

**Lauri Sovinen**

# **Spektrin aistinta kognitiiviradioverkoissa**

Tietotekniikan kandidaatintutkielma

22. toukokuuta 2019

Jyväskylän yliopisto

Informaatioteknologian tiedekunta

**Tekijä:** Lauri Sovinen

**Yhteystiedot:** lauri.j.sovinen@student.jyu.fi

**Työn nimi:** Spektrin aistinta kognitiiviradioverkoissa

**Title in English:** Spectrum sensing in cognitive radio networks

**Työ:** Kandidaatintutkielma

**Sivumäärä:** 22+0

**Tiivistelmä:** Radiospektrin ruuhkautuminen on ongelma tulevaisuudessa, ja kognitiiviradiot ovat yksi mahdollisista ratkaisuista ongelmaan. Tutkielmassa käsitellään kognitiiviradioita, kognitiiviradioverkkoja ja spektrin aistintaa sekä niihin liittyviä erilaisia ongelmia ja haasteita.

**Avainsanat:** Kognitiiviradio, kognitiiviradioverkko, radiospektri, spektrin aistinta

**Abstract:** Congestion in the radio spectrum will become a problem in the future, and cognitive radios are one of the possible solutions to it. Cognitive radios, cognitive radio networks, spectrum sensing and both problems and challenges related to them are taken a thorough look at in the thesis.

**Keywords:** Cognitive radio, cognitive radio network, radio spectrum, spectrum sensing

## **Kuviot**

Kuvio 1. OSA-malli ja spektrin aukot (mukaillen Liang ym. 2011). .....	4
--	---

# Sisältö

1	JOHDANTO .....	1
2	KOGNITIIVIRADIOVERKOT .....	2
2.1	Radiospektrin rajallisuus .....	2
2.2	Radiospektrin liityntäperiaatteet .....	2
2.3	Radiospektrin aukot ja OSA-periaate .....	3
2.4	Ohjelmisto- ja kognitiiviradiot .....	4
2.5	Kognitiiviradioverkkojen mallit .....	5
3	SPEKTRIN AISTINTA.....	8
3.1	Spektrin aistintamenetelmiä .....	9
3.2	Uskottavuusosamäärättestaus.....	10
3.3	Energian havainnointiin perustuva spektrin aistinta .....	11
4	ONGELMAT JA HAASTEET .....	13
4.1	Primäärikäyttäjän jäljittely .....	13
4.2	Kognitiiviradioiden häirintä.....	13
4.3	Tietomurto .....	14
5	YHTEENVETO.....	15
	LÄHTEET .....	16

# 1 Johdanto

Suomessa radiotaajuuksien käytöstä vastaa Traficom, jonka mukaan arviolta yli 99 prosenttia kaikista radiolaitteista Suomessa toimii alle 10 GHz:n taajuuksilla (Traficom, 2018 (viitattu 29.04.2019)). Tulevaisuudessa tulee oletettavasti olemaan yhä enemmän ja enemmän erilaisia langattomia laitteita, ja koska selvästi suurin osa laitteista toimii pienellä osalla radiospektristä, on radiospektrin hyödyntämistason parantaminen tärkeää. Spektrin aistinnan ja kognitiiviradioverkkojen avulla voidaan tulevaisuudessa tehostaa radiospektrin hyödyntämistä.

Radiospektrillä tarkoitetaan sähkömagneettisen spektrin tiettyä osaa, jonka taajuusalue on 9 kilohertsistä 3000 gigahertsiin asti. Kognitiiviradiot ovat radiolaitteita, joissa osa perinteisistä fyysisistä komponenteista on korvattu ohjelmiston avulla. Koska osa komponenteista on korvattu ohjelmistolla, on kognitiiviradion mahdollista muokata omia toiminnallisia parametrejaan radioympäristöstä saadun tiedon mukaisesti. Kognitiiviradioiden avulla voidaan muodostaa kognitiiviradioverkkoja, joille on kolme yleistä mallia.

Yksi kognitiiviradioiden tärkeimmistä toiminnoista on spektrin aistinta, minkä ansiosta kognitiiviradiot voivat käyttää automaattisesti sopivia spektrin aukkoja välttääkseen häiriön aiheuttamista muille radiospektrin käyttäjille. Spektrin aukoilla tarkoitetaan taajuuskaistoja, joiden käyttö kognitiiviradion fyysisessä sijainnissa ei tietyinä ajanhetkenä aiheuta häiriötä muille radiospektrin käyttäjille.

Kognitiiviradioihin, kognitiiviradioverkkoihin ja spektrin aistintaan liittyy niiden luonteen vuoksi erilaisia ongelmia ja haasteita. Ongelma voi olla esimerkiksi tahalliselta kognitiiviradioverkon häirinnältä suojautuminen tai tiettyyn spektrin aistintamenetelmään liittyvä.

Tutkielman luvussa 2 käsitellään kognitiiviradioverkkoja. Ensin tutustutaan radiospektriin ja sen rajallisuuteen, liityntäperiaatteisiin ja spektrin aukkoihin. Tämän jälkeen perehdytään ohjelmistoradioihin, kognitiiviradioihin ja kognitiiviradioverkkoihin. Luvussa 3 käsitellään spektrin aistintaa ja sen eri toteuttamistapoja. Tarkemmin keskitytään energian havainnointiin perustuvaan menetelmään. Lopuksi luvussa 4 tarkastellaan spektrin aistinnan ja kognitiiviradioverkkojen turvallisuuden haasteita ja ongelmakohtia.

## 2 Kognitiiviradioverkot

Kognitiiviradioiden avulla voidaan muodostaa kognitiiviradioverkkoja. Tässä luvussa käsitellään kognitiiviradioita (engl. *cognitive radio*), kognitiiviradioverkkoja (engl. *cognitive radio network*) ja niihin liittyviä asioita.

### 2.1 Radiospektrin rajallisuus

Radiospektri (engl. *radio spectrum*) voidaan ajatella loppumattomana luonnonvarana, koska se ei kulu käytettäessä. Samoja tai lähekkäisiä taajuuskaistoja käyttävät radiolaitteet voivat aiheuttaa toisilleen häiriötä, mikä aiheuttaa radiospektrin rajallisuuden. Rajallisuudesta johtuen yleisesti käytössä on käytäntö, jossa eri viranomaistahot määräävät taajuuksien käytöstä sekä kansainvälisesti, että eri alueilla esimerkiksi radiolupien avulla, jotta taajuuskaistojen häiriövapaa käyttö olisi taattua. Kiinteät määräykset taajuuksien käytöstä johtavat siihen, että radiospektriä ei hyödynnetä läheskään niin paljon kuin olisi mahdollista. Tulevaisuudessa tulee olemaan yhä enemmän ja enemmän langattomia laitteita, jotka kaikki käyttävät radiotaajuuksia. Laitteiden määrää tulee lisäämään esimerkiksi esineiden internetin (IOT, engl. *internet of things*) kehittyminen. Esimerkiksi Valenta ym. (2010) ovat tutkineet radiospektrin hyödyntämistasoa.

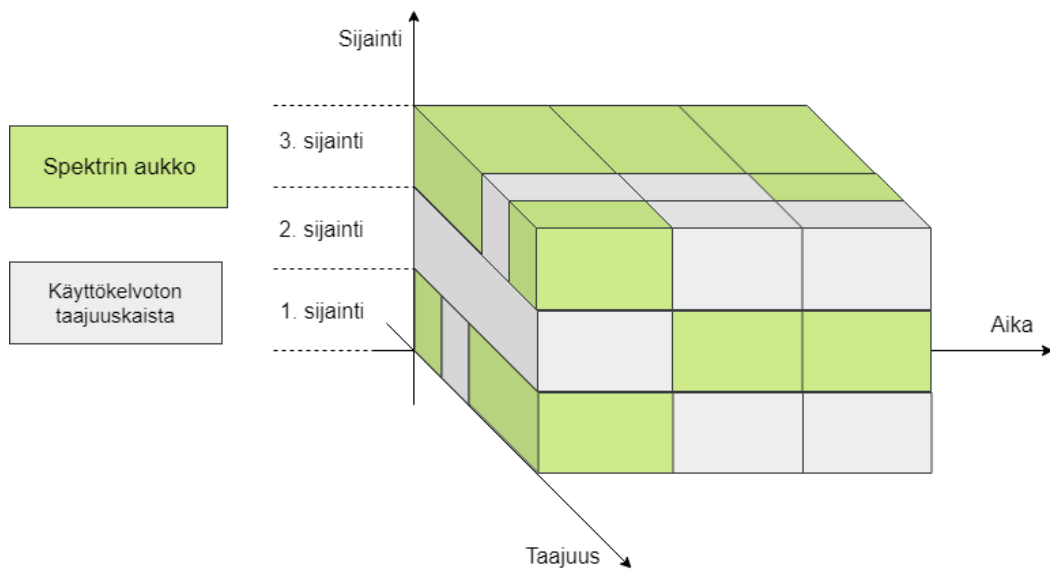
### 2.2 Radiospektrin liityntäperiaatteet

Radiospektriä on perinteisesti käytetty kiinteän spektrin liityntäperiaatteen (FSA, engl. *fixed spectrum access policy*) mukaisesti. FSA-periaatteessa on tyypillisesti jokin viranomaiselin, kuten Suomessa Traficom, joka varaa FSA-periaatteen mukaisesti eri kaistanleveyksien mukaisia taajuuskaistoja radiospektristä ainoastaan luvanvaraiseen käyttöön. Tällöin ainoastaan taajuuskaistaa koskevan luvan hallitsevat primäärikäyttäjät (engl. *primary user*) voivat käyttää varattuja taajuuskaistoja radiospektristä omiin käyttötarkoituksiinsa, eikä muita radiospektrin käyttäjiä ajatella olevan olemassa. Tämä voi johtaa radiospektrin matalaan hyödyntämistasoon esimerkiksi televisiolle varatuilla taajuuskaistoilla. FSA-periaatteelle on vaihtoehtoksi esitetty dynaamista spektrin liityntäperiaatetta (DSA, engl. *dynamic spectrum access*

*policy*). DSA-periaatteessa on edelleen olemassa ajatus primäärikäyttäjistä, joille voi olla varattuna taajuuskaistoja radiospektristä. Poiketen FSA-periaatteesta, DSA-periaatteessa ajatellaan radiospektrillä olevan primäärikäyttäjien lisäksi myös muita sekundäärikäyttäjiksi (engl. *secondary user*) kutsuttuja käyttäjiä. DSA-periaatteessa tarkoituksena on, että sekundäärikäyttäjä voi käyttää varattua taajuuskaistaa radiospektristä silloin kun käyttö ei aiheuta häiriötä primäärikäyttäjille, joille kyseinen taajuuskaista on varattu. (Liang ym. 2011.) Käyttämättömiä taajuuskaistoja kutsutaan myös spektrin aukoksi (engl. *spectrum hole*). Tällaiseen havainnointiin kykenevä sekundäärikäyttäjä on lähtökohtaisesti spektriä aistiva kognitiiviradio.

### **2.3 Radiospektrin aukot ja OSA-periaate**

Tandra, Misha ja Sahai (2009) tarkoittavat radiospektrin aukolla avaruus-aika-taajuus-aluetta, jota sekundäärikäyttäjät voivat hyödyntää. Ajan suhteen riittää, ettei primäärikäyttäjä juuri silloin käytä kyseistä taajuuskaistaa, mutta taajuuden kohdalla täytyy huomioida mahdollinen häiriön aiheutuminen vierekkäisille taajuuskaistoille. Esimerkiksi Clement, Krishna ja Bagubali (2012) luokittelevat spektrin aukot temporaalisiin ja spatiaalisiin spektrin aukkoihin. Temporaalinen spektrin aukko on vapaana sekundäärikäyttäjän käyttöön jonakin ajankohtana, ja spatiaalinen spektrin aukko on vapaana käytettäväksi sekundäärikäyttäjän ollessa tietyssä sijainnissa.



Kuvio 1. OSA-malli ja spektrin aukot (mukaillen Liang ym. 2011).

Kuviossa 1 havainnollistetaan spektrin aukkoja. Se esittää samalla opportunistista spektrin liityntäperiaatetta (myös OSA-malli, engl. *opportunistic spectrum access*), joka muistuttaa toimintaperiaatteeltaan luvussa 2.2 mainittua DSA-periaatetta. OSA-periaatteessa kognitiiviradiot käyttävät spektrin aistintaa havaitakseen kuviossa 1 vihreällä korostettuja spektrin aukkoja, joita kognitiiviradiot hyödyntävät opportunistisesti aina, kun niiden hyödyntäminen on mahdollista (Liang ym. 2011). Joissain julkaisuissa DSA-periaatteella tarkoitetaan täysin samaa asiaa kuin OSA-periaatteella. Esimerkiksi Santivanezin ym. (2006) mukaan DSA-periaate on vain toinen nimitys OSA-periaatteelle. Määritelmien välillä oleellinen ero kuitenkin on, ettei DSA-periaatteen määritelmässä mainita mitään siitä, tapahtuuko sekundäärikäyttäjälle jonakin ajankohtana käyttökelpoisten radiospektrin taajuuskaistojen käyttöönotto automaattisesti vai manuaalisesti.

OSA-mallilla on paljon yhtäläisyyksiä luvussa 2.5 tarkemmin tarkasteltavan kognitiiviradioverkkojen yhdistetyn mallin kanssa.

## 2.4 Ohjelmisto- ja kognitiiviradiot

Mitola (1992) lanseerasi ensimmäisenä ohjelmistoradion (SR, engl. *software radio*) käsitteen. Ohjelmistoradiolla voidaan tarkoittaa radiolaitetta, jossa osa tavallisen radiolaitteen



komponenteista on toteutettu ja korvattu ohjelmiston avulla (Dillinger, Madani ja Alonistioti 2003). Korvattuja komponentteja voivat olla esimerkiksi taajuussekoitin (taajusmikseri) tai modulaattori.

Kognitiiviradioilla ei toistaiseksi ole vain yhtä virallista määritelmää, mutta kaksi tunnetuinta määritelmää ovat Mitolan ja Haykinin esittämät määritelmät. Mitola (2000) määrittelee kognitiiviradion tarkoittamaan tilannetta, jossa kämmentietokoneet ja tietoverkot kykenevät tunnistamaan käyttäjiensä kommunikaatiotarpeita. Tällaisten tarpeiden tunnistamisen tulisi tapahtua tilanteen mukaan. Kun käyttäjälle on tunnistettu kommunikaatiotarpeita, tarjottaisiin käyttäjälle radioresurssit ja langattomat palvelut tarpeiden mukaan.

Haykin (2005) taas määrittelee kognitiiviradion älykkääksi ohjelmistoradioon pohjautuvaksi radiojärjestelmäksi, joka on tietoinen ympäristöstään. Ympäristöstä havaitsemiensa asioiden avulla Haykinin kognitiiviradio muuntelee omia toiminnallisia parametrejaan, kuten lähetystehoja tai kantotaajuuttaan tarpeen vaatiessa. Tällaisella mukautumisella ympäristönsä mukaisesti kognitiiviradio kykenee takaamaan luotettavan kyvyn kommunikoida missä ja milloin tahansa. Mukautumisessa oleellista on tavoitella myös radiospektrin tehokkaampaa käyttöä. Tällaisen mukautumisen mahdollistava asia on ohjelmistoradioon pohjautuminen.

Kognitiiviradioille on useita muitakin määritelmiä, joita on yrittänyt vakinaistaa muun muassa Yhdysvalloissa viranomaiselimenä toimiva *Federal Communications Commission*, *SDR Forum*, ja *IEEE Standard Coordination Committee* (Wyglinski, Nekovee ja Hou 2009).

## **2.5 Kognitiiviradioverkkojen mallit**

Kognitiiviradioiden avulla voidaan muodostaa kognitiiviradioverkkoja, joiden kolme yleisintä mallia ovat yhdistetty malli (engl. *interweave model*), allekkainen malli (engl. *underlay model*) ja päällekkäinen malli (engl. *overlay model*) (Abdelmohsen ja Hamouda 2017). Mallien nimien voi ajatella pohjautuvan radiospektrin käyttöhierarkiaan. Yhdistetyssä mallissa primääri- ja sekundäärikäyttäjät ovat samanarvoisia, allekkaisessa mallissa sekundäärikäyttäjät ovat alempiarvoisia ja päällekkäisessä mallissa sekundäärikäyttäjät ovat ylempiarvoisia. Järjestys hierarkissa määrittelee prioriteetin radiospektrin käyttöön.

Yhdistetyssä mallissa ajatellaan kognitiiviradioverkolla olevan primääri- ja sekundäärikäyttäjiä. Tällaisessa verkossa kognitiiviradiot aistivat toistuvasti, onko olemassa käytettävissä olevaa spektrin aukkoa (Biglieri ym. 2015). Jos tällainen aukko on olemassa, sekundäärikäyttäjä hyödyntää sitä opportunistisesti. Abdelmohsenin ja Hamoudan (2017) mukaan yhdistetyssä mallissa sekundäärikäyttäjän täytyy myös poistua nopeasti hyödyntämältään kanavalta jos primäärikäyttäjä ilmestyy takaisin kanavalle, mikä lähtökohtaisesti tapahtuu etsimällä hyödynnettäväksi uusi aukko spektristä. Näin yhdistetyssä mallissa priorisoidaan primäärikäyttäjille täysin häiriöttömän spektrin käytön takaamista. Olennaista yhdistetylle mallille on, ettei primäärikäyttäjien tarvitse tietää mitään sekundaarikäyttäjien olemassaolosta. Mallia voidaankin pitää yksinkertaisimpana mallina kognitiiviradioverkolle, koska se ei vaadi radiospektrin jakamista (engl. *spectrum sharing*) primääri- ja sekundäärikäyttäjien välillä. Jakamisella tarkoitetaan primääri- ja sekundäärikäyttäjien käyttävän samaa taajuuskaistaa samanaikaisesti.

Allekkaisessa ja päällekkäisessä mallissa hyödynnetään radiospektrin jakamista. Wangin ja Liun (2011) kuvauksessa allekkaisesta mallista sekundäärikäyttäjät käyttävät primäärikäyttäjälle varattua taajuuskaistaa myös silloin, kun taajuuskaistan primäärikäyttäjät käyttävät kaistaa. Koska samanaikaisuudesta aiheutuu häiriötä primäärikäyttäjille, on allekkaisessa mallissa jokaisella primäärikäyttäjällä määriteltynä häiriölämpörajaksi (engl. *interference temperature limit*) kutsuttu kynnysarvo lähetysteholle (engl. *transmission power*). Sen ylittäminen aiheuttaisi liikaa häiriötä primäärikäyttäjälle. Sekundäärikäyttäjien täytyy tällöin allekkaisessa mallissa pitää huoli siitä, ettei sekundäärikäyttäjän oma lähetysteho ylitä primäärikäyttäjän määrittelemää kynnysarvoa. Koska sekundäärikäyttäjien lähetysteho on mallissa rajoitettu, malli ei sovellu käytettäväksi silloin kun sekundäärikäyttäjien on tarve kommunikoida pitkällä kantamalla. Allekkaisessa mallissa sekundäärikäyttäjien ei myöskään välttämättä tarvitse ikinä hyödyntää spektrin aistintaa täysin vapaana olevan taajuuskaistan etsimiseksi.

Srinivasan ja Jafarin (2007) kuvailemassa päällekkäisessä mallissa oletetaan, että sekundäärikäyttäjä tietää etukäteen minkälaisen viestin primäärikäyttäjä haluaa välittää. Lisäksi he jakavat päällekkäisen mallin kahteen eri versioon, joita kutsutaan itsekkäiksi ja epäitsekkäiksi lähestymistavoiksi. Molemmissa versioissa sekundäärikäyttäjä on radiospektrin käyttöhie-

rarkiassa primäärikäyttäjää korkeammalla, jolloin sekundäärikäyttäjällä on prioriteetti käyttää radiospektriä primäärikäyttäjän sijaan. Itsekkässä lähestymistavassa sekundäärikäyttäjä ei välitä ollenkaan siitä, käyttääkö primäärikäyttäjä taajuuskaistaa vai ei, vaan käyttää joka tapauksessa mahdollisimman paljon lähetystehoa omiin tarkoituksiinsa. primäärikäyttäjälle tästä aiheutuva häiriö kumotaan hyödyntämällä likaisen paperin koodausta (engl. *dirty paper coding*) ja ennakkotietoa primäärikäyttäjän viestistä. Epäitsekkäässä lähestymistavassa sekundäärikäyttäjälä taas varaa tarvittavan osan omasta lähetystehostaan primäärikäyttäjän viestin välittämiseksi eteenpäin. Loput lähetystehosta käytetään sekundäärikäyttäjän omiin tarpeisiin. Epäitsekkäässä lähestymistavassa sekundäärikäyttäjä taas eliminoi häiriön hyödyntämällä likaisen paperin koodausta omaan viestiinsä.

Kaikille kolmelle mallille yhteistä on se, ettei yhdenkään mallin toiminnalle ole kriittistä primäärikäyttäjän kognitiivisuus. Jokaisessa mallissa ainoastaan sekundäärikäyttäjien tarvitsee olla kognitiiviradioita, primäärikäyttäjät voivat olla perinteisiä tai ei-kognitiivisia ohjelmistoradioita. Malleista yhdistetyn mallin mukaisen kognitiiviradioverkon käyttöönotto laajemmalla skaalalla on todennäköisesti helpointa, sillä mallia varten nykyisen FSA-periaatteen mukaisen infrastruktuurin ei tarvitse huomioida kognitiiviradioiden olemassaoloa.

### 3 Spektrin aistinta

Spektrin aistinnalla (engl. *spectrum sensing*) tarkoitetaan prosessia, jossa kognitiiviradio nuuhki ympäristöstään signaalin ja päättelee nuuhkitusta signaalista esimerkiksi sen, onko ympäristössä jo muita radiolaitteita (Sithamparanathan ja Giorgetti 2012). Haykinin, Thomsonin ja Reedin (2009) mukaan spektrin aistinta voidaan määrittellä radiospektrin aukkojen etsimiseksi kognitiiviradion lähinaapurustossa kognitiiviradion vastaanottimen avulla. Heidän mukaansa spektrin aistinta on myös tärkein kognitiiviradioiden toimintaa mahdollistava tekniikka. Spektrin aistintaa on mahdollista toteuttaa sekä fyysisellä kerroksella ja MAC-kerroksella (Shin ja Kim 2006).

Axellin ym. (2012) mukaan kaikista yksinkertaisimmillaan spektrin aistintaa voidaan kuvailla signaalinkäsittelyn ongelmana, jossa halutaan selvittää kumpi kahdesta hypoteesista

$$\begin{aligned} H_0 : \vec{y}[n] &= \vec{w}[n], & n = 1, \dots, N \\ H_1 : \vec{y}[n] &= \vec{x}[n] + \vec{w}[n], & n = 1, \dots, N \end{aligned} \quad (3.1)$$

pitää paikkansa. Hypoteesiparissa (3.1)  $\vec{x}[n]$ :llä merkitään primäärikäyttäjän signaalia,  $\vec{w}[n]$ :llä kohinaa,  $N$ :llä eri ajanhetkinä otettujen näytteiden lukumäärää ja  $\vec{y}[n]$ :llä vastaanotettua signaalia ajanhetkenä  $n$ . Jos hypoteesi  $H_0$  pitää paikkansa, ei radiospektrin osan käyttäminen häiritse ainakaan yhtään primäärikäyttäjää. Hypoteesien väliltä päätetään tyypillisesti muodostamalla vastaanotetun signaalin  $\vec{y}$  avulla testisuure, jota verrataan johonkin ennaltamäärättyyn kynnysarvoon.

Axell ym. (2012) kirjoittavat signaalin tunnistamisen, jota spektrin aistintakin on, perustuvan joko klassiseen tilastotieteeseen tai Bayes-tilastotieteeseen. Paradigmojen välisistä eroista huolimatta molemmissa päädytään käyttämään testisuurena uskottavuusosamäärää hypoteesiparin (3.1) mukaisten hypoteesien väliltä todennäköisemmän päättämiseen. Luvussa 3.2 käsitellään tarkemmin uskottavuusosamäärätestaukseen (LRT, engl. *likelihood ratio test*) perustuvaa spektrin aistintaa.

### 3.1 Spektrin aistintamenetelmiä

Dhope (2015) luokittelee erilaiset spektrin aistintamenetelmät kolmeen eri kategoriaan. Menetelmät voivat toimintatapansa vuoksi vaatia tietoa kohinasta ja vastaanotetusta signaalista, pelkästään kohinasta tai eivät kummastakaan. Eri menetelmillä on omat hyödyt ja haittansa, ja tämän vuoksi eri menetelmät eivät myöskään välttämättä sovellu järkevästi käytettäväksi kaikissa eri kognitiiviradioverkkojen malleissa. Luvussa 3.3 käsitellään tarkemmin näistä menetelmistä energian havainnointiin (engl. *energy detection*) perustuvaa spektrin aistintamenetelmää.

Spektrin aistintamenetelmät Dhopen (2015) mukaan luokiteltuna:

- Signaalin ja kohinan tehosta tietoa tarvitsevat menetelmät
  - Uskottavuusosamäärätestaus
  - Sovitettu suodatus (engl. *matched filtering*)
  - Syklostationaarinen havainnointi (engl. *cyclostationary detection*)
  
- Vain kohinan tehosta tietoa tarvitsevat menetelmät
  - Energian havainnointi (ED, engl. *energy detection*)
  - Aallokkeisiin perustuvat menetelmät (engl. *wavelet-based*)
  
- Menetelmät, jotka eivät tarvitse tietoa signaalin ja kohinan tehosta
  - Sokosti yhdistävä ED (engl. *blindly combined energy detection*)
  - Kovarianssiin perustuva (engl. *covariance-based*)

Yllä mainittujen menetelmien lisäksi myös uusia menetelmiä spektrin aistintaan on esitetty. Uudempia menetelmiä ovat muun muassa Reyesin ym. (2016) ja Zhangin ym. (2019) esittämät menetelmät. Reyesin ym. esittämä menetelmä perustuu signaalin autokorrelaatioon (engl. *autocorrelation*) ja Zhangin ym. esittämä menetelmä on yhteistyönä tapahtuvaan spektrin aistintaan (engl. *cooperative spectrum sensing*) perustuva menetelmä.

Dhopen (2015) mukaan aistintamenetelmien suorituskykyä voidaan tarkastella kahden eri

mittarin, tunnistuksen todennäköisyyden  $P_d$  (engl. *probability of detection*) ja väärän hälytyksen todennäköisyyden  $P_{fa}$  (engl. *probability of false alarm*) avulla.  $P_d$  kertoo, millä todennäköisyydellä menetelmä havaitsee primäärikäyttäjän läsnäolon taajuuskaistalla.  $P_{fa}$  kertoo, millä todennäköisyydellä menetelmä havaitsee primäärikäyttäjän läsnäolon taajuuskaistalla silloinkin, kun primäärikäyttäjä ei oikeasti ole läsnä. On myös mahdollista, että menetelmä ei havaitse primäärikäyttäjän läsnäoloa. Tämän tilanteen todennäköisyyttä Dhope kutsuu katoamisen todennäköisyydeksi  $P_m$  (engl. *probability of missing*).

## 3.2 Uskottavuusosamäärättestaus

Uskottavuusosamäärättestauksen avulla voidaan selvittää, onko nollahypoteesilla vai vastahypoteesilla parempi sopivuus (engl. *goodness of fit*) tilastolliseen malliin. Seuraavana on tapa spektrin aistintaan uskottavuusosamäärättestauksen avulla Zengin ym. (2010) esittämä. Neyman-Pearsonin lemman mukaan tiettyä väärän hälytyksen todennäköisyyttä vastaava testisuure saadaan uskottavuusosamäärättestin

$$T_{LRT}(\vec{v}) = \frac{p(\vec{v}|H_1)}{p(\vec{v}|H_0)} \quad (3.2)$$

mukaan, missä  $p$  on tiheysfunktio (engl. *probability density function, PDF*),  $\vec{v}$  vastaanotettua signaalia vastaava vektori ja  $H_1$  sekä  $H_0$  hypoteesiparin (3.1) mukaiset hypoteesit. Testisuureen  $T_{LRT}(\vec{v})$  ollessa suurempi kuin kynnyisarvo  $\gamma$  oletetaan  $H_1$  todeksi. Zengin ym. mukaan tämän menetelmän käytössä suurin haaste syntyy siitä, miten  $\vec{v}$ :n noudattama jakauma riippuu eri asioista hypoteesien  $H_1$  ja  $H_0$  kohdalla. Uskottavuusosamäärättestauksen käyttö vaatii tämän vuoksi signaalin ja kohinan jakaumien lisäksi tietoa langattomista kanavista, mikä hankaloittaa huomattavasti menetelmän käyttöä.

### 3.3 Energian havainnointiin perustuva spektrin aistinta

Energian havainnointiin perustuva menetelmä on yksi yksinkertaisimmista ja helpoiten toteutettavista spektrin aistintamenetelmistä, sillä menetelmä ei vaadi toimiakseen minkäänlaista ennakkotietoa primäärikäyttäjän signaalista. Menetelmässä on kyse signaalin energiatason arvioinnista. Esimerkiksi Gatate ja Agarkhed (2017) esittävät menetelmän eduksi toteuttamisen helppouden, vaikka menetelmä heidän mukaansa kykenee tunnistamaan primäärikäyttäjän olemassaolon huonommin kuin ominaisuuksien tunnistamiseen (engl. *feature detection*) perustuva spektrin aistinta. Vastaavasti menetelmällä väärän hälytyksen todennäköisyys on suurempi kuin esimerkiksi Reyesin ym. (2016) esittämällä autokorrelaatioon perustuvalla menetelmällä.

Energian havainnoinnissa käytetty testisuure  $T_{ED}$  on

$$T_{ED} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} (|\vec{v}[n]|)^2, \quad (3.3)$$

missä  $N$  on eri ajanhetkinä otettujen signaalinäytteiden määrä ja  $\vec{v}$  on vastaanotettu signaali (Dhope 2015). Testisuure  $T_{ED}$  kertoo vastaanotetun signaalin energian keskiarvon, jota uskottavuusosamäärätestin tavoin johonkin kynnysarvoon  $\gamma$  vertaamalla päätellään kumpi hypoteeseista 3.1 pitää paikkansa. Energian havainnoinnissa käytettävä testisuure voidaan johdattaa uskottavuusosamäärätestiin pohjautuvan menetelmän kaavasta (3.2), minkä käyvät läpi useamman vastaanottavan antennin tapauksessa esimerkiksi Zeng ym. (2010). Tällöin tärkeimpiä oletuksia ovat häipymisen tasaisuus (engl. *flat-fading*), ja kohinan sekä primäärikäyttäjän signaalien Gaussin jakauman noudattaminen.

Cabric, Mishra ja Brodersen (2004) mainitsevat menetelmällä olevan useita heikkouksia. Tuntemattomat tai muuttuvat kohinatasot aiheuttavat ongelmia testisuureen vertaamisessa ennaltamäärättyyn kynnyksirajaan. Tällöin energian havainnointia käyttävä kognitiiviradio tekee herkästi virheitä primäärikäyttäjän signaalin tunnistamisen suhteen. Menetelmää käytettäessä ei myöskään ole mahdollista tunnistaa eroa moduloitujen signaalien, kohinan ja häiriön väliltä, vaan ne kaikki oletetaan samaksi. Kognitiiviradio ei kykene tämän vuoksi hyödyntämään menetelmiä häiriön vähentämiseen (engl. *interference canceling*), jos samaa kanavaa käyttää toinenkin vastaanotin. Menetelmä ei myöskään toimi hajaspektritekniikoilla (engl. *spread spectrum*) lähetettyjen signaalien tunnistamiseen. Hajaspektritekniikoissa lähe-

tettävä signaali koodataan näyttämään taustakohinalta, mikä aiheuttaa menetelmän käyttämisessä ongelmia. Menetelmä ei heidän mukaansa sovellu käyttöön yleisesti käytössä olevan FSA-periaatteen alaisuudessa. He eivät kuitenkaan väitä menetelmän olevan käyttökelpoton DSA-periaatteessa noudatettaessa, mihin siirtyminen on tulevaisuudessa on mahdollista. FSA- ja DSA-periaatteet käsiteltiin aikaisemmin luvussa 2.2.



## 4 Ongelmat ja haasteet

Kognitiiviradioverkkoihin ja eri spektrin aistintamenetelmiin liittyy niiden luonteiden vuoksi erilaisia turvallisuusriskejä ja muita ongelmia. Tällaiset turvallisuusriskit voivat liittyä esimerkiksi kognitiiviradioverkon toiminnan tahalliseen häirintään eri tavoilla, kuten yhdistetyssä mallissa opportunistisesti spektrin aukkoja hyödyntäviä sekundäärikäyttäjiä häiritsemällä tai primäärikäyttäjää jäljittelemällä. Toimintaa häiritseviä hyökkäyksiä kutsutaan yleisesti palvelunestohyökkäyksiksi (engl. *denial of service attack, DoS*).

### 4.1 Primäärikäyttäjän jäljittely

Park ja Chen (2006) tarkoittavat primäärikäyttäjän jäljittelyhyökkäyksellä (PUE, engl. *primary user emulation attack*) tilannetta, jossa sekundäärikäyttäjän hyödyntämälle taajuuskaistalle ilmestyy toinen primäärikäyttäjää esittävä sekundäärikäyttäjä. PUE-hyökkäykset ovat heidän mukaansa haaste etenkin, kun käytössä on energian havainnointiin perustuva spektrin aistintamenetelmä, sillä tällöin sekundäärikäyttäjät olettavat automaattisesti tunnistamattoman signaalin olevan primäärikäyttäjän signaali. Tällöin hyökkäävä sekundäärikäyttäjä voi esittää primäärikäyttäjää ja estää muita sekundäärikäyttäjiä käyttämästä taajuuskaistoja lähettämällä niille tunnistamattomissa olevia signaaleja. PUE-hyökkäykset voidaan luokitella itsekkäiksi (engl. *selfish PUE attack*) ja haitallisiksi (engl. *malicious PUE attack*) hyökkääjän motiivin perusteella. Itsekäs hyökkääjä haluaa yksinkertaisesti omia osan radiospektristä itselleen, kun taas haittamielisesti motivoitunut hyökkääjä pyrkii vain estämään yhdistetyn mallin radioverkon toimintaa. Haittamielinen hyökkääjä ei välttämättä käytä itse radiospektriä mihinkään tarkoitukseen.

### 4.2 Kognitiiviradioiden häirintä

Perinteisessä radiohäirinnässä (engl. *radio jamming*) tavoitteena on estää radiotaajuuksien käyttöä aiheuttamalla häiriötä taajuuskaistoille, tyypillisesti lähettämällä riittävän tehokasta signaalia suuren häiriön aiheuttamiseksi vastaanottavan radiolaitteen päässä. Wang ym. (2011) määrittelevät perinteiselle radiohäirinnälle oman version kognitiiviradioverkkojen tapauk-

nessa. Heidän mukaansa kognitiiviradioverkon häirintä tapahtuu estämällä spektrin aukkojen havaitsemista ja niiden hyödyntämistä. Käytännössä tämä tapahtuisi siten, että kognitiiviradioverkkoa häiritsevät hyökkääjät kohdistavat hyökkäyksiä erityisesti taajuuksille, mitkä eivät ole primäärikäyttäjille varattuja taajuuksia.

### 4.3 Tietomurto

Zou ym. (2015) määrittelevät tietomurron (engl. *intelligence compromise*) yhtenä kognitiiviradioiden turvallisuusriskinä. Tietomurrossa hyökkääjä pääsee käsiksi kognitiiviradion ohjelmistoon, mahdollistaen kognitiiviradion kaappaamisen hyökkääjän omiin tarkoituksiin. Hyökkääjä kykenee tällöin muokkaamaan kognitiiviradion toiminnallisia parametreja tai jopa kognitiiviradion spektrin aistintaan käyttämään algoritmia. Tietomurron kohteeksi joutuneen kognitiiviradion paikantaminen on vaikeaa, koska hyökkäyksen kohteeksi joutunut kognitiiviradio voi vaikuttaa ulospäin täysin samanlaiselta kuin ennen hyökkäystä. Hyökkääjän on mahdollista aiheuttaa käytetystä kognitiiviradioverkon mallista riippuen erilaisia ongelmia kognitiiviradioverkon toiminnalle, ja pahimmillaan jopa lamauttaa verkon toiminnan kokonaan. Esimerkiksi allekkaisen mallin kognitiiviradioverkossa hyökkääjä voisi aiheuttaa haittaa primäärikäyttäjien toiminnalle asettamalla uhriksi joutuneen kognitiiviradion olemaan noudattamatta häiriölämpörajoja.

## 5 Yhteenveto

Tutkielmassa käsiteltiin radiospektrin rajallisuutta, radiospektrin liityntäperiaatteita, kognitiiviradioita, kognitiiviradioverkkoja, spektrin aistintaa ja niihin liittyviä haasteita ja ongelmia. Radiospektrin ruuhkautumisesta muodostuu tulevaisuudessa nykyisellä radiospektrin liityntäperiaattella ongelma, johon kognitiiviradioverkot ovat ratkaisu. Ruuhkautuminen johtuu nykyisestä kiinteästä liityntäperiaatteesta ja langattomien laitteiden määrän lisääntymisestä tulevaisuudessa. Kiinteästä dynaamiseen liityntäperiaatteeseen siirtyminen tulee olemaan mahdollista ottamalla kognitiiviradiotekniikkaa käyttöön laajemmalla tasolla.

Kognitiiviradioverkoista tutkielmassa nostettiin esille kolme yleisintä mallia. Näistä malleista helpoiten yleiseen käyttöön otettavaksi soveltuu yhdistetty malli. Yhdistetyn mallin toiminnan kannalta ei ole tarpeen, että nykyinen kiinteän liityntäperiaatteen mukainen olemassaoleva infrastruktuuri huomioi kognitiiviradioiden ilmestymistä radioympäristöön millään tavalla. Allekkaisessa mallissa jokaisen primäärikäyttäjän pitäisi määrittellä itselleen sopiva häiriölämpöraja, ja päällekkäisessä mallissa primäärikäyttäjien täytyisi kyetä välittämään sekundaarikäyttäjille ennakkotieto omasta lähetettävästä viestistään.

Spektrin aistintamenetelmiä on useita erilaisia. Tutkielmassa spektrin aistintamenetelmistä keskityttiin erityisesti energian havainnointiin perustuvaan menetelmään ja uskottavuusosamäärätestaukseen. Energian havainnointiin perustuva menetelmä osoittautui menetelmistä yksinkertaisimmaksi toteuttaa, mutta vastoin alkuperäisiä odotuksia menetelmä osoittautui tehokkuutensa puolesta huonoksi verrattuna muihin spektrin aistintamenetelmiin. Energian havainnointimenetelmää käyttävä kognitiiviradio on myös altis ulkopuoliselle häirinnälle, esimerkiksi primäärikäyttäjän jäljittelyhyökkäyksen muodossa. Uusia spektrin aistintamenetelmiä on jatkuvasti kehitteillä. Ongelmista ja haasteista käsiteltiin kolme esimerkkitapausta, mutta muitakin tutkielmassa mainitsemattomia turvallisuuteen liittyviä haasteita on useita.

Tutkielman pohjalta jatkotutkimuksen kohteeksi sopisivat yhteistyötä hyödyntävät spektrin aistintamenetelmät, jotka tämän tutkielman lähdemateriaalia etsiessä näkyvät olevan trendi aihealueen tutkimuksessa.

## Lähteet

Wang, B., Y. Wu, K. J. R. Liu ja T. C. Clancy. 2011. "An anti-jamming stochastic game for cognitive radio networks". *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 29:877–889.

Wang, B., ja R. K. Liu. 2011. "Advances in cognitive radio networks: A survey". *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing* 5:5–23.

Wygłinski, A. M., M. Nekovee ja T. Hou. 2009. *Cognitive Radio Communications and Networks: Principles and Practice*. Academic Press: Academic Press.

Abdelmohsen, A., ja W. Hamouda. 2017. "Advances on Spectrum Sensing for Cognitive Radio Networks: Theory and Applications". *IEEE Communications Surveys Tutorials* 19:1277–1304.

Axell, E., G. Leus, E. G. Larsson ja H. V. Poor. 2012. "Spectrum Sensing for Cognitive Radio : State-of-the-Art and Recent Advances". *IEEE Signal Processing Magazine* 29:101–116.

Biglieri, E., A. J. Goldsmith, L. J. Greenstein, N. B. Mandayam ja H. V. Poor. 2015. *Principles of Cognitive Radio*. Cambridge University Press: Cambridge University Press.

Cabric, D., S. M. Mishra ja R. W. Brodersen. 2004. "Implementation issues in spectrum sensing for cognitive radios". Teoksessa *Conference Record of the Thirty-Eighth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, 2004*. 1:772–776.

Clement, J. C., K. V. Krishnan ja A. Bagubali. 2012. "Cognitive Radio: Spectrum Sensing Problems in Signal Processing". *International Journal of Computer Applications* 40:37–40.

Dhope, T. S. 2015. *Cognitive Radio Networks Optimization with Spectrum Sensing Algorithms*. River Publishers: River Publishers.

Dillinger, M., K. Madani ja N. Alonistioti. 2003. *Software Defined Radio: Architectures, Systems and Functions*. Wiley: Wiley.

Gatate, V., ja J. Agarkhed. 2017. "Survey on spectrum sensing techniques in cognitive radio networks". Teoksessa *2017 International Conference on Intelligent Computing, Instrumentation and Control Technologies (ICICT)*, 1440–1445.

- Haykin, S. 2005. "Cognitive radio: brain-empowered wireless communications". *IEEE journal on selected areas in communications* 23:201–220.
- Haykin, S., D. J. Thomson ja J. H. Reed. 2009. "Spectrum Sensing for Cognitive Radio". *Proceedings of the IEEE* 97:849–877.
- Liang, Y.-C., K.-C. Chen, G. Y. Li ja P. Mahonen. 2011. "Cognitive radio networking and communications: an overview". *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 60:3386–3407.
- Mitola, J. 1992. "Software radios-survey, critical evaluation and future directions". Teoksessa *NTC-92: National Telesystems Conference*, 15–23.
- . 2000. "Cognitive Radio: An Integrated Agent Architecture for Software Defined Radio". Tohtorinväitöskirja, Royal Institute of Technology.
- Park, J.-M., ja R. Chen. 2006. "Ensuring Trustworthy Spectrum Sensing in Cognitive Radio Networks". Teoksessa *2006 1st IEEE Workshop on Networking Technologies for Software Defined Radio Networks*, 110–119.
- Reyes, H., S. Subramaniam, N. Kaabouch ja W. C. Hu. 2016. "A spectrum sensing technique based on autocorrelation and Euclidean distance and its comparison with energy detection for cognitive radio networks". *Computers Electrical Engineering* 52:319–327.
- Santivanez, C., R. Ramanathan, C. Partridge, R. Krishnan, M. Condell ja S. Polit. 2006. "Opportunistic spectrum access: challenges, architecture, protocols". Teoksessa *WICON '06 Proceedings of the 2nd annual international workshop on Wireless internet*, 1–9.
- Shin, K. G., ja H. Kim. 2006. "Adaptive MAC-layer Sensing of Spectrum Availability in Cognitive Radio Networks". Teoksessa *Real-Time Computing Laboratory*, 1–21. University of Michigan.
- Sithampanathan, K., ja A. Giorgetti. 2012. *Cognitive Radio Techniques : Spectrum Sensing, Interference Mitigation, and Localization*. Artech House: Artech House.
- Srinivasa, S., ja S. A. Jafar. 2007. "Cognitive Radios For Dynamic Spectrum Access - The Throughput Potential of Cognitive Radio: A Theoretical Perspective". *IEEE Communications Magazine* 45:73–79.

- Tandra, R., S. M. Mishra ja A. Sahai. 2009. "What is a Spectrum Hole and What Does it Take to Recognize One?" *Proceedings of the IEEE* 97:824–848.
- Traficom. 2018 (viitattu 29.04.2019). *Radiotaajuudet ja niiden käyttö*. <https://www.traficom.fi/fi/viestinta/viestintaverkot/radiotaajuudet-ja-niiden-kaytto>.
- Valenta, V., R. Marsalek, G. Baudoin, M. Villegas, M. Suarez ja F. Robert. 2010. "Survey on Spectrum Utilization in Europe: Measurements, Analyses and Observations". Teoksessa *5th International ICST Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications*. Cannes, France.
- Zeng, Y., Y.-C. Liang, A. T. Hoang ja R. Zhang. 2010. "A Review on Spectrum Sensing for Cognitive Radio: Challenges and Solutions". *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing* 2010.
- Zhang, S., Y. Wang, J. Li, P. Wan, Y. Zhang ja N. Li. 2019. "A cooperative spectrum sensing method based on information geometry and fuzzy c-means clustering algorithm". *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking* 2019.
- Zou, Y., J. Zhu, L. Yang, Y.-C. Liang ja Y.-D. Yao. 2015. "Securing Physical-Layer Communications for Cognitive Radio Networks". *IEEE Communications Magazine* 53:48–54.