



TIETO- JA SÄHKÖTEKNIIKAN TIEDEKUNTA
ELEKTRONIIKAN JA TIETOLIIKENNETEKNIIKAN TUTKINTO-OHJELMA

KANDIDAATINTYÖ

LAD- ja WIBA-energiailmaisumenetelmien suorituskyky BPSK-signaalille

Tekijä

Mikko Kaikkonen

Ohjaaja

Johanna Vartiainen

Toukokuu 2021

Kaikkonen M. (2021) LAD- ja WIBA-energiailmaisumenetelmien suorituskyky BPSK-signaalille. Oulun yliopisto, tieto- ja sähkötekniikan tiedekunta, elektroniikan ja tietoliikennetekniikan tutkinto-ohjelma. Kandidaatintyö, 27 s.

TIIVISTELMÄ

Tässä työssä tutkittiin LAD- ja WIBA-energiailmaisumenetelmien suorituskykyä BPSK-signaalille erilaisissa tilanteissa. Tilanteita olivat signaalin sijainnin muuttaminen suhteessa WIBA-menetelmän ikkunoihin, sekä ilmaisutodennäköisyyden muuttaminen molemmille menetelmille. Lisäksi saatiin tietoa signaalin leveyden vaikutuksesta sekä LAD- että WIBA-menetelmän suorituskykyyn. Tutkimus tehtiin käyttämällä MatLab-ohjelmaa simuloimalla kohinaista BPSK-signaalia. Tutkimuksen motiivina oli tuottaa molemmista ilmaisumenetelmistä käyttö- ja vertailukelpoista dataa, mitä voidaan hyödyntää jatkotutkimuksessa, sekä tulevaisuudessa tietoliikenneverkostojen luotettavuuden parantamisessa. Tuloksista havaittiin WIBA-ikkunan sijoittelulla olevan pieni, enintään noin 1 dB (SNR-tasossa), ero suorituskyvyissä, kun verrattiin huonointa sijoittelua parhaimpaan mahdolliseen. Simuloimalla myös eri signaalin leveyksillä, pystyttiin toteamaan WIBA-menetelmän olevan tehokkaampi kapeilla kaistanleveyksillä. Erot eivät olleet kuitenkaan kovin suuria, vain muutaman desibelin luokkaa. Ilmaisutodennäköisyyden muuttamista tutkittaessa huomattiin erojen olevan käytännössä olemattomat WIBA-signaalille, johtuen signaalin täydellisestä sijoittelusta näissä simulaatioissa. LAD-menetelmän tapauksessa erot olivat merkittäviä. Väljimmistä ilmaisutodennäköisyydestä tiukimpaan oli eroa SNR-tasossa toistuvasti 11-13 dB, riippuen signaalin kaistanleveydestä. LAD-menetelmässä vaadittu SNR-arvo hyvään ($P_d=0.9$) ilmaisuun nousi lähes 10 dB, kun signaalin kaistanleveys muuttui 5 %:sta 20 %:iin kokonaiskaistanleveydestä.

Avainsanat: LAD-menetelmä, WIBA-menetelmä, energiailmaisuus, signaalin tunnistus, BPSK-modulaatio, MatLab, kognitiivinen radio

Kaikkonen M. (2021) Performance evaluation of LAD- and WIBA-energy detection methods for BPSK-signal. University of Oulu, Degree Programme in Electronics and Communications Engineering. Bachelor's Thesis, 27 p.

ABSTRACT

In this thesis, the performance of LAD and WIBA energy detection methods for a BPSK modulated signal was studied in different environments. The situations included changing the position of the signal in relation to the WIBA-windows and changing the definition of the detection probability for both methods. Additionally, information about the effect of signal width on the performance of both the LAD and WIBA methods was received. The study was performed using MatLab by simulating a BPSK-signal with noise. The motive of the study was to produce usable and comparable data from both detection methods, which can be utilized in further inspection, as well as be used for improving the reliability of telecommunication networks in the future. From the results, it was found that the effects of moving the signal in relation to the WIBA-windows to be small, at most 1 dB (in SNR-level) difference in performance between the worst- and best-case scenario. By simulating different signal widths, it was found that the WIBA-method performs better at narrower signal widths. The differences were not very large, at most a few decibels. While changing the definition of the detection probability, the effects for WIBA-method were found to be insignificant, due to the perfect window positioning. In the case of the LAD method, the changes were significant. Between the loosest and strictest definitions, the difference in SNR-level was repeatedly between 11-13 dB, depending on the signal bandwidth. In the LAD-method the required SNR value for good detection ($P_d=0.9$) increased by almost 10 dB when the signal bandwidth was increased from 5 % to 20 % of the total bandwidth.

Key words: LAD-method, WIBA-method, energy detection, signal detection, BPSK-modulation, MatLab, cognitive radio

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

SISÄLLYSLUETTELO

ALKULAUSE

LYHENTEIDEN JA MERKKIEN SELITYKSET

1	JOHDANTO	7
2	ENERGIAILMAISU	8
	2.1 Kynnyksen asettelu.....	8
	2.1.1 FCME-kynnysarvon laskeminen	9
	2.2 Signaalin ilmaisumenetelmät	10
	2.2.1 LAD-menetelmä	10
	2.2.2 WIBA-menetelmä.....	12
3	TULOKSET	13
	3.1 BPSK-modulaatio.....	13
	3.2 Signaalin sijainnin ja leveyden vaikutus suorituskykyyn.....	14
	3.3 Ilmaisutodennäköisyyden muuttaminen.....	18
	3.4 Pohdinta.....	22
4	YHTEENVETO	25
5	LÄHDELUETTELO	26

ALKULAUSE

Tämä kandidaatintyö on tehty osana kandidaatintutkinnon suorittamista Oulun Yliopiston tietojen ja sähkötekniikan tiedekunnassa. Aihe saatiin yliopiston tarjoamasta valikoimasta.

Työn ohjaajana toimi Johanna Vartiainen Oulun Yliopiston CWC-yksiköstä, jota haluan kiittää aktiivisesta tuen antamisesta työn aikana. Lisäksi haluan kiittää vanhempiani ja läheisiäni jatkuvasta tuesta opintojen aikana, sekä ylä- että alamäissä.

Oulussa 14.5.2021

Mikko Kaikkonen

LYHENTEIDEN JA MERKKIEN SELITYKSET

5G	Viidennen sukupolven datayhteys mobiiliteknikassa
ACC	Adjacent Cluster Combining, vierekkäisten klustereiden yhdistäminen
BPSK	Bipolar Phase-Shift Keying, binäärinen vaiheavainnus
dB	Desibeli
FCME	Forward Consecutive Mean Excision, eteenpäin suuntautuva peräkkäisten keskiarvojen menetelmä
FFT	Fast Fourier Transform, nopea Fourier-muunnos
LAD	Localization Algorithm based on Double-thresholding, kahta kynnystä käyttävä havaitsemismenetelmä
OFDM	Orthogonal Frequency-Division-Multiplexing, ortogonaalinen taajuusdeviaatio multipleksaus
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying, nelivaiheinen vaiheenavainnus
SNR	Signal-To-Noise Ratio, signaali-kohinasuhde
TVWS	TV white-space
WIBA	Windowing Based sensing method, ikkunapohjainen energiamuunnosmenetelmä
E_s	BPSK-modulaatio symbolin sisältämä energia
$FFTsize$	Taajuusnäytteiden määrä
$Freq_{dev}$	Tutkittavan signaalin taajuusdeviaatio
i.i.d	Independent and Identically Distributed, riippumaton ja identtisesti jakautunut
L	WIBA-lohkojen määrä
M	Lohkon pituus (WIBA-menetelmässä ikkunan pituus)
M_{center}	WIBA-ikkunan keskellä sijaitseva näyte
N	Näytteiden määrä
P_{FA}	Probability of false alarms, väärin hälytysten todennäköisyys
Pd	Ilmaisutodennäköisyys
Q	FCME-menetelmän näytejoukko
T	Kynnysparametri
Th	Kynnysarvo
T_s	Symbolin kesto BPSK-modulaatiossa
x_i	Näyte i
y	Joukon Q keskimääräinen teho
y_i	Näytteen i energia
Z_i	WIBA-lohkon sisältämä energia

1 JOHDANTO

Tietoliikennetekniikan kehittyessä nopeaa tahtia täytyy meidän usein pysähtyä ja miettiä, olemmeko oikeasti kulkemassa eteenpäin. On faktaa, että esimerkiksi 5G:n kehittyessä yhteydet ovat nopeutuneet huomattavasti, mutta ongelmana on edelleen yhteyksien kantavuuksien parantaminen ja vapaiden kaistojen saatavuus [1]. Kaupunkialueilla, missä asutus on tiheää, 5G tukiasemien tiheys on hyvin kattavaa, jolloin yhteydetkin ovat luotettavia. Ongelma syntyy, kun astumme ulos optimaaliselta alueelta esimerkiksi maaseudulle, missä yhteydet ovat selkeästi heikompia vähemmän kehittyneen tietoliikenneverkoston vuoksi.

Ongelmaan on esitetty useita ratkaisuja, joista yksi on spektrin havainnoinnin (spectrum sensing) hyödyntäminen. Tutkijat ovat esittäneet, että spektrin havainnointia voisi hyödyntää erityisesti alueilla, missä vapaat radiokaistat yhteyksille eivät ole niin helposti saatavilla. Menetelmä perustuu ideaan, missä lähetetty signaali voidaan asettaa esimerkiksi käyttämättömille TV white-space (TVWS) kaistoille [2]. Spektrin käyttäjien välisen häiriön, sekä yleisen järjestelmällisyyden säilyttämiseksi on tärkeää, etteivät käyttäjien signaalit mene päällekkäin kaistoilla. Tässä auttaa spektrin havainnointi, jonka avulla pystymme tekemään johtopäätöksiä kaistojen sisällöstä. Spektrin havainnointia ei käytetä pelkästään 5G-tekniologiassa, vaan se on ollut keskeisenä tutkimuskohteena myös ajoneuvoja varten luoduissa verkostoissa (VANET), missä yritetään auttaa luomaan turvallisempaa ajoympäristöä esimerkiksi itsestään ajaville autoille [3].

Spektrin havainnointimenetelmiä on olemassa useita erilaisia. Yleisimpinä pidetään energianilmaisumenetelmiä, syklostationääristen ominaisuuksien tunnistamista, sekä kompressoitua tunnistamista [4]. Tässä työssä keskitytään energiailmaisuuksiin ja erityisesti kahteen siihen perustuvaan menetelmään, kahta kynnystä käyttävään havaitsemismenetelmään (LAD) [5], sekä ikkunapohjaiseen energiailmaisumenetelmään (WIBA) [6]. Molemmissa on kyse eri tavoista käsitellä vastaanotettua signaalia, sekä laskea niille kynnysarvo [7]. Kynnysarvon laskennassa käytetään FCME (eteenpäin suuntautuva peräkkäisten keskiarvojen menetelmä) -menetelmää [8]. Kynnysarvon asettamisen tarkoituksena on erotella signaali kohinasta, jotta saavutetaan tietty varmuus signaalin tunnistamisessa. Kynnysarvot ovat yleensä mukautuvia, jolloin niille voidaan antaa jokin parametri (esimerkiksi väärien hälytysten todennäköisyys), minkä mukaan kynnysarvo määräytyy [9].

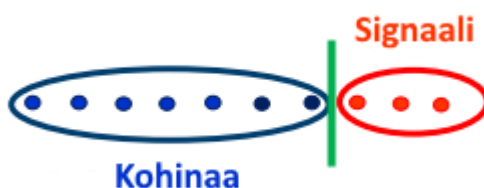
Tässä työssä tutkittiin kahta edellä mainittua menetelmää ja vertailtiin niitä binäärisellä vaiheavainnuksella (BPSK) moduloidulle signaalille. Ensimmäisessä tehtävässä arvioitiin WIBA-menetelmän suorituskykyä erilaisissa tilanteissa suhteessa ikkunan ja signaalien asetteluun (optimitilanteesta huonoimpaan mahdolliseen). Toisessa tehtävässä tarkasteltiin, miten ilmaisutodennäköisyyden määrittely vaikutti molempien menetelmien suorituskykyyn. Lisäksi tutkittiin, miten signaalien kaistanleveys vaikutti molempien menetelmien suorituskykyyn. Tutkimuskohteet ovat tärkeitä oikean elämän kannalta, koska ilmaisumenetelmien vertailu auttaa meitä valitsemaan tulevaisuudessa oikean menetelmän oikeaa tilannetta varten.

2 ENERGIAILMAISU

Energiaan pohjautuvan signaalin ilmaisun esitti ensimmäistä kertaa Urkowitz vuonna 1967 [10]. Energiailmaisuus on epäkoherentti signaalien ilmaisumenetelmä, mikä tekee siitä laskennallisesti hyvin yksinkertaisen ja hyötysuhteeltaan tehokkaan useisiin eri käyttötarkoituksiin. Energiailmaisussa lasketaan signaalin tehon keskiarvoa ennalta määrätyn spektrin yli ilman, että käytetään etukäteistietoa signaalista [11]. Tämä tekee siitä erittäin lupaavan vaihtoehdon esimerkiksi kognitiivisille radioille, missä radio on ohjelmoitu valitsemaan aina sopivin kaista spektriltä omaan käyttöön häiriöiden ja kaistaruhkan vähentämiseksi [12]-[14]. Kognitiivinen radio tutkii siis, onko kaistalla signaalia. Energiailmaisua pystytään käyttämään samalla tapaa myös toisinpäin, tutkimalla onko kaistalla häiriötä. Täten energiailmaisuus toimii myös työkaluna häiriönvaimennuksessa [8], [15].

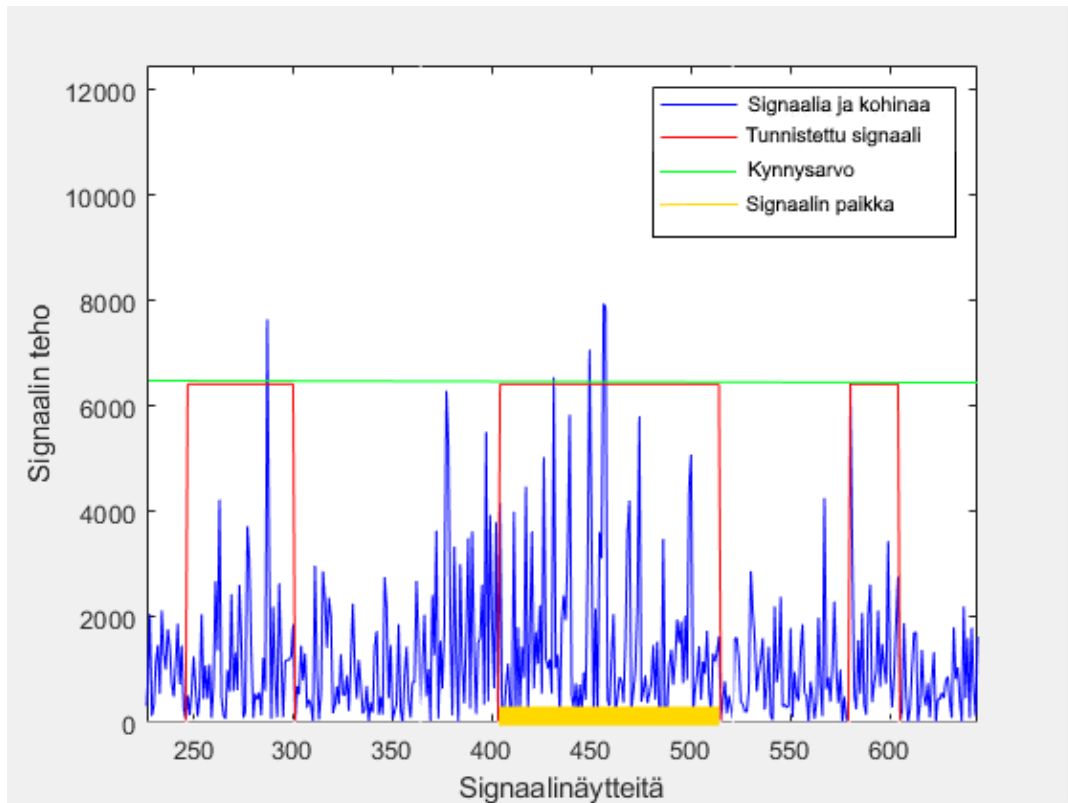
2.1 Kynnyksen asettelu

Energiailmaisussa käytettävä kynnyksarvo on sen tärkein ominaisuus ilmaisun kannalta. Kynnyksarvo määrittelee, minkä rajan näytteiden tulee ylittää, jotta ne määritellään signaaliksi. Kynnyksarvon alapuolella olevat arvot ovat siis määritelmän mukaan kohinaa. Kuvassa 1 esitettyä yksinkertaisesti kynnyksarvon merkitys.



Kuva 1. Vihreällä merkittynä kynnyksarvo, joka erottelee signaalin ja kohinan.

Työssä käytettävät LAD- ja WIBA-menetelmät käyttävät FCME-menetelmällä laskettua kynnyksarvoa signaalin ilmaisussa. Kynnykset ovat harvoin kiinteitä, johtuen kanavissa olevan kohinan ja häiriön arvaamattomuudesta. Yleensä käytetään mukautuvia kynnyksarvoja, jotka riippuvat jostain ympäristön vaikutustekijästä, esimerkiksi arvioidusta väärin hälytysten todennäköisyydestä P_{FA} . Kynnyksen asettelu pohjautuu lopulta siihen, miten korkea väärin hälytysten todennäköisyys systeemiin halutaan. Jos esimerkiksi kynnyksarvo on liian matala, saavutetaan erittäin korkea signaalin ilmaisutodennäköisyys, mutta samalla aiheutetaan korkea väärin hälytysten todennäköisyys. Signaalissa olevat sivukaistat ja kohinapiikit tunnistetaan helposti vahingossa signaaliksi tässä tapauksessa [16]. Kuvassa 2 on esitettyä tilanne, missä kynnyksarvo on asetettu liian alas. Signaalin todellinen sijainti on keltaisen palkin kohdalla näytevälillä 418-520. Johtuen liian matalasta kynnyksarvosta, myös kohinaa on virheellisesti tunnistettu signaaliksi.



Kuva 2. Esimerkki liian matalasta kynnysarvosta, joka on tunnistanut myös kohinaa signaaliksi.

2.1.1 FCME-kynnysarvon laskeminen

FCME-menetelmässä taajuusalueella otettujen näytteiden oletetaan olevan nollakeskiarvoisia ja itsenäisesti Gaussisesti jakautuneita (i.i.d), riippumatta siitä, että menetelmän on todettu toimivan myös silloin, kun kohina ei ole täysin Gaussista [17]. Näytteiden x_i energiaksi määritellään $y_i = |x_i|^2$, mikä noudattaa khiin neliöjakaumaa. Väärien hälytysten todennäköisyydelle saadaan ratkaistua kaava (1), kun oletetaan khiin neliöjakautuneiden muuttujien omaavan $2M$ vapausastetta [18].

$$P_{FA} = e^{-TM} \sum_{k=0}^{M-1} \frac{1}{k!} (TM)^k, \quad (1)$$

missä T on kynnysparametri. Kun oletetaan $M=1$, saadaan kaava supistettua muotoon [19]

$$T = -\ln(P_{FA}). \quad (2)$$

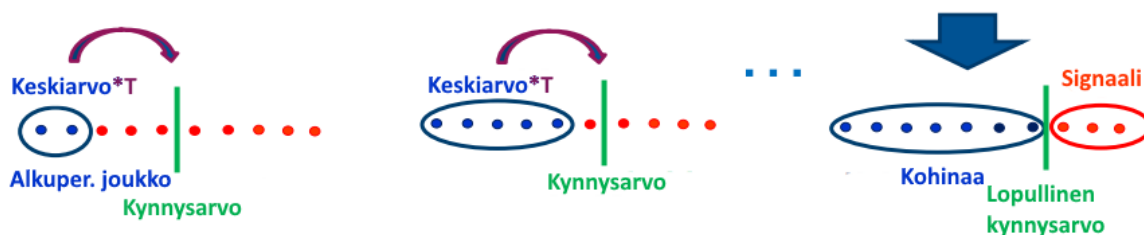
Nähdään, että kynnysparametrin arvo noudattaa käänteistä luonnollista logaritmia, kun $M = 1$. Yleisesti hyväksi todettu väärien hälytysten todennäköisyys on $P_{FA} = 0.01$, mikä tarkoittaa, että tilanteessa missä on pelkästään kohinaa, näytteistä 1 % ylittää kynnyn. Tällöin kynnysparametrin arvoksi saadaan $T = 4.605$.

Kynnysparametria käytetään, kun lasketaan uusia kynnysarvoja FCME-menetelmällä. FCME-kynnysarvon asettamisprosessissa signaalin näytteet järjestetään energian mukaan

nousevaan järjestykseen [20]. Tämän jälkeen otetaan $n = 10\%$ näytteistä pienimmästä päästä katsottuna ja kutsutaan näitä joukoksi Q . Uusi kynnysarvo lasketaan kaavalla

$$T_h = T\bar{y}, \quad (3)$$

missä T on kaavan (1) mukaan laskettu kynnysparametri ja \bar{y} joukon Q keskimääräinen teho. Kynnysarvon alapuolella olevat arvot lisätään alkuperäiseen joukkoon Q , minkä jälkeen laskenta toistetaan niin pitkään, kunnes yksikään signaalinäyte ei ole kynnysarvon alapuolella. Viimeisen iteraation päätyttyä todetaan, että kaikki kynnysarvon alapuolella olevat näytteet ovat kohinaa ja yläpuolella olevat signaalia [21]. Kuvilla havainnollistettu versio menetelmästä on esitetty kuvassa 3.



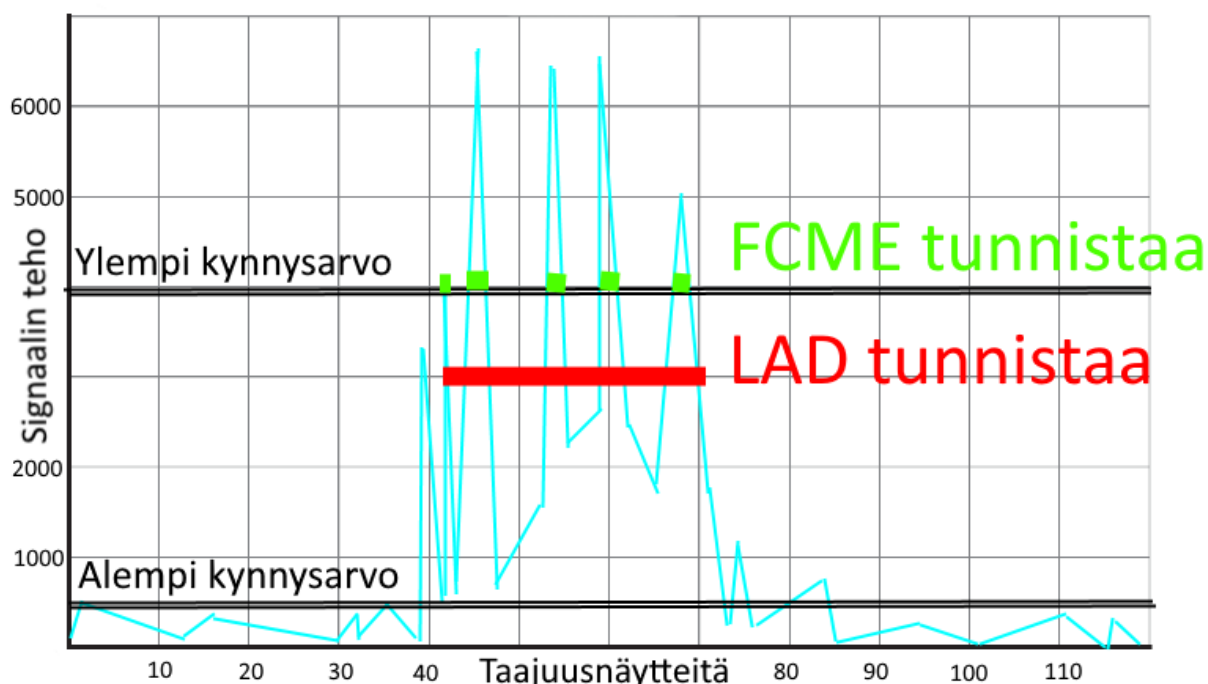
Kuva 3. FCME-kynnysarvon laskeminen

2.2 Signaalin ilmaisumenetelmät

Seuraavaksi tarkastellaan tarkemmin työssä käytettäviä LAD- ja WIBA-menetelmiä.

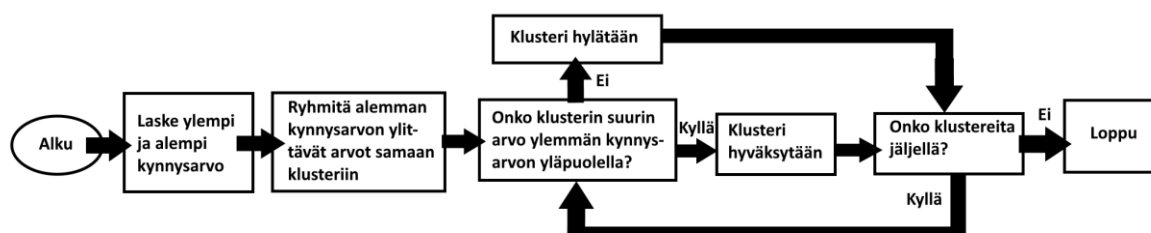
2.2.1 LAD-menetelmä

LAD-menetelmä käyttää kahta FCME-kynnysarvoa signaalien tunnistamisen määrittelyyn. Alemman kynnysarvon tehtävä on löytää signaali, kun taas ylemmän varsinaisesti varmistaa, että kyseessä varmasti on signaali eikä kohinaa. Kynnysparametri lasketaan laskukaavalla (2). Kynnysarvon laskennassa käytetään yleensä kynnysparametreina $T=13,81$ (ylempi) ja $T=2,66$ (alempi) [5]. Yleensä kun puhutaan LAD-menetelmästä, tarkoitetaan itseasiassa sen kehittyneempää versiota LAD ACC-menetelmää, missä tietyn verran näytteitä (yleensä kolme) sallitaan menevän alemman kynnysarvon alle, ilman että signaali menee poikki ja jaetaan useammaksi signaaliksi [22]. Tunnistetaan siis yksi leveä signaali, eikä useita kapeita piikkejä. Kuvassa 4 on esitettyä ero tilanteissa, missä signaalia tunnistetaan käyttäen FCME-menetelmää ja LAD-menetelmää.



Kuva 4. LAD- ja FCME-menetelmillä löydetyt signaalit

LAD-menetelmä pystyy siis näytteitä yhdistämällä arvioimaan kaistanleveyttä, mikä on suuri etu spektrin havaitsemisen hyödyntämisessä. FCME-menetelmä ei pysty arvioimaan kaistanleveyttä johtuen vain yhden kynnyisarvon käytöstä, joka jakaa signaalin osiksi. LAD-menetelmä pystyy antamaan tarkan arvion kaistanleveydestä johtuen kahden kynnyisarvon käytöstä. LAD-menetelmää sanotaan niin sanotuksi sokeaksi tunnistusmenetelmäksi, koska se pystyy löytämään signaalin ilman mitään taustatietoja signaalista tai kohinasta. Suositeltavaa on, että signaalin kaistanleveys on enintään puolet tutkittavan kaistan leveydestä. Mitä kapeampi tutkittava kaista on suhteessa kaistanleveyteen, sitä paremmin menetelmä toimii [7]. Kuvan 5 lohkokaaviossa on esitetty LAD-menetelmän toimintamalli yksinkertaistettuna.

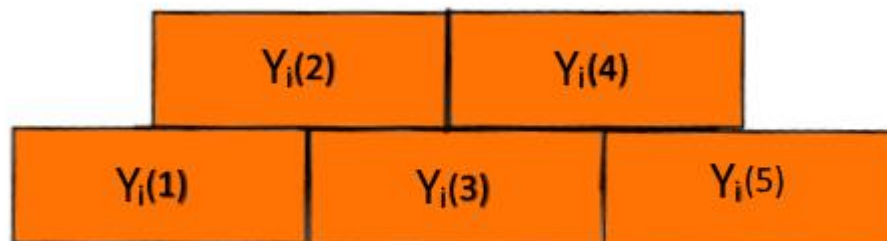


Kuva 5. LAD-menetelmän toimintamalli

Ylempi ja alempi kynnyisarvo lasketaan edellämainitulla FCME-menetelmällä, minkä jälkeen näytteet, jotka ylittävät alemman kynnyisarvon ryhmitellään samaan ryhmään eli klusteriin. Sitten tarkistetaan, ylittääkö klusterissa suurin arvo ylemmän kynnyisarvon, missä tapauksessa klusteri hyväksytään. Molempien kynnyisarvojen ylittyessä voidaan olla varmoja, että kyseessä on kaikkien määritelmien mukaan signaalia. Klustereita on voinut löytyä useampia, missä tapauksessa ne tutkitaan läpi, ennen kuin menetelmä koetaan loppuunkäydyksi [23].

2.2.2 WIBA-menetelmä

WIBA-menetelmässä käytetään spektrin näytteenotossa päällekkäisyyttä hyödyksi. Otetaan N kappaletta energianäytteitä y . Saadut näytteet jaetaan lohkoihin, joilla on tietyn verran päällekkäisyyttä. Määrää merkitään L ja pituutta M . Kuvassa 6 esimerkitapaus, missä lohkoilla on 50 % päällekkäisyyttä.

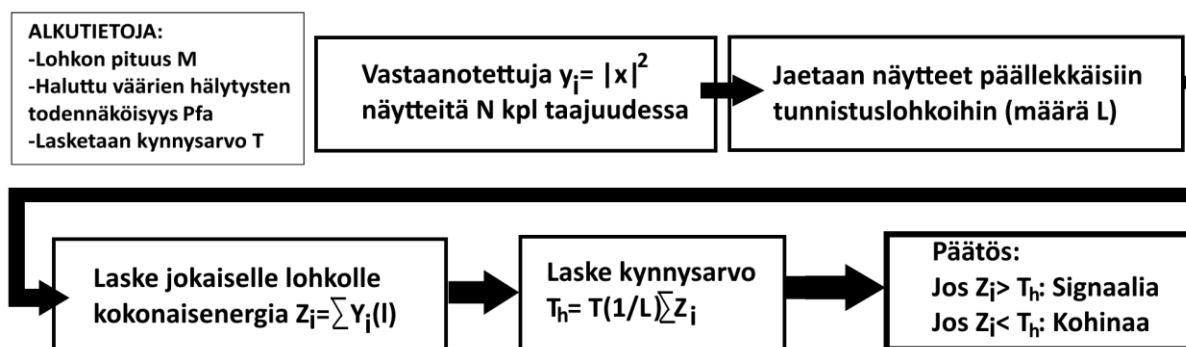


Kuva 6. 50 % päällekkäisyys L lohkoissa [7].

Lohkot $Y_i(l)$, $l = 1, \dots, M$ sisältävät näytteet $\frac{kM}{2} + 1, \dots, \frac{kM}{2} + M$, $k = 0, \dots, L - 1$. WIBA-menetelmä laskee uuden kynnsarvon signaalin tunnistamiselle.

$$T_h = T \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L Z_i \quad (5)$$

missä T saadaan FCME-menetelmän laskukaavasta (1) ja Z_i on yksittäisen lohkon sisältämä energia [7].



Kuva 7. WIBA-periaatteen lohkokaavio

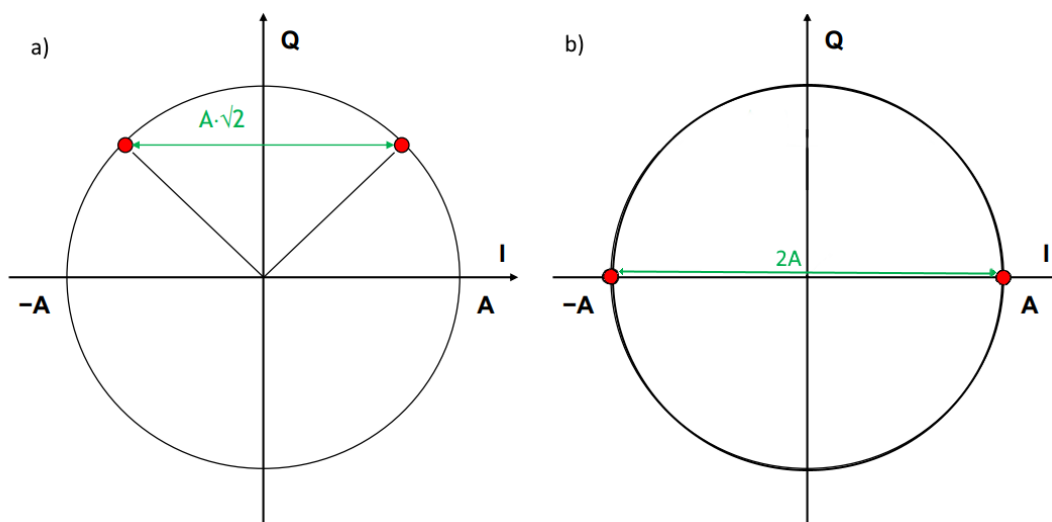
Kuvassa 7 on esitetty WIBA-menetelmän toimintaperiaate. Päätöksellä voidaan sitten tehdä haluttu operaatio. Jos tarkoituksena on löytää vapaita kaistoja, tiedetään kohinan löytyessä, että kaista on vapaana käyttöä varten.

3 TULOKSET

Työssä simuloitiin LAD- ja WIBA-menetelmiä yhdelle BPSK-signaalille. Simulaatioissa otettiin $N=1024$ näytettä vähintään 1000 Monte-Carlo iteraatioiden verran luotettavan tuloksen saamiseksi. Ylempänä LAD- kynnysparametrina käytettiin arvoa $T=13,81$ ja alempana arvoa $T=2,66$ [5]. WIBA-menetelmässä käytetty kynnysparametri laskettiin kaavasta (1) eri M :n arvoille. Signaalin leveyttä muutettiin WIBA-ikkunan muuttuessa, esimerkiksi kun tutkittiin $M=102$ näytteen pituista WIBA-ikkunaa, signaalin kaistanleveydeksi valittiin 10 % kokonaispituudesta, eli 102. Samalla tavalla, kun käytettiin WIBA-ikkunan pituutta $M=52$, oli signaalin leveys 5 % eli 52 näytettä. WIBA-ikkunoilla käytettiin normaalia 50 % päällekkäisyyttä. MatLabissa käytettävä koodi luo ensin kohinaa ja kapeakaistaisen signaalin, joka lisätään kohinaan. Kohinaiselle signaalille suoritetaan sitten FFT-muunnos sekä muuntaminen tehosignaaliksi, minkä jälkeen voidaan suorittaa ilmaisumenetelmiin liittyvät operaatiot.

3.1 BPSK-modulaatio

PSK:ssa eli vaiheensiirtoavainnuksessa tieto syötetään signaalin kantaaltoon vaiheen muutoksien muodossa. PSK voi olla monivaiheista, mutta yksinkertaisin ja häiriöttömin PSK:n muoto on BPSK eli binäärinen vaiheavainnus. BPSK:ssa vaiheita on kaksi, 0° ja 180° , jolloin symbolien välinen etäisyys eli euklidinen etäisyys konstellaatiokaaviolla on suurin mahdollinen. Tämä antaa BPSK:lle hyvät ominaisuudet symbolien välisen interferenssin (ISI) suhteen. Kuvassa 8 on BPSK-signaalin konstellaatiokuvaaja.



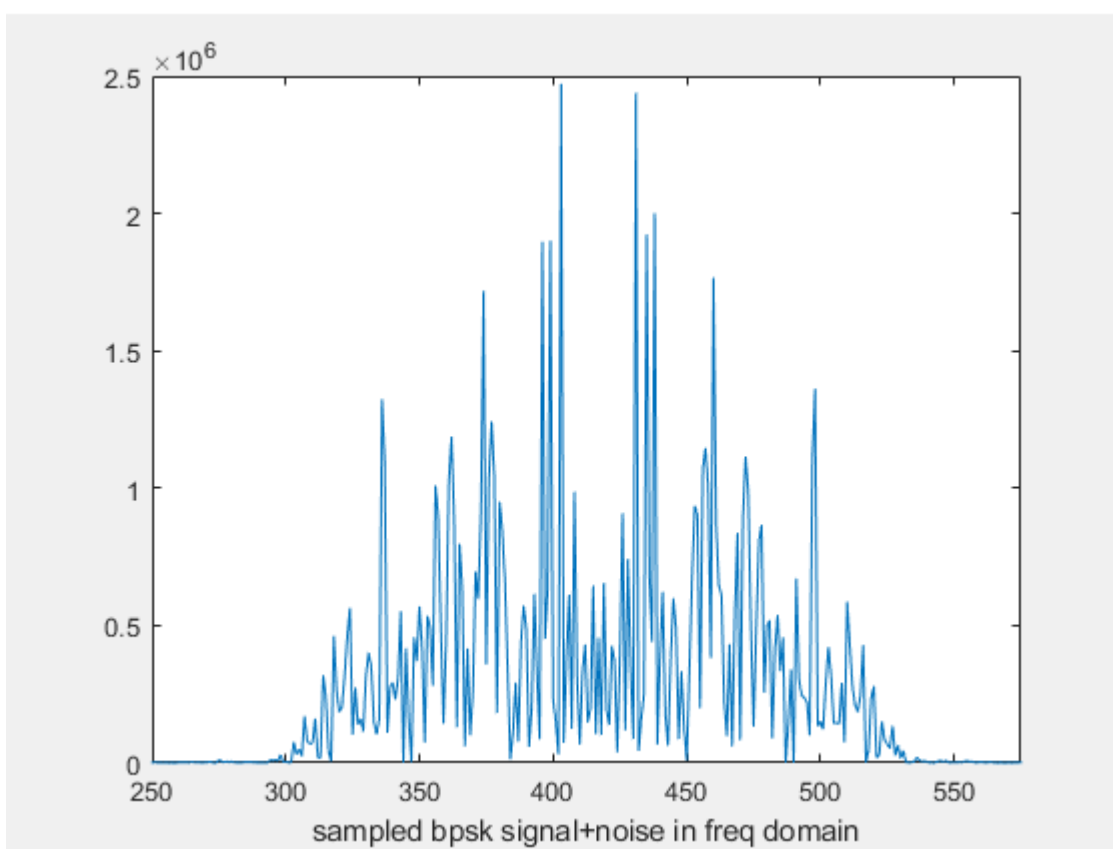
Kuva 8. PSK-signaalin konstellaatiokuvaaja, kun symbolien välinen kulma on $\pi/2$ (kuva a) ja π (kuva b, BPSK-tapaus).

BPSK moduloitu signaali voidaan esittää kaavalla

$$s(t) = \pm \sqrt{\frac{2E_s}{T_s}} \cos(2\pi f_c t), \quad nT \leq t \leq (n+1)T, \quad (4)$$

missä E_s on yksittäisen symbolin sisältämä energia ja T_s on symbolin kesto. Lausekkeen etumerkkiä ohjaa sisääntulobitti, esimerkiksi kun bitti on '0', lähtö on negatiivinen ja kun bitti on '1', lähtö on positiivinen [24].

Syy, miksi BPSK-signaali voi olla ongelmallinen signaalintunnistamisen kannalta, ilmenee sen spektristä. BPSK-signaalissa symbolit ovat keskittyneet kanta-aaltotaajuuden ympärille (nähdään spektrissä korkeana keskikohtana), mitkä nähdään sivukeiloina, jotka voivat vaikeuttaa signaalin tunnistamista. Symbolit 1 ja 0 ovat käytännössä neliöaaltoista vaihtelua ja kuten tiedetään, neliöaalton FFT-muunnos (Taajuusalueelle muunnos) on sinc-aalto [18]. Kuvassa 9 on esitettyinä työssä käytetyllä ohjelmalla otettu kuva BPSK-signaalista, kun SNR on erittäin korkea kohinan peittämiseksi. Edellämainitut sivukeilat ovat nähtävissä ja niillä voi olla kynnsarvosta riippuen merkittävä vaikutus tuloksiin.



Kuva 9. BPSK-signaalin taajuusvaste

3.2 Signaalin sijainnin ja leveyden vaikutus suorituskykyyn

Haluttiin selvittää, kuinka WIBA-menetelmä suorituskyky vaihtelee BPSK-signaalin läsnäollessa riippuen siitä, mihin kohtaan WIBA-ikkunoita signaali sattuu osumaan. Kun WIBA-ikkunan pituus $M = 102$ ja signaalin leveys on sama (10 %=102 näytettä), on ideaalinen tilanne kaistanleveyden arvioinnille kun signaali mahtuu yhden ikkunan sisään (Tapaus 1). Tarkasteltiin myös, miten signaalin siirtäminen puolikkaan (Tapaus 2) ja neljäsosa ikkunan

verran (Tapaus 3) vaikutti signaalin tunnistamiseen. Neljäsosa ikkunan siirto on ns. pahin mahdollinen ikkunan sijainti suhteessa signaaliin. Tällöin signaali ei osu kokonaan minkään ikkunan sisään. Oletettavasti vastakohta tälle tapaukselle on tapaus 1, missä signaali sattuu juuri sopivasti yhden ikkunan sisään. Tutkittiin lisäksi kaikissa tapauksissa, miten signaalin kaistanleveyden puolittaminen (5 % = 52 näytettä) vaikutti tunnistukseen, tässä tapauksessa myös lyhennettiin WIBA-ikkunan pituus puoleen eli $M = 52$. Simulaatiot tehtiin tuhannella Monte-Carlo iteraatiolla, jotta saatiin luotettavat tulokset.

Signaalin asettelussa käytettiin taajuusdeviaatiota. Taajuusdeviaation avulla pystyttiin määrittämään signaalin keskikohta niin, että se oli halutulla paikalla suhteessa WIBA-ikkunoihin. Keskikohta määritellään kaavalla

$$M_{center} = FFTsize - FFTsize * Freq_{dev},$$

josta saadaan taajuusdeviaation määrittelykaava kun $FFTsize = 1024$

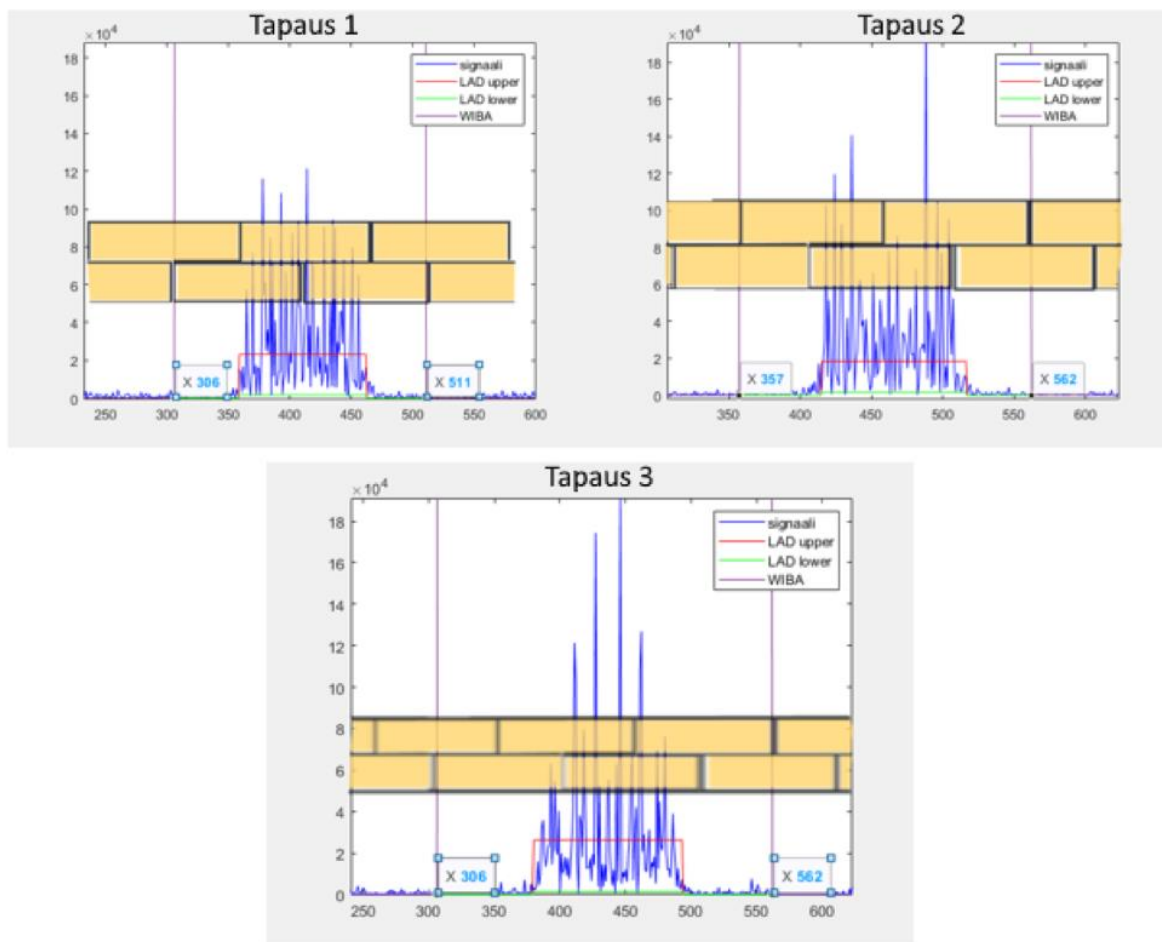
$$Freq_{dev} = 1 - \frac{M_{center}}{1024}.$$

Taulukossa 1 on esitettyä lasketut taajuusdeviaatioiden arvot erilaisille ikkunan asetteluille eri ikkunan pituuksilla M . Esimerkiksi kun ikkunan pituudeksi haluttiin $M=102$ ja sijoittelu neljäsosan verran sivuun keskeltä (Tapaus 3), käytettiin taajuusdeviaatiota 0,5747. Tällöin signaalin keskikohta sijoittui näytteen 436 kohdalle, mikä on $\frac{1}{4}$ verran sivussa ikkunasta, joka on näytevälillä 358-459.

Taulukko 1. Taajuusdeviaatioita laskettuna eri tapauksissa ja eri ikkunan pituuksilla

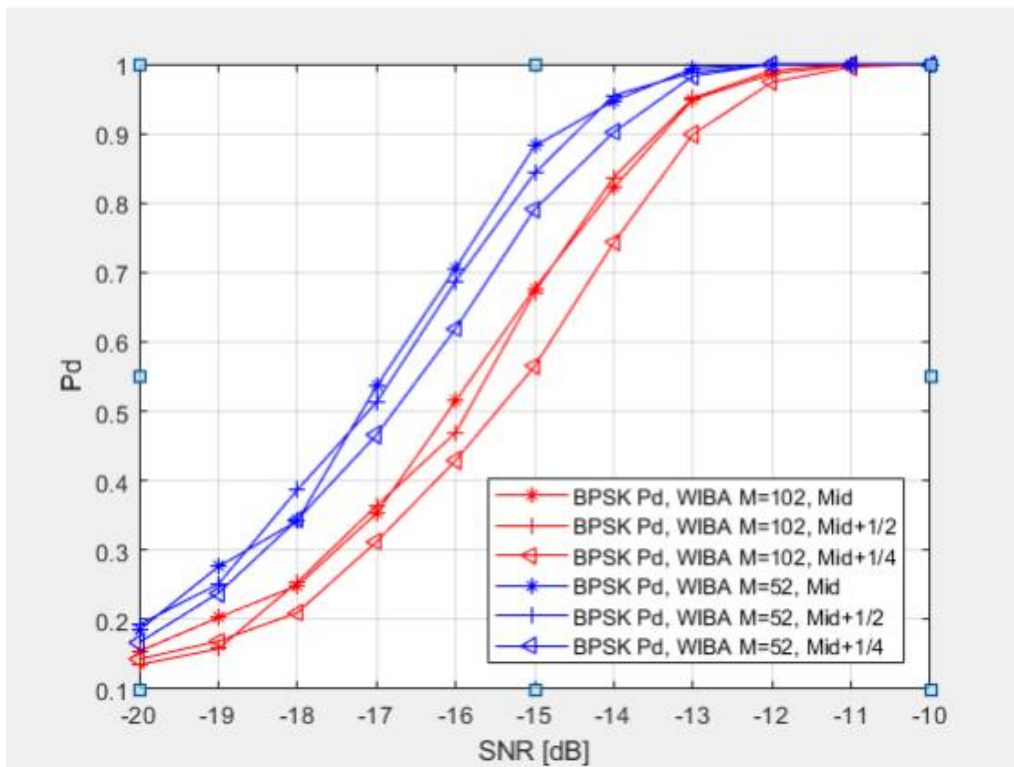
Tapaus/ M	1 (Keskellä)	2 (Keskellä + $\frac{1}{2}$)	3 (Keskellä + $\frac{1}{4}$)
102	0,6	0,55	0,5747
52	0,5684	0,543	0,556

Kuvassa 10 on esitetty tutkittavat tapaukset. Tapausten 1 ja 2 kuvissa nähdään, että signaali sopii melko hyvin yhteen WIBA-ikkunaan, johtuen siitä, että signaalia liikutetaan puolen ikkunan verran sivuun, jolloin tuloksena on oikeastaan sama tilanne, kuin mikä oli aikaisemminkin. Kolmannen tapauksen kuvassa on nähtävissä, miten tunnistettu signaali ei sovi yhden ikkunan sisään, johtuen ikkunoiden huonosta asettelusta nyt suhteessa signaalin reunoihin.

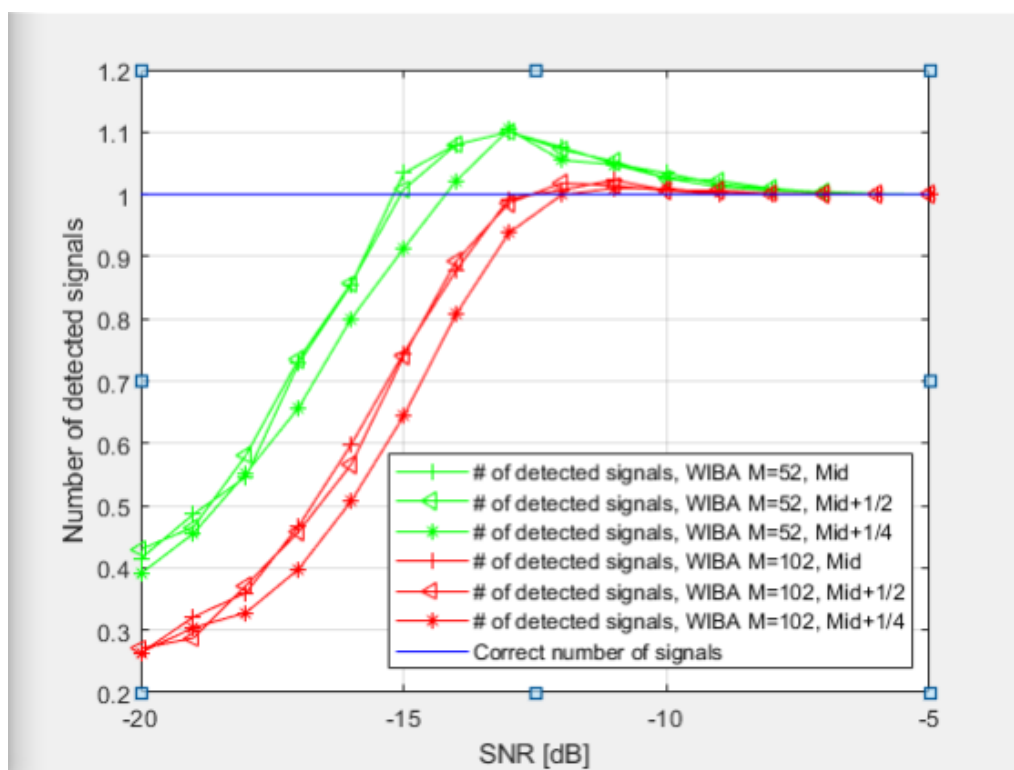


Kuva 10. Yksittäiset otokset kolmesta eri tapauksessa.

Kuvassa 11 on esitettyä ilmaisutodennäköisyyden muutokset suhteessa signaali-kohinatasoon (SNR) eri ikkunan asetteluilla ja kuvassa 12 löydettyjen signaalien määrä suhteessa signaali-kohinatasoon. Tulokset vahvistavat oletuksemme. Suuria muutoksia ei tapahdu tilanteessa, missä ikkuna siirtyy puolikkaan ikkunan verran sivuun päin. Poikkeamat tässä kuitenkin todistavat, etteivät aivan kaikki otokset satu sopivasti, kuten kuvasta 11 voisi päätellä. Odotetusti heikoin suorituskyky oli huonoimmassa tapauksessa, missä ikkuna oli aseteltu neljäsosan verran sivuun, jolloin on äärimmäisen epätodennäköistä, että se sattuisi juuri sopivasti signaalin päälle. Suurimmillaan ero optimaalisen ja huonoimman mahdollisen ikkunan sijoituksen välillä oli noin 1 dB. Kuvasta 11 voidaan todeta myös, kuinka lyhyempi ikkuna alkaa toimimaan kunnolla selkeästi aikaisemmin kuin pidempi ikkuna. Kun $M=52$, voidaan todeta menetelmä toimivaksi kun $\text{SNR} = -15$ dB. Kun $M=102$, ylitetään tämä kynnyks vastaa, kun $\text{SNR} = -13$ dB. Näissäkin desibelin heittoja johtuen ikkunan sijoittelusta.



Kuva 11. Ilmaisutodennäköisyydet suhteessa signaali-kohinasuhteeseen

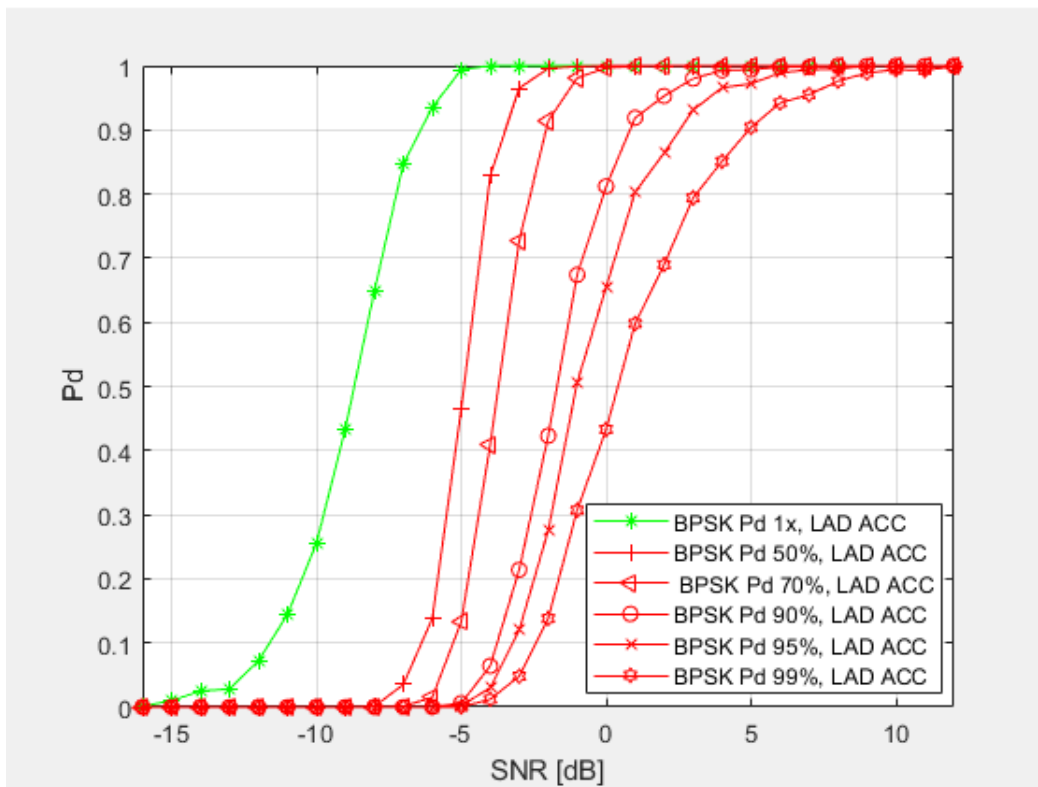


Kuva 12. Löydetyjen signaalien määrä suhteessa signaali-kohinasuhteeseen.

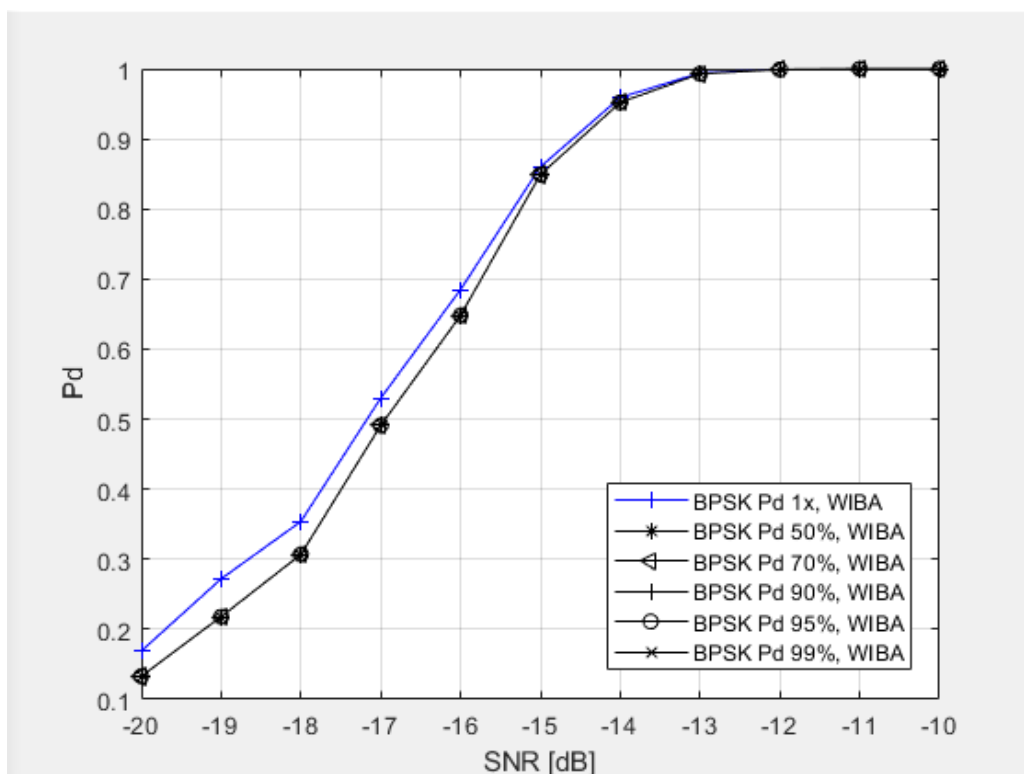
3.3 Ilmaisutodennäköisyyden muuttaminen

Seuraavaksi haluttiin tutkia miten ilmaisutodennäköisyyden määrittely vaikutti LAD- ja WIBA-menetelmien suorituskykyihin. Ilmaisutodennäköisyyden yksinkertaisin muoto on, että yksi signaalin sisältämä näyte riittää signaalin tunnistamiseen. Muita vaihtoehtoisia määritelmiä ovat esimerkiksi, että vaaditaan löydettäväksi 50 %, 70 % tai jopa yli 90 % signaalin näytteistä, jotta signaali hyväksytään löydettyksi. Signaali aseteltiin ikkunan keskelle (Aikaisemmassa tehtävässä tapaus 1), tällä ei tosin ole väliä LAD-menetelmän tapauksessa, koska LAD-menetelmä käy signaalin näyte kerrallaan läpi, eikä WIBA-ikkunan asettelu siihen vaikuta. Vertailtiin eri ikkunan leveyksiä WIBA-menetelmälle, sekä kasvatettiin myös signaalin leveyttä suhteessa saman verran. Ikkunan leveyden muuttaminen ei vaikuta LAD-menetelmän suorituskykyyn, mutta signaalin leveyden kasvattaminen vaikuttaa.

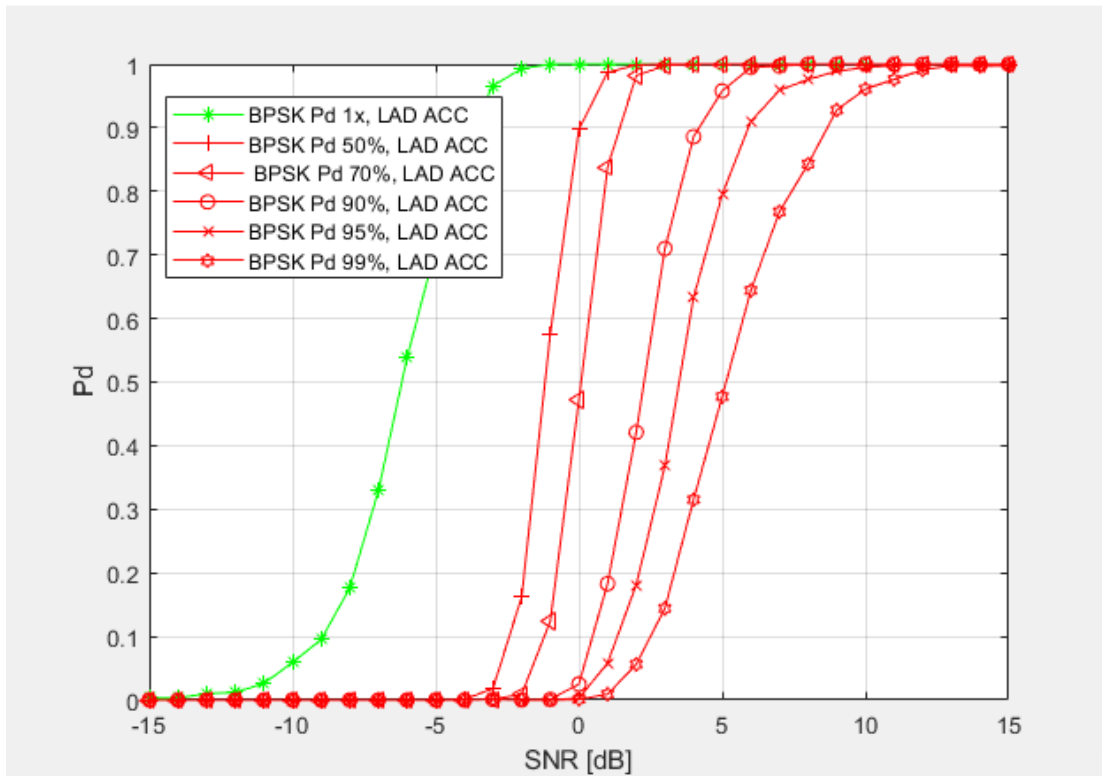
LAD-suorituskyvyn muutokset on esitetty kuvissa 13, 15 ja 17. WIBA-suorituskyvyn muutokset on esitetty kuvissa 14, 16 ja 18. Tuloksista voidaan päätellä, että kun WIBA-ikkuna aseteltiin optimaalisesti, oli myös ilmaisutodennäköisyys käytännössä riippumaton ilmaisutodennäköisyyden määritelmästä. LAD-menetelmän ilmaisutodennäköisyys heikkeni, mitä leveämmäksi signaali asetetaan. Esimerkiksi 20 % kaistanleveydellä ja 99 % tunnistamiskynnyksellä LAD-menetelmä saavutti hyvän 90 % ilmaisutodennäköisyyden vasta kun signaali-kohinansuhde oli 13 dB (kuva 17), mikä oli huomattavasti heikompi suorituskyky, kuin esimerkiksi tapaus, missä signaalin leveys on 5 % ja ilmaisutodennäköisyys 70 % (kuva 13). Edellämainitussa tapauksessa 90 % ilmaisutodennäköisyys saavutettiin -2 dB kohdalla. Kaistanleveyden vaikutusta WIBA-signaaliin voidaan myös arvioida, tulokset näissä eivät ole yhtä selkeitä kuin LAD-menetelmässä. Kapeimmalla kaistanleveydellä $M=52$ WIBA-menetelmä saavutti 90 % ilmaisutodennäköisyyden kun SNR oli -14,5 dB ja $M=206$ leveydellä, kun SNR oli -11,1 dB.



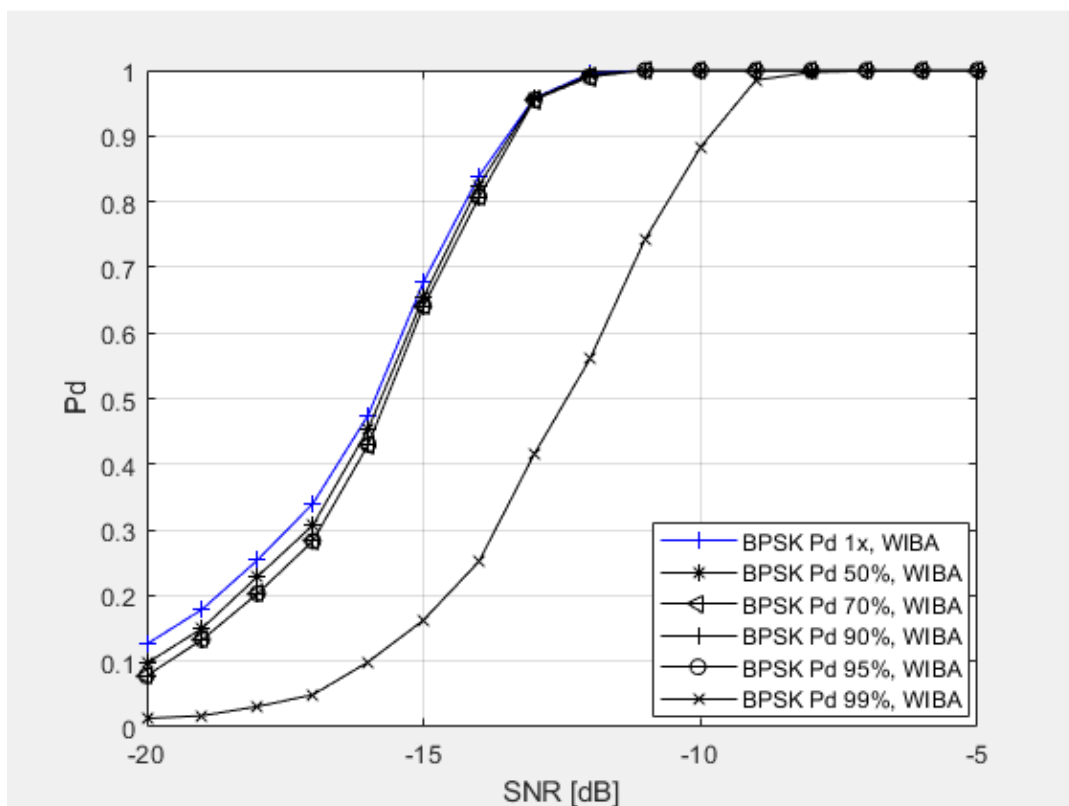
Kuva 13. BPSK-signaalin tunnistus LAD-menetelmällä, kun signaalin kaistanleveys on 5 %.



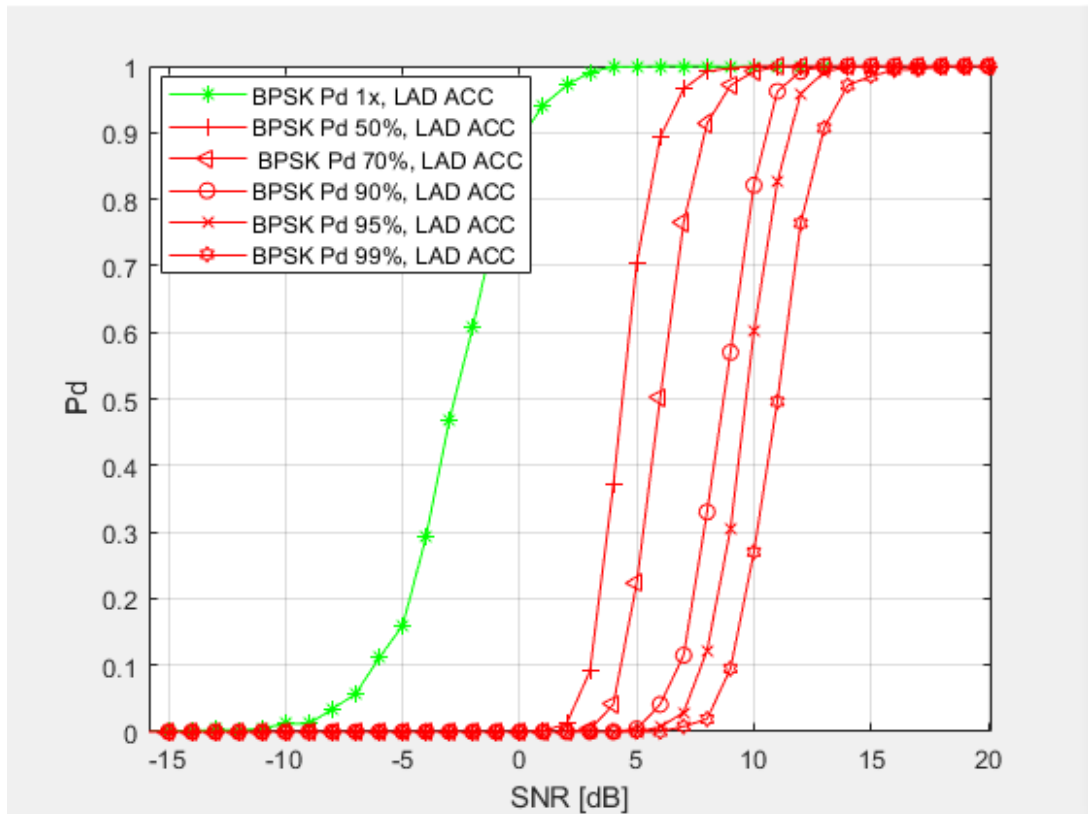
Kuva 14. BPSK-signaalin tunnistus WIBA-menetelmällä, kun signaalin kaistanleveys on 5 % ja $M=52$.



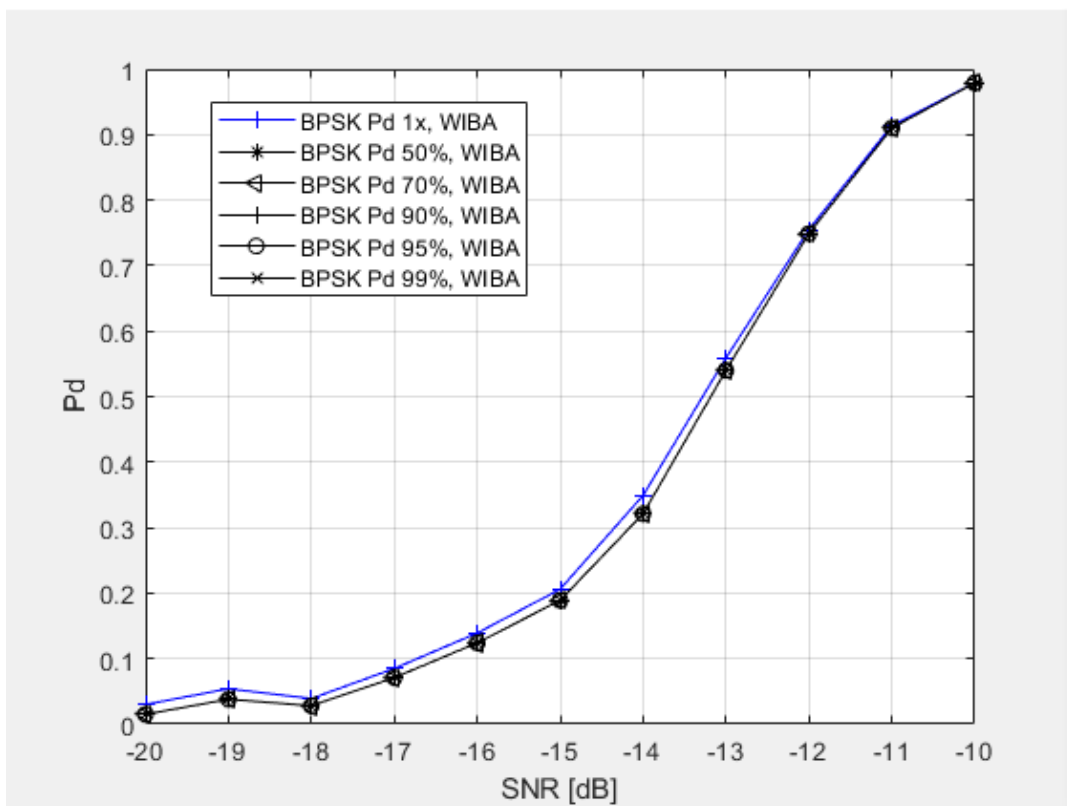
Kuva 15. BPSK-signaalin tunnistus LAD-menetelmällä kun signaalin kaistanleveys on 10 %.



Kuva 16. BPSK-signaalin tunnistus WIBA-menetelmällä kun signaalin kaistanleveys on 10 % ja $M=102$.

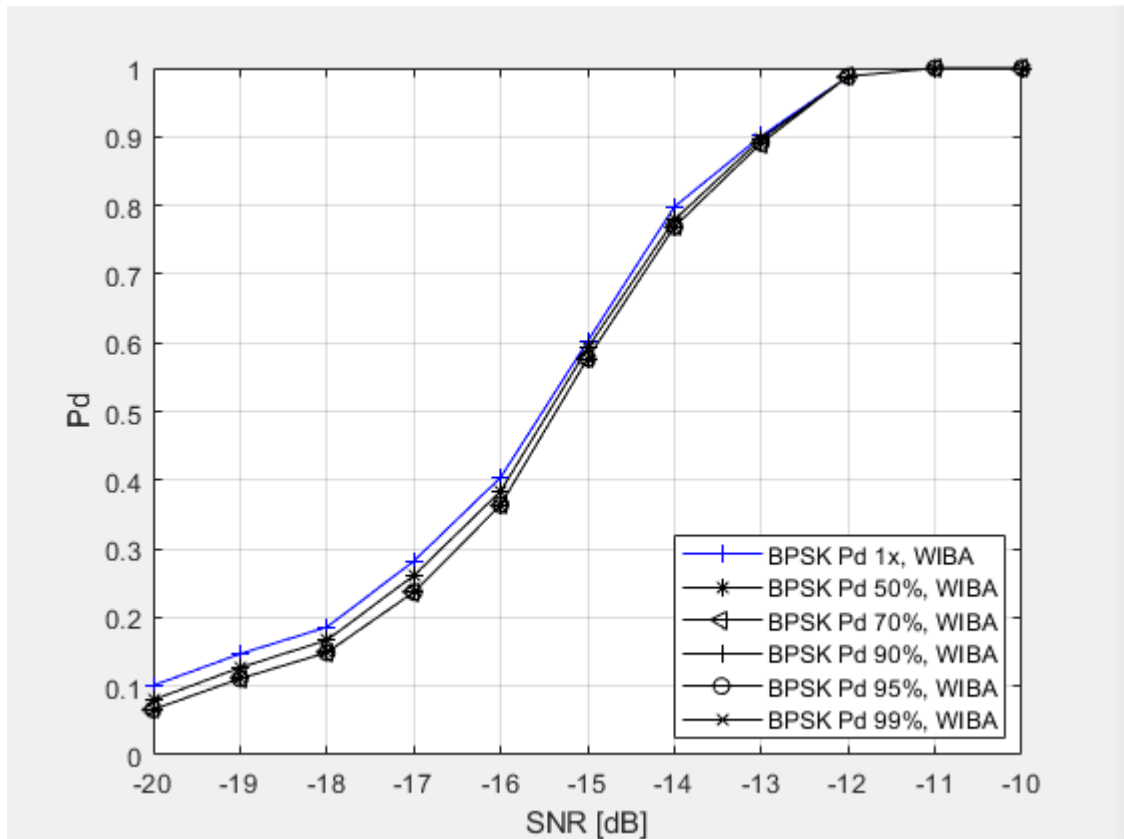


Kuva 17. BPSK-signaalin tunnistus LAD-menetelmällä, kun signaalin kaistanleveys on 20 %.



Kuva 18. BPSK-signaalin tunnistus WIBA-menetelmällä, kun signaalin kaistanleveys on 20 % ja $M=206$.

Huomattiin poikkeus, mikä on esitetty kuvassa 16, kun tarkastellaan WIBA-menetelmän ilmaisutodennäköisyyksiä ikkunan leveydellä $M=102$. WIBA-menetelmä sai 3 dB heikomman suorituskyvyn, kun ilmaisutodennäköisyys oli 99 %. Poikkeus johtuu siitä, että ikkunan kokoa määriteltäessä (10 % 1024 näytteestä) on tehty pyöristys alaspäin, jolloin erittäin tarkalla ilmaisutodennäköisyydellä 99 % jää osa signaalista ikkunan ulkopuolelle. Tätä virhettä ei tapahdu ikkunan pituus $M=52$ ja $M=206$ tapauksissa, koska niissä ikkunan pyöristys on tehty ylöspäin. Testataan siis vielä suorituskyyky, kun $M=104$. Kuvassa 19 on esitetty tapaus, kun korjaus on tehty.



Kuva 19. BPSK-signaalin tunnistus WIBA-menetelmällä, signaalin kaistanleveys on 10 % ja $M=104$.

Suorituskyyky on nyt odotettu 99 % ilmausutodennäköisyydelläkin. Tulokset korreloivat keskenään hyvin, eikä aiempaa poikkeusta ole nähtävissä. Piste, milloin WIBA-menetelmä saavutti 90 % ilmaisutodennäköisyyden on nyt -12,9 dB SNR-arvolla.

3.4 Pohdinta

Signaalin sijainnin ja leveyden vaikutukset olivat hyvin ennalta arvattavissa. WIBA-menetelmä toimi kuten pitikin ja antoi parhaimman suorituskyvyn silloin, kun ikkuna oli täydellisesti aseteltuna signaalin päälle. Verrattuna huonoimpaan mahdolliseen tilanteeseen, missä signaalia

oli siirretty neljäsosan verran sivuun suhteessa ikkunaan, erot olivat kuitenkin melko pieniä. Huonoin tapaus saavutti saman tunnistustodennäköisyyden kuin paras mahdollinen vain desibelin verran SNR-tasossa myöhemmin kuin paras mahdollinen.

WIBA-menetelmän suorituskky säilyi erittäin hyvänä, riippumatta ilmaisutodennäköisyyden määritelmän muuttelemisesta. Johtuen täydellisestä signaalin asettelusta suhteessa ikkunaan, mitään merkittäviä eroja ei käytännössä edes syntynyt eri ilmaisutodennäköisyyksien välille. Mielenkiintoisena poikkeuksena havaittiin $M=102$ tapauksessa selkeä muutos heti, kun ikkuna ei ollutkaan aivan optimaalinen suhteessa signaaliin. LAD-menetelmän suorituskvyn havaittiin olevan hyvin riippuvainen kaistanleveydestä. Lyhyempi kaistanleveys korreloi vahvemman suorituskvyn kanssa myös WIBA-menetelmän kanssa, mutta tulokset eivät tässä olleet yhtä suuria. Alla olevassa taulukossa 2 on listattu vaadittuja SNR-arvoja eri ilmaisumenetelmille eri todennäköisyyksille, että saavutettiin hyvä ($P_d=0.9$) ilmaisutodennäköisyys. Muistutuksena, että WIBA-menetelmässä myös ikkunan leveyttä kasvatettiin suhteessa signaalin leveyteen.

Taulukko 2. Vaaditut SNR-arvot, jotta saavutettiin täydellinen ilmaisutodennäköisyys

Ilmaisu % / SNR($P_d=0.9$)	1x	50 %	70 %	90 %	95 %	99 %
LAD 5 %	-6,4 dB	-3,5 dB	-2,1 dB	+0,8 dB	+2,5 dB	+4,9 dB
LAD 10 %	-3,7 dB	0 dB	+1,4 dB	+4,2 dB	+5,9 dB	+8,7 dB
LAD 20 %	+0,2 dB	+6,1 dB	+7,9 dB	+10,6 dB	+11,6 dB	+13,0 dB
WIBA 5 %	-14,6 dB	-14,5 dB	-14,5 dB	-14,5 dB	-14,5 dB	-14,5 dB
WIBA 10 %	-13 dB	-12,9 dB	-12,9 dB	-12,9 dB	-12,9 dB	-12,9 dB
WIBA 20 %	-11,1 dB	-11,1 dB	-11,1 dB	-11,1 dB	-11,1 dB	-11,1 dB

WIBA-menetelmällä on selkeästi vahvempi suorituskky, johtuen hyvästä signaalin asettelusta. Huomattiin, että ainoat muutokset suorituskvyyssä tapahtuivat, kun ikkuna oli väärän kokoinen suhteessa signaaliin. Tällöin havaittiin noin 3 dB heikompi suorituskky 99 % ilmaisutodennäköisyydellä. On siis tärkeää, että ikkuna valitaan oikean kokoiseksi suhteessa signaaliin. LAD-menetelmässä SNR-väli oli aina noin 12 dB pienimmän ja suurimman ilmaisutodennäköisyyden välillä. Tutkimustuloksia voidaan pitää luotettavina, koska ne vastasivat hyvin aikaisempiin tutkimuksiin perustuviin oletuksiin LAD- ja WIBA-menetelmistä.

Yllätyksenä tuli, miten hyvin WIBA-menetelmä löysi signaalin huonoimmassa mahdollisessakin tilanteessa. Tämä kertoo menetelmän luotettavuudesta, koska reaalielämässä emme voi etukäteen olla täysin varmoja siitä, mihin kohtaan ikkunaa signaali osuu. LAD-menetelmän tapauksessa muutokset olivat suurempia, tosin on kyseenalaistettava käytännöllisyyttä LAD-metodille, jos käytetään esimerkiksi vain 50 % ilmaisutodennäköisyyttä. Tämä tarkoittaisi, että kun LAD-menetelmä on löytänyt signaalin ja arvioinut sille kaistanleveyden, on mahdollista että vain 50 % tästä kaistanleveydestä on signaalia. Arvio kaistanleveydestä olisi tällöin epäluotettava. Tarkasteltaessa tuloksia LAD-menetelmälle, täytyy kaistanleveyden estimointia arvioidessa tarkastella tuloksia, kun esimerkiksi 90 % signaalista löytyi.

Työ antoi arvokkaan ensikosketuksen oikeaan tutkimukseen ja tietoliikenneverkostojen simuloimiseen, jolloin sain myös kokea ensikertaa mahdollisia ongelmia mitä tässä työssä voi

tulla vastaan. Työn aluksi saimme pohtia, mistä johtuvat erot tuloksissa, kun simulointiohjelma suoritetaan minun tietokoneella, eikä ohjaajani tietokoneella. Syyksi selvisi pienet erot MatLab versioissa. Muita kynnyksiä minkä yli piti työn kanssa päästä, oli opetella hahmottamaan esimerkiksi WIBA-ikkunan keskikohdan ja taajuusdeviaation korrelaatio kaavamuodossa, jotta pystyin käyttämään sitä toistuvasti eri tilanteissa. Teoriaa sain työn aikana opetella melko paljon, mutta en pitänyt sitä missään vaiheessa ylitsepääsemättömän vaikeana, koska konseptit oli helppo yhdistää minun aikaisempaan oppimaani tietoliikennetekniikan kursseilta. Tutkimustyyllisen tekstin kirjoittaminen on minulle vielä uusi asia, joten itse tekstin aikaansaaminen oli työssä minulle helposti hitain vaihe. Tämä on kuitenkin oletettavaa, koska aikaisempaa kokemusta tästä minulla ei varsinaisesti ollut.

Olisi kiintoisaa nähdä kahden tehdyn tehtävän yhdistelmä, eli simuloimalla vielä tilanteita missä ilmaisutodennäköisyyttä muutettaisiin ja verrattaisiin vielä tilanteissa, missä ikkunan sijainti on eri paikoissa suhteessa signaaliin. BPSK-signaalin vertailua varten pitäisin myös hyvänä tutkimuskohteena muut signaalien modulointimenetelmät, jotta sivukeilojen vaikutusta voisi verrata modulointeihin, missä sivukeilat eivät ole niin suuressa osassa. OFDM (Ortogonaalinen taajuusjako multipleksointia käyttäen)-modulaatio on toinen 5G-teknologiassa yleisesti käytetty menetelmä, joka olisi todennäköisesti hyvä vertailukohde BPSK-modulaatiolle. Myös muut PSK-modulaatioiden moninkerrat, kuten QPSK (nelivaiheinen vaihevainnus)-modulaatio, voisivat olla kiinnostavia tutkimuskohteita.

4 YHTEENVETO

Tässä työssä tarkasteltiin LAD- ja WIBA-energiailmaisumenetelmiä. Ensiksi tarkasteltiin energiailmaisua yleisesti sekä siihen liittyviä kynnyksenasettelumenetelmiä. Seuraavaksi tarkasteltiin molempien työssä käytettävien LAD- ja WIBA-menetelmien toimintamalleja, sekä BPSK-signaalia. Molemmat energiailmaisumenetelmät hyödyntävät FCME-menetelmällä laskettua adaptiivista kynnyksarvoa. Aluksi tutkittiin LAD- ja WIBA-menetelmiä BPSK-signaalille 1024 näytteen verran vähintään 1000 Monte-Carlo iteraation verran tilanteissa, missä WIBA-ikkuna on aseteltu eri tavalla suhteessa signaaliin leveyteen. Simuloinnit tehtiin vaihtelevilla SNR-tason väleillä saadaksemme vertailukelpoista dataa menetelmien suorituskyvyistä eri ympäristöissä.

Ennen varsinaisia simulaatioita jouduttiin pohtimaan algoritmeja, millä taajuusdeviaatiosta riippuva signaalin sijainti saadaan tarkasti paikalleen. Tämän jälkeen pystyttiin simuloimaan kolmea eri tapausta, joissa signaalin sijainti vaihteli suhteessa WIBA-ikkunoihin. Tulokset olivat oletetun mukaisia, eli WIBA-menetelmä tunnisti signaaleja tehokkaammin tilanteissa, missä ikkuna oli aseteltu hyvin signaalin kohdalle. Huonoimman, eli neljäsosa siirron tapauksessa, sekä parhaimman asettelun eroavaisuudet SNR-tasossa (milloin signaali saavutti tietyn ilmaisutodennäköisyyden) oli vajaa 1 dB. Puolikkaan ikkunan kokoisella siirrolla ei ollut merkitystä johtuen ikkunoiden 50 % päällekkäisyydestä, koska tällöin päädyttiin vain samaan tilanteeseen, kuin missä oltiin aiemmin.

Toisena tutkimuskohteena oli suorituskyvyn muutoksen tutkiminen, kun vaadittua suhteellista näytemäärää yhden signaalin löytämiseen muutettiin. Samalla tutkittiin myös signaalin leveyden vaikutusta LAD-menetelmälle. Johtuen WIBA-ikkunoiden hyvästä asettelusta, mitään merkittäviä eroja ei WIBA-menetelmän tuloksissa nähty. Poikkeustapauksena nähtiin, miten ikkunan koon virheellinen asettelu liian pieneksi vaikutti tuloksiin, tällöin signaali ei mahdu ikkunaan kokonaisuutena ja 99 % ilmaisutodennäköisyys oli selkeästi vaikeampi menetelmälle. Tämä oli merkittävä löytö koska aikaisemmassa tutkimuksessa oli käytetty alaspäin pyöristettyä ikkunan kokoa. Tutkittiin samalla myös kaistanleveyden vaikutusta WIBA-menetelmään ja pystyttiin toteamaan, että kaistanleveyden puolittaminen 10 % kokonaisleveydestä 5 % aiheutti noin 1 dB muutoksen suorituskyvyssä. LAD-menetelmässä nähtiin paljon suurempia eroja verrattuna WIBA-menetelmään, kun ilmaisutodennäköisyyttä muutettiin. SNR-arvojen muutos erilaisilla ilmaisutodennäköisyyden määritelmillä oli kuitenkin kaikilla signaalinleveyksillä 11-13 dB välillä. Kaistanleveyden muutoksella oli myös suurempi merkitys LAD-menetelmässä. Eroja kaistanleveyksien välillä oli lähes 4 dB verran, kun siirryttiin 5 % kaistanleveydestä 10 % kaistanleveyteen.

5 LÄHDELUETTELO

- [1] Santivanez C. (2006) Opportunistic spectrum access: Challenges, architecture, protocols. ACM International Conference Proceeding Series, Boston, USA, Vol. 220, Artikkelin nro. 1234174
- [2] Flores A. B. (2013) IEEE 802.11af: A standard for TV white space spectrum sharing. IEEE Commun Mag, Vol. 51, s. 92-100.
- [3] Rasheed H., Haroon F. & Rajatheva N. (2016) Energy detection with diversity combining over KG fading for cognitive VANET. IEEE Vehicular Technology Conference, Kanada, Montreal. Vol 0, Artikkelin nro. 7880983.
- [4] Akyildiz I. F., Lo B. F. & Balakrishnan R. (2011) Cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks: A survey. Phys. Commun., Vol. 4, s. 40-62.
- [5] Vartiainen J., Lehtomäki J. J. & Saarnisaari H. (2005) Double-threshold based narrowband signal extraction. IEEE 61st Vehicular Technology Conference, Ruotsi, Tukholma. Vol 2, s. 1288-1292.
- [6] Saarnisaari H. & Vartiainen J. (2018) Spectrum window-based signal detection at low SNR. 2018 International Conference on Military Communications and Information Systems, Puola, Varsova, s. 1-5.
- [7] Vartiainen J. (2019) Performance Evaluation of Windowing Based Energy Detector in Multipath and Multi-signal Scenarios. Lect. Notes Inst. Comput. Sci. Soc. Informatics Telecommun. Eng., Vol. 291, Poznań, Puola s. 59-72.
- [8] Saarnisaari H. & Henttu P. (2003) Impulse detection and rejection methods for radio systems. 2003 IEEE Military Communications Conference, Boston, USA. Vol 2, s. 1126-1131
- [9] Hänninen T, Vartiainen J & Juntti M. (2010) Implementation of spectrum sensing on wireless open-access research platform. 2010 3rd International Symposium on Applied Sciences in Biomedical and Communication Technologies, Rooma, Italia. s. 1-5.
- [10] Urkowitz H. (1967) Energy detection of unknown deterministic signals, Proceedings of the IEEE, Vol. 55, s. 523-531.
- [11] Bae S., So J. & Kim H. (2017) On optimal cooperative sensing with energy detection in cognitive radio. Sensors, Vol. 17. Artikkelin nro 2111.
- [12] Goldsmith A. (2009) Breaking spectrum gridlock with cognitive radios: An information theoretic perspective, Proc IEEE, Vol. 97, s. 894-914.
- [13] Mitola III J. & Maguire Jr. G. Q. (1999) Cognitive radio: making software radios more personal. IEEE Pers Commun, Vol. 6, s. 13-18.

- [14] Haykin S. (2005) Cognitive radio: Brain-empowered wireless communications. *IEEE J Sel Areas Commun*, Vol. 23, s. 201-220.
- [15] Saarnisaari H. (2004) Consecutive mean excision algorithms in narrowband or short time interference mitigation. *Record - IEEE PLANS, Position Location and Navigation Symposium*, Monterey, USA, s. 447-454.
- [16] Vartiainen J. (2016) The future of spectrum sensing. *International Conference on Ubiquitous and Future Networks*, Wien, Austria, s. 247-252.
- [17] Vartiainen J. & Vuotoniemi R. (2015) False alarm rate analysis of the FCME algorithm in cognitive radio applications. *AICT 2015 - 11th Advanced International Conference on Telecommunications*, Brussels, Belgium, s. 102-106.
- [18] Proakis J. G. & Salehi M. (2008) *Digital Communications*. (5. ed), s. 45, 146, 772.
- [19] Vartiainen J. (2019) Cooperative sensing with WIBA energy detection under rural area channel conditions. *90th IEEE Vehicular Technology Conference*, Honolulu, USA. s. 1-6.
- [20] Press W. H. (1992) *Numerical Recipes. C : The Art of Scientific Computing*. (2nd ed ed.)
- [21] Saarnisaari H., Henttu P. and Juntti M. (2005) Iterative multidimensional impulse detectors for communications based on the classical diagnostic methods. *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 53, (3), s. 395-398.
- [22] Vartiainen J. (2007) Spectrum sensing with LAD-based methods. *2007 IEEE 18th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, Athens, Greece. s. 1-5.
- [23] Lehtomaki J. J. (2008) Analysis of the LAD Methods. *IEEE Signal Processing Letters*, Vol. 15, s. 237-240.
- [24] Chandra A., Patra A. and Bose C. (2010) Performance analysis of BPSK over different fading channels with imperfect carrier phase recovery. *2010 IEEE Symposium on Industrial Electronics and Applications (ISIEA)*, Penang, Malaysia. s. 106-111.