

Jori Rintakangas

OHJELMISTOTUTKAN SOVELLUKSET AUTOISSA

Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta
Kandidaatintyö
Huhtikuu 2022

TIIVISTELMÄ

Jori Rintakangas: Ohjelmistotutkan sovellukset autoissa
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Tieto- ja sähkötekniikan kandidaattiohjelma
Huhtikuu 2022

Tutkateknologia on kehittynyt viime vuosina, kun elektroniikan valmistusmenetelmät ovat parantuneet sekä laskentateho kasvanut. Erityisesti taajuusmoduloidut kantaalotutkat (engl. Frequency Modulated Continuous Wave) ovat edullisuutensa ja pienen koonsa vuoksi löytäneet tiensä useisiin kaupallisiin sovelluksiin. Esimerkiksi ajoneuvotutkien markkinat ovat kasvussa ja niistä onkin tullut suurin siviilikäytössä oleva tutkateknologian sovelluskohde. Tämän työn tavoitteena oli selvittää, miten ajoneuvotutkalla voidaan tunnistaa jalankulkija.

Uudet lait ja säädökset ovat velvoittaneet uusien ajoneuvojen olevan varustettu tietyillä aktiivisilla ajoavustimilla ja turvajärjestelmillä. Tämä on johtanut siihen, että autonvalmistajat ovat alkaneet kehittää ja lisäämään ympäristöä havainnoivia sensoreita ajoneuvoihin. Uusiin autoihin on asennettu esimerkiksi kameroita, ultraäänisensoreita sekä tutkia. Tutkat ovat nousseet erityiseen suosioon, sillä tutka tuottaa välittömiä nopeus- ja etäisyysmittauksia kohteista sää- ja valaistusolosuhteista riippumatta. Ajoneuvotutkien määrän yhä lisääntyessä niiden suunnittelussa joudutaan ottamaan enenevästi huomioon se, miten tutkat pysyvät toimintakykyisinä erityisesti kaupunkiympäristöissä, joissa useiden ajoneuvojen tutkat alkavat aiheuttamaan häiriötä toisiinsa.

Ajoneuvotutkien on kyettävä luotettavasti havaitsemaan tiellä liikkuva jalankulkija, jotta esimerkiksi automaattinen hätäjarrutusjärjestelmä voisi estää kohtalokkaan törmäyksen. Jalankulkijan pienempi tutkapoikkipinta-ala esimerkiksi toisiin ajoneuvoihin verrattuna sekä ihmisen vaateuksesta johtuva huonompi tutkasignaalien heijastuminen vaikeuttavat kuitenkin havaitsemista. Lisäksi esimerkiksi itseajavien autojen on pystyttävä myös tunnistamaan havaittu kohde jalankulkijaksi. Havaitsemista ja tunnistamista voidaan parantaa hyödyntämällä ihmisen raajojen liikkeestä aiheutuvia ylimääräisiä Doppler-taajuuksien vaihteluita eli mikro-Doppleria.

Tämän työn mittauksissa käytettiin juuri mikro-Doppler ilmiötä apuna, kun pyrittiin tunnistamaan jalankulkija tutkadatasta. Mittausdatasta muodostettiin aika-taajuusanalyysin avulla kohteiden liikemalleja. Mittausten keskeinen päätelmä oli, että liikkeestä, joka ei ole tutkan säteilykuvion suuntaista, on haastavaa tuottaa tarkkoja liikemalleja. Todettiin, että jotta ajoneuvotutka kykenisi kohteiden havainnointiin ja tunnistamiseen mikro-Doppler ilmiötä hyödyntämällä, edellyttää se tutkalta korkeaa mittausresoluutiota sekä laajaa keilanleveyttä.

Avainsanat: tutka, FMCW, radar, automotive radar, micro-Doppler, ajoneuvotutka, ajoavustin

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. TEORIA	2
2.1 Pulssitutka	3
2.2 Taajuusmoduloitu kanta-aaltotutka	4
3. TUTKASOVELLUKSET AUTOISSA	7
3.1 Tutka ajoavustimena	8
3.2 Tutkatyypit	9
3.3 Tutkateknologian käytön haasteet	10
4. MITTAUKSET	13
4.1 Laitteisto ja mittausympäristö	13
4.2 Mittaukset ohjelmistotutkalla	15
4.3 Tulosten analysointi ja johtopäätökset	20
5. YHTEENVETO	22
LÄHTEET	23

LYHENTEET JA MERKINNÄT

ACC	adaptiivinen vakionopeudensäädin (adaptive cruise control)
ADAS	kuljettajaa avustavat järjestelmät (advanced driver assistance systems)
AEB	automaattinen hätäjarrutus (automatic emergency braking)
BSD	sokean kulman havainnointi (blind spot detection)
CFAR	vakio virrehälytystaso (constant false alarm rate)
Euro NCAP	Euroopan uusien autojen turvallisuutta arvioiva ohjelma (European new car assessment programme)
FMCW	taajuusmoduloitu kantaalto (frequency modulated continuous wave)
LIDAR	valotutka (light detection and ranging)
LRR	pitkän kantaman tutka (long range radar)
MRR	keskipitkän kantaman tutka (medium range radar)
RF	radiotaajuus (radio frequency)
SAR	synteettisen apertuurin tutka (synthetic aperture radar)
SNR	signaali-kohinasuhde (signal-to-noise ratio)
SRR	lyhyen kantaman tutka (short range radar)
STFT	lyhyen ajan Fourier-muunnos (short-time Fourier transform)
B	kaistanleveys
c	valonnopeus
F	kohinaluku
F_m	modulaation kaistanleveys
f_D	Doppler-taajuus
f_p	pulssintoistotaajuus
Δf	signaalien välinen taajuusero
G_r	vastaanottoantennin vahvistus
G_t	lähetysantennin vahvistus
k	Bolzmännin vakio
L_s	järjestelmän kokonaissignaalihäviö
λ	aallonpituus
P_n	lämpökohinan teho
P_r	vastaanottoteho
P_t	lähetysteho

R	kohteen ja antennin välinen etäisyys
R_{un}	suurin yksiselitteisesti mitattavissa oleva etäisyys
ΔR	etäisyysresoluutio
σ	tutkapaikkipinta-ala
T_0	normaalilämpötila
T_m	modulaatiojakson kesto
Δt	signaalien välinen aikaero
τ	pulssin kesto
θ	kohteen nopeuden ja tutkan säteilykuvion välinen kulma
v_r	kohteen säteisnopeus

1. JOHDANTO

Laskentatehon kasvu ja elektroniikan kehittyminen ovat tuoneet tutkateknologian yhä lähemmäs ihmisten jokapäiväistä elämää. Ensimmäiset tutkat kehitettiin sodankäyntiin. Ne olivat suurikokoisia, eikä niitä välttämättä kyetty liikuttamaan. Nykyään tutkateknologiaa hyödynnetään monille tutussa poliisin nopeustutkassa, liikeseensoreissa sekä erityisesti autoissa, joihin asennettavien tutkien markkinat ovat suuressa kasvussa.

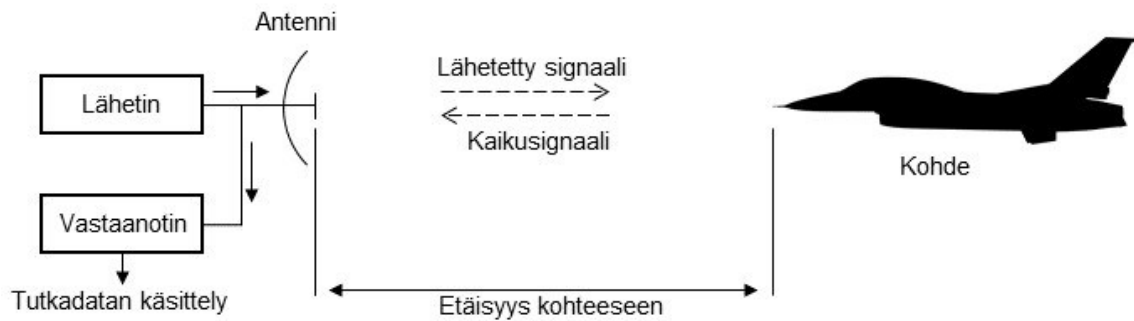
Ajoneuvojen yhä tiukkenevat turvallisuusvaatimukset ovat ajaneet autonvalmistajat kehittämään ja lisäämään ajoavustimia, ja tutkatekniikka on monessa tapauksessa osoittautunut luotettavaksi teknologiaksi. Esimerkiksi keliolosuhteiden lievät vaikutukset tutkan toimintaan ovat tehneet siitä houkuttelevan vaihtoehdon ajoneuvojen turvallisuuskriittisille järjestelmille. Nykypäivän autossa voi olla useita tutkia, joiden tehtävänä on havainnoida auton ulkopuolista ympäristöä ja ilmoittaa auton ympärillä olevista esteistä.

Siinä missä perinteinen ilmavalvontatutka havainnoi jatkuvasti samaa aluetta, joutuvat ajoneuvoihin liitettävät tutkat operoimaan hyvinkin erilaisissa ympäristöissä. Ajoneuvo-tutkien on kyettävä toimimaan vaihtelevissa olosuhteissa ja nopeuksissa niin tiheässä kaupunkiympäristössä kuin myös maantieajossa. Erityisen tärkeää on, että jalankulkijat pystytään luotettavasti havaitsemaan joka tilanteessa. Havaitseminen saattaa olla kuitenkin haastavaa johtuen ihmisen pienestä tutkapoikkipinta-alasta sekä huonosta tutkasignaalien heijastumisesta.

Tämän työn luvussa 2 käydään läpi teoreettisesti tutkan toimintaa ja perehdytään erityisesti eri lähetystapaa käyttävien tutkien ominaisuuksiin. Luvussa 3 tutustutaan ajoneuvojen ajoavustimiin. Erityisesti käydään läpi, miten tutkateknologiaa hyödynnetään ajoneuvoissa ja tutustutaan niiden historiaan, tulevaisuudennäkymiin sekä haasteisiin. Työn tavoitteena on selvittää mittausten avulla, miten tutkadatasta voidaan tunnistaa jalankulkija. Mittausjärjestelyt, tulokset ja johtopäätökset käydään läpi luvussa neljä. Lopuksi luvussa viisi tehdään yhteenveto työn tuloksista.

2. TEORIA

Tutka on mittalaite, jonka toiminta perustuu sähkömagneettisten aaltojen hyödyntämiseen. Tutkan antenni lähettää sähkömagneettista säteilyä radioaaltojen spektrialueella, joka osuessaan esineisiin tai muihin kohteisiin kimpoaa takaisin kohti tutkaa. Tutkan antenni vastaanottaa tämän kaikusignaalin, (*engl. echo signal*) ja kun lähetetyn ja vastaanotetun signaalin välinen aikaero mitataan, saadaan laskettua etäisyys tutkan ja kohteen välillä. Kuvassa 2.1 on esitetty periaatekuva tutkan toiminnasta.



Kuva 2.1 Periaatekuva tutkan toiminnasta. Perustuu lähteeseen [1]

Tutka kykenee tutkatyypistä riippuen mittaamaan etäisyyden lisäksi myös kohteen nopeuden, suunnan, koon sekä muodon. Tutkan kyky suorittaa näitä mittauksia riippuu viime kädessä siitä, miten voimakkaan signaalin tutka vastaanottaa ja mikä on häiriösignaalien osuus vastaanotetussa signaalissa. Tutkan vastaanottaman signaalin teho P_r saadaan kaavalla

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4}, \quad (2.1)$$

jossa P_t on tutkan lähetysteho, G_t ja G_r lähetys- ja vastaanottoantennien vahvistukset, λ tutkan lähettämän signaalin aallonpituus, σ kohteen tutkapoikkipinta-ala ja R etäisyys tutkan ja kohteen välillä. Kaavaa 2.1 kutsutaan tutkayhtälöksi. [2, s. 64] Tutkayhtälö edellä esitellyssä muodossa ei ota huomioon kohinan, signaalin vaimenemisen sekä häiriösignaalien vaikutuksia. Vaikka tutkayhtälö kuvaakin ideaalista tapausta, niin se toimii tärkeänä apuvälineenä tutkien suunnittelussa ja antaa hyvän yleiskuvan tutkan toimintaan ja tehokkuuteen vaikuttavista tekijöistä. [1, s. 5].

Kohinaa aiheutuu pääasiassa tutkan vastaanottimen elektroniikkapiireissä syntyvästä lämpökohinasta. Kun vastaanotetun signaalin teho jaetaan lämpökohinan teholla, saadaan signaali-kohinasuhde (*engl. Signal-to-Noise-Ratio, SNR*). Lämpökohinan teho P_n saadaan kaavalla

$$P_n = kT_0FB, \quad (2.2)$$

jossa k on Boltzmannin vakio, T_0 normaalilämpötila, F vastaanottimen kohinaluku ja B vastaanottimen hetkellinen kaistanleveys. Tällöin SNR saa muodon

$$SNR = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4 k T_0 F B}. \quad (2.3)$$

Tutkasignaaliin aiheutuu häviöitä esimerkiksi tutkan komponenteista, johtimista ja tutkassa tapahtuvasta signaalinkäsittelystä. Lisäksi signaali vaimenee kulkiessaan ilmassa. Kun häviöt huomioidaan, niin SNR saa muodon

$$SNR = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4 k T_0 F B L_s}, \quad (2.4)$$

jossa L_s on järjestelmän kokonaissignaalihäviö. [2, s. 65–68]

Kohinan ja häviöiden lisäksi täytyy huomioida myös häiriösignaalien vaikutus. Kohinan itsessään voidaan ajatella olevan häiriösignaali, mutta häiriösignaaleiksi luetaan usein erityisesti tutkan ulkopuolisten laitteiden ja järjestelmien lähettämä sähkömagneettinen säteily, joka päätyy tutkan vastaanottimeen. Näitä ulkopuolisia laitteita ovat esimerkiksi matkapuhelinverkkojen tukiasemat, televisio- ja radiomastot sekä muut tutkat. Eräs hyvin merkittävä häiriösignaalin lähde on tutkavälke (*engl. radar clutter*). Tutkavälkkeellä tarkoitetaan tutkan vastaanottamia kaikusignaaleita muista kohteista kuin kohteesta, joka halutaan havaita. Tutkavälke on hyvin ongelmallista, sillä sen voimakkuus riippuu hyvin paljon tutkan parametreista. [2, 165–167].

Kuten edellä todettiin, erityyppiset tutkat kykenevät erilaisiin mittauksiin. Jaottelu eri tyyppisiin voidaan tehdä monella eri tavalla, esimerkiksi lähetystavan mukaan. Käytännössä tutkat lähettävät joko lyhyitä pulssisignaaleja tai jatkuva-aikaista aaltomuotoa. Seuraavaksi tarkastellaan näiden eri lähetystapaa käyttävien tutkien toimintaa.

2.1 Pulssitutka

Pulssitutkan (*engl. pulse radar*) tapauksessa etäisyys R kohteeseen saadaan kaavalla

$$R = \frac{c\Delta t}{2}, \quad (2.5)$$

jossa Δt on lähetetyn ja vastaanotetun signaalin välinen aikaero ja c valonnopeus. Jotta etäisyydenmittaus olisi yksiselitteinen, ei pulssintoistotaajuus saa olla liian suuri. Mikäli tutka lähettää uuden pulssin ennen kuin se on vastaanottanut edellisen pulssin kaiun, tulkitsee se kaiun olevan juuri lähetetyn uuden pulssin aiheuttama. Tämä saa aikaan vääristyneen aikaeron ja siten vääristyneen etäisyydsmittauksen. Tästä syystä tutkalle määritellään suurin yksiselitteinen etäisyys R_{un} , joka lasketaan kaavalla

$$R_{un} = \frac{c}{2f_p}, \quad (2.6)$$

jossa f_p on pulssintoistotaajuus. R_{un} kertoo siis suurimman matkan, jonka tutkasta edennyt signaali pystyy etenemään tuottaen vielä yksikäsitteisen etäisyydsmittauksen. [1, 2–3] Lähetetyn pulssin pituus on suoraan verrannollinen tutkan kykyyn erotella kohteita toisistaan eli tutkan etäisyysresoluutioon. Etäisyysresoluutio ΔR voidaan laskea kaavalla

$$\Delta R = \frac{c\tau}{2}, \quad (2.7)$$

jossa τ on pulssin pituus [2, s. 29]. Tutkan erottelukyvyn kannalta on siis suotuisaa, että pulssien pituus on mahdollisimman lyhyt, mutta toisaalta lyhyt pulssin pituus aiheuttaa ongelmia kohteen nopeuden määrittämisessä. Yleisesti nopeuden määrittämisessä käytetään hyödyksi Doppler-ilmiötä. Doppler-ilmiön mukaisesti aaltolähteen nopeus vaikuttaa siitä lähtevän aaltoliikkeen taajuuteen. Jos siis tutkasignaali kimpoaa liikkeessä olevasta kohteesta, niin lähetetyn ja vastaanotetun signaalin välisestä taajuuden muutoksesta voidaan määrittää kohteen nopeus. Taajuuden muutos f_D saadaan kaavalla

$$f_D = \frac{2v_r}{\lambda}, \quad (2.8)$$

jossa λ on tutkan käyttämä aallonpituus ja v_r kohteen säteisnopeus. Mikäli kohde ei liiku suoraan tutkaan päin, niin säteisnopeus $v_r = v \cos \theta$, jossa v on kohteen nopeus ja θ kohteen nopeuden ja tutkan säteilykuvion välinen kulma. [1, s. 105] Lyhyt pulssin pituus vaikeuttaa kuitenkin tätä taajuuden muutoksen mittausta. Lisäksi lyhyt pulssi ei aina sisällä tarpeeksi energiaa, mikä vaikeuttaa kohteiden havaitsemista. Pulssikompressio (*engl. pulse compression*) on eräs tapa, jolla voidaan saavuttaa sekä hyvä erottelukyky että tarpeeksi energiaa pulssiin. [2, s. 30]

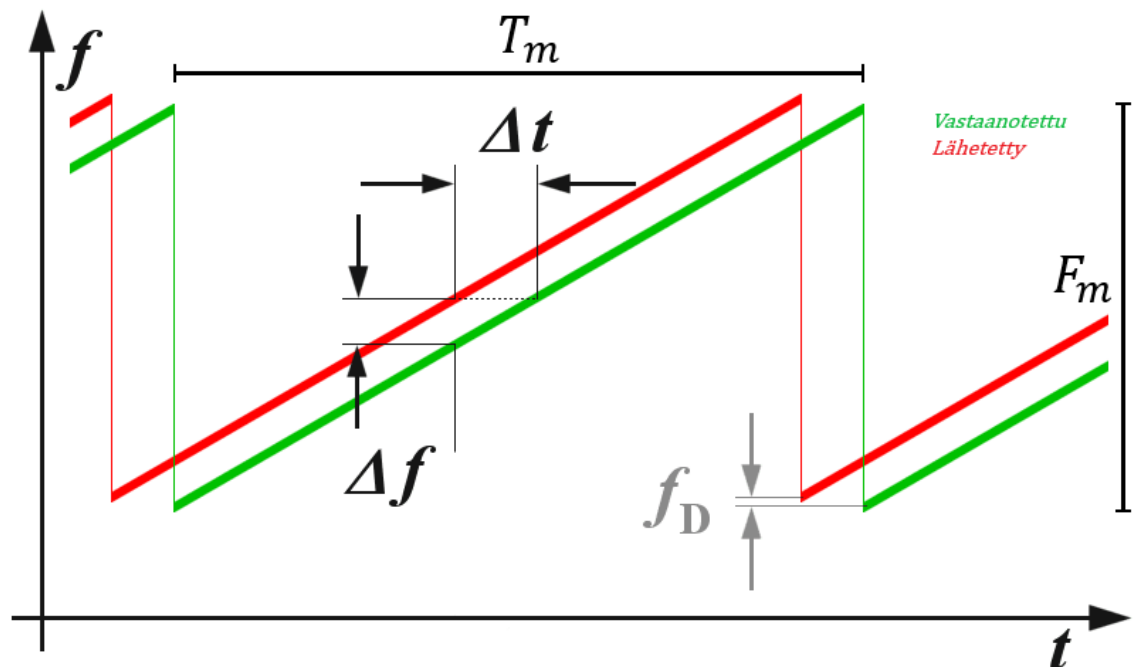
2.2 Taajuusmoduloitu kantoaaltotutka

Jatkuva-aikaista aaltomuotoa lähettävän tutkan tapauksessa vältetään nopeuden mittauksen ongelmista, jotka esiintyvät pulssitutkan kanssa. Normaalin kantoaaltotutkan haittapuolena on kuitenkin se, että etäisyyttä kohteeseen ei saada mitattua. Siitä huolimatta

ne tarjoavat yksinkertaisen ja halvan tekniikan sovelluksiin, joissa etäisyystiedolle ei ole tarvetta. Esimerkiksi nopeustutka ja erilaiset liikesensorit hyödyntävät kanta-aaltotutkan teknologiaa [3].

Lähetettävän tutkasignaalin ominaisuuksia muokkaamalla on kuitenkin mahdollista saada myös etäisyystieto kohteeseen. Yksi tapa on käyttää taajuusmodulaatiota, jolloin puhutaan taajuusmoduloidusta kanta-aaltotutkasta (*engl. Frequency Modulated Continuous Wave, FMCW*). Taajuusmodulaation avulla tutkasignaaliin saadaan liitettyä ominaisuuksia ajan mittausta varten ja täten etäisyyden laskeminen on mahdollista. FMCW-tutka on halpa, yksinkertainen, ja se tarjoaa hyvän etäisyysresoluution. Tästä syystä se soveltuu hyvin käytettäväksi erilaisissa kaupallisissa sovelluksissa, jotka vaativat edullista ja pieneen tilaan mahtuvaa tutkateknologiaa. [4, s. 17–18]

Taajuusmodulaatio tarkoittaa yksinkertaisuudessaan sitä, että aallon taajuutta muutetaan moduloivan aallon vaihteluiden mukaisesti. Moduloivia aaltomuotoja on olemassa monia erilaisia, ja eräs FMCW-tutkissa yleisesti käytetty muoto on saha-aalto (*engl. sawtooth waveform*). Saha-aallossa taajuus nousee lineaarisesti haluttuun maksimiarvoon ja sen jälkeen tippuu takaisin aloitustaajuudelle. Lineaarista taajuuden nousua kutsutaan usein taajuuspyyhkäisyksi (*engl. frequency sweep*). Kuvassa 2.2 on esitetty FMCW-tutkan lähettämän ja vastaanottaman tutkasignaalin taajuus.



Kuva 2.2 Saha-aallot ja niistä luettavat ominaisuudet. Muokattu lähteestä [3]

Kuvasta 2.2 saadaan yhdenmuotoisten kolmioiden ominaisuuksien avulla suhde

$$\frac{\Delta t}{T_m} = \frac{\Delta f}{F_m}, \quad (2.9)$$

jossa Δt on lähetetyn ja vastaanotetun signaalin välinen aikaero, Δf signaalien välinen taajuusero, T_m modulaatiojakson kesto ja F_m modulaation kaistanleveys. Kun edellä saatu kaava yhdistetään kaavan 2.5 kanssa, saadaan kohteen etäisyydeksi

$$R = \frac{cT_m\Delta f}{2F_m}. \quad (2.10)$$

Kuvassa 2.2 näkyy myös Doppler-ilmiön aiheuttama taajuuden muutos f_D . Mikäli kohteella on siis liikettä, vaikuttaa signaalien väliseen taajuuseroon myös f_D . Tällöin yhtälön 2.10 mukaisesti liikkeessä olevalle kohteelle etäisyydmittaus antaisi väärän tuloksen. Tämä ongelma voidaan ratkaista käyttämällä saha-aallon sijaan kolmioaaltoa. Kolmioaalto on kuin saha-aalto, mutta saavutettuaan maksimiarvon se laskee lineaarisesti takaisin aloitustaajuudelle sen sijaan, että se laskisi sinne välittömästi. Kolmioaallossa on siis sekä nousu- että laskuosa, joista voidaan mitata taajuuden muutokset $\Delta f_{up} = -\Delta f + f_D$ ja $\Delta f_{down} = \Delta f + f_D$. Tällöin saadaan etäisyydeksi

$$R = \frac{cT_m(\Delta f_{down} - \Delta f_{up})}{8F_m} \quad (2.11)$$

ja hyödyntämällä kaavaa 2.8 kohteen nopeudeksi

$$v_r = \frac{-\lambda(\Delta f_{down} + \Delta f_{up})}{4}. \quad (2.12)$$

Kolmioaaltoa käyttämällä saadaan siis kaksi yhtälöä, joiden avulla kaksi tuntematonta, etäisyys ja nopeus, pystytään ratkaisemaan. [4, s. 28]

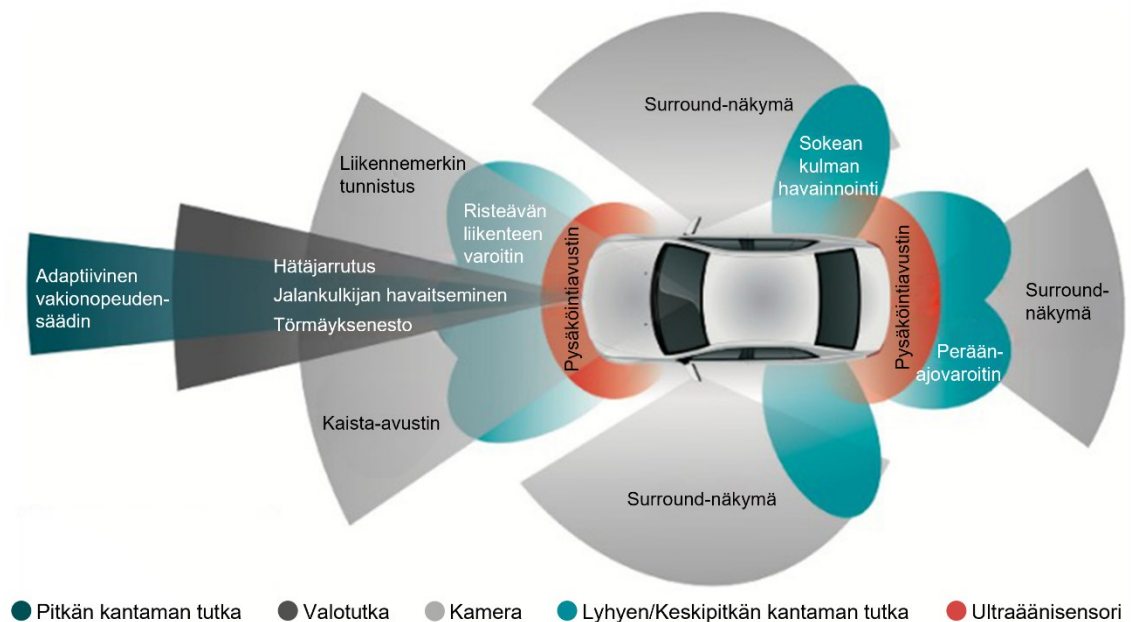
Kuten edellä mainittiin, FMCW-tutkalla on hyvä erottelukyky eli etäisyysresoluutio. Etäisyysresoluutio saadaan kaavalla

$$\Delta R = \frac{c}{2F_m}. \quad (2.13)$$

Tämän lisäksi se tarjoaa myös korkean resoluution etäisyysprofiilin (*engl. high resolution range profile*), joka mahdollistaa FMCW-teknologian käytön kuvantavissa tutkissa (*engl. Synthetic Aperture Radar, SAR*). [4, s. 44]

3. TUTKASOVELLUKSET AUTOISSA

Nykypäivän autoista löytyy monia erilaisia kuljettajaa avustavia järjestelmiä (engl. *Advanced Driving Assistance Systems, ADAS*), jotka helpottavat ajamista sekä suojaavat auton sisä- ja ulkopuolella olevia henkilöitä. Monet näistä teknologioista havainnoivat auton ulkopuolista ympäristöä ja keräävät siitä dataa sensorien avulla. Tyypillisesti nämä sensorit jaetaan neljään eri luokkaan: kamerat, valotutkat (engl. *LIDAR, Light Detection And Ranging*), ultraäänisensorit sekä radioaaltoalueella toimivat tutkat. Näistä sensoreista jokaisella on omat etunsa ja haittansa toisiinsa nähden ja yleensä autosta löytyy kahta tai useampaa teknologiaa. Kuvassa 3.1 on esitetty yleisimpiä auton ajoavustimia.



Kuva 3.1 Ajoavustimia ja niissä sovellettuja teknologioita. Muokattu lähteestä [5]

Lisäksi mainittakoon, että sensortechnologiaa hyödynnetään myös ajoneuvon sisällä. Esimerkiksi kuljettajan vireystilan tarkkailussa sekä eleohjattujen hallintalaitteiden käytössä. Tutkien sekä muiden ajoavustimiin sovellettavissa olevien teknologioiden määrä ajoneuvoissa tulee yhä nousemaan tulevaisuudessa. Esimerkiksi Euroopan unionissa on säädetty tiettyjen turvallisuusteknologioiden pakollisuudesta uusissa autoissa vuodesta 2022 alkaen [6].

3.1 Tutka ajoavustimena

Tutkateknologian hyödyntämistä autoissa tutkittiin ensimmäisen kerran 1960–1970-luvuilla [7]. Tutkateknologian nähtiin silloin olevan sovellettavissa esimerkiksi adaptiiviseen vakionopeudensäätimeen (*engl. Adaptive Cruise Control, ACC*), sokean kulman havainnointiin (*engl. Blind Spot Detection, BSD*) ja automaattiseen hätäjarrutukseen (*engl. Automatic Emergency Braking, AEB*) [8]. Kuten kuvassa 3.1 on esitetty, nämä avustimet ovat yleisesti käytössä nykypäivän autoissa.

Aluksi tutkat toimivat noin 10 GHz ja 16 GHz taajuusalueilla. Teknologian sekä signaalinkäsittelypiirien kehittymisen myötä alettiin ensisijaisesti käyttämään 24 GHz ISM-taajuusalueita ja lisäksi 76–77 GHz taajuuskaista luokiteltiin maailmanlaajuisesti ajoneuvotutkien (*engl. automotive radar*) käyttöön. Ensimmäinen 24 GHz kaupallinen tutka oli VORAD:n valmistama ja sitä käytettiin Yhdysvalloissa raskaan kaluston ajoneuvoissa. Mercedes-Benz otti käyttöönsä henkilöautossa ensimmäisen 76 GHz tutkan vuosina 1998–1999. [7]

Erityisesti tutkien käyttö autoissa on lisääntynyt vuodesta 2010 alkaen kun teknologian kehittyminen on mahdollistanut massatuotannon kautta hintojen laskun ja siten tutkat ovat tulleet saataville myös alemman hintaluokan autoihin [7]. Lisäksi Euroopan uusien autojen turvallisuutta arvioiva ohjelma (*engl. European New Car Assessment Programme, Euro NCAP*) alkoi vuonna 2015 vaatimaan aktiivisten turvallisuusjärjestelmien käyttöä uusissa autoissa [9]. Tällä hetkellä ajoneuvotutkat ovat nopeimmin kasvava siviilikäytössä oleva tutkateknologian sovellus [10].

Tutka tarjoaa kuvassa 3.1 esitettyihin muihin sensoriteknologioihin verrattuna monia etuja. Tutka toimii hyvin vaihtelevissa sääolosuhteissa ja valaistuksissa sekä tarjoaa välittömiä ja tarkkoja etäisyysmittauksia. Lisäksi teknologian kehittymisen kautta ne ovat edullisia ja mahtuvat pieneen tilaan, mikä on tärkeä ominaisuus käyttökohteen ollessa auto. Tutka voidaan asentaa myös optisesti läpinäkymättömän osan taakse, mikä edelleen tekee siitä houkuttelevan vaihtoehdon ajoneuvojen parissa. [10–11]

Kameran etuja ovat suhteellisen halpa hinta, pieni koko sekä pieni virrankulutus. Kameran käytössä ongelmaksi muodostuu kuitenkin se, että se toimii huonosti vaihtelevissa sääolosuhteissa ja valaistuksissa. Valotutka mahdollistaa etäisyyksien mittaamisen hyvin korkealla resoluutiolla, mutta ne ovat kuitenkin kalliita, painavia ja virrankulutukseltaan suuria. Lisäksi niiden suorituskykyä rajoittavat kameran tapaan huonot sää- ja valaistusolosuhteet. Ultraäänisensorit ovat edullisia mutta niiden käyttöä rajoittaa lyhyt kantama, joten niitä käytetään usein vain auton lähiympäristön havainnointiin kuten kuvassa 3.1 on esitetty. [10–13]

3.2 Tutkatyypit

Ajoneuvotutkat voidaan tyypillisesti jakaa kolmeen luokkaan: SRR-tutkat (*engl. Short Range Radar*), MRR-tutkat (*engl. Medium Range Radar*) ja LRR-tutkat (*engl. Long Range Radar*) [14]. Taulukossa 3.1 on esitetty näiden tutkien tyypillisiä teknisiä parametreja sekä käyttökohteita.

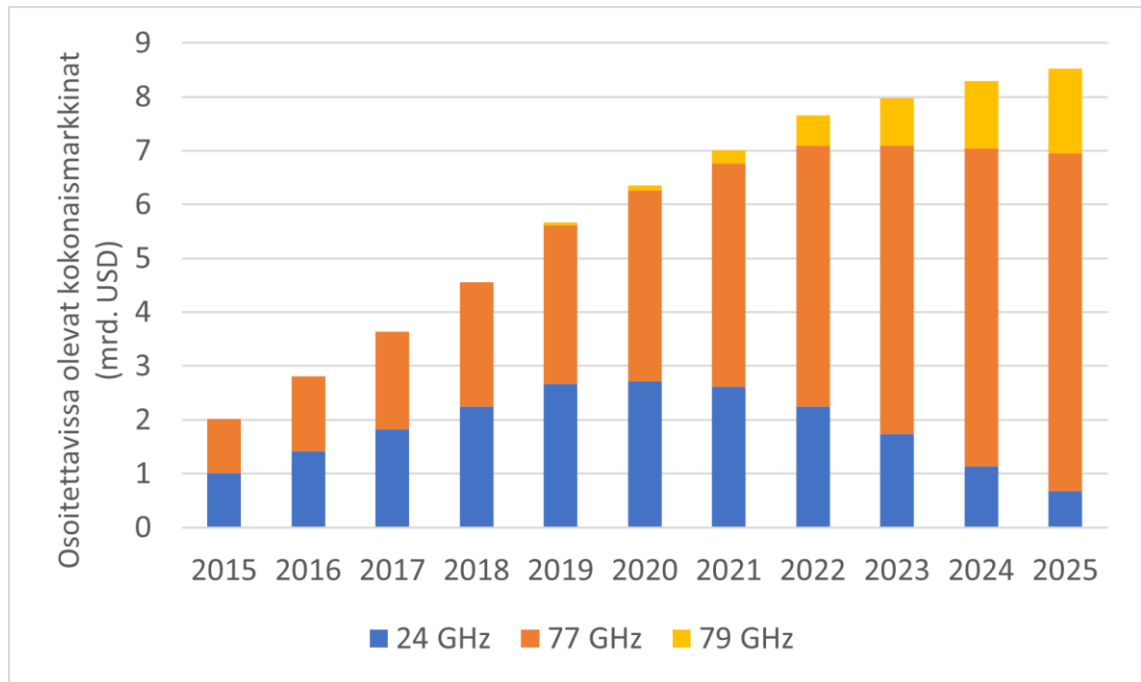
Taulukko 3.1 Ajoneuvotutkien ominaisuuksia. Muokattu lähteestä [14]

Tutkatyyppi	SRR	MRR	LRR
Etäisyysmittaus	0,15–30 m	1–100 m	10–250 m
Keilanleveys (horisontaali)	±80°	±40°	±15°
Keilanleveys (elevaatio)	±10°	±5°	±5°
Käyttökohde	Esteiden havaitseminen	Sokean kulman havainnointi	Adaptiivinen vakionopeudensäädin

Kuten taulukosta 3.1 nähdään, niin LRR-tutka tarjoaa kapean keilan ja kykenee havaitsemaan kohteita pidemmillä etäisyyksillä. Tällöin sitä voidaan käyttää adaptiivisen vakionopeudensäätimen käytössä, jonka toiminnan kannalta on tarpeellista havaita muita autoja tai kohteita satojen metrien päässä. Lyhyemmän kantaman SRR- ja MRR-tutkat tarjoavat laajemman keilanleveyden, mikä on tarpeellista sillä auton lähiympäristössä kohteet voivat sijaita tietasoon nähden laajalla korkeusalueella.

Kuten edellä todettiin, ajoneuvotutkat ovat pääsääntöisesti käyttäneet 24 GHz:n tai 77 GHz:n taajuuksia. 77 GHz:n tutkat ovat kuitenkin syrjäyttämässä 24 GHz:n tutkat tulevaisuudessa kuten kuvassa 3.2 on esitetty. Kuvasta nähdään myös, että 79 GHz:n taajuusalueella toimivien tutkien markkinaosuus tulee kasvamaan. Tämän lisäksi tutkimuksia yhä korkeampien taajuuksien käytöstä on tehty [15–16].

Yleisesti ottaen ajoneuvotutkat käyttävät FMCW-teknologiaa. FMCW-tutkien etuna on, niillä pystytään mittaamaan sekä nopeus että etäisyys korkealla resoluutiolla. FMCW-teknologian toteuttaminen voidaan myös tehdä vain muutamia elektroniikkakomponentteja käyttämällä [17]. Lisäksi lineaarisen taajuusmodulaation käytöstä johtuen näytteenottotaajuuden ei tarvitse olla suuri, jolloin myös vähemmän tehokkaiden signaaliprosessorien ja mikrokontrollereiden käyttö on mahdollista [17].



Kuva 3.2 Ajoneuvotutkien markkinaosuudet ja -ennusteet. Perustuu lähteeseen [18]

24 GHz tutkien etuna ovat edullisuus, pieni virrankulutus ja tekninen yksinkertaisuus 77 GHz:n tutkiin verrattuna. Lisäksi niiden asentaminen ajoneuvoon ei vaadi yhtä suuria sijoittelukriteerejä, sillä 24 GHz:n aalto vaimenee ja taituu vähemmän, mikäli se kulkee auton muoviosien, kuten kojelaudan läpi. 77 GHz:n tutka on tekniikaltaan haastavampi toteuttaa, sillä taajuuden noustessa aktiivisten elektroniikkakomponenttien suorituskyky alkaa laskemaan. 77 GHz:n tutka on kuitenkin pienikokoisempi, sillä korkeammalla taajuudella saadaan aikaan haluttu keilanleveys pienemmällä antennilla. Lisäksi sillä saavutetaan parempi kulmaresoluutio sekä helpompi Doppler-taajuuksien erottelu. Puoli-johde- ja piirilevyteknologian kehittymisen myötä 77 GHz:n tutkien tuotantokustannukset ovat myös pienentyneet. [14, 19]

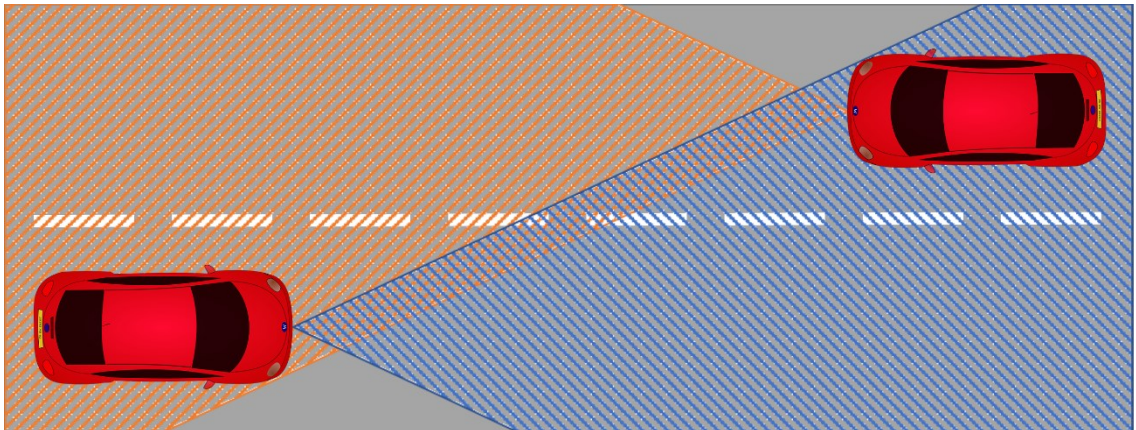
3.3 Tutkateknologian käytön haasteet

Kun tutka asennetaan ajoneuvoon, aiheuttaa se erilaisia haasteita ja ongelmia tutkan toiminnalle. Luvussa 2 mainittiin tutkavälkkeen olevan yksi ongelmallinen häiriösignaalin lähde. Ajoneuvon tapauksessa sen ongelmallisuus korostuu, sillä kaikki ajoneuvon edessä olevat esteet ovat mahdollisia kohteita, sen sijaan että etsittäisiin jotain yksittäistä tiettyä kohdetta, kuten esimerkiksi ilmavalvontatutkan tapauksessa. Tutkan keilanleveys elevaatiotasossa on oltava tarpeeksi suuri, jotta auton läheisyydessä olevat esteet voidaan havaita. Suuren keilanleveyden myötä liikkuvan ajoneuvon tutka vastaanottaa kui-

tenkin häiritsevää Doppler-levinnyttä tutkavälkettä, joka on peräisin tiestä. Samaan tapaan horisontaalitasen keilat vastaanottavat Doppler-levinnyttä tutkavälkettä tien sivussa olevista kohteista. Kaukana ajoneuvon edessä olevasta kohteesta peräisin olevan kaikusignaalin erottaminen tutkavälkkeestä on siten hyvin haasteellista. [10, 12]

Haasteita aiheuttaa myös ajoneuvon ympäristön suuri vaihtelu. Ympäristönä voi olla esimerkiksi kaupunkialue, maaseutu tai valtatie. Jokaisessa ympäristössä on eri kokoisia ja eri nopeudella liikkuvia kohteita, joita tutkan tulee kyetä havaitsemaan. Tutkan käyttämän aaltomuodon parametrien valinta on haasteellista, jotta sekä hitaasti liikkuvien jalankulkijoiden että nopeasti liikkuvien autojen havaitseminen on mahdollista. Jotta eri kokoisten sekä eri etäisyydellä olevien kohteiden yhtäaikainen havaitseminen on mahdollista, vaaditaan tutkalta myös laajaa dynamiikka-aluetta (*engl. dynamic range*). [10]

Ajoneuvotutkien yhä lisääntyessä suureksi ongelmaksi nousee se, että tutkasignaalit alkavat häiritä toisiaan. Ajoneuvojen tutkat altistuvat tutkasignaalihäiriölle kolmella tavalla: itsehäiriön kautta, ajoneuvon muiden tutkien kautta sekä toisten ajoneuvojen tutkien kautta. Itsehäiriö johtuu ajoneuvon pinnasta heijastuvista kaikusignaaleista. Erityisesti tiheässä liikenneympäristössä autojen väliset tutkasignaalien häiriöt korostuvat. [10]



Kuva 3.3 Autojen tutkasignaalien kohtaaminen. Perustuu lähteeseen [20]

Kuvassa 3.3 on esitetty yksinkertainen tilanne, jossa autojen keulaan sijoitettujen tutkien lähettämät signaalit päätyvät vastaanotettavaksi toisen auton tutkaan. On huomattava, että häiriön aiheuttaminen ei vaadi välttämättä näköyhteyttä tutkien välillä, sillä häiriösignaali voi päätyä tutkan vastaanottimeen myös heijastuttuaan esimerkiksi muista ympäristössä olevista kohteista.

Koska häiriösignaalit aiheuttavat suuria ongelmia tutkan toiminnan kannalta, lukuisia eri tekniikoita on kehitelty häiriöiden vaikutuksien minimoimiseksi. Esimerkiksi Euroopan Unionin MOSARIM-projekti (*engl. MOre Safety for All by Radar Interference Mitigation*) oli vuosina 2010–2012 toteutettu laaja tutkimus, jossa tutkittiin ajoneuvotutkien välisiä

häiriöitä sekä määriteltiin ja kehitettiin erilaisia tekniikoita häiriöiden vähentämiseksi [21]. Taulukossa 3.2 on esitetty järjestyksessä viisi parasta MOSARIM-projektissa tutkittua häiriönpoistotekniikkaa.

Taulukko 3.2 MOSARIM-projektin häiriönpoistotekniikat. Muokattu lähteestä [21]

Häiriöiden poistamistekniikka	Häiriön vaimennus
CFAR eli vakio virrehälytystaso -algoritmi (engl. <i>Constant False Alarm Rate</i>)	n. 10–20 dB
Häiriön havaitseminen ja lähetystaajuuden muuttaminen	Mahdollista poistaa häiriön vaikutus kokonaan
Satunnaisen pituisten taukojen pitäminen lähetysspulssien välillä	n. 3 dB
Taajuuskaistojen ennalta määrätty erottelu ajosuunnan mukaan	Mahdollista poistaa häiriön vaikutus kokonaan
Häiriön havaitseminen ja korjaus aikatasossa vastaanottimessa	n. 20 dB asti

Kuten taulukosta 3.2 ilmenee, osa tekniikoista pyrkii välttämään häiriöitä ja osa havaitsemaan ja sitten korjaamaan häiriön aiheuttamat virheet. Luonnollisesti häiriön välttäminen on suotuisampi vaihtoehto, sillä häiriöiden havaitseminen ja korjaaminen vaatii lisää laskentatehoa. Koneoppimismenetelmien kehittymisen kautta niiden soveltuvuutta on myös tutkittu ajoneuvotutkien häiriönpoistotekniikoiksi ja häiriöiden luokitteluun [22–23].

4. MITTAUKSET

Edellisessä luvussa käytiin läpi eri sensortechnologioiden vahvuuksia ja heikkouksia. Tutkan todettiin kykenevän havaitsemaan kohteen myös huonossa valaistuksessa ja keliolosuhteissa. Kuitenkin esimerkiksi itseajavien autojen tulee pystyä pelkän havaitsemisen lisäksi myös tunnistamaan havaittu kohde. Tutkan yksi heikkous onkin esimerkiksi kameraan verrattuna se, että tutkadatasta kohteen tunnistaminen on paljon vaikeampaa, kuin visuaalisesta kuvasta.

Eräs tapa pyrkiä tunnistamaan kohteita tutkadatasta on hyödyntää mikro-Doppler (*engl. Micro-Doppler*) ilmiötä. Tutkan havaitsemat kohteet sisältävät usein osia, jotka aiheuttavat jaksollista liikettä tai pyörivät. Nämä niin sanotut mikroliikkeet aiheuttavat ylimääräisiä Doppler-taajuuksia ja niitä kutsutaan mikro-Doppleriksi. Tutkataan voi aiheutua mikro-Doppleria esimerkiksi helikopterin pyörivästä roottorista tai ihmisen raajojen liikkeestä.

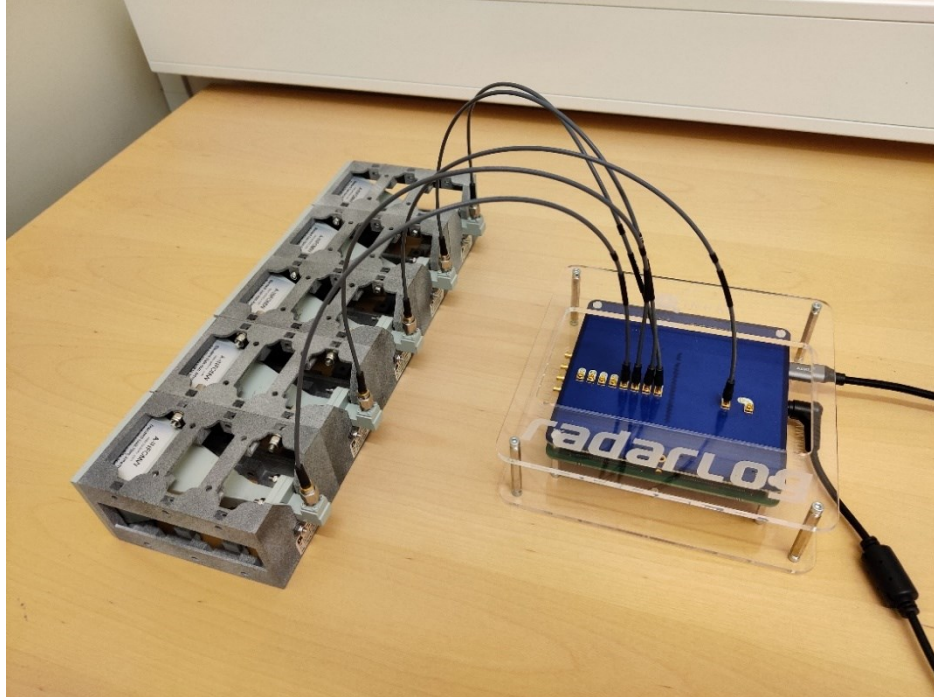
Tämän työn mittauksen tavoitteena oli tunnistaa jalankulkija tutkadatasta. Ajoneuvotutkan kyky tunnistaa jalankulkija luotettavasti on äärimmäisen tärkeää, jotta voidaan välttää jalankulkijalle usein kohtalokas törmäys. Jalankulkijan tunnistamista vaikeuttaa se, että ihminen aiheuttaa pienemmän tutkapoikkipinta-alan kuin esimerkiksi toinen ajoneuvo ja lisäksi ihmisen vaatetus ei usein heijasta tutkasignaaleita parhaalla mahdollisella tavalla. Tästä syystä mittauksissa keskityttiin edellä mainitun mikro-Doppler ilmiön analysointiin. Mittauksissa tutkittiin tilanteita, joissa tutkaa kohti ja sen ohi kävellään ja juostaan. Lisäksi simuloitiin ajoneuvon liikettä tutkan ohi ja tutkaa kohti. Tarkoituksena oli kuvata tilanteita, joita ajoneuvon keulaan asennettu tutka kohtaa liikenteessä.

4.1 Laitteisto ja mittausympäristö

Mittauksissa käytettiin INRAS GmbH:n Radarlog-tutkalaitteistoa. Radarlog on suunniteltu reaaliaikaiseen useita vastaanotto- ja lähetyskanavia sisältävän kantoaaltojutkajärjestelmän operointiin. Laitteiston suorittimena toimii Arria V FPGA -prosessori, joka soveltuu hyvin reaaliaikaiseen signaalinkäsittelyyn. Laitteistossa on kaksi AFE5801 analogia-digitaalimuunninta, jotka sisältävät tarvittavat signaalinmuokkauspiirit (*engl. signal conditioning*) vastaanotetuille signaaleille, jolloin kantoaaltojutkien signaalien suora käsittely on mahdollista. Radarlog-laitteisto liitetään USB 3.0 väylällä tietokoneeseen konfigurointia ja datan siirtoa varten. [24]

Radarlog-laitteistoon voidaan liittää erilaisia RF-etupäitä (*engl. Radio Frequency*). Tässä työssä käytetty RDL-24G-TX2RX8 RF-etupää on myös INRAS GmbH:n valmistama.

RDL-24G-TX2RX8 toimii 24 GHz:n alueella ja tukee kahta lähetys- ja kahdeksaa vastaanottoantennia. Radioetupää lähettää FMCW-signaalia ja signaalin parametrit voidaan konfiguroida Radarlogin kautta. [25] Tässä työssä käytettiin yhtä lähetys- ja neljää vastaanottoantennia. Antennit ja tutkalaitteisto kokonaisuudessaan on esitetty kuvassa 4.1.



Kuva 4.1 Mittauslaitteisto

Radarlogiin on tarjolla MATLAB-rajapinta, jonka avulla laitteiston ja siihen liitetyn radioetupään konfigurointi ja ohjaus toteutettiin. Rajapinnan avulla Radarlogista saadulle tutkadatalle voidaan tehdä tarvittavaa signaalinkäsittelyä ja toteuttaa visualisointeja.



Kuva 4.2 Soppiheijastin

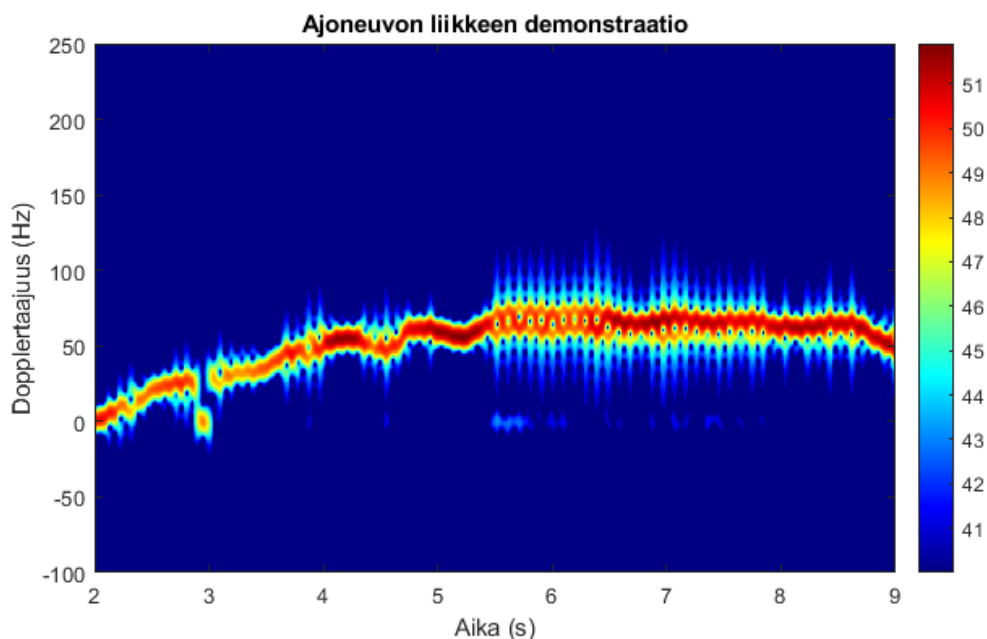
Mittauksissa käytettiin apuna kuvan 4.2 mukaista soppiheijastinta. Soppiheijastimen muodon vuoksi se heijastaa hyvin tutkan lähettämää signaalia takaisin, luoden vahvan kaikusignaalin. Tällöin mittauksia on helpompi tehdä, kun kohde erottuu tutkadatasta paremmin.

4.2 Mittaukset ohjelmistotutkalla

Mittaukset jakoutuivat kahteen vaiheeseen: Tutkan säteilykuvion suuntaisen liikkeen mittauksiin sekä säteilykuviota vastaan kohtisuoran liikkeen mittauksiin. Molemmissa vaiheissa tehtiin kolme mittausta. Koska mittausten tarkoituksena oli havainnollistaa mikro-Doppler ilmiötä, muodostettiin tutkadatasta aika-taajuus esitys käyttäen lyhyen ajan Fourier-muunnosta (*engl. Short-Time Fourier Transform, STFT*).

Mittauksissa tutka konfiguroitiin lähettämään 100 kehystä, joista jokainen sisälsi 64 taajuuspyyhkäisyä. Jokaisesta pyyhkäisystä otettiin 256 näytettä. Taajuuspyyhkäisyjen kesto oli $512 \mu\text{s}$ ja pyyhkäisyjen väli 1 ms. Taajuuspyyhkäisyksen kaistanleveydeksi määritettiin 0,6 GHz keskitaajuuden ollessa 24 GHz.

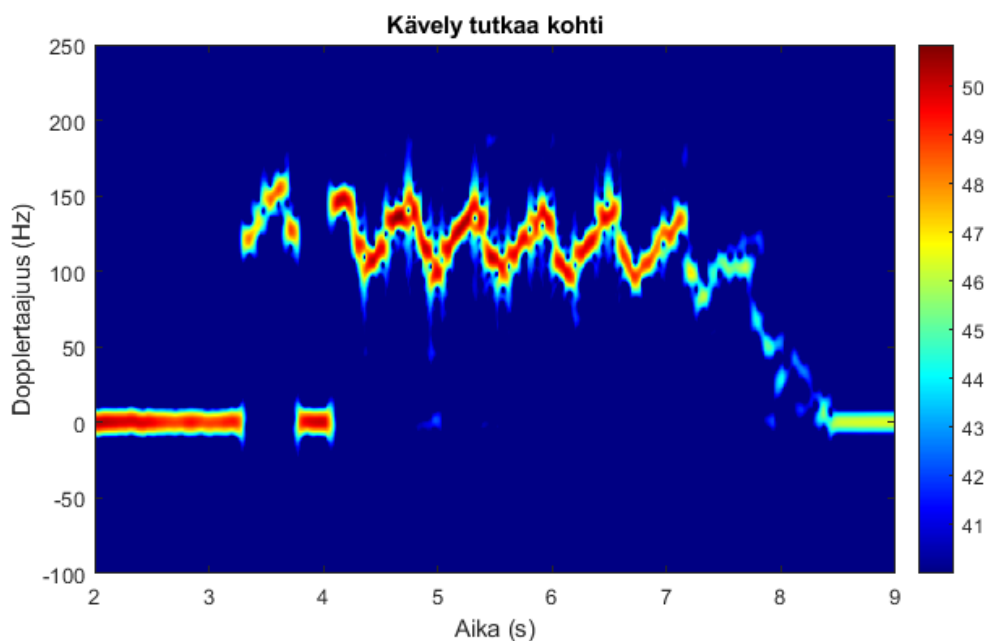
Ensimmäisen vaiheen ensimmäisessä mittauksessa soppiheijastin asetettiin pyörillä olevalle toimistotuolille ja tuolia liikutettiin tasaisella nopeudella kohti tutkaa. Tämän mittauksen tarkoituksena oli demonstroida ajoneuvon tasaisesta liikkeestä aiheutuvaa Dopplertaajuutta ja toimia siten vertailukohtana muille mittauksille. Mittauksen STFT on esitetty kuvassa 4.3.



Kuva 4.3 Ajoneuvon lähestymisen STFT

Kuvasta 4.3 nähdään, että liike alkaa noin kahden sekunnin kohdalla ja liikkeestä aiheutuva Doppler-taajuus pysyy alkukiihdytyksen jälkeen likimain vakiona arvossa 60 Hz. Todellisen ajoneuvon tapauksessa Doppler-taajuus olisi ajoneuvon suuremman nopeuden vuoksi usein paljon suurempi. Esimerkiksi ajoneuvon tyypillinen taajamanopeus 45 km/h olisi aiheuttanut mittauksessa kaavan 2.8 mukaisesti 2000 Hz:n Doppler-taajuuden. Nyt mitattu 60 Hz:n Doppler-taajuus aiheutuu liikkeestä, jonka nopeus on edelleen kaavan 2.8 mukaisesti 0,38 m/s.

Ensimmäisen vaiheen toisessa mittauksessa tutkaa kohti käveltiin rauhallisesti tasaisella nopeudella pitäen soppiheijastinta kädessä. Soppiheijastimen annettiin liikkua käden luonnollisen liikkeen mukana. Mittauksen STFT on esitetty kuvassa 4.4.



Kuva 4.4 Lähestyvän kävelijän STFT

Kuvasta 4.4 nähdään, että kävely alkaa noin 3,3 sekunnin kohdalla ja päättyy noin 8,4 sekunnin kohdalla. Nyt nähdään selkeä muutos Doppler-taajuuksien rakenteessa verrattuna edelliseen mittaukseen. Kuvasta nähdään, että kävelijän liike aiheuttaa Doppler-taajuuksia noin 130 Hz:n tasolle. Doppler-taajuus ei kuitenkaan pysy vakiona 130 Hz:n arvossa, vaan on havaittavissa selkeitä taajuuden vaihteluita 100–160 Hz:n välillä. Kävelijän liike tutkaa kohti aiheuttaa 130 Hz:n Doppler-taajuuden ja taajuuden vaihtelut ovat peräisin kävelijän käden liikkeestä. Kaavaa 2.8 käyttämällä saadaan kävelijän nopeudeksi laskettua 0.81 m/s, joka vastaa rauhallista kävelynopeutta.

Kävelijän liike voidaan todeta myös tekemällä kahden riippumattoman otoksen t-testi. Kuvassa 4.4 esitetystä tutkadatasta otetaan näytteet A_1 väliltä 2–3 sekuntia ja A_2 väliltä

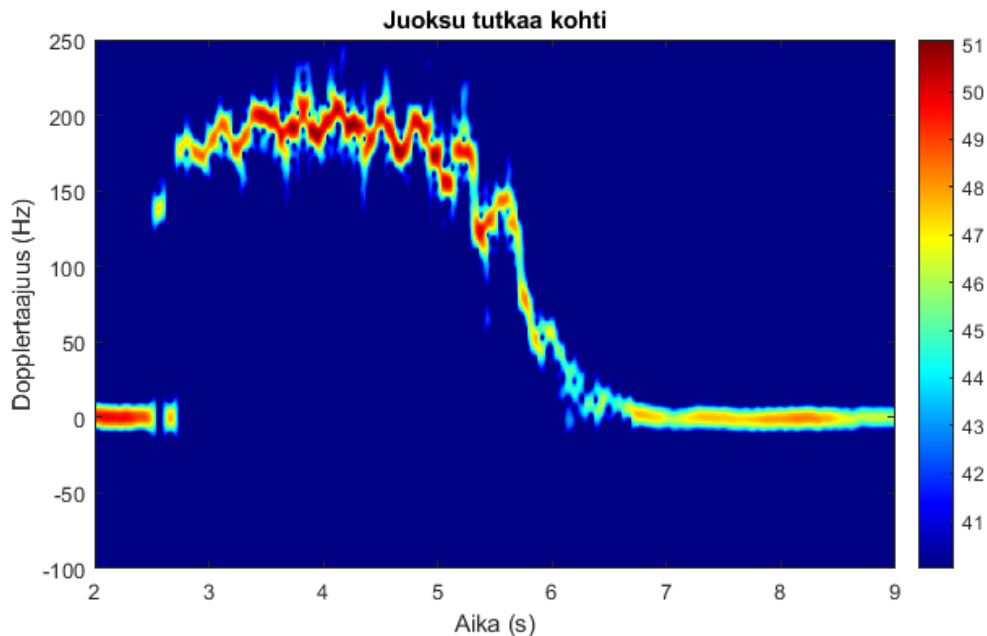
5–6 sekuntia. Taulukossa 4.1 on esitetty otosten tilastolliset suureet. T-testin nollahypoteesina on, että otoksien keskiarvot ovat yhtä suuret ja vaihtoehtoisena hypoteesina se, että keskiarvot ovat erisuuret.

Taulukko 4.1 Otokset ja niistä lasketut suureet

Joukko	Joukon koko	Keskiarvo	Varianssi
A_1	332	0,12	0,080
A_2	332	121,51	139,70

T-testin laskemisessa voidaan käyttää apuna Matlabia, jolla saadaan testisuureen arvoksi -187,08 ja vapausasteeksi 331,38 sekä merkitsevyydestasolla 0,05 p-arvoksi nolla. Koska p-arvo on pienempi kuin merkitsevyydestaso, voidaan nollahypoteesi hylätä. Toisin sanoen voidaan päätellä, että otoksien A_1 ja A_2 keskiarvot eroavat merkittävästi toisistaan ja todeta, että havaittu kohde liikkuu.

Ensimmäisen vaiheen kolmannessa mittauksessa tutkaa kohti hölkättiin rauhallisesti tassisella nopeudella pitäen jälleen soppiheijastinta kädessä ja antaen sen liikkua käden luonnollisen liikkeen mukana. Mittauksen STFT on esitetty kuvassa 4.5.



Kuva 4.5 Lähestyvän juoksijan STFT

Kuvasta 4.5 nähdään, että juoksu alkaa noin 2,5 sekunnin kohdalla ja päättyy noin 6,7 sekunnin kohdalla. Nyt havaitaan, että juoksijan nopeampi liike kävelijään verrattuna on

aiheuttanut Doppler-taajuuksien tason siirtymisen noin 200 Hz:n alueelle. Lisäksi havaitaan, että juoksijan käden liikkeestä aiheutuu kävelijän tapaan Doppler-taajuuksien vaihteluita. Nyt kuitenkin taajuuden vaihteluväli 180–220 Hz on pienempi ja lisäksi taajuuden vaihtelut ovat nopeampia. Tämä johtuu siitä, että juostessa käden edestakainen liike on pienempää mutta samalla sitä tapahtuu nopeammin. Kaavaa 2.8 käyttämällä juoksijan nopeudeksi saadaan 1,25 m/s, joka vastaa rauhallista hölkkäysnopeutta.

Kuten kävelijän tapauksessa, juoksijan liike voidaan myös todeta tekemällä kahden riippumattoman otoksen t-testi. Kuvassa 4.5 esitetyistä tutkadatasta otetaan näytteet A_1 väliä 3,5–4,5 sekuntia ja A_2 väliä 8–9 sekuntia. Taulukossa 4.2 on esitetty otosten tilastolliset suureet. T-testin nollahypoteesina on, että otoksien keskiarvot ovat yhtä suuret ja vaihtoehtoisena hypoteesina se, että keskiarvot ovat erisuuret.

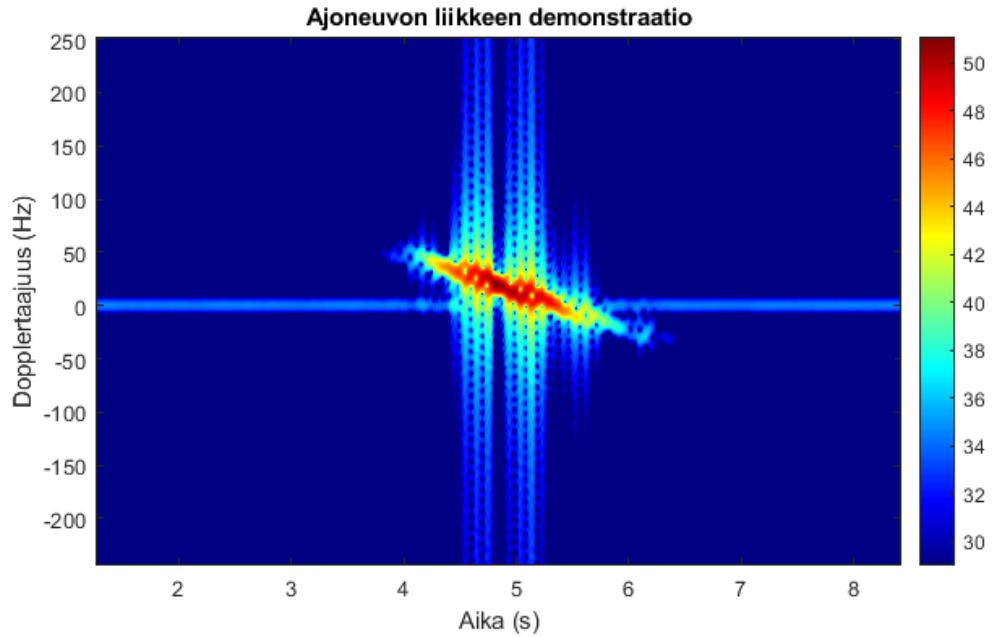
Taulukko 4.2 Otokset ja niistä lasketut suureet

Joukko	Joukon koko	Keskiarvo	Varianssi
A_1	332	193,39	44,96
A_2	332	-0,43	0,26

Matlabilla saadaan testisuureen arvoksi 525,17 ja vapausasteeksi 334,82 sekä merkitsevyystasolla 0,05 p-arvoksi nolla. Koska p-arvo on pienempi kuin merkitsevyystaso, voidaan nollahypoteesi hylätä. Toisin sanoen voidaan päätellä, että otoksien A_1 ja A_2 keskiarvot eroavat merkittävästi toisistaan ja todeta, että havaittu kohde liikkuu.

Mittausten toisessa vaiheessa liikuttiin tutkan ohi, eli tutkan säteilykuviota vastaan kohtisuoraan. Tutkan ohi suuntautuva liike aiheuttaa haasteita Doppler-ilmiön havaitsemiselle. Luvussa 2 kaavan 2.8 esittelyn yhteydessä todettiin kohteen säteisnopeuden olevan muotoa $v_r = v \cos \theta$, kun kohteen liike ei ole tutkan säteilykuvion suuntaista. Toisin sanoen voidaan ajatella, että kohteen nopeudesta aiheutuva Doppler-taajuus pienenee aina kertoimen $\cos \theta$ verran. Tämän lisäksi haastetta aiheuttaa se, että ohiliikkeessä kohde on tutkan säteilykuvion vaikutuksen alaisena vain hetkellisesti. Mikäli tutkan keulanleveys on pieni, niin tutkalla on lyhyt aika kerätä tutkadataa liikkuvasta kohteesta.

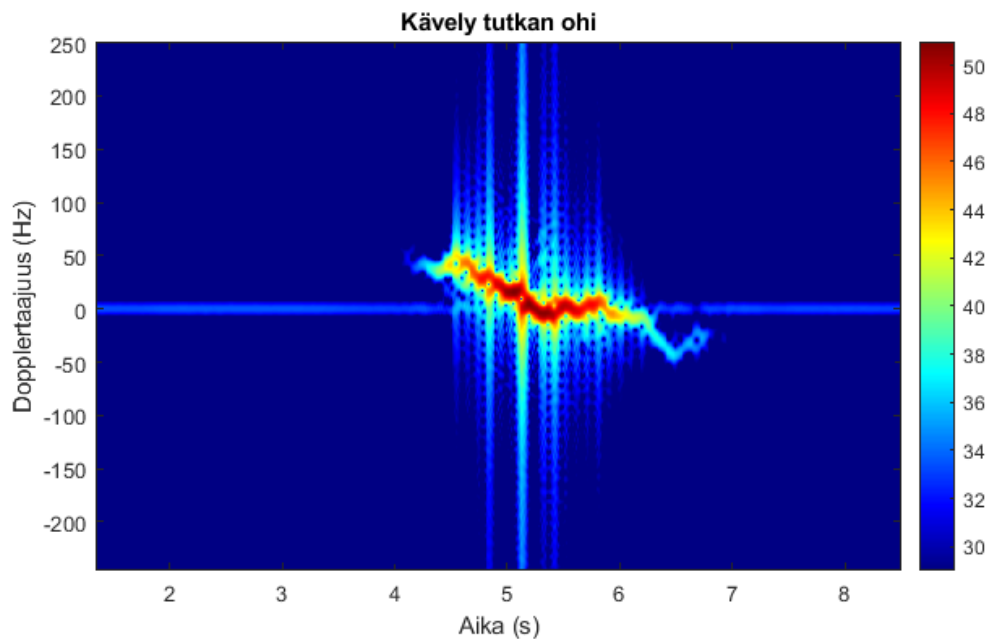
Toisen vaiheen ensimmäisessä mittauksessa toteutettiin samanlainen ajoneuvon liikkeen demonstraatio kuin ensimmäisessä osassa. Nyt toimistotuolille asetettua soppiheijastinta liikutettiin tasaisella nopeudella tutkan ohi noin 3 metrin etäisyydeltä. Mittauksen STFT on esitetty kuvassa 4.6.



Kuva 4.6 Ajoneuvon ohiliikkeen STFT

Kuvasta 4.6 nähdään, että kohde tulee tutkan säteilykuvion vaikutuksen alaiseksi noin 4 sekunnin kohdalla ja poistuu noin 6 sekunnin kohdalla. Doppler-taajuuksien muoto on alaspäin laskeva suora, joka laskee myös negatiivisten taajuuksien puolelle. Tämä kuvaa kohteen loittonemista tutkasta sen jälkeen, kun tutkan keskilinja on saavutettu.

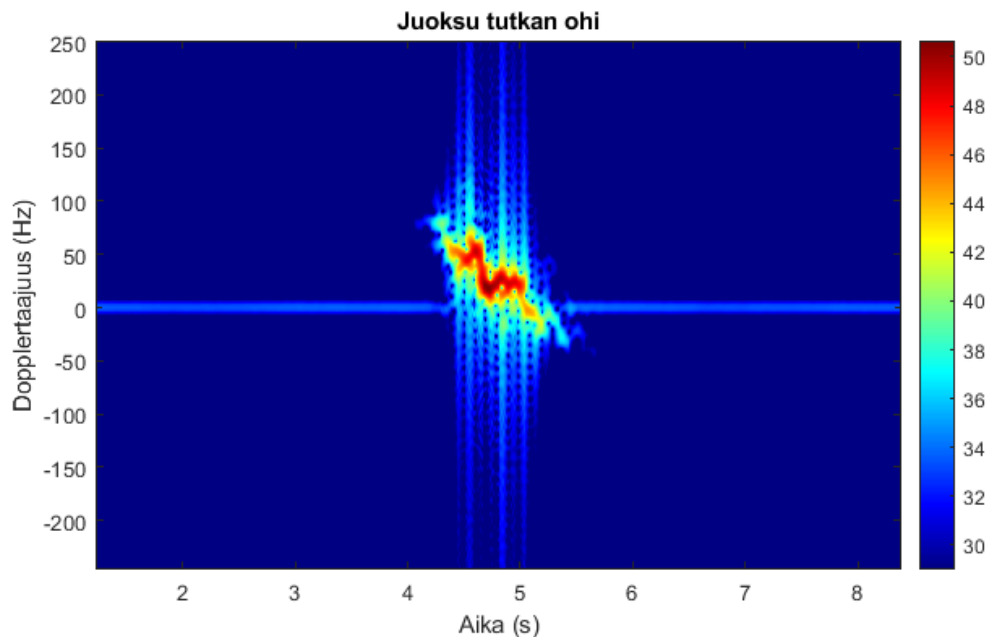
Toisen vaiheen toisessa mittauksessa tutkan ohi käveltiin rauhallisesti soppiheijastin kädessä noin 3 metrin etäisyydeltä. Soppiheijastimen annettiin liikkua käden luonnollisen liikkeen mukana. Mittauksen STFT on esitetty kuvassa 4.7.



Kuva 4.7 Tutkan ohittavan kävelijän STFT

Kuvasta 4.7 nähdään, että nyt kävelijän käden liikkeestä aiheutunut Doppler-taajuus ei ole yhtä selvästi näkyvissä kuin ensimmäisessä vaiheessa. Havaittujen Doppler-taajuuksien merkittävä lasku johtuu edellä mainitusta ohiliikkeen säteisnopeuden pienenemisestä. Havaittavissa on kuitenkin pientä aaltomaista taajuuden vaihtelua, joka erottaa kävelijän ja ajoneuvon demonstraation aika-taajuusesitykset toisistaan.

Toisen vaiheen kolmannessa mittauksessa tutkan ohi hölkättiin rauhallisesti soppiheijastin kädessä noin 3 metrin etäisyydeltä. Soppiheijastimen annettiin jälleen heilua käden luonnollisen liikkeen mukana. Mittauksen STFT on esitetty kuvassa 4.8.



Kuva 4.8 Tutkan ohittavan juoksijan STFT

Kuvasta 4.8 nähdään, että aika-taajuusesitykseen on muodostunut käytännössä vain yksi heilahdus juoksijan käden liikkeestä. Tämä johtuu siitä, että juoksijan nopeuden takia juoksija on tutkan säteilykuvion vaikutuksen alaisena vain noin sekunnin ajan.

4.3 Tulosten analysointi ja johtopäätökset

Mittauksista käy selkeästi ilmi se, että tutkan säteilykuvion suuntaisesti liikkuvien kohteiden tunnistaminen on huomattavasti helpompaa. Ensimmäisen vaiheen mittaukset tuottivat selkeästi havaittavia Doppler-taajuuksien vaihteluita. Kuvien 4.4 ja 4.5 aika-taajuusesitykset, jotka kuvasivat ihmisen liikettä, erottuivat selvästi kuvan 4.3 ajoneuvon demonstraation liikkeestä.

Ohiliikkeestä kohteen tunnistaminen osoittautui paljon vaikeammaksi. Tähän vaikuttivat pienemmät säteisnopeuskomponentit ja kohteen lyhyempi tarkastelu-aika tutkan suuntaiseen liikkeeseen verrattuna. Kuvien 4.7 ja 4.8 aika-taajuusesityksissä ei ole havaittavissa kovin selkeitä Doppler-taajuuksien vaihteluita, jotka auttaisivat kohteiden tunnistamisessa. Lisäksi on huomioitava, että nytkin mittauksissa saadut tulokset aiheutuivat hyvin tutkasignaalia heijastavasta soppiheijastimesta.

Mittauksissa käytettiin yhtä soppiheijastinta, jolloin saatiin kerättyä vain ihmisen yhden raajan liikkeestä aiheutuvia Doppler-taajuuksia. Useampaa soppiheijastinta käyttämällä olisi saatu tarkempia, erityisesti ihmisen liikemallia kuvaavia aika-taajuusesityksiä. Vaikka kuvien 4.4 ja 4.5 aika-taajuusesitykset havainnollistavat hyvin käden liikkeestä aiheutuvia Doppler-taajuuksia, niin ne eivät silti itsessään riitä kohteen tunnistamiseen ilman taustatietoja kohteesta. Kuvissa esiintyviä jaksollisia taajuuden vaihteluita voi aiheutua myös muista liikkuvista kohteista ympäristössä.

Mittausympäristössä oli myös hyvin ideaaliset olosuhteet verrattuna tilanteeseen, jossa ajoneuvotutka joutuu todellisuudessa toimimaan. Mittaustila ei esimerkiksi sisältänyt muuta liikettä kuin itse havainnoitavan kohteen. Liikenneympäristössä tutkan havainnointialueella on kuitenkin usein monia liikkuvia kohteita, jotka aiheuttavat tutkadataan Doppler-taajuuksia. Tällöin selkeiden jaksollisten taajuusvaihteluiden havaitseminen vaikeutuu. Lisäksi tutkadataan ei aiheutunut mittauksissa häiriöitä muista tutkista tai sähkömagneettisen säteilyn lähteistä, joita todellisessa liikenneympäristössä esiintyy.

Mittausten keskeisenä päätelmänä voidaan sanoa olevan se, että mikro-Doppler ilmiötä hyödyntämällä on mahdollista tehdä ero jalankulkijoiden ja ajoneuvojen välillä. Kuitenkin tarvitaan vielä lisätutkimuksia siitä, miten todellisessa liikenneympäristössä mitatusta tutkadatasta saadaan eri kohteiden mikro-Doppler liikemallit erotettua toisistaan. Lisäksi voidaan todeta, että jotta ajoneuvotutka pystyisi tunnistamaan kohteita myös ohiliikkeestä, sillä täytyy olla riittävä keilanleveys horisontaalitasossa, jotta kohde on tutkan havainnointialueella tarpeeksi pitkään. Myös elevaatiotason keilanleveys on oltava tarpeeksi suuri, jotta myös suuremmista kohteista saadaan muodostettua tarkat liikemallit. Lisäksi kohteentunnistukseen soveltuvan ajoneuvotutkan tulee tehdä mittauksia korkealla resoluutiolla, jotta pienistäkin liikkeestä aiheutuvat Doppler-taajuudet saadaan havaittua.

5. YHTEENVETO

Tässä työssä tutustuttiin tutkien teoreettiseen toimintaperiaatteeseen, tutustuttiin erilaisiin autojen ajoavustimiin sekä suoritettiin kokeellisia mittauksia ohjelmistotutkalla. Ajoavustimia tarkastellessa käytiin pääpiirteittäin läpi erilaisten sensoriteknologioiden käyttöä ajoneuvoissa perehtyen erityisesti tutkateknologian soveltamiseen. Mittauksissa pyrittiin tunnistamaan kohteita tutkadatasta.

Tutkateknologian todettiin olevan sovellettavissa erityisen hyvin ajoneuvojen ajoavustimiin. Erityisesti riippumattomuus valaistuksesta ja sääolosuhteiden vähäinen vaikutus tutkan toimintaan tekevät siitä hyvin liikenneympäristöön soveltuvan sensoriteknologian. Ajoneuvotutkien markkinoiden todettiin olevan suuressa kasvussa. Erityisesti markkinoita ovat vauhdittaneet laissa säädetyt vaatimukset uusien autojen ajoavustimista sekä elektroniikan kehittymisen myötä pienentyneet valmistuskustannukset. Lisäksi todettiin, että tutkien määrän yhä lisääntyessä ne alkavat aiheuttamaan häiriötä toisiinsa, joten tämä täytyy ottaa huomioon ajoneuvotutkien suunnittelussa.

Työn mittaukset keskittyivät jalankulkijan tunnistamiseen tutkadatasta. Ajatuksena oli hyödyntää jalankulkijan raajojen liikkeestä aiheutuvaa mikro-Doppler ilmiötä. Mikro-Doppler ilmiön aiheuttamat taajuuden vaihtelut havainnollistettiin aika-taajuusanalyysin avulla. Analyysin avulla luoduista liikemalleista pystyttiin näkemään ero mittausten eri kohteiden välillä. Kuitenkin todettiin, että todellisessa tilanteessa kohteen tunnistus vaikeutuu häiriöiden ja muiden liikkuvien kohteiden vuoksi. Lisäksi huomattiin, että mikäli kohteen liike ei ole tutkan säteilykuvion suuntaista, on tarkan liikemallin muodostaminen haastavaa.

Loppupäätelmänä voidaan todeta, että mikro-Doppler ilmiön hyödyntämistä tutkalla tapahtuvaan kohteentunnistukseen on syytä tutkia lisää. Tulevissa tutkimuksissa on pyrittävä suorittamaan mittauksia liikenneympäristöä vastaavissa olosuhteissa ja keskityttävä siihen, miten kohteiden mikro-Doppler liikemallit voidaan erotella toisistaan, kun ympäristö ei ole staattinen ja myös häiriöt ovat läsnä. Esimerkiksi koneoppimismenetelmien soveltuvuutta edellä mainittujen ongelmien ratkaisemiseksi voitaisiin tutkia.

LÄHTEET

- [1] Skolnik M.I., Introduction to radar systems 3rd ed, McGraw-Hill, 2001.
- [2] Richards M.A., Scheer J., Holm W.A., Principles of modern radar. Vol. I, basic principles, SciTech Publishing, 2010.
- [3] Wolff C., Radartutorial, FMCW Radar, <https://www.radartutorial.eu/02.basics/Frequency%20Modulated%20Continuous%20Wave%20Radar.en.html> (viitattu 16.02.2022).
- [4] Melvin W.L., Sheer J.A., Principles of modern radar. Volume III, Radar applications, SciTech Publishing, 2014.
- [5] Dempsey M., The Next Seat Belt, Frontier Technology, 2016, <https://mdium.com/frontier-tech/the-next-seat-belt-60e980c3ea8b> (viitattu 22.02.2022).
- [6] Road safety: Commission welcomes agreement on new EU rules to help save lives, European Commission, 2019, https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_19_1793 (viitattu 22.02.2022).
- [7] Waldschmidt C., Hasch J., Menzel W., Automotive Radar — From First Efforts to Future Systems, IEEE Journal of Microwaves, Vol.1, No.1, 2021, pp.135–148.
- [8] Grimes D.M., Jones T.O., Automotive radar: A brief review, Proceedings of the IEEE, Vol.62, No.6, 1974, pp.804–822.
- [9] 2020 Roadmap, Euro NCAP, 2015, <https://cdn.euroncap.com/media/16472/euroncap-2020-roadmap-rev1-march-2015.pdf> (viitattu 23.02.2022)
- [10] Bilik I., Longman O., Villeval S., Tabrikian j., The Rise of Radar for Autonomous Vehicles: Signal Processing Solutions and Future Research Directions, IEE Signal Processing Magazine, Vol.36, No.5, 2019, pp.20–31.
- [11] Saponara S., Greco M.S., Gini F., Radar-on-Chip/in-Package in Autonomous Driving Vehicles and Intelligent Transport Systems: Opportunities and Challenges, IEEE Signal Processing Magazine, Vol.36, No.5, 2019, pp.71–84.
- [12] Murad M., Bilik I., Friesen M., Nickolaou J., Salinger J., Geary K., Colburn J.S., Requirements for next generation automotive radars, 2013 IEEE Radar Conference (RadarCon13), 2013.
- [13] Du Y., Man K.L., Lim E.G., Image Radar-based Traffic Surveillance System: An all-weather sensor as intelligent transportation infrastructure component, 2020 International SoC Design Conference (ISOCC), 2020.
- [14] Hasch J., Topak E., Schnabel R., Zwick T., Weigel R., Waldschmidt C., Millimeter-Wave Technology for Automotive Radar Sensors in the 77 GHz Frequency Band, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol.60, No.3, 2012, pp.845–860.

- [15] Köhler M., Gumbmann F., Schür J., Schmidt L., Blöcher H., Considerations for future automotive radar in the frequency range above 100 GHz, German Microwave Conference Digest of Papers, 2010, pp.284–287.
- [16] Norouzian F., Hoare E.G., Marchetti E., Cherniakov M., Gashinova M., Next Generation, Low-THz Automotive Radar – the potential for frequencies above 100 GHz, 2019 20th International Radar Symposium (IRS), 2019.
- [17] Charvat G.L., Small and Short-Range Radar Systems, CRC Press, 2014.
- [18] Radar for automotive: automated driving applications strengthens market dynamics, Yole Group of Companies, 2019, http://www.yole.fr/iso_upload/News/2019/PR_RADAR_for_AUTOMOTIVE_RadarMarketUpdate_YOLE_May2019.pdf (viitattu 23.02.2022).
- [19] Murad M., Nickolaou J., Raz G., Colburn J.S., Geary K., Next generation short range radar (SRR) for automotive applications, 2012 IEEE Radar Conference, 2012.
- [20] Sun S., Petropulu A.P., Poor H.V., MIMO Radar for Advanced Driver-Assistance Systems and Autonomous Driving: Advantages and Challenges, IEEE Signal Processing Magazine, Vol.37, No.4, 2020, pp.98–117.
- [21] MOSARIM Project final report, 2012, <https://cordis.europa.eu/docs/projects/cnect/1/248231/080/deliverables/001-D611finalreportfinal.pdf> (viitattu 02.03.2022).
- [22] Mun J., Kim H., Lee J., A Deep Learning Approach for Automotive Radar Interference Mitigation, 2018 IEEE 88th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall), 2018.
- [23] Zhang R., Cao S., Support vector machines for classification of automotive radar interference, 2018 IEEE Radar Conference (RadarConf18), 2018.
- [24] Radarlog User Manual, Inras GmbH, 2016.
- [25] RDL-24G-TX2RX8 Frontend User Manual, Inras GmbH, 2016, https://inras.at/wp-content/uploads/2021/11/RDL-24G-TX2RX8_01.pdf (viitattu 17.03.2022).