaikupulssin perusteella ensiö- ja toisiotutkiin. Ensiötutka toimii samalla periaatteella kuin yksipaikkainen tutka eli sen kaikupulssi heijastuu kohteesta tutkavastanottimeen. Toisiotutkan (SSR, secondary surveillance radar) toimintaperiaate perustuu puolestaan transponderin käyttöön eli lähetin lähettää signaalin ja kohteen transponderi vastaa tutkalle kertoen esimerkiksi kohteen kulkusuunnan, paikkatiedon, koneen tyyppin tai lentonumeron. (Klemola & Lehto 1998: 18)

### 3.2.3 Mekaaniset-, elektroniset-, sekä hybriditutkat

Tutkia voidaan jakaa myös antennin ohjaukseen perustuen. Mekaanisesti keilaava tutkajärjestelmä suuntaa lähetystehon kääntäen antennia mekaanisesti haluttuun keilaussuuntaan pysty- ja vaakatasoissa. Mekaanista keilausta käytetään muun muassa hävittäjissä ja ilmatorjuntalaitteiden seurantatutkajärjestelmissä. Muissa järjestelmissä sen käyttö on kuitenkin vähäisempää, sillä mekaanisen keilausjärjestelmän tutkilla hitausmomentti tuo rajoituksia keilan suuntauksessa. (Kosola & Solante 2013: 174)

Elektronisesti keilaava tutkajärjestelmä puolestaan keilaa sekä vaaka- että pystytasoa elektronisen vaiheohjauksen sisältämällä antenniryhmällä. Kyseisen antenniryhmän vahvuus on nopea suunnan muutos, jolloin haluttua kohdetta voidaan valaista pidempään ja samanaikaisesti valvoa ympäröivää avaruutta. Vaiheohjattuja, elektronisesti keilaavia tutkia on käytössä esimerkiksi erilaisissa valvontatutkajärjestelmissä. (Kosola & Solante 2013: 175)

Hybridikeilaavat tutkajärjestelmät käyttävät mekaanista sekä elektronista keilausta. Tällöin antennin korkeuskulma eli elevaation keilaus toteutetaan elektronisesti sekä suuntakulman eli atsimuutin keilaus puolestaan mekaanisen periaatteen mukaisesti. Uusimmissa tutkajärjestelmissä elektronisen vaihesiirron avulla on toteutettu sekä elevaatio- että atsimuuttitaso. Esimerkiksi Northrop Grumman kehittämä AN/APG-81 -moderni hybriditutkajärjestelmä (AESA, active electronically scanned array) käyttää

edellä mainittua elektronista vaihesiirtoa (Northrop Grumman 2018; Kosola & Solante 2013: 175-176)



Kuva 1. AN/APG-81 -moderni hybriditutkajärjestelmä, jota käytetään Lockheed Martinin valmistamissa F-35 Lightning II -hävittäjissä. (Northrop Grumman 2018)

### **3.3 Tutkasensorin toiminta**

Tutkat voidaan jakaa niiden toimintaperiaatteen mukaisesti pulssitutkiin sekä kantaaltoja lähettäviin CW (CW, Contrinous Wave) -tutkiin. Tutkamallien olennaisin ero liittyy etäisyyden määrittelyyn. Pulssitutkien etäisyystieto määritetään lähetys- ja vastaanottopulssien aikaeroon perustuen, kun taas CW-tutkien avulla määritetty etäisyys muodostetaan vertailemalla signaaliin moduloitujen koodien lähetys- vastaanottoaikoja. (Kosola & Solante 2013: 234)

#### **3.3.1 Pulssitutka**

Pulssitutkan toiminta perustuu sen lähettämään sähkömagneettiseen pulssiin. Erilaiset pulssitutkat ovat tutkien perussovelluksia.

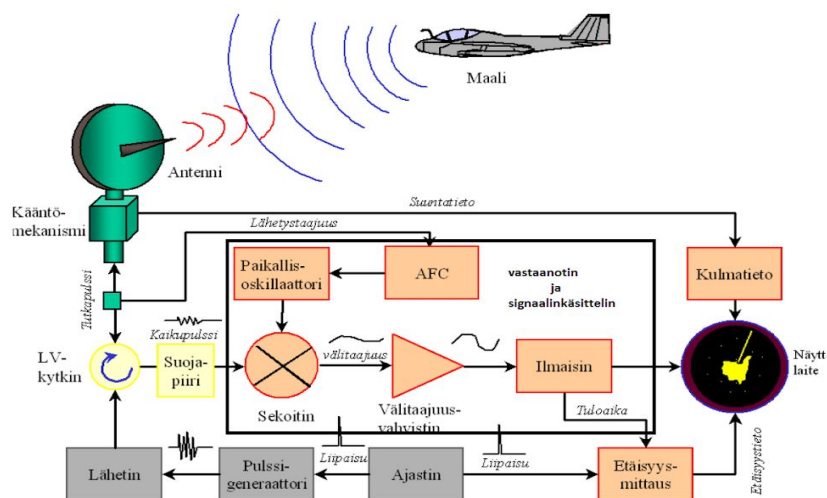
Tutka havaitsee kohteesta heikon kaikusignaalin, jonka jälkeen määritetään kohteen etäisyys pulssitutkan sähkömagneettisen pulssin avulla mittaamalla aikaa, joka kuluu edestakaiseen matkaan kohteelle. Kohteen suuntatieto saadaan kapeakeilaisen antenni avulla, jonka suunta kertoo kohteen tulosuunnan. Dopplerin ilmiöön perustuen saadaan

määriteltyä kohteen nopeus lähetetyn ja vastaanotetun taajuuden erotuksena. (Klemola & Lehto 1998: 15 - 16)

### Pulssitutkan toimintaperiaate

1. Ajastin lähettää käskyn pulssigeneraattorille, jonka seurauksena tämä lähettää hyvin lyhyen, mikrosekunteja kestäväen suuritehoisen ja -taajuisen sähköisen pulssin.
2. LV-kytkimen (duplekserin) kautta suuritehoinen pulssi välittyy antenniin. LV-kytkimen irroittaa vastaanottimen lähetyksen ajaksi pois verkosta, jotta ilmaisin ei vaurioidu.
3. Sähköinen pulssi tavoittaa kohteen ja heijastuu takaisin antennirakenteisiin. Tämän jälkeen heijastuva pulssi johdetaan LV-kytkimelle.
4. LV-kytkimeltä signaali johdetaan vastaanotin ja signaalinkäsittely -rakenteeseen, jossa pulssi saa lopullisen muotonsa.

(Klemola & Lehto 1998: 28-31; Kosola & Solante 2013: 176-177)





Kuva 2. Yksinkertaistettu malli pulssitutkan rakenteesta lohkokaaviosalla (Kosola & Solante 2013).

Lohkokaaavion perusosat tutkarakenteessa ovat ajastin, lähetin, LV-kytkin (duplekseri), aaltoputki, antenni, vastaanotin ja signaalinkäsittelijä sekä näyttölaite. Ajastin toimii tutkan eri eri osatoimintojen tahdistimena. Lähetyshetkellä se lähettää liipaisun lähettimelle sekä näyttölaitteelle. LV-kytkimen rakenne perustuu kolmeen porttiin. Sisään tulevan input-signaalin se päästää aina myötöpäivään kierrettäessä seuraavaan ulostuloporttiin, jolloin saapuva signaali saadaan johdettua oikeaan aaltoputki- ja lohkorakenteeseen. Aaltoputkirakenne on väylä, joka yhdistää LV-kytkimen ja antennin. (Klemola & Lehto 1998: 28-31; Kosola & Solante 2013: 176-177)

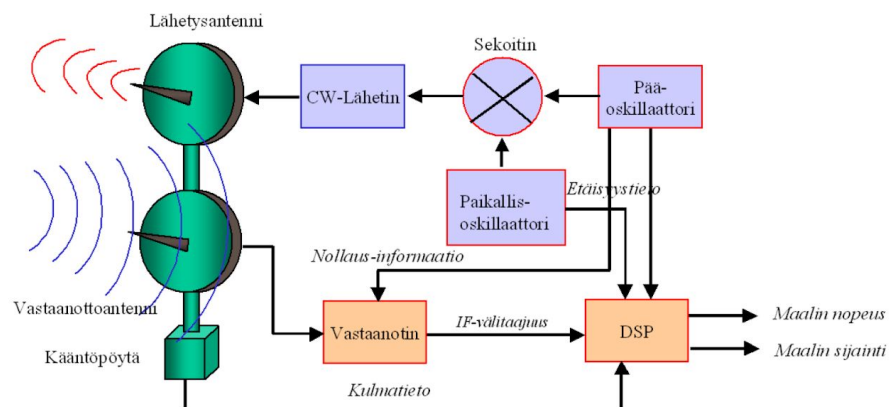
Vastaanotin ja signaalinkäsittelijä -lohkon rakenne koostuu useasta komponentista. Sen etupäässä käytetään usein supertaajuusvahvistinta, joka vahvistaa heikon pulssisignaalin. Vahvistimen jälkeen pulssi johdetaan sekoittimeen ja paikallisoskillaattoriin. Sekoittimen ja paikallisoskillaattorien kaukupulssien erotuksena saadaan välitaajuus. Paikallisoskillaattorin avulla voidaan säätää taajuus sopivaksi, jolloin syntyvä välitaajuus pysyy vakiona. (Klemola & Lehto 1998: 30-31; Kosola & Solante 2013: 176-177)

Välitaajuusvahvistimen rakenteessa on kaistanpäästösuodatin, jonka tehtävänä on päästää vain välitaajuskaiden signaalit ilmaisimeen. Välitaajuusvahvistin ja kaistanpäästösuodatin yhdessä parantavat vastaanotinrakenteen selektiivisyyttä. Ilmaisim muodostaa lopullisen pulssin välitaajuuden avulla, jonka jälkeen sen vahvistus toteutetaan videovahvistimen avulla ja välitetään näyttölaitteelle. (Kosola & Solante 2013: 176-177)

### **3.3.2 CW-tutka**

CW-tutkan toimintaperiaate perustuu jatkuvan aaltosignaalin lähetykseen. Kohteen etäisyys saadaan lähetteen modulaatiolla vaihekoodauksen tai lineaarisen taajuuspyyhkäisyn avulla vertailemalla signaaliin moduloitujen koodien lähetyksen ja

vastaanottoaikoja. Koodit ovat erilaisia signaaleita, jotka on moduloitu lähetteeseen esimerkiksi taajuusmodulaation (FM, Frequency Modulation) avulla. CW-tutkien käyttö vaatii erilliset antennit signaalin lähettämiseen ja vastaanottamiseen, joka vaatii paljon tilaa erityisesti matalien taajuuksien alueella. (Klemola & Lehto 1998: 21; Kosola & Solante 2013: 234)



Kuva 3. CW-tutkan lohkokaaaviokuva. (Kosola & Solante 2013)

CW-tutka lohkokaaaviorakenteen perusosat ovat pääosin samoja kuin pulssitutkillä. DSP (DSP, Digital Signal Processor) on signaaliprosessori, joka käsittelee sille saapuvan signaalin. (Kosola & Solante 2013: 149)

CW-tutkien yleisiä käyttökohteita ovat esimerkiksi erilaiset matalalentoisten ilmakohteiden seuranta- ja etsintäsovellutukset. Sotateknologiassa CW-tutkia on käytössä lähes kaikissa taistelukentän tutkasovelluksissa. FM-CW -tutkat käyttävät taajuusmoduloitua lähetettä ja niillä saadaan myös etäisyys mitattua. FM-CW -tyyppisiä tutkia eli altimetreja on yleisesti käytössä lentokoneiden korkeusmittareina sekä ilmanpainetta mittaavina korkeusmittareina. Korkeusmittarit ilmoittavat lentokoneen korkeusaseman suhteessa maan pintaan sekä ilmanpaineeseen perustuvat mittarit

ilmaisevat ilmanpaineen kyseisellä lentokorkeudella. (Klemola & Lehto 1998: 21; Kosola & Solante 2013: 23; Liimatainen 2005: 61)

### **3.4 Tutkien näyttötyypit**

Näyttötyyppejä on kehitetty useanlaisia niiden eri käyttötarkoitusten mukaisesti. Esimerkiksi valvontatutkille, ilmatorjunnassa käytetyille tutkille sekä lentokoneille on kehitetty omat, tehtävänsuorituksen soveltuvat näyttötyypit. Tutkasensorin välittämä tieto näytön välityksellä voi olla alkuperäis- tai jo käsiteltyä dataa. Käsitellyn datan tapauksessa puhutaan synteettisestä videosignaalista, kun siihen on jo lisätty erilaista tietoa kuten korkeus-, suunta-, nopeus tai muita kohteeseen liittyvää tietoa. Nykyaikaisissa järjestelmissä vastaanottimen tieto on lähes poikkeuksetta jo prosessoitua. (Meikle 2008: 614-615; Klemola & Lehto 1998: 33-34)

Näyttötavat voidaan jakaa kahteen päätyyppiin, poikkeutusmoduloituihin ja intensiteettimoduloituihin. Poikkeutusmoduloista näytöistä esimerkki on A-näyttötyyppi, joka on ensimmäinen tutkissa käytetty katodisädeputkinäyttö. A-näytön vaak-akseli näyttää aikaperusteisesti etäisyyden ja pystyakseli heijastuvan pulssin voimakkuuden. Intensiteettimoduloista näytöistä esimerkki on puolestaan PPI (Pixels Per Inch) -näyttö, jossa etäisyyden näyttävä akseli pyörii ja kohteen voimakkuus on suoraan verrannollinen heijastuvaan pulssiin. Tutka-antenni on keskellä kuvaruutua ja kohteet on kuvattu pisteinä. (Meikle 2008: 615-616; Klemola & Lehto 1998: 33-34; Kosola & Solante 2013: 177)

## **4 Häivetekniikka**

Häivetekniikka, stealth technology kuuluu “pienen havaittavuuden tekniikoihin”. Konetekniikan näkökulmasta häivetekninen kehitys sai alkunsa toisesta maailmansodasta, kun tutkan merkitys nykyaikaisessa sodankäynnissä kasvoi. Tällöin valtiot alkoivat etsiä ratkaisumenetelmiä, joiden avulla olisi mahdollista pienentää koneiden tutkanäkyvyyttä. (Klemola & Lehto 1998: 79)

Virallisesti häivetekninen valtakausi alkoi 1970-luvun puolivälissä, kun Yhdysvaltojen ilmailuteollisuus onnistui viemään läpi Have Blue -projektin, jonka tuloksena valmistettiin F-117A Nighthawk. Tämä käynnisti nopean tekniikan muutoksen. Häivetekniikan kehitys muutti sotilaslentokoneiden runkorakenteiden muotoilua sekä kehitystä. Erilaisia materiaaliratkaisuja alettiin kehitellä. Lisäksi kehitys oli syysäys avioniikka- eli ilmailuelektronisten järjestelmien kehitykselle, sillä ne lähettävät tutkakuvissa näkyvää säteilyä. Häivetekniikan yhteydessä mainittakoon myös erilaiset elektronisen sodankäynnin häirintämenetelmät, sillä niiden avulla pyritään vaikeuttamaan tutkien toimintaa.

(Lorell 2003: 97; Klemola & Lehto 1998: 79, 183)

#### 4.1 Häiveteknologian keinot tutka-alueella

Kohteen näkyvyyttä tutkassa kuvataan tutkakaikupinnalla. Tutkakaikupinta (RCS, Radar Cross Section) kuvaa näkymää tutkassa tutka- ja millimetrialueella, jolla useimmat sensorit toimivat. Sen yksikkö on  $m^2$  ja se muodostuu geometrisen poikkipinnan, pinnan suuntaavuuden sekä kohdepinnan heijastuskertoimen tuloista. Tutkakaikupinta on erityisen riippuvainen säteen tulokulmasta, sillä muutaman asteen kulmaväli voi muuttaa sitä tuhat kertaa suuremmaksi. Tämän vuoksi kohteen geometrisen pinnan koko ei usein ole niin merkitsevä kuin pinnan suuntaavuus, joka vaikuttaa olennaisesti kaikupinnan suuruuteen. (Kari ym. 2008: 455)

##### 4.1.2 Kohteen muotoilu

Pyrittäessä pieneen tutkakaikupintaan on kohteen muotoilun merkitys varsin keskeinen. Muotoilun tarkoituksena on ohjata heijastuvaa säteilyä pois tutkan vastaanottimesta ja tässä korostuu suunnittelutyön merkitys. Suunnittelumallit rakennetaan heijastavasta materiaalista ja testataan huolellisesti, miten teoreettisesti muotoillut rakenteet käyttäytyvät aerodynaamisesti sekä heijastavat tutkasignaalia. Nykyään tehokkaiden laskenta- ja mallinnusohjelmistojen avulla voidaan tarkasti määrittää ja hallita tutkakaikupintaa. (Austin 2010: 118; Kari ym. 2008: 456)

Ulkopintojen sileyks on keskiössä pyrittäessä pieneen tutkakaikupintaan, jonka vuoksi epäjatkuvuuskohdat pyritään saamaan mahdollisimman pieniksi. Moottorit, erilaiset säiliöt, antennit ja kuorma on sijoitettu rungon sisälle ja peitetty esimerkiksi erilaisilla luukkuratkaisuilla. Vahvasti tutkasignaalia heijastavat rakenteet, kuten tasomaiset levyt ja sylinterirakenteet, pyritään poistamaan. Suurimpia heijastusta aiheuttavia rakenteita sekä lentokoneiden että laivojen osalta ovat soppiheijastimet, joita voi muodostua esimerkiksi merenpinnan ja laivan rungon väliin. (Kari ym. 2008: 456; Klemola & Lehto 1998: 81)

Kaarevien rakenteiden avulla voidaan pienentää tutkakaikupintaa. Niiden etuna suoriin verrattuna on niiden sirottavuus, tutkavaimennusmateriaalisäästöt sekä kaarevuuden aikaansaama aerodynaamisuus. Lentokoneiden tapauksessa suihkumoottoreiden imuaukkoja ei voida kokonaan peittää, mutta niiden heijasteet saadaan mahdollisimman pieniksi esimerkiksi käyttämällä keraamisesta vaimennusmateriaalista muotoiltua, mutkittelevaa imukanavaa. (Kari ym. 2008: 456)

#### 4.1.3 Absorptiomateriaalit

Absorptiomateriaaleja ovat kaikki ne aineet, joilla pienennetään heijastuvan signaalin energiamäärää. Mahdollisimman pienen tutkakaikupinnan aikaansaamiseksi hyödynnetään viittä erilaista materiaalityyppiä. Näitä ovat erilaiset komposiitit, keraamit, elastomeerit, maalit sekä johtavat pinnoitteet. (Klemola & Lehto 1998: 81-82; Kari ym. 2008: 459)

Suojattavan kohteen pinnalle voidaan asentaa pinnoitemateriaalia kennoraketeisena pinnoitteena. RAM (RAM, radar absorbing material) -materiaalit jaetaan magneettisiin ja dielektrisiin materiaaleihin. Magneettisten materiaalien avulla pyritään muuttamaan tutkan säteily lämmöksi, kun taas dielektristen materiaalien peruseriaate on tutkapulssivaiheen kumoaminen. RAM-materiaalien heikkous on kuitenkin niiden

paino. Tutkavaimennusrakenteet (RAS, radar absorbing structures) koostuvat erityyppisistä sähköisten ja magneettisten ominaisuuksien kerroksista. (Klemola & Lehto 1998: 81-82; Kari ym. 2008: 459-460)

Sähkönjohtokykyisillä elastomeereillä on mahdollista koostaa erilaisia RAM-materiaaleja sekä sähkömagneettisesti muuntokykyisiä materiaalirakenteita. Ne säilyttävät hyvin häiveominaisuudet, vaikka kohteen muoto muuttuisi ja niiden avulla kyetään poistamaan epäjatkuvuuskohdista johtuvat tutkaherätteet. Älykkäitä vaimennusmateriaaleja eli dynaamisia RAM-materiaalirakenteita valmistetaan johtavista elastomeereista ja niitä voidaan sovittaa laajalti eri taajuuksille. Niiden toiminta perustuu kykyyn muuttaa sähköisiä ominaisuuksia tutkataajuudelle sopivaksi. (Kari ym. 2008: 461)

Vaihemuuttuvien materiaalien avulla voidaan heijastaa tutkan lähettämä pulssi takaisin eri taajuusalueella. Pulssin aikana materiaalit muuntuvat sähköisiltä ominaisuuksilta ja vaimentavat taajuuden. Vaihemuuttuvat materiaalikalvot ovat joko resistiivisiä tai reaktiivisiä ja niiden perustoimintaperiaate on keskenään samankaltaista, mutta ne toimivat eri kaistaisilla taajuusalueilla. Esimerkiksi resistiivinen kalvo aktivoituu tutka-aaltotaajuuden mukaan, jolloin kalvon aktivoituminen laskee sen resistanssia ja kalvosta tulee johtava. Johtava kalvo on tehokas keino vaimentaa tutkan säteilyä. (Kari ym. 2008: 461)

Jo teoriassa pitkään tunnettu plasma on yksi tulevaisuuden häiveteknisistä materiaaleista. Vuonna 2008 plasmalla kyettiin suojaamaan kohdelaitteen pieniä osia, mutta epäilemättä tekniikka on kehittynyt edelleen. Plasmaa voidaan hyödyntää esimerkiksi siten, että siipien etu- ja takaosien välille muodostetaan sähkökenttä, joka ionisoi ilmaa tutkasäteilyä absorboivaksi. Tulevaa tutka-aaltoa voidaan myös kumota aktiivisesti johtamalla laitteen ulkopintaan sähkövirtaa, joka pienentää kohteen tutkakaiun pinta-alaa. Myös erilaiset lämpösäteilyä pienentävät

maastouttamisjärjestelmät ovat olleet laajalti tutkimuksen kohteina. Esimerkiksi Venäjällä on tuotettu tutkanaamioverkkoja pienentämään tutkanäkyvyyttä. (Kari ym. 2008: 462)

Häivetekniikan kannalta mielenkiinnon ja tutkimuksen kohteina ovat viime vuosina olleet myös metamateriaalit, jotka ovat keinotekoisesti tuotettuja, luonnonmateriaaleista poikkeavan hilarakenteen materiaaleja. Metamateriaalien hilarakenne koostuu säteilyyn reagoivista virtapiireistä, joiden avulla saadaan muodostettua oma säteilykenttä sekä taitto- ja heijastusominaisuudet. On ennakoitu, että tulevaisuudessa metamateriaalien avulla olisi mahdollisuus toteuttaa näkymättömyyskaapuja tutkataajuuksille. Tällöin kaavun sähkökenttä kierrättää saapuvan signaalin kohteen suojattavan kohteen ohi. (Kari ym. 469)

## **4.2 Vastahäivetekniikka**

Nopean häivetekniikan lisääntymisen ja kehityksen myötä monet valtiot ovat alkaneet kehittää tutkilla toteutettavia vastahäivetekniikkaratkaisuja ja -sovelluksia. HF ja VHF -alueen tutkien avulla on mahdollista parantaa häivytettyjen kohteiden havaittavuutta, sillä suurin osa absorptiomateriaaleista on suunniteltu mikroaaltoalueilla toimivien tutkien hankaloittamiseksi. Lisäksi matalataajuiset HF ja VHF -alueet aiheuttavat resonanssin koneen rungossa, jolloin tutkan havainnointimahdollisuudet paranevat (Kari ym. 2008: 462-463; Klemola & Lehto 1998: 86)

Mikäli kohteen poikkipinta-ala pienenee erittäin pieneksi, ei perinteisellä monostaattisella tutkalla ole kovinkaan paljon vastakeinoja käytössä. Bi- ja multistaattisten tutkien avulla on mahdollista parantaa kohteen havaitsemismahdollisuuksia sijoittamalla vastaanotin siten, että kohteesta eteenpäin sironnut signaali tulee vastaanottimeen. Lisäksi esimerkiksi viestiliikennettä seuraamalla eli suuntimalla häiveteknisten kohteiden välistä viestintää, voidaan parantaa paikantamismahdollisuuksia. Sensorifuusio on yksi olennaisimpia ratkaisuja kohteiden

näkyvyyden parantamiseksi erilaisissa valvontajärjestelmissä nyt ja tulevaisuudessa. (Kari ym. 2008: 462-463; Klemola & Lehto 1998: 86-87)

## **5 Tulevaisuuden kehitysnäkymiä**

### **5.1 Sensori- ja datafuusio**

Erilaiset sensorijärjestelmät- ja teknologiat kehittyvät nopeasti. Tulevaisuudessa autonomia sekä älykkäät teknologiat mahdollistavat yhä autonomisempien ratkaisujen toteuttamisen sensorijärjestelmien avulla. YLE julkaisi 6.2.2018 artikkelin, jossa käytiin läpi aamu-tv:ssä keskustelun aiheena ollut tiedevuotta 2018. Artikkelissa havaintopsykologian tutkija Jukka Häkkinen Helsingin yliopistolta arvioi, että tekoäly ja koneoppiminen tulevat kehittymään kovaa vauhtia vuonna 2018. Häkkisen mukaan erityisesti syväoppiminen on kehittynyt suurin harppauksin ja koneille voidaan kehittää kyky oppiä uusia asioita sekä muistaa. Disruptiivisten teknologioiden asiantuntija, VTT:n Lauri Reuter puolestaan kertoo artikkelissa, että koneille voidaan nyt opettaa intuitiivisesti toteutettavaa ajattelu- ja oppimiskykyjä, joita on aiemmin pidetty vain ihmisten kykynä. (Blencowe 2018)

#### **5.1.1 Esimerkki: AAWA -projekti**

Rolls-Royce toteutti yhdessä yhteistyökumppaneidensa kanssa 2015-2017 AAWA (AAWA, Advanced Autonomous Waterborne Applications) -projektin, jossa kehitettiin autonomiseen merenkulkuun liittyviä ratkaisuja. Projektin tarkoituksena oli suunnitella ja kehittää autonomisen, miehittämättömän laivan tekniikkaa. Suomesta projektissa olivat mukana Turun yliopisto, Tampereen teknillinen yliopisto, Aaltoyliopisto sekä VTT. (Hyvönen 2016; Rolls-Royce Plc 2016; Saurama 2016)

Kyseisessä projektissa esimerkiksi Turun yliopiston TRC (TRC, Technology Research Center) -keskuksen tutkijat tutkivat laivan ympäristön havainnointiin liittyviä sensoriratkaisuja, joissa yhdistetään erilaisten tutkien sekä lämpö- ja visuaalisten kameroiden datatietoa. Sensorifuusion avulla eri sensoreilta saatu tieto suodatetaan ja



fuusioidaan, jolloin saadaan luotua tilannekuva laivan toimintaympäristöstä. Datafuusion analyysimenetelmien avulla saadaan tietoa ympäristöolosuhteista ja laivan toimintakunnosta (Hyvönen 2016; Saurama 2016)



Kuva 4. AAWA -projektissa luotu autonomisen laivan prototyyppi sekä laitteessa olevat sensorit. (Hyvönen 2016; Rolls-Royce 2016)

Projektiorganisaatio on arvioinut, että nykyisellä tekniikan kehityksellä vuonna 2020 käytössä olisi pienemmällä miehistöllä varustettu laiva, jossa olisi joitakin autonomisia ominaisuuksia. Vuonna 2030 käyttökokeiluun saataisiin miehittämätön, etäohjattu

avomerialus ja täysin itsenäinen autonominen miehittämätön avomerialus olisi käytössä vuonna 2035. (Hyvönen 2016)

## 5.2 Tutkat

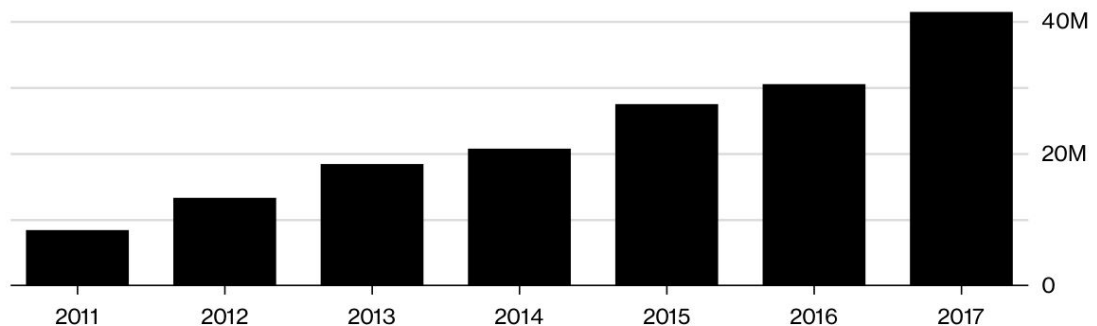
Tulevaisuudessakin tutkien käyttö tulee olemaan merkittävässä osassa erilaisia teknisiä laitteita ja sovelluksia, sillä niiden avulla saadaan määritettyä tarkat paikkatiedot. Käyttötarkoitukset tulevat edelleen olemaan varsin laajat ja niitä määritteleekin erilaiset suunnittelu- ja sovelluskokoonpanot. Esimerkiksi autoteollisuudessa pyritään kehittämään tutka- ja sensorijärjestelmien avulla tekniikka-avusteisia, yhä autonomisempia järjestelmiä, jotka avustavat jo nykyään muun muassa kaistojen vaihdossa, pysäköinnissä ja törmäysvaroituksissa sekä keräävät autoilutietoja (Chediak 2018; Kari ym. 2008: 85)

Taulukko 2. Tutkasensoreiden määrä ja määrän kehitys ajoneuvoissa viimeisen seitsemän vuoden aikana. (Bloomberg 2018)

### Robot Cars Are Coming

Sales of vehicles with radar have nearly quintupled in the past seven years

■ Estimated global sales of vehicles with radar sensors



Source: Bloomberg New Energy Finance, MarkLines

**Bloomberg**

Taulukosta voidaan nähdä, että viimeisen seitsemän vuoden aikana tutkasensoreiden käyttö ajoneuvoissa on nelinkertaistunut. Tämä tulee todennäköisesti kasvamaan tulevaisuudessa yhä edelleen.

Tutka-antennit ovat perinteisesti olleet heijastinantenneja, joiden toiminta perustuu haluttuun keilauskuvion toteutukseen toiminta-alueella. Nykyään ja tulevaisuudessa mekaaninen ohjaus vähenee, sillä uusissa tutkajärjestelmissä vaiheohjattavuus on yhä enemmän nykyaikaa, jolloin sekä elevaatio- että atsimuuttitaso on toteutettu elektronisen vaihesiirron avulla. (Kari ym. 2008: 87; Kosola & Solante 2013: 175-176)

Antennirakenteiden toimintaan ja kehitykseen tulee tulevaisuudessa vaikuttamaan myös adaptiivisesti toteutettava häiriönpoisto eli häirintään puuttuminen sekä erilaisiin välkkeisiin reagoiminen. Puolijohteiden käyttö mahdollistaa tutkan RF-rakenteen sekä antennin yhtenäisen rakenteen muodostuksen, joka pienentää myös signaalin lähetyksen ja vastaanoton siirtolinjahäviöitä. (Kari ym. 2008: 87)

Tulevaisuudessa häiveteknologian aikaansaama pienentyneen tutkakaikupinta-alan kehitys on yksi suurimpia tutkien kehitystä ohjaavia tekijöitä. Lisäksi erilaisten pienten, miehittämättömien ilmassa, maassa sekä vedessä liikkuvien alusten lisääntyvä määrä yhdessä häiveiden kanssa tekee tutkien toiminnasta tulevaisuudessa yhä haastavampaa, joka lisää myös tutkatekniikan kehitystä. Kehitystä ohjaa tulevaisuudessa myös tutkien runsas häirintä eli elektroninen sodankäynti. Häirinnän seurauksesta uudet tutkamallit sisältävät aina uusia menetelmiä häirintää vastaan, joka lisää tutkien kehitystä. (Kari ym. 2008: 85)

### **5.3 Häiveteknologian kehitys**

Nykyään ja tulevaisuudessa häivetekniikan menetelmät on alettu huomioida yhä enenevässä määrin kaikissa, erityisesti sotatekniikan materiaalin- ja varusteiden tuotannossa. Häivetekniikan suunnitteluohjelmat, kuten erityyppiset laskenta-, mallinnus- ja simulointiohjelmat tulevat kehittymään edelleen. (Kari ym. 472)

Hävittäjätekniikan kehitys tulee olemaan tulevaisuudessakin nopeaa. Tällä hetkellä esimerkiksi Venäjällä on julkisuuteen tulleiden tietojen mukaan kehitteillä on MiG-41-mallin, kuudennen sukupolven hävittäjä. MiG-yhtiön johtaja Ilja Tarasenko kertoo UK

Defence journal -lehden elokuussa 2017 julkaisemassa artikkelissa, että MiG-41-hävittäjällä on nopeammat moottorit, uudet aseet sekä laajempi operointialue ja kyky operoida avaruudesta. Lisäksi kyseisen hävittäjän ominaisuuksiin kuuluu myös kyky toimia ilman lentäjää. Tällainen hävittäjien kehitystaso olisi artikkelin mukaan mahdollista 2035-2040. (Allison 2017)

Erilaiset miehittämättömät, autonomiset liikkuvat alukset kehittyvät nopeasti. Esimerkiksi miehittämättömien ilma-alusten tekniikka on kehittynyt paljon viime vuosina ja yhdessä häiveominaisuuksien kanssa ne tarjoavat etuja verrattuna miehitettyihin ilma-aluksiin. Ne voidaan esimerkiksi mitoittaa kooltaan hyvin pieniksi, sillä miehistön kuljetus ei tuo muotoilurajoituksia. Näin ollen niiden avulla voidaan toteuttaa optimaalinen kompromissi aerodynamiikan ja tutkasignaalin vaikutus huomioiden. (Austin 2010: 117-118)

Tulevaisuudessa materiaalitekniikan kehitys tekee häiveteknisistä RAM-materiaaleista helpommin käytettäviä, edullisempia sekä kulutusta ja säätä kestäviä. Niiden suorituskyvyn ei odoteta paranevan, sillä ne ovat jo hyvin pitkälle tunnettuja sekä kehittyneitä ympäri maailmaa. Tutkavaimennusrakenteiden osuus häivetekniikassa sen sijaan kasvaa yhä suuremmaksi ja niiden avulla on mahdollisuus päästä VHF-taajuisten tutkasignaalien parempaan hallintaan. Elastomeerit ovat olleet viime vuosina laajalti tutkimusten kohteina. Tulevaisuudessa johtavien elastomeerien avulla on mahdollista toteuttaa hyvin vaikeasti tutkilla havaittavia laitteita. (Kari ym. 2008: 459)

Edistyneimmissä tekniikan sovelluksissa tulevaisuudessa esimerkiksi siipien ohjauspinnoista voidaan siirtyä käyttämään muotoutuvaa siipirakennetta, joka pienentää tutkakaikupintaa edelleen. Suurimmat häivetekniset odotukset ovat erityisesti erityyppisissä häiveteknisissä materiaaleissa, kuten johtavissa elastomeereissa ja pinnoitteissa sekä meta- ja sähkösäädettävissä materiaaleissa. Lisäksi uusien näyttötekniikoiden avulla on mahdollista toteuttaa elektro-optista naamiointia. (Kari ym. 2008: 473)

## 6 Johtopäätökset ja pohdinta

### 6.1 Kehitysnäkökulmia

Kehityksen myötä erilaiset tutkajärjestelmät siirtyvät hyödyntämään yhä enemmän useiden erilaisten sensoreiden yhteiskäyttöä esimerkiksi erilaisissa valvontajärjestelmissä. Yksittäisten sensoreiden käyttö vähenee ja sensori- sekä datafuusio ovat tulevaisuutta. Esimerkiksi yksittäisen tutkasensorin rinnalle otetaan käyttöön erilaisia lämpö-, laser-, näkyvän valon sekä optronisia sensoreita, mikä onkin jo nykypäivää.

Tulevaisuudessa autonomisten järjestelmien ja koneälyn kehitys mahdollistavat yhä älykkäämpien tutka- ja sensorijärjestelmien luomisen. Älyn ja autonomian avulla tutka-sensorijärjestelmä kykenee havaitsemaan kohteen, tunnistamaan, määrittämään etäisyyden sekä laukaisemaan ohjuksen. Laukaisun jälkeen järjestelmä tarkastaa, miten kohteen nopeus muuttui sekä esimerkiksi infrapunasensorin avulla määrittämään tarkan osumapisteen. Tällaisia ominaisuuksia on jo olemassa esimerkiksi seuraavan sukupolven hävittäjissä, joissa tosin toimintaa ohjaa edelleen ihminen.

Tehokkuus, erilaiset sensorit, etäohjaus ja äly ovat tulevaisuutta. Erilaisten tehokkaampien laitteiden, häiveominaisuuksien ja valvontajärjestelmien kehitys on jatkuvaa kilpajuoksua. Mallia kilpailevat osapuolet ottavat toisiltaan ja kilpailu lisää sekä nopeuttaa kehitystä edelleen. Sensori- ja datafuusioiden avulla sensori- ja tutkajärjestelmiin saadaan lisää tehokkuutta.

Intuitiivinen kyky oppia olisi tekijän näkemyksen mukaan tulevaisuuden tutka- ja sensorijärjestelmiä sisältäville koneille ja laitteille valtava kehitysaskel. Tutkahäirintäsovellusten ja häiveiden kehittyessä valvoville sensorijärjestelmille voitaisiin tulevaisuudessa opettaa uusimmat häirintämenetelmät koneälyn keinoin sekä lisäksi tunnistamaan erilaiset laitteet ja niiden häiveet heti. Lisäksi tutkille kyettäisiin opettamaan myös perinteiset maan, meren ja ilman aiheuttamat häiriötekijät eli välkkeet.

Koneälyn ja autonomian avulla kyetään kehittämään myös häiveteknisiä materiaaleja. Tekijän näkemyksen mukaan tulevaisuudessa materiaalijärjestelmille voitaisiin opettaa intuitiivisen koneälyn keinoin tunnistamaan tutkasignaali sekä muut havaitsemisyrietykset ja muuntamaan materiaalirakennetta sen perusteella. Metamateriaalien kehityksen myötä on puhuttu jopa kyvystä luoda näkymättömyysviitta ja sellaisia on kehitetty. Tekijän näkemyksen mukaan tulevaisuudessa ei todennäköisesti onnistuta luomaan valvovalle tutka- ja sensorijärjestelmälle täysin näkymätöntä kohdetta, sillä valvontajärjestelmät kilpailevat häiveteknologian kanssa ja toisen kehitys kehittää myös toista.

Jos esimerkiksi MiG-41 kykenee operoimaan avaruudesta pitkällä toimintasäteellä ilman pilottia, vaatii se myös tutkatekniikalta ja -järjestelmiltä lisää kehitystä. Toisaalta tällaiseen MiG-41 -malliseen mediauutisointiin sensori- ja häivetekniikan kehityksestä tulee suhtautua pienellä varauksella, sillä häivetekniikkaa ja erilaisia propagandamuotoja on mediassa tarjolla varsin runsaasti. Teknisten koneiden- ja laitteiden tutka- ja sensorijärjestelmien ominaisuuksista saatetaan antaa valheellista tietoa ja kykyjä liioitella. Lisäksi erityisesti sotatekniikassa sensori- ja tutkajärjestelmin toteutettavat valvontajärjestelmät sekä häiveteknologian uusimpia kehitysaskelaita pidetään hyvin tarkoin suojeltuna ja jopa valtion salaisuuksina.

## 6.2 Tulevaisuuden kehityksen haasteet

Toisaalta tekoäly ja autonomia tuovat myös uhkakuvia. Tekijöitä voivat olla esimerkiksi rikollisuus, terrorismi ja valtiolliset toimijat, jotka voivat luoda todellisia turvallisuushkia. Joukko tutkijoita muun muassa Yhdysvaltojen ja Iso-Britannian eri yliopistoista sekä eri turvallisuus- ja tulevaisuuskeskuksista ovat koostaneet helmikuussa 2018 julkaistun raportin tekoälyn ja autonomian uhkakuvista. Raportissa käydään läpi tekoälyn uhkakuvia, turvallisuuskysymyksiä sekä toimenpide-ehdotuksia ja arvioita. Raportin mukaan esimerkiksi kyberturvallisuus ja tietoverkkojen turvallisuus on erityisen tärkeää. (Future of Humanity Institute ym. 2018)

Kyberturvallisuus on vakava uhka tietoyhteiskunnassa. Esimerkiksi tutkakuvan ja sensoriverkkojen tiedonvälityksen kaappaaminen ja niiden käyttö käyttäjiä vastaan voisivat aiheuttaa hyvin vakavia onnettomuuksia. AAWA -projektin tapauksessa autonomisen laivan tietoverkon kaappaus voisi olla rikollisuudelle keino anastaa kuljetuslaivan materiaali, valtiolliselle toimijalle mahdollisuus ottaa haltuunsa arvokasta laitteistoa tai terroristeille mahdollisuus ajaa laiva kohti toista alusta.

Aina edes lainsäädäntö ei pysy tekniikan kehityksen mukana, sillä lakiprosessin läpivienti oikeusvaltiossa ei ole erityisen nopeaa. Malliesimerkki tästä on miehittämättömien ilma-aluksien pysäyttämiseen liittyvät haasteet rajanylityspaikoilla. Vaikka erilaiset valvontajärjestelmien tutkat havaitsisivat miehittämättömiä ilma-aluksia tai lennokkitoimintaa rajanylityspaikalla, siihen ei välttämättä saada lain puitteissa puuttua. Suomen turvallisuusviranomaisilta nimittäin puuttuu ajantasalla oleva ja kattava valtuus puuttua kyseiseen toimintaan, joita voivat toteuttaa esimerkiksi rikolliset, terroristit tai erilaiset valtiolliset toimijat. Rajavartiolakiin on tällä hetkellä valmisteltu säännös, joka oikeuttaisi rajavartiomiehen puuttumisen miehittämättömän ilma-aluksen ja lennokin kulkuun teknisin tai tarvittaessa voimakeinoin. Kirjoitushetkellä säännöstä on valmisteltu, mutta sitä ei ole vielä täytäntöönpantu. (Rajavartiolaitos 2017; Finlex 2018)

Robottien ja älyn kehitys osana autonomisia valvonta- ja sotajärjestelmiä on tuonut esille myös eettisyysnäkökulman. Onko autonomisesti toimivalla taistelualuksella oikeus tehdä päätös tuhota ihmisiä? Tällä hetkellä tulenavauspäätöksen tekee ihminen, mutta olemassa on jo esimerkiksi uusia vastatoimintajärjestelmiä, joiden tutkat ja muut sensorit tunnistavat niitä vastaan laukaistun ohjuksen ja käynnistävät vastatoimet automaattisesti.

Tulevaisuudessa lainsäädännön haasteet teknisten laitteiden kehityksen vuoksi tulevat kirjoittajan näkemyksen mukaan olemaan haaste päättäjille kasvavissa määrin. Vaikka suojaus- ja tuhoamisjärjestelmät kehittyvät tulevaisuudessa edelleen, kirjoittajan

näkemyksen mukaan tulenavaus- ja tuhoamispäätöksen tekee hyvin pitkään tulevaisuudessakin ihminen. Omasuojajärjestelmiä pidetään yleisesti eettisesti hyväksyttävänä, sillä niissä tutka- ja sensorijärjestelmät reagoivat hyökkävään viholliseen ja reagointi on nopeampaa ja tehokkaampaa kuin yksittäisen valvomossa istuvan henkilön.

## **YHTEENVETO**

Työn aiheena on sensorijärjestelmät ja yksittäisistä sensoreista perehtyminen erityisesti tutkasensorin toimintaan sekä tutkakuvan häirintään häiveteknisin keinoin. Yksittäisen sensorin toiminnan perusajatus on fysikaalisen suuren mittaus sekä tulkinta. Sensoreita ja niiltä saatavia tietoja yhdistelemällä saadaan muodostettua sensorifuusio, jonka avulla havaintotiedosta saadaan luotettavampaa. Kun yhdistetään sensorifuusio, tilanne- sekä uhka-arviot, saadaan aikaan datafuusio. Datafuusiossa laite käyttää omia sensoreitaan aktiivisesti, yhdistää tietoa ja tekee omia ratkaisujaan saatavan tiedon perusteella.

Tutka on tärkeimpiä ilma- ja meriliikenteen valvontavälineitä sekä osa monenlaisia sensorijärjestelmiä. Tutkasensorin toiminta perustuu sähkömagneettisen säteilyn heijastumiseen ja vastaanottamiseen 250 MHz - 100 GHz taajuusalueella, jonka perusteella saadaan määritettyä kohteen paikkatiedot. Tutkia voidaan jaotella useiden eri periaattein. Mono-, bi- ja multistaattiset tutkat on jaettu vastaanottimien sijoituspaikkoihin perustuen. Ensiö- ja toisiotutkajako puolestaan perustuu niiden lähettämään kaikupulssiin. Mekaaniset-, elektroniset sekä hybriditutkat on jaettu antennin ohjaukseen perustuen sekä kaikupulssin perusteella toteutettu jako pulssitutkiin ja kantoaaltoja lähettäviin CW-tutkiin.

Erityyppisiä tutkanäyttöjä kehitetty useanlaisia eri käyttötarkoituksiin. Valvontatutkille, ilmatorjunnassa käytetyille tutkille sekä lentokoneille on omanlaisensa, tehtäväkuvaan soveltuvat näyttötyypit. Nykyaikaisissa järjestelmissä vastaanottimen tieto on lähes poikkeuksetta jo prosessoitua.



Häivetekniikalla pyritään mahdollisimman pieneen kohteen havaitsemistodennäköisyyteen. Tutkakaikupinnalla kuvataan kohteena olevan kappaleen näkymää tutkassa sensoreiden toiminta-alueella ja se muodostuu geometrisen poikkipinnan, pinnan suuntaavuuden ja sekä kohdepinnan heijastuskertoimen tuloista. Häivetekniikan keinoja pienen tutkakaikupinnan aikaansaamiseksi ovat muotoilu sekä erilaiset absorptiomateriaalit. Muotoilun peruseriaate on suurten sileiden pintojen avulla muodostettu mahdollisimman pieni tutkakaikupinta-ala. Absorptiomateriaaleilla, joita ovat erilaiset komposiitit, keraamit, elastomeerit, maalit sekä johtavat pinnoitteet, pienennetään heijastuvan signaalin energiamäärää. Vastahäivetekniikan avulla pyritään etsimään ratkaisuja paremman tutkakuvan aikaansaamiseksi häivetekniikkaa vastaan.

Tutkien käyttö tulee tulevaisuudessa olemaan edelleen merkittävässä osassa eri teknisiä laitteita ja sovelluksia sekä käyttötarkoitukset varsin laaja. Uusissa tutkajärjestelmissä antennien vaiheohjattavuus on yhä enemmän nykyaikaa. Puolijohteiden avulla tutkan RF-rakenteesta saadaan yhä tehokkaampia. Myös adaptiivinen häiriönpoisto tulee lisääntymään. Tulevaisuudessa tutkasensoreiden käyttö tulee esimerkiksi autoteollisuudessa lisääntymään merkittävästi, kun autoteollisuus pyrkii kehittämään autonomisia sensorijärjestelmiä.

Häiveteknisten materiaalien osalta suurimmat häivetekniset odotukset ovat erityisesti erityyppisissä häiveteknisissä materiaaleissa, kuten johtavissa elastomeereissa ja pinnoitteissa sekä meta- ja sähkösäädettävissä materiaaleissa. Lisäksi uusien näyttötekniikoiden avulla on mahdollista toteuttaa elektro-optista naamiointia.

Tällä hetkellä tekniikan kehitys on erityisen nopeaa. Geopoliittisen epävarmuuden myötä hävittäjäteknologia ja erityyppiset miehittämättömät alukset kehittyvät nopeasti. Tämä lisää osaltaan sensorijärjestelmien ja autonomisten tekniikoiden kehitystä, sillä valvontajärjestelmiä pyritään kehittämään häivetekniikan ja häirintälaitteiden kehityksen mukana. Eri lähteiden mukaan nykyajan koneille ja laitteille on mahdollista rakentaa intuitiivinen oppimiskyky. Vuodesta 2018 ennustetaan tulevan nopean koneälyn kehityksen vuosi. Kyky oppia olisi tulevaisuuden tutka- ja sensorijärjestelmiä

sisältäville koneille ja laitteille valtava kehitysaskel, jolloin esimerkiksi tutkasensorille olisi mahdollista opettaa uusimmat häirintämenetelmät.

Tutkielman loppujohtopäätöksensä voidaan todeta, että tulevaisuuden tutka-, sensori-, sekä laitejärjestelmiä ohjaa yhä enemmän sensorifuusio eli erilaisten sensoreiden havaitseman tiedon yhdistäminen, älykkäät ja autonomiset ratkaisut sekä intuitiivinen oppimiskyky. Nopea autonomian ja koneälyn kehitys tuovat myös haasteita, joita ovat tietojenvaihdon turvallisuus sekä lainsäädännön ja etiikan haasteet. Kyberturvallisuus on olennaisessa osassa pidettäessä yllä tulevaisuuden tutka-, sensori- ja laitejärjestelmien tietojenvaihtoturvallisuutta.

Tekniikan tutkimuksen haaste on sen jatkuva kehittyminen ja tulevaisuuden arviointi. Kehityksen tämän hetken tason ja tulevaisuuden arvioinnin haasteena erilaisten tutka-, sensori- sekä häiveteknologisten järjestelmien osalta voidaan pitää tuoreimpien teknisten ominaisuuksien saannin heikkoutta. Geopoliittisesta näkökulmasta uusinta teknologiaa saatetaan esimerkiksi valvonta- ja häivelaitteistojen osalta pitää jopa valtiosalaisuuksina.

Työn haasteita olivat aihealueen laajuus ja rajaaminen, sillä erilaisia tutkasovelluksia ja sensorijärjestelmiä on tekniikassa valtavasti. Tutkimusta voisi jatkaa esimerkiksi perehtymällä tarkemmin tutkien ilmaisuteorioihin sekä esimerkiksi muihin sähkömagneettisen spektrin sensoreihin ja niiden käyttöön osana sensorijärjestelmiä. Lisäksi mekatronisissa ja koneteknisissä laitteistoissa miehittämättömien järjestelmien sensori- sekä häiveteknologian taso on kehittynyt viime vuosina paljon ja hyvä jatkotutkimuksen aihe.

## LÄHDELUETTELO

Austin, R. (2010) Unmanned aircraft systems: UAVS design, development and deployment. Chichester: Wiley

Allison G. (2017) Russia claims new Mach 4+ MiG-41 interceptor will be able to operate in space. UK Defence journal 8/2017.  
[https://ukdefencejournal.org.uk/russia-claims-new-mig-41-interceptor-will-able-operate-space/?utm\\_source=fark&utm\\_medium=website&utm\\_content=link&ICID=ref\\_fark](https://ukdefencejournal.org.uk/russia-claims-new-mig-41-interceptor-will-able-operate-space/?utm_source=fark&utm_medium=website&utm_content=link&ICID=ref_fark)  
[14.2.2018]

Antti Saurama (2016) Mediatiedotteet, Merenkulku automatisoituu - Turun Yliopiston tutkimus vauhdittaa globaalia murrosta. Turun Yliopisto 4/2016.  
<https://www.utu.fi/fi/Ajankohtaista/mediatiedotteet/Sivut/Merenkulku-autonomisoituu-Turun-yliopiston-tutkimus-vauhdittaa-globaalia-murrosta-.aspx> [13.2.2018]

Blencowe A. (2018) YLE. Uutiset, Miltä näyttää tiedevuosi 2018? Tekoäly ja koneoppiminen kehittyvät vauhdilla - "Koneet oppivat intuitiivista ajattelua ja oppimista" YLE 2/2018.  
<https://yle.fi/uutiset/3-10060550> [27.2.2018]

Bloomberg L.P. (2018) Bloomberg New Energy Finance, Marklines.  
<https://www.bloomberg.com/news/articles/2018-02-02/there-s-never-been-more-money-pouring-into-mobility-startups> [22.2.2018]

Chediak M. (2018) There's Never Been More Money Pouring Into Mobility Startups  
Bloomberg L.P. 2/2018.  
[https://www.bloomberg.com/news/articles/2018-02-02/there-s-never-been-more-money-pouring-into-mobility-startups?cmpid=socialflow-twitter-business&utm\\_content=busin](https://www.bloomberg.com/news/articles/2018-02-02/there-s-never-been-more-money-pouring-into-mobility-startups?cmpid=socialflow-twitter-business&utm_content=busin)

[ess&utm\\_campaign=socialflow-organic&utm\\_source=twitter&utm\\_medium=social](#)  
[22.2.2018]

Finlex (2018) Hallituksen esitykset, HE 201/2017  
<https://www.finlex.fi/fi/esitykset/he/2017/20170201>[24.2.2018]

Future of Humanity Institute, University of Oxford, Centre for the Study of Existential Risk, University of Cambridge, Center for a New American Security, Electronic Frontier Foundation, OpenAI (2018) The Malicious Use of Artificial Intelligence: Forecasting, Prevention, and Mitigation.  
[https://img1.wsimg.com/blobby/go/3d82daa4-97fe-4096-9c6b-376b92c619de/download/s/1c6q2kc4v\\_50335.pdf](https://img1.wsimg.com/blobby/go/3d82daa4-97fe-4096-9c6b-376b92c619de/download/s/1c6q2kc4v_50335.pdf) [25.2.2018]

Hyvönen M (2016) Tulevaisuuden autonomiset laivat. Tampereen teknillinen Yliopisto 11/2016.  
[http://www.tut.fi/cs/groups/public\\_news/@1102/@news/@p/documents/liit/x171684.pdf](http://www.tut.fi/cs/groups/public_news/@1102/@news/@p/documents/liit/x171684.pdf)  
f [13.2.2018]

Kari M., Hakala A., Pääkkönen E., Pitkänen M. (2008) Sotatekninen arvio ja ennuste 2025: Osa 1, Teknologian kehitys. Ylöjärvi: Puolustusvoimien teknillinen tutkimuskeskus.

Klemola O. & Lehto A. (1998) Tutkatekniikka. Otatieto Oy, Helsinki

Kosola, J. & Solante (2013), T. Digitaalinen taistelukenttä – informaatioajan sotakoneen tekniikka. 3. painos. Maanpuolustuskorkeakoulu, Sotatekniikan laitos. Helsinki: Edita Prima Oy. saatavilla verkossa:  
<http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/94298/DigTstK%203.%20painos%20verkkoversio.pdf?sequence=2&isAllowed=y> [1.3.2018]

Laurinen M. (2016) Remote and autonomous ships the next steps, Technology. Rolls-Royce Plc 2016.

<http://www.rolls-royce.com/~media/Files/R/Rolls-Royce/documents/customers/marine/ship-intel/aawa-whitepaper-210616.pdf> [12.2.2018]

Liimatainen P. (2005) Oppitunnit Radiotekniikka, Tutkatekniikka <http://www.ee.oulu.fi/~kk/atsp/tutoriaalit/Liimatainen.pdf> [11.2.2018]

Loell, M. A. (2003) The U.S. Combat aircraft industry, 1909-2000: structure, competition, innovation. RAND Corporation, Santa Monica

Meikle H. (2008) Modern Radar Systems. 2. painos. Boston: Artech House, Inc

Northrop Grumman (2018), Capabilities, AN/APG-81 radar

<http://www.northropgrumman.com/Capabilities/ANAPG81AESARadar/Pages/default.aspx> [27.2.2018]

Northrop Grumman (2018), Newsroom, AN/APG-81 radar

[http://www.northropgrumman.com/MediaResources/Pages/Photo.aspx?pid%3DAN-10137\\_001%26rel%3D%2F%26name%3DPhotos](http://www.northropgrumman.com/MediaResources/Pages/Photo.aspx?pid%3DAN-10137_001%26rel%3D%2F%26name%3DPhotos) [27.2.2018]

Rajavartiolaitos (2017). Tietoa, tiedotteet, Drone luvatta Venäjältä Suomeen

[https://www.raja.fi/tietoa/tiedotteet/1/0/drone\\_luvatta\\_venajalta\\_suomeen\\_74709](https://www.raja.fi/tietoa/tiedotteet/1/0/drone_luvatta_venajalta_suomeen_74709) [24.2.2018]

Rolls-Royce Plc (2016) Press photos, Ship intelligence.

<https://www.flickr.com/photos/rolls-royceplc/25762431952/in/album-72157647334399764/> [21.2.2018]

Viestintävirasto (2018), Taajuudet, Radiotaajuudet, Taajuusjakotaulukko

<https://www.viestintavirasto.fi/taajuudet/radiotaajuuksienkaytto/taajuusjakotaulukko.html> [27.2.2018]