

# Signaalien luokittelu ohjelmistoradiojärjestelmässä

Katri Haapalinna

**Perustieteiden korkeakoulu**

Kandidaatintyö  
Espoo 2.12.2020

**Vastuupettaja**

Prof. Ahti Salo

**Työn ohjaaja**

TkT Maarit Melvasalo



**Aalto-yliopisto**  
Perustieteiden  
korkeakoulu

Copyright © 2021 Katri Haapalinna

Työn saa tallentaa ja julkistaa Aalto-yliopiston avoimilla verkkosivuilla.  
Muilta osin kaikki oikeudet pidätetään.

---

**Tekijä** Katri Haapalinna

---

**Työn nimi** Signaalien luokittelu ohjelmistoradiojärjestelmässä

---

**Koulutusohjelma** Teknillinen fysiikka ja matematiikka

---

**Pääaine** Matematiikka ja systeemitieteet **Pääaineen koodi** SCI3029

---

**Vastuuopettaja** Prof. Ahti Salo

---

**Työn ohjaaja** TkT Maarit Melvasalo

---

**Päivämäärä** 2.12.2020

**Sivumäärä** 25

**Kieli** Suomi

---

**Tiivistelmä**

Sähkömagneettinen taajuusspektri sisältää kohinan seassa vaihtelevan määrän signaaleja, joita voidaan eri tavoin käsitellä ja tunnistaa. Tuntemattomia radiosignaaleja vastaanottaessa on kuitenkin kyettävä erottelamaan signaalit kohinasta ilman, että signaalia tai sen ominaisuuksia tunnetaan tarkasti. Tässä kandidaatintyössä on sovellettu tunnettua menetelmää signaalien havaitsemiseen implementoimalla havaintojen varianssiin perustuva ilmaisin ohjelmistoradioilla vastaanotetuille signaaleille. Energiailmaisimen toiminta perustuu kynnsarvoihin, jotka tässä määritettiin kohinan tehon eli varianssin avulla. Samalla tutkittiin vastaanoton parametrien eli keskitaajuuden, taajuuskaistan, antennivahvistuksen ja itse antennien vaikutusta kohinatasoon. Työssä on myös käsitelty ilmaisimelle olennaisten kynnsarvojen merkitystä tuloksiin eli ilmaisun tyyppin I ja II virheiden todennäköisyyksiin.

---

**Avainsanat** Signaalinkäsittely, signaalien ilmaisu, ohjelmistoradiot, hypoteesin testaus, radiospektrin monitorointi

---

# Sisältö

<b>Tiivistelmä</b>	<b>3</b>
<b>Sisältö</b>	<b>4</b>
<b>Symbolit ja lyhenteet</b>	<b>5</b>
<b>1 Johdanto</b>	<b>6</b>
<b>2 Aikaisempi tutkimus</b>	<b>6</b>
<b>3 Tutkimusaineisto ja -menetelmät</b>	<b>9</b>
3.1 Tutkimuksen osat . . . . .	9
3.2 Mittalaitteisto . . . . .	10
3.3 Laskennalliset menetelmät . . . . .	12
<b>4 Tulokset</b>	<b>15</b>
4.1 Mittausparametrit . . . . .	15
4.2 Kohinan varianssi kynnyсарvojen määrittäksessä . . . . .	16
4.3 Energiailmaisimen toiminta . . . . .	18
4.3.1 Kohinasignaalin tunnistus . . . . .	18
4.3.2 Jatkuva-aikaisten signaalien ilmaisu . . . . .	18
4.3.3 Purskeisten signaalien ilmaisu . . . . .	20
<b>5 Yhteenveto</b>	<b>23</b>

## Symbolit ja lyhenteet

### Symbolit

$K$	vastaanoton kohina
$LK$	ilmaisluokitus vastanoton kohinaksi
$LS$	ilmaisluokitus vastanoton signaaliksi
$p(A)$	tapahtuman A todennäköisyys
$p(A B)$	tapahtuman A ehdollinen todennäköisyys B:n tapahtuessa
$p_D$	ilmaisutodennäköisyys
$p_{FA}$	virheilmaisun todennäköisyys
$p_{fa}$	virheilmaisun todennäköisyyden yläraja
$p_{MD}$	väärien negatiivisten todennäköisyys
$S$	vastaanotto signaalia

### Lyhenteet

ADC	analogia-digitaalimuunnin (Analog-to-Digital Converter)
AM	amplitudimodulaatio (Amplitude Modulation)
BPSK	binäärinen vaihesiirtoavain (Binary Phase-Shift Keying)
DAC	digitaal-analogiamuunnin (Digital-to-Analog Converter)
dB	desibeli, signaalin antennivahvistuksen yksikkö
DC	tasavirta (Direct Current)
FA	virheilmais (False Alarm)
FM	taajuusmodulaatio (Frequency Modulation)
I	toinen kvadratuuri-ilmaisun kanavista (In-phase)
MD	väärä negatiivinen (Missed Detection)
MIMO	moniantennijärjestelmä (Multiple-Input Multiple-Output)
Q	toinen kvadratuuri-ilmaisun kanavista (Quadrature)
RX	radiovastaanotin (Radio Receiver)
SDR	ohjelmistoradio (Software-Defined Radio)
SNR	signaali-kohinasuhde (Signal-to-Noise Ratio)
USRP	Ettus Researchin ohjelmistoradiomerkki (Universal Software Radio Peripheral)

# 1 Johdanto

Radiolähettimet ja -vastaanottimet viestivät keskenään erilaisten langattomien signaalien välityksellä. Signaalit sisältävät radiotaajuudella kulkevalle aallolle koodattua informaatiota. Ne voivat olla muodoltaan jatkuvia tai koostua erillisistä purskeista, jolloin varsinaista signaalia tulee vain ajoittain. Informaatio koodataan eli moduloidaan esimerkiksi signaalin amplitudiin (AM, Amplitude Modulation) tai taajuuteen (FM, Frequency Modulation). Useimmissa tapauksissa, kuten esimerkiksi matkapuhelinliikenteessä tai televisioissa, vastaanottaja tai vastaanottava laite tietää, miten ja millaista signaalia lähetetään, ja pystyy täten oikeilla asetuksilla vastaanottamaan ja tulkitsemaan lähetetyn sanoman. Esimerkiksi radiokanavan kuuntelija kykenee seuraamaan ohjelmaa valitsemalla sopivan taajuuden sekä tietämällä, onko kyse taajuus- vai amplitudimodulaatiosta. Signaalin lähettäjän toimintaa ei kuitenkaan aina tunneta. Esimerkiksi signaalitiedustelussa, kognitiivisissa radioissa tai elämää ulkoavaruudesta etsittäessä on ensimmäiseksi selvitetävä, sisältyykö yksittäiselle taajuusalueelle tietyllä ajanhetkellä ja tietyssä sijainnissa lähetystä. Mahdollisten signaalien löytäminen edellyttää niiden erottamista kohinasta.

Tuntemattomia signaaleja haettaessa ei tiedetä lähettävän radiolaitteen asetuksia ja lähetysparametreja kuten taajuusaluetta. Tällaisia signaaleja pystytään kuitenkin havainnoimaan muun muassa energiailmaisimella, joka erottaa signaalin tehonsa perusteella kohinasta (Biglieri et al., 2012). Haasteita signaalien ilmaisuun tuovat heikot signaalit, jotka teholtaan ovat lähellä kohinaa tai sitä matalampia ja täten sekoittuvat helposti kohinaan (Yucek ja Arslan, 2009). Toinen tapa on ilmaista signaali autokorrelaation avulla, sillä pelkkä kohina on luonteeltaan satunnaista eikä siinä esiinny autokorrelaatiota kuin nollaviiveellä (Biglieri et al., 2012). Signaalien ilmaisu helpottuu, jos vastaanotettava signaali tunnetaan edes joiltain osin. Yleisesti käytettyjä menetelmiä ovat pilotit eli lähetykseen kuuluvat tunnetut harjoitussignaalit, joiden avulla vastaanotin voi määrittää oikeat asetukset, sekä korrelointi lähetetyn signaalin kanssa (Biglieri et al., 2012).

Tässä työssä etsitään vastaanotetusta datasta mahdollisia signaaleja jaottelemalla mitattuja näytteitä sen mukaan, sisältävätkö ne lähetettyä signaalia vai ainoastaan kohinaa. Lisäksi tutkitaan eri mittausparametrien vaikutusta kohinatasoon. Työssä esitellään energiailmaisimeen perustuva menetelmä ominaisuuksiltaan tuntemattomien signaalien havaitsemiseen, kun käytettävä data on vastaanotettu ohjelmistoradioilla.

Aikaisempien tutkimusten tuottamia tapoja signaalien ilmaisuun on esitelty luvussa 2. Luvussa 3 on kuvattu tässä työssä ohjelmistoradioilla toteutetut mittaukset sekä käytetyt matemaattiset menetelmät. Tulokset on eritelty luvussa 4, ja luku 5 tekee yhteenvedon. Havaittujen signaalien tarkempi analysointi, kuten erilaisten signaalien erottelu toisistaan, ei työhön sisälly.

## 2 Aikaisempi tutkimus

Sähkömagneettinen spektri sisältää kaikki mahdolliset sähkömagneettisen säteilyn taajuudet, joista tässä työssä käsitellyt mikroaallot toimivat noin 1 ja 40 GHz:n

välisellä alueella (Klemola ja Lehto, 1998). Jokainen signaali käyttää jotakin osaa spektristä, joten signaaleja lähetetään ja vastaanotetaan aina jollakin keskitaajuudella ja taajuuskaistalla. Keskitaajuus kuvaa keskimmäistä radiotaajuutta, jolla signaalia lähetetään. Taajuuskaista kertoo signaalin käyttämän taajuusalueen leveyden. Kun väliaineessa etenevää analogista signaalia vastaanotetaan ja muutetaan tietotekniikan ymmärtämään digitaaliseen muotoon, on valittava myös näytteistystaajuus eli tiheys, jolla signaalista otetaan näytearvoja.

Signaalien ilmaisu liittyy läheisesti spektrin aistintaan (spectrum sensing) eli taajuusspektrin havainnointiin ja mahdollisten signaalien löytämiseen. Tätä on tutkittu runsaasti etenkin tutkajarjestelmien ja kognitiivisten radioiden yhteydessä. Kognitiivisissa radioissa toissijaiset käyttäjät hyödyntävät hetkellisesti ensisijaisen käyttäjien, kuten televisiokanavien, käyttämätöntä taajuuskaistaa eli sähkömagneettista spektriä. Tätä varten niiden on havainnoitava kaistaa ja löydettävä ensisijaisilta käyttäjiltä tulevat lähetykset eli signaalit (Lee ja Akyildiz, 2008), (Tandra ja Sahai, 2008). Mikäli lähetystä ei löydy, voi toissijainen käyttäjä lähettää hetkellisesti omia signaalejaan ensisijaiselle eli lisensoidulle käyttäjälle varatulla taajuusalueella, minkä jälkeen on selvitettävä, onko spektri edelleen vapaana. Havainnointiaikana toissijainen käyttäjä ei itse voi lähettää lähetystä, sillä se sekoittuisi ensisijaisen käyttäjän mahdolliseen signaaliin. Toissijaisen käyttäjän on siis varottava, ettei aiheuta lisensoitua lähetystä häiritsevää interferenssiä lähettämällä lähetystä ensisijaisen käyttäjän kanssa samaan aikaan ja samalla taajuudella.

Häiritsevän interferenssin välttämiseksi tarvitaan säännöllistä spektrin havainnointia aina lyhyiden lähetyksien välillä. Saatua havainto signaalista tai vapaasta spektristä on sitä varmempi, mitä enemmän mittauksia ja samalla havaintoarvoja vastaanotetaan eli mitä pidempään kaistaa seurataan (Lee ja Akyildiz, 2008). Signaali-ilmaisimen tarkkuutta saadaan kasvatettua myös lisäämällä paikallisesti hajautettujen antureiden tai sensoreiden määrää eli paikkadiversiteettiä ja ilmaisemalla signaalit eri havaintimien tuottamia, toisistaan erillisiä havaintoja sopivasti yhdistelemällä (Oksanen, 2016).

Radiolaitteissa kohina on sähköenergiaa, joka koostuu muun muassa elektroniikan lämpökohinasta, viereisiltä taajuuskaistoilta vuotavista signaaleista, muista radiolaitteista, vastaanottimen suodattimien aiheuttamasta laitteen sisäisestä kohinasta sekä ilmakehän, auringon ja ulkoavaruuden lähettämästä kohinasta (Kosola ja Solante, 2013), (Tandra ja Sahai, 2008). Signaalin voimakkuutta suhteessa kohinaan kuvataan signaali-kohinasuhteella (SNR, Signal-to-Noise Ratio), joka on sitä suurempi, mitä selkeämmin signaali erottuu kohinasta. Signaali-kohinasuhdetta voidaan parantaa joko antennivahvistuksella eli kohdistamalla havainnointi tarkemmin halutulle alueelle tai vaihtoehtoisesti kaventamalla seurattavaa taajuuskaistaa. Kohdistukset voivat kuitenkin myös johtaa signaalin kadottamiseen, jos suunta- tai taajuusikkunaan pienentämällä rajataan pois muuten mahdollisesti havaittava signaali. Kaukaisten kohinalähteiden merkitystä saadaan pienennettyä myös käyttämällä korkeampia taajuuksia. (Kosola ja Solante, 2013) Lisäksi tutkittavan aikaikkunan pidentäminen sekä antennien lukumäärän eli antennidiversiteetin kasvattaminen nostavat signaali-kohinasuhteen tasoa.

Matemaattisesti kohina muodostuu satunnaisista ja keskenään riippumattomista

näytteistä. Esimerkiksi gaussisen, nollakeskiarvoisen kohinan tapauksessa aikavälin energiaa voidaan mallintaa tilastollisesti riippumattomien Gaussin jakaumaa noudattavien muuttujien neliöiden summana (Urkowitz, 1967). Tällöin kohinaa vastaanotettaessa noudattaa käytettävä testisuure keskitettyä, tiettyjen vapausasteiden  $\chi^2$ -jakaumaa, ja vastaanoton sisältäessä signaalia vastaavasti yleistä, keskittämättömä  $\chi^2$ -jakaumaa. Testisuureta voidaan pitää jakaumaa noudattavana, jos se on arvoltaan valittua, usein 90 tai 95 prosentin luottamustasoa vastaavaa  $\chi^2$ -jakauman pistettä pienempi (Pindyck ja Rubinfeld, 1991).

Jotta signaaleja voidaan havaita, niillä on oltava kohinasta eroavia ominaisuuksia. Näiden ominaisuuksien arvoja jollakin päätöksentekomenetelmällä vertailemalla tehdään päätös, havaitaanko signaalia. Kognitiivisten radioiden spektrinkäyttöä kuvattaessaan Biglieri et al. (2012) nimeävät neljä tapaa signaalien erottamiseen kohinasta. Näitä ovat energia-, korrelaatio-, syklostationaarisuus- ja autokorrelaatiomenetelmät. Korrelaatiomenetelmä perustuu johonkin vastaanotettavan signaalin tunnettuun ominaisuuteen, kuten koodaukseen, modulaatioon tai alustusosaan. Syklostationaarisuusmenetelmässä taas on tiedettävä syklostationaarisuuden jakso tai signaalin on oltava digitaalisesti moduloitu. Kyseiset tavat eivät siis sovellu mielivaltaisen ja tuntemattoman signaalin havaitsemiseen eikä niitä siksi käsitellä tässä sen tarkemmin.

Energiamenetelmä eli energiailmaisimen käyttö signaalin erottamisessa kohinasta on täysin riippumaton signaalin ominaisuuksista, sillä sen toiminta pohjautuu tehon mittaukseen. Kun teho ylittää erikseen määriteltävän kynnsarvon, vastaanotto tulkitaan signaaliksi. Menetelmän heikkous on sen huono toimivuus matalilla signaali-kohinasuhteilla, joilla signaalin teho voi olla samaa suuruusluokkaa tai pienempi kuin kohinalla ja sen erottamiseen vaadittaisiin tällöin jokin kohinasta eroava ominaisuus (Biglieri et al., 2012). Signaalien löytäminen matalilla signaali-kohinasuhteilla edellyttää suurta ajan ja kaistanleveyden tuloa eli näytteitä on otettava joko pitkältä ajalta tai suurelta taajuusalueelta. Liukuvalla ikkunoinnilla saadaan nopeutettua energiailmaisimen toimintaa nimenomaan matalan signaali-kohinasuhteen alueella (Tian et al., 2016). Lisäksi energiailmaisimeen liittyviä haasteita ovat kynnsarvojen valinta sekä vaikeudet erottaa heijastuneet signaalit kohinasta (Yucek ja Arslan, 2009). Heijastuneet signaalit muistuttavat teholtaan kohinaa, sillä heijastuminen on vaimentanut niitä. Tämän vuoksi signaalit vaimentuvat merkittävästi, jos lähettäjän ja vastaanottajan välillä ei ole näköyhteyttä (Kosola ja Solante, 2013). Heijastuminen aiheuttaa myös monitie-etenemistä eli eri reitin kulkeneita ja täten erivaiheisia signaalin komponentteja voidaan vastaanottaa samanaikaisesti. Tällöin eri komponentit summautuvat vastaanottimessa yhteen, mikä aiheuttaa interferenssiä ja destruktiivisen interferenssin tapauksessa heikentää signaalia (Kosola ja Solante, 2013). Interferenssi saattaa kuitenkin olla myös konstruktiiivista eli vahvistavaa, jolloin monitie-etenemisellä signaalin signaali-kohinasuhdetta saadaan parannettua.

Energiailmaisimen kynnsarvot vaikuttavat oleellisesti menetelmän toimivuuteen. Päätöksenteko edellyttää hypoteesin testausta. On siis asetettava nollahypoteesi ja laskettava satunnaiselle näytteelle testisuure, jonka perusteella nollahypoteesi joko hylätään tai hyväksytään (Montgomery, 1991). Signaalien ilmaisussa nollahypoteesi on, että on vastaanotettu vain kohinaa. Vaihtoehdoisen hypoteesin mukaan vastaanotto taas koostuu kohinasta ja signaalista. Energiailmaisimessa kynnsarvo asettaa rajan



nollahypoteesin hyväksyvän ja hylkäävän testisuureen arvon välille. Kynnysarvon sopivuutta voidaan arvioida mallin tarkkuutta ja herkkyyttä tutkimalla. Ilmaisimen toimintaa kuvataan tunnusluvuilla, jotka kertovat hypoteesitestauksen virheiden todennäköisyydet. Virhe on joko väärä positiivinen eli tyypin I virhe, jolloin kohinassa havaitaan olematon signaali, tai väärä negatiivinen eli tyypin II virhe, jolloin todellinen signaali jätetään havaitsematta. (Biglieri et al., 2012), (Lundén, 2009) Koska kynnysarvo kuvaa mallissa kohinan tehoa ja kynnysarvon alittavat tehot tulkitaan kohinaksi, nähdään, että korkea kynnysarvo ohjaa luokittelemaan näytteet todellista helpommin kohinaksi, mikä johtaa vääriin negatiivisiin tuloksiin. Matala kynnysarvo johtaa vastaavasti vääriin positiivisiin tuloksiin eli virheilmaisuihin. Usein onkin tehtävä kompromissi matalan virheilmaisun ja väärien negatiivisten todennäköisyyksien välillä, mutta tarpeeksi laajoilla näytteillä voidaan saavuttaa pieni todennäköisyys kummallekin virheelle (Lundén, 2009).

On myös mahdollista hyödyntää kyseisiä virheiden todennäköisyyksiä kynnysarvojen valinnassa. Esimerkiksi yleisimmässä ilmaisuteknikassa eli Neyman-Pearsonin menetelmässä valitaan kynnysarvo siten, että kun tyypin I virheen todennäköisyys on asetettu vakioksi, saadaan tyypin II virheen todennäköisyys minimoitua eli samalla ilmaisutodennäköisyys maksimoitua. Toisessa vaihtoehdossa, ideaalisessa mittajassa, minimoidaan virheilmaisun ja väärien negatiivisten todennäköisyyksien signaalin ilmaantuvuudella painotettua summaa eli kokonaisvirhettä. Koska ideaalinen mittaaja tällöin ottaa huomioon signaalin ilmaantuvuuden todennäköisyyden, se vaatii a priori -tietoa eri hypoteesien todennäköisyyksistä. (Klemola ja Lehto, 1998)

Autokorrelaatiomenetelmässä havaittava signaali oletetaan heikosti stationääriksi (Biglieri et al., 2012). Menetelmä perustuu mitatussa signaalissa esiintyvään peräkkäisten pisteiden väliseen autokorrelaatioon, joten se ei vaadi etukäteistietoa lähetetystä signaalista. Valkoiselle kohinalle autokorrelaatio nollaa suuremmalla viiveellä on nolla (Pindyck ja Rubinfeld, 1991) eli sillä ei ole autokorrelaatiota. Täten signaali on erotettavissa kohinasta autokorrelaationsa perusteella. Autokorrelaatiomatriisi kuvaa vektorin pisteen autokorrelaatiota eri viiveillä, joten se on valkoiselle kohinalle diagonaalimatriisi ottaen huomioon, että pisteen autokorrelaatio itsensä kanssa on aina 1. Menetelmä hyödyntää vastaanoton autokorrelaatiomatriisin ominaisarvojen tutkimista: esimerkiksi jos ominaisarvot ovat lähes yhtä suuria, on autokorrelaatiomatriisi diagonaalimatriisi ja vastaanotto voidaan olettaa kohinaksi. (Biglieri et al., 2012)

## 3 Tutkimusaineisto ja -menetelmät

### 3.1 Tutkimuksen osat

Työ jakautui kahteen osaan. Ensin suoritettiin mittaukset ohjelmistoradioilla. Vastaanotetut signaalit tallennettiin binäärimuodossa jatkokäsittelyä varten.

Kokeellisen osuuden jälkeen saatuja mittaustiedostoja analysoitiin, ja niistä pyrittiin ilmaisemaan tunnettuja signaaleja. Ilmaisuuun käytettiin Matlabilla luotua energiailmaisinta, jonka toimintaa myös tarkasteltiin ja arvioitiin erinäisten tunnuslukujen valossa.

## 3.2 Mittalaitteisto

Tutkitut signaalitiedostot luotiin Ettus Researchin valmistamilla USRP-ohjelmistoradioilla (Universal Software Radio Peripheral). Mittauksissa käytettiin USRP-sarjan mallia X310, joista toiseen oli asennettu kaksi UBX- ja toiseen kaksi TwinRX-tytärkorttia. Tytärkorttien ominaisuuksista johtuen edellisellä laitteella pystyttiin sekä lähettämään että vastaanottamaan enintään kahdella antennilla samanaikaisesti. Jälkimmäisellä ohjelmistoradiolla taas voitiin vastaanottaa lähetystä tai kohinaa enintään neljällä antennilla, mutta lähetys ei ollut mahdollista. Ohjelmistoradioiden erot on lueteltu myös taulukossa 1.

Taulukko 1: Mittauksissa käytettyjen ohjelmistoradioiden toisistaan eroavia ominaisuuksia.

Ohjelmistoradio	A	B
<b>Tytärkortit</b>	2 x UBX	2 x TwinRX
<b>Lähetysantenneja</b>	2	0
<b>Vastaanottavia antenneja</b>	2	4

Ohjelmistoradiot (Software-Defined Radio, SDR) eroavat tyypillisistä radiolähettimistä sekä -vastaanottimista siten, että niiden lähetys- ja vastaanottoparametrit ovat muunneltavissa tavallisia radioita laajemmin. Kun yleisimmissä radiovastaanottimissa säädeltäviä ominaisuuksia ovat lähinnä keskitaaajuus eli kuunneltava radiotaajuus sekä signaalin modulaatiotyyppi, kuten esimerkiksi AM, FM tai BPSK (Binary Phase-Shift Keying), voi ohjelmistoradion käyttäjä valita lisäksi käytettävän taajuuskaistan, signaalin näytteistystaajuuden sekä vastaanoton tai lähetysten vahvistuksen voimakkuuden. Siinä missä perinteisten radioiden parametrit määräytyvät laitteiston rakenteesta, ohjelmistoradiolle ne voidaan asettaa ohjelmistollisesti ja siksi joustavasti. Vaihteluväli mahdollisille eri parametrien arvoille riippuu kuitenkin käytettävästä laitteesta. Esimerkiksi USRP-ohjelmistoradion mahdolliset keskitaaajuudet määräytyvät emolaitteeseen asennettujen tytärkorttien perusteella. Tässä työssä käytettyjen UBX- ja TwinRX-korttien taajuusalue on molemmilla 10 megahertsistä 6 gigahertsiin ([Ettus Research, a](#)), ([Ettus Research, c](#)). Emolaitteet on kytketty tietokoneisiin yhden gigabitin ethernet-kaapeleilla, mikä määrää eri antennien yhteenlasketun näytteistystaajuuden enintään 25 megahertsiksi ([Ettus Research, b](#)). Taajuuskaista määräytyi käytetyillä laitteilla suoraan näytteistystaajuudesta, eikä sitä voinut erikseen muuttaa.

USRP:n lähettämä signaali koostuu kahdesta komponentista, joiden välillä on 90 asteen vaihe-ero. Näistä toista kutsutaan I:ksi (In-phase) ja toista Q:ksi (Quadrature). ([Klemola ja Lehto, 1998](#)) Digitaalisesti käsiteltäessä on lähete tai vastaanotto aina diskreettiä eikä jatkuvaa signaalia, ja se muodostuu kompleksilukupisteistä, joiden reaali-osa sisältää I- ja kompleksiosa Q-kanavaa vastaavan arvon.

USRP, kuten ohjelmistoradiot yleensäkin, käsittelee signaaleja sekä analogisessa että digitaalisessa muodossa. Vastaanotettaessa jatkuva, analoginen signaali tai kohina muunnetaan ADC:llä eli analogia-digitaalimuuntimella (Analog-to-Digital Converter) diskreettiseksi, biteistä muodostuvaksi digitaalisignaaliksi tallentamalla I- ja Q-

komponentin amplitudeja käyttäjän asettamalla näytteistystaajuudella. Lähetettäessä taas digitaalinen signaali muunnetaan DAC:llä eli digitaali-analogiamuuntimella (Digital-to-Analog Converter) vastaavasti analogiseksi, mikroaalloilla kulkevaksi radiosignaalksi. (Kosola ja Solante, 2013)

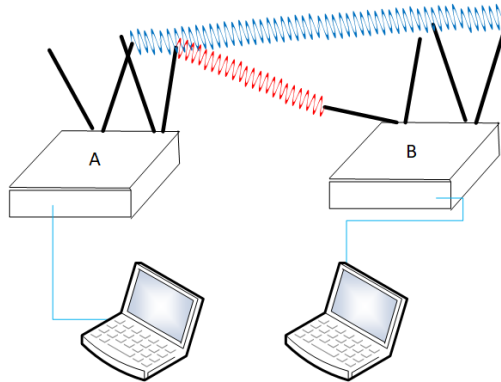
USRP-ohjelmistoradioita ohjattiin tässä työssä käsitellyissä mittauksissa tietokoneelta Gnuradio Companion -ohjelman tarjoaman graafisen käyttöliittymän kautta. Jokainen käytetty ohjelmistoradio kytkettiin ethernet-kaapelilla kannettavaan tietokoneeseen siten, että yhteen tietokoneeseen oli liitetty enintään yksi ohjelmistoradio. Koko järjestelmässä on monta lähetintä ja vastaanotinta, minkä vuoksi sitä kutsutaan MIMO-järjestelmäksi (Multiple-Input Multiple-Output). Järjestelmästä on valokuva kuvassa 1. Gnuradio Companioniin syötettiin halutut mittaussparametrit eli keskitäajuus, näytteistystaajuus ja vahvistus erikseen vastaanotolle sekä tarvittaessa myös lähetykselle. Kaistanleveys määräytyy USRP-ohjelmistoradioilla näytteistystaajuudesta. Käytettyjä mittaussparametreja on kuvattu tarkemmin luvussa 4.



Kuva 1: Yllä on kuvattu käytetty MIMO-järjestelmä. Vasemmanpuoleinen ohjelmistoradio vastaa taulukon 1 laitetta B ja oikeanpuoleinen laitetta A. Ohjelmistoradiot on yhdistetty sinisin Ethernet-kaapelein kuvan yläosan kannettaviin tietokoneisiin. Kuva: Maarit Melvasalo

Kohinamittauksissa asetettiin kumpikin käytetyistä ohjelmistoradioista vastaanottamaan kohinaa antenniensa avulla. Referenssimittauksissa lähetettiin toiselle laitteelle toiselta näköyhteysreittiä pitkin useita erilaisia digitaalisesti moduloituja

signaaleja kuvan 2 mukaisesti. Signaalit oli luotu Matlabilla ja tallennettu binääritiedostoiksi, ja ne lähetettiin Gnuradio Companionin avulla. Kuvassa 3 on näkymä Gnuradio Companionista. Lähetykseen saatiin antennidiversiteettiä lähettämällä samaa signaalia samanaikaisesti kahdesta antennista, eikä useamman kuin kahden antennin lähetys olisi käytetyllä ohjelmistoradiolaitteistolla ollut mahdollista. Mittauksissa myös simuloitiin monitie-etenemistä eli eri reittejä vastaanottimeen saapuvia signaaleja lähettämällä toisesta lähetysantennista digitaalisesti viivästettyä versiota signaalipulssista eli -purskeesta.



Kuva 2: Yksinkertaistettu kuvaus mittauksista MIMO-järjestelmällä. Ohjelmistoradiot A ja B ovat samat kuin taulukossa 1. Laite A lähettää kuvassa siniaaltoja kahdesta antennista, ja laite B vastaanottaa kaikilla neljällä antennillaan. Kuvaan piirretyt aallot ovat vain yhdet monista, sillä käytetyt antennit ovat ympärisäteileviä; suurin osa aalloista on jätetty pois kuvan selkeyden takia.

Niin kohina- kuin referenssimittauksissakin tallennettiin vastaanotetut, kompleksiset signaalit binäärimuodossa tietokoneelle jatkokäsittelyä varten. Tällaisia binääritiedostoja saatiin yhdellä mittauksella yksi jokaista vastaanotinantennia kohden eli joko kaksi tai neljä kerrallaan. Yhtä kompleksista, sekä I- että Q-komponentin amplitudin sisältävää näytepistettä kohden tallennettiin 64 bittiä.

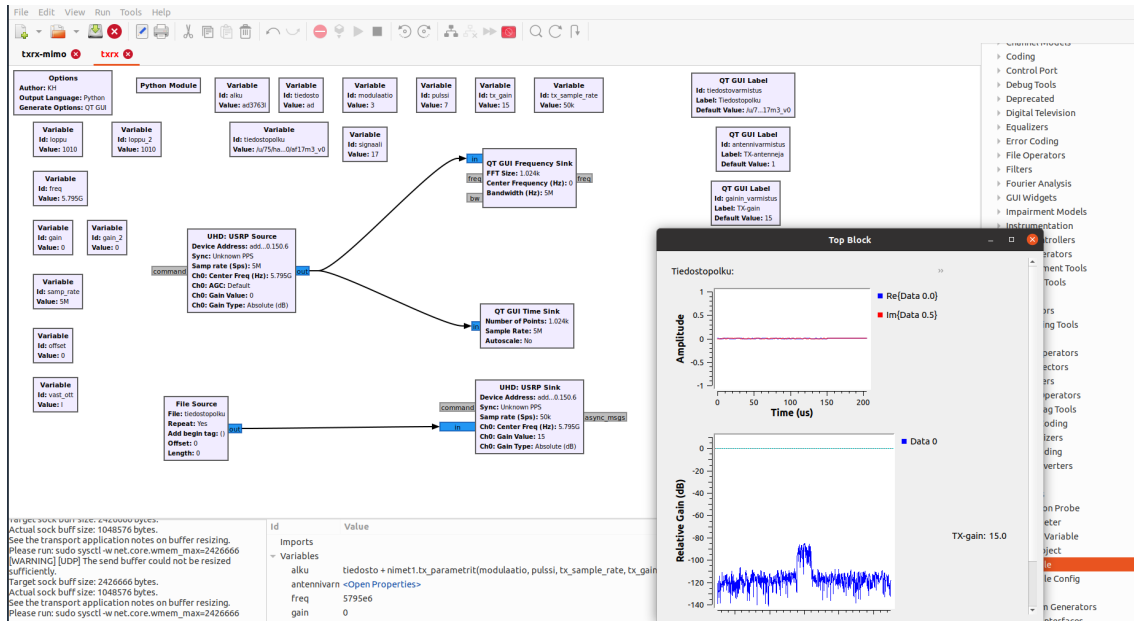
### 3.3 Laskennalliset menetelmät

Energiailmäisimessä signaalin teho eli energia  $Y$  lasketaan seuraavasti (Biglieri et al., 2012):

$$Y = \int |y(t)|^2 dt \quad (1)$$

Koska signaali nollakeskiarvoistetaan, on sen teho sama kuin sen varianssi, joten jäljempänä kutsutaan sitä sekä tehoksi että varianssiksi. Yllä  $y(t)$  on ajassa muuttuva vastaanotto eli signaali tai kohinaa. Signaalista on otettu näytteitä  $y_n$  diskreetteinä ajanhetkinä  $n$ . Tehosta saadaan muodostettua energiailmäisimen testisuure (Biglieri et al., 2012):

$$Y = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} |y_n|^2 \quad (2)$$



Kuva 3: Ruutukaappaus Gnuradio Companionin graafisesta käyttöliittymästä. Systemi on muodostettu vaalean violeteista palikoista, joista nuolella yhdistetyt lähettävät tai vastaanottavat signaaleja ja muut ovat muuttujia, joihin on tallennettu mitausparametrien arvoja. Kuvan tapauksessa *UHD : USRP Sink* -palikka lähettää tiedostosta lukemansa signaalin ja *UHD : USRP Source* -palikka vastaanottaa sitä erillisellä antennilla. Jälkimmäinen palikka myös piirtää vastaanottamansa signaalin kuvan harmaapohjaisen ikkunan aika-amplitudi- ja taajuus-intensiteetti-kuvaajiin käytännössä reaaliajassa.

Yllä  $N$  on jatkuvasta signaalista mitattujen näytteiden lukumäärä, ja  $y_n$  näyte indeksillä  $n$ . Nähdään siis, että testisuure kaavassa (2) on lähestulkoon otosvarianssi nollakeskiarvoisesta  $y$ :stä lukuunottamatta kertoimen nimittäjää, joka  $N - 1$ :en sijaan on  $N$ . Täten testisuure approksimoi todellista signaalin varianssia eli tehoa. Testisuureta valittuun kynnyksarvoon vertaamalla päätetään, onko kyseessä signaali vai kohinaa. Menetelmä olettaa tällöin, että signaalin ja kohinan varianssien summa on kohinan varianssia suurempi, minkä vuoksi se ei erota riittävän heikkoja tai vaimentuneita signaaleja kohinasta.

Tässä työssä mitatut, signaaleita tai kohinaa sisältävät binääritiedostot luettiin ensin Matlabilla kompleksisiksi vektoreiksi Matlabin *fread*-funktion avulla. Näin päästiin muotoon, jossa signaalin tai kohinan saattoi esimerkiksi piirtää kuvaajaan.

Saadut vektorit jaettiin seuraavaksi Matlabilla 500 näytearvon vektoreiksi. Jakaminen oli kannattavaa, sillä mitattujen binääritiedostojen pituus vaihteli ja vakiopituiset vektorit olivat helpompia jatkokäsiteltäviä. Lisäksi energiailmaisinta käytettäessä on lyhyestä vektorista todennäköisempää havaita lyhyitäkin signaalipurskeita, sillä energiailmaisimen tutkima signaalin teho lasketaan aina yhdelle vektorille, joita voidaan kutsua myös ikkunoiksi. Pidemmän vektorin tapauksessa voisi purskeen eli pulssin aiheuttama signaalin tehon hetkellinen nousu kadota keskiarvoistuksen myötä.

Pituudeltaan vakioituista vektoreista vähennettiin seuraavaksi niiden keskiarvo,

jolloin DC:n eli tasavirran (direct current) aiheuttama mahdollinen poikkeama I:n ja Q:n arvoihin saatiin poistettua. Tasavirtapoikkeama johtuu ohjelmistoradiolaitteistosta ja voisi vääristää tuloksia. Sen jälkeen energiailmaisimelle tarvittava testisuure määritettiin kullekin vektorille kaavan (2) avulla. Testisuureta verrattiin kynnyksarvoon, ja kynnyksarvon ylittyessä luokiteltiin vektori signaalia sisältäväksi. Vastaavasti testisuureen ollessa kynnyksarvoa matalampi luokiteltiin vektori kohinaksi.

Kynnyksarvojen  $\lambda_{fa}$  määrittämiseen käytettiin kaavaa (3), jonka [Ye ja Grosspietsch \(2008\)](#) johtavat virheilmaisun todennäköisyydestä:

$$\lambda_{fa} = \sigma_n^2 \left( 1 + \frac{Q^{-1}(p_{fa})}{\sqrt{M/2}} \right) \quad (3)$$

Kaavassa  $Q^{-1}$  on Q-funktion käänteisfunktio ja  $p_{fa}$  virheilmaisun todennäköisyyden yläraja, jonka arvoksi sijoitettiin tässä työssä 0,1.  $M$  taas kuvaa näytteiden lukumäärää eli tässä vektorin pituutta, joten sille käytettiin arvoa 500.  $\sigma_n^2$  on kohinan varianssi, joka tässä työssä määritettiin ennalta kohinamittauksista vastaavasti kuin tutkittavien signaalien varianssit.

Kynnyksarvot määritettiin erikseen eri ohjelmistoradioiden vastaanottoantenneille, antennivahvistuksen arvoille, keskitaajuuksille ja näytteistystaajuuksille, koska kohinan varianssi saattoi olla eri näissä tapauksissa. Tietyllä parametrijhdistelmällä mitattujen kohinavektorien variansseista otettiin keskiarvo, joka kaavaan (3) sijoittamalla saatiin kynnyksarvo kyseisille vastaanottoparametrien arvoille. Kun signaalitiedostosta määritettyä varianssia oli verrattu samoille vastaanottoparametreille määritettyyn kynnyksarvoon kuvan 4 mukaisesti, se tulkittiin kohinaksi tai signaaliksi.

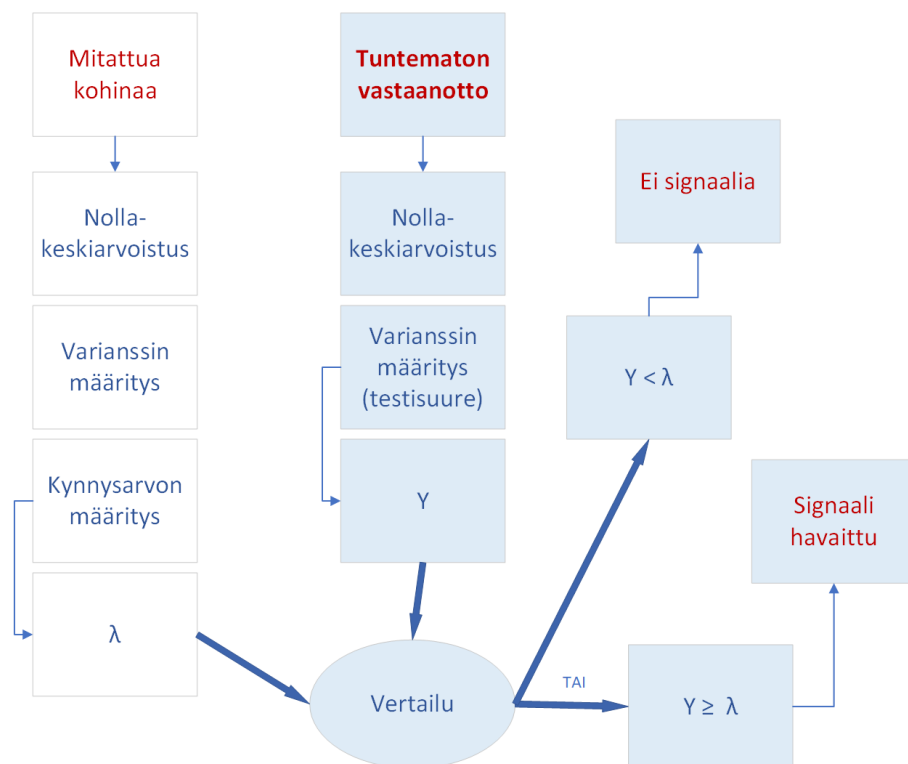
Käytettäessä tunnettua signaalitiedostoa kyettiin myös määrittämään virhetodennäköisyyksiä ilmaisimelle. Ilmaisimen ulostulon erotessa tiedetystä oikeasta tuloksesta on kyseessä joko virheilmaisus, jos ilmaisimella löytyy olemattoman signaalin, tai väärä negatiivinen havainto, jos todellista signaalia ei löydetä.

Kaavoissa (4) ja (5) on esitetty todennäköisyydet virheilmaisulle ja väärille negatiivisille tuloksille:

$$p_{FA} = p(LS|K) \quad (4)$$

$$p_{MD} = p(LK|S) = 1 - p(LS|S) = 1 - p_D. \quad (5)$$

Kaavan (4) mukaisesti virheilmaisun eli väärin positiivisten todennäköisyys  $p_{FA}$  (FA: False Alarm) on todennäköisyys sille, että ilmaisimella luokittelee signaaliksi (tapahtuma  $LS$ ), kun vastaanotto on todellisuudessa kohinaa  $K$ . Vastaavasti väärin negatiivisten todennäköisyys  $p_{MD}$  (MD: Missed Detection) kaavassa (5) on ilmaisimen luokittelun kohinaksi  $LK$  ehdollinen todennäköisyys, kun siihen syötetään signaali  $S$ . Kaavasta (5) nähdään myös, että väärin negatiivisten todennäköisyys  $p_{MD}$  on ilmaisutodennäköisyys  $p_D$ :n komplementti (D: Detection). ([Biglieri et al., 2012](#))



Kuva 4: Työssä toteutetun energiailmäsimen toiminta. Valkoiset ruudut suoritetaan etukäteen, minkä jälkeen siniset ruudut käydään läpi joka kerran, kun uusi vastaanotto otetaan tutkittavaksi. Kynnysarvoa merkitään  $\lambda$ :lla ja tutkitulle vastaanotolle määritettyä testisuureta  $Y$ :llä.

## 4 Tulokset

### 4.1 Mittausparametrit

Tuloksissa käsitellyissä, USRP-ohjelmistoradioilla suoritetuissa mittauksissa käytetyt vastaanotto- ja lähetyksparametrit on koottu taulukkoon 2. Käytetyillä ohjelmistoradioilla taajuuskaistan ja näytteistystaajuuden arvot ovat samat. Kynnysarvojen määrittämisessä ja vastaanotettujen kohinan ja signaalien ikkunoinnissa käytettyjä numeerisia parametrejä on eritelty taulukossa 3.

Taulukko 2: Mittauksissa käytettyjä parametrien arvoja.

Parametri	Käytetyt arvot
<b>Keskitaajuus</b>	2440 MHz ja 5795 MHz
<b>Vastaanoton antennivahvistus</b>	0, 10, 20, ..., 90 dB
<b>Vastaanoton näytteistystaajuus</b>	1 MHz ja 5 MHz
<b>Lähetyksen antennivahvistus</b>	0 dB
<b>Lähetyksen näytteistystaajuus</b>	5 MHz

Taulukko 3: Kynnysarvojen määrittämisessä ja mitattujen tulosten jatkokäsittelyssä käytetyt parametrien arvoja.

Parametri	Käytetyt arvot
<b>Ikkunan pituus (<math>M</math> kaavaan (3))</b>	500 näytepistettä
$p_{fa}$ (kaavaan (3))	0,1
<b>Ikkunoita mittauksessa</b>	300

## 4.2 Kohinan varianssi kynnysarvojen määrittämisessä

Työssä määritettiin kynnysarvot kaavan (3) mukaan antenni-, RX-vahvistus-, keskitaa-juus- ja näytteistystaajuuskohtaisesti. Jokaiselle käytetylle parametrijohdistelmälle mitattiin kohinan teho, josta kynnysarvo laskettiin. Käytetyt parametrien arvot ovat taulukossa 2.

Ensin tarkastellaan eri mittausparametrien, keskitaaajuuden, antennivahvistuksen ja taajuuskaistan, vaikutusta kohinatehoon. Työssä käytetyillä ohjelmistoradioilla näytteistystaajuus ja taajuuskaista ovat samat, joten mainittavat taajuuskaistan arvot ovat samalla myös näytteistystaajuuden arvoja.

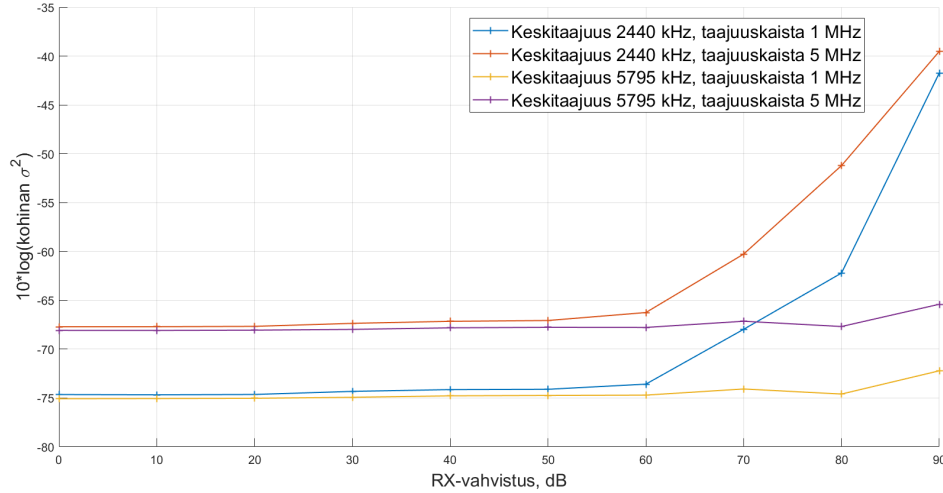
Kuvasta 5 nähdään kohinan varianssin muutos vastaanoton antennivahvistuksen eli RX-vahvistuksen funktiona kahdella eri keskitaaajuudella ja kahdella eri taajuuskaistalla. Varianssi pysyy jokseenkin vakiona antennivahvistuksen ollessa alle 60 dB, mutta nousee keskitaaajuudesta riippuen merkittävästikin tätä suuremmilla vahvistuksilla. Samalla varianssin arvolla ei siis voida luotettavasti kuvata eri antennivahvistuksilla vastaanotettua kohinaa, joten kynnysarvot ja kohinan varianssit kannattaa pitää vahvistuskohtaisina.

Kuvan 5 käyristä kaksi kuvaa kohinan varianssia 2440 MHz:n ja kaksi 5795 MHz:n keskitaaajuudella. Kuvasta nähdään, että merkittävin ero näiden käyräparien välillä on kulmakerroin yli 60 dB:n antennivahvistuksella. Alemman keskitaaajuuden käyrät nousevat jyrkästi, kun taas ylempää taajuusaluetta kuvaavien käyrien nousu on hyvin pientä ja alkaa suuremmilla vahvistuksen arvoilla noin 80 desibelin kohdalla. Suurilla antennivahvistuksilla kohinan varianssi siis kasvaa erityisesti alemmalla keskitaaajuudella, mistä nähdään, että ylempällä keskitaaajuudella kohina on vähäisempää. Tulos kuulostaa järkevältä sen valossa, että kaukaisten kohinalähteiden merkitys vähenee käytettäessä korkeampia taajuuksia (Kosola ja Solante, 2013). Havaittu ero keskitaaajuuksien välillä myös puoltaa kynnysarvojen määrittämistä niille erikseen.

Kuvan 5 kuvaajista havaitaan, että kohinan varianssi on odotetusti suurempi leveämmällä 5 megahertsin taajuuskaistalla kuin 1 MHz:n kaistalla. Kohinan varianssin riippuessa täten näytteistystaajuudesta voidaan pitää perusteltuna taajuuskaistakoh- taisten kynnysarvojen määrittämistä.

Kohinatehon arvoja eri vastaanottoantenneille on esitetty kuvassa 6 desibeleinä RX-vahvistuksen funktiona. Kuvassa keskitaaajuus on 5795 MHz ja taajuuskaista 1 MHz. Antennit A, B, C ja D kuuluvat yhteen ja vastaavasti antennit E ja F yhteen ohjelmistoradioon. Kaikki antennit ovat vastaanottaneet kohinaa samanaikaisesti. Kuvassa antennien A ja C lähes yhtenevä vastaanotetun kohinan teho eroaa jonkin verran antennien B ja D tasosta. Havaitaan siis, että saman ohjelmistoradion eri



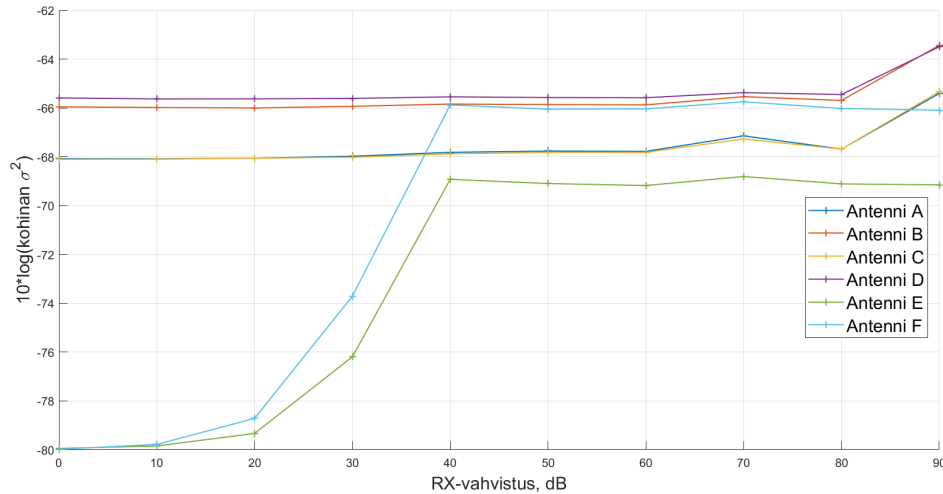


Kuva 5: Kynnysarvojen määrittämisessä käytetyn, kohinalle määritetyn varianssin kymmenellä kerrottu, kymmenkantainen logaritmi vastaanoton (RX) antennivahvistuksen funktiona kahdella eri keski- ja näytteistystaajuudella yhdelle antennille. Käytetyillä ohjelmistoradioilla taajuuskaista on näytteistystaajuuden suuruinen.

antenneilla voi olla ero kohinatasossa. Huomattavasti merkittävämpi ero havaitaan eri ohjelmistoradioiden antennien välillä matalilla vahvistuksilla. Tällöin esimerkiksi ero antennien F ja D vastaanottaman kohinan välillä on merkittävä.

Erot antennien vastaanottaman kohinan välillä vaihtelevat myös eri keskitäajuuksien ja taajuuskaistojen suhteen, eikä saman antennin vastaanottama kohina ole aina voimakkainta. Siten kuva 6 on vain esimerkki antennin vaikutuksesta kohinatasoon. Voidaan kuitenkin olettaa, että jokaiselle antennille erikseen kohinan varianssista määritettävät kynnysarvot lisäävät energiailmaisimen tarkkuutta antennien välisen hajonnan vuoksi. Antennikohtaisten kynnysarvojen myötä huomioidaan samalla myös erot kohinatasossa eri ohjelmistoradioiden välillä.

Kynnysarvojen toimivuus edellyttää kohinan varianssin ennustettavaa käyttäytymistä. Kynnysarvoja määritettäessä oletettiin kohinan varianssi eri parametrien eli antennin, vastaanoton antennivahvistuksen, keskitäajuuden ja taajuuskaistan funktioksi sekä vakioksi eri mittauskertojen välillä. Kohinan varianssin hajontaa mittauskerran aikana on havainnollistettu kuvassa 7. Siitä nähdään, että mittauskerran sisäinen hajonta kohinatehossa on noin 1 dB vahvistuksesta riippumatta, joten hajonta on melko pientä. Kuvaan ei ole piirretty selkeyden vuoksi korkeampien vastaanoton vahvistuksen arvoja, joilla hajontakin kasvaa. Hajonta kasvaa luonnollisesti myös lyhyempää ikkunakokoa käytettäessä. Kuvassa 7 ikkunan pituus on 500 näytepistettä. Mittauskertojen välillä ei varianssin havaittu merkittävästi vaihtelevan.



Kuva 6: Kynnysarvojen määrittämisessä käytetyn, kohinalle määritetyn varianssin kymmenellä kerrottuna, kymmenkantainen logaritmi vastaanoton (RX) antennivahvistuksen funktiona kuudelle vastaanottoantennille. Antennit A-D kuuluvat taulukossa 1 B:llä merkittyyn ohjelmistoradiioon, ja antennit E ja F A:lla merkittyyn ohjelmistoradiioon. Kohina on vastaanotettu keskitaajuudella 5795 MHz ja näytteistystaajuudella 1 MHz. Käytetyillä ohjelmistoradioilla taajuuskaista on näytteistystaajuuden suuruinen.

## 4.3 Energiailmaisimen toiminta

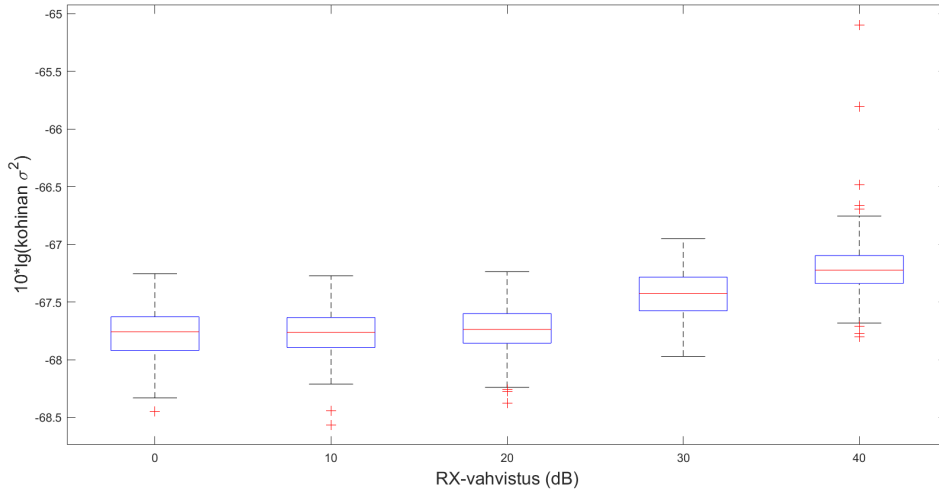
### 4.3.1 Kohinasignaalin tunnistus

Energiailmaisimen toimivuuden varmistamiseksi syötettiin energiailmaisimeen mitattua kohinaa. Kyseinen kohinasignaali oli kuitenkin eri mittauksesta kuin kynnysarvojen määrittämisessä käytetty kohina. Energiailmaisin luokitteli kohinan pitkillä ikkunoilla ja pienellä virheilmaisun ylärajalla kohinaksi todennäköisyydellä 1, joten sen voidaan todeta toimivan jatkuvan kohinan tunnistamisessa. Parametrejä muuttamalla kuitenkin havaittiin, että ikkunan pituuden lyhentyessä tai virheilmaisun ylärajan eli kaavan (3) parametrin  $p_{fa}$  kasvaessa ilmaisimen luokitteli kohinaa myös signaaliksi, joten ilmaisimen suorituskyky riippuu valituista parametrien arvoista.

### 4.3.2 Jatkuva-aikaisten signaalien ilmaisu

Laskettuja kynnysarvoja kokeiltiin ja Matlabilla toteutetun energiailmaisimen toimivuutta tutkittiin hyödyntämällä referenssimittauksia, joissa lähetetty signaali tunnettiin. Kynnysarvot oli määritetty kaavan (3) avulla käyttämällä muuttujalle  $p_{fa}$  arvoa 0,1 ja muuttujalle  $M$  arvoa 500. Vertaamalla vastaanottoa tunnettuun lähetykseen saatiin määritettyä energiailmaisimelle virheilmaisun ja väärin negatiivisten tulosten todennäköisyydet. Koska data oli tunnettua, tiedettiin jatkuvan lähetyksen tapauksessa, että koko vastaanotto tulisi luokitella signaaliksi. Vastaavasti kohinamittausten oletettiin kynnysarvoja määritettäessä tuottaneen vain kohinaa.

Vastaanotosta otetut ikkunat merkittiin vääriksi negatiivisiksi, jos energiailmaisimen



Kuva 7: Kohinan varianssien boxplot-kuvaajat desibeleinä eri vastaanoton vahvistuksilla yhdelle vastaanottoantennille. Yksi sininen laatikko on piirretty yhdestä mittauksesta, ja se sisältää kvantiilien väliset 50 % mittauksen ikkunoiden kohinatehoista. Punainen taso laatikon keskellä kuvaa ikkunoiden kohinatasojen mediaania. Mustien rajojen ulkopuoliset pisteet kuvaavat vieraita havaintoja (outliers). Kuvan mittauksissa käytettiin keskitaajuutta 2440 MHz ja taajuuskaistaa 5 MHz.

ei ollut havainnut signaalia. Väärien negatiivisten tulosten todennäköisyys saatiin seuraavaksi laskemalla virheellisten ikkunoiden osuus kaikista.

Ideaalisessa ilmaisimessa nollahypoteesi ainoastaan kohinaa sisältävästä vastaanotosta hylätään, jos ja vain jos signaalia vastaanotetaan. Tällöin sekä virheilmaisun että väärien negatiivisten todennäköisyydet olisivat nolliä, ja ilmaisimien luokittelee vastaanoton aina oikein. Käytännössä ideaaliseen tapaukseen ei välttämättä päästä, mutta virhetodennäköisyyksien avulla voidaan arvioida ilmaisimen toimivuutta.

Jatkuvalähetyksisen signaalin ollessa kyseessä sisältää vastaanotto todellisuudessa ainoastaan signaalia. Kuvaan 8 on piirretty ilmaisutodennäköisyys  $p_D$  eri vastaanottoantenneille estimoidun signaali-kohinasuhteen funktiona, kun toisella ohjelmistoradiolla on vastaanotettu toiselta lähetettyä, jatkuva-aikaista UMTS-signaalia. Estimointi on suoritettu kaavalla (6).

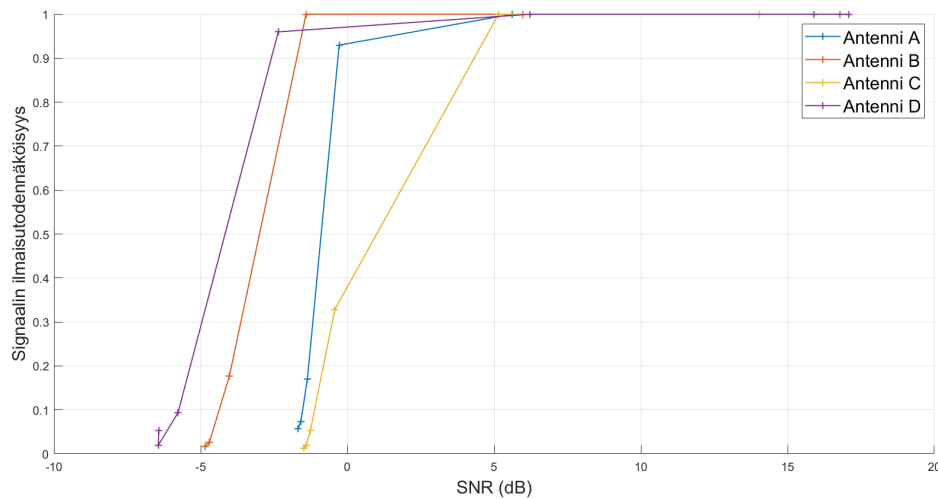
$$SNR \approx 10 \cdot \log_{10}\left(\frac{\sigma_{\text{signaali}}^2}{\sigma_{\text{kohina}}^2}\right) = 10 \cdot \log_{10}\left(\frac{\sigma_{\text{signaali\&kohina}}^2 - \sigma_{\text{kohina}}^2}{\sigma_{\text{kohina}}^2}\right) \quad (6)$$

Eri vastaanoton vahvistuksia vastaavat estimoidut signaali-kohinasuhteet on määritetty sijoittamalla kaavaan (6) kullakin vastaanoton vahvistuksella mitatut signaalin ja kohinan varianssit. Tällöin on oletettu, että kohina ja signaali ovat keskenään riippumattomia, jolloin signaalin varianssi saadaan vähentämällä signaalia ja kohinaa sisältävän vastaanoton varianssista  $\sigma_{\text{signaali\&kohina}}^2$  kohinan varianssi.

Kuvasta 8 nähdään, että signaalien ilmaisun luotettavuus kasvaa signaali-kohinasuhteen parantuessa vahvistuksen myötä. Tulos on odotettu, sillä kuten luvussa 2 on mainittu, toimii energiailmaisimien yleisesti vain riittävän voimakkailla signaaleilla tai

riittävän pitkille näytesekvensseille. Kuvasta 8 havaitaan, että ilmaisutodennäköisyys on tässä esimerkissä 1, kun estimoitu signaali-kohinasuhde ylittää 7 dB. Tällöin kaikki mitatun vektorin osat on luokiteltu oikein signaaliksi.

Lisäksi kuvasta 8 huomataan, että vastaanottoantennien toiminnassa on eroa saman ohjelmistoradionkin sisällä. Ilmaisutodennäköisyys on C-antennille keskimäärin muita matalampi, mikä tarkoittaa, että antennin C avulla kerätyt havainnot signaalista luokitellaan tässä tapauksessa kohinaksi muita antenneja useammin. Kuva 8 on esimerkinomainen, eivätkä siitä luettavat lukuarvot päde yleisesti. Tarkempia tuloksia saataisiin myös suorittamalla kriittisen alueen kohdalla mittauksia tiheämmin eri RX-vahvistuksen arvoilla. Tässä tapauksessa mittauksia on otettu vain 10 dB:n välein.



Kuva 8: Signaalin ilmaisutodennäköisyys  $p_D$  estimoidun signaali-kohinasuhteen funktiona saman ohjelmistoradion eri vastaanottoantenneille. Todennäköisyydet on määritetty keskitaajuudella 2440 MHz ja taajuuskaistalla 5 MHz vastaanotettua jatkuvalähetyksistä UMTS-signaalia energiailmaisimella luokittelemalla. Signaali-kohinasuhde on estimoitu kaavalla (6) sijoittamalla antennivahvistuksilla 0, 10, 20, ..., 50 dB mitatut vastaanoton eli signaalin ja kohinan sekä pelkän kohinan varianssit.

### 4.3.3 Purskeisten signaalien ilmaisu

Purskeisille signaaleille käytettiin samoja kynnyksarvoja kuin jatkuva-aikaisille signaaleille. Purskeisten signaalien ilmaisun arviointi edellytti tietoa todellisista signaalipulssikohdista. Purskemittauksesta etsittiin kohta, jossa vastaanotto korreloi eniten tunnetun lähetysten kanssa, jolloin löydettiin yksi signaalipurske. Loput signaalipurskeet löydettiin tasaisen etäisyyden välein ensimmäisestä purskeesta, koska vastaanotettujen purskeiden etäisyydet kyettiin määrittämään lähetetyn tiedoston ja käytettyjen näytteistystaajuuksien perusteella.

Kohdat, joissa malli vastaanotosta osoitti olevan signaaleja, joita ilmaisun ei kuitenkaan havainnut, merkittiin vääräksi negatiivisiksi. Vastaavasti ne kohdat, jotka

ilmaisimien luokittelu signaaliksi ja malli kohinaksi, merkittiin virheilmaisuuksi. Todennäköisyydet kummallekin virheelle määritettiin seuraavaksi laskemalla niiden osuudet kohinakohtien lukumäärästä virheilmaisun ja signaalia sisältävien kohtien lukumäärästä väärin negatiivisten kohdalla.

Purskeisten signaalien ilmaisu on jatkuvalähetysisiä signaaleja haastavampaa. Toisin kuin jatkuva-aikaisella signaalilla, purskeista signaalia vastaanottaessa ikkunan eli vektorin sisältämä teho vaihtelee merkittävästi sen mukaan, mikä on signaalin ja kohinan osuus mittausikkunassa. Tällöin onnistuneen luokittelun kannalta kriittisiksi muodostuvat ikkunan pituus ja aloituskohta, pulssin pituus sekä peräkkäisten ikkunoiden päällekkäisyys. Mitä lyhyempi signaalipurske on, sitä lyhyempiä ikkunoita on käytettävä, jotta purskeen aiheuttama vastaanoton varianssin hetkellinen nousu huomataan. Toisaalta vain osittain ikkunaan osuva pulssi ei välttämättä saa ikkunalle laskettavaa testisuureta ylittämään kynnysarvoa, jolloin ikkunan aloituskohta vaikuttaa ilmaisuun. Päällekkäisten ikkunoiden avulla voidaan parantaa ilmaisua, koska silloin kasvatetaan signaalin todennäköisyyttä osua kokonaan ikkunaan. Tällöin virheiden määrittäminen ja virhetodennäköisyyksien laskenta kuitenkin vaikeutuvat. Tässä työssä käytettiin ikkunan pituutena 500 näytearvoa, ja ikkunoiden välillä ei ollut päällekkäisyyttä eli yhteisiä pisteitä. Ikkunan pituus vaikutti ilmaisimen toimintaan ja virhetodennäköisyyksiin, mutta jatkotutkimuksen aiheeksi jää ikkunoinnin tarkempi vaikutus energiailmaisimen toimivuuteen.

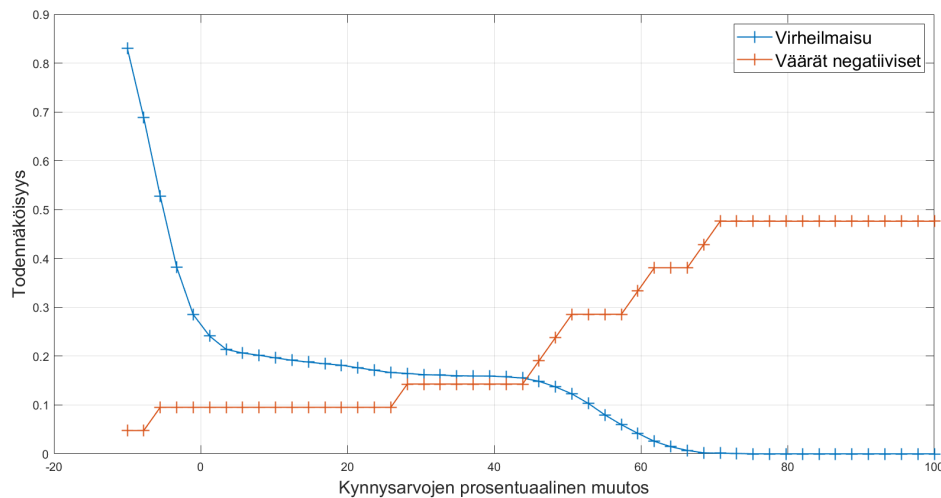
Purskeisella signaalilla voidaan laskea samasta mittauksesta väärin negatiivisten tulosten todennäköisyyden lisäksi myös virheilmaisun todennäköisyys, sillä ilmaisimen ei tulisi luokitella signaalipulssien välistä kohinaa signaaliksi vaan erotella purskeet havaintojen joukosta. On myöskin päätettävä, miten virhe määritellään tapauksissa, joissa signaalipulssi osuu ikkunaan vain osittain. Tässä työssä tärkeämpää oli kaikkien pulssien löytyminen kuin virheilmaisun minimoiminen. Virhetodennäköisyydet määritettiin siten, että edes osittaisen signaalipurskeen sisältävän ikkunan luokittelu kohinaksi johti väärään negatiiviseen tulokseen eli virheeseen.

Virheilmaisujen määrää voidaan vähentää kasvattamalla kynnysarvoa. Kuvasta 9 nähdään, että virheilmaisun todennäköisyyden pienentyessä kasvaa vastaavasti väärin negatiivisten tulosten todennäköisyys. Kuvan käyrät on piirretty keskitajuudelle 2440 MHz, vastaanoton vahvistukselle 30 dB ja taajuuskaistalle 5 MHz. Kuvassa mainitut virhetodennäköisyydet on piirretty käytettyjen kynnysarvojen suhteellisen muutoksen funktiona, ja siitä nähdään virheilmaisun todennäköisyyden kasvavan kynnysarvojen pienentyessä ja väärin negatiivisten tulosten todennäköisyyden vastaavasti kasvavan kynnysarvojen kasvaessa. Tämä on intuitiivista, sillä korkeilla kynnysarvoilla kohinan ja heikoimpien signaalien taso ei ylitä kynnysarvoa, mikä johtaa väärin negatiivisiin tuloksiin. Vastaavasti matalan kynnysarvon ylittävät signaalien lisäksi myös voimakkaimmat kohinatehot, jolloin tehdään virheilmaisua.

Kuvan 9 perusteella voidaan kyseisen purskeisen signaalin ilmaisua parantaa muokkaamalla tarvittaessa kynnysarvoja. Molemmat virhetodennäköisyydet eivät kuitenkaan ole samanaikaisesti nollija, joten niiden välillä on tehtävä kompromissi. Työssä määritellyille kynnysarvoille eli kuvan 9 x-akselin nollakohdassa virhetodennäköisyydet ovat kuvan tapauksessa eli antennille A, keskitajuudelle 2440 MHz, vahvistukselle 30 dB ja taajuuskaistalle 5 MHz  $p_{FA} = 0,25$  ja  $p_{MD} = 0,10$ . Esimerkik-

si ilmavalvontatutkissa virheilmaisui- ja havaitsemistodennäköisyydet ovat vastaavasti  $10^{-6}$ :n ja 0,8:n luokkaa (Klemola ja Lehto, 1998), jolloin väärin negatiivisten todennäköisyys on noin 0,2. Ilmavalvontatutkien tarkkuuden ja herkkyyden yhdistelmään ei tällä ilmaisimella kuvan 9 tapauksessa päästä, sillä vaikka kynnsarvot valittaisiin siten, että  $p_{FA} \leq 10^{-6}$ , on väärin negatiivisten tulosten todennäköisyys tällöin 0,48. Jos taas kynnsarvot valittaisiin täyttämään ehto  $p_{MD} \leq 0,2$ , olisi hyväksyttävä kuvan 9 mukaan vähintään 0,15:n virheilmaisutodennäköisyys. Käytettävästä sovelluksesta riippuu, onko  $p_{FA}$ :n vai  $p_{MD}$ :n minimointi ensisijaista. Vastaavanlaisia tuloksia saadaan myös muille vahvistuksille ja antennille, mikäli antennivahvistukset ovat alle 60 dB. Antenni C:n havaitaan kuitenkin poikkeavan jatkuvasti virhetodennäköisyyksissä, mistä nähdään, että määritetyt kynnsarvot sopivat paremmin toisille antennille kuin toisille, vaikka ne ovatkin antennikohtaisia.

Kuvan 9 avulla voidaan myös tutkia määritettyjen kynnsarvojen herkkyyttä. Kuvasta nähdään, että työssä määritettyjen kynnsarvojen 20 prosentin kasvu ei tässä tapauksessa erityisemmin vaikuta ilmaisimen toimintaan mitatulla purskeisella signaalilla. Sen sijaan aleneminen jo 5 prosentilla kaksinkertaistaa virheilmaisutodennäköisyyden noin 0,25:stä 0,5:een, joten kynnsarvoja ei kannata tässä esimerkissä pienentää määritetyistä.



Kuva 9: Virhetodennäköisyyksien eli virheilmaisun ja väärin negatiivisten tulosten todennäköisyydet kynnsarvojen suhteellisen muutoksen funktiona. Kynnsarvoja verrataan luvussa 3.3 kaavan (3) avulla määritettyihin kynnsarvoihin. Virhetodennäköisyydet on määritetty luokittelemalla kulloisiakin kynnsarvoja käyttämällä purskeista signaalia, joka on vastaanotettu keskitäajuudella 2440 MHz, antennivahvistuksella 30 dB ja näytteistystaajuudella eli tässä myös taajuuskaistalla 5 MHz.

## 5 Yhteenveto

Tässä työssä esiteltiin menetelmä USRP-ohjelmistoradioilla vastaanotettujen signaalien erottamiseen kohinasta. Mitatusta kohinasta määritettiin ensin kynnysarvot energiammaisimelle. Sitten mitatut eli vastaanotetut signaalit käsiteltiin vektormuotoon ja niille laskettiin tehoa eli varianssia kuvastava testisuure, jota verrattiin kohinan varianssista määritettyyn kynnysarvoon. Tämän perusteella energiammaisimien luokitteli vastaanoton joko signaalia sisältäväksi tai kohinaksi.

Työssä mitattiin kohinan variansseja eri antennilla, vastaanoton antennivahvistuksilla, keskitaajuuksilla ja taajuuskaistoilla. Vastaanotetun kohinan varianssi vaihteli eri parametrien välillä. Suuret vastaanoton vahvistukset nostivat kohinatehoa merkittävästi matalammalla tutkitulla keskitaaajuudella. Taajuuskaistan osalta havaittiin, että leveämmällä kaistalla vastaanotetaan enemmän kohinaa, jolloin myös kohinan varianssi kasvaa. Energiämmaisimen kynnysarvot ovat työssä suoraan verrannollisia kohinan varianssiin, joten eri parametreille päädyttiin määrittelemään erilliset kynnysarvot.

Mittausjärjestelmä aiheutti haasteita, sillä työssä käytettyjen ohjelmistoradioiden antennit vastaanottivat keskenään vaihtelevia kohinatasoja, minkä vuoksi määrittelyjä kynnysarvoja on hankala yleistää edes saman ohjelmistoradion eri antennille. Ohjelmistoradioita voidaan kalibroida mittausten aluksi pelkästä kohinasta koostuvalla vastaanotolla, mutta haasteena on, ettei voida varmasti tietää, onko kaistalla kohinan lisäksi lähetystä. Yksittäiselle antennille kohinataso pysyi kuitenkin käytännössä vakiona tietyllä vastaanottoparametrien yhdistelmällä, joten antenni- ja parametrikohaisia kynnysarvoja voidaan määrittää. Kynnysarvot olisi täten mahdollista määrittää ja taulukoida varsinaista käyttöä varten, jos käytettävät antennit ja vastaanottoparametrit ovat tiedossa etukäteen.

Energiämmaisimen toimintaa tutkittiin jatkuva-aikaisilla signaaleilla ja havaittiin, että ilmaisimien osaa erotella signaalit erinomaisesti suurilla signaali-kohinasuhteilla. Vastaavasti pienillä signaali-kohinasuhteen arvoilla ilmaisimen luokittelussa on virheitä. Onkin tunnettua, ettei energiammaisimien toimi liian heikoille signaaleille, jos näytämäärä on pieni. Energiämmaisimen implementointi todettiin täten toimivaksi.

Purskeiden signaalien ilmaisu oli jatkuvalähetyksisiä haastavampaa, ja signaalien luokittelussa oli useita virheitä. Työssä kuitenkin havaittiin, että kynnysarvoja muuttamalla voidaan merkittävästi vaikuttaa energiammaisimen toimintaan purskeiden tapauksessa. Kynnysarvoja kasvattamalla on mahdollista pienentää virheilmaisun todennäköisyyttä, mutta se tehdään väärin negatiivisten tulosten todennäköisyyden kustannuksella eli samalla kasvatetaan havaitsematta jäävien signaalien osuutta. Kynnysarvoja valittaessa onkin tehtävä kompromissi matalan virheilmaisun tai väärin negatiivisten tulosten todennäköisyyksien välillä, ja halutut virhetodennäköisyyksien ylärajat riippuvat käyttötarkoituksesta ja kyseessä olevasta sovelluksesta.

Koska käytettävät ohjelmistoradiot sekä eri käyttötarkoituksiin optimaaliset virhetodennäköisyydet ja siten myös kynnysarvot vaihtelevat, on kynnysarvot määritettävä tai optimoitava erikseen eri tilanteissa, mikä vähentää yksittäisten kynnysarvojen käyttökelpoisuutta. Kohinan varianssia tulisikin estimoida tarkasti joka vastaanotuksessa ja eri toimintaparametreilla signaalien käsittelyn aikana luotettavan ilmai-

sutuloksen saamiseksi, mitä hyödynnetään useissa tutkajärjestelmissä. Kohtuulliset virhetodennäköisyydet antavia kynnsarvoja voidaan tämän työn tulosten perusteella määrittää aina uudestaan halutuille parametreille estimoimalla ensin kohinan varianssia näillä vastaanottoparametreilla, jolloin kynnsarvojen generointi saadaan automatisoitua.

Näiden päätelmien yleispätevyyttä rajaa käytetty mittausten määrä. Lisäksi työssä on tutkittu ainoastaan tiettyjä USRP-ohjelmistoradioita, joten tuloksia ei ilman lisätutkimuksia voida soveltaa muihin laitteistoihin. Erilaisiin tuloksiin voisi johtaa myös mittausten suorittaminen toisenlaisessa mittaustilassa, jossa signaalin kulkema reitti ja heijastusten lukumäärä muuttuisivat. Erityisesti on huomattava, että signaalin voimakkuus heikkenee heijastusten ja välimatkan kasvun myötä, mikä muuttaa samalla signaalin tehoa ja pienentää sen todennäköisyyttä ylittää kynnsarvo. Kuten aiemmin on jo todettu, ei energiailmaisoin yleensä ottaen kykene erottamaan matalan signaali-kohinasuhteen signaaleja pienillä näytemäärillä.

Tässä työssä ei käsitelty tarkemmin purskeisten signaalien ilmaisun ikkunoinnin vaikutusta ilmaisimen toimintaan. Lisätutkimusta vaatii myöskin heikkojen signaalien tunnistus esimerkiksi erittäin suurilla näytemäärillä tai autokorrelaatiota hyödyntämällä.

## Viitteet

- E. Biglieri, A. Goldsmith, L. J. Greenstein, N. Mandayam, ja H. V. Poor. *Principles of Cognitive Radio*. Cambridge University Press, Cambridge, 2012. 308 s.
- Ettus Research. Ubx, a. Päivitetty 20.4.2020. Viitattu 24.7.2020. Saatavissa: <https://kb.ettus.com/UBX>.
- Ettus Research. X300/x310, b. Päivitetty 1.5.2020. Viitattu 24.7.2020. Saatavissa: <https://kb.ettus.com/X300/X310>.
- Ettus Research. Twinrx, c. Päivitetty 8.4.2020. Viitattu 24.7.2020. Saatavissa: <https://kb.ettus.com/TwinRX>.
- O. Klemola ja A. Lehto. *Tutkatekniikka*. Ensimmäinen painos. Otatieto, Helsinki, 1998. 275 s.
- J. Kosola ja T. Solante. *Digitaalinen taistelukenttä. Informaatioajan sotakoneen tekniikka*. Kolmas painos. Maanpuolustuskorkeakoulu, Sotatekniikan Laitos, Helsinki, 2013. 491 s.
- W. Lee ja I. F. Akyildiz. Optimal spectrum sensing framework for cognitive radio networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 7(10):3845–3857, 2008. Saatavissa: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4657330>.
- J. Lundén. *Spectrum Sensing for Cognitive Radio and Radar Systems*. Doctoral Dissertation, Helsinki University of Technology, Espoo, 2009.



- D. C. Montgomery. *Design and Analysis of Experiments*. John Wiley & Sons, Singapore, 1991. 649 s. Kolmas painos.
- J. Oksanen. *Machine Learning Methods for Spectrum Exploration and Exploitation*. Doctoral Dissertation, Aalto University School of Electrical Engineering, Helsinki, 2016.
- R. S. Pindyck ja D. L. Rubinfeld. *Econometric Models and Economic Forecasts*. Kolmas painos. McGraw-Hill, Singapore, 1991. 596 s.
- R. Tandra ja A. Sahai. Snr walls for signal detection. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2(1):4–17, 2008. Saatavissa: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4453895>.
- X. Tian, Z. Tian, E. Blasch, K. Pham, D. Shen, ja G. Chen. Sliding window energy detection for spectrum sensing under low snr conditions. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 16(12):1654–1663, 2016. Saatavissa: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/wcm.2639>.
- H. Urkowitz. Energy detection of unknown deterministic signals. *Proceedings of the IEEE*, 55(4):523–531, 1967. Saatavissa: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1447503>.
- Memik G. Ye, Z. ja J. Grosspietsch. Energy detection using estimated noise variance for spectrum sensing in cognitive radio networks. *2008 IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, ss. 711–716, 2008. Saatavissa: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4657330>.
- T. Yucek ja H. Arslan. A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 11(1):116–130, 2009. Saatavissa: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4796930>.