

MAANPUOLUSTUSKORKEAKOULU

**KOGNITIIVINEN RADIO SOTILAALLISEN MAANPUOLUSTUKSEN
KONTEKSTISSA**

Diplomityö

Kapteeni
Jussi Honko

Yleisesikuntaupseerikurssi 57
maasotalinja

Heinäkuu 2015

MAANPUOLUSTUSKORKEAKOULU

Kurssi Yleisesikuntaupseerikurssi 57	Linja Maasotalinja
Tekijä Kapteeni Jussi Honko	
Tutkielman nimi KOGNITIIVINEN RADIO SOTILAALLISEN MAANPUOLUSTUKSEN KONTEKSTISSA	
Oppiaine johon työ liittyy Operaatiotaito ja taktiikka	Säilytyspaikka MPKK:n kurssikirjasto
Aika Heinäkuu 2015	Tekstisivuja 107 Liitesivuja 43
TIIVISTELMÄ <p>Kognitiiviteknologialla on ennustettu olevan disruptiivisia vaikutuksia sodankäyntiin. Kognitiiviteknologian avulla pyritään löytämään myös ratkaisu kasvavista datansiirtovaatimuksista aiheutuvaan radiotaajuuden spektrin ahtauteen. Tämän tutkimuksen keskiössä on kognitiivinen radio. Diplomityössä ennakoidaan niitä muutoksia, joita radion kognitiiviset ominaisuudet tuovat sotilaalliseen toimintaympäristöön. Tutkimuksessa etsitään kognitiivisen radion suorituskykyyn, suorituskyvyn rakentamiseen ja käyttöön liittyviä tekijöitä, jotka ovat merkityksellisiä sotilaallisesta näkökulmasta. Radion kognitiivisuutta käsitellään kognitiivisten ominaisuuksien, kuten adaptiivisuuden tai tilannetietoisuuden, kautta.</p> <p>Painopisteenä on kognitiivisten ominaisuuksien keskinäinen arvottaminen, mahdollisten vaikutusten tarkastelu operatiivisessa viitekehyksessä sekä tarvittavien toimenpiteiden kartoittaminen kognitiivisen tekniikan operatiivisen käytön mahdollistamiseksi. Tutkimuksen pohjalta esitetään kognitiivisten ominaisuuksien tärkeysjärjestys suorituskyvyn ja johtamisjärjestelmien kehittämisen näkökulmista ja alustavia operatiivisia vaatimuksia kognitiiviselle radiolle sekä kuvataan spektrin hallinnan kehittämismahdollisuuksia. Operatiivisia vaikutuksia tutkitaan myös uhkalähtöisesti eli arvioimalla, miten tietty kognitiivinen ominaisuus vaikuttaisi yleisimpiin tiedonsiirtoverkkoihin kohdistuviin uhkiin. Lisäksi työssä arvioidaan kognitiivisen radion käyttöönoton esteitä Puolustusvoimissa. Tutkimuksen päämenetelmä on delfoi, jota on täydennetty asiantuntijahaastatteluin sekä -arvioin.</p> <p>Kognitiiviselle radiolle on useita erilaisia määritelmiä. Kaikkia kriteerejä täyttävää kognitiivista radiota ei ole vielä olemassa, vaikka kognitiivisia ominaisuuksia radioissa on ollut pitkään. Kognitiivinen radio, tai jo pelkästään ohjelmistoradio kehittyneillä kognitiivisilla ominaisuuksilla, tuo huomattavia mahdollisuuksia parantaa langattoman tiedonsiirron toimintakykyä sotilaallisessa käyttöympäristössä. Merkittävin suorituskykyisä sotilaallisessa käyttöympäristössä saadaan seuraavista kognitiivisista ominaisuuksista: 1) dynaaminen spektrin hyväksikäyttö (DSA) 2) yhteyksien adaptiivisuus ja radioresurssien hallinta (SLA ja RRM) sekä 3) älykäs verkonmuodostus (SON ja RBR).</p> <p>Tiedonsiirtojärjestelmien ylläpito ja rakentaminen vaativat aiempaa enemmän suunnittelua ja ammattitaitoa, mutta toisaalta loppukäyttäjän osaamistasovaatimuksia voidaan laskea sitä mukaa, kun lähestytään 0-konfiguraatiojärjestelmiä. Radioiden kognitiivisuuden myötä voidaan myös passiivisiin uhkiin, esimerkiksi elektroniseen tiedusteluun, varautua aiempaa tehokkaammin. Aktiivisiin uhkiin, kuten häirintään, kognitiiviset ominaisuudet vaikuttavat jopa toiminnan fundamentteja muuttavasti. Tiedonsiirtojärjestelmien ohjelmistopohjaisuus nostaa kyberin merkittävyttä arvioitaessa eri uhkien kokonaismerkityksiä. Onnistunut kyber-operaatio voi tarkoittaa koko järjestelmän lamautumista tai vakavaa tietovuotoa.</p> <p>Kognitiivisten ominaisuuksien liittäminen osaksi sotilasradiojärjestelmiä on haasteellista. Käyttöönoton esteitä ovat osaamisen puute, lainsäädännön ja regulaation jäykkyys, teknii-</p>	

kan osittainen kypsymättömyys sekä tietoturvan hallinta. Spektri on muutoksessa, mikä tulee näkymään spektrin sirpaloitumisena vuoteen 2020 mennessä. Paine taajuushallinnan muuttamisesta kognitiivitekniikkaa sallivampaan suuntaan nousee erityisesti siviilipuolen kehittyvien mobiililaitteiden datansiirtomäärien kasvaessa. Lainsäädäntö antaa viranomaisille suuret valtuudet säädellä spektrin käyttöä poikkeusoloissa. Tämä mahdollistaa sotilaallisten järjestelmien suunnittelun ja kehittämisen taajuusriippumattomasti jo normaalioloissa. Haasteena on spektrin hallinnoinnin kehittäminen esimerkiksi ennakoitua nopeammassa tilannekehityksessä. Spektriä tulisi hallita kokonaisturvallisuuden näkökulmasta joustavasti viranomaisten yhteisillä päätöksillä.

Kognitiivisen radion tulisi tulevaisuudessa voida käyttää muille järjestelmille osoitettuja taajuusresursseja taajuuksien ollessa käyttämättömänä. Kognitiivista radiota kannattaisi kehittää taajuusvapaasti. Spektri tulee olemaan tulevaisuudessa yhä ahtaampi, ja tähän haasteeseen kognitiivinen radio tarjoaa osaltaan ratkaisun.

AVAINSANAT

kognitiivinen radio, tiedonsiirtojärjestelmä, taajuushallinta, delfoi, disruptiivinen

SISÄLLYSLUETTELO

1. Johdanto	1
1.1 Tutkimuksen tausta.....	1
1.2 Tutkimuksen viitekehys	3
1.3 Tutkimusongelma.....	4
1.4 Aiempi tutkimus ja keskeiset lähteet.....	5
1.5 Kognitiivisen radion kehitys ja nykytila	6
1.6 Käsitteet ja määritelmät.....	8
2. Tutkimuksen toteutus	14
2.1 Tutkimusmenetelmä	14
2.2 Tutkimuksen kulku.....	16
2.3 Kysymysten muodostaminen	18
2.4 Aineiston analysointi.....	20
3. Kognitiivinen radio sotilaallisessa käyttöympäristössä	22
3.1 Kognitiivisen radion keskeiset ominaisuudet.....	22
3.1.1 Dynaaminen spektrin hyväksikäyttö.....	22
3.1.2 Moniantennijärjestelmät.....	24
3.1.3 Yhteyksien adaptiivisuus	25
3.1.4 Radioresurssien hallinta	26
3.1.5 Kognitiiviset häirintäjärjestelmät.....	27
3.1.6 Reaaliaikaiset spektrimarkkinat	27
3.1.7 Verkonmuodostus	28
3.2 Tietokannat osana kognitiivista radiota.....	29
3.3 Kognitiiviset ominaisuudet sotilaallisissa tiedonsiirtoverkoissa.....	31
3.3.1 Suojautuminen	33
3.3.2 Uhkat.....	35
3.4 Taajuushallinta	40
3.5 Johtopäätökset	41
4. Delfoi tulokset	45
4.1 Delfoi 1. kierros.....	45
4.1.1 Puolustusvoimien kannalta keskeisimmät kognitiiviset ominaisuudet.....	46
4.1.2 Kognitiivitekniikan ja kognitiivisen radion käyttöönoton esteet	53
4.1.3 Ideaalinen kognitiivinen radio.....	56
4.1.4 Päätelmät.....	59
4.2 Delfoi 2. kierros.....	59

4.2.1	Puolustusvoimien kannalta keskeisimmät kognitiiviset ominaisuudet	60
4.2.2	Väittämien analyysi.....	66
4.2.3	Päätelmät	80
4.3	Delfoin soveltuvuuden arviointi	84
4.4	Johtopäätökset	86
5.	PÄÄTELMÄT JA JATKUMOT	91
5.1	Kognitiivinen radio vuonna 2015 ja lähitulevaisuudessa.....	91
5.2	Kognitiivisen radion ominaisuudet ja niiden operatiivinen tärkeysjärjestys.....	93
5.3	Kognitiivisten ominaisuuksien vaikutus sotilaalliseen käyttöympäristöön.....	97
5.4	Spektri, kehittäminen, käyttö ja haasteet operatiivisessa viitekehyksessä	99
5.4.1	Kognitiivisen radion toimintaympäristö 2020	99
5.4.2	Toimintaympäristön kehittäminen	100
5.4.3	Kognitiivisen radion operatiivinen kehittäminen, käyttö ja vaatimukset.....	101
5.4.4	Kognitiivisen radion käyttöönoton esteitä	105
5.5	Jatkotutkimustarpeet ja -mahdollisuudet.....	106

LÄHTEET

LIITTEET

LYHENTEET

ALE	Automatic Link Establishment
AFC	Automatic Frequency Control
AMC	Adaptive Modulation and Control
BLOS	Beyond Line of Sight
CEPT	The European Conference of Postal and Telecommunications Administrations
COTS	Commercial of the Shelf
CR	Cognitive Radio
CRS	Cognitive Radio System
DARPA	Defense Advanced Research Projects Agency
DSA	Dynamic Spectrum Access
FCC	Federal Communications Commission
FEC	Forward Error Correction
ELTI	Elektroninen tiedustelu
ELVA	Elektroninen vaikuttaminen
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
ITU-R	International Telecommunication Union Radiocommunication Sector
LAN	Local Area Network
LOS	Line of Sight
LRV	Langaton runkoverkko
MANET	Mobile Ad hoc NETwork
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MISO	Multiple Input Single Output
OODA	Observe Orientate Decide Act
RBR	Role Based Reconfiguration
RDS	Radio Data System
RRM	Radio Resource Management
SDR	Software Defined Radio
SIMO	Single Input Multiple Output
SLA	Single Link Adaption
SON	Self Organized Networks
TPC	Transmit Power Control
UWB	Ultra Wide Band
WNaN	Wireless Network After Next
WRC	World Radiocommunication Conference

KOGNITIIVINEN RADIO SOTILAALLISEN MAANPUOLUSTUKSEN KONTEKSTISSA

1. Johdanto

1.1 Tutkimuksen tausta

Kognitiivitekniologiaa, sensoritekniologiaa ja verkostoitumistechnologiaa yhdistää ainakin kaksi asiaa: Ne ovat kolme ensimmäistä nimettyä teknologiaa, joilla voi olla disruptiivisia vaikutuksia sodankuvaan tai tapaan, jolla sotia tulevaisuudessa käydään (Kosola 2013, s. 19–22). Lisäksi yhdistämällä kaksi ensimmäistä teknologiaa innovatiivisesti lähetin-vastaanottimeen syntyy kognitiivinen radio. Kaikki elementit yhdessä puolestaan voivat muodostaa kognitiivisen radiojärjestelmän.

Disruptiivinen teknologia ymmärretään sotilaallisessa ympäristössä teknologiana, joka muuttaa sodankäyntiä tai sen pelisääntöjä niin merkittävästi, että se pakottaa muokkaamaan asevoimien doktriinia, rakennetta, resurssilinjauksia, henkilöstö- tai materiaalistrategiaa tai muita strategisia linjauksia. Pelkkä suorituskykyllisyys ei sen sijaan nosta teknologian merkitystä disruptiiviseksi.¹ Disruptiivinen teknologia vaikuttaa Puolustusvoimien rakenteisiin tai eri suorituskykyjen käyttöperiaatteisiin niin paljon, että se tulisi tunnistaa jo 10–20 vuotta ennen sen yleistymistä. Strategioissa disruptiiviset teknologiat tulisi tunnistaa 10–15 vuotta ennen kuin ne muuttuvat jokapäiväiseksi käyttökoneiksi. (Kosola 2013, s. 17.)

Monialainen tai monitieteinen tutkimus on 2000-luvulla nostettu keskeiseksi osaksi mm. monia yliopistotason tutkimushankkeita ja tieteenalaohjelmia. Lisäksi mm. Euroopan unionin tutkimuksen ja teknologian kehittämistä koskevan 7. puiteohjelman (v. 2007–2013) erityisenä painopistealueena on ollut ”monialainen ja aihealueet ylittävä tutkimus” (Puiteohjelma 7). Linjaus on merkityksellinen jo senkin takia, että puiteohjelma on eurooppalaisen tutkimuksen rahoittajista Euroopan unionin merkittävin. Mm. eri tieteenalojen välittäjänä toimiva tutkimusryhmä Fidea määrittelee tieteidenvälisen tutkimuksen verkkosivuillaan seuraavasti:

¹ Suurin osa teknologisesta kehityksestä ei ole luonteeltaan disruptiivista. Kosola (2013) antaa disruptiivisuudesta selkeän esimerkin teoksessaan Disruptiiviset teknologiat puolustuskontekstissa: ”[...] ydinpommi oli aikanaan disruptiivinen teknologia, joka lisäsi pommikoneen tehoa 15.000-kertaiseksi. Vetypommin kehittäminen lisäsi ydinpommin tehoa monta kertaluokkaa, mutta sillä ei enää ollut disruptiivista vaikutusta, sillä aseiden tuhovoima oli jo tasolla, joka muutti strategisen viitekehyksen.” (Kosola 2013, s. 17.)

”Tieteidenvälinen tutkimus (engl. interdisciplinary research, IDR) yhdistää tietoa, menetelmiä, näkökulmia, käsitteitä tai teorioita kahdesta tai useammasta tutkimusperinteestä. Yleensä tieteidenvälistä tutkimusta tehdään tutkimusryhmissä, mutta myös yksittäiset tutkijat voivat yhdistää työssään eri lähestymistapoja. Tieteidenvälisen vuorovaikutuksen tavoitteena on etsiä ratkaisuja tieteenalojen rajat ylittäviin kysymyksiin. Tällaisia kysymyksiä nousee esiin yhä useammin, kun yhteiskunta luontosuhteineen ja tietorakenteineen monimutkaistuu.” (Huutoniemi 2010)

Monialaisen tai monitieteisen tutkimuksen lisäksi on viime vuosina alettu puhua myös integroivasta tutkimuksesta (Huutoniemi 2010), jonka tarkoituksena on vielä aiempaa tehokkaammin sitoa yhteen tieteen eri osa-alueiden välinen työ – ilman keinotekoisia ”yhteen liimaamisen” rasitetta. Tätä tutkimusta voidaan pitää integroivana tutkimuksena sikäli, että se pyrkii integroimaan sotatieteiden alaan kuuluvan operaatiotaidon ja tekniikan alan osaamista sekä kehitystarpeita, synnyttämään tavoitteellista vuoropuhelua eri ammattialojen asiantuntijoiden kesken ja tuottamaan tutkimuksen synteesisinä raportin, joka parhaimmillaan voi tarjota hyödyllisiä sisältöjä (määritelmiä, vaatimuksia, tietoa, kannanottoja) eri tieteenalojen edustajien käyttöön. Tässä tutkimuksessa käsitellään kognitiivisen radion teknistä kehitystä ja erilaisia teknisiä ominaisuuksia, spektriä ja spektrin hallintaa sekä sivutaan lainsäädäntöä, joka on perinteisesti liitetty johtamisen opetukseen. Työ nivotaan sotatieteiden ytimeen käsittelemällä kognitiivista radiota operatiivisessa viitekehyksessä. Yhdistävinä tekijöinä mainituille sotatieteenaloille toimivat operaatiotaito ja taktiikka.

Kognitiivisella radiolla on potentiaalia mullistaa koko johtamisjärjestelmien konsepti, alkaen koulutuksesta ja ulottuen esimerkiksi elektroniseen häirintään tai taajuushallintaan. On toisaalta huomattava, että korkealla teknologialla – jota kognitiiviradiokin edustaa – on tyypillisesti korkea hinta. Hinta luonnollisesti kohoaa entisestään, mikäli kehitystyö joudutaan itse maksamaan. Puolustusvoimillakin on siis paineita etsiä kustannustehokkuutta ja synergiaetuja kaupallisista järjestelmistä (puolustusministeriö, Tulevaisuuden selvitys 2012, s. 5). Kognitiivisella radiolla ja sen sovelluksilla on myös kaupallista potentiaalia: Datansiirtonopeudet ja tätä kautta myös vaatimukset spektrin käyttöasteen parantamisesta ovat 2000-luvulla kasvaneet huimaan tahtiin, ja kognitiivinen radio voi olla seuraava kehitysaskel, joka on otettava, jotta uudenlaisiin haasteisiin kyetään vastaamaan. Kognitiivisen radion perusajatus on, että järjestelmä kykenee itse oppimaan keräämistään tuloksista ja mukautumaan vallitsevaan tilanteeseen. Kognitiiviseen radioon voidaan myös syöttää tietoa ulkopuolelta. Tulevaisuudessa kognitiivisen radion on ajateltu tehostavan spektrin hyödyntämistä, sillä se pystyy itseohjautuvasti käyttämään tietyllä ajanhetkellä vapaita tai häiriöttömiä taajuuksia. (Matinmikko 2012, s. 21.)

ITU-R (*International Telecommunication Union Radiocommunication Sector*) ennustaa vuoden 2005 ja 2011 katsauksissaan, että mobiilipalvelujen tarve kasvaa merkittävästi vuoteen 2020 mennessä (ITU-R Report M.2072, ITU-R Report M.2243). Mobiilijärjestelmien datansiirtovaatimukset tulevat ITU-R:n mukaan nousemaan kolminkertaiseksi vuodesta 2013 vuoteen 2015 (ITU-R Report M.2243, s. 16). Haasteena on siis löytää voimakkaasti kasvaville mobiilimarkkinoille tarkoitukseen sopivia taajuuksia. Sotilaalliselta kannalta on merkittävää, että ympäröivän yhteiskunnan täytyy saada langattomille järjestelmilleen käyttöön yhä enemmän taajuusresurssia langattomille järjestelmille, kun samalla myös sotilaalliset sovellukset vaativat enemmän taajuuskaistaa käyttöönsä. Myös NATO on tunnistanut kognitiivisen radion tuomat mahdollisuudet (Cognitive Radio in NATO, 2014, s. 1).

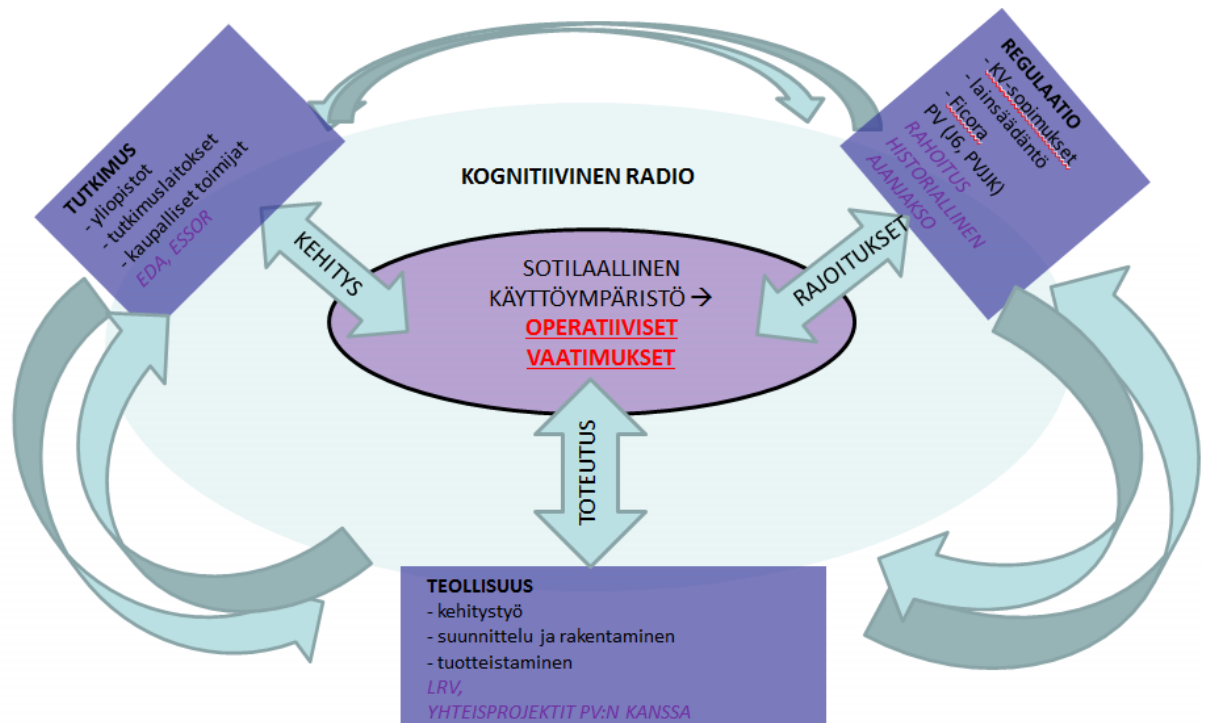
Sotilaallisessa käyttöympäristössä kognitiivisen radiojärjestelmän tuomat mahdollisuudet ovat merkittävät. Jo pelkästään taajuushallintaan kognitiivisuus avaa kokonaan uuden lähestymistavan. Jos kognitiivinen radiojärjestelmä toimii hyvin, taajuuksien valinta voidaan ulkoistaa radiojärjestelmälle itselleen. Vastatoimien (elektroninen tiedustelu, ELTI; elektroninen vaikuttaminen, ELVA) kannalta kognitiivisuus voi tarkoittaa merkittäviä haasteita mutta toisaalta myös mahdollisuuksia, mikäli kognitiiviset ominaisuudet kuuluvat omiin käytettävissä oleviin resursseihin.

Tämä tutkimus on Suomessa ensimmäinen tutkimus, jossa ennakoidaan radion kognitiivisten ominaisuuksien sotilaalliseen käyttöympäristöön ja operatiiviseen toimintatapaan tuomaa muutosta. Tutkimuksessa etsitään sellaisia kognitiivisen radion suorituskykyyn, suorituskyvyn rakentamiseen ja käyttöön liittyviä tekijöitä, jotka ovat merkityksellisiä sotilaallisesta näkökulmasta. Mahdollisia muutostekijöitä tarkastellaan kognitiivisten ominaisuuksien kautta peilaamalla niitä operatiiviseen viitekehykseen (ks. kuva 1). Operatiivista näkökulmaa esitellään arvioimalla kognitiivisen radion ominaisuuksia elektronisen tiedustelun, vaikuttamisen ja suojautumisen kannalta sekä tarkastelemalla radiotaajuisia spektriä sotilaallisten vaatimusten kautta. Tutkimuksessa sivutaan myös kognitiivisten ominaisuuksien vaikutusta viestitaktisen ajattelun muutostarpeisiin. Operatiivista näkökulmaa on painotettu myös delfoi-analyyseissa luvun 2 esittämällä tavalla. Lisäksi työssä arvioidaan kognitiivisen radion käyttöönoton haasteita Puolustusvoimissa.

1.2 Tutkimuksen viitekehys

Tutkimuksen viitekehyksenä (kuva 1) toimivat kognitiivinen radio sotilaallisessa käyttöympäristössä (ks. tarkemmin luku 1.6) sekä siihen ja sen kehityksen vaikuttavat keskeiset tekijät:

tutkimus, teollisuus ja käytön rajoitukset (regulaatio). On selvää, että kognitiivisen radion kehitykseen vaikuttaa muitakin tekijöitä. Tutkimuksessa käsiteltyjen osatekijöiden voidaan kuitenkin katsoa olevan kehityksen keskiössä, kun kognitiivisia radioita ei ole vielä julkistettu.



Kuva 1: Tutkimuksen viitekehys

1.3 Tutkimusongelma

Tutkimuksen pääkysymys on kaksiosainen:

- Mitkä kognitiivisen radion ominaisuudet ovat sotilaallisessa toimintaympäristössä merkityksellisimpiä johtamisjärjestelmien kehityksen näkökulmasta ja missä tärkeysjärjestyksessä?
- Miten radion kognitiiviset ominaisuudet vaikuttavat sotilaalliseen käyttöympäristöön elektronisen suojautumisen, tiedustelun ja vaikuttamisen näkökulmista?

Keskeisiä alakysymyksiä tutkimuksessa on neljä:

- Millainen on kognitiivisen radion toimintaympäristö vuonna 2020?
- Miten toimintaympäristöä tulisi kehittää, jotta sotilaskäyttöön suunniteltu kognitiivinen radio toimisi?
- Millaisia alustavia operatiivisia vaatimuksia kognitiiviselle radiolle ja sen ominaisuuksille voidaan asettaa?

- 4) Mitkä ovat keskeisimmät esteet kognitiivitekniikan yleistymiselle ja kognitiivisten ominaisuuksien käyttöönotolle?

Luvussa 1 kuvataan kognitiivinen radio toimintakenttineen, esitellään tutkimusongelma ja aiempi tutkimus sekä avataan tutkimukseen liittyvät keskeiset käsitteet ja määritelmät operatiivisessa kontekstissa. Seuraavassa luvussa 2 esitellään tutkimuksen kulku. Luvussa 3 kuvataan ne kognitiiviset ominaisuudet, jotka ovat tämän tutkimuksen tutkimuskysymysten kannalta olennaisimpia sekä osoitetaan niiden merkitys tiedustelun, vaikuttamisen ja suojautumisen näkökulmista. Lisäksi tarkastellaan näiden ominaisuuksien vaikutuksia maavoimien tiedonsiirtoverkossa. Kognitiivisten ominaisuuksien merkitystä viestitaktisille periaatteille tutkitaan yleisten elektroniselta tiedustelulta ja vaikuttamiselta suojautumisen periaatteiden kautta. Luvussa 4 puretaan auki delfoi-kierroksilla tuotettu tieto. Päättäntöluvussa 5 kootaan lyhyesti tutkimuksen tulokset ja tarkastellaan tuloksia osana kansallista toimintaympäristöä. Luvussa 5 esitellään myös kognitiivisen radion alustavia käyttötapauksia, jotka on rakennettu tutkimuksen aikana kerätyn tiedon ja syntyneen ymmärryksen pohjalta.

Päätutkimusmenetelmänä tutkimuksessa toimii delfoi. Tätä menetelmää on täydennetty kirjallisuustutkimuksella sekä asiantuntija-arvioilla ja haastatteluilla. Asiantuntija-asettelun tavoitteena on ollut kattaa kaikki keskeiset tahot uusien teknologioiden käyttöönotossa: määrittelijät, kehittäjät, tuottajat ja säätelijät. Nämä tahot kuvataan tarkemmin luvussa 2 (Tutkimuksen kulku). Viittaustekniikkana käytetään tekstin sisäisiä viittauksia, koska se helpottaa tekstin sähköisten versioiden lukemista. Alaviitteitä on käytetty sellaisissa selvennyksissä, jotka eivät ole tutkimuksen kannalta ratkaisevan tärkeitä mutta jotka silti olennaisesti avaavat tutkimuksen kulkua lukijalle.

Tutkimuksen painopiste on yksittäisessä radiossa eli kognitiivisessa radiossa. Näkökulma on operatiivis-tekniinen; kognitiivisuuden tuomia mahdollisuuksia ja haasteita tarkastellaan sotilaallisessa ympäristössä ilmenevien haasteiden kautta. Kansainvälisten tehtävien ja monikanallisten operaatioiden vaatimukset rajataan tutkimuksen ulkopuolelle.

1.4 Aiempi tutkimus ja keskeiset lähteet

Ensimmäisenä ajatuksen kognitiivista radiosta esitti Joseph Mitola III vuonna 1999 (Mitola 1999), minkä jälkeen kognitiivisten radiojärjestelmien tutkimus on ollut aktiivista. Matinmikko (2012) tarjoaa väitöskirjassaan kognitiivisista radioverkoista ajankohtaisen ja kattavan

esityksen sekä kokoaa viime vuosien merkittävimmät tieteelliset julkaisut: kognitiivisen radiojärjestelmän arkkitehtuurin kehitys (Mitola 2009), standardisointi ja säännöstö -kokoelma (Filin ym. 2011 sekä Yoshino 2012), suorituskyvyn arviointi (Zhao ym. 2009), yhteiskäyttö kognitiivisessa radiojärjestelmässä (Ben Letaief & Zhang 2009) ja signaalinprosessointi (Ma ym. 2009).

Tämän tutkimuksen tärkeimpiä lähteitä ovat Matinmikon väitöstutkimus *Spectrum sharing using cognitive radio system capabilities: Methods to obtain and exploit knowledge of spectrum availability* vuodelta 2012 ja Wireless Innovation Forumin vuonna 2010 (myöh. WINNF 2010) kognitiivisista ominaisuuksista laatima koonnos *Quantifying the Benefits of Cognitive Radio* sekä sotilaallista näkökulmaa pohjustavat, sotilaalliseen käyttöympäristöön kirjoitetut tutkimukset Karsikas 2007, Kuosmanen 2004, Kärkkäinen 2013 sekä Tuukkanen ym. 2013. Myös ITU on ottanut kantaa kognitiiviseen radioon määrittelemällä sen olemusta raporteissaan ITU-R Report SM.2152: *Definitions of software defined radio (SDR) and cognitive radio system (CRS)* ja ITU-R Report M.2225: *Introduction to cognitive radio systems in the land mobile service*.

Vaikka Puolustusvoimat on tunnistanut kognitiivisen tekniikan tarjoamat sotilaalliset käyttömahdollisuudet, mistä osoituksena on kognitiivisten ominaisuuksien tutkiminen osana Puolustusvoimien tutkimusohjelmaa (PVTO2013, soveltuvuustutkimus loppuraportit TN26 ja TN32), ei kognitiivista radiota ole operatiivisesta näkökulmasta tutkittu lainkaan. Ne ulkomaiset tutkimukset, jotka ovat julkisia, ovat keskittyneet kognitiivisen radion tekniseen kehitykseen ja kehityskulun arviointiin (ks. esim. Bose, 2009, s. 28; Hoppe 2009; Thoresen 2012, NATO 2014). MPKK:lla on aihetta sivuten tehty yksi EUK:n tutkielma (Kärkkäinen 2011), jonka osittaisena jatkona diplomityö (Kärkkäinen 2013). Nämä työt keskittyivät langallisten tietoliikennejärjestelmien kognitiivisuuteen, ja niiden painopiste oli enemmänkin kybersodan käynnissä kuin kognitiivisessa radiossa.

1.5 Kognitiivisen radion kehitys ja nykytila

Radioiden kehitys alkoi jo 1800-luvun loppupuolella, jolloin brittiläinen fyysikko J.C. Maxwell osoitti teoreettisesti, että sähkömagneettisia aaltoja voidaan käyttää langattomaan viestintään. Tästä lähtien langattomia viestintämahdollisuuksia on tutkittu maailmalla laajasti. Ensimmäisen patentin langattomalle lähettimelle sai Guglielmo Marconi vuonna 1897.

Seuraava merkittävä askel radioiden kehityksessä oli transistoriradioiden keksiminen 1950-luvulla. Putkiradioihin verrattuna transistoriradiot olivat merkittävästi pienempiä kooltaan, tarvitsivat paljon vähemmän tehoa sekä kestivät iskuja paremmin. Puolijohdetekniikan, akkujen, digitaalisen signaaliprosessoinnin sekä ohjelmistoteknologian kehittyminen mahdollisti ohjelmistoradioiden syntymisen. Termin *ohjelmistoradio* lanseerasi Joseph Mitola III vuonna 1992 esitelmässään ”Software Radio: Survey, Critical Analysis and Future Directions”. Ohjelmistoradio on edellytys kognitiiviselle radiolle, jonka siis Joseph Mitola III määritteli seitsemän vuotta myöhemmin (Mitola 1999).

ITU määrittelee ohjelmistoradion seuraavasti:

“Software-defined radio (SDR): A radio transmitter and/or receiver employing a technology that allows the RF operating parameters including, but not limited to, frequency range, modulation type, or output power to be set or altered by software, excluding changes to operating parameters which occur during the normal pre-installed and predetermined operation of a radio according to a system specification or standard.” (ITU-R Report SM.2152, 2009.)

Laajasta tutkimuksesta ja ajallisestikin verrattain pitkästä kehitystyöstä huolimatta kognitiivisia radiosovelluksia on toistaiseksi olemassa vähän. Yksittäisiä, kognitiiviseksi luettavia ominaisuuksia radioissa on kyllä käytetty jo kauan. Yksi tunnetuimmista on esimerkiksi autoradioiden RDS-toiminto, jossa valittu radiokanava pysyy lukittuna, vaikka taajuus muuttuu auton liikkuessa toisen lähettimen kuuluvuusalueelle. Sotilassovelluksista pitkään käytössä ollut automaattinen linkin muodostus (ALE; *Automatic Link Establishment*) on myös tulkittavissa kognitiiviseksi ominaisuudeksi. Automaattisessa linkinmuodostuksessa yhteyden muodostavilla radioilla on käytössään joitakin etukäteen määritettyjä taajuuksia, jotka valitaan käyttöön esimerkiksi sen mukaan, missä on vähiten häiriötä.

Kognitiivisten ominaisuuksien yhdistäminen radiojärjestelmään on ollut hidasta, tai kehittelytyön tulokset eivät ole julkisia. Yhtenä pisimmälle päässeistä tutkimuksista on Yhdysvaltojen puolustusministeriön tutkimuslaitoksen (DARPA) projekti WNaN (*Wireless Network after Next*). WNaN yhdistää dynaamisen spektrin hyväksikäytön, monikanavaisen lähetin-vastaanottimen ja älykkään verkonmuodostuksen periaatteita. Projektissa on raportin mukaan pystytty yhdistämään 100 radioverkon solmua ja näin on onnistuttu luomaan hyvin laaja mobiili ad hoc -verkko (MANET) (Redi ym. 2011). 100 radioverkon solmun sotilaallinen mobiili ad hoc -verkko on tietävästi alan maailmanennätys (Redi ym. 2011, s. 1). Tosin on huomattava, että edellä mainitussa lähteessä ei millään tavalla arvotettu kyseisen sadan solmun MANET-verkon tuottamaa palvelutasoa.

Suomen puolustusvoimissa yksi merkittävimmistä johtamisjärjestelmien kehittämisprojekteista on ollut langaton runkoverkko (LRV). Langaton runkoverkko on suomalaisen Elektrobittin valmistama ohjelmistoradio, jonka kehittämisessä myös Puolustusvoimat on ollut ja on edelleen mukana. Langatonta runkoverkkoa voidaan kuvata yhdeksi Puolustusvoimien tulevaisuuden johtamisjärjestelmäratkaisuksi – tai ainakin osaksi sitä (PVTO2013, soveltuvuustutkimus loppuraportti TN26, s. 8). Viimeisimmässä Puolustusvoimien tutkimusohjelmassa vuonna 2013 tutkittiin menetelmiä, joilla langattoman runkoverkon suorituskykyä voitaisiin parantaa, kun hyödynnetään kognitiivisia menetelmiä (PVTO2013). Johtopäätöksenä suorituskykyä parantavista ominaisuuksista tutkimuksen loppuraportissa mainittiin muun muassa automaattinen taajuuksien alustus, älykäs taajuuksien hallinta ja radioiden parametrien adaptiivinen konfigurointi (PVTO2013, soveltuvuustutkimus loppuraportti TN32). Edellä mainittuja kognitiivisia ominaisuuksia käsitellään tässä tutkimuksessa luvussa 3.

Kognitiivista radiota Suomessa kehittää oululainen Kyynel OY. Kyynel on tiettävästi ensimmäisenä maailmassa julkaisemassa HF-alueen kognitiivisen radion vuonna 2015 (Lindén 2014)². Onnistuessaan yritys luo maailman ensimmäisen sarjatuotantoonkin soveltuvan kognitiivisen radion, mitä voidaan pitää erittäin merkittävänä kehitysaskeleena koko alalla. Nähtäväksi jää, tuleeko julkistettava radio olemaan nimenomaan kognitiivinen radio vai ohjelmistoradio, jossa on merkittäviä kognitiivisia ominaisuuksia. Lopputulos riippuu sekä kehitystyön onnistuneisuudesta että siitä, miten kognitiivinen radio määritellään.

1.6 Käsitteet ja määritelmät

Radion sotilaallisella käyttöympäristöllä tarkoitetaan tässä tutkimuksessa uudistetun taistelutavan mukaisesti (Parkatti 2012) laajalle alueelle levittäytyntä, hierarkkisesti järjestäytyntä ja usean eri tiedonsiirtojärjestelmän käsittävää verkkoa, jossa spektrin käyttömahdollisuudet vaihtelevat nopeasti sekä ajallisesti että paikallisesti. Kognitiivisista radioista on aiemmassa tutkimuskirjallisuudessa löydettävissä useita määritelmiä. Yleisen näkemyksen mukaan kognitiivisen radion toiminta perustuu niin kutsuttuun OODA-silmukkaan (*Observe-Orientate-Decide-Act*), jossa kognitiivinen jatkuvasti havainnoi ympäristöään, arvioi ja analysoi saatua tietoa sekä päättää ja toimii (Mitola ym. 1999).

Joseph Mitola III:n ym. (1999) mukaan kognitiivinen radio havainnoi ympäristöään, sijaintiaan, radiokanavan tilaa, verkkoja, protokollia, käyttäjää ja radion sisäistä tilaa. Haykinin

² Haastattelu tehtiin 27.3.2014. Radion julkaisu ja sarjatuotanto on siirtynyt loppuvuodelle 2015.

(2005) mukaan kognitiivisen radion tulisi olla tietoinen käyttäjän tietoliikennetarpeista ja eri tietoliikennevaihtoehtoja käyttäen ennakoida tietoliikennetapahtumia sekä onnistumisen todennäköisyyttä verrattuna haluttuun lopputulokseen.

Haykinin määritelmän mukaan kognitiivinen radion on älykäs, langaton viestintäjärjestelmä, joka on tietoinen ympäristöstään:

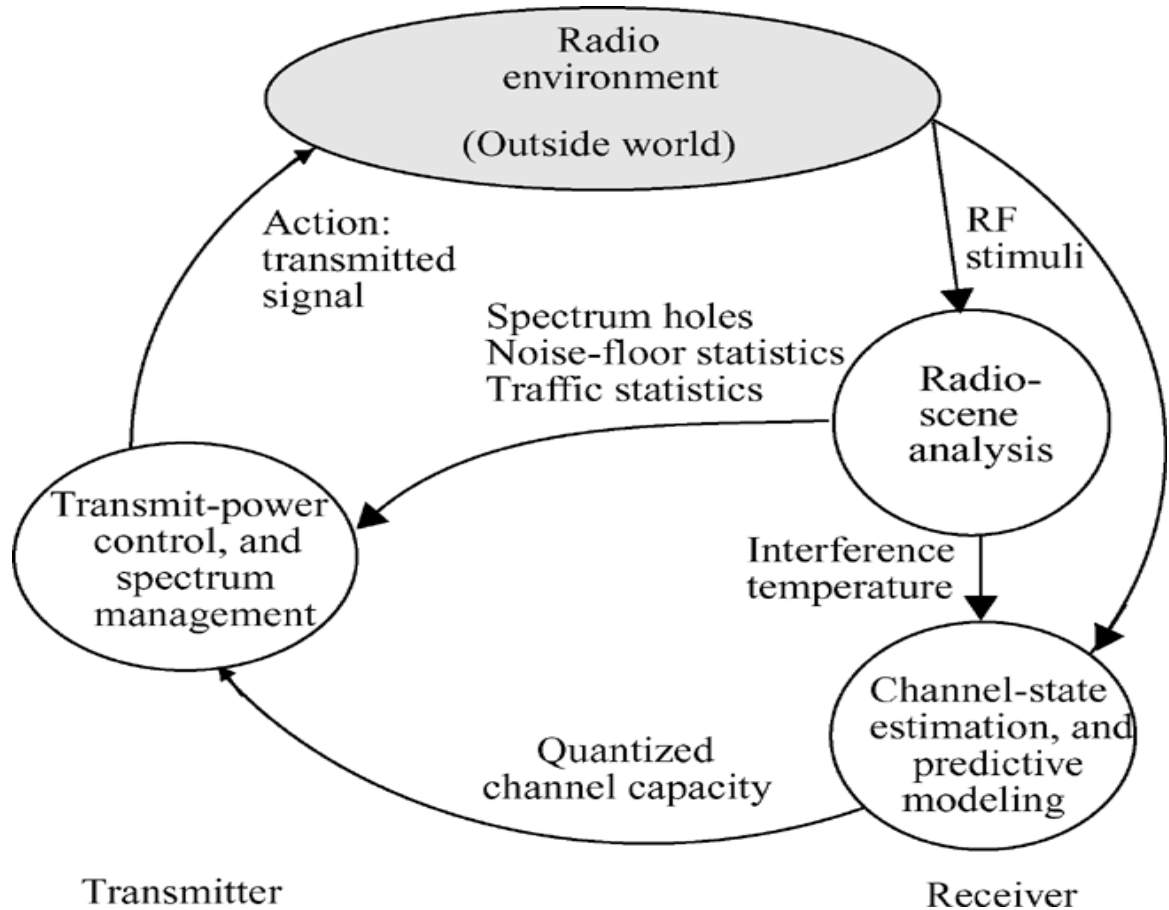
“The cognitive radio, built on a software-defined radio, is defined as an intelligent wireless communication system that is aware of its environment and uses the methodology of understanding-by-building to learn from the environment and adapt to statistical variations in the input stimuli”(Haykin 2005, s. 201–202).

Haykin määrittelee artikkelissaan (Haykin 2005, s. 202) kognitiiviselle radiolle kolme kognitiivista tehtävää:

1. spektrin analysointi ja tarkkailu sekä tyhjän tilan havaitseminen spektrissä
2. radiokanavan tilan arviointi ja ennuste kanavan käyttökapasiteetista
3. lähetyksen kontrollointi ja dynaaminen taajuushallinta.

Ollessaan toistensa kanssa vuorovaikutuksessa radiotaajuisessa ympäristössä nämä kolme tehtävää muodostavat kognitiivisen silmukan, jota kuvataan perusmuodossaan seuraavan sivun kuvassa 2.

Haykinin määritelmässä ja hänen laatimassaan kuviossa (kuva 2) ei varsinaisesti toteudu Mitolan kumppaneineen (Mitola ym. 1999) esittämä alkuperäinen ajatus älykkäästä radiosta, joka kykenisi itsenäiseen päätöksentekoon käyttäjän tarpeiden perusteella ja joka pystyisi ennakoimaan tapahtumia. Haykinin määritelmässä keskitytään enemmän OSI-mallin fyysisen kerroksen ratkaisuihin. Merkittäväksi Haykinin havainnon tekee kuitenkin se, että Haykinin artikkelissa tietyvästi ensimmäistä kertaa esitettiin, että kognitiivinen radio olisi nimenomaan tietoinen ympäröivästä spektristä. (Kognitiivisen radion seminaari Oulussa 11.11.2014.)



Kuva 2: Kognitiivinen silmukka (Haykin 2005, s. 202)

ITU-R määrittelee kognitiivisen radiojärjestelmän varsin kattavalla tavalla:

“Cognitive radio system (CRS): A radio system employing technology that allows the system to obtain knowledge of its operational and geographical environment, established policies and its internal state; to dynamically and autonomously adjust its operational parameters and protocols according to its obtained knowledge in order to achieve predefined objectives; and to learn from the results obtained.”(ITU-R Report SM.2152, 2009).

Kognitiivinen radiojärjestelmä on siis systeemi, joka mahdollistaa tiedon hankkimisen niin spektristä, radion maantieteellisestä sijainnista ja tilasta kuin toimintamääräyksistä ja järjestelmän sisäisestä tilastakin. Järjestelmä sovittaa dynaamisesti ja itsenäisesti toimintaparametrisa ja protokollat. Se toimii hankitun tiedon mukaisesti saavuttaakseen ennalta asetetut tehtävät ja oppiakseen saatujen tulosten perusteella.

ITU:n määritelmän mukaan kognitiivinen radiojärjestelmä on sarja prosesseja ja tekniikoita, joissa radiojärjestelmä hankkii tietoa ympäristöstään, tekee päätöksiä saamansa informaation perusteella ja sopeutuu vallitsevaan tilanteeseen. Kognitiivinen radiojärjestelmä pystyy ratkaisuja tehdessään käyttämään hyväkseen aiemmin hankittua tietoa. Se toisin sanoen pystyy op-

pimaan siten, että sen itsenäisesti tekemät ratkaisut parantavat järjestelmän suorituskykyä.

Tätä määritelmää voidaan soveltaa myös yksittäiseen kognitiiviseen radioon.

Informaatioteorian näkökulmasta kognitiivinen radio pystyy käyttämään älykkäästi hyväkseen saatavilla olevaa lisäinformaatiota 1) liikenteen aktiviteetista, 2) kanavien tilasta, 3) koodauksesta tai 4) toisten solmujen lähettämästä informaatiosta (Goldsmith ym. 2009, s. 2). Sen mukaan kognitiivisilla radiojärjestelmillä on kolme radioverkkoparadigmaa: *underlay*, *overlay* ja *interweave*. Vapaasti suomennettuna paradigmat voisivat olla esimerkiksi *allekkainen*, *päällekkäinen* ja *yhdistetty*. Underlay-paradigma tarkoittaa tekniikkaa, jossa oletetaan, että kognitiivinen radio tietää, miten ja kuinka paljon se häiritsee perinteisiä, ei-kognitiivisiä radioita. Tässä yhteydessä kognitiivisen radion katsotaan olevan taajuuden toisiokäyttäjä (*secondary user*) ja ei-kognitiivisen radion primäärikäyttäjä (*primary user*), jolla on taajuushallintaviranomaisen lupa käyttää taajuutta. Underlay-paradigmassa kognitiivisen järjestelmän lähetystasoja rajataan siten, ettei siitä aiheudu häiriötä ei-kognitiivisen radiojärjestelmän vastaanotolle (Goldsmith ym. 2009, s. 2). Toisin sanoen lähetystehot määritetään niin alhaisiksi, ettei signaali voi aiheuttaa häiriötä ympärilleen. Esimerkkinä tämänkaltaisesta järjestelmästä on UWB-radio (*Ultra Wide Band*).

Overlay-paradigmassa kognitiivinen radiojärjestelmä voi lähettää viestin samanaikaisesti ei-kognitiivisen järjestelmän kanssa mutta käyttää osan (radio)resursseistaan välittämään ei-kognitiivisen järjestelmän dataa. Overlay-paradigma olettaa, että kognitiivisella järjestelmällä on paljon tietoa ei-kognitiivisestä järjestelmästä, esimerkiksi kanavan tilasta tai ei-kognitiivisen järjestelmän välittämästä datasta. Interweave-paradigma (yhteen kudottu paradigma) oli alun perin kognitiivisen radion keksinnön taustalla. Tehdyt tutkimukset osoittivat (Matinmikko 2012, s. 22–27), että suurin osa spektristä ei ollut käytössä lainkaan. Spektristä löytyi niin kutsuttuja spektrin aukkoja (*spectrum holes*), jotka ovat tietyllä ajanhetkellä tietystä paikassa käyttämättömiä, lisensoituja tai lisensoimattomia, spektrin alueita. (Goldsmith ym. 2009, s. 3.)

Interweave-paradigmassa kognitiivinen radio käyttää hyväkseen edellä mainittuja spektrin käyttämättömiä alueita. Kognitiivinen radiojärjestelmä seuraa ympäröivää spektriä, havaitsee älykkäästi spektrin käyttöasteen eri alueilla ja muodostaa yhteyden muihin radioihin hyödyntäen spektrin kuoppia. Samalla se minimoi häiriöt muihin järjestelmiin ja käyttäjiin. (Goldsmith ym. 2009, s. 3.)

Yllä esitellyt paradigmat kuvaavat erilaisia käyttäjiä tai käyttäjien roolia spektrissä. Sotilaallisesta näkökulmasta katsottuna tilanne on haastava. Normaaliolojen ja poikkeusolojen tavat ja oikeudet käyttää spektriä poikkeavat merkittävästi toisistaan. Muun muassa valmiuslaki antaa viranomaiselle merkittäviä oikeuksia säädellä spektriä poikkeusoloissa (Valmiuslaki §61: Radiotaajuuksiin kohdistuvat toimenpiteet). Normaalioloissa taajuuksien säätely eli regulaatio on Suomessa perinteistä: taajuudet jaetaan käyttötarkoituksen mukaan tarvitsijoille (Viestintävirasto 2013, Taajuusjakotaulukko). Tämä johtaa siihen, että spektriä laajasti hyväksikäyttäviä järjestelmiä ei voida testata eikä kehittää normaalioloissa, koska muuhun käyttöön osoitettuja taajuusalueita ei saa käyttää. Toisaalta sama spektrin vajaakäyttö koskee myös sotilaille varattuja taajuuksia: sotilasalueita ja harjoitusalueita on koko Suomen pinta-alaan verrattuna vähän. Tästä huolimatta missään päin Suomea ei saa käyttää sotilastaajuuksia ilman erillistä lupaa, vaikka sotilaita ei olisi lähelläkään.

Yleisesti spektriä on tyypitetty kolmeen eri luokkaan.

- 1) *Black spaces* eli *musta tila*. Mustalla tilalla tarkoitetaan spektrin osaa, jossa joinakin ajanhetkinä on voimakkaita häiriöitä.
- 2) *Grey spaces* eli *harmaa tila*. Harmaassa tilassa esiintyy pienitehoisia häiriöitä, jotka ovat varanneet osan spektristä.
- 3) *Whiten spaces* eli *valkoinen tila*. Valkoinen tila on aluetta, joka on vapaata radiotaajuisilta häiriöiltä, pois lukien taustakohina. Taustakohina voi olla luonteeltaan luonnon tai ihmisen aiheuttamaa, esimerkiksi laajakaistaista lämpökohinaa auringosta tai impulssikohinaa, jota synnyttävät mm. sytytyslaitteet tai mikroaaltouunit. (Haykin 2005, s. 206)

Spektrin aukot (*spectrum holes*) ja valkoinen tila (*white space*) ovat sama asia sanottuna eri sanoin. Kognitiivisten radiojärjestelmien kannalta mielenkiintoisin alue on juuri valkoinen tila. Muut alueet (harmaa ja musta) kiinnostavat erityisesti niissä tapauksissa, joissa radiotaajuiset signaalit ovat pois päältä ja merkittävän kokoiset valkoiset tilat syntyvät (Haykin 2005, s. 207). Huomattavaa on, että virallisesti white space -termiä ei ole hyväksytty esimerkiksi ITU:ssa, mutta termi on yleisellä tasolla yhdistetty nimenomaan kognitiivisiin radioihin, mistä esimerkkinä on Genevessä pidetty ITU-R:n workshop ”Spectrum Management issues related to the use of White Spaces by Cognitive Radio Systems” (Geneve, 20. tammikuuta 2014).

Työpajakutsussaan CEPT kirjoittaa, että vaikka ITU ei ole muodollisesti määritellyt valkoista tilaa, erilaisia työmääritelmiä, kuten CEPT:n oma kuvaus, on jo olemassa:

“White space is a part of the spectrum, which is available for a radiocommunication application (service, system) at a given time in a given geographical area on a non-interfering / non-protected basis with regard to primary services and other services with a higher priority on a national basis.” (CEPT Report 24, 2008)

CEPT:n (Report 24, 2008) *white space*n määritelmä on selvästi kattavampi kuin Haykinin (2005) määritelmä, ja se onkin jo yleisesti käytössä epävirallisuudestaan huolimatta (Rantanen 2014).

2. Tutkimuksen toteutus

2.1 Tutkimusmenetelmä

Käsitteiden ja perusteiden kerääminen olivat olennainen osa tutkimusta sekä taustatyöskentelyvaiheessa että osana itse tutkimusraporttia, ja näiltä osin keskeisimpänä tutkimusmetodina toimi kirjallisuuteen perehtyminen. Koska kognitiivista radiota on jo tutkittu paljon ja julkaistuja tutkimuksia on useita tuhansia³, osuvan kirjallisuuden valinta osoittautui kuitenkin haasteelliseksi. Validin kirjallisuuden löytämiseksi päädyttiin oman etsimistyön rinnalla kysymään suosituksia muutamilta kognitiivisen radion asiantuntijoilta. Suositukseen tarttumalla varmistettiin myös, että aihevalinnan kannalta kaikkein relevantein levikiltään marginaalisempikin kirjallisuus tuli työssä huomioitua.

Varsinaiseen aineiston keruu- ja käsittelyvaiheeseen tutkimusmenetelmäksi valittiin delfoimenetelmä. Toinen mahdollinen lähestymistapa olisi ollut kognitiivisen radion matemaattinen mallintaminen. Simuloiminen olisi kuitenkin ollut teknisesti hyvin haastavaa, ja lisäksi simuloinnista olisi seurannut, että työ olisi jäänyt luonteeltaan spekulatiiviseksi sekä parametrien valintojen että kognitiivisen radion ominaisuuksien kuvaamisen osalta. Delfoimenetelmässä sen sijaan tavoitteena on koota asiantuntijakyselyin yhteen ajankohtaista tietotaitoa, joka toki aineiston analysoimisen jälkeen mahdollistaa peruteltujen spekulatioiden ja mallintamisperusteiden esittämisen. Seuraavissa tekstikappaleissa esitellään tarkemmin delfoimenetelmän taustaa ja periaatteita niiltä osin, kuin ne palvelevat tämän tutkimusraportin lukemista.

Delfoitekniikkaa ryhdyttiin alun perin käyttämään 1950-luvulla RAND-ajatushautomon (*think tank*) tulevaisuuteen suuntautuvissa tutkimuksissa⁴. Jo tuolloin tutkimuksen keskiössä olivat sotilasteknologiat, kun delfoimenetelmän avulla kerättiin asiantuntijoiden arvioita ”optimaalisesta yhdysvaltalaisen asevoimien maallittamisesta” (Valtonen 2010, s. 44, ks. myös Kuusi 2002, s. 205). Viitteitä Delfoimenetelmän käytöstä löytyy kuitenkin jo vuodelta 1948, jolloin vastaavankaltaisen menetelmän avulla lienee pyritty ennustamaan laukka- tai koirakilpailujen tuloksia (Häder & Häder 1995, s. 9, ks. kuitenkin Valtonen 2010, s. 44). Alun perin delfoimenetelmä suunniteltiin luomaan asiantuntijoiden välille todellista debattia eli kiivastakin argumentoivaa väittelyä, joka ei ole riippuvainen persoonallisuuksista (Gordon 1994, s. 1).

³ Scholar google antoi hakusanalla ”cognitive radio” kaiken kaikkiaan 1 040 000 tulosta (19.1.2015).

⁴ RAND Corporation on voittoa tavoittelematon instituutio, jonka päätehtävä on parantaa käytäntöjä ja päätöksentekoa tutkimalla ja analysoimalla maailmaa ja sen ilmiöitä. Lähde: www.rand.org

Sanana *delfoi* viittaa Kreikan tarustoon ja Delfoin oraakkeliin tai oraakkeleihin. Antiikin Kreikan jumalan Apollon jumalallisia ennustuksia välittivät Pythiaat eli oraakkelit, jotka olivat transsiin vaipuneita, sekavia puhuvia nuoria naisia. Näiden naisten ennustuksia tulkitsivat papit, jotka välittivät informaation tiedon tarvitsijoille eli neuvoa kysyville ihmisille. Papit olivat tyypillisesti merimiehiä, joilla oli tuohon aikaan merkittävän paljon tietoa ympäröivästä maailmasta. Delfoin oraakkelit olivat siis aikansa ajatushautomo, joka perusti ajatuksensa tai ennustuksensa yleiseen tietoon maailman tilasta. (Kuusi 2002, s. 204–205.)

Delfoi-menetelmää on määritelty useilla eri tavoilla. Suomessa uraa uurtavaa delfoi-tutkimusta tehnyt Osmo Kuusi⁵ käyttää toimittamassaan kirjassa (Kuusi 2002) Linstonen ja Turoffin (2002) luomaa määritelmää:

“Delfoi-tekniikkaa voidaan luonnehtia ryhmän kommunikaatioprosessin strukturointi menetelmäksi, jonka tarkoituksena on auttaa yksilöiden muodostamaa ryhmää kokonaisuutena käsittelemään mutkikasta ongelmaa” (Kuusi 2002, s. 205)

Samankaltaiseen määritelmään on päätyntä myös Hannu Linturi, jonka muotoilua delfoi-menetelmästä Vesa Valtonen pitää väitöskirjassaan kattavana (Valtonen 2010, s. 45):

”Delfoi-menetelmää voidaan luonnehtia anonyymisti esiintyvän asiantuntijaryhmän kommunikaatioprosessin strukturointimenetelmäksi, jonka tarkoituksena on auttaa eri orientaation omaavien yksilöiden muodostamaa ryhmää kokonaisuutena ja argumentoiden käsittelemään mutkikasta ongelmaa.”

Sekä Kuusen että Linturin määritelmät ovat hyvin samankaltaisia ja vaikuttavat myötäilevän Linstonen ja Turoffin määritelmää. Delfoi-menetelmällä on kolme tunnistettavaa piirrettä, jolla se erottuu muista kysely- tai haastattelututkimuksista. Ne ovat 1) tunnistamattomuus (*anonymity*), 2) iteratiivisuus (*iteration*) ja 3) palaute (*feedback*). Tunnistamattomuudella pyritään siihen, että asiat tai mielipiteet eivät henkilöidy tai kohdistu tiettyyn organisaatioon, vaan keskiössä ovat argumentit ja asiasisällöt. Näin etuintressit tai asemat eivät piilo-ohjaa työskentelyä (Linturi 2007, s. 112). Iteratiivisuudella tarkoitetaan sitä, että tutkimuksen kuuluu useita kyselykierroksia, joiden aikana asiantuntijat voivat täydentää ja korjata kannanottojaan, jos niin haluavat. Palautteella viitataan ennen kaikkea kaikkien asiantuntijoiden ymmärryksen ja tietouden lisääntymiseen prosessin aikana. Palautteessa voi olla koko asiantuntijapaneelin vastauksista koottuja tunnuslukuja, kuten keskiarvoja tai keskihajontoja, mutta ny-

⁵ Ks. myös Linturi 2007, s. 103.

kyään se on myös enenevässä määrin argumentaatioiden välittämistä. (Kuusi 2002, s. 206–207, Woudenberg 1991, s. 133, Munkki 2009, s. 75.)

Delfoi-menetelmä on käyttökelpoinen tutkimusmenetelmä erityisesti silloin, kun tutkitaan aiheita, jotka ovat kehityskaarensa alkuvaiheessa ja joiden kehitykseen voidaan suunnittelulla vaikuttaa. Näissä tapauksissa onnistuneilla strategioiden valinnoilla voidaan vaikuttaa tutkitavan aiheen kehityskulkuihin. Juuri teknologian kehityksen arviointiin delfoi-menetelmää onkin käytetty useita kertoja esimerkiksi Yhdysvalloissa ja Iso-Britanniassa. (Kuusi 2002, s. 222–223.)

Delfoi-menetelmän käyttöön on kohdistettu myös kovaa kritiikkiä. Kritiikki on perustunut menetelmän alkuperäiseen ajatukseen yksimielisyyden saavuttamisen tarpeesta (konsensus asiantuntijoiden välillä) ja toisaalta myös tapaan esittää tutkimusraporteissa keskiarvoja asiantuntijoiden mielipiteistä. Kuusi esittää asian seuraavasti: ”Jos asiantuntijapaneeli on kokoonpanoltaan yksipuolinen[,] myös mielipiteiden keskiarvot ovat sitä.” Kuten mitä tahansa menetelmää käytettäessä, myös delfoita sovellettaessa onkin huomioitava, että tulosten tarkastelu tunnuslukuina kertoo saadusta aineistosta vain osatotuuden. Myöskään yksimielisyys ei ole tämän päivän delfoi-menetelmässä tavoiteltava ominaisuus, vaan ennemminkin pyritään löytämään useita perusteltuja näkökulmia tulevasta kehityksestä. (Kuusi 2002, s. 209–211.)

2.2 Tutkimuksen kulku

Käsitteiden ja perusteiden keräämiseen käytettiin metodina kirjallisuuteen perehtymistä. Kaikkein relevanteimmalla ja ajankohtaisella tutkimuskirjallisuuden löytäminen varmistettiin kysymällä suosituksia myös asiantuntijoilta: kognitiivisen radion tekniikkaa koskevasta aineisto suositusta kysyttiin oululaiselta Kyynel OY:lta (Matti Raustia ja Toni Lindén) ja soti-laallisesta näkökulmasta asiaa kysyttiin DI Heikki Rantaselta sekä komentaja Topi Tuukkasel-ta. Kirjallisuustarkastelun lähtökohdaksi valikoitui asiantuntijoiden suosituksesta kaksi laajaa teosta: Suomessa tehty väitöskirjatason tutkimus (Marja Matinmikon väitöskirja 2012) sekä kognitiivista radiota käsittelevä Wireless Innovation Forumin kokoelmateos *Quantifying Benefits of Cognitive radio*, jossa asiantuntijoina toimivat useat tunnetut kognitiivisen radion asiantuntijat Joseph Mitolasta alkaen. Perehtyminen tuoreimpaan, suositeltuun tutkimukseen taustoituksineen sekä suositusten perusteluihin auttoi synnyttämään kattavan yleiskuvan kognitiivitekniikan kehityksestä, nykytilasta ja mahdollisuuksista.

Tutkimuksen alkuvaiheessa valittiin tutkimuskirjallisuuden tukemana ne kognitiiviset ominaisuudet, joiden merkittävyyttä sotilaallisessa käyttöympäristössä haluttiin tutkia. Valintojen osuvuutta arvioi myös neljä asiantuntijaa, joiden kommenttien perusteella kognitiivisen radion käyttömahdollisuuksia sotilaallisessa käyttöympäristössä tarkennettiin.

Taustatyövaiheen jälkeen näkökulmaa päätettiin laajentaa ottamalla mukaan kognitiivisen radion kehityksen ja käyttöönoton kannalta olennaiset tahot: operatiiviset asiantuntijat, tutkimus, teollisuus ja regulaatio. Näistä neljästä tutkimusta ohjaava käyttökonteksti, tässä tapauksessa sotilaallinen toimintaympäristö eli operatiivinen taho, muodostui tärkeimmäksi. Toisena ja kolmantena keskenään yhtä vahvana kriteerinä olivat tutkimus ja teollisuus. Neljänneksi kriteeriksi nousi taajuuksien ja radiolupien hallinnointi eli regulaatio (ks. kuva 1: Viitekehys). Näkökulmaa laajennettiin näihin asiantuntijatahoihin, jotta kirjallisuustarkastelussa arvioitavaksi seuloituneet kognitiiviset ominaisuudet tulisivat kattavasti käsitellyksi kaikkien keskeisten toimijoiden näkökulmista ja jotta näin voitaisiin tutkimuksen synteessinä luoda holistinen kuva eri ominaisuuksien keskinäisestä merkittävyydestä.

Kyselykierroksia varten muodostettiin 14 asiantuntijan delfoi-paneeli. Asiantuntijat valittiin edellisessä tekstikappaleessa mainituilta toimialueilta: 1) operatiivinen, 2) tutkimus, 3) teollisuus ja 4) regulaatio. Tarkemmin vastaajaryhmät on esitetty liitteessä 1. Asiantuntijavalintoihin vaikutti lisäksi se, että tutkimuksen haluttiin painottuvan sotilaalliseen käyttökontekstiin. Useat asiantuntijat olivat taustoiltaan upseerikoulutettuja, vaikka heidän pääasiallinen tehtävänsä vastaushetkellä oli esimerkiksi tutkimuksessa tai regulaatiossa. Toisaalta liiallinen homogenisuus vastaajaryhmissä kompensoitiin hakemalla asiantuntijoita myös Puolustusvoimien ulkopuolelta. Nämäkin asiantuntijat valittiin kuitenkin niin, että he olivat jossakin työuransa vaiheessa työskennelleet Puolustusvoimien vetämissä tutkimusprojekteissa tai tunsivat Puolustusvoimien erityispiirteet toimialansa puitteissa.

Tutkimuksen konteksti, sotilaallinen käyttöympäristö, on haastava. Siksi ei voitu olettaa, että ilman merkittävää perehtymistä tutkimuksen asiayhteyteen vastaukset olisivat olleet perusteltuja. Lopulliset asiantuntijavalinnat tehtiin suositusten avulla; aluksi selvitettiin Puolustusvoimien keskeiset toimijat, minkä jälkeen tutkittiin, keiden kanssa Puolustusvoimat tekee kognitiivisen radion kehitystä koskevaa yhteistyötä. Esivalinnan jälkeen jokaiselle asiantuntijalle soitettiin puhelimella henkilökohtaisesti ja kysyttiin halukkuutta osallistua tutkimukseen.

Delfoi-menetelmän mukaisesti suoritettiin kaksi erillistä kyselykierrosta. Ensimmäisellä kierroksella loka-marraskuussa 2014 muodostettiin kokonaiskäsitys kognitiivisesta radiosta aset-

tamalla asiantuntijoiden vastattavaksi ja samalla arvioitavaksi neljä laajahkoa kysymyskonaisuutta. Toisella kierroksella tammikuussa 2015 asiantuntijoiden näkemyksiä tarkennettiin ja syvennettiin käyttäen hyväksi ensimmäisen kierroksen vastauksia. Molempien kierrosten kyselyt pilotoitiin tutkimuksen ulkopuolisella ryhmällä. Pilottiryhmään kuului kaksi upseeria ja yksi filosofian tohtori, ja sen tehtävä oli testata kyselyn tekninen toimivuus sekä kommentoida kysymysten asettelua. Tarkemmin sekä Delfoi-kierrosten kysymystenasettelu että analyysi on kuvattu tutkimuksen luvussa 4.

Teknisesti ensimmäinen delfoi-kierros toteutettiin sähköpostin liitteenä lähetetyllä Word-kyselyllä, koska vastaukset edellyttivät laajoja perusteluita ja koska kyselyyn vastaaminen edellytti mahdollisuutta sen alkupään osioiden sujuvaan hyväksikäyttöön myös kyselyn lopussa. Ensimmäisen Delfoi-kierroksen saatekirje löytyy tutkimuksen liitteestä 2 ja itse kysely on liitteestä 3. Toisella kierroksella kysely tehtiin Webropol-ohjelmalla siten, että luodun kyselyn linkki lähetettiin asiantuntijoille sähköpostitse. Delfoin toisen kierroksen kysymykset ja vastaukset löytyvät liitteestä 4.

2.3 Kysymysten muodostaminen

Delfoi 1. kierros

Koska tutkimus on ensimmäinen kognitiivisen radion operatiivista toiminnallisuutta koskeva tutkimus Suomessa, delfoi-kyselyn painopiste luotiin kognitiivisen radion ja sen toimintaympäristön ominaisuuksiin. Toisin sanoen selvitettiin, mitä lisää kognitiivinen radio voi tarjota sotilaalliseen käyttöympäristöön. Kirjallisuuteen perehtymisen ja muutaman asiantuntijan kuulemisen jälkeen voitiin todeta, että kognitiivitekniikka voi tuoda olennaista suorituskykyä lisää sotilaallisiin tarpeisiin. Selvityksen perusteella valikoitiin myös ne kognitiiviradion ominaisuudet, joista delfoin 1. kierroksella haettiin lisätietoa.

Delfoin 1. kierroksella asiantuntijoiden arvioitavaksi ja arvotettavaksi annettiin seitsemän eritasoista, tutkimuskirjallisuudessa käsiteltyä kognitiivisen radion ominaisuutta, jotka ennakolta arvioitiin merkityksellisimmiksi. Delfoi-kierroksen ensimmäisellä kysymyksellä (liite 3) haluttiin selvittää, millä kognitiivisilla ominaisuuksilla on paras potentiaali sotilaallisessa käyttöympäristössä. Kysymys antoi toisin sanoen tietoa myös siitä, mistä ominaisuuksista olisi eniten hyötyä, jos kognitiivisia ominaisuuksia haluttaisiin hankkia sotilasradioihin. Tässä vaiheessa tutkimusta käytettiin avointa kyselylomaketta (Word), koska vastaajille haluttiin antaa rajaton tila perusteluiden antamista varten. Samalla vastaajille taattiin mahdollisuus

lisätä ennakkoon valittujen 7 ominaisuuden joukkoon kokonaan uusia ominaisuuksia, mikäli he katsoivat sen perustelluksi.

Toisena kokonaisuutena delfoin 1. kierroksella kartoitettiin mahdollisia esteitä uuden teknologian käyttöönotossa. Kartoituksessa huomioitiin niin Puolustusvoimien sisäiset kuin ulkoisiakin tekijöitä. Tällä kysymyksellä sekä valitsemalla asiantuntijoita myös Puolustusvoimien ulkopuolelta haluttiin selvittää laajemmin, mitkä ovat mahdollisen uuden kognitiiviteknologian käyttöönoton esteet.

Delfoin 1. kierroksen kolmas kysymys koski ideaalisesti toimivaa kognitiivista radiota ja tarkemmin sitä, millainen tuo ideaaliradio olisi. Kysymyksenasettelu oli hyvin väljä. Selvää oli, että tämäntyyppinen kysymys voi tuoda uutta tietoa vain siinä tapauksessa, että vastaajat ovat motivoituneita vastaamaan ja käyttämään vastauksiinsa omaamaansa tietoa ja kokemuspohjaa. Helppo tapa kiertää kysymys ja antaa niin sanottu ”oikea vastaus” vastaajille olisi tässä tutkimuksessa ollut antaa hyväksyntänsä jo käytössä oleville kognitiivisen radion virallisille määritelmille.

Delfoi 2. kierros

Toimiakseen tarkoituksenmukaisella tavalla delfoi-menetelmän on katsottu edellyttävän palautetta ja iterointia (ks. luku 2.1). Vaikka kaikki uusimmat delfoi-menetelmän muunnokset eivät suoraan näitä vaadi, tässä tutkimuksessa juuri ensimmäiseltä kierrokselta saatujen tulosten tarkentaminen ja syventäminen palvelivat tutkimuksen tavoitetta eikä kokonaan uusien tutkimuskysymysten avaamiselle nähty tarvetta.

Toisen delfoi-kierroksen kysymyksillä haluttiin varmistaa ja syventää 1. delfoi-kierroksen perusteella syntynyt näkemys tulevaisuuden toimintakentästä eli radiotaajuisten spektrin mahdollisesta muutoksesta. Lisäksi asiantuntijoilta pyydettiin arvioita kognitiivisen radion suorituskyvyn mahdollisuuksista sekä alustavista teknisistä toteutuksista. Osa väittämistä muotoiltiin provokatiivisiksi keskustelun herättämiseksi ja nasevankin argumentoinnin virittämiseksi.

Delfoin 2. kierroksen ensimmäisellä kysymyksellä selvitettiin, miten eri näkökulmat vaikuttavat muodostuneeseen kognitiivisten ominaisuuksien tärkeysjärjestykseen. Näkökulmat valittiin siten, että kolme ensimmäistä näkökulmaa (suorituskykyliä, tekninen toteutus, tekninen kypsyys) yhdessä muodostavat neljännen kokonaisuuden (johtamisjärjestelmien kehitys), jota myös kysyttiin erikseen samassa yhteydessä. Eri näkökulmien yhteyttä ei kuitenkaan painotettu erikseen delfoi-kyselyn kysymysasettelussa.

Delfoi 2. kierroksen toisessa kysymyskokonaisuudessa selvitettiin tarkemmin 1. kierroksella hahmotellun ideaalisen kognitiivisen radion olemusta. Kysymys muodostui 39 väittämästä, joihin asiantuntijoiden tuli ottaa kantaa ohjatulla tavalla. Asiantuntijoiden aikaa ja ammattitaitoa haluttiin arvostaa suoralla etenemistavalla: samoja väitteitä ei esitetty useaan eri kertaan eikä väitteitä pääsääntöisesti käännetty negaatioiksi – vaikka molemmat menettelytavat voidaan joskus katsoa esimerkiksi tutkimuksen reliabiliteettia nostaviksi toimenpiteiksi.

2.4 Aineiston analysointi

Tutkimukseen osallistui vastaajia kaikista neljästä pyydetystä ryhmästä (operatiivinen, tutkimus, teollisuus, regulaatio). Osa vastaajista edusti useampaa kuin yhtä taustaryhmää, ja nämä kaksoisroolit huomioitiin aineiston analysoinnissa siten, että vastaukset laskettiin mukaan ikään kuin uusina vastauksina kunkin edustetun ryhmän osana. Näin saatiin myös vahvistettua vastauksiin haluttua ”operatiivista” painopistettä, onhan kyseessä Puolustusvoimien tarpeisiin tähtäävä tutkimus.

Delfoi-kierrosten tulokset käsitellään tutkimuksen luvussa 4. Tutkimustulokset raportoidaan kysymyksittäin omina alalukuinaan. Jokaisen luvun loppuun on kirjoitettu päätäntö, jossa alalukujen päätelmiä syvennetään ja jossa päätelmät nivotaan koko lukua koskevaan laajempaan kehykseen. Tutkimuksen lopulliset johtopäätökset ja jatkotutkimusehdotukset on esitetty päätäntöluvussa 5. Alaluvuissa esitetään runsaasti suoria lainauksia delfoi-kierrosten asiantuntijavastauksista, sillä lainausten kautta lukijoille pystytään konkretisoimaan se, mitä tutkimuksen yhteenvedoissa ja tulkinnoissa on väitetty.

Vaikka delfoi on tutkimusmenetelmänä vahvasti laadullinen ja sen tavoitteena on tuottaa ennen kaikkea laadullisesti rikasta sisältöä, aineiston analysoinnissa käytettiin kvalitatiivisten menetelmien lisäksi kvantitatiivisia menetelmiä⁶. Toisin sanoen kvantitatiivisuus nähdään tässä tutkimuksessa menetelmänä, ei aineiston ominaisuutena. Tilastomatematiikassa järjestyksasteikkolisilla muuttujilla ei tyypillisesti lasketa perustunnuslukuja (summa, keskiarvo, keskihajonta) moodia lukuun ottamatta (Heikkilä 2005, s. 90). Tässä tutkimuksessa tunnuslukuja (keskiarvoja ja -hajontoja) kuitenkin käytettiin laadullisen analyysin tukena, koska ne auttavat hahmottamaan keskeisiä tuloksia ja antavat lukijalle suuntaa-antavan sekä tilastolli-

⁶ Vrt. esim. Tuomivaara (2005), joka erottaa kvantitatiivisen ja kvalitatiivisen tutkimuksen sillä perusteella, millaisia muuttujia (nominaali-/järjestysasteikko vai välimatka/-suhdeasteikko) tarkastellaan, riippumatta siitä, käytetäänkö aineiston tarkasteluun matemaattisia menetelmiä vai ei.

sestikin riittävän pätevän kuvan ilmiöstä. Tarkat vastausjakaumat on lisäksi esitetty erillisissä taulukoissa. Kvantitatiivisista menetelmistä käytettiin perustunnuslukujen lisäksi järjestysasteikollisten muuttujien lukumäärään ja niiden välisiin korrelaatioihin perustuvaa Cronbachin alfaa, joka kertoo, kuinka yhdenmukaisia vastaajien vastaukset ovat (Heikkilä 2005, s. 187).

Kvalitatiivisessa analyysissä painotettiin sisällönanalyysia, joka perustuu aineiston ryhmittelyyn ja teemoitteluun. Sisällönanalyysissä otettiin diskurssianalyysin perinteen mukaan huomioon enonsiaatio eli se, kuka puhuu, mitä sanoi, mitä tarkoitti ja miksi (Metsämuuronen 2005, s. 127). Erilaiset näkökulmat huomioitiin tutkimusasettelussa luomalla jo etukäteen edellä mainitut neljä vastaajaryhmää.

3. Kognitiivinen radio sotilaallisessa käyttöympäristössä

3.1 Kognitiivisen radion keskeiset ominaisuudet

Tässä luvussa käsitellään niitä kognitiivisen radiojärjestelmän teknisiä ominaisuuksia, joilla on potentiaalista merkitystä sotilaallisessa ympäristössä. Jaottelu perustuu kirjallisuuslähteissä (Tuukkanen ym. 2013; Wireless Innovation Forum 2010, myöh. WINNF) esitettyihin ominaisuuksiin sekä tutkijan omaan näkemykseen merkittävistä sotilaallisista ominaisuuksista. Tässä yhteydessä ei sen sijaan paneuduta kognitiivisen radiojärjestelmän vaikutuksiin siviilimarkkinoilla tai sen kaupallisiin sovelluksiin tuomiin ominaisuuksiin, vaikka siviilisovellusten merkitys koko teknologian kehittymiselle on kiistaton.

Tässä luvussa arvioidaan myös kognitiivisten radioverkkojen ja -laitteiden vaikutuksia johtamisjärjestelmiin. Tiedonsiirtojärjestelmiä tarkastellaan toiminnalliselta kannalta, kun arvioidaan, miten tiedonsiirtojärjestelmän kognitiiviset ominaisuudet vaikuttavat elektroniseen tiedusteluun, vaikuttamiseen ja suojautumiseen. Kognitiivisia radioverkkoja arvioidaan lyhyesti erikseen myös viestitaktisesta näkökulmasta. Kansainvälisiin operaatioihin ei oteta tässä tarkastelussa kantaa. Kuten Tuukkanen ja Anteroinen toteavat konferenssiesitelmässään (Tuukkanen ym. 2013), on tiedonsiirtojärjestelmien kehittämisestä puhuttaessa välttämätöntä erottaa globaalien suurvaltojen intressit ja pienten valtioiden kansalliseen puolustukseen tähtäävät intressit. Tässä tutkimuksessa tarkastelu rajataan Suomen viitekehykseen.

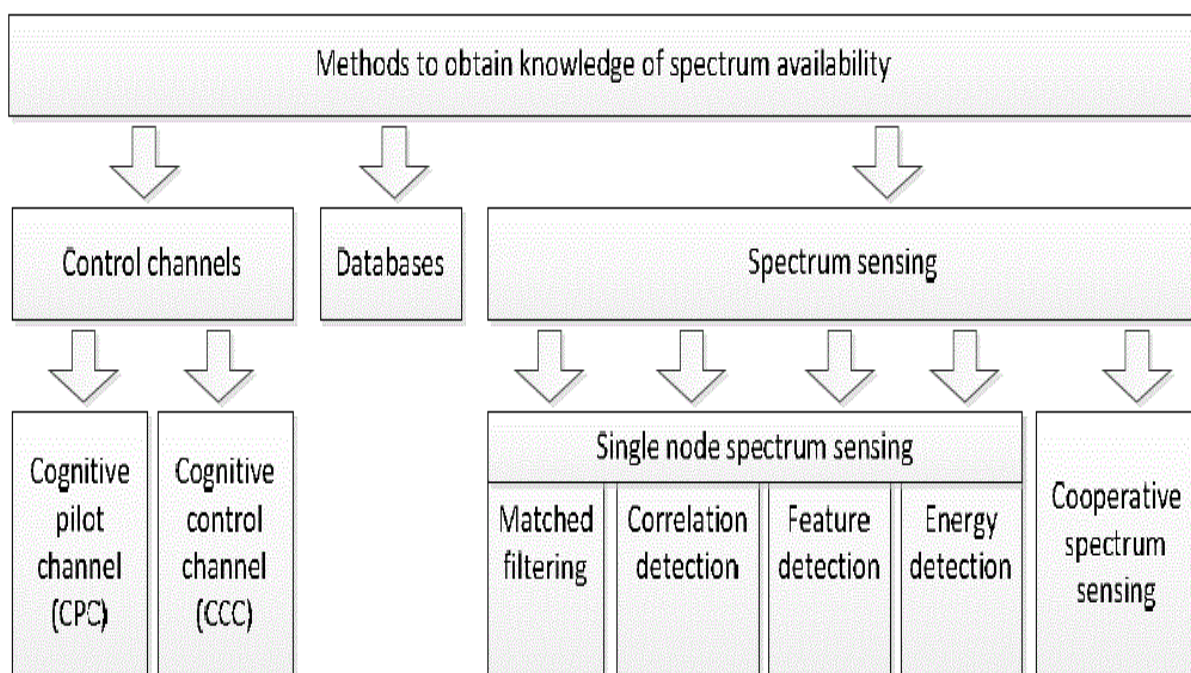
3.1.1 Dynaaminen spektrin hyväksikäyttö

Dynaaminen spektrin hyväksikäyttö (DSA) on kuvattu useissa eri lähteissä erittäin tärkeäksi osaksi kognitiivista radiota. Tiedeyhteisössä se onkin saanut osakseen suuremman huomion kuin kognitiivisen radion muut ominaisuudet. DSA on kuitenkin erittäin mielenkiintoinen ilmiö myös sotilaallisesti. DSA:n on tutkittu parantavan spektrin käyttöastetta, saatavuutta ja kapasiteettia sekä yksinkertaistavan spektrin hallintaa (WINNF, 2010, s. 12–13). Sotilaallisesta näkökulmasta erityisesti spektrin laajeneminen ja hallinta ovat mielenkiintoisia kokonaisuuksia.

Dynaaminen spektrin hyväksikäyttö on kuvattu IEEE:n standardissa reaaliaikaiseksi spektrin hyväksikäytöksi, jossa radio sopeutuu ympäristöön ja tehtäviin (IEEE Standard, IEEE Standard Definitions and Concepts for Dynamic Spectrum Access, 2008). DSA mahdollistaa sen, että toisiokäyttäjät (*secondary users*) voivat tulla jakamaan ennen vain yhdelle käyttäjälle

(*primary user*) allokoitua taajuusresurssia. Nykyinen järjestelmä, jossa spektriä on myyty eniten tarjoavalle, on johtanut spektrin hyvin alhaiseen käyttöasteeseen (Matinmikko 2012, s. 23–28). DSA:n myötä toisiokäyttäjien on teoriassa mahdollista jakaa taajuusresurssia aiheuttamatta häiriötä samalla taajuusalueella jo oleville järjestelmille (WINNF 2010, s. 13). DSA-tekniikalla pyritään mahdollistamaan aiemmin kuvattujen spektrin aukkojen (*white space*) käyttö.

Spektrin käytettävyyden kannalta on olennaista tietää mm., onko taajuus vapaa, onko taajuudella häiriöitä sekä onko häiriöitä odotettavissa. Tietoa spektrin käytettävyydestä voidaan hankkia usealla eri tavalla. Näistä kolme päämetodia ja niiden alavaihtoehtoja esitetään seuraavassa kuvassa 3.



Kuva 3. Metodeja spektrin käytettävyyden parantamiseksi (Matinmikko 2012, s. 28)

- 1) Spektrin havainnointi (*spectrum sensing*). Spektrin havainnoinnissa kognitiivinen radiojärjestelmä erottelee signaalit kohinasta päättelemällä vastaanottamiensa spektrin näytteiden perusteella, ovatko signaalit päällä vai pois päältä.
- 2) Tietokannat (*databases*). Tietokannoista voidaan hakea tietoa kognitiivisen radiojärjestelmän käyttöön spektrin käytettävyyden parantamiseksi. Tietokannat voivat olla esimerkiksi paikkatietokantoja, taajuustietokantoja tai käyttäjätietokantoja. Kaikkien kognitiiviseen radiojärjestelmään kuuluvien radioiden ei tarvitse olla yhteydessä tietokantoihin. Sen sijaan riittää, että jokin järjestelmään kuuluva radio saa tarvittavat tiedot ja välittää ne eteenpäin esimerkiksi kontrollikanavia pitkin.

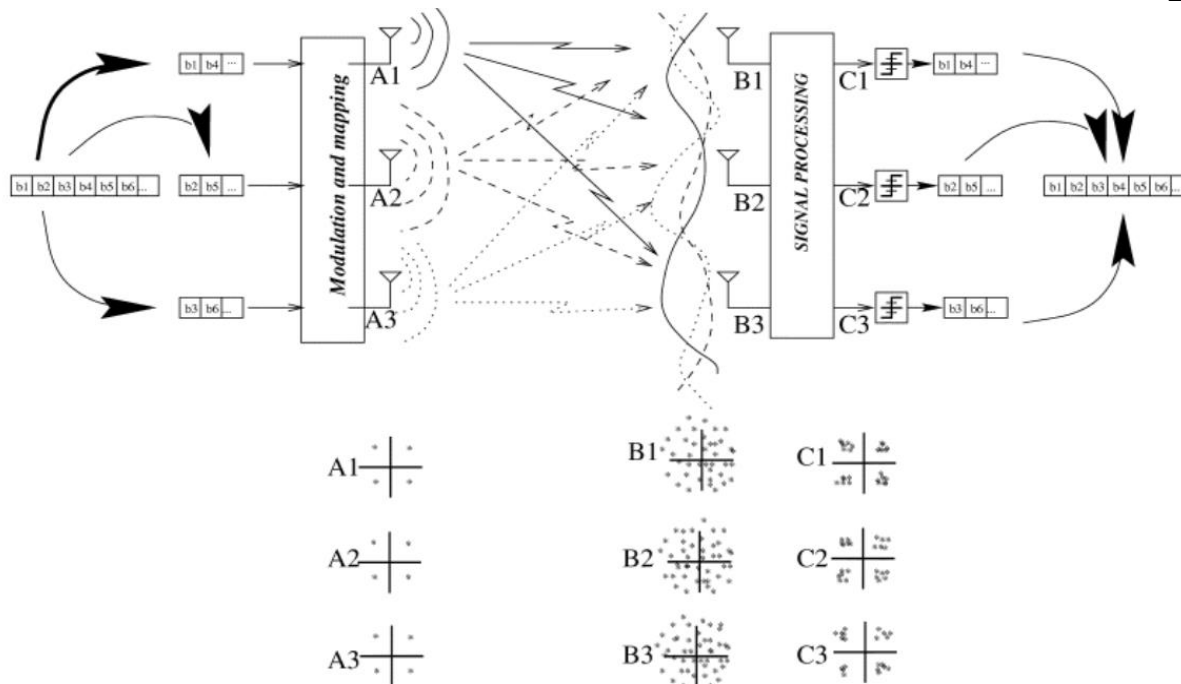
- 3) Kontrollikanavat (*control channels*). Kontrollikanavilla tarkoitetaan sellaisia etukäteen määritettyjä kanavia (kuten yksittäinen taajuus tai aikapaikka riippuen käytettävissä olevasta aaltomuodosta), joilla voidaan välittää tietoa esimerkiksi järjestelmän sisäisestä tilasta, vapaista taajuuksista, saatavilla olevista päivityksistä ja konfiguraatiomuutoksista. Kontrollikanavat voivat olla yhteydessä suoraan radiosta radioon tai radiosta tukiasemaan riippuen järjestelmästä, verkon topologiasta ja konfiguraatioista.

Tarkemmat kuvaukset esitetyistä metodeista ja alavariaatioista on tutkijayhteisön näkökulmasta esittänyt Matinmikko (2012, s. 28–36). Kestävyyden ja toimintavarmuuden parantamiseksi kognitiivisissa radiojärjestelmissä käytetään yllä kuvattuja toimintoja yhdistäviä tekniikoita (WINNF 2010, s. 12). Niin kutsutun hiljaisen solmun tai pelkän vastaanottimen läsnäoloa ei voida esimerkiksi spektrin havainnointitekniikalla todentaa, koska ne eivät säteile ympärilleen mitään. Tarvitaan siis yhdistäviä tekniikoita oikean tilannekuvan luomiseksi. Tutkituimmat kognitiivisen radiojärjestelmän tekniikat liittyvät spektrin toisiokäyttöön (*secondary users*) ja perustuvat havainnointitekniikkaan. Vähäisemmälle huomiolle ovat jääneet muut tekniikat ja näiden yhdistelmät. (Matinmikko 2012, s. 28–36.) Tästä syystä tietokannat käsitellään erikseen alaluvussa 3.2.

3.1.2 Moniantennijärjestelmät

Moniantennijärjestelmillä voidaan parantaa tiedonsiirtojärjestelmän suorituskykyä, kuten datansiirtonopeuksia, ja kohentaa yhteyden toimintavarmuutta. Niiden avulla voidaan myös lisätä suorituskykyä esimerkiksi kasvattamalla peittoalueita, verkonmuodostusta ja yhteysetäisyyksiä sekä vähentämällä energiankulutusta.

MIMO-järjestelmässä (*Multiple Input Multiple Output*) on monia antennia sekä lähetys- että vastaanottopäässä. Tämä mahdollistaa ns. rinnakkaiskanavien käytön lähetyksessä, sillä jokainen antenni vastaanottaa signaalia, jossa on osia kustakin lähetyksistä samalla taajuudella ja samalla hetkellä lähetystä signaaleista. Rinnakkaiskanaviin ei siis tarvita ylimääräistä kaistanleveyttä. Edellä kuvatulla space–time-diversiteetillä (tila–aika-monimuotoisuudella) saadaan merkittävästi parempi S/N-suhde ja sitä kautta suurempi datansiirtonopeus antennien lukumäärän kasvaessa, kuten seuraavassa kuvassa 4 on esitetty. (Rantanen, 2014.)



Kuva 4. MIMO-järjestelmissä space–time-diversiteetillä (tila–aika-diversiteetillä) voidaan parantaa S/N-suhdetta (Hon, 2014)

Myös muilla kehittyneillä mutta MIMOa alempitaisoisilla antennijärjestelmillä on sotilaallisesti merkitystä (Tuukkanen ym. 2013, s. 9). Järjestelmiä *Single Input Multiple Output* (SIMO) ja *Multiple Input Single Output* (MISO) ovat tutkineet esimerkiksi Tuukkanen ym. (2003) ja ne on havaittu toimivaksi sotilaskäytössä (Tuukkanen ym. 2013, s. 9). SIMO- ja MISO-antennijärjestelmät toimivat samalla periaatteella kuin MIMO-järjestelmät, mutta näissä vain lähetys (MISO) tai vastaanotto (SIMO) on yhdestä lähteestä. Kun yhteyttä voidaan parantaa ilman mitattavia radioparametrimuutoksia (esimerkiksi kaistanleveys ja taajuus) ja kun yhteys voi adaptoitua vallitsevaan signaaliympäristöön, on sillä merkitystä sotilaallisessa käyttöympäristössä. Vaikuttamisen kannalta esimerkiksi häirinnän vaikutuksen todentaminen on vaikeampaa: moniantennijärjestelmän adaptoituminen vallitsevaan tilanteeseen ei välttämättä ilmene näkyvinä ja siten havaittavina muutoksina.

3.1.3 Yhteyksien adaptiivisuus

Yksittäisen yhteyden adaptiivisuutta ja linkin muodostusta on tutkittu kymmeniä vuosia. Kognitiivista radiota käsittelevässä kirjallisuudessa yhteyden sopeutuvuutta kutsutaan termillä *Single Link Adaptation*, lyhyemmin SLA. Adaptiivisia ominaisuuksia ovat esimerkiksi AMC (*Adaptive Modulation and Control*), TPC (*Transmit Power Control*), AFC (*Automatic Frequency Control*) ja FEC (*Forward Error Correction*) (WINNF 2010, s 47; Tuukkanen ym. 2013, s.10), josta ensimmäiset sovellukset ovat jo 1950-luvulta (virheenkorjauskoodi *Hamming-Code*). Edellä mainitut ovat yksittäisiä tekniikoita, joilla pyritään parantamaan radioyh-

teyttä, mutta kokonaisuutena niiden voidaan myös katsoa kuuluvan radioresurssinhallintaan (RRM). Adaptiivisia ominaisuuksia hallinnoidaan (teoriassa) kognitiivisella koneella (*Cognitive Engine*, CE). Tällöin ajatuksena on, että kognitiivisen moottorin älykkäitä algoritmeja käyttämällä voidaan parantaa yhteyden laatua (*Quality of Service*, QoS). (WINNF 2010, s. 27.)

3.1.4 Radioresurssien hallinta

Prosessia, jolla radion eri parametreja, kuten teho, taajuus ja hyppytnopeus, hallitaan järjestelmätasolla, kutsutaan radioresurssien hallinnaksi (RRM). Radioresurssien hallinta mahdollistaa resurssien optimoinnin hallinnoimalla esimerkiksi lähetystehoa, kanavia, tiedonsiirtonopeutta, modulaatiota/aaltomuotoa, koodausta ja virheenkorjausta (Tuukkanen ym. 2013, s. 10).

Lähes jokaisen kognitiivisen radion voidaan katsoa olevan eräänlainen RRM-tapaus. Kun älykkyys ja tilannetietoisuus sisällytetään järjestelmään, verkkoon tai laitteeseen, joissa voidaan käyttää yllämainittuja tekniikoita parantamaan tietoliikenneyhteyksiä, syntyy kombinaatioita, joita ei ole mahdollista yhdistää ilman hallintatyökalua. Sitä mukaa, kun verkkoihin liitettävien laitteiden ja laiteiden välisten yhteyksien määrä kasvaa, muuttuvat järjestelmät ja käyttötilanteet yhä monimutkaisemmiksi (WINNF 2010, s. 31). Näissä tilanteissa RRM vaikuttaa olennaisesti siihen, miten järjestelmät ratkaisevat tilanteet ja miten ne oppivat toimimaan alati muuttuvassa toimintaympäristössä.

Sotilaallisen toimintaympäristön voidaan katsoa olevan radiojärjestelmälle eräs haastavimmista mahdollisista toimintaympäristöistä: On tilanteita, joissa kaikki emissiot tulee hallita, ja on järjestelmiä, jotka on tehty häiritsemään juuri tietyn järjestelmän tietyn tyyppistä viestiliikennettä. Ääritapauksessa verkkojen tulee pystyä toipumaan solmujen fyysisestä tuhoutumisesta. Sotilasverkkoja pitää pystyä hallitsemaan kaikilla tasoilla, mutta ilman tehokasta ja kattavaa radioresurssien hallintaa ei kognitiivisia verkkoja voida sotilaallisessa ympäristössä käyttää. Sellaista tilannetta ei voida sallia, jossa radiot keskustelevat keskenään niin, että käyttäjä ei voi siihen vaikuttaa. Koska kognitiivinen radio on aina automaattinen ja jopa oppiva, on huolehdittava siitä, että operaattori voi vaikuttaa siihen, mitä tapahtuu radio- ja verkkotasolla (Prokkola 2014).

3.1.5 Kognitiiviset häirintäjärjestelmät

Kognitiivinen radio, joka pystyy itsenäisellä päätöksenteolla väistämään häiriöt ja häirinnän, herättää väistämättä kysymyksen vastajärjestelmästä sekä siitä, millainen se olisi. Yleisesti ottaen hyvä häirintäjärjestelmä on sellainen, joka pystyy tehokkaasti estämään vastustajan johtamisjärjestelmien toiminnan ja samalla aiheuttaa omille johtamisjärjestelmille mahdollisimman vähän häiriötä. Mikäli vastustaja vaihtaa toimintataajuuttaan, tulee häirintäjärjestelmän seurata perässä uudelle taajuudelle. Ei-kognitiivisissa järjestelmissä häirinnän seuraaminen, kuten toisaalta myös häirinnän väistäminen, edellyttää pääsääntöisesti ihmistä tekemään nämä toimenpiteet (WINNF 2010, s. 89).

Kognitiivinen häirintäjärjestelmä kykenee maksimoimaan häirinnän vaikutuksen häiritävään kohteeseen ja minimoimaan häiriöt omiin järjestelmiin, eli se muuntuu ja konfiguroituu tilanteen mukaan. Kognitiivisella häirintäjärjestelmällä on käytössään samanlaiset ominaisuudet kuin kognitiivisella radiollakin: se mm. on tietoinen ympäristöstään ja voi tunnistaa häiritävät lähetteet, ja lisäksi siihen voidaan implementoida esimerkiksi älykkäät antennit (WINNF 2010, s.89).

Kognitiivinen häirintäjärjestelmä olisi toimiessaan merkittävä suorituskykyisä ja todella vaikea vastustaja ei-kognitiiviselle tiedonsiirtojärjestelmälle. Kognitiivisen radion ja kognitiivisen häirintäjärjestelmän asettaminen vastakkain ja molempien toiminnan ennakointi on puolestaan hyvin vaikeaa ja ehkä jopa ennakoimatonta. Se, kumpi voittaa, riippuu suorituskyvystä – esimerkiksi taajuusalueesta ja aaltomuotojen kehittyneisyydestä – ja toisaalta myös siitä, kumpi järjestelmä pystyy ajamaan OODA-silmukkaa nopeammin (ks. luku 1.6).

3.1.6 Reaaliaikaiset spektrimarkkinat

Spektrimarkkinoiden perusidea on parantaa spektrin käytettävyyttä kaupallisuuden kautta. Spektrimarkkinoiden myötä spektri olisi vapaammin kaikkien käytettävissä siten, että myös muut toimijat (toissijainen käyttäjä, *secondary user*) voisivat käyttää jollekin tietylle toimijalle (ensisijainen käyttäjä, *primary user*) dedikoitua taajuuskaistaa. Edellytyksenä on, että toissijaiset käyttäjät eivät häiritse ensisijaista käyttäjää. (WINNF 2010, s. 57–59.)

Mobiilijärjestelmien datansiirtovaatimukset tulevat ITU-R:n mukaan nousemaan kolminkertaiseksi vuodesta 2013 vuoteen 2015 (ITU-R Report M.2243, s. 16). Haasteena on siis löytää voimakkaasti kasvaville mobiilimarkkinoille tarkoitukseen sopivia taajuuksia. Kognitiivisen radion ominaisuudet, etupäässä dynaaminen spektrin hyväksikäyttö (DSA) ja sen myötä mahdollisuus muodostaa toimintaympäristötietoisuus, soveltuisivat hyvin opportunistiseen spekt-

rin käyttöön. Toisin sanoen, jos spektriä on vapaana, sitä olisi myös mahdollista käyttää hyväksi.

Esteeksi spektrimarkkinoiden toteutumiselle voivat muodostua maksut tai maksutapa. Osa yrityksistä on maksanut valtioille spektrin käytöstä valtavia summia erilaisissa huutokaupoissa⁷. Tämänkaltaisten kauppojen uudelleen neuvotteleminen voi olla vaikeaa, ja toisaalta ne yritykset, jotka spektriin jo ovat investoineet, haluavat myös investoinneilleen vastinetta. Erilaisia kaupallisia malleja kognitiivisen radion spektrin käytölle on kehitetty ja kehitellään edelleen, mutta kansainvälisesti toimivat ratkaisut ovat yhä jokseenkin selkiytymättä. (WINNF 2010, s 59–60.)

3.1.7 Verkonmuodostus

Verkkojen kognitiivisuus mahdollistaa toimiessaan useita eri tapoja radioverkkojen muodostamiseen. Langattomat verkot voidaan jakaa kahteen eri kategoriaan ja näiden yhdistelmään (Buddhikot 2007, s. 1):

- 1) kiinteään infrastruktuuriin perustuviin mobiiliverkkoihin, joissa tukiasemat muodostavat keskitetyn liityntäpisteen tietyllä alueella sekä
- 2) peer-to-peer- (P2P) tai ad hoc -verkkoihin (suomeksi rakenteettomat verkot), joissa verkot eivät ole riippuvaisia keskitetyistä solmuista.

Buddhikotin (2007) mukaan P2P:n ja kiinteän infrastruktuuriin muodostamaa hybridiverkkoa kutsutaan Mesh-verkoksi. Sotilaallisissa tutkimuksissa termeillä *mesh* ja *ad hoc* on yksinkertaistaen tarkoitettu verkkoja, joiden rakenne voi muuttua dynaamisesti ja joiden solmut voivat muodostaa yhteyksiä itsenäisesti (Karsikas 2007, s. 102). Tämän tutkimuksen kannalta merkityksellisin verkon muoto on niin kutsuttu *wireless mesh network* (WMN), jossa eri verkot (esimerkiksi rakenteettomat verkot) voidaan liittää toisiinsa yhdyskäytävällä (*gateway*) (Raniwala ym. 2005, s. 3). Nimestään huolimatta WMN:iin voi liittyä myös kaapeliyhteyksillä (Raniwala ym. 2005, s. 1). WMN vastaa rakenteeltaan luvussa 3.3 esitettyä maavoimien tiedonsiirtoverkkoa.

Toisinaan verkonmuodostus on kirjallisuudessa liitetty pelkästään DSA:n ominaisuudeksi, koska se nähdään yhtenä tapana hyödyntää spektriä (ks. esim. Buddhikot 2007, s. 1). Tämä on kuitenkin kovin suppea näkökulma, mikäli verkonmuodostusta tarkastellaan sotilaallisessa

⁷ Yleisesti uutisoitu tapaus Suomessakin oli, kun Sonera ”osti ilmaa Saksasta 40 miljardilla markalla” vuosittu-

käyttöympäristössä. Sotilaalliseen käyttöympäristöön soveltuvan kombinaation muodostavat itsenäisesti organisoituvat verkot (*Self Organized Networks*, SON) ja tehtävän mukainen konfigurointi (*Role Based Reconfiguration*, RBR).

Itsenäisesti organisoituvalla verkolla (SON) tarkoitetaan verkkoa, joka voi automaattisesti laajentua, muuntua ja konfiguroitua sekä optimoida verkon peittoaluetta, kapasiteettia, solukokoa, topologiaa, taajuusallokointia ja kaistanleveyksiä. Optimointikyky perustuu verkon kykyyn reagoida häiriöiden muutoksiin, signaalin vahvuuteen, paikkaan, viestiliikenteen toimintamalliin (*traffic pattern*) sekä muihin ympäristöllisiin ominaisuuksiin. (WINNF 2010, s. 67.)

Tehtävän mukaisella konfiguroinnilla (RBR-konseptilla) tarkoitetaan sitä, että laite tai laitteet voidaan konfiguroida yksilön tehtävän mukaan (WINNF 2010, s. 78). Tällöin esimerkiksi komppanian päälliköllä on radiossaan eri asetukset kuin ryhmänjohtajalla. Komppanian päällikölle annetaan mahdollisuus seurata useaa verkkoa yhtä aikaa (esim. pataljoonan komentajan komentoverkko, oman komppanian komentoverkko, reservikomppanian komentoverkko, joukkueiden johtamisverkot, tulenkäytön verkot jne.), kun ryhmänjohtajalle voivat riittää oman ryhmän verkko sekä joukkueen johtajan verkko.

Kun liitetään toisiinsa SON ja RBR, syntyy yhdistelmä, joka vastaa käytännössä jokaiseen verkonmuodostukseen liittyvään operatiiviseen suorituskykyvaatimukseen, joita tämän hetken johtamisjärjestelmiltä vaaditaan (Karsikas 2014). Haasteena on tunnistaa oman verkon jäsenet luotettavasti dynaamisessa, langattomassa ja salatussa ympäristössä.

3.2 Tietokannat osana kognitiivista radiota

Tietokantojen merkitystä kognitiivisissa verkoissa ei tule nähdä pelkkänä DSA:n alalajina, jolla mahdollistetaan – osana muita ominaisuuksia – dynaaminen spektrin käyttö, vaan niiden käytettävyys erityisesti operatiivisissa järjestelmissä tulisi nähdä osana laajempaa kokonaisuutta. Tietokantojen käyttö kognitiivisessa radiossa on toistaiseksi saanut vasta vähän huomiota tutkijapiireissä. Tietokannat on kuitenkin tunnistettu yhdeksi merkittävimmistä tietolähteistä tulevaisuuden kognitiiviradiolle (Matinmikko 2012, s. 29).

Sotilaallisissa sovelluksissa erilaisia tietokantoja on käytetty jo vuosien ajan. Esimerkiksi automaattisissa valvontajärjestelmissä eri kohteet voidaan tunnistaa mm. ottamalla näyte signaalista ja vertaamalla sitä tietokannassa oleviin näytteisiin. Valvontajärjestelmän mitaamat sig-

naalit ovat siis eräänlaisia sormenjälkiä, joita maalit emittoivat ympäristöön ja joiden perusteella valvontajärjestelmät niitä identifioivat. Kognitiivisessa radiossa tietokannat mahdollistavat tiedon monipuolisen hyödyntämisen. Sovellettavissa olevia tietokantatyyppejä tietovarantoja on arvioitu alla olevassa taulukossa 1.

Taulukko 1. Kognitiivisen radion mahdollisia tietokantoja

Tietokanta	Kuvaus	Käyttötarkoitus
1) Paikkatietokanta	Tietokanta, jossa on kognitiivisten radioiden paikkatiedot ja kiinteiden lähetteen paikat. Voidaan lisätä myös tiedustelun tuottamia paikkatietoja lisäämään vastatoimenpiteiden tehoa.	1) Tuottaa kognitiiviselle radiojärjestelmälle kaikkien kog.radioiden paikkatieto 2) Muiden kog.radioiden vaikuttavien lähetteen paikkatiedot 3) Kog.radioiden toimintaan vaikuttavien lähetteen paikkatieto; esimerkiksi tieto häirintälähetteen paikasta vaikuttaa antennien suuntaamiseen.
2) Käyttäjätietokanta	Tietokannassa on Kogn. radioiden käyttäjien tai organisaation tehtävien mukaiset tiedot. Tietokanta sisältää myös muiden organisaatioiden lähetteen tiedot (paikka, lähetystehot).	Kogn. radioiden parametrien (kuten seurattavien taajuuksien) määrä vaihtelee käyttäjästä riippuen. Tietokantaan voidaan rakentaa eri käyttäjätyyppille roolit, joita voidaan tilanteen mukaan jakaa tarvitsijoille.
3) Käyttötapatietokanta	Tietokantaan voidaan syöttää eri operaatioiden vaiheen mukaiset kognitiivisen radiojärjestelmän asetukset.	Pitää sisällään johtamisjärjestelmäkäsityksessä määritettyjä asioita, kuten EMCON-tasot eri vaiheissa, yhteyksien tärkeysjärjestys jne. Operaatioiden edetessä valmistellut kokonaisuudet voidaan toimeenpanna kog. radioiden ohjelmiston avulla.
4) Signaalitietokanta	Tietokannassa on normaalioloissa kerättyä pohjatietoa, jota poikkeusoloissa täydennetään. Tietokannassa on kog. radioiden itsensä keräämä tilasto signaaliympäristöstä	Mahdollistaa häirintälähetteen erottamisen häiriöistä, mikäli tällainen ominaisuus on järjestelmään rakennettu. Kognitiivinen radiojärjestelmä voi kerätä tilastoa häiriöttömistä taajuuksista. Tämä korostuu matalilla taajuuksilla.
5) Kohdetietokanta	Tietokannassa on tiedot uhkan suorituskyvystä (esim. häirintälähtimet).	Kognitiivinen radio mahdollistaa oikeat vastatoimenpiteet – mikäli se on kyennyt tunnistamaan ja tyypittämään uhkan oikein.

Samantyyppisiin tietokantoihin, tosin suppeammin esitettyinä, ovat päätyneet myös norjalaiset tutkijat Norjan puolustusvoimien tutkimuslaitoksen (FFI) raportissa ”MILKOG - a cognitive radio electronics warfare agent architecture” (Thoresen ym. 2012).

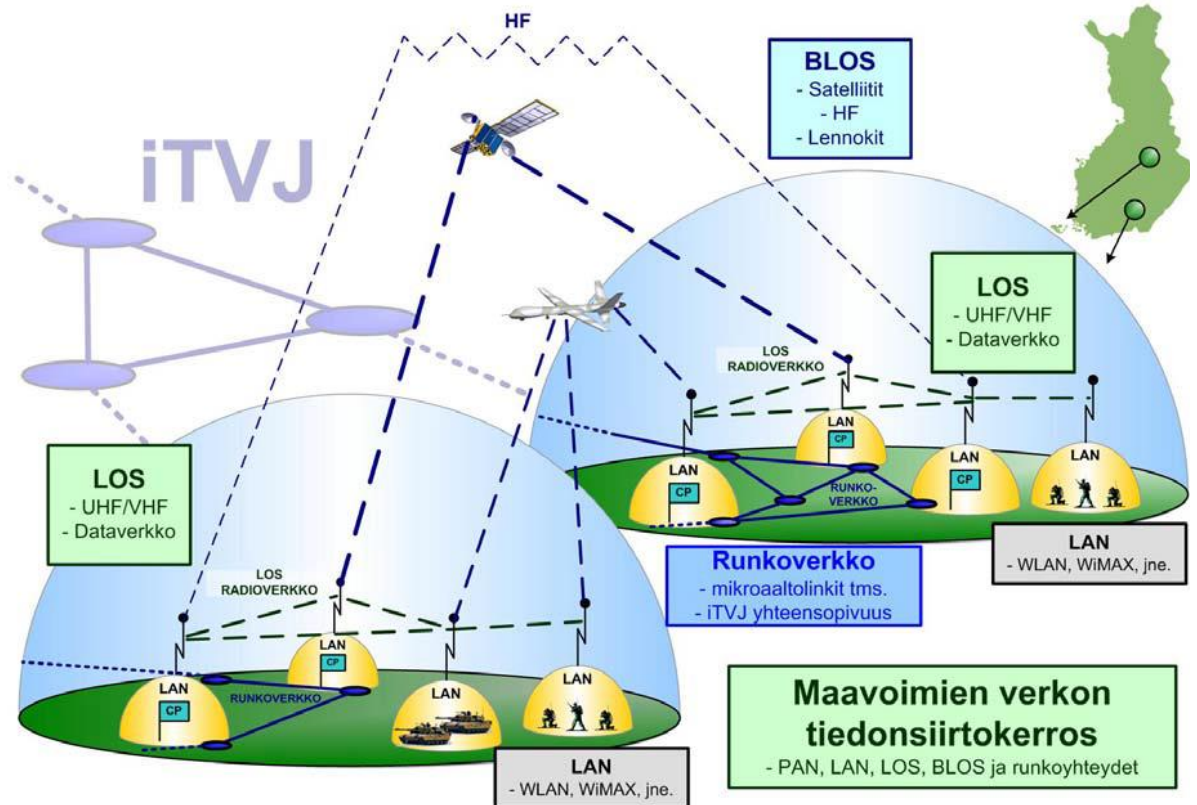
Vaikka tietokannat tuovat merkittävää lisäarvoa kognitiivisen radion päätöksenteolle erillisinäkin tietovarantoina, niiden yhteiskäyttö korostuu sotilaallisessa ympäristössä. Eri tieto-

kantojen roolia on kuvattu seuraavassa esimerkissä: Häirintäjärjestelmä pyrkii häiritsemään kognitiivista radiota. Häirintäjärjestelmä tarvitsee tietokannan tai ennakkotiedon kohteesta, jotta se kykenee optimoimaan häirinnän kyseistä järjestelmää vastaan. Kognitiivinen verkko taas pystyy tunnistamaan ja tyypittämään (tai alueella oleva tiedustelujärjestelmä näiden lisäksi paikantamaan) häirintäjärjestelmän, joka yrittää häiritä radioyhteyksiä. Yhdistäessään tiedot häirintäjärjestelmän suorituskyvystä ja kognitiivisen järjestelmän toimintavaihtoehtoista kognitiivinen järjestelmä voi synnyttää tilanteen, jossa kognitiivisen verkon taajuuksien hyppytnopeus on korkeampi, kuin mihin häirintäjärjestelmä pystyy vaikuttamaan. Kognitiivinen radio voi tehdä valinnan, jossa hyppytnopeutta nostetaan yli häirintäjärjestelmän suorituskyvyn, ja pakottaa häirintäjärjestelmän vaihtamaan häirintämoodiaan esimerkiksi laajakais- taiseksi. Laajakaisaisen häirinnän vaikutusetaisyys on merkittävästi lyhyempi kuin ka- peakaistaisen, koska häirintäteho kanavaa kohden laskee suoraan häirintäkaistanleveyden kasvamisen suhteessa. Loppuasetelmassa häirintäjärjestelmä joutuu muuttamaan häirintägeo- metriaansa (siirtymään esimerkiksi maantieteellisesti lähemmäksi) tai vaihtamaan kohdetta, ja kognitiivinen radio voi jatkaa toimintaansa.

Tietokantojen luominen ja ylläpitäminen edellyttävät merkittävää työpanosta. Osa tietokan- noista on muiden viranomaisten kuin sotilasviranomaisten ylläpitovastuulla. Esimerkiksi tie- dot (paikat, säteilyteho, prioriteetti) siviiliyhteiskunnan tarvitsemista läheteistä yleisradiosta rautateiden ohjainlaitteisiin ovat Viestintäviraston vastuulla (Viestintävirasto, Esittely ja teh- tävät, 2015). Tietokantojen ajantasaisuus ja yhteensopivuus tulee olemaan jatkossakin mer- kittävä haaste.

3.3 Kognitiiviset ominaisuudet sotilaallisissa tiedonsiirtoverkoissa

Sotilaallisessa ympäristössä tiedonsiirtojärjestelmien tehtävänä on liittää taistelukentän senso- rit sekä tiedonsiirtojärjestelmänkäyttäjät verkostoon verkostokeskeisyyden perusajatuksen mu- kaisesti. Samalla järjestelmän tulee olla kerrostunut, jotta joukkojen ja asejärjestelmien liike mahdollistuisi. Kerroksellisuus toteutetaan hyödyntämällä kaikkia saatavilla olevia yhteyksiä: suoria, ilmasta releoituja yhteyksiä, satelliittiyhteyksiä sekä ylliradiohorisontin kantavia radio- yhteyksiä. Tavoitteena on siis laaja-alainen verkottuminen horisontaalisesti ja vertikaalisesti, mikä on yksi johtamisen tärkeimmistä vaatimuksista sotilaallisessa käyttöympäristössä. Ku- vassa 5 on esimerkkinä käytetty maavoimien tiedonsiirtoverkkoa. (Karsikas 2007, s. 122.)



Kuva 5. Maavoimien verkon toiminnallinen perusajatus (Karsikas 2007, s. 122)

Esimerkissä maavoimien tiedonsiirtoverkon osajärjestelmät on nimetty niiden kantaman perusteella. Alimmalla tasolla ovat henkilökohtaiset yhteydet (PAN, *personal area network*), jotka liittyvät taistelijan tai ajoneuvon omien yhteyksien toteuttamiseen. Näillä toteutuksilla voidaan laskea sisäkaapelointien kustannuksia sekä helpottaa kytkemistä. (Karsikas 2007, s. 122–123.)

Paikallisverkolla (LAN, *local area network*) tarkoitetaan yhteyksiä, jotka ovat PAN-yhteyksiä pidempiä, mutta kuitenkin maksimissaan noin kilometrin yhteyksiä. Paikallisverkkojen yhteydet voidaan rakentaa käyttämällä WLAN-tyyppisiä ratkaisuja. (Karsikas 2007, s. 123.) Tyypillisiä käyttökohteita ovat esikunnat, johtamispaikat, eri yksiköt sekä asejärjestelmät. Paikallisverkot voidaan liittää toisiinsa ad hoc -verkonmuodostustekniikalla.

Näköyhteyden etäisyydelle kantavat LOS-radiojärjestelmät (*Line Of Sight*) muodostavat maavoimien verkon kolmannen kokonaisuuden. Tällä radiojärjestelmällä voidaan rakentaa noin 3–10+ km:n yhteysetäisyyksiä, kuitenkin maksimissaan radiohorisonttiin asti. (Karsikas 2007, s. 123.) LOS-radiojärjestelmän taajuudet ovat tyypillisesti 30–2400 MHz (myös 4 GHz:n alueen käyttäminen on mahdollista), ja tällä järjestelmällä rakennetaan tärkeimmät taistelunjohtoyhteydet yhtymätasolla.

BLOS-tiedonsiirtojärjestelmät (*beyond line-of-sight* eli yli näköyhteyden toimivat) muodostavat maavoimien verkkojen neljännän osan. Näillä järjestelmillä muodostetaan pitkät, radiohorisontin yli kantavat yhteydet. (Karsikas 2007, s. 123–124.) Yhteydet voidaan rakentaa esimerkiksi satelliittiyhteyksillä, releoimalla ilma-aluksen kautta tai HF-radioyhteyksillä.

Yllä kuvatut radioiden toiminnallisuudet ovat löydettävissä myös meri- ja ilmavoimista sekä Puolustusvoimien yhteisiltä suorituskyvyiltä, kuten tiedustelulta ja logistiikalta tai erikoisjoukoilta. Kaikilla on omat erilaiset painotuksensa, mikä selittyy niiden toiminnan erilaisesta luonteesta: ilmavoimilla korostuvat LOS-yhteydet, ja merivoimien tulee pystyä luomaan yhteydet horisontin taakse (BLOS). Erikoisjoukkojen puolestaan tulee voida operoida lähtökohdaisesti kaikissa ympäristöissä.

3.3.1 Suojautuminen

Sotilaallinen tiedonsiirtoverkko on kompleksinen kokonaisuus, johon liittyy useita eri siirtoiteitä ja sovelluksia, kuten kuvasta 5 on havaittavissa. Kognitiivinen radiojärjestelmä ei toteutuessaan kuitenkaan tarkoita sitä, että tunnetut, tällä hetkellä käytössä olevat rakenteet puretaan. Jatkossakin tulee olemaan tarvetta eritasoisille ja -kokoisille viestikeskuksille tai solmuille, joiden kokoonpano riippuu operatiivisista vaatimuksesta (vaatimukset suojalle, liikelle, yhteyksien määrälle ja kapasiteetille sekä henkilöstö- ja materiaalikokoonpanoille) sekä oletetusta uhkakuvasta.

Yllä kuvatun maavoimien tiedonsiirtoverkon voidaan katsoa olevan rakenteeltaan *wireless mesh network* (ks. myös luku 3.1.7), jossa runko muodostuu paikallisista verkoista joko rakenteettomasti tai tukiasemiin tukeutuen – riippuen tarpeesta ja järjestelmien yhteensopivuudesta. Nämä solut on liitetty yhdyskäytävillä, jotka voivat olla sekä langattomia että kaapelilyhteyksiä. Yhteydet voidaan reitittää dynaamisesti kaikkia tarjolla olevia reittejä pitkin valitsevan tilanteen mukaisesti.

Liitteessä 5 olevassa taulukossa 2 tarkastellaan tässä luvussa esitettyjä kognitiivisia ominaisuuksia ja niiden vaikutuksia sotilaallisessa toimintaympäristössä. Sotilaallista ympäristöstä kuvataan yleisten elektronisen tiedustelun ja häirinnän väistössä käytetyin metodein osin lähteen Kosola ym. 2004 (s. 132) mukaisesti, osin lisäten asiakokonaisuuksia, joita on painotettu elektronisen suojautumisen koulutuksessa Viestirykmentin ELSO-koulutuskeskuksessa ja sen edeltäjässä 2. Viestikompaniassa. Taulukolla 2 kuvataan, miten mikin kognitiivinen ominaisuus vaikuttaa toteutuessaan eri suojautumisen menetelmiin.

Taulukosta 2 nähdään, että kognitiivisilla ominaisuuksilla on vaikutuksensa jokaiselle elektronisen suojautumisen osa-alueelle, mitä on kuvattu liitteen 5 taulukon 2 sarakkeissa. Johtopäätöksenä voidaan todeta, että kognitiivisilla ominaisuuksilla tulee olemaan merkittävä vaikutus viestitaktiseen ajatteluun sekä järjestelmien käyttöön ja kehitykseen. Merkittävää on, että monet ominaisuudet vaikuttavat useisiin eri suojautumisen keinoihin, mutta myös toisilleen vastakkaisella tavalla. Esimerkiksi siirryttäessä laajakaistaisiin aaltomuotoihin havaittavuus tyypillisesti paranee, jos vastustajalla on kehittynyt tiedustelujärjestelmä: yhteen lähteeseen saadaan jopa satoja suuntia ja aiempaa laajemmalla taajuusalueella, jolloin suuntimistarkkuus paranee useamman mittaustuloksen perusteella ja häiriöt siirtotiellä keskiarvoistuvat. Lisäksi kognitiiviset ominaisuudet avaavat uudenlaisia mahdollisuuksia suojautua, DSA esimerkiksi mahdollistaa dynaamisesti erilaisten häiriöiden hyväksikäytön niin kutsutussa maskaamisessa, jossa hyötylähetteet pyritään ”piilottamaan” häiriölähteiden taakse.

Oma pohdinnan aiheensa on, kummasta näkökulmasta kognitiivinen radio ohjelmoidaan: elektronisen suojautumisen vai tietoliikenteen optimoinnin kannalta. Lopputulos on hyvin erilainen sen mukaan, kumpi valitaan. Suojautumisen näkökulmasta radiotien liikenne pitäisi minimoida ja pyrkiä käyttämään matalia tehoja, suunta-antenneja ja mahdollisesti korkeita taajuuksia. Tietoliikenteen optimoinnin kannalta voidaan johtajatuksiksi valita esimerkiksi suurin tiedonsiirtokapasiteetti. Lähtökohtatilanteessa verkkojen toimintatavat saattavat olla hyvinkin samanlaiset, ja tietoliikenne suuntautuu nopeisiin langallisiin yhteyksiin. Tilanteiden muuttuessa, esimerkiksi kaapeliyhteyksien katketessa, painotusten erot korostuvat ja lopputulos kognitiivisten radioiden toiminnassa voivat olla merkittävästi erilaiset: Suojautumisen kannalta optimaaliseksi ohjelmoitu kognitiivinen radio voi käyttää lyhyitä yhteyksiä korkeilla taajuuksilla, mutta todellinen tiedonsiirtonopeus laskee tällöin merkittävästi, koska tietoliikenne joudutaan reitittämään usean solmun yli. Toisaalta verkko on tässä tapauksessa ollut vaikeampi havaita ja häiritä. Tietoliikenteen optimoinnin kannalta ohjelmoitu kognitiivinen radio puolestaan käyttää suurempia tehoja ja suurempaa reititystä. Datansiirtonopeus on tällöin suurempi, mutta riski paljastumiselle ja häirinnän kohteeksi joutumiselle on kasvanut. Minkälaiseen ratkaisuun kognitiivisten radioiden käytössä päädytään, riippuu käytännössä siitä, mikä on operatiivinen tilanne ja minkä päätöksen komentaja tekee.

Radiojärjestelmissä kognitiivisuuden merkitys ja siitä saatavat edut ovat sitä suuremmat mitä laajempi systeemi on kyseessä. Kognitiivinen radio pystyy optimoimaan toimintansa kokonaisvaltaisesti, kun sillä on käytössään enemmän vaihtoehtoja. Vaihtoehtojen määrä voidaan kuvata kognitiivisten osien tulona, jossa yhden osan voi muodostaa esimerkiksi antenni-

järjestelmä, seuraavan osan taajuusalue, seuraavan aaltomuoto ja niin edelleen. Kognitiivisuuden myötä perinteinen ajatus radioverkoista katoaa: enää ei muodosteta tai ei ole tarvetta muodostaa jokaiselle toiminnolle omaa verkkoa omine taajuuksineen. Sen sijaan pyritään tilanteeseen, jossa verkon toiminnallisuutta ei eritellä sen kattavuuden tai yhteysetäisyyden perusteella. Tilanteen mukaan voidaan sen sijaan valita paras vaihtoehto tai käyttää samanaikaisesti useita eri vaihtoehtoja viestin läpimenon varmentamiseksi. Ei siis olisi lainkaan mahdollonta, että kognitiivinen radio lähettäisi tulikomennon 5 kilometrin päähän HF:llä tai että tiedusteluraportti pääesikuntaan reitittyisi ylä-UHF:llä – eli juuri päinvastoin, kuin on totuttu ajattelemaan. Määrävinä tekijöinä yhteyden muodostukselle olisivat tällöin yhteyksille asetetut vaatimukset (mm. yhteyksien tärkeysjärjestys, kapasiteetti, vasteaika), järjestelmän konfiguraatio ja vallitseva tilanne.

Tavoitteena tulevaisuuden tiedonsiirtoverkoissa on, että loppukäyttäjän ei tarvitse itse tietää, miten viesti reitittyy vastaanottajalle. Kognitiivinen radio ohjelmoidaan toimimaan siten, että haluttu loppuasetelma toteutuu. Eri käyttäjillä on käytössään erilainen tietoliikennesurssi riippuen siitä, mikä on tehtävän hoitajan edellyttämä tarve. Käyttäjän kannalta kyseessä olisi 0-konfiguraatiomalli. Siinä järjestelmä ohjelmoidaan toimimaan tehtävän mukaan oikealla tavalla siten, että se huomioi muun muassa päätelaitteen kantajan tehtävän vaatimukset (esim. komppanian päällikkö verrattuna ryhmänjohtajaan; asetukset, prioriteetit ja vaihtoehdot ovat erilaiset), operaationvaiheen mukaiset emissiokontrollitasot ja toisaalta tavat ohittaa emissiokontrolli pakottavissa tilanteissa. Mikäli kaikkiin käyttäjiin on yhteys verkon kautta, voidaan EMCON-tasojä hallita myös keskitetysti esimerkiksi radioresurssien hallinnalla (RRM).

3.3.2 Uhkat

Petteri Kuosmanen on vuoden 2004 yleisesikuntaupseerikurssin diplomityössään (Kuosmanen 2004) tutkinut taktisten ad hoc -verkkojen eli rakenteettomien verkkojen toteuttamismahdollisuuksia sotilaallisessa toimintaympäristössä. Kuosmanen on tutkinut neljää maantieteellisesti eri tavalla jakautunutta ad hoc -verkkoa, jotka vastaavat periaatteiltaan s. 32 – 33 esitettyä maavoimien tiedonsiirtoverkkoa, vaikka ne onkin valittu eri lähtökohdista. Yhtenä osana diplomityötään Kuosmanen loi taistelukestävyyden viitemallin vastaamaan tietoverkkoihin kohdistuvan uhkan arviointitarpeisiin. Viitemallissa kuvataan kolme vaikuttamisen mekanismia tietoverkkoihin: fyysinen vaikuttaminen, sähkömagneettinen vaikuttaminen ja binäärinen vaikuttaminen, joka nykyään liitetään kybersodankäyntiin. (Kuosmanen 2004, s. 26.)

Tulevaisuudessa vaikuttamisen rajoitteena tullevat käytännössä olemaan tiedustelutietojen saatavuus sekä ymmärrys järjestelmistä: mihin osaan kannattaa vaikuttaa milläkin aseella, mitkä ovat halutut vaikutukset, miten vaikutukseen päästään, syntyykö sivuvaikutuksia (*collateral damage*) ja mikä on vaikutuksen kesto (Puolustusvoimien vaikuttaminen 2013). Vaikuttaminen suunnitellaan ja toimeenpannaan maalittamisen prosessin mukaisesti (Puolustusvoimien vaikuttaminen 2013, s 18). Maalittamisella (maalittamisen prosessilla) pyritään toisin sanoen vastaamaan edellä esitettyihin kysymyksiin.

Fyysinen uhka

Fyysinen tuhoaminen on edelleen yksi merkittävimmistä radion ja radioverkon uhkista. Fyysisen tuhoamisen mahdollisuus on huomioitu viimeisimmissä kyberuhkamalleissakin, joissa se on otettu mukaan perinteisten kyberuhkamallien jatkeeksi, erityisesti kun tarkastellaan taktisten verkkojen kyberuhkaa (Kärkkäinen 2013, s. 39–40). Kuosmanen tutkimuksessa fyysisen vaikuttamisen mekanismin keskeisiä johtopäätöksiä oli, että vaikuttamalla verkon kannalta kriittisiin solmuihin tai verkon suorituskyvyn kannalta kriittisiin kohteisiin päästään hyökkääjän kannalta parhaaseen vaikutukseen. Ad-hoc -verkoissa kriittisiksi pisteiksi muodostuivat liittymäpisteet. (Kuosmanen 2004, s. 132.) Näin tulee edelleenkin olemaan myös kognitiivisen radion tapauksessa: Radioiden (myös kognitiivisten) muodostama taktisen tason verkko liitetään joistakin pisteistä tiedonsiirroltaan nopeampaan liittymä- tai runkoverkkoon (Korkiamäki 2013, s. 7). Ratkaisevaa on, monestako pisteestä tulevaisuuden verkko liitetään liittymä- tai runkoverkkoon ja muodostuuko näistä pisteistä kriittisiä esimerkiksi vähäisen lukumäärän vuoksi⁸.

Toinen merkittävä tapa vaikuttaa tietoverkkoihin on kohdistaa vaikutus palvelimiin ja tietovarantoihin (esimerkiksi Kärkkäinen 2013, Kuosmanen 2004). Kuosmanen arvio vuonna 2004, että ”verkon tietovarastoja tai palvelimia ei nähdä yhtä merkittävänä maaleina [kuin liittymäpisteitä] hyökkääjän kannalta, koska niiden toiminnallisuus on helpommin hajautettavissa ja siten myös niiden paikallistaminen on vaikeampaa” (Kuosmanen 2004, s. 132). Sekä toiminnallisuuden hajauttaminen että tietovarantojen paikantaminen on edelleen vaikeaa, mutta niiden merkitys kognitiivisissa verkoissa on merkittävästi suurempi kuin perinteisissä verkoissa. Siksi myös todennäköisyys joutua maalittamisen kohteeksi voidaan nykyään arvioida suuremmaksi kuin yli kymmenen vuotta sitten. Toisaalta kognitiivisuus tuo mahdollisuuksia luoda uusia menetelmiä hajauttamiselle (Lindén 2014). Kognitiivisella radiolla ei esimerkiksi

⁸ Myös Kuosmanen (2004, s. 133) päätyi samaan johtopäätökseen ad hoc -verkkoja koskevassa diplomityössään: ”ad hoc-verkon taistelunkestävyys perustuu pitkälti suureen yksittäisten solmujen määrään ja vähäiseen kriittisten solmujen määrään. Tämä ei kuitenkaan pidä paikkaansa, jos ad hoc -verkko on liitetty muihin verkkoihin vain harvoin liittymäpisteistä. Tällöin liittymäpisteistä muodostuu kriittisiä pisteitä, joiden fyysiseen tuhoamiseen hyökkääjän kannattaa panostaa”.

tarvitse olla keskitettyä tietokantaa, vaan jokaisella solmulla voi olla vain solmun itsensä tarvitsema tieto, jolloin verkon lamauttaminen muodostuu erittäin vaikeaksi. Vaikeudeksi edellisessä esimerkissä muodostuu se, miten tietojen ajantasaisuudesta varmistutaan (Lindén 2014; Prokkola 2014). Jos kohteeksi joutuminen arvioidaan yhtä todennäköiseksi kuin fyysisten solmujen tuhoaminen, nousee myös tietovarantojen ja palvelimien tuhoamisen yhdeksi merkittävimmistä uhkista kognitiivisissa radiojärjestelmissä.

Kyberuhka, häirintä ja tiedustelu

Kyberuhka määritellään tässä tutkimuksessa kyberturvallisuusstrategian mukaisesti: ”Kyberuhka tarkoittaa mahdollisuutta sellaiseen kybertoimintaympäristöön vaikuttavaan tekoon tai tapahtumaan, joka toteutuessaan vaarantaa jonkin kybertoimintaympäristöstä riippuvaisen toiminnon” (Suomen kyberturvallisuusstrategia 2013, s. 13). Sähkömagneettista uhkaa ja kyberuhkaa tarkastellaan tarkemmin liitteessä 6 olevan taulukon 3 avulla; liitteessä arvioidaan tässä luvussa esitettyjä keskeisiä kognitiivisia ominaisuuksia sähkömagneettisten ja kyberuhkien näkökulmasta. Taulukko ei ole tyhjentävä, vaan sen tarkoitus on kuvata vaikutusten suuntaa johtamisjärjestelmissä sekä tiedustelun ja vaikuttamisen järjestelmissä eri kognitiivisten ominaisuuksien kannalta. Taulukkoa voidaan lukea myös tiedustelun ja häirinnän kannalta: punaisella on kirjattu ominaisuuden arvioitu vaikutus elektronisen tiedustelun ja vaikuttamisen järjestelmiin ja sinisellä puolestaan on kirjattu kyseisen ominaisuuden vaikutus johtamisjärjestelmiin. Näin voidaan arvioida, miten kognitiivisuus vaikuttaa omiin tiedustelu- ja häirintäjärjestelmiin, jos vastustajalla on kognitiivisia ominaisuuksia johtamisjärjestelmissään.

Sähkömagneettisen uhkan konkretisoituessa perinteiset menetelmät ovat vaatineet operaattoreilta suoria fyysisiä toimenpiteitä, jotta uhkaan on voitu vastata. Näitä toimenpiteitä voivat olla tilanteesta riippuen esimerkiksi 1) häirinnän havaitseminen, 2) ilmoittaminen, 3) tehon nosto, 4) antennien uudelleen suuntaus, 5) taajuuden/moodin vaihto sekä 6) asemapaikan vaihto (Yhtymän viestiopas 2001, s. 88–90). Kognitiivisuus radiojärjestelmissä mahdollistaa uhkan ennakkoinnin, nopeuttaa ja automatisoi suojautumisen toimenpiteitä sekä poistaa osin inhimillisen tekijän. Toisaalta kognitiivisuus luo järjestelmään binäärisen logiikan, jota voi olla vaikea ennakoida erityisesti tilanteissa, joissa molemmilla osapuolilla on johtamisjärjestelmissään kognitiivisia ominaisuuksia.

Termiä binäärinen logiikka on aiemmin käytetty kyberasioiden yhteydessä (esim. Heim 1991; Porras ym. 2009). Tässä tutkimuksessa binäärisellä logiikalla tarkoitetaan tietokoneohjelmoitujen radioiden tai radiojärjestelmien toimintaa tilanteessa, jossa molemmat järjestelmät ovat

hyvin automatisoituneita. Pahimmillaan kognitiivisen radion hyödyt voivat juuri niiden automaattisuuden vuoksi kääntyä haitaksi; pitkälle viety automaattisuus voi toisin sanoen olla järjestelmän heikko kohta (Prokkola 2014; myös WINNF 2010, s. 89–96).

Jos tarkastellaan tilannetta, jossa vastakkain ovat kognitiivinen häirintäjärjestelmä ja kognitiivinen johtamisjärjestelmä, voidaan päätyä johtopäätökseen, että suorituskyvyltään parempi järjestelmä voittaa. Näin ollen esimerkiksi leveämpi käytettävissä oleva taajuuskaista tai järjestelmän suurempi hyppynopeus olisivat kilpailuetuja. Tämä on toki totta häirinnän tai johtamisjärjestelmien näkökulmasta. Mikäli tilannetta tarkastellaan tiedustelun ja maalittamisen näkökulmasta, on kuitenkin mahdollista, että molemmat järjestelmät ovat vaihtaneet lyhyen ajan sisällä suuren määrän erilaisia aaltomuotoja, häirintämoodeja ja verkkokombinaatioita. Prosessin lopputuloksena kehittynyt tiedustelujärjestelmä on voinut paikantaa ja luokitella alueella olevat verkot tai sen osat esimerkiksi päättelemällä eritasoisten solmujen (BLOS, LOS, LAN) sijaintien perusteella. Tällöin suorituskyvyn parantamiseen käytetyt resurssit voivat kääntyä järjestelmiä itseään vastaan.

Elektronisen tiedustelun kannalta kognitiivinen radio voi olla haastava. Laajeneva spektri asettaa lisävaatimuksia tiedustelujärjestelmien laajakaistaisuudelle ja suorituskyvylle. Jos kognitiivinen radio kykenee vaihtamaan aaltomuotoa ja taajuusaluetta automaattisesti ja joustavasti, se tarkoittaa sitä, että myös tiedustelujärjestelmän on voitava ilmaista ja tunnistaa muuttuvat signaalit eli sen tulee pystyä seuraamaan valittua kohdetta kaikissa tilanteissa. Eriytyisen haastavaksi tilanteet muuttuvat silloin, jos kognitiivinen radio pystyy käyttämään hyväkseen kehittyneitä aaltomuotoja ja paikkatietoja joko omien radioidensa tai vastustajan tiedustelujärjestelmän sijainnista. Tämä mahdollistaa kognitiiviselle radiolle ”taajuussuunnittelun” siten, että etäisyyksistä johtuvat signaalien ilmaisumahdollisuudet muuttuvat vastustajan tiedustelujärjestelmälle epäedullisiksi tai mahdottomiksi.

Laajeneva spektri ja joustava taajuuksien ja aaltomuotojen vaihtaminen voivat johtaa siihen, että myös tiedustelujärjestelmät tulee kehittää kognitiopohjaisiksi: tiedusteltava spektri joudutaan ilmaisemaan laajakaistaisena ja analysoimaan ohjelmallisesti. Toisaalta on huomattava, että myös itse kognitiivinen radio edellyttää toimiakseen erittäin laajakaistaista ja suorituskykyistä vastaanotinta, sillä muuten reaaliaikaisen tilannetietoisuuden luominen spektristä ei ole mahdollista. Voidaan siis arvioida, että kognitiivisen radion kehityksen myötä myös tiedustelujärjestelmät tulevat kehittymään kognitiivisen radion rinnalla.

Onnistuneen tiedusteluanalyysin jälkeen järjestelmään voidaan vaikuttaa esimerkiksi kiinteisesti. Järjestelmien kognitiivisuuden tulee koostua hyvin suunnitelluista ja testatuista kokonaisuuksista, joihin sisältyy rauhan aikana kerättyä pohjatietoa vastustajan järjestelmistä sekä oman järjestelmän rajoituksista. Pohjatietojen puolestaan tulee olla yhteen sovitettuna siten, että eri tilanteisiin valitut järjestelmän käyttötavat ovat optimoituja. Lähtökohtana ei tietenkään voi olla, että vastustajien järjestelmät tunnetaan läpikotaisin. Kognitiivisen radion tulee siis olla robusti myös ennakoimattomia tilanteita vastaan siten, ettei kognitiivisuudesta muodostu esteitä omalle toiminnalle (Prokkola 2014).

Monitasoisen verkottumisen vaatimuksena ja ohjelmistopohjaisuuden seurauksena merkittäväksi haasteeksi kognitiivisille radiojärjestelmille nousee lopulta kyberuhka kaikissa muodoissaan. Yleisimmät kyberuhkat taktisia verkkoja vastaan ovat:

- tiedon eheyden rikkomukset (*integrity violation*)
- tiedon saatavuuden estäminen (*prevention of availability*),
- luottamuksellisuuden rikkomukset (*confidentiality violation*) sekä
- fyysinen tuhoaminen (*kinetic destruction*).

Lista ei kata – eikä voi kattaa – kaikkia mahdollisia taktisen verkon kyberuhkia, koska menetelmät ja työkalut muuttuvat ja kehittyvät koko ajan (Kärkkäinen 2013, s. 39–40). Merkillepantava lisä vuoden 2013 kyberuhkien listauksessa on huomio fyysisen tuhoutumisen mahdollisuudesta myös, kun puhutaan kyberuhkista.

Elektroniseen tiedusteluun ja tiedustelutietojen analyysiin kognitiivisuus vaikuttaa merkittävästi:

- 1) WMN-verkkojen (*wireless mesh network*, ks. luku 3.1.7) myötä verkkorakenteet häviävät tai ohenevat, koska viestien reititys ei ole kognitiivisessa radiojärjestelmässä taajuus- tai järjestelmäriippuvaista.
- 2) Taajuusdedikoidut järjestelmät vähenevät tai poistuvat (esimerkiksi MeriVHF, Ilmailukaisat, kenttäradiotaajuusalueet), jolloin kohteiden tunnistaminen taajuustiedon perusteella vaikeutuu.
- 3) Tiedusteltava spektri laajenee ja spektrin käyttöaste voi kasvaa. Ylemmillä taajuusalueilla signaalien paikallisuus korostuu, ja tilannetietoisuuden myötä spektrin alueellinen käytettävyys paranee. Ilmasta tehtävälle signaalitiedustelulle kehityssuunta on haaste: tiedustelualueet ovat satoja kilometrejä halkaisijaltaan, jolloin päällekkäisiltä signaaleilta ei voida välttyä.
- 4) Signaalikirjastojen ja tietokantojen merkitys tulee todennäköisesti kasvamaan. Yhä useammat järjestelmät tarvitset tiedustelun tuottamia pohjatietoja järjestelmiinsä.

- a) Signaalikirjastojen käytettävyys kasvaa edelleen, mikäli kontrollikanavien tai pilottikanavien käyttö lisääntyy.
- b) Kontrollikanavat ovat rauhan aikaisen tiedustelun kohteena. Kanavien käyttö ja niiden rakenne tulee suunnitella tarkkaan, ja osa kontrollikanavien parametreista tulee jättää vain poikkeusolojen käyttöön.

3.4 Taajuushallinta

Taajuussuunnittelusta vastaa kansallisella tasolla Viestintävirasto. Viestintävirasto jakaa taajuuksia ja taajuusalueita tarpeen ja käyttötarkoitusten mukaisesti. Taajuuksista muodostetaan taajuusjakotaulukko, jolla taajuuksien hallinta toteutetaan (Viestintävirasto, Taajuusjakotaulukko 2013.) Viestintävirasto kerää yrityksiltä, yhteisöiltä ja muilta viranomaisilta, kuten Puolustusvoimilta, tiedon radiotaajuuksien käyttötarpeista ja muodostaa kansallisen näkemyksen taajuuksien käyttöperiaatteista. Näiden mukaisesti Viestintävirasto pyrkii vaikuttamaan kansainväliseen päätöksentekoon. (Viestintävirasto, Taajuussuunnittelu 2013).

Ylin radiotaajuuksia säätelevä kansainvälinen toimija on Yhdistyneiden Kansakuntien (YK) alaisen järjestön ITU:n (International Telecommunication Union) järjestämä radioviestintäkonferenssi, WRC (World Radiocommunication Conference), joka pidetään noin kolmen vuoden välein. Konferenssin päätöksillä on suoraan vaikutuksia siihen, millaisia spektriä hyväksikäytettäviä laitteita tai palveluita ryhdytään valmistamaan. (Viestintävirasto, Taajuussuunnittelu 2013.)

Euroopassa taajuuksien suunnittelusta, kuten myös WRC-valmisteluista, vastaa CEPT (The European Conference of Postal and Telecommunication Administrations). Kansallisella valmistelulla, Viestintäviraston johtamana ja CEPT:n päätösten pohjalta, syntyy Suomen kansallinen taajuuksien käyttösuunnitelma. Taajuuksienkäyttösuunnitelma annetaan radiotaajuuksimääräyksenä nro 4, jonka liitteenä on taajuusjakotaulukko (Viestintävirasto, Taajuusjakotaulukko 2013). Taajuusjakotaulukossa on kuvattu, mihin tarkoitukseen mikäkin taajuuskaista on tarkoitettu sekä millaisia rajoituksia ja oikeuksia niiden käyttöön liittyy. (Viestintävirasto, Taajuussuunnittelu 2015.)

3.5 Johtopäätökset

Kognitiiviset ominaisuudet limittyvät toisiinsa monilla eri tasoilla. Optimaalisen lopputuloksen saavuttamiseksi tulisi dynaamista spektrin hyväksikäyttöä, linkin muodostusta, radiore-surssinhallintaa, moniantennijärjestelmiä ja verkonmuodostusta käsitellä yhdessä eikä erikseen, kuten vielä tapahtuu (Prokkola 2014). Termistökin on vielä vakiintumatonta, ja samoista asioista puhutaan eri lähteissä eri termeillä.

Eniten huomiota tieteellisissä tutkimuksissa ovat saaneet osakseen dynaaminen spektrin hyväksikäyttö (DSA) sekä moniantennijärjestelmät. DSA on sotilaallisessa käyttöympäristössä yhdessä moniantennijärjestelmien kanssa yksi radiojärjestelmien avainominaisuuksista. Yhdistämällä DSA:n spektrin hyväksikäyttömötödit (spektrin havainnointi, tietokannat, kontrollikanavat) on mahdollista luoda hyvin toimiva ja taistelunkestävä järjestelmä. Kontrollikanavien käyttöä sotilasjärjestelmissä on epäilty niiden aiheuttaman tiedustelu-uhan vuoksi (Tuukkanen ym. 2013, s. 8). Huoli on aiheellinen erityisesti, jos kontrollikanavien taajuusallokoinnissa tai koodauksessa käytetään standardoituja metodeja. Tämä johtuu siitä, että julkisesti standardoidut kontrollikanavat luovat sotilaallisessa käyttöympäristössä avoimuutensa vuoksi järjestelmälle merkittävän uhan. Sotilassovellukset edellyttävät lähtökohtaisesti omia, mieluiten kansallisia, ratkaisuja tärkeimmissä johtamisjärjestelmissä.

Sotilaallisessa ympäristössä moniantennijärjestelmiä (SIMO, MISO, MIMO) ei tule nähdä yhden taajuusalueen ratkaisuna vaan kokonaisjärjestelmänä, jossa eri taajuusalueen antennit muodostavat antennikokonaisuuden. Taistelunkestävyyttä ja järjestelmän toimintavarmuutta voidaan siis lisätä käyttämällä hyväksi kognitiivisia ominaisuuksia myös antennissa.

Älykäs verkonmuodostus ja siihen liittyvät ominaisuudet, kuten SON ja RBR, tuovat mukanaan aivan uudenlaisen mahdollisuuden hallita tiedonsiirtojärjestelmiä. Kognitiivisen radion toteutuessa näiden työkalujen avulla on mahdollista laatia yhtymän tai laajemman organisaation nykyiset johtamisjärjestelmäkäskyt tai erikoismääräykset suoraan kognitiivisen järjestelmän suoritettavaksi. Toisaalta suunnittelun ja valvonnan osuus kasvaa toimeenpanon nopeutuessa.

Kognitiivisten ominaisuuksien optimaalinen käyttö edellyttää laajaa spektrin käyttöä – ja huomattavasti paljon laajempaa, kuin mihin on perinteisissä taajuusjakokäytännöissä totuttu. Yhdysvalloissa taajuushallinnasta vastaavalla viranomaisella FCC:llä on konkreettinen suunnitelma kognitiivisten radioiden käytön mahdollistaville taajuuden säätelymuutoksille, joiden

tavoitteena on laajentaa spektrin käyttömahdollisuuksia kokonaisvaltaisesti ja joustavasti (FCC, The National Broadband Plan). NATOssa puolestaan spektrin avaaminen kognitiivisille sovelluksille on takalukossa, eikä tarvittavia päätöksiä ole kyetty tekemään (Scheers 2013). Suomessa spektri on avattu testikäyttöön taajuusalueella 470–790 MHz (Liikenne- ja viestintäministeriö, Communications Policy Program for Elektronic Media 2012, s. 73).

Maavoimien tiedonsiirtoverkon kaikkien osien ei tarvitse olla kognitiivisia. Verkot voidaan rakentaa myös osittain kognitiivisiksi, jolloin seuraavat ratkaisut ovat mahdollisia:

- 1) Jokin osa verkosta koostuu kognitiivisesta radiojärjestelmästä osan jäädessä perinteisten radioiden varaan. Yhteensovittaminen voidaan tehdä sovellustasolla tai erillisten yhdyskäytävien kautta.
- 2) Radiojärjestelmillä on vain osia kognitiivisista ominaisuuksista. Todennäköisesti kaikkia tässä tutkimuksessa esitettyjä ominaisuuksia ei tulla näkemään vuosiin sotilaskäyttöön suunnitelluissa kognitiivisissa radiojärjestelmissä. DSA:n toiminnallisuudet ovat ominaisuuksista todennäköisimpiä, ja mikäli käytössä on ohjelmistoradioita, voidaan tulla näkemään kehittyntä adaptiivisuutta ja jopa aaltomuotojen vaihtamista.

Kognitiivisuus ei rajoita solmun tai verkon kokoa vaan päinvastoin. Solmussa, viestikeskuksessa tai verkossa olevat eri järjestelmät tai niiden puute vaikuttavat karkeasti n kertaa kognitiivisen radiojärjestelmän mahdollisuuksiin välittää viesti vastaanottajalle ($n =$ vaihtoehtojen määrä ja $n \neq 0$).

Kognitiivisuus muuttaa perinteisten sähkömagneettisten uhkien luonnetta. Tietovarantoihin kohdistuvan fyysisen vaikuttamisen todennäköisyys vaihtelee sen mukaan, millaiseksi niiden merkitys eri järjestelmille arvioidaan. Tietojärjestelmiin kohdistuvan uhkan arvioinnin tulee perustua maalittamisen prosessiin sekä sen painotuksiin ja arvioihin saavutettavissa olevasta vaikutuksesta. Arvioitaessa uhkaa omia järjestelmiä kohtaan näkökulman tulisi siis olla vastustajalähtöinen: mikä on vastustajan kyky tiedusteluun, mitkä ovat vastustajan vaikutusmahdollisuudet ja mitkä ovat vastustajan toimintatavat. Näiden tekijöiden kautta päästään arvioimaan, mikä on uhkan vaikutus ja vaikutuksen todennäköisyys omiin järjestelmiin.

Kognitiiviset ominaisuudet vaikuttavat elektronisen tiedustelun ja vaikuttamisen toteutukseen. Se, mihin loppuasetelmaan päädytään, riippuu siitä, kuinka paljon eri ominaisuuksia itsellä on käytössä ja toisaalta siitä, mikä on vastustajan järjestelmän suorituskyky. Asetelma on tuttu jo vuosikymmenien ajalta; kilpajuoksu järjestelmien kehityksen ja vastatoimien välillä jatkuu. Voidaan kuitenkin ennakoida, että häirintäjärjestelmien käytössä kognitiivista radiota vastaan

on tulossa selkeä muutos. Mikäli häirintäjärjestelmän suorituskyky riittää estämään kognitiivisen radion liikennöinnin operatiivisesti tarkoituksenmukaisilta etäisyyksiltä, tehtävä tulee luonnollisesti säilymään. Perinteisen häirintätehtävän lisäksi häirintäjärjestelmälle voidaan suunnitella tehtäviä, joita voidaan kutsua esimerkiksi toisiotehtäviksi.

Toisiotehtävien tarkoituksena ei ole häiritä vastustajan radiojärjestelmiä vaan luoda edellytyksiä esimerkiksi kognitiivisen radion tai tiedustelujärjestelmän toiminnalle. Toisiotehtäviä voisi olla esimerkiksi 1) aiemmin mainittujen spektrin aukkojen (*white space*) luominen ”varaamalla” taajuusresurssia oman kognitiivisen radion käyttöön ja vapauttamalla sitä tarpeen mukaan tai 2) kognitiiviseen radioon kohdistuva häirintä, jolla pyritään saamaan kognitiivinen radio avaamaan lisää resurssejaan. Toiminnan tarkoituksena on saada lisättyä esimerkiksi kontrollikanavaliikennettä tai saada kognitiivinen radio käyttämään lisää solmuja, jotta tiedustelujärjestelmällä päästään tarkempaan tilannekuvaan. 3) Häirintäjärjestelmällä voidaan myös pyrkiä ohjaamaan vastustajaa käyttämään jotakin tiettyä järjestelmää, joka on oman joukon toiminnalle edullinen. Esimerkiksi tiedustelulle eri järjestelmien informaatioarvo ei ole yhtenevä.

Kyberuhkat muodostavat laajan ja merkittävän uhkan kognitiivisille radiojärjestelmille. Mahdollisuuksia on kontrolliliikenteen sieppauksesta aina järjestelmän tietojen varastamiseen. Kehittyneellä haittaohjelmalla on teoriassa mahdollista ohjelmoida johtamisjärjestelmä lähettämään tietonsa omalla radiollaan ulkopuoliselle toimijalle, joka voi toimia toisen valtion alueelta. On mahdollista, että onnistuneella kyberoperaatiolla tietokannat voidaan tyhjentää ja solmut maalittaa tuhoamista varten.

Laajeneva spektri sekä kyky joustaviin taajuuksien ja aaltomuotojen vaihdoksiin tulee olemaan haaste elektronisille tiedustelujärjestelmille. Tiedustelujärjestelmät tulevat hyötymään kognitiivisista ominaisuuksista välillisesti vastaanotinten kehityksen ja myös tiedustelun omien johtamisjärjestelmien paranemisen kautta. Vastaanotinten ja tiedonkäsittelyn osalta korkean suorituskyvyn omaavat, osittain manuaaliset tiedustelujärjestelmät, joilla pystytään tehokkaasti myös signaalianalyysiin, eivät tule poistumaan kognitiivisen kehityksen seurauksena. Edelleen tulee olla ihmisten ohjaamina järjestelmiä, jotka kertovat loogiset päättelyketjut muille järjestelmille. Tullee siis olemaan ESM-tyyppisiä automatisoituja valvontajärjestelmiä (tällaisesta esimerkki on RL-2000-järjestelmä), jotka ohjelmoidaan tunnistamaan erilaisia tietoliikenne- ja radioparametreja, minkä perusteella voidaan tehdä johtopäätöksiä. Näiden valvontajärjestelmien yläpuolella ravintoketjussa on kuitenkin suorituskykyisiä tiedustelujärjestelmiä, joiden tulee tuottaa riittävän paljon korkealaatuista dataa analysoitavaksi, jotta alemman tason järjestelmiä voidaan evästää oikeilla parametritiedoilla. Signaalikirjastotuotan-

toa ja niiden toimittamista muille järjestelmille (eli evästysprosessia) ei voi automatisoida eikä ulkoistaa.

Häirintä on rajallinen resurssi. Jotta kognitiivinen radio osaisi toimia häirintää vastaan oikein, sen tulisi tietää, milloin on kyseessä häirintä ja milloin häiriö. Häirinnän ja häiriön vaikutukset radiojärjestelmiin voivat olla samanlaiset: molemmat saattavat estää yhteyden, vaikka toinen on tahallista toimintaa ja toinen tahatonta. Vastatoimet häirintää vastaan ovat kuitenkin merkittävästi erilaiset kuin häiriötä vastaan: Häiriö ei seuraa taajuuden- tai parametrienvaihdon perässä eikä häiriötä voi harhauttaa esimerkiksi jättämällä osa resursseista vanhoille parametreille. Optimaalisessa tilanteessa kognitiivinen radio tunnistaa ja luokittelee häirinnän oikein sekä mitoittaa vastatoimet tarkoituksenmukaisella tavalla luokittelun ja käyttäjän asetusten vaatimusten perusteella.

4. Delfoin tulokset

Tässä luvussa esitellään tutkimuksen delfoi-kierrosten 1 ja 2 tulokset. Tulokset esitellään kapaleen alaluvuissa kierroksittain. Asiantuntijaryhmät, kyselyt sekä kyselyn saatekirje, joka lähetettiin asiantuntijapanelisteille, ovat tutkimuksen liitteissä 1–4.

4.1 Delfoi 1. kierros

Delfoin ensimmäisellä kierroksella selvitettiin kognitiivisen radion tärkeimmät ominaisuudet sotilaallisessa käyttöympäristössä ja muodostettiin ominaisuuksista alustava tärkeysjärjestys. Tämän lisäksi kartoitettiin kognitiivitekniikan yleistymisen merkittävimmät esteet. Kolmantena osiona 1. kierroksella hahmoteltiin ideaalisen kognitiivisen radion olemusta innovoimalla, millainen se voisi olla tai mitä se voisi tehdä.

Kysymyssarjan ensimmäinen kohta, **kognitiivisten ominaisuuksien priorisointi**, perustuu alan keskeisen tutkimuksen pohjalta muodostettuun käsitykseen kognitiivisesta radiosta (tarkemmin luvussa 3; kierroksen kysymyssarja liitteessä 3). Priorisointi oli myös delfoin ensimmäisen kierroksen kysymyssarjan pääkysymys. Asiantuntijoiden tehtävänä oli asettaa tärkeysjärjestykseen keskeisimmät kognitiiviset ominaisuudet sekä perustella vastauksensa seuraavan tehtävänannon mukaisesti: *Mitkä seuraavista kognitiivisista ominaisuuksista ovat mielestäsi tärkeimmät, kun puhutaan radion käytöstä sotilaallisessa käyttöympäristössä?* Seitsemän valmiiksi annetun ominaisuuden lisäksi asiantuntijoilla oli mahdollisuus lisätä listaan myös muita olennaisiksi katsomiaan kognitiivisia ominaisuuksia ja asettaa ne sitten osaksi muodostamaansa tärkeysjärjestystä. Kolme vastaajista myös käytti tätä mahdollisuutta. Kunkin valmiiksi tarjotun ominaisuuden lyhyt määritelmä annettiin vastaajille liitteenä kysymyssarjan lopussa. Myös määritelmiä oli mahdollista kommentoida tai tarkentaa tapauskohtaisesti.

Kysymyssarjan toinen kysymys koski **kognitiivitekniikan tai kognitiivisen radion yleistymisen esteitä**. Kysymys oli avoin kysymys, ja sillä pyrittiin kartoittamaan asiantuntijoiden näkemykset mahdollisista esteistä tai hidasteista laaja-alaisesti rajoittaen kysymys kuitenkin ainoastaan puolustusvoimalliseen näkökulmaan (*Mitkä ovat mielestäsi merkittävimmät esteet kognitiivitekniikan sekä kognitiivisen radion käyttöönotolle puolustusvoimien näkökulmasta?*).

Myös kolmas kysymys oli avoin kysymys ja koski **ideaalista kognitiivista radiota**: *Kuvaa ideaalinen kognitiivinen radio ja kerro, mitä ominaisuuksia siihen kuuluu*. Asiantuntijoita pyydettiin määrittelemään omasta näkökulmastaan ja kokemuserästään ideaalinen kognitiivinen radio, jota ei siis ainakaan toistaiseksi ole olemassa.

Ensimmäisen kierroksen kysymyksiin vastasi 11 asiantuntijaa. Yksi vastaus oli puutteellisuuden vuoksi hylättävä, joten lopulta 10 vastausta voitiin käyttää tässä tutkimuksessa tehtävään analyysiin. Vastaajista 3 edusti operatiivista vastaajaryhmää, 3 tutkijaryhmää, 4 teollisuusryhmää ja yksi regulaatiota. Kun vastaajien kaksoisroolit otetaan huomioon, operatiivista vastaajaryhmää edusti kuitenkin 6 vastaajista ja tutkimusta 4 vastaajaa.

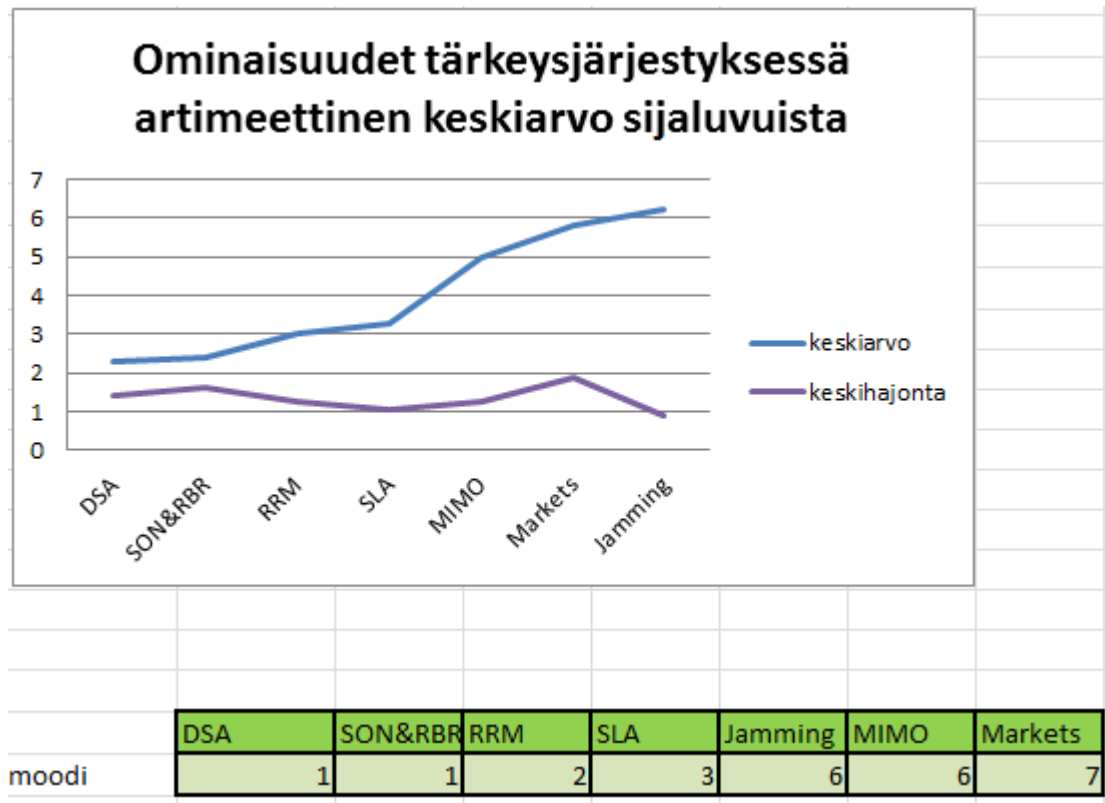
4.1.1 Puolustusvoimien kannalta keskeisimmät kognitiiviset ominaisuudet

Matemaattiset tunnusluvut ja niiden tulkinta

Numeerisilla tunnusluvuilla luotiin yleiskuva siitä, miten kognitiiviset ominaisuudet sijoittuvat keskenään asiantuntijoiden arvioissa. Tärkeysjärjestys laskettiin sijaluvuista aritmeettisella keskiarvolla sekä sijalukujen tyypillisimmän arvon (moodin) avulla (ks. luku 2.4, s. 20–21). Vastausten yhteneväisyyttä arvioitiin laskemalla erikseen Cronbachin (alfa) reliabiliteettikerroin. Yksiselitteistä raja-arvoa Cronbachin alfalle ei ole määritetty, mutta mikäli kertoimen arvo on yli 0,7, vastauksia voidaan pitää pitkälti yhtenevinä (Heikkilä 2005, 187).

Panelistien vastausten perusteella laskettu ominaisuuksien järjestyksen suuntaa-antava keskiarvo ja vastausten keskihajonta on esitetty seuraavassa kuvassa 6. Kuvassa olevien lyhenteiden tarkenteet ja määritelmät on esitetty 1. kierroksen kyselysarjan lopussa liitteessä 3 ja tutkimuksen luvussa 3.

Sijalukujen keskiarvon perusteella kognitiivisten ominaisuuksien tärkeysjärjestys muodostuu kuvan 6 mukaiseksi: 1. dynaaminen spektrin hyväksikäyttö, 2. älykäs verkonmuodostus, 3. radioresurssien hallinta, 4. yhteyksien adaptiivisuus, 5. älykkäät antennit, 6. toimivat spektrimarkkinat ja 7. kognitiiviset häirintäjärjestelmät.



Kuva 6: Aritmeettinen keskiarvo sijaluvuista sekä vastausten moodi

Mitä pienempi sijaluku on, sitä tärkeämmäksi asiantuntijat ovat ominaisuuden arvioineet.

Vastausten moodi eli kyselyaineiston vastausten (sijalukujen) tyypillisin arvo antaa lähes yhtenevän tuloksen. Ainoastaan kognitiiviset häirintäjärjestelmien sijaluku muuttuu näin tarkasteltuna viimeiseltä paikalta toiseksi viimeiseksi. Moodin muutos on selitettävissä spektrimarkkinoiden vastausten korkeammalla keskihajonnalla: spektrimarkkinat saivat järjestysluokarvoja välillä 2–7, ja eniten siis arvoja 7, mutta keskiarvoksi muutettuna korkeammat järjestysluokarvot nostavat sen häirintäjärjestelmien edelle.

Vastaukset olivat pitkälti yhtenevät eri vastaajaryhmien kesken (taulukko 4 seuraavalla sivulla). Operatiivisen roolin ja tutkijaroolin vastaukset olivat yhtenevät keskiarvojen ja moodien perusteella laskettuna. Operatiivisen roolin vastaukset muodostivat seuraavan tärkeysjärjestyksen: 1. dynaaminen spektrin hallinta, 2. älykäs verkonmuodostus sekä 3. radioresurssien hallinta ja yhteyksien adaptiivisuus. Tutkijan roolissa vastanneet painottivat dynaamisen spektrin hyväksikäytön ja älykkään verkonmuodostuksen samanarvoisiksi ja samalla tärkeimmiksi (ka 2.25 molemmissa), kun kolmanneksi tärkeimmäksi oli arvioitu yhteyksien adaptiivisuus.

Taulukko 4: Vastaajaryhmittäin eriteltyt vastaukset ja vastausten keskiarvot

DSA = dynaaminen spektrin hyväksikäyttö, SON & RBR = älykäs verkonmuodostus, Jamming = kognitiiviset häirintäjärjestelmät, MIMO = älykkäät antennit, RRM = radioresurssien hallinta, SLA = yhteysien adaptiivisuus, Markets = toimivat spektrimarkkinat. Korkeimmat arvot on ympyröity.

Taustatie	TaustaID	DSA	SON&RBR	Jamming	MIMO	RRM	SLA	Markets
TUT	1	3	1	4	6	5	2	7
REG	2	4	5	6	2	1	3	7
TEOL	3	4	1	7	6	2	3	5
OP	4	1	2	6	5	4	3	7
TEOL	3	1	2	7	6	4	5	3
TEOL	3	4	1	6	5	3	2	7
TUT	1	1	5	6	4	2	3	7
TEOL	3	3	1	7	6	4	5	2
OP	4	1	2	6	5	3	4	7
OP	4	1	4	7	5	2	3	6
OP	4	3	1	4	6	5	2	7
OP	4	4	1	7	6	2	3	5
OP	4	1	2	7	6	4	5	3
TUT	1	4	1	6	5	3	2	7
TUT	1	1	2	6	5	3	4	7
TUT	1	2,25	2,25	5,5	5	3,25	2,75	7
REG	2	4	5	6	2	1	3	7
TEOL	3	3	1,25	6,75	5,75	3,25	3,75	4,25
OP	4	1,833333	2	6,166667	5,5	3,333333	3,333333	5,833333

Teollisuuden vastaajaryhmässä älykäs verkonmuodostus painottui matemaattisessa tarkastelussa dynaamisen spektrin hyväksikäytön (DSA) edelle. Teollisuuden näkökulmasta tärkeysjärjestys kolmen ensimmäisen ominaisuuden osalta oli 1. älykäsverkon muodostus, 2. dynaaminen spektrin hyväksikäyttö ja 3. radioresurssien hallinta. Regulaation edustajan vastaaja arvioi kärkisijalle radioresurssien hallinnan, toiselle älykkäät antennit ja kolmannelle yhteysien adaptiivisuuden. Tässä asiantuntijaryhmässä saatiin lopulta tosin siis vain yksi vastaus, mikä luonnollisesti estää laajamittaisten yleistysten tekemisen.

Koko vastaajaryhmän aineistosta laskettiin erillinen korrelaatioarvo, niin kutsuttu Cronbachin alfa-kerroin, jolla voidaan arvioida vastausten yhteneväisyyttä (konsistenssia osana reliabiliteetin arviointia). Cronbachin alfa-kerroin mukaan vastaukset ovat yhdenmukaisia, kun laskettu kerroin on suurempi kuin 0.7. Vastausten näennäisestä hajonnasta huolimatta Cronbachin alfa-kerroin arvoksi tuli tässä tutkimuksessa 0.91, jota voidaan pitää erittäin korkeana korrelaatiolukuna. Asiantuntijat siis arvottivat annettuja kognitiivisen radion ominaisuuksia keskenään pitkälti samalla tavalla siitäkin huolimatta, että osa vastaajista piti kompleksisen kokonaisuuden yksittäisten piirteiden arviointia haastavana tehtävänä. Asiantuntijoiden esittämiä varauksia käsitellään sanallisten perusteluiden esittelyn yhteydessä seuraavissa kappaleissa.

Sanalliset perustelut ja niiden analyysi

Kognitiivisen radion ominaisuuksien asettaminen tärkeysjärjestyksen osoittautui ennakoidulla tavalla haastavaksi tehtäväksi: pakotettu priorisointi antaa kiinnostavaa ja suuntaa-antavaa tietoa asiantuntijoiden näkemyksistä mutta jättää myös runsaasti varauksia. Olennaisen osan vastauksista ja siten ensimmäisen delfoi-kierroksen tutkimusaineistosta muodostavatkin tärkeysjärjestyksen arviointiin liitetyt avointen vastausten argumentit eli panelistien varsin syväälliset perustelut.

Osa vastauksista perustui varmasti tutkimusajankohtaan kiinnittyvään realismiin. Näitä vastauksia ohjasi ennen kaikkea käsitys siitä, mikä tekniikka ylipäättään arvioitiin mahdolliseksi toteuttaa lähitulevaisuudessa. Osassa vastauksissa näkökulma taas oli lähes puhtaasti poikkeusolojen tarpeissa. Kaikki vastaukset olivat kuitenkin hyvin perusteltuja ja toivat merkittävän lisäarvon analyysille: olennaiseksi ei muodostunut vastaajan edustama asiantuntijaryhmä vaan perustelut, joita vastaajat olivat vastauksilleen antaneet. Eräs teollisuutta edustanut vastaaja kiteytti varauksensa osuvasti:

Esimerkki 1

”Vaikka tehtävänantona oli asettaa listalla mainitut ominaisuudet paremmuusjärjestykseen, mikä on tehty, ei jako ole kovin yksiselitteinen. Radiojärjestelmän suorituskyky ja sen taistelukestävyys muodostuu eri osa-alueista ja joku jokin niistä toimii huonosti tai puuttuu, ei järjestelmä voi toimia parhaalla mahdollisella tavalla. Vastaavasti, jos yksi ominaisuus on erinomaisen korkealla tasolla ja muut keskinkertaisia, suorituskyky jää keskinkertaiselle tasolle”

Toisin sanoen kokonaisuus ratkaisee, mutta myös se, miten eri ominaisuudet linkittyvät toisiinsa. Esimerkki on kuvaava, sillä lähes kaikkien vastausten perusteluista on löydettävissä sama analogia.

Numeeristen arvojen ja perustelujen pohjalta tärkeysjärjestykseksi muodostuu ensimmäisen delfoi-kierroksen perusteella lopulta seuraava kärkikolmikko:

- 1) dynaaminen spektrin hyväksikäyttö (DSA)
- 2) yhteyksien adaptiivisuus ja radioresurssien hallinta (RRM ja SLA)
- 3) älykäs verkonmuodostus (SON & RBR).

Perusteluissa dynaaminen spektrin hyväksikäyttö arvotettiin lähes varauksetta ensimmäiseksi:

Esimerkki 2

”DSA kaiken sisältävänä itseoikeutettu ykkönen. Kognitiivisen verkonmuodostuksen merkitys on suuri, sillä se mahdollistaa taajuussuunnittelusta eroon pääsyn, joustavan spektrin käytön joka tuo tiedustelu- ja häirintäsuojaa sekä lisää verkon kokonaiskapasiteettia, kun taajuuksia käytetään tilanteen mukaan oikein eikä ennalta tehdyn suunnitelman mukaisesti.” – teollisuus

Esimerkki 3

”Dynaaminen spektrinhallinta on ”perinteinen” kognitiivinen ominaisuus ja tärkein suorituskykyisiä. Verkon kognitiivinen toiminta, resurssien kokonaisuoptimointi ja adaptiivisuus eri tasoilla muodostavat seuraavan kerroksen. Tämä jälkimmäinen kokonaisuus on kuitenkin monimutkaisempi, ja siinä mielessä vaativampi toteuttaa” – operatiivinen

Esimerkki 4

”Dynaaminen spektrinkäyttö on alkuperäinen kognitiiviradion päättehtävä ja etenkin sotilasympäristössä sen merkitys korostuu mahdollisen tahallisen häirinnän johdosta.” – tutkimus

Toisaalta DSA:n, adaptiivisuuden ja radioresurssinhallinnan välillä ei nähty merkittäviä eroa:

Esimerkki 5

”1–3[DSA, SLA, RRM]: Kognitiivinen radio pitää olla, jotta voidaan järkevästi toteuttaa kognitiivinen verkonmuodostus 4. [SON&RBR] Kohdat 1–3 ovat periaatteessa samanarvoisia.” – operatiivinen.

Radioresurssien hallinta ja yhteyksien adaptiivisuus yhdistettiin vastauksissakin toisiinsa (vrt. luku 3.1.3, jossa on kuvattu yhteyksien adaptiivisuuden ja radioresurssien hallinnan (SLA:n ja RRM:n yhteys):

Esimerkki 6

”Taktisen tiedonsiirtojärjestelmän tärkein ominaisuus on kyetä luotettavasti suorittamaan sille määritelty tehtävä niissä olosuhteissa, joissa järjestelmä toimii.[...] Langattoman tiedonsiirtojärjestelmän keskeinen osa-alue on sen ilmaraajapinta ja sen suorituskyky. Sotilasjärjestelmissä adaptiivisuus, kyky väistää tai sietää häiriöitä sekä kyky toimia mahdollisimman huomaamattomasti ovat usein mainittuja ominaisuuksia. Adaptiivisuuteen oleellisesti kuuluu myös RRM, radioresurssien hallinta, joka itse asiassa luo pohjan adaptiivisuudelle.” – teollisuus

DSA, yhdistetty RRM ja SLA sekä älykäs verkonmuodostus ovat sotilaalliselta kannalta merkittävä suorituskykyisiä, jota kognitiivitekniikka voi luoda. Perustelut olivat suorituskyvyn osalta lähes yhteneväisiä, ja niistä muodostui looginen kausaalisuus: **Dynaamisen spektrin hyväksikäyttö (DSA) on perusedellytys kognitiivisen radion tilannetietoisuudelle. Ei voi adaptoitua eikä voi hallita resursseja, jos ei ole tietoinen toimintaympäristöstään. Ra-**

diuresurssien hallinta (RRM) ja sen alalaji yhteyksien adaptiivisuus (SLA) luovat pohjan verkonmuodostukselle: toimintaympäristön tunteminen ja radioalustan hallitseminen mahdollistaa ympäristöön sopeutumisen, mikä taas on edellytys tehokkaalle ja älykkäälle verkonmuodostukselle (SON & RBR). Kognitiivisessa verkonmuodostuksessa tulee kuitenkin ottaa huomioon monimutkaisen automaation tuomat riskit, jotka lauetessaan voivat heikentää merkittävästi kognitiivisten verkkojen suorituskykyä.

Viimeisiksi arvetut ominaisuudet (antennijärjestelmät, häirintäjärjestelmät ja spektrimarkkinat) eivät ole luonteeltaan vähäpätöisiä, mutta jäivät delfoi-kyselyn argumenteissa ”perusedellytysten” jalkoihin. Yksi operatiivista vastaajaryhmää edustanut vastaaja kuvasi niitä sanoin ”tehostavat toimintaa”. Myös kysymysasettelu itsessään jätti jonkin verran epävarmuutta vastauksiin (häirintäjärjestelmät, ks. seuraava tekstikappale), samoin asiantuntijoiden arviot ominaisuuden kypsydestä (spektrimarkkinat).

Moniantennijärjestelmiä, kuten MIMOa, ei kaikissa vastauksissa katsottu lainkaan osaksi kognitiivista radiota, kuten ei kognitiivista häirintäjärjestelmääkään. Häirintäjärjestelmät jakoivat vastaajien mielipiteitä kohtuullisen paljon, mikä osittain saattoi johtua kyselyn ominaispiirteistä: On mahdollista, että kaikki vastaajat eivät olleet perehtyneet häirintäjärjestelmien määritelmään, joka oli sijoitettu tutkimuskyselyn liitteeksi, minkä vuoksi myös tehtävänkohdan tulkinnassa oli kirjavuutta. Osa tulkitsi häirintäjärjestelmän osaksi radiojärjestelmää eli ajatteli, että kognitiivista radiota sellaisenaan käytettäisiin häirintään, ja osa tulkitsi häirintäjärjestelmän ikään kuin omana suorituskykyisänään.

Myöskään häirintäjärjestelmän nostaminen kognitiivisten ominaisuuksien rinnalle ei ollut kaikkien vastaajien mielestä perusteltua, mitä kuvastaa seuraava sitaatti teollisuutta edustavan asiantuntijan vastauksesta:

Esimerkki 7

”Käyttötapaus poikkeaa muista arvioitavista ominaisuuksista. Kyseessä vaikuttaminen eikä oman tiedonsiirron suorituskyvyn parantaminen, paitsi ehkä sekundaarisesti. Oleellinen toiminnallisuus, johon kognitiivisen radion tekniikat voivat tuoda merkittävää suorituskykyparannusta mutta ei voida asettaa arvioitavaksi rinnakkain muiden kanssa.” – teollisuus

Häirintäjärjestelmää ei kaikissa vastauksissa myöskään pidetty olennaisena, koska se joko katsottiin kantamaltaan vähäiseksi (taktiseksi) tai sen toimivuutta kognitiivista radiota vastaan pidettiin kyseenalaisena.

Merkittävimmin vastaukset ja niiden perustelut hajosivat kaupallisia spektrimarkkinoita koskevassa kysymyksessä. Suurin osa vastaajista (8/10) arvioi kaupallisten spektrinmarkkinoiden merkittävyyden sotilaallisessa käyttöympäristössä arvoille 5–8 eli tärkeysjärjestyksen häntäpäähän. Kaksi vastaajaa asetti kuitenkin kaupalliset spektrimarkkinat arvioissaan korkealle (arvot 2 ja 3). Heikoimpia arvoja antaneet perustelivat vastauksensa sillä, että kaupalliset spektrimarkkinat eivät ole välttämättömiä sotilaallisessa käyttöympäristössä, jolloin niiden merkitys radion suorituskyvyn kannalta ei ole niin merkityksellistä kuin muiden ominaisuuksien. Korkeammat arvot antaneet panelistit näkivät spektrimarkkinoiden toimivuuden oleellisena osana kognitiivisen radion sotilaskäyttöä: Toimiessaan spektrimarkkinat lisäisivät merkittävästi käytettävissä olevaa spektriä, mikä helpottaisi kognitiivisen radion omaa toimintaa laajemmalla taajuusalueella. Toisaalta laajempi spektri vaikeuttaisi vihollisen tiedustelun ja häirinnän kohdentamista sotilaallisiin kohteisiin.

Korkeimmat arviot antaneet panelistit myös ymmärsivät vastauksissaan sotilaallisen käyttöympäristön laajempänä käsitteenä kuin perinteisenä laajamittaisena sotana. Yhdessä perustelussa todettiin aiheellisesti, että ”*mikäli voitaisiin olettaa, että [valtakunnallisesta] taajuushallinnasta ei sotilaallisessa käytössä tarvitse välittää, tämän tärkeys olisi olematon*” (teollisuus). Perusteluissa lähestyttiin siis kokonaisturvallisuuden käsitettä⁹.

Lisätyt ominaisuudet

Asiantuntijapanelisteille annettiin mahdollisuus lisätä annettuun listaan siitä mahdollisesti puuttuneita kognitiivisia ominaisuuksia ja arvioida niiden merkitystä suhteessa annettuihin ominaisuuksiin. Lisäykset pyydettiin myös perustelemaan. Kolme panelistia kaikista vastanneista lisäsi ominaisuuksia. Lisättyjä ominaisuuksia olivat (satunnaisessa järjestyksessä) seuraavat:

- 1) kyvykkyys monipuoliseen yhteistoimintaan mukaan lukien ei-kognitiiviset vastinkumppanit
- 2) älykäs liikkuvuuden hallinta
- 3) verkkojen yhteiskäyttöä tukevat menetelmät
- 4) harhauttavat radiojärjestelmät.

Ensimmäinen lisäys (kyvykkyys monipuoliseen yhteistoimintaan mukaan lukien ei-kognitiiviset vastinkumppanit) liittyy kiinteästi kokonaisturvallisuuden käsitteeseen ja Puolus-

⁹ ”Kokonaisturvallisuus on tavoitetilä, jossa valtion itsenäisyyteen, väestön elinmahdollisuuksiin ja muihin yhteiskunnan elintärkeisiin toimintoihin kohdistuvat uhkat ovat hallittavissa. **Yhteiskunnan elintärkeät toiminnot turvataan viranomaisten, elinkeinoelämän sekä järjestöjen ja kansalaisten yhteistoimintana.** Turvaamisen toimiin kuuluvat uhkiin varautuminen, häiriötilanteiden ja poikkeusolojen hallinta sekä niistä toipuminen” (Valtioneuvoston periaatepäätös kokonaisturvallisuudesta, 2012, s. 7).

tusvoimiin osana yhteiskuntaa. Poikkeusoloja (tai sota-aikaa) ei voi käsitellä ajatellen vain Puolustusvoimia, vaan Puolustusvoimien toimien tulee tukea muuta yhteiskuntaa yhteistoiminnassa eri viranomaisten, järjestöjen ja kansalaisten kesken. Yhteistoiminta kokonaisturvallisuuden kentässä niin kutsutussa harmaassa vaiheessa tulisi olla mukana kaikessa suunnittelussa, eikä suunnittelun tulisi keskittyä vain poikkeusoloihin. Toinen ja kolmas lisäys (älykäs liikkuvuuden hallinta ja verkkojen yhteiskäyttötukevat menetelmät) liittyvät kognitiiviseen verkonmuodostukseen ja mahdolliseen verkkojen yhteistoimintaan. Neljäs lisäys harhauttavista radiojärjestelmistä liittyy ylätasoltaan kognitiivisiin häirintäjärjestelmiin. Perinteisestä mallista ajatus poikkeaa siten, että kognitiivinen radio voitaisiin ohjelmoida luomaan itse harhauttavaa radioliikennettä, niin ettei se häiritse omaa liikennöintiä.

Mahdollisen jatkotutkimuksen kannalta kognitiiviset verkot, verkonmuodostus ja liikkuvuuden hallinta ovat erittäin oleellisia kokonaisuuksia: kognitiivisen radion tulisi voida lisätä radion käytettävyyttä ja suorituskykyä. Parhaiten tämä onnistuu, kun hyödynnetään kaikkia käytettävissä olevia radioresursseja.

4.1.2 Kognitiivitekniikan ja kognitiivisen radion käyttöönoton esteet

Kaikkien kysymykseen vastanneiden panelistien näkökulma oli puolustusvoimallinen. Panelistien näkemykset ryhmitettiin sisällönanalyysissa teemoittain. Erilaisia käyttöönoton esteiden teemoja oli löydettävissä 5 kappaletta: 1) operatiivinen ymmärrys ja suorituskyvyn rakentaminen 2) tekniikan kehittymättömyys 3) lainsäädäntö ja regulaatio 4) tietoturva ja 5) rahoitus.

Alle on teemoittain ryhmitelty panelistien näkemykset esteistä sekä heidän argumenttiensa keskeinen sisältö. Suluissa kerrotaan, kuinka moni vastaajista nosti kyseisen aiheen esille vastauksessaan. Johtopäätökset eri esteistä on kirjattu esimerkkien jälkeen. Asiantuntijat olivat käsitelleet vastauksissaan useita eri esteitä. Tästä johtuen suluissa olevien numeeristen kognitiivitekniikan käyttöönoton esteiden yhteenlaskettu määrä on suurempi kuin vastaajien lukumäärä. Huomattavaa on myös, että vastaajaryhmä ei näytä vaikuttaneen kognitiivitekniikan esteiden arviointiin, sillä lähes kaikista vastaajaryhmistä löytyi samoja perusteluita.

Operatiivinen ymmärrys ja suorituskyvyn rakentaminen (5)¹⁰

Esimerkki 8

Taktisella ja operatiivisella tasolla toimivien upseereiden osaamisen puute ymmärtää uuden teknologian tuomia mahdollisuuksia ja tästä johtuva kyvyttömyys muodostaan operatiivisia tarpeita tukevia vaatimuksia. Kun ei ole vaatimuksia, ei osata ohjata tutkimusta, tuotekehitystä ja hankkeita. – tutkimus

Esimerkki 9

Uusien teknologioiden merkitystä vähätellään ja mahdollisuudet muuttuvat uhkiksi. Operatiivinen ymmärrys uusien suorituskyykyjen mahdollisuuksista sodankäynnin muutoksentekijöinä on puutteellista. Toimintatapojen muutoksiin ei ole valmiutta ja varustelunäkökulma peittää suorituskyykyllähtöisen ajattelun. Tutkimukseen ja osittaiseen kehittämiseen panostetaan, mutta operatiiviset konseptit, käyttötapaukset ja vaatimukset ovat heikkoja. Tällöin siirtyminen kognitiivisiin järjestelmiin ei tule olemaan systemaattista ja vaatimukseen perustuvaa tai nopeaa ja joustavaa. Sekä muutosvastarinta että epäusko kansalliseen osaamiseen on vahvaa. – operatiivinen

Esimerkki 10

Keskeisenä haasteena on, kuinka puolustusvoimat kykenee johtamaan kognitiiviradioiden hankkeet niin, että kehitystä ohjaavat PV:n omat tarpeet eivätkä tutkimukset tai teollisuuden tahtotila. Vaihtoehtoja on puolustusvoimien näkökulmasta kaksi: voidaan odottaa sopivia kaupallisia tuotteita ja laatia niiden pohjalta käyttökonseptit tai voidaan hankkia tarvittava osaaminen kehityksen johtamiseen ja ohjaukseen. Kaupallisten tuotteiden odottaminen siirtää kognitiivitekniikan käyttöönottoa vähintään 5–10 vuotta eteenpäin. – teollisuus

Esimerkki 11

Keskittyminen puheen siirtämiseen ja olemassa oleviin hierarkioihin estää parhaiden ominaisuuksien kehittymisen. Uudet teknologiat nähdään vain parhaiden joukkojen välineenä eikä sinä liimana, joka yhdistää eri toimijat ja toiminnan tasot toisiinsa. – tutkimus

Esimerkki 12

Kognitiivisten järjestelmien käyttöönotto edellyttää suurta muutosta viestitaktiseen ajatteluun ja koulutukseen. – operatiivinen

Merkittävimmäksi esteeksi kognitiivitekniikan käyttöönotolle nousi vastauksissa ehkä yllättäenkin Puolustusvoimien oman henkilöstön ja erityisesti upseerien operatiivisen ymmärryksen kapea-alaisuus. Tahtotilan kuvaaminen ja teknologioiden luomien mahdollisuuksien yhdistäminen ei ole onnistunut, ja luottamus omiin kansallisiin kykyihin on laskenut. 5–10 vuoden viivettä tiedonsiirtotekniikan alalla voidaan pitää liian pitkänä aikana.

¹⁰Esimerkistä 8 eteenpäin vastauksia on muokattu yhtenäistämällä kirjoitusasua ja tiivistämällä perusteluita. Sisällöllisesti vastaukset on säilytetty alkuperäisessä muodossaan.

Tekniikan kehittymättömyys (3)

Esimerkki 13

Kognitiivinen tekniikka on vielä kehitysasteella eikä kognitiivisista järjestelmistä ole käyttökokemuksia. Puolustusvoimat tarvitsee laajan järjestelmän ja valittu tekniikka tulee olla luotettavaksi todennettua. – operatiivinen

Esimerkki 14

Luotettavuuden varmistaminen, toiminnallisuus ja kyky vastata erilaisiin kapasiteettitarpeisiin dynaamisesti tulee voida todentaa. Suuri este on lähteä liian kunnianhimoisesti liikkeelle. Lähtökohdaksi kannattaa valita osatoiminnallisuuksia ja laajentaa järjestelmää ideaalisemmaksi tekniikan kehittyessä. – regulaatio

Esimerkki 15

Älykkyyden tuoma automaatio voi monimutkaistaa järjestelmää siten, että verkon käyttäjä ei ymmärrä järjestelmää. On mahdollista, että järjestelmä suorittaa automaattisesti toimintoja verkon käyttäjän tietämättä, mitkä toiminnot eivät ole kyseisessä tilanteessa taktisesti järkeviä. Älykkäiden järjestelmien testaaminen on vaikeaa, mistä seuraa että järjestelmään voi jäädä toimimattomia tilanteita. – tutkimus

Kognitiivitekniikka ei kaikkien panelistien mielestä ole vielä riittävän kehittynyttä, eli tekniikan käyttöönotolle ei vielä ole edellytyksiä tai se tulisi maksamaan liikaa tuotekehityksenä. Kehittymättömyyden riskinä on myös se, että luodaan liian monimutkainen järjestelmä, jota ei ymmärretä ja jota ei osata määritellä.

Lainsäädäntö ja regulaatio (3)

Esimerkki 16

Taajuushallinta on merkittävin este tällä hetkellä – teollisuus

Esimerkki 17

Joissain määrin kognitiiviradiotekniikan soveltamista rajoittaa tällä hetkellä voimassa oleva lainsäädäntö, taajuusregulaatio ja taajuusallokaatiot. Viestintävirasto ja liikenneministeriö ovat kuitenkin suhtautuneet myönteisesti kognitiiviradion kehitykseen. – teollisuus

Esimerkki 18

Suurin este on asenne. Estettä kognitiivisen radion tuomisessa legacy-radiojärjestelmän rinnalle ei ole, koska kognitiivinen radio voi väistää taajuuksien primäärikäyttäjät. – teollisuus

Lainsäädäntö ja taajuusregulaatio eivät vastausten perusteella ole ajan tasalla. Merkittävää on, että huomio tuli esille teknologiaa rakentavien tahojen toimesta eli tässä tutkimuksessa teollisuuden vastaajaryhmässä. Toimenpiteet kognitiivitekniikan käytön mahdollistamiseksi on kyllä aloitettu, mutta asenteet teknologiaa kohtaan ovat vielä epäileviä. Kaupallisten spektri-

markkinoiden kysymyksen yhteydessä tuli esille arvio, että radiotaajuinen spektri tulisi olemaan regulaatiolla rajattu myös jatkossa, mikä tulee johtamaan edelleen taajuuksien merkittävään sirpaloitumiseen.

Tietoturvan hallinta (2)

Esimerkki 19

Merkittävin este on todennäköisesti tietoturvan hallinta nopeasti muuttuvissa tilanteissa, esimerkiksi väylien vaihdossa. – tutkimus

Esimerkki 20

Tietoturva ja salaus asettavat paljon vaatimuksia toteutukselle, ja ne voivat estää yksinkertaisimpien ratkaisujen toteuttamisen. – regulaatio

Merkittävimpänä ja oikeastaan ainoana uhkakuva edustavana esteenä nähtiin tietoturva monimutkaisissa, automatisoiduissa ja älykkäissä radioverkoissa, joissa loppukäyttäjä ei ole välttämättä tietoinen siitä, miten radio toimii erilaisissa tilanteissa.

Rahoitus (2)

Esimerkki 21

Käytössä on tällä hetkellä teknologia, osaaminen, henkilöstöresurssit, valmius ja tahtotila kehittää kognitiiviradiotekniikkaa ja tuoda näitä ominaisuuksia esimerkiksi LRV-järjestelmään. Kansallisilla toimijoilla ei ole välttämättä kaupallisia perusteita investoida teknologiaan ja kehitystyöhön ilman asiakasrahoitusta. – teollisuus

Esimerkki 22

Merkittävä este lienee taloudellinen: milloin puolustusvoimilla on rahaa hankkia kognitiivista teknologiaa laajassa mittakaavassa – teollisuus

Kehittämisen kalleus tuli myös esille, ja vastaajien argumenteissa erityisesti teollisuuden edustajat epäilivät nimenomaan Puolustusvoimien kykyä rahoittaa ja hankkia uutta kotimaista teknologiaa.

4.1.3 Ideaalinen kognitiivinen radio

Kolme vastaajaa viittasi suoraan ITU:n määritelmään kognitiivisesta radiosta, jota he pitivät kohtuullisen kattavana ja hyvänä määritelmänä. ITU:n määritelmää on käytetty myös aiemmin tässä tutkimuksessa, ja se löytyy englannista suomeksi käännettynä luvusta 1 (sivuilla 10–11). ITU:n laatima kuvaus on kattava visio kognitiivisesta radiosta, mutta sen heikkoutena on todellisten toiminnallisuuksien kuvaamisen puute. Lähtökohtana määritelmässä on luonnollisesti ollut ideaalinen kognitiivinen radio, joka verkottuu muiden kognitiivisten radioiden

kanssa. Todellisuudessa kognitiivisen radion tulee voida luoda yhteydet myös vanhoihin edellisten sukupolvien radioihin ja radioverkkoihin.

Yhdeksän kymmenestä vastaajasta kuvasi kognitiivisen radion toiminnallisuutta innovoiden sitä. He esittivät, mitä toiminnallisuuksia siinä tulisi olla, miten järjestelmä ottaisi huomioon edellisen sukupolven tiedonsiirtojärjestelmät ja kuinka kognitiivinen radio voisi hyödyntää tehokkaasti muita resurssejaan olettavasti sirpaloituvassa toimintakentässään. Näiden kuvausten pohjalta luotiin geneerinen toiminnallisuuden kuvaus: kuinka kognitiivinen radio toimii tai voisi toimia nykyisen kaltaisessa toimintaympäristössä ja mitä toiminnallisia vaatimuksia kognitiiviselle radiolla tulisi asettaa alkuvaiheessa. Alkuvaiheella tässä yhteydessä tarkoitetaan vaihetta, jolloin kognitiivinen radio on siirtymässä käyttöönottovaiheeseen. Käytössä on useita edellisen polven radiojärjestelmiä, eikä taajuuksien säätely ole kehittynyt tukemaan ideaalisesti kognitiivista radiota. On siis olemassa eri järjestelmille osoitettuja taajuusallokointeja, ja vapaiden taajuuksien käyttö on osin estetty taajuuksien säätelyllä.

Seuraavassa tekstikappaleessa esitetään vastausten perusteella luotu kuvaus ideaalisesta kognitiivisesta radiosta sotilaallisessa toimintaympäristössä, jossa on huomioitu kokonaisturvallisuuden konseptin tuomia vaatimuksia. Jokaisen vastaajan näkemyksiä on käytetty kuvauksen pohjana, ja geneerinen toiminnallisuuden kuvaus on näin ollen muodostettu koko vastauskimpua hyödyntäen. Kuvaus on kursivoitu.

Kognitiivisen radion arkkitehtuuri perustuu ohjelmistoradioon (SR). Sillä on riittävän suuri toimintakaista (esimerkiksi 3–3000MHZ), joka mahdollistaa radion joustavan toiminnallisuuden. Kognitiivinen radio tai radiot muodostaa tilannekuvan ympäristöstään: sillä on reaaliaikainen tilannekuva spektristä ja omassa järjestelmässä liikkuvasta tietoliikenteestä. Kognitiivinen radio tunnistaa alueella olevat signaalit ja pystyy luomaan yhteydet muihin radiojärjestelmiin (myös COTS-tuotteisiin ja vanhempiin aaltomuotoihin, esimerkiksi Tadiran, LRV, LTE tai Virve). Kognitiivinen radio luo verkon muiden järjestelmien kanssa yhdyskäytävien (gateway) avulla ja se mukautuu erilaisiin tilanteisiin käyttämällä koko taajuus- ja tiedonsiirtokapasiteettia tehokkaasti hyväkseen tarvittaessa priorisoimalla liikennettä.

Kognitiiviseen radiojärjestelmään voidaan ohjelmoida vaatimukset operaation tukemiselle. Järjestelmään voidaan laatia operaation perusajatus, jota järjestelmä toteuttaa itsenäisesti kokonaisresurssien optimoinnin ja dynaamisen allokoinnin näkökulmasta, ja jossa otetaan huomioon radion oma toiminta, muiden järjestelmien hyväksikäyttö sekä vastustajan toiminnan vaikeuttaminen. Radio voidaan ohjelmoida huomioimaan erilaiset tilanteet/moodit, kuten

tiedustelulta suojautumien, avaintiedon läpimenon varmistaminen ratkaisutilanteissa jne. Radio on suojattu häirittäohjelmilta.

Toiminnan aikana radio monitoroi spektriä ja mukautuu tilanteisiin vaihtamalla aaltomuodon symbolinopeus- ja modulaatioparametrejä, toimintataajuutta sekä verkkoja sirpaloituneessa spektrissä. Kognitiivinen radio on tietoinen yhteyksien tilasta, ja se osaa optimoida toimintansa linkin muutoksiin (antennikäyttö, modulaatio/koodaus, tehonsäätö, mahdollinen hajaspektrihajotus). Radioyhteyksissä voidaan käyttää hyväksi adaptiivisia tai MIMO-antenneja tai yhteydet voidaan toteuttaa myös kaapelilla. Muodostetut yhteydet on salattu ja yhteysvälien muodostuksessa on satunnaisuutta, jotta näkyviä ”tiedon valtateitä” tai avainsolmuja ei muodostuisi.

Kognitiivinen radio oppii ja hyödyntää oppimaansa toistuvista tilanteista ja reagoi niihin oikein suorituskyvyn maksimoimiseksi.

Yllä olevaa kuvausta käytettiin delfoin 2. kierroksen väittämien pohjana. Väittämillä hahmoteltiin kognitiivisen radion toiminnallisuuksia ja radiospektraalista toimintaympäristöä siirryttäessä 2020-luvulle.

Alkuperäinen kysymys ”*Kuvaa ideaalinen kognitiivinen radio ja kerro, mitä ominaisuuksia siihen kuuluu*” oli tarkoituksellisesti provokatiivinen ja ajatuksia herättävä. Tavoitteena oli saada asiantuntijoilta ajatuksia ja näkemyksiä sellaisessa muodossa, jossa niitä muuten ei ole mahdollista saada. Tässä tavoitteessa onnistuttiin vähintäänkin hyvin. Yksi tutkimusta edustaneista vastaajista muistuttikin osuvasti kysymyksen asettelun ideologisuudesta:

Esimerkki 23

”Ei ole olemassa ideaalista kognitiiviradiota, se tulee aina ja väistämättä olemaan kompromissi teoreettisten mahdollisuuksien, valmisteteknologian ja käyttäjien tarpeiden kesken. Kognitiiviradiota EI tule nähdä yhtenä monoliittisena laitteena tai järjestelmänä vaan se tulee ymmärtää yleisnimityksenä teknologialle, joka voi sisältää usean eri suorituskäytön omaavia laite/järjestelmäperheitä, jotka nekin kykenevät toimimaan saumattomasti yhteistyössä LEGACY-radioiden (Tadiran) ja useiden ohjelmistoradiosukupolvien (LRV) kanssa” - tutkimus

4.1.4 Päätelmät

Ominaisuuksien tärkeysjärjestys neljän ensimmäisen ominaisuuden osalta muodostui delfoin

1. kierroksen perusteella seuraavanlaiseksi:

- 1) dynaaminen spektrin hyväksikäyttö (DSA)
- 2) yhteyksien adaptiivisuus ja radioresurssien hallinta (RRM ja SLA)
- 3) älykäs verkonmuodostus (SON & RBR).

Häirintäjärjestelmiä ja antennijärjestelmiä ei arvotettu yhtä korkealle, vaan niitä pidettiin enemmänkin toimintaa tehostavana elementtinä. Spektrimarkkinat jakoivat asiantuntijoiden mielipiteitä eniten, mikä vaikutti vastausten perusteella johtuvan enemmänkin näkökulma-eroista kuin siitä, että vastaajat olisivat kiistäneet ominaisuuden merkityksen.

Mainituista kognitiivitekniikan yleistymisen esteistä selkeimmin Puolustusvoimia koskeva oli operatiivisen henkilöstön osaamisvaje. Toisena ja kolmantena puhtaasti Puolustusvoimien kehittämistä ja tekniikan käyttöönottoa rajoittavana tekijänä nähtiin mahdolliset tietoturvaan liittyvät uhkat sekä puolustushallinnon kyky rahoittaa korkean teknologian kehitystyö ja hankinnat. Yleisemmällä tasolla esteenä arvioitiin olevan regulaation jäykkyys ja tekniikan kehittymättömyys.

Ideaalisen kognitiivisen radion kuvausten perusteella luotiin geneerinen kuvaus kognitiivisen radion toiminnallisuuksista (luku 4.1.3). Näiden toiminnallisuuksien kautta on mahdollista rakentaa ensimmäiset kognitiivisen radion käyttötapaukset sotilaallisessa käyttöympäristössä.

4.2 Delfoi 2. kierros

Toisella delfoi-kierroksella lähdettiin tarkentamaan muodostettua ominaisuuksien tärkeysjärjestystä. Tämä tehtiin kysymällä asiantuntijoilta, onko 1. delfoi-kierroksen perusteella syntynyt järjestys validi eri kehittämisalueiden näkökulmista (liite 4). Toisena kysymyskokonaisuutena 2. kierroksella käsiteltiin väittämiä, jotka on luotu kognitiivisen radion geneerisen toiminnallisen kuvauksen perusteella. Kuvaus on esitetty tämän diplomityön luvussa 4.1.3. *Ideaallinen kognitiivinen radio*. Väittämien synnyttämien argumenttien pohjalta luvussa 4.2.2 kuvataan toimintaympäristön (radiotaajuusenspektrin) muutosta viiden vuoden aikajänteellä ja arvioidaan kognitiivisen radion toiminnallisia vaatimuksia tarkastelemalla väittämien kautta kognitiivisen radion suorituskykyä ja teknisiä toteutusmahdollisuuksia.

Toisen kierroksen kysymykset lähetettiin 14 asiantuntijalle. Niihin vastasi 13 asiantuntijaa (vastausprosentti ts. 93 %), ja kaikkia vastauksia myös voitiin käyttää analyysiin. Vastaajista 4 edusti operatiivista vastaajaryhmää, 2 tutkijaryhmää, 4 teollisuusryhmää ja 3 regulaatiota. Kun vastaajien kaksoisroolit otetaan huomioon, operatiivista vastaajaryhmää edusti yhteensä 6 vastaajaa, teollisuus- ja tutkimusvastaajaryhmää 4 vastaajaa ja regulaatiovastaajaryhmää 5 vastaajaa. Regulaatiovastaajaryhmässä kaksoisrooliksi huomioitiin 2. kierroksella vastaukset myös niiltä vastaajilta, jotka esimiesasemansa vuoksi joutuvat ottamaan kantaa taajuushallinnollisiin asioihin. Tämä menettely katsottiin perustelluksi, koska väitteissä sivutaan tulevaisuuden kehityskulkuja, joihin esimiesten näkemyksillä on merkittävä vaikutuksensa.

4.2.1 Puolustusvoimien kannalta keskeisimmät kognitiiviset ominaisuudet

Delfoin 1. kierroksella asiantuntijoita pyydettiin mm. asettamaan tärkeysjärjestykseen seitsemän etukäteen valittua kognitiivista ominaisuutta. Asiantuntijat osoittivat vastauksissaan sekä suoraan sanallisesti (esimerkki 1, luvussa 4.1.1.) että välillisesti (esimerkki 3, luvussa 4.1.1.), että erityisesti tärkeysjärjestyksen muodostaminen koettiin vaikeaksi ja osin ongelmalliseksi tehtäväksi: Vastaajat olivat joutuneet asettamaan valinnoilleen rajoituksia ja tarkentamaan näkökulmaansa varsin laaja-alaisessa kysymyksessä. Analyysin perusteella muodostunut ko-koava tärkeysjärjestys esiteltiin asiantuntijoille delfoin 2. kierroksen tutkimuskyselyssä sen terävimmän kärjen eli kolmen tärkeimmän ominaisuuden osalta (tarkkaan ottaen neljän, koska kolmannessa yhdistyi kaksi ominaisuutta). Tähän tärkeysjärjestykseen sekä tärkeysjärjestykselle esitettyihin tiiviisiin perusteluihin (liite 4) asiantuntijoilta pyydettiin argumentoitua arviota. Lisäksi tehtävää lavennettiin ottamalla mukaan neljä eri näkökulmaa: 1) suorituskykyli- sä, 2) tekninen toteutus, 3) tekninen kypsyys ja 4) Puolustusvoimien johtamisjärjestelmien kehitys. Näkökulmat tuli ottaa huomioon yksi kerrallaan kognitiiviradion ominaisuuksien tärkeysjärjestyksen arvioinnissa.

Toisen delfoi-kierroksen alussa asiantuntijoille esitettiin 1. kierroksen tulos lyhyine peruste- luineen seuraavassa muodossa:

Ensimmäisen delfoi-kierroksen vastausten perusteella kognitiivisille ominai- suuksille muodostui seuraavan kaltainen tärkeysjärjestys:

1) Dynaaminen spektrin hyväksikäyttö (DSA). Perustelu tiiviisti: DSA on perus- edellytys kognitiivisen radion tilannetietoisuudelle, jota ilman ei voi adaptoitua eikä hallita radioresurssia.

2) Yhteyksien adaptiivisuus ja radioresurssien hallinta (yhdistetty RRM ja SLA). Perustelu tiiviisti: Radioresurssien hallinta (RRM) ja sen alalaji yhteyksien

adaptiivisuus (SLA) luovat pohjan verkonmuodostukselle ja yhteyksien luotettavuudelle.

3) Älykäs verkonmuodostus (SON & RBR). Perustelu tiiviisti: Verkonmuodostus on johtamisjärjestelmälle perusedellytys. Tehokas ja älykäs verkonmuodostus ja verkon yhteyksien ylläpito on luotettavampaa, kun järjestelmä pystyy luomaan tilannekuvan ympäristöstään ja sopeutumaan muutoksiin

Tulosta seurasi varsinainen tutkimuskysymys:

”Ovatko järjestys ja perustelut mielestäsi valideja seuraavista näkökulmasta?”

1. Suorituskykyisän näkökulmasta

2. Teknisen toteutuksen näkökulmasta

3. Tuotekehityksen (kognitiivitekniikan kypsyyden) näkökulmasta

4. PV:n johtamisjärjestelmien kehityksen näkökulmasta

Vastaajille tarjottiin valmiit vastausvaihtoehdot, minkä lisäksi kutakin kysymyksen alakohtaa oli mahdollista kommentoida ilman rajoitettua merkkimäärää. Vastausvaihtoehdot olivat sovelletun 5-portaisen Likert-asteikon¹¹ mukaiset: *eivät ole, ovat vähän, ovat kohtuullisesti, ovat hyvin, ovat erittäin hyvin*. Kuudentena vaihtoehtona annettiin mahdollisuus valita vaihtoehto ”ei kantaa”, jota kukaan vastaajista ei kuitenkaan käyttänyt – mikä jo itsessään on varsin merkittävä tulos.

Tutkimuskysymyksen tarkennuksella annettuihin näkökulmiin pyrittiin ennen kaikkea parantamaan kysymyksen validiteettia eli varmistamaan, että kukin vastaaja arvioi tärkeysjärjestystä samasta viitekehiksestä käsin sen sijaan, että olisi antanut arvionsa esimerkiksi itselleen ammatillisesti läheisimmän näkökulman kautta. Toisaalta asiantuntijoille haluttiin taata mahdollisuus tarkastella muodostunutta tärkeysjärjestystä numeerisen tai järjestysarvion lisäksi myös laadullisesti eri näkökulmista – ja perustella näkemyksiään, mikäli siihen nähtiin tarvetta. Tällöin saatiin myös materiaalia sisällönanalyysiin, joka voisi mm. paljastaa mahdollisten epäodotuksenmukaisten tai ristiriitaisten näkemysten syitä.

Asiantuntijoiden mielestä parhaiten tärkeysjärjestys korreloi **suorituskykyisän näkökulmasta**: 8 vastaajista (n. 62 %) arvioi järjestyksen suorituskykyisän näkökulmasta erittäin validiksi (*erittäin hyvin*), 3 hyvin validiksi (n. 23 %) ja 1 (n. 8 %) kohtuullisen validiksi. Vain yksi vas-

¹¹ Sovelletulla tässä tarkoitetaan sitä, että poiketen alkuperäisestä Likert-asteikosta keskimäinen vaihtoehto ei ole puhtaasti neutraali, vaan silläkin on järjestyksellinen merkitys (Vehkalahti 2008).

taaja piti järjestystä suorituskykyisän näkökulmasta vähemmän onnistuneena (*ovat vähän*). Vastausten viitteellinen keskiarvo viisiportaiselta asteikoilta laskettuna muodostui siis hyvinkin korkeaksi (ka 4,38, kh 0,96). Seuraavasta taulukosta 5 asiantuntijoiden vastaukset löytyvät koottuna siten, että kunkin näkökulman mukaiset tulokset esitetään omalla rivillään.

Taulukko 5: Koko asiantuntijaryhmän vastaukset kognitiivisten ominaisuuksien tärkeysjärjestykseen eri näkökulmista

	eivät ole	ovat vä- hän	ovat koh- tuulli- sesti	ovat hyvin	ovat erit- tään hyvin	ei kan- taa	Yhteensä	Viitteellinen keskiarvo
	1	2	3	4	5			
Suorituskykyisän näkökulmasta	0	1	1	3	8	0	13	4,38
Teknisen toteutuksen näkökulmasta	0	2	2	5	4	0	13	3,85
Tuotekehityksen (kognitiivitekniiikan kypsyysden) näkökulmasta	0	2	5	3	3	0	13	3,54
PV:n johtamisjärjestelmien kehityksen näkökulmasta	0	1	1	5	6	0	13	4,23

Toiseksi parhaiten muodostettu tärkeysjärjestys ja perustelut vastasivat asiantuntijoiden näkemyksiä Puolustusvoimien **johtamisjärjestelmien kannalta** (viitteellinen keskiarvo 4,23, kh 0,93). **Teknisen toteutuksen kannalta** tärkeysjärjestys arvioitiin lähelle hyvää (ka 3,85, kh 1,07). Heikoimman validiteetin ensimmäisen delfoi-kierroksen tulokselle asiantuntijat koko ryhmänä arvio **tuotekehityksen näkökulmasta**, mutta silläkin nähtiin keskimäärin varsin hyvä vastaavuus annettuun tärkeysjärjestykseen perusteluineen (ka 3,54, kh 1,05).

Kaikkien vastaajaryhmien vastaukset ovat kokonaiskuvan muodostumisen kannalta tärkeitä, mutta erityisesti operatiivisen vastaajaryhmän vastauksista voidaan tarkemmin arvioida, miten muodostunut tärkeysjärjestys palvelee juuri Puolustusvoimien tarpeita (taulukko 6). Operatiiviset suorituskykyvaatimukset on olennainen osa hankintoja ohjaavia asiakokonaisuuksia (Kosola 2004, s. 91–96), ja tarkastelemalla vaatimusten asettajien vastauksia (operatiivinen vastaajaryhmä muodostui upseereista) saadaan kuva muodostuneen tärkeysjärjestyksen toteuttamiskelpoisuudesta.

Taulukko 6: Operatiivisen asiantuntijaryhmän vastaukset kognitiivisten ominaisuuksien tärkeysjärjestykseen eri näkökulmista

	eivät ole	ovat vähän	ovat koh- tuul- lisesti	ovat hyvin	ovat erit- tään hyvin	ei kan- taa	Yhteensä	Viitteellinen keskiarvo
	1	2	3	4	5			
Suorituskykyllisän näkökulmasta	0	0	0	0	6	0	6	5
Teknisen toteutuksen näkökulmasta	0	1	0	1	4	0	6	4,33
Tuotekehityksen (kognitiivitekniikan kypsyysden) näkökulmasta	0	2	1	1	2	0	6	3,5
PV:n johtamisjärjestelmien kehityksen näkökulmasta	0	0	0	1	5	0	6	4,83

Operatiivisen vastaajaryhmän vastaukset mukailevat selkeästi kaikkien vastaajien tuloksia mutta antavat esitettyyn kysymykseen kokonaistulosta yksiselitteisemmän vastauksen: suorituskykyllisän näkökulmasta tärkeysjärjestys on kaikkien vastaajien mielestä erittäin validi (ka 5). Myös Puolustusvoimien johtamisjärjestelmien kehityksen näkökulmasta viisi kuudesta vastaajasta arvioi vastaavuuden erittäin hyväksi ja kuudeskin vastaaja hyväksi, jolloin keskiarvo muodostui hyvin korkeaksi (4,83). Teknisen toteutuksen kannalta linja oli lähes samankaltainen. Yksi vastaajista oli kuitenkin epäileväinen (valittuna vaihtoehto *ovat vähän*) ja perusteli vastaustaan DSA:n ja SON:n teknisellä kypsymättömyydellä: ”DSA tunnetaan heikosti ja tutkittu enimmäkseen siviilisov[ellusten] näkökulmasta. Sotilaall[isia] DSA-sovelluksia ei ole tutkittu juurikaan ja SONitkin vielä aluillaan”. Tuotekehityksen näkökulmasta erityisesti huoli teknisestä kypsymättömyydestä nousi vielä voimakkaammin esille: ”DSAn sotilaalliset sovellukset ja SON:a [on] tutkittu vähän, tuotteistaminen [on vielä] kesken”.

Teollisuuden vastaajaryhmän vastauksissa seuraavassa taulukossa 7 tarkastelun painopiste on teknisen toteutuksen ja tuotekehityksen näkökulmissa, koska sen edustamat tahot viime kädessä rakentavat kognitiivisen radion, jos sellainen halutaan tehdä.

Taulukko 7: Teollisuuden asiantuntijaryhmän vastaukset kognitiivisten ominaisuuksien tärkeysjärjestykseen eri näkökulmista

	eivät ole	ovat vähän	ovat kohtuullisesti	ovat hyvin	ovat erittäin hyvin	Ei kannata	Yhteensä	Viitteellinen keskiarvo
	1	2	3	4	5			
Suorituskykyllisän näkökulmasta	0	1	0	1	2	0	4	4
Teknisen toteutuksen näkökulmasta	0	1	0	2	1	0	4	3,75
Tuotekehityksen (kognitiivitekniikan kypsyyden) näkökulmasta	0	0	1	2	1	0	4	4
PV:n johtamisjärjestelmien kehityksen näkökulmasta	0	1	0	1	2	0	4	4

Teollisuutta edustavien asiantuntijoiden vastaukset ovat samansuuntaisia muiden ryhmien vastausten kanssa, kuten taulukosta 7 selviää. Yhden vastaajan linja on kuitenkin yleisnäkemyistä selkeästi skeptisempi, mikä johti jonkin verran muita alempiin keskiarvoihin (≈ 4) tässä vastaajaryhmässä. Kyseisen asiantuntijan kritiikki kohdistui ennen kaikkea asioiden käsittelyn radiokeskeisyyteen: ”Kognitiivisen radion tulokulma on hyvin radio, fyysinen kerros ja ilma-rajapintaorientoitunutta. Radio tulisi nähdä osana verkkoa, joko langatonta tai hybridiä, jolloin verkkotason ominaisuudet ovat kokonaissuorituskyvyn kannalta merkittävämpiä. Taajuuden merkitystä korostetaan siksikin liikaa, että fyysiset radion rajoitukset (analogiset osat) rajoittavat radion mahdollisuutta hyödyntää spektriä vapaasti.” Huomio on aiheellinen ja esitetty asiakokonaisuus pätevä. Erityisesti sotilaallisessa käyttöympäristössä radioiden verkottuminen kuitenkin korostuu jo pelkästään taistelunkestävyyden takia. Tämän tutkimuksen näkökulma on ollut radiokeskeinen, mikä perustuu siihen, että kognitiivinen radio on vasta tulollaan. Radioverkot muodostuvat useista yksittäisistä radioista, jolloin on perusteltua keskittyä teknisen kehityksen tässä vaiheessa nimenomaan radion suorituskykyyn. Verkot, esimerkiksi SON eli *self-organized-networks*, on tutkimuksessa huomioitu osana kognitiivisia ominaisuuksia.

Merkittävää teollisuuden edustajien vastauksessa on, että heidän mielestään muodostunut kognitiivisten ominaisuuksien tärkeysjärjestys vastaa hyvin Puolustusvoimien tarpeita teknisen toteutuksen näkökulmasta (ka 4) ja lähes yhtä hyvin tuotekehityksen näkökulmasta (ka 3,75). Teollisuuden asiantuntijaryhmän tarkat vastaukset ja perustelut on esitetty liitteessä 4.

Tutkimuksen asiantuntijaryhmän vastaukset on koottu taulukkoon 8. Tutkimuksen asiantuntijaryhmän vastauksien tarkastelun painopiste on tuotekehityksen ja kognitiivitekniikan kypsyyden näkökulmassa, koska voidaan olettaa, että heillä on ajallisesti pisin perspektiivi tekniseen tarkasteluun.

Taulukko 8: Tutkimusryhmän asiantuntijoiden vastaukset kognitiivisten ominaisuuksien tärkeysjärjestykseen eri näkökulmista

	eivät ole	ovat vähän	ovat kohtuullisesti	ovat hyvin	ovat erittäin hyvin	Ei kannata	Yhteensä	Viitteellinen keskiarvo
	1	2	3	4	5			
Suorituskykyllisän näkökulmasta	0	0	0	1	3	0	4	4,75
Teknisen toteutuksen näkökulmasta	0	1	1	2	0	0	4	3,25
Tuotekehityksen (kognitiivitekniikan kypsyyden) näkökulmasta	0	2	1	0	1	0	4	3
PV:n johtamisjärjestelmien kehityksen näkökulmasta	0	0	0	1	3	0	4	4,75

Tämän ryhmän vastaukset hajosivat merkittävästi tuotekehitystä koskevassa osiossa. Kaksi vastaajista oli sitä mieltä, että muodostunut ominaisuuksien tärkeysjärjestys on validi (vain vähän, yhden mielestä kohtuullisesti ja yhden vastaajan mukaan erittäin hyvin. Vastausten suuntaa-antava keskiarvo oli 3, mutta juuri tämän esimerkin kohtalaisen suuri hajonta (kh 1,41) osoittaa keskiarvojen rajallisen kuvausvoiman etenkin Likert-asteikollisen tutkimusaineiston tulkinnassa. Sanallisissa perusteluissa huoli kohdistui siihen, että kognitiivinen radio on osittain vielä tutkimusasteella ja sen tuotteistaminen on kesken. Toisaalta yksi vastaajista samalla totesi, että mikäli Puolustusvoimat haluaa jatkossa hyödyntää kognitiivisia ominaisuuksia, niin nyt esitetyistä ominaisuuksista on hyvä aloittaa.

Asiantuntijat eivät vastauksissaan juurikaan kyseenalaistaneet 1. delfoi-kierroksella muodostunutta tärkeysjärjestystä. Dynaaminen spektrin hyväksikäyttö (DSA), yhteyksien adaptiivisuus (SLA) yhdistettynä radioresurssien hallintaan (RRM) sekä älykäs verkonmuodostus (SON ja RBR) ovat niitä ominaisuuksia, jotka tuovat johtamisjärjestelmille merkittävimmän suorituskykyllisän. Myös teknisen kypsyyden, tuotekehityksen ja johtamisjärjestelmien kehityksen näkökulmista ominaisuuksien tärkeysjärjestys on yhtenevä edellä mainitun järjestyksen kanssa, tässä kappaleessa esitetyin varauksin.

4.2.2 Väittämien analyysi

Toisena kysymyskokonaisuutena 2. kierroksella käsitellään väittämiä, jotka on luotu kognitiivisen radion yleisen toiminnallisen kuvauksen pohjalta. Kuvaus luotiin 1. kierroksen ideaalisista kognitiivista radiota koskevan kysymyksen perusteella: ensimmäisellä delfoi-kierroksella asiantuntijat kuvasivat innovoiden, miten kognitiivinen radio voisi toimia ja mitä toiminnallisuuksia siihen voisi kuulua. Kuvaus on esitetty tutkimuksen luvussa 4.1.3. *Ideaalinen kognitiivinen radio*. Kyselyyn liitettiin myös joitakin tulevaisuuteen tarkkarajaisemmin suuntaavia väittämiä. Näissä väittämissä pyydettiin arvioimaan mm. spektrin muutoksia ennen vuotta 2020 sekä teknistä toteutusta eli esimerkiksi sitä, ovatko päätelaiteet tulevaisuudessa kaupallisia tuotteita vai jotain muuta. Eri asiantuntijoiden 1. delfoi-kierroksella esittämät ajatukset alistettiin tässä osiossa muiden panelistien arvioitavaksi kolmiportaisella asteikolla: *kyllä, ei, en osaa sanoa*. Vaihtoehtojen lisäksi jokaista väittämää oli mahdollista kommentoida sanallisesti.

Väittämiin saatuja vastauksia analysoidaan kahdella erilaisella lähestymistavalla, koska analyysin lopputuotteet ovat erilaiset. Aluksi vastausten pohjalta kuvataan toimintaympäristön (radiotaajuisenspektrin) muutosta viiden vuoden aikajänteellä sekä Puolustusvoimille mahdollisia toimintaperiaatteita muutoksen hallinnassa. Toimintaympäristön mahdollista muutosta analysoidaan vertaamalla koko vastaajaryhmän vastauksia taajuushallintaan erikoistuneiden asiantuntijoiden eli regulaatioryhmän vastauksiin. Analyysissa toisin sanoen verrataan kognitiivisen radion eri osa-alueisiin perehtyneiden asiantuntijoiden ja taajuushallinnan ammattilaisten näkemyksiä kognitiivisen radion toimintaympäristöstä, sen muutoksista sekä muutosten tarpeesta ja todennäköisestä kehityskulusta. Vertailu koko asiantuntijaryhmään, eikä siis regulaatioryhmällä vähennyttyyn asiantuntijaryhmään, on perusteltua, jotta lukija hahmottaa paremmin kaikkien asiantuntijoiden vastaukset. Synteesinä muodostetaan kuvaus toimintaympäristön muutoksesta sekä arvio siitä, miten mahdollinen muutos tulisi ottaa huomioon sotilaallisen toimintaympäristöön tarkoitetun kognitiivisen radion vaatimusmäärittelyssä. Toisessa analyysiosiossa arvioidaan kognitiivisen radion käyttömahdollisuuksia tarkastelemalla väittämien kautta kognitiivisen radion suorituskykyä sekä yleisiä teknisiä toteutuksia. Väittämiin saatujen vastausten analyysin perusteella muodostetaan alustavia operatiivisia suorituskykyvaatimuksia sekä joitakin teknisiä suosituksia.

Tehtävänanto delfoin 2. kierroksen väittämöosioon oli seuraava:

”Seuraavaan osioon on koottu väittämiä, joita asiantuntijat ovat esittäneet ideaalisen kognitiivisen radion kuvauksen yhteydessä. Mukaan on lisätty muutama lisäväite erilaisista kognitiivisen radion käyttötapauksista ja ominaisuuksista. Tämän tutkimusosion tavoitteena on

hahmotella väittämien perusteella erilaisia kognitiivisen radion käyttötapauksia ja toimintaympäristöjä kognitiiviselle radiolle.

Ovatko väittämät mielestäsi oikein vai väärin? Mikäli et tiedä tai olet epävarma, merkitse kohta "en osaa sanoa". Voit kommentoida vastaustasi vieressä oleviin kommenttikenttiin."

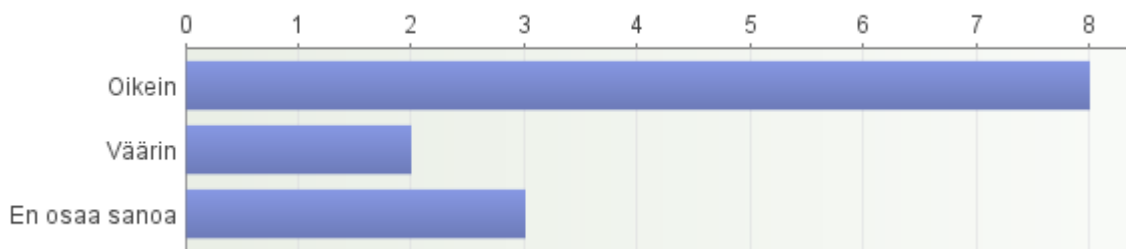
Muutokset spektrissä vuoteen 2020 mennessä sekä taajuushallinnan tulevaisuutta

Vuosi 2020 valittiin väittämissä kohdevuodeksi, koska 20 vuotta on tyypillisesti se aika, joka kestää idean esittämisestä teknologian käyttöönottoon (Kosola 2013, s. 18). Joseph Mitola esitti ideansa kognitiivisesta radiosta vuonna 1999 (Mitola 1999), josta vuonna 2020 on siis kulunut 21 vuotta. Pelkästään nykyperspektiivistä katsottuna vuosi 2020 on toki jo lähitulevaisuutta, kuten eräs teollisuutta edustanut asiantuntijakin huomautti yhden regulaatiota koskevan väittämän yhteydessä: ”Regulaatiomielessä 5 vuotta on lyhyt aika”.

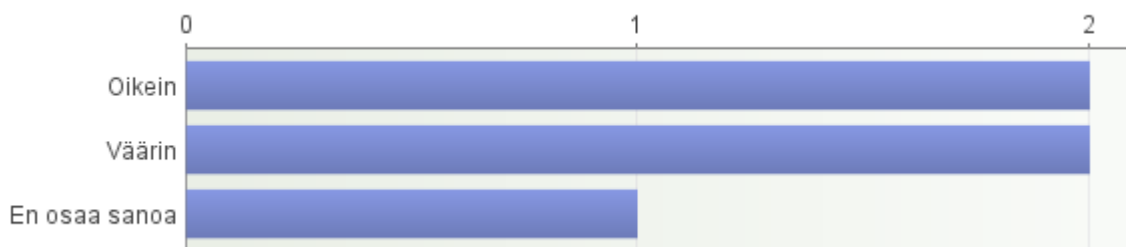
Spektrin tulevaisuutta yleisellä tasolla koskevia väittämiä kyselyssä oli kaksi kappaletta ja vuotta 2020 kartoittavia väittämiä kolme. Vuotta 2020 koskettavat väitteet muodostavat kokonaisuuden siten, että ensin kartoitettiin suuntaa, johon spektrin arvioidaan kehittyvän (sirpaloituuko vai selkiytyykö). Toisessa väittämässä haluttiin selvittää, onko spektrin hallinnointiin asiantuntijoiden mielestä tulossa seuraavan viiden vuoden aikana sellaista muutosta, joka avaisi kognitiiviselle radiolle avoimemman toimintaympäristön. Kolmanneksi väitettiin (ensimmäisen delfoi-kierroksen asiantuntijakommenttiin pohjautuen), että regulaation jäykkyys tulee estämään kognitiivisen radion käytön vuonna 2020. Spektrin tulevaisuutta yleisesti kartoittavat väitteet oli muotoiltu seuraavasti: 1) *Kognitiivista radiota tulisi kehittää taajuusvapaa-ennakoiden mahdollista taajuuksien yhteiskäyttöä ja 2) Kognitiivisen radion tulisi tulevaisuudessa voida käyttää muiden järjestelmien taajuusresursseja.* Tässä analyysissä verrataan taajuusregulaation ammattilaisten vastauksia koko ryhmän vastauksiin. Tavoitteena on selvittää, vastaavatko kognitiivisen radion kehityksen ja tutkimuksen ammattilaisten sekä taajuushallinnan ammattilaisten käsitykset kognitiivisen radion käyttömahdollisuuksia vuosikymmenen vaihteessa toisiaan. Mikäli näkemykset poikkeavat toisistaan, on olennaista myös selvittää, mistä eriävät mielipiteet johtuvat.

Ensimmäisenä käsitellään vuotta 2020 kartoittavia väittämiä. Väittäminen: *Tulevaisuudessa (vuonna 2020) radiotaajuinen spektri tulee olemaan yhä sirpaleisempi.* Koko ryhmän vastaajista 8 (n. 62 %) sanoo väittämän olevan oikein eli on sitä mieltä, että radiotaajuinen spektri tulee vuonna 2020 olemaan nykyistä sirpaleisempi (kuva 7). Kaksi vastaajista (n. 15 %) on väittämästä kuitenkin eri mieltä, ja kolme vastaajista (n. 23 %) ei ota väittämään kantaa (*en*

osaa sanoa). Regulaation edustajien vastauksissa (kuva 8) vastaukset menevät tasan puolesta ja vastaan (2 vastaajaa pitää väittämää oikeana, 2 vääränä), yksi puolestaan ei ota väittämään kantaa. Erityisesti regulaation edustajien vastaukset hajoavat siis merkittävästi.



Kuva 7: Tulevaisuudessa (vuonna 2020) radiotaajuinen spektri tulee olemaan yhä sirpaleisempi. (Väittämä 27, delfoin 2. kierros). Vastaajia 13 (koko vastaajaryhmä).

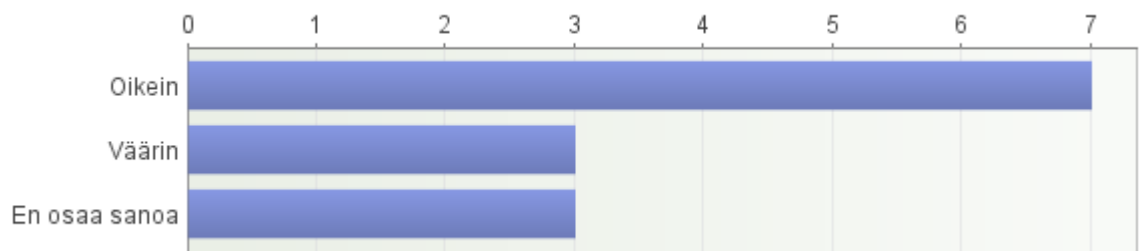


Kuva 8: Tulevaisuudessa (vuonna 2020) radiotaajuinen spektri tulee olemaan yhä sirpaleisempi. (Väittämä 27, delfoin 2. kierros). Erikseen regulaatiota edustavat 5 vastaajaa.

Huomattavaa yllä olevan väittämän 27 (kuvat 7 ja 8) vastauksissa on se, että hajonta aiheutuu kokonaisuudessaan regulaation edustajien vastauksista (2 vastasi *väärin* ja yksi *ei osaa sanoa*). Väittämään sekä myönteisesti että kielteisesti vastanneet perustelivat näkemyksensä WRC:n (World Radiocommunication Conference) mahdollisesti tuomiin tuloksiin: WRC pyrkii luomaan normistoa, joka mahdollistaisi kognitiivisen radion käytön vuonna 2020. Toiset vastaajista uskovat tämän tuovan muutoksia, toiset taas ovat sitä mieltä, että merkittävää edistystä ei tapahdu. Kaikki vastaajat ovat kuitenkin samaa mieltä siitä, että taajuuksien käyttö tulee lisääntymään. Todennäköinen kehityskulku tulee olemaan sellainen, että vuonna 2020 spektri on yhä sirpaleisempi, ja ruuhkautumaan jatkuu edelleen.

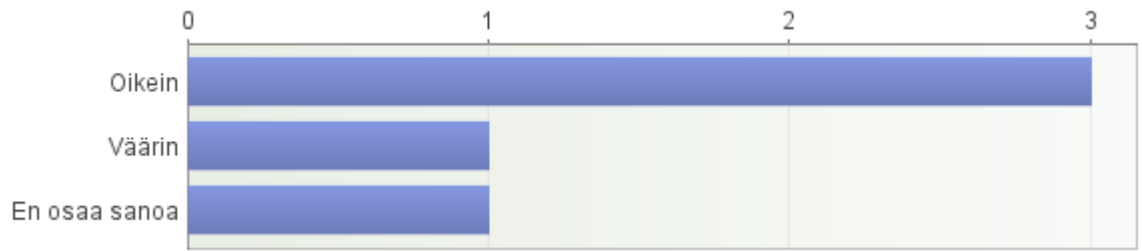
Työ spektrin tehostamiseksi on joka tapauksessa jo alkanut. Se, millä aikataululla pääosin kaupallisin perustein säänneltyä spektriä voidaan vapauttaa, riippuu siitä, miten voimakas tahto muutoksen aikaan saamiseksi Puolustusvoimissa saavutetaan. On hyvä muistaa, että spektrin säätely on kuitenkin ihmisten itsensä luomaa, ja viime kädessä sitä ohjataan poliittisella päätöksenteolla.

Toinen vuotta 2020 kartoittava väittämä käsitteli taajuuksien jakoa: *Tulevaisuudessa (vuonna 2020) suurin osa (yli 50 %) radiotaajuisesta spektristä on edelleen dedikoitu sellaisille järjestelmille (esim. DIGITV tai GSM), joita kognitiivinen radio ei voi käyttää hyväkseen*. Vastauksista ilmeni 53 %:n vastaajista (7/13) uskovan, että suurin osa spektristä tulee edelleen vuosikymmenen vaihteessa olevan rajoitettua siten, että kognitiiviset radiot eivät voi näitä osia käyttää hyväkseen (kuva 9). 23 % (3/13) asiantuntijoista ei ottanut väitteeseen kantaa (*ei osaa sanoa*) ja niin ikään 23 % vastaajista oli sitä mieltä, että spektri päinvastoin tulee olemaan nykyistä vapaammin käytössä vuonna 2020.



KUVA 9: Tulevaisuudessa (vuonna 2020) suurin osa (yli 50 %) radiotaajuisesta spektristä on edelleen dedikoitu sellaisille järjestelmille (esim. DIGITV tai GSM), joita kognitiivinen radio ei voi käyttää hyväkseen (Väittämä 33). Vastaajia 13 (koko vastaajaryhmä).

Regulaation edustajien vastaukset (kuva 10) ovat edelleen jonkin verran ristiriitaiset: oikeana väitettä piti 3/5 vastaajista ja vääränä 1/5, kun viides vastaaja ei ottanut väitteeseen kantaa. Erään väitteeseen myönteisesti suhtautuneen vastaajan kommentissa painotetaan vuoden 2020 läheisyyttä, ja juuri aikaikkunan suppeus saattaakin selittää vastausten hajontaa: ”2020 on aika pian...”. Toisen, väitteeseen kielteisesti suhtautuneen vastaajan kommentti puolestaan ennakoi langattoman laajakaistan tarpeiden kasvavan niin olennaisesti, että muutos tulee (näinkin pian) tapahtumaan. *En osaa sanoa* -kanta puolestaan perusteltiin sillä, että väittämässä esimerkkinä mainittujen järjestelmien taajuusalueet on ensisijaisesti suunniteltu kaupallisille järjestelmille, vaikka taajuuksien käytön joustavuutta tullaankin lisäämään vuoteen 2020 mennessä.

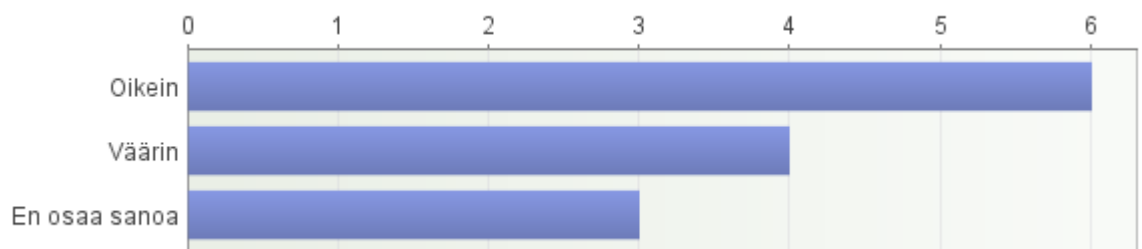


KUVA 10: Tulevaisuudessa (vuonna 2020) suurin osa (yli 50 %) radiotaajuisesta spektristä on edelleen dedikoitu sellaisille järjestelmille (esim. DIGITV tai GSM), joita kognitiivinen radio ei voi käyttää hyväkseen (Väittämä 33). Erikseen regulaatiota edustavat 5 vastaajaa.

Väittämään kielteisesti (*väärin*) vastanneen regulaation edustajan sanalliset argumentit eivät sinänsä kumonnet väitettä mutta jättivät vastauksen perustelut ilmaan. Myönteisesti (*oikein*) vastanneet perustelivat näkemyksensä vuoden 2020 läheisyydellä eivätkä uskoneet merkittävien muutoksien tulevan voimaan seuraavan viiden vuoden aikana. Todennäköisenä tämän väittämän vastausten perusteella voidaan pitää sellaista kehityskulkua, jossa seuraavan viiden vuoden aikana tapahtuvat muutokset vasta luovat pohjaa laajemmalle kehitykselle 2020-luvun aikana.

Kolmannessa vuotta 2020 kartoittavassa väittämässä haluttiin selvittää, onko asiantuntijoiden mielestä mahdollista, että regulaatio rajoittaisi kognitiivisen radion käyttöönottoa vuonna 2020 (kuva 11). Koko vastaajaryhmässä 6/13 (46 %) vastaajista arvio, että kognitiivinen radio ei lähitulevaisuudessa saa käyttää muiden järjestelmien taajuusresurssia. 4/13 (31 %) kuitenkin arvioi väittämän vääräksi eli kognitiivinen radio voisi käyttää spektriä laajemminkin hyväkseen. 3/13 (23 %) ei ottanut väitteeseen kantaa (*en osaa sanoa*).

Vastaajien määrä: 13 (koko ryhmä)



KUVA 11: Kognitiivinen radio ei vuoteen 2020 mennessä saa käyttää muiden järjestelmien taajuusresurssia, mikä johtuu regulaatiosta (Väittämä 51). Vastaajia 13 (koko vastaajaryhmä).

Regulaatiota edustavat vastaajat (Kuva 12 alla) olivat lähes yksimielisiä (4/5, 80 %) siitä, että kognitiivinen radio ei vuonna 2020 saa käyttää muiden järjestelmien taajuusresurssia. Yksi eri mieltä ollut regulaation asiantuntija perusteli vastaustaan seuraavalla tavalla: ”TV UHF-alue

jo nyt kognitiivisen radion käytössä. Erilaisia esim. tietokantoihin perustuvia ratkaisuja tulee varmaan aikaisemmin mahdollistamaan taajuuksien yhteiskäyttöä, eikä silloin ole pakosti kyseessä yhteiskäyttö vain kognitiivisen radion kanssa vaan laitteiden, jotka hyödyntävät kognitiivisia kyvykkyyksiä.” Vastaajan väite perustuu siihen, että osa spektristä on jo avattu kognitiivisen radion käyttöön, joten väite olisi sinänsä väärin. Väitteeseen myönteisesti suhtautuneet vastaajat puolestaan perustelivat näkemystään nykyisellä kehityssuunnalla ja regulaation muutoksen hitaudella. Yhden taajuusalueen (TV UHF-alue) avaaminen ei kuitenkaan tarkoita merkittävää taajuusresurssien kohdentamista muilta järjestelmiltä kognitiiviselle radiolle.



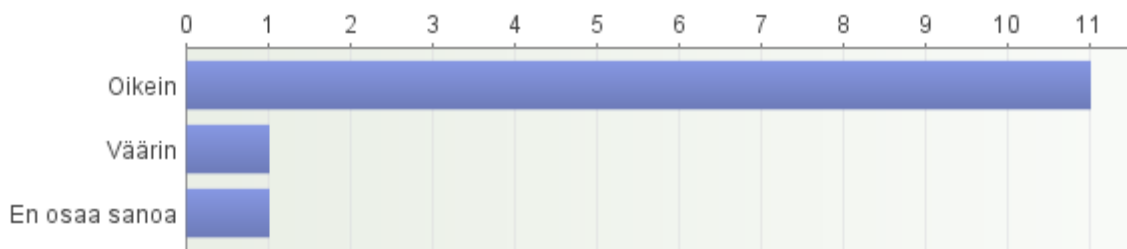
KUVA 12: Kognitiivinen radio ei vuoteen 2020 mennessä saa käyttää muiden järjestelmien taajuusresurssia, mikä johtuu regulaatiosta (Väittämä 51). Erikseen regulaatiota edustavat 5 vastaajaa.

Yllä olevassa (kuva 12) väittämässä regulaation edustajien näkemys eriaa merkittävästi muihin vastaajien näkemyksestä (6:sta väitteeseen *oikein* vastanneesta 4 oli regulaation edustajia). Aihealueeseen perehtyneiden asiantuntijoiden pessimismi – eli epäusko regulaation muuttumisesta kognitiiviselle radiolle edulliseksi – onkin ilmeistä. Laajempi näkökulma asiaan olisi, onko näillä sinänsä merkittävillä alkuaskelilla sotilaallisessa mielessä merkitystä. Toistaiseksi spektrin käytön kannalta merkitys on vielä vähäinen. Suurempi merkitys sen sijaan on sillä, että nyt on jo mahdollista todeta kehityksen alkaneen, ja kehityksellä on ainakin näin aluksi kognitiivisen radion kehityksen kannalta edullinen suunta, vaikkakin kehityksen nopeus on vaatimaton.

Kolmen edellä esitellyn väitteen herättämien vastausten vastauksen perusteella johtopäätöksenä spektrin muutoksesta vuoteen 2020 mennessä voidaan todeta, että **merkittävää muutosta spektrissä ja spektrin säätelyssä ei tule tapahtumaan viidessä vuodessa**. Spektri tulee edelleen sirpaloitumaan, ja toiminnallisuuksiin perustuva taajuusallokointi tulee edelleen oleva kantava peruste spektrin jakamiselle.

Kognitiivisen radion tulevaisuuden toimintamahdollisuuksista kysyttiin asiantuntijoilta myös hieman toisella tavalla muotoillussa väittämässä, josta aikaperspektiiviä rajaava vuosiluku

kuitenkin oli poistettu: ”Kognitiivisen radion tulisi tulevaisuudessa voida käyttää muiden järjestelmien taajuusresursseja”. Regulaation asiantuntijat vastasivat tähän väitteeseen (kuva 14) samankaltaisesti kuin edelliseen, vuoteen 2020 sidottuun väittämään samalla hajonnalla (oikein 4/5, 80 %). He perustelivat vastauksensa kirjoittamalla, että näin tulisi voida tehdä, kunhan edetään yhteisten sovittujen toimintatapamallien mukaisesti. Koko asiantuntijaryhmän vastaukset (kuva 13) olivat lähes yksimielisesti (11/13) väittämän oikeellisuuden kannalla (85 %).



KUVA 13: Kognitiivisen radion tulisi tulevaisuudessa voida käyttää muiden järjestelmien taajuusresursseja (Väittäjä 49). Vastaajia 13 (koko vastaajaryhmä).



KUVA 14: Kognitiivisen radion tulisi tulevaisuudessa voida käyttää muiden järjestelmien taajuusresursseja (Väittäjä 49). Erikseen regulaatiota edustavat 5 vastaajaa).

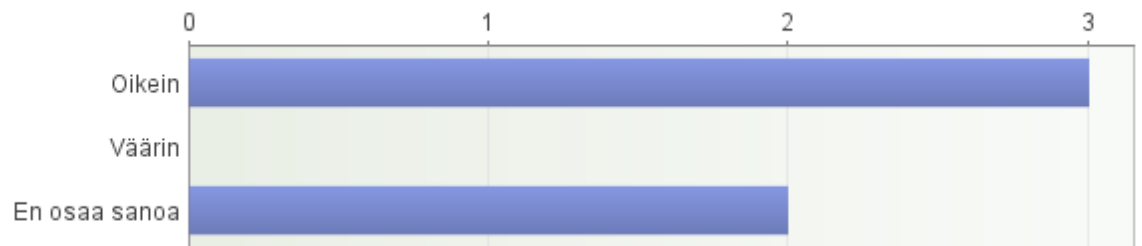
Sanallisissa perusteluissa todettiin, että kognitiivisen radion perusominaisuus ja kehittämisen lähtökohta on taajuusresurssin joustava yhteiskäyttö. Väittämän kyseenalaistanut regulaation edustaja totesi kuitenkin, että tietyissä ”taajuuskaista–radioliikennetyyppi-yhdistelmissä” kognitiivisen radion olisi mahdollista käyttää muiden järjestelmien taajuusresursseja. **Regulaation edustajat ovat tämän tutkimuksen mukaan siis sitä mieltä, että tulevaisuudessa kognitiivisen radion tulisi voida käyttää muiden järjestelmien resursseja mutta vuosi 2020 tulee muutoksen aikaan saamisen kannalta liian nopeasti.**

Kognitiivisen radion kehittämistä taajuusvapaaksi kartoittaneesta väitteestä ”Kognitiivista radiota tulisi kehittää taajuusvapaasti ennakoiden mahdollista taajuuksien yhteiskäyttöä” koko vastaajaryhmä oli lähes yksimielinen. Vastaajista 11/13 (85 %) oli taajuusvapaan kehittämisen puolella (kuva 15).



KUVA 15: Kognitiivista radiota tulisi kehittää taajuusvapaasti ennakoiden mahdollista taajuuksien yhteiskäyttöä (Väittämä 43). Vastaajia 13 (koko vastaajaryhmä).

Regulaatioryhmässä vastaukset (kuva 16) hajoavat siten, että 3/5 vastasi *oikein* ja 2/5 *en osaa sanoa*. Myönteisesti vastanneiden sanallisissa perusteluissa taajuusvapauden kehittäminen nähtiin tulevaisuuden visiona ja osana kognitiivisen radion laajakaistaisuuden hyötyjä. Toinen ”*En osaa sanoa*” vaihtoehdon valinneista kommentoi väitettä ironissävyytteisesti ilmaisulla ”mitä taajuuksien ennakoitua yhteiskäyttöä” viitaten siihen, että asia ei ole ollut esillä WRC:ssä (World Radiocommunication Conference).



KUVA 16: Kognitiivista radiota tulisi kehittää taajuusvapaasti ennakoiden mahdollista taajuuksien yhteiskäyttöä (Väittämä 43). Vastaajia 5 (regulaativovastaajaryhmä).

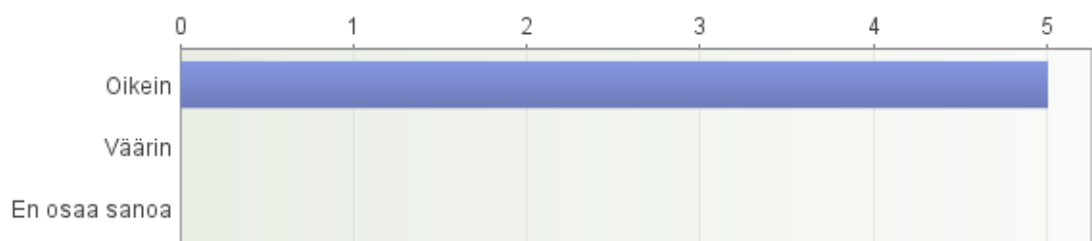
Väittämän perusteluissa regulaation asiantuntija kiteytti kognitiivisen radion kehittämisen idean seuraavasti: ”Toimintatavat kannattaa kehittää universaaleiksi ja sitten rajoittaa käyttöön annettuja taajuusalueita tilanteen ja sääntelyn mukaan.” Myös yksi teollisuuden edustajista esitti kommentissaan varauksensa taajuuksien laajamittaiselle yhteiskäytölle, vaikka periaatteessa näkeekin yhteiskäytön positiivisena ominaisuutena: ”[...] taajuusvapautta tuskin koskaan saavutetaan siinä mielessä, että mikä tahansa taajuus olisi vapaasti käytettävissä. Käyttö ohjataan tietyille alueille, mutta niiden puitteissa yhteiskäyttö tulee olemaan mahdollinen. Esim. LSA/ASA ovat yksi hyvä esimerkki tästä.” **Johtopäätös on, että taajuusvapaa kognitiivisen radion kehittäminen hyvin laajakaistaiseksi, välittämättä tämän hetken taajuudellisesta säätelystä, on se suunta, johon kehitystyössä tulee pyrkiä.**

Seuraavassa väittämäryppäessä (väittämät 45, 47 ja 57) hahmotellaan Puolustusvoimien roolia ja mahdollisia toimia taajuuksien yhteiskäyttöön liittyvissä kysymyksissä. Keskeiset kysymykset väittämien taustalla ovat: a) tulisiko Puolustusvoimien olla aktiivinen osapuoli kognitiivisen radion mahdollistajana myös taajuushallinnan näkökulmasta, vaikka Puolustusvoimat ei taajuuksien jaosta suoranaisesti päätäkään, ja b) kuinka taajuuksien mahdolliseen yhteiskäyttöön tulisi suhtautua.

Koko asiantuntijaryhmä oli lähes yksimielinen (11/13) siitä, että Puolustusvoimien tulisi olla yksi aktiivinen kehittäjä ja edelläkävijä taajuushallintaan liittyvissä asioissa. Myös koko regulaation asiantuntijaryhmä yhtyi väitteeseen. (Kuvat 17 ja 18.)

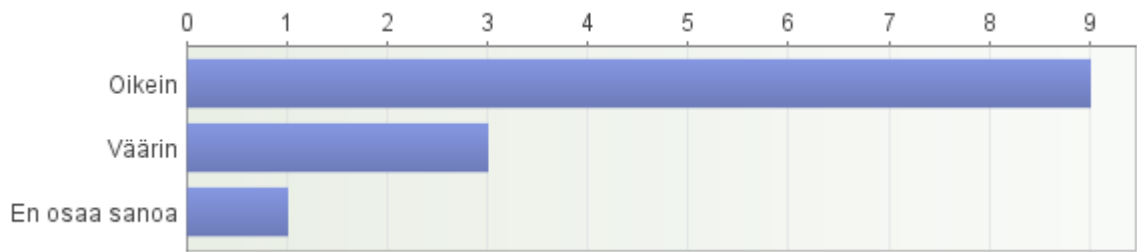


Kuva 17: Puolustusvoimien tulisi osallistua kognitiiviradiolle tarkoitettujen yhteiskäyttötaajuuksien/taajuusalueiden kehittämiseen (Väittämä 45). Vastaajia 13 (koko vastaajaryhmä)



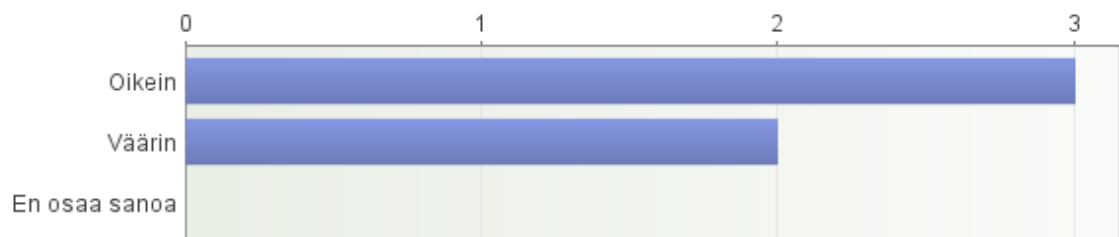
Kuva 18: Puolustusvoimien tulisi osallistua kognitiiviradiolle tarkoitettujen yhteiskäyttötaajuuksien/taajuusalueiden kehittämiseen (Väittämä 45). Vastaajia 5 (regulaatiovastaajaryhmä)

Aivan samanlaista yksimielisyyttä asiantuntijaryhmässä ei syntynyt Puolustusvoimien roolista muiden rohkaisijana (9/13, kuva 19 seuraavalla sivulla). Vastakkaiset mielipiteet perusteltiin ajatusmallilla ”ei kannata lähteä, jos sitä ei erikseen vaadita”, eli esimerkin näyttämisen ei uskottu tuottavan mitään uutta tai edistyksellistä.



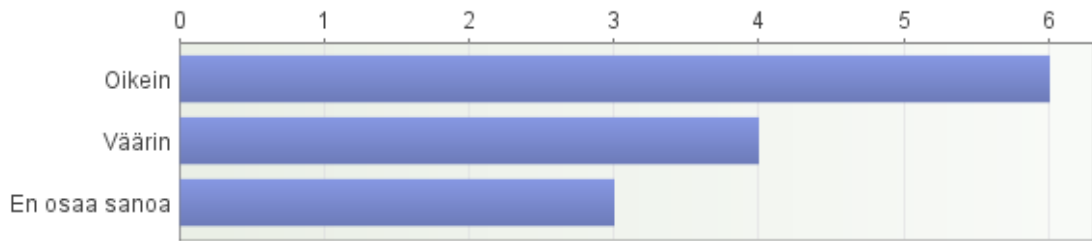
Kuva 19: Puolustusvoimien tulisi aktiivisesti rohkaista muita toimijoita kognitiiviradiolle tarkoitettujen yhteiskäyttötaajuuksien/taajuusalueiden kehittämiseen (Väittämä 47). Vastaajia 13 (koko vastaajaryhmä)

Regulaation edustajien mielipiteet hajaantuvat tässä väittämässä (kuva 20 alla). Perusteluissa regulaation edustajien näkökulmat hajosivat kahteen eri suuntaan: Samaa mieltä väittämän kanssa olleet tunnustivat regulaation muutoksen hitauden ja näkivät aktiivisen vaikuttamisen tärkeäksi. Erimieltä olleet (2 vastaajaa) olivat sitä mieltä, että muiden rohkaiseminen muutokseen ei kuulu Puolustusvoimille. Merkille pantavaa on, että ainoastaan toinen näistä vastaajista tuki kannanottoaan sanallisesti, ja hänkin ainoastaan yhdellä kommentilla.



Kuva 20: Puolustusvoimien tulisi aktiivisesti rohkaista muita toimijoita kognitiiviradiolle tarkoitettujen yhteiskäyttötaajuuksien/taajuusalueiden kehittämiseen (Väittämä 47). Vastaajia 5 (regulaatiovastaajaryhmä)

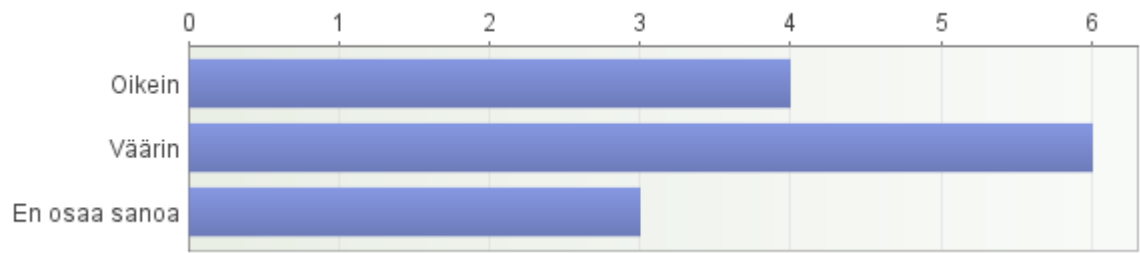
Varauksetonta kannatusta ei saanut myöskään väittämä, jossa esitettiin, että Puolustusvoimat toimisi esimerkkinä muille taajuuksien yhteiskäytön avaajana. Asiantuntijoiden mielipiteet Puolustusvoimien roolista ja Puolustusvoimien mahdollisista toimista taajuuksien avaamiseksi olivat kaksijakoiset kuvan 21 mukaisesti: kehityksessä tulisi olla aktiivisesti mukana, mutta toisaalta proaktiivisuus jakoi asiantuntijoiden mielipiteet lähes kahtia. Muiden rohkaisemista ja esimerkkinä toimimista vastustaneet eivät pitäneet aktiivisen kehittäjän roolin hakemista tarpeellisena tai Puolustusvoimien toimintaa ylipäättään kuuluvana, ja toisaalta aktiivisuus nähtiin riskinä, johon liittyy vaara menettää loputkin taajuudet.



Kuva 21: Puolustusvoimien tulisi olla näyttää esimerkkiä muille taajuuksien yhteiskäytön avaajana (Väittämä 57). Vastaajia 13 (koko vastaajaryhmä)

Asiantuntijoiden näkemyksiä taajuuksien yhteiskäytön merkityksestä kriisiaikana kysyttiin väittämässä 61: *Taajuuksien yhteiskäyttö korostuu sotaa alempiasteisissa kriiseissä (suuronnettomuus, terrori-isku)* sekä väittämässä 63 *Taajuuksien yhteiskäytöllä ei ole juurikaan merkitystä laajamittaisessa sodassa*. Taajuuksien yhteiskäytöllä tarkoitetaan tässä yhteydessä oikeutta käyttää toisiokäyttäjänä (*secondary user*) muille järjestelmille/käyttäjille allokoituja taajuuksia. Asiantuntijat olivat sitä mieltä, että taajuuksien yhteiskäytöllä on merkitystä kaikissa kriisin vaiheissa. Väittämiin esitetyt argumentit on kuitenkin kiteytettävissä yhden tutkimusta edustaneen vastaajan kommenttiin: ”Toisaalta mikäli yhteiskäyttöä ei ole rauhan aikana sallittu, tarkoittaa se käytännössä sitä, että myöskään tällaiseen kykeneviä laitteita ei ole.” **Johtopäätös on, että taajuuksien yhteiskäytön tulisi olla rauhanaikaista, mieluiten jokapäiväistä toimintaa, jotta tekniikka ja toimintatavat voisivat kehittyä.** Pelkästään normaaliolojen säädösten pohjalta ei tekniikkaa eikä toimintatapoja tule kehittää, koska valmiuslainsäädäntö tuo viranomaisille toimivaltuuksien kautta mahdollisuuksia toimia vapaammin. Tähän aspektiin palataan tarkemmin päätäntöluvussa 5.

Seuraavissa kahdessa väittämässä (kuva 22 ja kuva 23) kysyttiin asiantuntijaryhmän mielipidettä mahdollisesta Puolustusvoimien kognitiivisen radion käyttöön liittyvästä taajuuksien käyttöpolitiikasta. Osa vastaajista huomautti, että asia ei kuulu heille, mutta kertoi kuitenkin oman mielipiteensä asiaan. Huolimatta oikein/väärin-vastausten hajonnasta (kuva 22) molempien väittämien perusteluissa oli löydettävissä yhdenmukaisuus. Kuvan 22 esittelemän väittämän *Puolustusvoimien tulisi avata merkittävä määrä omia taajuusallokaatioitaan muiden käyttöön* lähes kaikki vastaukset perusteltiin kyselyissä vastavuoroisuudella (niin puolesta kuin vastaan ja *en osaa sanoa* vastanneet): jos Puolustusvoimat antavat sille annettuja taajuuksia muiden käyttöön, tulee myös vastaavasti muiden tarjota omia taajuuksia Puolustusvoimien käytettäväksi. Yksi regulaatiota edustanut vastaaja piti taajuuksien avaamista vaarallisenä kehityksenä ja perusteli näkemystään lähimenneisyyden tapahtumilla, joissa taajuudet on vähitellen siirretty sotilailta siviilimarkkinoille.



Kuva 22: Puolustusvoimien tulisi avata merkittävä määrä omia taajuusallokaatioitaan muiden käyttöön (Väittämä 53). Vastajia 13 (koko vastaajaryhmä)

Kuvan 23 väittämästä *Jos Puolustusvoimat avaa omat taajuusallokaationsa muiden tahojen käyttöön, Puolustusvoimien tulisi samalla saada oikeus käyttää näiden tahojen taajuuksia toissijaisena käyttäjänä (secondary user)* koko asiantuntijaryhmä oli yksimielinen. Väittämän vastaukset mukailevat koko asiantuntijaryhmässä edellisen väittämän (53, kuva 22) sanallisia perusteluita.



Kuva 23: Jos Puolustusvoimat avaa omat taajuusallokaationsa muiden tahojen käyttöön, Puolustusvoimien tulisi samalla saada oikeus käyttää näiden tahojen taajuuksia toissijaisena käyttäjänä (*secondary user*) (väittämä 55). Vastajia 13 (koko vastaajaryhmä)

Johtopäätöksenä on, että mikäli taajuuksien hallinnoinnissa edetään toisiokäytön mahdollistavaan suuntaan, tulee Puolustusvoimien toisaalta tukea kehitystä olemalla aktiivisesti mukana eri hankkeissa. Toisaalta tulee pitää huoli siitä, että Puolustusvoimilla on tarvittavat taajuusresurssit käytössään. Puolustusvoimien toiminta ei myöskään saa vaarantua tai vaikeutua hallitsemattomasta taajuuksien opportunistisesta käytöstä.

Kognitiivisen radion toiminnallisuuksia ja ominaisuuksia

Delfoin 1. kierroksella asiantuntijoita pyydettiin kuvailemaan ideaalista kognitiivista radiota. Kuvauksista luotu kooste, joka kiteyttää ideaalisen kognitiivisen radion toiminnallisuudet, on kirjattu tämän tutkimuksen lukuun 4.1.3 (s. 57–58). Delfoin 2. kierroksella kognitiivisen radion toiminnallisuuksia ja teknistä toteutusta koskevat väittämät luotiin edellä mainitun koosteen pohjalta. 1. kierroksen tuloksena kootut asiantuntijoiden ajatukset alistettiin näin koko

asiantuntijaryhmän arvioitavaksi ja kommentoitavaksi. Tämän tutkimusluvun tavoitteena on löytää toteutettavissa olevia keskeisiä toiminnallisuuksia, joita voidaan hyödyntää tulevaisuudessa esimerkiksi kognitiivisen radion vaatimusmäärittelyssä.

Koonnoksen pohjalta luodut väittämät, asiantuntijaryhmän vastaukset ja johtopäätökset on koottu liitteissä 7 ja 8 oleviin taulukkoihin 9 ja 10. Väittämien absoluuttiset tulokset (oikein/väärin/EOS) eivät yksinään anna totuudenmukaista kuvaa tutkimuksen tuloksista, koska useissa kyselyissä monivalinnan vastaus vasta yhdessä kommenttien kanssa kertoi asiantuntijan aidon mielipiteen. Kommenttien keskeiset johtopäätökset on kirjattu kenttään *Varaukset*. Johtopäätös-sarakkeessa on kerrottu, mitä väittämä tarkoittaa sotilaskäyttöön suunnatun kognitiivisen radion määrittelyn kannalta. Johtopäätökset jalostettiin edelleen alustaviksi operatiivisiksi vaatimuksiksi sekä teknisiksi suosituksiksi (s. 78–80). Delfoin 2. kierroksen väittämien kaikki tulokset ja kommentit löytyvät diplomityön liitteestä 4. Väittämien numerointi on liitteen mukainen ja esittämisjärjestys luvun 4.1.3. kuvauksen mukainen. Mikäli väittämät muodostavat yhdessä selkeän kokonaisuuden, ne on korostettu eri värillä.

Väittämiin saatujen vastauksien perusteella sotilaskäyttöön tarkoitetulle kognitiiviselle radiolle voidaan määrittää alustavat operatiiviset vaatimukset. Tässä yhteydessä on kuitenkin ymmärrettävä, että alla luetellut alustavat vaatimukset ovat vain tässä tutkimuksessa käsitellyistä ominaisuuksista ja toimintaympäristöstä johdetut alustavat operatiiviset vaatimukset, eikä lista ole siis kattava kuvaus sotilaallisen kognitiivisen radion operatiivisista suorituskykyvaatimuksista. Listausta voidaan kuitenkin hyödyntää sellaisenaan alustavien konseptien laadinnassa, tietopyyntöjen laadinnassa tai tarjouspyyntöjä tehtäessä.

Kognitiivisen radion alustavat operatiiviset vaatimukset:

- 1) Kognitiivisen radion tulee olla erittäin laajakaistainen (esimerkiksi 3–3000 MHz). Laajakaistaisuus ei tarkoita automaattisesti sitä, että radio käyttäisi kaikki taajuuksia, vaan kognitiivisen radio tulee voida virittyä myös muille järjestelmille varatuille taajuuksille.
- 2) Kognitiivisen radion tulee voida käyttää muille järjestelmille allokoituja taajuuksia häiritsemättä niitä.
- 3) Kognitiivisen radion tulee perustua ohjelmistopohjaiseen arkkitehtuuriin, jotta radion ylläpito ja kehittäminen on tarkoituksenmukaista ja kustannustehokasta.
- 4) Kognitiivisen radion tulee olla tietoinen ympäröivän spektrin tilasta. Sotilaallisessa käytössä spektrin tilaa tulisi voida hallita useammalla kuin yhdellä tekniikalla (ks. luku 3.1.1 DSA kuva 3).

- 5) Kognitiivisen radion tulee olla tietoinen järjestelmässä liikkuvasta datasta. Tietoliikenteen optimoinnin ja priorisoinnin kannalta radion tulee tietää, mitä tietoa järjestelmässä kulkee.
- 6) Kognitiivisen radion tulee voida ottaa vastaan radion ulkopuolelta tuotettua tietoa, esimerkiksi paikkatietoja tai eri signaalien tunnistustietoja (nk. kirjastot).
- 7) Kognitiivisen radion tulee olla riittävän yhteensopiva tiettyjen (erikseen määriteltävien) aiemman sukupolven radiojärjestelmien kanssa.
- 8) Kognitiivisen radion tulee voida liittyä myös olennaisimpiin kaupallisiin radiojärjestelmiin, jotka tulee määritellä erikseen. Tässä yhteydessä kaupalliseen kuuluvaksi tulee ymmärtää myös kaupallisin perustein rakennetut radiojärjestelmät, joita muut viranomaiset mahdollisesti käyttävät (esimerkiksi TETRA eli Suomessa VIRVE).
- 9) Kognitiiviselle radiolle voidaan ohjelmoida erilaisia toimintatapamalleja, joita se toteuttaa itsenäisesti. Perusteet toimintatapamalleille tulevat operatiivisista suunnitelmista ja erikoismääräyksistä, joiden perusteella radiota hallinnoiva taho ohjelmoi ne toteutettavaksi.
- 10) Kognitiivisen radion tulee mukautua muuttuvaan toimintaympäristöönsä vaihtamalla toimintataajuuttaan, fyysisen kerroksen parametreja (esim. symbolinopeutta ja modulaatiota), MAC-kerroksen parametreja (esim. kättely- ja suoja-aikoja) ja verkkokerroksen parametreja, kuten reititystä tai osoitteistusta.

Teknisten väittämien johtopäätöksinä hahmotellaan mahdollisia kognitiivisen radion teknisiä kehityspolkuja sekä tällä hetkellä teknisesti toteutettavia ratkaisuja. Teknisiä vaatimuksia ei tässä yhteydessä esitetä, koska tekninen kehitys on niin nopeaa, että tulevaisuudessa valideja vaatimuksia on mahdotonta ennustaa. Tässä yhteydessä tekniset väittämät johdetaan suositukseksi, jotka ainakin tällä hetkellä asiantuntijoiden mukaan on mahdollista teknisesti toteuttaa.

Teknisiä suosituksia:

- 1) Kognitiivisen radion yhteensopivuus aiemman sukupolven radioihin sekä kaupallisiin radiojärjestelmiin voidaan toteuttaa gateway-ratkaisujen kautta.
- 2) Sotilaalliseen käyttöympäristöön suunniteltu kognitiivinen radio voi toimintaperiaatteeltaan ja rakenteeltaan perustua kaupallisiin tuotteisiin (COTS). Sovellusten ja ohjelmistojen tulisi olla turvallisuuskulman ja huoltovarmuuden takia sotilaalliseen käyttöön suunniteltuja ja mielellään kotimaisia tuotteita.
- 3) Päätelaitteiden ja kognitiivisen radion välisten tiedonsiirtovaatimusten ei tule rajoittua pelkästään sotilaallisiin tai kaupallisiin ratkaisuihin. Tärkein vaatimus on yhteyksien toimivuus ja luotettavuus. Turvallisuusaspekti tulee ottaa huomioon erityisen tarkasti tiedonsiirtoprotokollien ja salausten valinnassa.

4) Kognitiivisten radioiden tulee voida vaihtaa ja välittää keskenään informaatiota (esimerkiksi spektrin tilasta tai siirrettävän tiedon laadusta). Kognitiivisten radioiden väliset, nk. sisäiset yhteydet, voivat olla itse kehitettyjä, kaupallisia tai MIL-standardoituja, mutta ensisijaisia vaatimuksia ovat luotettavuus ja turvallisuus. Kansainvälinen yhteensopivuus tulee ottaa huomioon erikseen vaatimusmäärittelyssä, mikäli sellaista ominaisuutta halutaan.

4.2.3 Päätelmät

Delfoin 2. kierroksella kognitiivisen radion ominaisuuksien tärkeysjärjestystä tarkennettiin neljästä eri näkökulmasta: a) suorituskykyliisä, b) tekninen toteutus, c) tuotekehitys ja c) Puolustusvoimien johtamisjärjestelmien kehitys. Kehittämisen kokonaisuus, eli Puolustusvoimien johtamisjärjestelmien kehittämisen näkökulma, muodostuu kolmesta ensimmäisestä näkökulmasta: tulee saada lisää suorituskykyä (a) tekniikalla (b), joka on toteutettavissa (c) hyväksyttävällä riskillä ja kohtuullisilla kustannuksilla (myös liite 4 s. 2, kommentit-osio). Johtamisjärjestelmien kehittämisen näkökulma olisi teoriassa johdettavissa kolmen ensimmäisen näkökulman perusteella. Eri näkökulmien painoarvot eivät kuitenkaan käytännössä koskaan ole samanarvoisia: on olemassa hintakattoja ja erilaisia painotuksia, jotka vaihtelevat hankkeen toimeksiannon perusteella. Toistuvuutta ja jatkuvuutta (siis sellaisia tekijöitä, jotka eivät käytännössä muutu, oli hanke mikä tahansa) on kuitenkin löydettävissä asiantuntijaryhmistä, jotka ovat vastuussa Puolustusvoimien hankintojen eri osien toimeenpanossa ja valmistelussa. Tässä tutkimuksessa pysyvinä elementteinä on tunnistettu eri asiantuntijaryhmien vastuut eri näkökulmien kehittämisessä, ja heidän näkemyksiään on painotettu koko asiantuntijaryhmän edelle.

Suorituskykyliisän ja Puolustusvoimien johtamisjärjestelmien kehityksen näkökulmaa on painotettu operatiivisen asiantuntijaryhmän näkemyksellä. Tämä on perusteltua, koska Puolustusvoimien hankkeissa operatiivisten asiantuntijoiden tehtävä on laatia suorituskykyvaatimukset, joiden avulla kerrotaan, mitä ja minkälaista suorituskykyä halutaan. Teknisen toteutuksen näkökulmassa painotetaan teollisuuden vastaajaryhmän näkemystä tärkeysjärjestyksestä, koska teollisuuden vastuulla on kognitiivisen radion rakentaminen, mikäli sellainen tullaan rakentamaan. Kognitiivisen radion tutkimusta edustavan vastaajaryhmän näkemyksiä on painotettu tuotekehityksen ja kypsyyden arvioissa, koska voidaan olettaa, että tällä ryhmällä on ajallisesti pisin perspektiivi ja ammattitaito teknisen kypsyyden arviointiin. Seuraavassa taulukossa 11 on esitetty eri asiantuntijaryhmien näkemykset muodostettuun kognitiivisten ominaisuuksien tärkeysjärjestykseen eri näkökulmista.

Taulukko 11: Koontitaulukko eri asiantuntijaryhmien näkemyksellä painotetusta kognitiivisten ominaisuuksien tärkeysjärjestyksestä eri näkökulmista

	eivät ole	ovat vähän	ovat kohtuullisesti	ovat hyvin	ovat erittäin hyvin	ei kannata	Yhteensä	Viitteellinen keskiarvo
	1	2	3	4	5			
Suorituskykyllisän näkökulmasta (OPERATIIVINEN)	0	0	0	0	6	0	6	5
Teknisen toteutuksen näkökulmasta (TEOLLISUUS)	0	1	0	2	1	0	4	3,75
Tuotekehityksen (kognitiivitekniikan kypsyyden) näkökulmasta (TUTKIMUS)	0	2	1	0	1	0	4	3
PV:n johtamisjärjestelmien kehityksen näkökulmasta (OPERATIIVINEN)	0	0	0	1	5	0	6	4,83

Suorituskykyllisän näkökulmasta operatiiviset asiantuntijat arvioivat kognitiivisten ominaisuuksien tärkeysjärjestyksen ja perustelut erittäin valideiksi. Heidän arvionsa mukaan luodun tärkeysjärjestyksen soveltuvuus koko Puolustusvoimien johtamisjärjestelmän kehitykselle on niin ikään erittäin validi. **Johtopäätöksenä on, että järjestys, jonka mukaisesti suorituskykyllisää kannattaa lähteä hankkimaan, on seuraava:**

- 1) **dynaaminen spektrin hyväksikäyttö (DSA)**
- 2) **yhteyksien adaptiivisuus ja radioresurssien hallinta (RRM ja SLA)**
- 3) **älykäs verkonmuodostus (SON & RBR).**

Järjestys korreloi erittäin hyvin myös yleisemmin johtamisjärjestelmien kehityksen näkökulmasta kanssa. Operatiivinen vastaajaryhmä oli poikkeuksellinen yksimielinen arviossaan eikä esittänyt varauksia kommenttiosiossa.

Teknisen toteutuksen näkökulmasta teollisuuden asiantuntijaryhmä arvioi ominaisuuksien tärkeysjärjestyksen hyvin validiksi. Vastausten keskiarvoa pudotti yhden asiantuntijan arvio, jonka mukaan järjestys *on vähän* validi. Asiantuntija perusteli vastaustaan sillä, että verkkotason ominaisuudet ovat merkityksellisempiä kokonaissuorituskyvyn kannalta. Perustelu on näkökulmaltaan laajempi, kuin mistä tässä tutkimuksessa on kyse – tarkastelun keskiössä on kognitiivinen radio. Verkkotason ominaisuuksia ja verkon suorituskykyä on kuitenkin tarkasteltu kognitiivisten ominaisuuksien (esim. SON) kautta. Huomio on silti aiheellinen, koska jokainen kognitiivinen ominaisuus tehostuu, jos ominaisuutta voidaan käyttää hyväksi laajalla

alueella (verkon tapaan) ja jos tietoa voidaan jakaa esimerkiksi spektrin tilasta. Selkeä jatkok tutkimuksen tarve onkin verkkotason toimintojen tutkiminen sotilaallisessa käyttöympäristössä. Mikäli mainitun eri mieltä olleen asiantuntijan näkemys jätetään huomioimatta, myös teknisen toteutuksen näkökulma ylittää 4:n keskiarvon (4.33). **Tällöin johtopäätös on, että ominaisuuksien tärkeysjärjestys on teknisen toteutuksen näkökulmasta toteuttamiskelpoinen.**

Tutkimuksen asiantuntijaryhmän arvio tekniikan kypsyydestä hajosi merkittävästi. Ryhmä arvioi, että kyseiset ominaisuudet pitävät sisällään jonkinasteisen riskin, koska ne ovat vielä osittain tutkimusasteella. Huomattavaa kuitenkin on, että myös tutkimusta edustavan ryhmän mielestä muodostunut ominaisuuksien tärkeysjärjestys on erittäin validi niin suorituskykyllisän kuin Puolustusvoimien johtamisjärjestelmien kehittämisen näkökulmasta. **Johtopäätöksenä on, että tuotekehityksen näkökulmasta ominaisuuksien kehittämisessä on riskiä.** Osa tässäkin tutkimuksessa käsitellyistä ominaisuuksista, esimerkiksi MIMO-antennit, on teknisen kypsyyden kannalta kehittyneempiä kuin nyt neljä ensimmäiseksi valikoitunutta ominaisuutta. Asiantuntijaryhmä arvioi, että muodostunut tärkeysjärjestys on *kohtuullisesti* validi tuotekehityksen näkökulmasta. Tuotekehityksen riskiä ei arvioitu, joten suoraa johtopäätöstä riskin todennäköisyydestä ei voi tämän tutkimuksen perusteella tehdä.

Merkittävä tulos tässä tutkimusosiossa on myös se, että yksikään vastaajista ei käyttänyt vastausvaihtoehtoa ”*ei kantaa*”. Tulos on tulkittavissa siten, että aihe on koettu ajankohtaiseksi ja tärkeäksi ja toisaalta myös niin, että kysymykset ovat olleet selkeitä. Tutkimuksen validiteetin kannalta tulos kertoo, että vastaajat ovat kokeneet vastaamisen merkitykselliseksi: vastaajan kannalta helpoin ja turvallisin vaihtoehto olisi ollut vastata neutraalisti eli *ei kantaa*.

Kognitiivisen radion tarkoituksenmukainen tai lähes optimaalinen toiminta edellyttää toimintaympäristön muutosta eli spektrin tai tarkemmin ottaen spektrin hallinnoinnin muutosta. Yleistäen kognitiivisesta radiosta ja sen spektrin tarpeesta voidaan sanoa, että mitä laajempi taajuuskaista (eli mitä enemmän spektriä) sitä paremmat toimintamahdollisuudet kognitiivisella radiolla on. Vuoteen 2020 mennessä merkittäviä muutoksia spektrissä ja spektrin hallinnoinnissa ei ole odotettavissa. Kehitystä kuitenkin haetaan, ja suunta on kognitiivisen radion käytölle edullinen. Kehityksen nopeutta ja muutosten syvyyttä ei tosin ole mahdollista tarkasti ennustaa, koska WRC, jossa yhteiset taajuuksien käytösäännöt sovitaan, on ITU:n yhteistyöfoorumi, jonka jäseninä on 193 valtiota.¹² Konsensuksen löytäminen lähes 200 valtion kesken

¹² www.itu.int sivuston mukaan 7.4.2015 jäsenmaita ITU:ssa on 193. (http://www.itu.int/online/mm/scripts/mm.list?_search=ITUstates&_languageid=1)

voi olla hyvinkin haastavaa. Spektri tullee vielä vuonna 2020 olemaan hajanainen ja kognitiivisen radion käyttömahdollisuudet merkittävästi rajoittuneet. Positiivinen kehitys on mahdollista 2020-luvun aikana, mutta kuten moni asiantuntija argumentoi, regulaatiossa muutokset ovat hitaita.

Kansallisella tasolla spektrin reguloinnista vastaa Viestintävirasto. Puolustusvoimat itse vastaa sen spektrin osan käytöstä, joka sille on allokoitu. Asiantuntijoiden mielestä Puolustusvoimat voisi ottaa aitojen kaatajan tai edelläkävijän roolin taajuuksien yhteiskäytön avaajana vastavuoroisuusperiaatteen mukaisesti: mikäli Puolustusvoimat antaa sille jaettuja taajuuksia muiden käyttöön, Puolustusvoimat itse saa käyttöönsä jollekin toiselle jaettuja taajuuksia.

Toimintaympäristö eli spektri on vuonna 2020 todennäköisesti vielä sirpaleisempi, kuin se on tänä päivänä. Käyttäjää on enemmän, ja siirretyn datan määrä on jatkuvassa kasvussa. (Ks. myös johdantoluku 1.1, sivu 3.) Todennäköistä on, että suurin osa spektristä on edelleen rajoitettu vain tiettyjen järjestelmien tai organisaatioiden käyttöön, käyttivät ne heille annettua spektriä tai eivät. Todennäköistä on myös se, että vaikka jollekin organisaatiolle tai järjestelmälle osoitettua spektriä olisi tarpeettomasti vapaana, ei kognitiivinen radio voi käyttää sitä hyväkseen, koska regulaatio kieltää spektrin opportunistisen käytön.

Taajuuksien säätelyä koskevien väitteiden kommentteja leimasi pessimismi: pikaisiin muutoksiin ei uskottu. Huomattavaa kuitenkin on, että muutoksen uskotaan lopulta tapahtuvan – joskin hitaasti. Osa panelisteista arvioi, että jossakin vaiheessa 2020-lukua spektrin avoimempi käyttö muillakin kuin testitaajuuskaistoilla olisi mahdollista. Viime vuosina on ollut paineita siirtää sotilalliseen käyttöön allokoituja taajuuksia siviilitoimijoille (ks. esim. liite 4, kohta 54). Huoli vähenevästä taajuusresurssit on ilmeinen: ennakoitavissa olevassa regulaation muutoksessa halutaan olla mukana mutta saavutetuista eduista ei haluta luopua ilman varmuutta, että muutos vie asioita positiiviseen suuntaan.

Alustavia operatiivisia vaatimuksia sotilaskäyttöön suunnatulle kognitiiviselle radiolle tunnistettiin 10 kappaletta. Vaatimukset muodostettiin panelisteille esitetyistä väittämistä. Väittämät ja niistä johdetut johtopäätökset varauksineen on esitetty liitteen 7 taulukossa 9.

Tutkimuksessa myös sivuttiin mahdollisia teknisiä ratkaisuja kognitiivisen radion eri yhteyksien toteuttamisesta ja yhteensopivuusvaatimuksista. Väittämät ja niistä johdetut johtopäätökset varauksineen on esitetty liitteen 8 taulukossa 10. Johtopäätöksistä edelleen jalostetut vaatimukset ja tekniset suositukset on listattu erikseen kappaleen 4.2.2 loppuosaan (s. 78–80).

4.3 Delfoin soveltuvuuden arviointi

Delfoi soveltuu menetelmänä hyvin juuri tulevaisuutta kartoittavaan tutkimukseen. Kognitiivitekniikka on uusi orastava tekniikka, johon myös kaupallisella puolella on intressejä. Toinen mahdollinen lähestymistapa olisi ollut kognitiivisen radion simuloiminen ja tulosten vertaaminen olemassa oleviin järjestelmiin. Simuloiminen olisi kuitenkin ollut teknisesti hyvin haastavaa ja sisältänyt myös merkittävästi spekulatiivisuutta eri parametrien valinnoissa ja ominaisuuksien kuvauksissa.

Asiantuntijoiden valinta on delfoin toimivuuden kannalta ratkaisevaa. Massaotannan sijaan delfoin ideologiaan ja taloudelliseen käyttöön sopii parhaiten suppeahko mutta hyvin rajattu otanta eli informantijoukko. Tällöin jokaisella vastauksella on painoarvoa ja jokainen vastaus voidaan vastaajien statuksen myötä olettaa totuudenmukaiseksi ja perustelluksi. Haastavaksi tässä tutkimuksessa muodostui aluksi oikeiden asiantuntijoiden löytäminen. Kognitiivisen radion tutkijoita on Suomessa vain kohtuullinen määrä samoin kuin sotilaallisen toimintaympäristön asiantuntijoita: vaikka yksittäisen osa-alueen osaajia löytyy, on haasteellista löytää monialaisia, molempien osa-alueiden ammattilaisia. Tähän tutkimukseen asiantuntijat valikoituivatkin suositusten perusteella. Koska kyselykierroksia oli kaksi, olennaiseksi muodostui myös asiantuntijoiden sitoutuminen vastaamaan osin raskaisiin kyselykierroksiin. Tässä tutkimus onnistui yli odotusten. Asiantuntijat vastasivat tutkimuskyselyyn laajasti ja väsymättömästi vastausprosentin yltäessä toisella kierroksella 93 %:iin.

Tulosten analysoinnissa numeerinen järjestys yksin ei anna tuloksista oikeaa kuvaa, vaan myös kommentit ja perustelut ovat keskeisessä roolissa. Kuten tämäkin tutkimus osoittaa, tulee priorisointijärjestystä hakevissa tutkimuksissa ottaa huomioon käytetyn kyselytyypin rajoitteet sekä ne inhimilliset tekijät, joita esimerkiksi pelkkä järjestysarvostelma tai onnistunutkaan monivalintatehtävä ei pysty tavoittamaan. Tässä tutkimuksessa esimerkiksi tärkeysjärjestyksen arvioinnissa viimeiseksi jätetty ominaisuus (spektrimarkkinat) ei päätenyt viimeiselle sijalle siksi, että se olisi kognitiiviselle radiolle merkityksetön, vaan sen tähden, että kommenttiensa perusteella vastaajat arvioivat järjestystä osittain rahan ja ajankohtaisuuden kautta.

Täydellinen yksimielisyys syntyi ainoastaan yhdestä väittämästä (liite 4, väittämä 55). Kohtuullinen hajonta sekä monivalintatehtävissä että esitetyissä perusteluissa tukevat tutkimuksen onnistuneisuutta: Moniäänisyys on tutkimuksen validiteetille arvo, joka kertoo asiantuntija-

joukon toivotun kaltaisesta heterogeenisuudesta, kuten heidän edustamiensa tahojen erilaisista intresseistä. Toisaalta sekä vastausjakaumissa että perusteluissa on tasaisen hajonnan sijaan nähtävissä selvät painopistealueet, mikä kertoo siitä, etteivät tulokset ole sattumaa vaan perusteltujen näkemysten heijastuksia. Reliabiliteettia arvioitaessa voidaan todeta, että tämän tutkimuksen tulokset ovat yhteneviä monilta osin myös muiden tahojen tekemiin tutkimuksiin nähden esimerkiksi, Thoresen ym. 2012, NATO 2014, WINNF 2010. Myös eri vastaajaryhmien vastauksista muodostui omat kokonaisuutensa. Itse asiassa vastaajaryhmät olisikin voitu muodostaa tuloksista sisällönanalyysin kautta jo pelkkien vastausten perusteella, kun ne nyt oli koottu etukäteen.

Tällä defloi-tutkimuksella ei lähtökohtaisesti haettu konsensusta asiantuntijoiden välillä. Iteratiivisuus ja palaute toteutettiin toisella kierroksella tarkentamalla ja syventämällä eri asiantuntijoiden esittämiä näkemyksiä siten, että ne asetettiin koko paneelin arvioitavaksi. Tässä tavoitteessa onnistuttiin hyvin, mikä näkyi myös tunteen palona osassa vastauksissa. Samalla aineistosta alkoi hahmottua myös voimakkaan ja löyhemmän konsensuksen alueita ja toisaalta joitakin selkeitä näkemyseroja. Aineisto käsittelyssä on pyritty mahdollisimman suureen avoimuuteen, ja materiaali, josta tutkimuksen johtopäätökset on tehty, on esitetty joko leipätekstissä tai liitteissä.

Delfoin toisella kierroksella vastaukset kerättiin Webropol-ohjelmistolla. Ohjelmisto soveltui hyvin kysymysten laadintaan ja vastausten purkamiseen sekä analyysiin. Heikkoutena oli se, että kokonaiskuva kysytystä ilmiöstä saattoi jäädä osalle vastaajista epäselväksi. Menetelmän toisena pulmana mainittakoon, että delfoin 2. kierroksella osa vastaajista oli väittämiin vastatessaan edelleen kiinni kognitiiviradion määritelmässä; he eivät huomanneet, että tehtävänanto oli vaihtunut ja nyt vaadittiinkin keskittymistä kognitiivisen radion toimintamahdollisuuksiin. Kokonaisuuden hahmottamista olisi ehkä voitu tukea jakamalla vastaajille kyselyn yhteydessä erikseen esimerkiksi Word-muotoinen koonnosdokumentti, josta he olisivat voineet lukea väitteiden taustalla vaikuttaneen kuvauksen kognitiivisen radion toiminnallisuuksista. Toisaalta dokumentin jakaminen olisi voinut johtaa kokonaisuuden arviointiin, mikä taas ei ollut tavoitteena. Tarkoituksena sen sijaan oli, että väittämiin on mahdollista vastata yksitellen sellaisenaan ja kokonaiskuva muodostetaan induktiivisesti vastausten perusteella.

Kysymysten laadintaan käytettiin molemmilla kierroksilla paljon aikaa. Saadun palautteen perusteella asiantuntijat pitivät kysymyksiä ja kysymystenasettelua pääosin onnistuneina, tosin myös paikoin haastavina. Tutkimusaineistoa syntyi paljon, mistä johtuu myös aineiston analyysiin keskittyvän luvun 4 laajuus.

4.4 Johtopäätökset

Ominaisuuksien tärkeysjärjestys neljän ensimmäisen ominaisuuden osalta muodostui delfoin

1. kierroksen perusteella seuraavanlaiseksi:

- 1) dynaaminen spektrin hyväksikäyttö (DSA)
- 2) yhteyksien adaptiivisuus ja radioresurssien hallinta (RRM ja SLA)
- 3) älykäs verkonmuodostus (SON & RBR).

Delfoin 2. kierroksella kognitiivisen radion ominaisuuksien tärkeysjärjestystä tarkennettiin neljästä eri näkökulmasta: suorituskykyllisän, teknisen toteutuksen, tuotekehityksen ja Puolustusvoimien johtamisjärjestelmien kehityksen näkökulmista.

Suorituskykyllisän näkökulmasta operatiiviset asiantuntijat arvioivat tärkeysjärjestyksen ja perustelut erittäin valideiksi, ja teknisen toteutuksen näkökulmassa teollisuuden asiantuntijaryhmä arvioi ominaisuuksien tärkeysjärjestyksen hyvin validiksi. Tutkimuksen asiantuntijaryhmän arvio tekniikan kypsyydestä hajosi merkittävästi. Ryhmä arvioi, että kyseiset ominaisuudet pitävät sisällään jonkinasteisen riskin, koska ne ovat vielä osittain tutkimusasteella. Huomattavaa kuitenkin on, että myös tutkimusryhmän mielestä muodostunut ominaisuuksien tärkeysjärjestys on erittäin validi niin suorituskykyllisän kuin Puolustusvoimien johtamisjärjestelmien kehittämisen näkökulmasta. Ominaisuuksille syntynyt tärkeysjärjestys ei myöskään muuttunut toisen kierroksen jälkeen, vaan käsitys järjestyksen oikeellisuudesta vahvistui.

Delfoin 1. kierroksella mukana olleet kognitiivisen radion ominaisuudet – kognitiiviset häirintäjärjestelmät, antennijärjestelmät (MIMO) ja kaupalliset spektrimarkkinat – jäivät alemmille sijoille, eikä niitä arvotettu uudestaan delfoin 2. kierroksella. Edellä mainitut ominaisuudet koettiin enemmänkin tehostavan kognitiivisen radion toimintaa. Spektrimarkkinat jakoivat asiantuntijoiden mielipiteitä eniten, mikä vaikutti vastausten perusteella johtuvan enemmänkin näkökulmaeroista kuin ominaisuuden merkityksettömyydestä.

Delfoi-aineistossa esitetyistä käyttöön oton ja tekniikan kehityksen esteistä muodostettiin sisällönanalyysin avulla viisi kategoriaa. Puolustusvoimien omaa kehittämistä ja teknologista osaamista hidastavat asiantuntijoiden mielestä eniten upseerien osaamisen puute niin operatiivisella kuin tekniselläkin tasolla. Huolestuttavia ovat erityisesti havainnot upseerien osaamisvajasta kehittyvien teknologioiden mahdollisuuksien tunnistamisessa ja kyvyssä muuntaa mahdollisuudet ymmärrettäviksi vaatimuksiksi sekä edelleen mahdollisuuksien jalostamisessa toimiviksi toimintatapamalleiksi. Toiseksi Puolustusvoimien kognitiivisen radion kehittämistä

rajoittavaksi tekijäksi tunnistettiin rahoituksen niukkuus: uudet teknologiat ovat kalliita hankkia, ja vielä kalliimpaa on niiden kehittäminen. Yleisiksi kognitiivitekniikan yleistymisen esteiksi tutkimuksessa havaittiin tekniikan ainakin osittainen kehittymättömyys (myös liite 4, väittämä 39), lainsäädännön ja regulaation jäykkyys sekä tietoturvan hallinta (ks. s. 53–56). Tietoturva korostuu sotilaallisissa järjestelmissä jo muutenkin, mikä ilmentyy esimerkiksi operatiivisten tietoliikenneyhteyksien verrattain voimakkaalla salaamisella.

Vuosi 2020 valittiin tutkimuksessa kognitiivisen radion toimintaympäristön arvioinnin kohdevuodeksi, koska 20 vuotta on tyypillisesti se aika, joka kestää idean esittämisestä teknologian käyttöönottoon (Kosola 2013, s. 18). Joseph Mitola esitti ideansa kognitiivisesta radiosta vuonna 1999 (Mitola 1999), josta vuonna 2020 on kulunut 21 vuotta. Keskeisenä johtopäätöksenä tutkimusaineiston perusteella voidaan esittää, että merkittävää muutosta spektrissä ja sen säätelyssä ei todennäköisesti tule tapahtumaan vuoteen 2020 mennessä. Spektri tulee kuitenkin hajaantumaan ja pirstoutumaan entisestään, ja spektriä hyväksikäyttävät järjestelmät ja päätelaitteet tullevat lisääntymään. Asiantuntijoiden mielestä kognitiivisen radion tulisi tulevaisuudessa voida käyttää muille järjestelmille osoitettuja taajuusresursseja taajuuksien ollessa käyttämättömänä ja lisäksi kognitiivista radiota kannattaisi kehittää taajuusvapaasti. Taajuusvapaudella tarkoitetaan sitä, että kognitiivinen radio olisi hyvin laajakaistainen eikä taajuuskaistaa rajoitettaisi perinteiseen ajatteluun, jossa kenttäradiot toimivat ainoastaan taajuusalueella 30–88 MHz. Tulevaisuuden kognitiivinen radio voisi toimia esimerkiksi 3–3000 MHz:n taajuusalueella ja käyttää siellä olevia vapaita taajuuksia ennalta sovitulla tavalla, jonka päättää viime kädessä Viestintävirasto.

Taajuuksien yhteiskäyttö tai oikeus käyttää muille allokoituja taajuuksia toisiokäyttäjänä on yksi merkittävimmistä muutoksista, joita kognitiivinen radio voi tulevaisuudessa mahdollistaa taajuuksien hallinnoinnin saralla. Taajuuksien yhteiskäytön tulisi olla osa normaalioloissa tehtävää harjoittelua, mieluiten jokapäiväistä toimintaa, jotta tekniikka ja toimintatavat voisivat kehittyä. Mikäli taajuuksien hallinnoinnissa edetään toisiokäytön mahdollistavaan suuntaan, tulee Puolustusvoimien toisaalta tukea kehitystä olemalla aktiivisesti mukana eri hankkeissa mutta myös pitämällä huoli siitä, että niillä on käytössään tarvittavat taajuusresurssit. Myöskään Puolustusvoimien toiminta ei saa vaarantua tai vaikeutua taajuuksien hallitsemattomasta opportunistisesta käytöstä.

Taajuuksien toisiokäyttömahdollisuudella on merkitystä niin normaaliolojen häiriötilanteissa kuin poikkeusoloissakin. Häiriötilanteen ja kriisin luonteesta riippuen muutokset spektrissä ovat mahdollisia esimerkiksi lähetysasemien tuhoutumisen tai sähkönjakelun häiriöiden myö-

tä: on jopa todennäköistä, että kriisi- tai sotatoimialueella spektriä käyttävä siviili-infrastruktuuri on tuhoutunut ja spektriä ”vapautuu” merkittäviä määriä. Tällöin spektrin opportunistinen käyttö on mahdollista ja jopa suotavaa. Sotilaallisilla järjestelmillä voidaan tällöin korvata esimerkiksi tuhoutunutta tiedonsiirtoinfrastruktuuria ja luoda alueella toimiva tiedonsiirtojärjestelmä, joka parhaimmillaan on yhteensopiva esimerkiksi matkapuhelimien kanssa. Kognitiivisella radiolla voi siis olla merkitystä myös viranomaisyhteistyölle.

Viranomaisyhteistyötä sivuttiin myös delfoin toisella kierroksella, jossa yhtenä väittämänä (liite 4, väittämä 41) oli, että ”*Kognitiivisella radiolla ei tule olemaan suurta merkitystä viranomaisyhteistyölle ja sen kehittymiselle Suomessa.*” Asiantuntijat kuitenkin pitivät kognitiivista radiota yhtenä merkittävistä yhteistyön mahdollistajista tulevaisuudessa. Yhteensopivan tiedonsiirtojärjestelmän tarve viranomaisten kesken nyt ja tulevaisuudessa on ilmeinen, mistä osoituksena on nykyään käytössä oleva TETRA-teknologiaan perustuva VIRVE-järjestelmä.

Toimintaympäristön muutoksella on merkitystä kognitiivisen radion käytölle normaaliolojen häiriötilanteissa ja poikkeusoloissa myös spektrin kannalta. Kokonaan oma tutkimusaiheensa olisi arvioida tai simuloida vapautuvan spektrin määrä erilaisissa uhkaskenaarioissa.

Kognitiivisen radion kehityksen ja käyttöönoton kannalta regulaation muutoksen hitaus on huolestuttava. Pahimmillaan taajuuksien hallinnoinnin jäykkyys voi hidastaa tai jopa estää positiivisen teknologisen kehityksen. Toisaalta positiivisena esimerkkinä regulaation ketteryydestä Suomessa toimi vastikään Elinkeinoelämän keskusliiton hallituksen puheenjohtaja ja Nokian nousukauden aikana johtoryhmän jäsenenä ollut Matti Alahuhta, joka Ylen Ykkösämun haastattelussa 21.2.2015 totesi regulaation joustavuuden olleen yksi avaintekijöistä Nokian noustessa aikanaan johtavaksi matkapuhelinvalmistajaksi (Alahuhta 2015). Regulaattori ja lainsäätäjä voivat yhdessä, niin halutessaan, olla hyvinkin ketteriä ja nopeita päätöksissään.

Taustakirjallisuuden ja delfoi-kyselyjen pohjalta esitetään seuraavaksi sotilaskäyttöön suunnatulle kognitiiviselle radiolle 10 operatiivista vaatimusta. Vaatimukset muodostettiin panelisteille esitettyjen väittämien ja niihin saatujen vastausten perusteella. Väittämät ja niistä johdetut johtopäätökset varauksineen on esitetty liitteessä 7 taulukossa 9. Alustavat vaatimukset ovat tässä tutkimuksessa käsitellyistä ominaisuuksista ja toimintaympäristöstä johdettuja operatiivisia suorituskykyvaatimuksia. Lista ei siis ole kattava kuvaus sotilaallisen kognitiivisen radion operatiivisista suorituskykyvaatimuksista.

Alustavat operatiiviset suorituskykyvaatimukset

Kognitiivisen radion tulee:

- 1) olla erittäin laajakaistainen (esimerkiksi 3–3000 MHz)
- 2) voida käyttää muille järjestelmille allokoituja taajuuksia häiritsemättä niitä
- 3) perustua ohjelmistopohjaiseen arkkitehtuuriin
- 4) olla tietoinen ympäröivän spektrin tilasta
- 5) olla tietoinen järjestelmässä liikkuvasta datasta
- 6) voida ottaa vastaan radion ulkopuolelta tuotettua tietoa
- 7) olla riittävältä osin yhteensopiva aiemman sukupolven radiojärjestelmien kanssa
- 8) voida liittyä myös olennaisimpiin kaupallisiin ja viranomaiskäytössä oleviin radiojärjestelmiin
- 9) toteuttaa itsenäisesti sille ohjelmoituja toimintatapamalleja
- 10) mukautua muuttuvaan toimintaympäristöönsä vaihtamalla toimintataajuuksiaan, fyysisen kerroksen parametreja, MAC-kerroksen parametreja ja verkkokerroksen parametreja.

Tutkimuksessa sivuttiin kognitiivisen radion eri yhteyksien toteuttamismahdollisuuksien ja yhteensopivuusvaatimusten mahdollisia teknisiä ratkaisuja. Väittämät ja niistä johdetut johdopäätökset varauksineen on esitetty liitteessä 8 taulukossa 10. Vaatimukset ja tekniset suositukset on listattu erikseen kappaleen 4.2.2 loppuosaan (s. 78–80).

Alustavat tekniset suositukset ovat:

- 1) Kognitiivisen radion yhteensopivuus aiemman sukupolven radioihin sekä kaupallisiin radiojärjestelmiin voidaan (ja ainakin vielä tällä hetkellä tulisi) toteuttaa gateway-ratkaisuiden kautta.
- 2) Sotilaalliseen käyttöympäristöön suunniteltu kognitiivinen radio voi toimintaperiaatteeltaan ja rakenteeltaan perustua kaupallisiin tuotteisiin (COTS). Sovellusten ja ohjelmistojen tulisi olla sotilaalliseen käyttöön suunniteltuja ja mielellään kotimaisia tuotteita turvallisuusnäkökulman takia.
- 3) Päätelaitteiden ja kognitiivisen radion välisten tiedonsiirron vaatimusten ei tule rajoittua pelkästään sotilaallisiin tai kaupallisiin ratkaisuihin. Tärkein vaatimus on yhteyksien toimivuus ja luotettavuus. Turvallisuusnäkökulma tulee ottaa huomioon erityisen tarkasti tiedonsiirtoprotokollien ja salausten valinnassa.
- 4) Kognitiivisten radioiden tulee voida vaihtaa ja välittää keskenään informaatiota eli tietoa esimerkiksi spektrin tilasta tai siirrettävän tiedon laadusta. Kognitiivisten radioiden väliset, nk. sisäiset yhteydet voivat olla itse kehitettyjä, kaupallisia tai MIL-standardoituja, mutta en-

sisijaiset vaatimukset ovat luotettavuus ja turvallisuus. Kansainvälinen yhteensopivuus tulee ottaa huomioon erikseen vaatimusmäärittelyssä, mikäli sellaista ominaisuutta halutaan.

Täydellisen yksimielisiä vastaajat olivat delfoi-kierrosten aikana ainoastaan yhdestä esitetystä väittämästä (liite 4, väittämä 55): *Jos Puolustusvoimat avaa omat taajuusallokaationsa muiden tahojen käyttöön, Puolustusvoimien tulisi samalla saada oikeus käyttää näiden tahojen taajuuksia toissijaisena käyttäjänä (secondary user)*. Vastausten hajonta muissa väittämissä on seurausta ennen kaikkea siitä, että kunkin asiantuntijan edustama taustaryhmä vaikutti vahvasti hänen asenteisiinsa/vastauksiinsa. Konsensusta koko ryhmän kesken ei syntynyt, mutta niin ei ollut tarkoituskaan. Muodostettujen vastaajaryhmien sisältä puolestaan oli löydettävissä selkeät yhdenmukaiset näkemykset. Tämä havainto kertoo osiltaan koulutuksen ja kokemuksen yhdenmukaistavasta vaikutuksesta mutta on toisaalta myös selkeä osoitus siitä, että jos delfoi-tyyppisellä asiantuntijapaneelilla halutaan saavuttaa luotettavia tutkimustuloksia, tulee panelistit valita huolella heidän taustansa huomioiden. Liian yksipuolisella otannasta seuraa yksipuolisia tuloksia, hyvin heterogeenisen vastaajaryhmän tuloksista taas on mahdollonta sanoa, vaikuttaako niihin yksilöllisen vaihtelun lisäksi myös säännönmukaisia ryhmätekojia.

Tutkimuksen tuloksissa on useasti viitattu taajuushallinnan muutokset hitauteen ja osittain myös lainsäädännön vajavaisuuteen. Tutkimuksen aikana lainsäädäntö muuttui toisiokäytön suhteen sallivampaan suuntaan (Tietoyhteiskuntakaari, 7.11.2014/917). Lainsäädännön muuttuminen ei kuitenkaan suoranaisesti tarkoita sitä, että taajuushallinta olisi automaattisesti avoimempaa kuin ennen. Tietoyhteiskuntakaaren pohjalta annettu valtioneuvoston asetus radiotaajuuksien käytöstä ja taajuussuunnitelmasta toteaa kognitiivisten radioverkkojen osalta seuraavaa: ”*Kognitiivisten radiojärjestelmien toimintaan käytettävä taajuusalue on 470–790 megahertsiä 31 päivään joulukuuta 2016 ja 470–694 megahertsiä 1 päivästä tammikuuta 2017. Kognitiiviset radiojärjestelmät eivät kuitenkaan saa suojausta muun radioviestinnän aiheuttamilta häiriöiltä, eivätkä ne saa aiheuttaa häiriötä muulle radioviestinnälle*” (Valtioneuvoston asetus radiotaajuuksien käytöstä ja taajuussuunnitelmasta, 3 § kognitiiviset radioverkot, 18.12.2014). Kyseinen asetus rajoittaa taajuuskaistan varsin kapealle alueella ja edellyttää, että kognitiivinen radio ei saa aiheuttaa häiriötä muille järjestelmille. Taajuushallintaviranomaiselle jätetäänkin vastuu arvioida, milloin häiriöitä voi tapahtua ja milloin ei. Laki ja asetus ovat hyvä alku, mutta eivät ratkaise taajuushallinnan ongelmaa. On kuitenkin mahdollista, että osa taajuushallintaa koskevista delfoi-kyselyn vastauksista olisi ollut positiivisempia, jos lakimuutos olisi astunut voimaan selvästi ennen tutkimusta, jolloin sitä koskeva tieto olisi ehtinyt levitä paremmin.

5. PÄÄTELMÄT JA JATKUMOT

”Disruptiivisen teknologian tunnistaminen on vaikeata monestakin syystä. Teknologian potentiaali pitäisi tunnistaa hyvin varhaisessa vaiheessa, jolloin ei vielä ole näyttöä siitä, onko teknologialla 20 vuoden päässä merkittävää vaikutusta. Teknologialla voi olla vastateknologia, joka kehittyessään mitätöi sen mahdollisen disruptiivisen vaikutuksen. Sodankäynnissä tämä on osa normaalia ase/vasta-asekamppailua. Kolmas tunnistamista vaikeuttava tekijä on se, että teknologia voi olla miltä tahansa tieteen alalta” (Kosola 2013, s. 18)

5.1 Kognitiivinen radio vuonna 2015 ja lähitulevaisuudessa

Kognitiivinen radio on paradoksi. Sitä on tutkittu valtavasti ja sen eri ominaisuuksia on kehitetty määrätietoisesti. Kokonaisuudessaan kognitiivisen radion kehitysprojektit ovat työllistäneet tuhansia ihmisiä. Vaikka kognitiivinen radio on mielikuvissa jo pitkään ollut olemassa uhkana ja mahdollisuutena, kukaan ei ole vielä pystynyt rakentamaan määritelmiä täyttävää kognitiivista radiota (ks. luku 1.6).

Tässä tutkimuksessa keskiössä on ollut kognitiivinen radio ja sen toiminta radiotaajuudessa spektrissä. Vaikka taajuus on vain yksi parametri, jonka tehokkuutta tai käyttöastetta kognitiivisuudella voidaan parantaa, on se ehkä koko tekniikan kehityksen, käytettävyyden ja todennäköisesti myös kaupallisten intressien kannalta keskeisin muuttuja. Mikäli taajuuksia ja taajuuksien käytettävyyttä ei ennakoida ajoissa, koko tekniikan kehitys voi vaarantua jo sekin takia, että kaupalliset tulevaisuuden näkymät ovat heikot.

Kognitiivisella radiolla on dokumentoitu olevan merkittävä määrä erilaisia ominaisuuksia, joita sen edeltäjillä ei voitu kuvitellakaan olevan. Kenttäradiot, niin digitaaliset kuin analogiset, viritettiin yhdelle ennalta määritetylle taajuudelle, jolla radio odotti, kunnes ihminen teki sille jotakin. Ohjelmistoradio toimii periaatteessa samalla tavalla kuin kenttäradio, mutta ohjelmistoradio on ohjelmallisesti päivitettävissä: periaatteessa kuoret ja sisusta pysyvät samana, kun ohjelmaa muutetaan kuten peliä pelikoneessa. Radiojärjestelmien ja laajemmin tiedonsiirtojärjestelmien tulevaisuuden haasteeksi muodostuu kasvava tarve verkottaa niin ihmiset kuin laitteetkin. Tästä syntyy ahtautta sekä taajuustasossa että verkkokerroksella, ja tähän ruuhkautumiseen perinteisillä radiojärjestelmillä on vaikea vastata. Kognitiivinen radio erilaisine ominaisuuksineen on toimiessaan osaltaan vastaus tähän haasteeseen.

Kognitiivista radiota ovat määritelleet useat eri tahot omista lähtökohdistaan. Selkeää, yksiselitteistä määritelmää ei toistaiseksi ole ollut käytettävissä. ITU:n määritelmässä kognitiivinen radio hankkii tietoa, tekee päätöksiä ja sopeutuu. Määritelmä kuvaa hyvin kognitiivisen radion olemusta jääden kuitenkin abstraktiksi. On siis mahdollista, että tulevaisuudessa syntyy tilanne, jossa kognitiivisena radiona markkinoidaan kaikkia radioita, joissa on vähäisiäkin kognitiivisia ominaisuuksia. Operatiivisesta näkökulmasta kognitiivinen radio on perusteltua määritellä toiminnallisuksiensa kautta.

Kognitiivinen radio:

- pystyy itsenäisesti hankkimaan tietoa toimintaympäristöstään
 - esimerkiksi spektri ja paikkatieto
- on tietoinen oman järjestelmän sisäisestä tilasta ja järjestelmässä liikkuvasta informaatiosta mukaan lukien informaation arvo
- on tietoinen tehtävästä ja sen asettamista rajoituksista
- sovittaa dynaamisesti ja itsenäisesti toimintaparametrit ja protokollat tehtävän antamisen reunaehtojen mukaisesti
- pystyy käyttämään hyödyksi itse keräämiään tai sille syötettyjä tietoja ja optimoimaan toimintansa informaation perusteella.

Mikäli jokin yllä mainituista ehdoista ei toteudu, kyseessä ei ole kognitiivinen radio vaan radio, jolla on kognitiivisia ominaisuuksia. Todennäköistä on, että ensimmäiset kaupalliset kognitiiviset radiot eivät täytä kaikkia lueteltuja kognitiivisen radion ehtoja, eivät tässä tutkimuksessa esitettyjä eivätkä muidenkaan. Tätä kehitystä ei silti tule nähdä negatiivisesti vaan osana radioiden luonnollista kehityskaarta. Jokainen kognitiivinen ominaisuus, myös irrallisena kokonaisuudesta, voi osoittautua merkittäväksi kehitysaskelleeksi kokonaisprosessin kannalta, vaikka se ei lineaarisesti johtaisikaan kognitiivisen radion syntymiseen.

Kognitiivitekniikan kehittymättömyys luo epävarmuutta sen luotettavuutta kohtaan ainakin toistaiseksi. Luotettavuutta voidaan hankkia käyttämällä standardoituja ja käytössä testattuja järjestelmiä, mutta haasteeksi tässä toimintatapamallissa muodostuu uusimman teknologian huomioiminen: uudet tekniikat ovat varsin harvoin käytössä testattuja. Luottamusta johtamisjärjestelmien tietoturvaan voidaan lisätä uskomalla kansalliseen osaamiseen. Tunnettu tosiasia on, että lähes kaikissa ohjelmistoissa tai ohjelmistopohjaisissa laitteissa on olemassa mahdollisuus tietoturvallisuusriskeihin. Näitä riskejä voidaan ainakin osin hallita hankkimalla laitteet ja ohjelmistot sellaiselta taholta, jolle ei ole luotu paineita kolmansilta osapuolilta. Laitteiden hankkimista ja myymistä voidaan myös rajoittaa kansallisesti. Toisin sanoen hankkimalla

kansalliseen puolustukseen tarkoitettuja johtamisjärjestelmät kansallisilta toimittajilta voidaan lisätä luottamusta järjestelmien turvallisuudesta.

5.2 Kognitiivisen radion ominaisuudet ja niiden operatiivinen tärkeysjärjestys

Tässä luvussa vastataan tutkimuksen ensimmäiseen pääkysymykseen: *Mitkä kognitiivisen radion ominaisuudet ovat sotilaallisessa toimintaympäristössä merkityksellisimpiä johtamisjärjestelmien kehityksen näkökulmasta ja missä tärkeysjärjestyksessä?*

Kognitiivisia ominaisuuksia tarkasteluun valittiin seitsemän eritasoista ominaisuutta:

- 1) dynaaminen spektrin hyväksikäyttö (DSA)
- 2) yhteyksien adaptiivisuus (SLA)
- 3) radioresurssien hallinta (RRM)
- 4) älykäs verkonmuodostus (SON & RBR)
- 5) moniantennijärjestelmät (esim. MIMO)
- 6) kognitiiviset häirintäjärjestelmät
- 7) reaaliaikaiset spektrimarkkinat.

Tarkasteluun valituista ominaisuuksista reaaliaikaiset spektrimarkkinat ja kognitiiviset häirintäjärjestelmät edellyttävät jo toimivia kognitiivitekniisiä sovelluksia ja edustavat näin jo seuraavan sukupolven ominaisuuksia. Valitut ominaisuudet perustuvat lähteissä WINNF 2010 ja Tuukkanen ym. 2013 kuvattuihin kognitiivisiin ominaisuuksiin sekä tutkijan omaan näemykseen sotilaalliseen käyttöympäristöön vaikuttavasta merkittävästä teknisestä kehityksestä.

Kognitiivisen radion ominaisuuksien tärkeysjärjestystä tarkasteltiin neljästä eri näkökulmasta, joita olivat suorituskykyisä, tekninen toteutus, tuotekehitys ja Puolustusvoimien johtamisjärjestelmien kehitys. Asiantuntijoiden vastausten analysoinnin perusteella kognitiivisen radion ominaisuuksien tärkeysjärjestys muodostui kärjen osalta seuraavaksi:

- 1) dynaaminen spektrin hyväksikäyttö (DSA)

Perustelu tiiviisti: *DSA on perusedellytys kognitiivisen radion tilannetietoisuudelle, jota ilman ei voi adaptoitua eikä hallita radioresurssia.*

- 2) yhteyksien adaptiivisuus ja radioresurssien hallinta (yhdistetty RRM ja SLA)

Perustelu tiiviisti: *Radioresurssien hallinta (RRM) ja sen alalaji yhteyksien adaptiivisuus (SLA) luovat pohjan verkonmuodostukselle ja yhteyksien luotettavuudelle.*

3) älykäs verkonmuodostus (SON & RBR).

Perustelu tiiviisti: *Verkonmuodostus on johtamisjärjestelmälle perusedellytys. Tehokas ja älykäs verkonmuodostus ja verkon yhteyksien ylläpito on luotettavaa, kun järjestelmä pystyy luomaan tilannekuvan ympäristöstään ja sopeutumaan muutoksiin.*

Muodostunut tärkeysjärjestys perusteluineen oli erittäin hyvin tai hyvin validi suorituskyky-lisän, teknisen toteutuksen ja Puolustusvoimien johtamisjärjestelmien kehityksen näkökulmista (ks. s. 81). Tuotekehityksen näkökulmasta tärkeysjärjestys arvioitiin vain kohtuullisen validiksi, koska tuotekehityksen näkökulmasta muodostetussa järjestyksessä on riskiä (ks. s. 81–82). Ensimmäiseksi valikoitunut ominaisuus, jolla kognitiivinen radio erottuu edeltäjistään sotilaallisessa käyttöympäristössä, on spektrin dynaaminen hyväksikäyttö (DSA). Tilannetietoisuudella tarkoitetaan tässä yhteydessä kykyä muodostaa oikeanlainen ja oikea-aikainen käsitys ympäröivästä tilasta eli tässä tapauksessa radiotaajuisesta spektristä ja sen eri toimijoista. Tilannekuvan tai -tietoisuuden kognitiivinen radio muodostaa havainnoimalla spektriä, hakemalla tietoa tietokannoista ja jakamalla tietoa muiden kognitiivisten radioiden kanssa.

Toiseksi tärkeimmäksi arvioidulla ominaisuudella eli radioresurssien hallinnalla ja yhteyksien adaptiivisuudella tarkoitetaan prosessia, jolla radion eri parametreja, kuten teho, taajuus ja hyytynopeus, hallitaan järjestelmätasolla. Yhteyksien adaptiivisuuden eli tilanteisiin mukautumisen kautta datan siirtonopeuksia ja toisaalta myös yhteysetäisyyksiä voidaan kasvattaa. Samalla myös yhteyksien luotettavuus paranee.

Kognitiivinen verkonmuodostus (*self-organized networks & rolebased reconfiguration*) arvioitiin kolmanneksi tärkeimmäksi ominaisuudeksi. Sillä tarkoitetaan verkkoa, joka voi automaattisesti laajentua, muuntua ja konfiguroitua sekä optimoida verkon peittoaluetta, kapasiteettia, solukokoa, topologiaa, taajuusallokointia ja kaistanleveyksiä. Optimointikyky perustuu verkon kykyyn reagoida häiriöiden muutoksiin, signaalin vahvuuteen, paikkaan, viestiliikenteen toimintamalliin (*traffic pattern*) ja muihin ympäristön ominaisuuksiin. RBR-konseptilla (*role based reconfiguration*) tarkoitetaan sitä, että laite tai laitteet voidaan konfiguroida yksilön tehtävän mukaan. Sotilaallisessa toiminnassa tämä tarkoittaa sitä, että esimer-

kiksi komppanian päälliköllä on radiossaan eri asetukset kuin ryhmänjohtajalla tai pataljoonan komentajalla.

Kärkikolmikkoa vähemmän tärkeiksi arvioitiin kognitiiviset häirintäjärjestelmät ja antennijärjestelmät, joita pidettiin enemmänkin toimintaa tehostavina elementtinä kuin kognitiivisen radion välttämättöminä ominaisuuksina. Spektrimarkkinat jakoi asiantuntijoiden mielipiteitä eniten, mikä johtui pääsääntöisesti näkökulmaeroista.

On huomattava, että monet kognitiivisista ominaisuuksista saattavat toistua eri tasoilla. Perinteinen OSI-malli, jossa eri kerrokset toimivat jokseenkin itsenäisesti, ei suoranaisesti päde siirryttäessä kognitiivisiin sovelluksiin. Sotilasverkoissa taistelunkestävyys paranee, koska erilaisten vaihtoehtojen määrä yhteyksien turvaamiseksi kasvaa kognitiivisuuden myötä: kognitiivinen radio voi, samanaikaisesti tai erikseen, vaihtaa automaattisesti antennien säteilykuviota, lähetystehoja ja aaltomuotoa sekä lisätä virheenkorjausta tai muuttaa koodausta. Eri OSI-mallin kerrosten toiminnallisuuksia voidaan sujuvasti yhdistellä halutun lopputuloksen saamiseksi. Toisaalta verkon tihentyminen ja parametrien muuttaminen lisäävät liikennemäärää ja verkon omia häiriöitä, mikä voi johtaa liikenteen ruuhkautumiseen erityisesti silloin, kun liikenne reitittyy useamman solmun yli (Prokkola 2014). Verkon sisäinen kontrolliliikenne voi kasvaa myös, kun verkko joutuu tekemään sisäisiä muutoksia. Kontrolliliikenne on uhkan kognitiiviselle radiolle ja verkoille (ks. liite 6, taulukko 3), ja uhka tulee ottaa huomioon operatiiviselta kannalta jo normaalioloissa (ks. s. 39–40). Edellä mainituissa tilanteissa korostuu liikenteen optimointi ja kognitiiviseen radioon ohjelmoidun logiikan huomioon ottaminen tilanteiden ennakoinnissa ja operaattorin toiminnassa.

Toteutuessaan ja odotuksenmukaisesti toimiessaan kognitiivinen radio mahdollistaa niin kutsutun 0-konfiguraatiojärjestelmän, mikä on syytä ottaa huomioon asetettaessa kognitiivisen radion käyttäjävaatimuksia. Kognitiiviseen järjestelmään voidaan etukäteen valmistella esimerkiksi kulloisenkin sotilaallisen operaation vaiheet ja käyttäjäroolit, jotka toimeenpannaan komentajan käskyllä johtamisjärjestelmähenkilöstön toimesta. Kognitiivisuus tulee todennäköisesti lisäämään ensinnäkin esisuunnittelun ja etukäteisvalmistelujen tarvetta johtamisjärjestelmissä sekä toisaalta keskitetyn verkonhallinnan merkitystä. Moniulotteisemmat rakenteet voivat mahdollistaa sen, että loogiset verkot ja roolit suunnitellaan keskitetysti etukäteen, mutta parametrit, taajuudet ja fyysinen topologia hajautetusti ja osin tilanteenmukaisesti. Järjestelmien kognitiivisten ominaisuuksien tulee olla hyvin suunniteltuja ja testattuja kokonaisuuksia. Rauhan aikana vastustajan järjestelmistä sekä oman järjestelmän rajoituksista kerätyn pohjatiedon tulee olla yhteen sovitettuna siten, että eri tilanteisiin valitut järjestelmän

käyttötavat ovat optimoituja. Kokonaisuuden ymmärtäminen ja toimivien kombinaatioiden luominen vaativat syvää osaamista järjestelmätasolla. Toisaalta käyttäjätasolla osaamisvaatimukset tullevat laskemaan (Lindén 2014).

Kognitiivinen radio ei tule suoranaisesti korvaamaan vanhaa suorituskkyä vaan on tullessaan aivan uusi suorituskky – tai vähintäänkin vie sen uudelle tasolle. Ajatusmallien tulee muuttua, jotta mahdollisuudet voidaan konkretisoida. Kokonaisuuden hahmottaminen asettaa merkittävän muutospaineen erityisesti upseerien koulutukselle ja viestitaktiselle osaamiselle. Radioiden kognitiivisuus johtaa siihen, että enää ei olla staattisesti sidottuja tilanteisiin: Häirinnän alla radiot aloittavat itsenäisesti yhteyksien parantamisen tai uudelleen muodostamisen. Fyysiset verkkorakenteet häviävät ja tilalle tulee erilaisia loogisia verkkoja (kuten vanha keskussanomalaiteverkko); viestit ja sanomat liikkuvat niille osoitettuihin osoitteisiin, mutta reitti tai edes siirtotie eivät ole loppukäyttäjän tiedossa.

Operatiiviselta kannalta synteesinä voidaan esittää, että kognitiivinen radio johtaa riippumattomuuteen organisaatiosta ja lähes automaattiseen sopeutumiseen muuttuvissa tilanteissa. Radio on muuttumassa laitteesta palvelun kaltaiseksi kokonaisuudeksi, jota ohjataan operatiivisen suunnitteluprosessin kautta. Suunnitteluprosessien (FINGOP tai YHTSUPE) eri vaiheissa syntyvien tuotteiden ohjaaminen kognitiivisen radion tai radioverkon käytön suunnittelua ja toimeenpanoa tukevaksi kokonaisuudeksi on työ, joka on etupainoisesti otettava huomioon, mikäli kognitiivisia radioita otetaan käyttöön.

Kognitiivista radiota ja sen suorituskkyä pohdittaessa herää kysymys: mitä suorituskkyä olisi jo nyt tuotettavissa? Kognitiivista radiotahan ei kokonaisuudessaan tietävästi vielä ole kyetty rakentamaan. Tässä tutkimuksessa esitettyjen kolmen tärkeimmäksi arvoitetun ominaisuuden osalta suorituskvyt ovat pääosin olemassa erillisinä tekniikoina. Dynaaminen spektrin hyväksikäyttö ja radioresurssien hallinta sekä yhteyksien adaptiivisuus ovat jo tuotannossa (esim. Perich ym. 2010). Älykäs verkonmuodostus on ainakin osittain kiistanalainen tekniikka, ja kiistanalaisuudessa kyse on pitkälti siitä, miten älykäs verkonmuodostus halutaan määrittellä. Kognitiivisen radion kannalta olennaista on, miten nämä erilaiset ominaisuudet ja perinteisen OSI-mallin kerrokset on yhdistetty toisiinsa. Puhutaan siis tässä tutkimuksessa vähemmän sivutusta kognitiivisen radion ”älystä”, josta yleisesti kirjallisuudessa käytetään termiä *Cognitive engine*, kognitiivinen kone. Tulevaisuudessa erilaisten kognitiivisten radioiden keskinäisessä arvottamisessa tulee tarkastella ennen kaikkea sitä, miten eri ominaisuudet toimivat yhteen ja millaisen kokonaisuuden radio muodostaa.

5.3 Kognitiivisten ominaisuuksien vaikutus sotilaalliseen käyttöympäristöön

Tässä luvussa käsitellään kognitiivisten ominaisuuksien vaikutusta sotilaalliseen käyttöympäristöön elektronisen suojautumisen, tiedustelun ja vaikuttamisen näkökulmista. Luvussa vastataan toiseen tutkimuksen pääkysymyksistä: *Miten radion kognitiiviset ominaisuudet vaikuttavat sotilaalliseen käyttöympäristöön elektronisen suojautumisen, tiedustelun ja vaikuttamisen näkökulmista?*

Kognitiivinen radio ei luonnollisesti tule antamaan vastausta kaikkiin sotilaallisten johtamisjärjestelmien haasteisiin, mutta se saattaa olla yksi seuraavista tärkeistä kehitysaskelista. Sotilaalliset peruseriaatteet johtamisjärjestelmien kehityksessä tulevat säilymään jatkossakin. Tarve liikkuville, alustoihin sijoitetuille viestikeskuksille säilyy, koska sodan kuva ei ole muuttunut niin paljon, että operatiivisia suorituskykyvaatimuksia täytyisi radikaalisti muuttaa esimerkiksi suojan tai liikkuvuuden kannalta. Tämänkaltaisia pysyviä, kognitiiviselle radiol-lekin järjestelmätasolla asetettavia vaatimuksia ovat esimerkiksi seuraavat:

- 1) Viestijärjestelmän tulee olla liikkuva, koska sataprosenttista maantieteellistä kattavuutta ei voida kenttäviestijärjestelmissä saavuttaa.
- 2) Viestijärjestelmän liikkuvuuden tulee olla samalla tasolla kuin tuettavan joukon.
- 3) Viestijärjestelmät tarvitsevat ballistisen suojan.
- 4) Tarvitaan korkeita mastoja, koska puiden latvojen yläpuolelle on tietyissä tilanteissa päästävä. Mastojen liikuttelu edellyttää ajoneuvoja.

Aluksi voi syntyä tilanne, jossa kognitiivinen radio korvaa aiemman sukupolven radiota niiltä osin, kuin sitä tarvitsee uusia, jotta se toimisi. Radiojärjestelmissä kognitiivisuuden merkitys ja siitä saatavat edut ovat sitä suuremmat mitä laajempi systeemi on. Kognitiivisissa radiojärjestelmissä radio pystyy optimoimaan toimintansa kokonaisvaltaisemmin, kun sillä on käytössään enemmän vaihtoehtoja eli erilaisia kognitiivisia ominaisuuksia ja toisaalta myös vaihtoehtoja ominaisuuksien sisällä eli esimerkiksi erilaisia tapoja muodostaa tilannetietoisuus. Tällaisia tapoja ovat mm. spektrin havainnointi ja tietokantojen hyväksikäyttö. Asetelma johtaa myös siihen, että kiinteiden kaapeliyhteyksien tarve ei tule poistumaan, vaan niiden olemassaolo ja mahdollinen tietoliikenneverkkojen kognitiivisuus tuovat jatkossakin merkittävän lisän maavoimien tiedonsiirtoverkoille (myös Kärkkäinen 2011, s. 49–50). Tiedonsiirtoverkoissa kriittisiksi haavoittuvuuksiksi voivat muodostua ne kohdat tai solmupisteet, joissa tyyppillisesti pienemmän tiedonsiirtonopeuden omaavat taktiset yhteydet liitetään nopeampaan runkoverkkoon. Radioyhteyksien merkitys taktisella tasolla tulee olemaan edelleen kiistaton: Niin kutsuttu viimeinen maili eli tukiaseman/tuliaseman ja sotilaan välinen yhteys on se väli,

jota ei voida eikä kannata kaapeliyhteyksillä rakentaa. Lisäksi alati kiihtyvä taistelutempo edellyttää langattomia yhteyksiä.

Tyypillisimmin häiriötä spektriin aiheuttavat vastustajan häirintä, radioiden keskinäishäiriöt tai tahattomat häiriöt, joita sotilaskäyttäjän näkökulmasta ovat esimerkiksi siviiliyhteiskunnan tuottamat signaalit. Tahattomia häiriöitä voivat myös olla esimerkiksi vastustajan käyttämät radiotaajuudet, jos ne ovat samoja kuin omat taajuudet. Selvitäkseen tästä ympäristöstä kognitiivinen radiojärjestelmä tarvitsee spektrin käytettävyyden lisäämiseksi käyttöönsä useamman kuin yhden metodin tilannetietoisuuden luomiseksi: Spektrin havainnoinnin, tietokantojen ja kontrollikanavien samanaikainen hyväksikäyttäminen antavat mahdollisuuden kestävästi kognitiivisen radion luomiseen. Yhdistettynä eri menetelmät tuovat myös täysin uudenlaisia, ennen tavoittamattomia mahdollisuuksia taistelunkestävyyden parantamiselle.

Kognitiivisen radion uhkat sotilaallisessa toimintaympäristössä ovat samat kuin muillakin johtamisjärjestelmillä: fyysinen tuhoaminen, elektroninen tiedustelu, elektroninen vaikuttaminen ja kyberuhkat. Uhkien painotukset kuitenkin muuttuvat johtamisjärjestelmien kehittyessä. Merkittävimpiä muutoksia uhkien painotuksissa ovat kybersodankäynti ja fyysisen tuhoamisen kohteiden muutokset sekä sensoreiden ja asejärjestelmien verkottumisen kautta syntyneet mahdollisuudet vaikuttaa mihin järjestelmän osaan tahansa, useilla erilaisilla vaikuttamisen menetelmillä.

Kognitiivisessa radiossa tai radiojärjestelmässä jatkuvan tiedustelu-uhan alla ovat myös normaalioloissa tietokannat sekä kontrollikanavat. Normaalioloissa tulee pyrkiä käyttämään vaihtoehtoisia ja vaihtuvia menetelmiä, jotta rauhan aikaisen tiedustelun aiheuttama uhka voidaan minimoida. Laajeneva spektri tulee nähdä merkittävänä mahdollisuutena väistää aktiivisia ja passiivisia uhkia. Elektroniselle tiedustelulle radioiden kognitiivisuus ja laajeneva spektri ovat haaste. Tiedustelujärjestelmien tulee olla entistä laajakaistaisempia, ja niiden suorituskykyyn tulee kasvaa niin signaalianalyysin kuin datafuusionkin osalta. Ennen järjestelmät käyttivät niille osoitettuja taajuusalueita ja eri järjestelmille sovitettuja aaltomuotoja. Tulevaisuudessa kognitiivisen radion myötä eri kohteiden tiedustelu aaltomuoto- tai taajuusperusteisesti ei onnistu vaan tiedusteluun ja tiedusteluanalyysiin tarvitaan enemmän tietoa laajemmalla spektrin alueelta.

Kyberuhkat muodostavat kognitiivisille radiolle laajan ja merkittävän haasteen. Onnistuneella kyberoperaatiolla on mahdollista esimerkiksi lamauttaa kognitiivinen radio tai varastaa tietovarannot (tarkemmin liitteessä 6 taulukossa 3). Uhkiin pitää varautua varmentamalla tietova-

rannot sekä jättämällä edes alkeellinen manuaalinen käyttömahdollisuus radioihin. Merkitävää kyberuhkassa on, että se ei kosketa pelkästään kognitiivista radiota vaan myös ohjelmistoradioita. Onnistuessaan kyberoperaatio voi estää koko viestijärjestelmän toiminnan tai saada viestijärjestelmän toimimaan toisin kuin sen pitäisi. Stuxnet-viruksen robottimainen toiminta Iranin sentrifugeissa (Matrosov ym. 2010) ei ole lainkaan mahdoton uhkamalli myöskään sotilaallisissa johtamisjärjestelmissä.

Kognitiivisuus voi luoda järjestelmiin binäärisen logiikan, jota on vaikea ennakoida erityisesti tilanteissa, joissa molemmilla osapuolilla on kognitiivisia ominaisuuksia johtamisjärjestelmissään. Kaupallisissa sovelluksissa tilanne on hallittavissa jo tuotekehityksen eri vaiheissa, mutta sotilaallisessa toimintaympäristössä vastapuolten järjestelmien yhtäaikaista toimintaa ei voida etukäteen testata. Häirintäjärjestelmien käyttö kognitiivisia radioita vastaan luo uusia lähestymistapoja. Spektriin voidaan luoda tilanteita, joihin kognitiivisen radion halutaan reagoivan halutulla tavalla. Suojautumisen näkökulmasta näihin erilaisiin tilanteisiin tulee varautua etukäteen esimerkiksi simuloimalla ja mallintamalla häirintä- ja häiriöskenaarioiden vaikutuksia kognitiivisen radion eri toimintatapamalleissa.

5.4 Spektri, kehittäminen, käyttö ja haasteet operatiivisessa viitekehityksessä

Tässä luvussa vastataan tutkimuksen neljään alakysymykseen. Kussakin alaluvussa (5.4.1–5.4.4) perehdytään yhteen kysymykseen samassa järjestyksessä, kuin ne esitettiin johdantoluvussa.

5.4.1 Kognitiivisen radion toimintaympäristö 2020

Millainen on kognitiivisen radion toimintaympäristö vuonna 2020?

Vuoteen 2020 mennessä kognitiivisen radion spektrissä eli toimintaympäristössä ja spektrin säätelyssä (regulaatiossa) ei tule tapahtumaan merkittävää muutosta. Spektri tulee olemaan vielä vuonna 2020 hajanainen ja kognitiivisen radion käyttömahdollisuudet merkittävästi rajoittuneet. Positiivinen kehitys on mahdollista 2020-luvun aikana, mutta kuten moni asiantuntija kyselyvastauksissaan muistutti, regulaatiossa muutokset ovat hitaita. Muutoksen hitauden takia valmistelut tulisi aloittaa hyvissä ajoin – tämän tutkimuksen perusteella välittömästi. Tavoitetila, johon pyritään, on kuitenkin se, että tulevaisuudessa kognitiivinen radio voisi käyttää muiden järjestelmien resursseja. Vaikka vuosi 2020 tulee muutoksen kannalta liian nopeasti, muutoksia nähtäneen jo 2020-luvun aikana.

Taajuuksien toisiokäyttömahdollisuudella on myös merkitystä niin normaaliolojen häiriötilanteissa kuin poikkeusoloissakin. Häiriötilanteen luonteesta riippuen muutokset spektrissä ovat mahdollisia esimerkiksi lähetyksasemien tuhoutumisien tai sähkönjakelun häiriöiden myötä. Kognitiivinen radio voi mahdollistaa myös joustavan johtamisjärjestelmien alustan viranomaisyhteistyöhön: Päätelaitteet ja käyttösovellukset voivat olla räätälöityjä eri turvallisuus-toimijoiden tarpeisiin. Tiedonsiirtoalusta olisi yhteinen, ja sillä voisi tarvittaessa hyödyntää kaupalliseen toimintaan tarkoitettuja resursseja. Toimintaympäristön muutoksella normaaliolojen häiriötilanteissa ja poikkeusoloissa on siis merkitystä kognitiivisen radion käytölle myös spektrin kannalta. Oma tutkimusaiheensa olisi arvioida tai simuloida vapautuvan spektrin määrää ja laatua (taajuusalueita) erilaisissa uhkaskenaarioissa.

Yhtenä keskeisenä motivaattorina kognitiivisen radion kehittämiselle kaupallisella puolella on spektrin käyttöasteen ja tätä kautta spektrin tehokkuuden lisääminen (myös *Matinmikko* 2012, s. 15–16). Kognitiivisen radion kehityksen ja käyttöönoton kannalta regulaation muutoksen hitaus on huolestuttavaa. Pahimmillaan taajuuksien hallinnoinnin jäykkyys voi hidastaa tai jopa estää positiivisen teknologisen kehityksen. FCC:n¹³ mukaan taajuuksien avaaminen on myös yksi avaintekijöistä talouskasvuun (FCC, *The National Broadband Plan* 2010). Spektri on valtioiden itsensä säätelemä resurssi. Käytännössä valtioiden toimia spektrin käytössä sitovat valtioiden itsensä standardointifoorumeilla sopimat säännöt niiltä osin, kuin valtio itse on tahtonut sääntöihin sitoutua (Tuukkanen ym., s. 7–8).

5.4.2 Toimintaympäristön kehittäminen

Miten toimintaympäristöä tulisi kehittää, jotta sotilaskäyttöön suunniteltu kognitiivinen radio toimisi?

Asiantuntijoiden pessimismi regulaation muutoksen, ja erityisesti muutoksen nopeuden suhteen, oli selkeää. Lainsäädäntöä on muutettu vuonna 2014 toisiokäyttöä sallivampaan suuntaan (Tietoyhteiskuntakaari, §96)¹⁴, mutta käytännön haasteita lain säätäminen ei pysty ratkaisemaan: miten varmistetaan siitä, että toisiokäyttö ei ”*aiheuta häiriöitä ensisijaisten käyttötarkoitusten mukaiselle radioviestinnälle*” (Tietoyhteiskuntakaari, §96). Kokemusta kognitiivitekniikasta on vielä vähän, ja käytännön kokemukset tekniikan luotettavuudesta puuttuvat. Regulaattorin, Viestintäviraston, tulisi olla eteenpäin suuntautunut tulevaisuuden päätök-

¹³ FCC (Federal Communication Commission) on Yhdysvaltojen taajuushallinnasta vastaava viranomainen.

¹⁴ ”Viestintävirasto voi radiotaajuuksien yhteiskäytön edistämiseksi tai muusta perustellusta syystä sallia 95 §:n I momentin nojalla annetussa valtioneuvoston asetuksessa säädetyille radiotaajuusalueelle tai tämän pykälän I momentin nojalla annetussa määräyksessä tarkoitettulle taajuusalueelle myös muuta kuin sen käyttötarkoituksen mukaista radioviestintää, jos muu radioviestintä ei rajoita taajuusalueen käyttöä sen ensisijaisiin käyttötarkoituksiin eikä aiheuta häiriöitä ensisijaisten käyttötarkoitusten mukaiselle radioviestinnälle” (Tietoyhteiskuntakaari, §96).

sissään samoin kuin Puolustusvoimienkin. Mikä estäisi Puolustusvoimia avaamasta taajuuksiaan sotilaallisen (kansallisen!) kognitiivisen radion testaukseen, ts. avaamasta omia, Viestintäviraston Puolustusvoimille osoittamia taajuuksia, sotilaallisen kognitiivisen radion testaukseen? Puolustusvoimillehan on allokoitu merkittävä määrä taajuuksia kaikilta taajuusalueilta (Viestintävirasto, Taajuusjakotaulukko 2015). Puolustusvoimien tahtotila tulisi näin selväksi tekniikan kehittämisen suhteen.

5.4.3 Kognitiivisen radion operatiivinen kehittäminen, käyttö ja vaatimukset

Tässä alaluvussa vastataan kysymykseen Millaisia alustavia operatiivisia vaatimuksia kognitiiviselle radiolle ja sen ominaisuuksille voidaan asettaa? Tämän lisäksi hahmotellaan yksinkertaistettuja kognitiivisen radion käyttötapauksia.

Regulaation muutoksen hitaus ei saa vaikuttaa sotilaalliseen käyttöön suunniteltavan kognitiivisen radion kehittämiseen. Kognitiivinen radio voidaan kansallisen puolustuksen näkökulmasta kehittää erittäin laajakaistaiseksi, ulottumaan myös sellaisille taajuusalueille, joita normaaliolojen taajuusjakokäytännöt rajoittavat. Suomen lainsäädäntö mahdollistaa viranomaisille erittäin laajat toimivaltuudet spektrin säätelyssä, mikäli olosuhteet sitä vaativat. Poikkeusolojen lisätoimivaltuuksista spektrin käytöstä on säädetty valmiuslain pykälässä 61 seuraavasti:

”Sähköisten tieto- ja viestintäjärjestelmien toimivuuden ja yhteiskunnan elintärkeiden toimintojen turvaamiseksi liikenne- ja viestintäministeriö voi poikkeusoloissa valtuuttaa Viestintäviraston:

- 1) muuttamaan radiotaajuuksista ja telelaitteista annetussa laissa (1015/2001) tarkoitetun radioluvan ehtoja*
- 2) peruuttamaan radioluvan*
- 3) keskeyttämään radiolupien myöntämisen*
- 4) kieltämään radiotaajuuksista ja telelaitteista annetussa laissa tarkoitetun radiolähtetimen tai radiojärjestelmän käytön taikka rajoittamaan niiden käyttöä muulla tavalla.”* (valmiuslaki § 61)

Laki tarkoittaa sitä, että poikkeusoloissa viranomaiset voivat säädellä radiolupia tilanteen edellyttämällä tavalla ja tarvittaessa jopa kieltämällä tai estämällä radiolähtetimen tai radiojärjestelmän käytön. Laajat oikeudet eivät kuitenkaan poista siviiliyhteiskunnan välttämättömien tarpeiden huomioimista, mikä edellyttää taajuushallinnasta vastaavien viranomaisten ja Puo-

lustusvoimien tarpeiden kokonaisvaltaista yhteensovittamista. Kyseessä on kokonaisturvallisuuteen (ks. s. 52 alaviite) liittyvä asiakokonaisuus, joka tulisi koordinoida ja yhteen sovittaa kansallisella tasolla.

Lisätoimivaltuuksien hankkiminen valmiuslain kautta on hidas prosessi, joka viime kädessä edellyttää valtioneuvoston päätöstä. Ennakoitua nopeammassa tilannekehityksessä tai niin kutsutussa hybridisodankäynnissä¹⁵ käytettävissä oleva aika voi osoittautua kriittiseksi tekijäksi, ja jopa sodan ja rauhan välisen rajan vetäminen voi olla vaikeaa. Näin myös valmiuslakien edellyttämien lisätoimivaltuuksien myöntäminen viranomaisille voi olla poliittisesti haastavaa, eikä aikaa välttämättä ole riittävästi raskaiden prosessien läpiviemiseksi. Tietoyhteiskuntakaari ei mahdollista regulaattorille radiotaajuuslupien muokkaamista esimerkiksi kansallisen kriisin tai suuronnettomuuden takia (Tietoyhteiskuntakaari, §47 radioluvan muuttaminen, §48, Radioluvan ja radiotaajuuksien varauksien peruuttaminen). Merkittävät muutokset edellyttävät valmiuslakien toimeenpanoa. Kognitiivisen radion myötä häiriötön tai lähes häiriötön taajuuksien yhteiskäyttö on mahdollista. Viranomaisten kykyä joustavampaan ja nopeampaan säätelyyn voitaisiin lisätä esimerkiksi myöntämällä regulaattorille harkinnanvarainen oikeus myöntää tilapäisiä taajuuksien toisiokäyttöoikeuksia esimerkiksi Puolustusvoimille. Näin voitaisiin välttää hidas ja raskas lisätoimivaltuusmenettely valmiuslain kautta, ja kyky vastata nopeasti kehittyviin uhkiin tai epäselviin tilanteisiin paranisi merkittävästi taajuuksien käytön näkökulmasta.

Sotilaalliselta kannalta kognitiivinen radio voi mahdollistaa yhteisen johtamisjärjestelmien alustan ilman, että koko johtamisjärjestelmää laitteineen tarvitsisi uusia. Kognitiivisuus johtamisjärjestelmissä olisi ikään kuin liima, joka liittää vanhat ja uudet järjestelmät toisiinsa. Seuraavaksi hahmotellaan lyhyin esimerkein, miten kognitiivinen radio voisi parhaimmillaan toimia sotilaallisessa käyttöympäristössä.

1) Hyökkäävä taisteluosasto joutuu kosketukseen vihollisen kanssa, ja vihollinen pyrkii häiritsemään hyökkäävän taisteluosaston kognitiivisen radion muodostamia johtamisyhteyksiä. Kognitiivinen radio havaitsee, että voimakas häirintä tulee lähetyksen päälle. Toimenpiteenä kognitiivinen radio vaihtaa toimintataajuuttaan automaattisesti sellaiselle alueelle, jossa häiriötä ei ole. Kognitiivinen radio on voitu myös ohjelmoida vihollisen häirintäjärjestelmästä saatujen ennakkotietojen perusteella vaihtamaan taajuuttaan sellaiselle alueelle, jossa vihollisen häirintäjärjestelmä ei pysty toimimaan tai vaihtamaan sellaiseen aaltomuotoon, johon vi-

¹⁵ Hybridisodankäynnin termiä on yleisesti käytetty Ukrainan kriisin yhteydessä. Hybridisodankäynnin määritelmiä on useita. Tässä tutkimuksessa hybridisodankäynti määritellään sotilaallisia tavoitteita sisältäväksi toiminnaksi, jossa yhdistetään tavanomaisia ja epätavanomaisia keinoja, jotka voidaan jaotella nk. DIME-analyysin kautta (Diplomatia, Informaatio, Sotilaallinen [Military] ja Talous [Economics]).

hollisen häirintäjärjestelmä ei pysty vastaamaan. Tällä hetkellä käytössä olevilla johtamisjärjestelmillä häirinnän väistäminen edellyttää sitä, että ihminen tunnistaa häirinnän ja aloittaa itsenäisesti luvussa 3 esitetyt suojautumisen toimenpiteet.

2) Merivoimien alus operoi avomerellä, josta se siirtyy saariston kautta satamaan. Avomerellä johtamisyhteys on muodostettu HF:n tai satelliitin kautta. Ulkosaaristossa alus voi muodostaa johtamisyhteyden HF:n tai satelliitin lisäksi myös MERIVHF:n kautta liittymällä merivoimien johtamisjärjestelmän tukiasemiin. Saavuttaessa sisemmäs saaristoon alus on myös 3G-matkapuhelinverkon peittoalueen sisäpuolella, ja sataman läheisyydessä on saatavilla jo 4G- tai WLAN-verkkoja. Aluksen liittyttyä laituriin siihen voidaan kiinnittää kaapeliyhteys. Kognitiivisuus tarkoittaa tässä tapauksessa sitä, että johtamisjärjestelmä valitsee automaattisesti käytettävän johtamisyhteyden ilman, että ihmisen tarvitsee operoida kuutta tai seitsemää radiojärjestelmää. Johtamisjärjestelmälle voidaan asettaa rajoituksia tai vaatimuksia; se voidaan esimerkiksi asettaa käyttämään aina nopeinta yhteyttä, jolloin järjestelmä vaihtelee käytävissä olevia yhteyksiä sen datansiirtonopeuden perusteella. Vaihtoehtoisesti järjestelmä voidaan ohjelmoida siten, että se yrittää olla mahdollisimman vaikeasti havaittavissa elektroniselta tiedustelulta. Tällöin kognitiivinen radio todennäköisesti pyrkii käyttämään mahdollisimman pieniä lähetystehoja korkeilla taajuuksilla eli kiinnittymään lähimpiin tukiasemiin (MERIVHF, 3G, 4G tai WLAN) tai käyttämään hyväkseen HF:n pinta-aaltoa.

3) Erikoisjoukot ovat paikantaneet maalin, joka on tarkoitus tuhota. Etukäteen ei voitu tietää, tuhotaanko kohde ilmasta maahan aseella vai tykistöllä, joten erikoisjoukot joutuivat ottamaan mukaansa sekä ilmatulenjohtoon soveltuvan radion että tykistön johtamiseen soveltuvan radion. Kognitiivisen radion myötä useita erilaisia ja eri käyttöön suunniteltuja radiota ei tarvita, vaan radio muodostaa yhteydet itsenäisesti tai jonkin käyttöliittymän ohjaamana – tarvittaessa myös kaupallisiin radiojärjestelmiin tai vaikkapa avoimiin WLAN-verkkoihin.

4) Viranomaisyhteistyö: yhteinen johtamisjärjestelmäalusta on toimivan ja tehokkaan yhteistoiminnan perusta. Tästä esimerkkinä Suomessa on turvallisuusviranomaisten yhteinen viranomaisradioverkko VIRVE. Kognitiivinen radio mahdollistaa tulevaisuudessa myös joustavan viranomaisverkkoalustan: eri turvallisuusviranomaisilla on omat päätelaiteet, jotka on räätälöity eri tahoille tehtäviin, mutta ohjelmistot, salaukset, autentikoinnit ja aaltomuodot ovat samat. Tarvittaessa kognitiivinen radio voi käyttää hyväkseen myös kaupallisia radioverkkoja esimerkiksi harvaan asutulla alueella tai radiolla voidaan korvata tuhoutunutta tiedonsiirtoinfrastruktuuria.

Edellä kuvatut käyttötapaukset edellyttävät toimintatapojen ja erityisesti ajatusmallien muutosta. Yhtenä suurimmista ajatusmallien muutoksista on se, että kognitiivisen radion toimivuuteen tulee luottaa, eikä luottamusta synny, ennen kuin järjestelmän toimivuus on testattu. Kognitiivista radiota tulisi kehittää taajuuksista tai taajuusalueista riippumattomasti, ja sitä tulisi voida myös käyttää nykyistä taajuusvapaammin jo normaalioloissa. Muuten toiminnan testaamista ei voida tehdä eikä luottamusta järjestelmään synny sen enempää taajuuksien ensisijaisille käyttäjille, toisiokäyttäjille kuin toisaalta regulaattorillekaan. Pelkästään nykyisten normaaliolojen säädösten pohjalta ei tekniikkaa eikä toimintatapoja tule kehittää, vaan katseen tulee olla tulevaisuudessa. Mikäli taajuuksien hallinnoinnissa edetään toisiokäytön mahdollistavaan suuntaan, tulee Puolustusvoimien toisaalta tukea kehitystä olemalla aktiivisesti mukana eri hankkeissa ja pitämällä samalla huoli siitä, että Puolustusvoimilla on tarvittavat taajuusresurssit käytössään. Myöskään Puolustusvoimien toiminta ei saa vaarantua tai vaikeutua hallitsemattomasta taajuuksien opportunistisesta käytöstä.

Alustavia operatiivisia suorituskyyvaatimuksia sotilaalliseen käyttöön tarkoitettulle kognitiiviselle radiolle muodostettiin kymmenen kappaletta. Suosituksia mahdollisiksi teknisiksi ratkaisuuksi annettiin neljä kappaletta. Teknisissä suosituksissa on kuitenkin huomioitava, että teknologiat kehittyvät nopeasti ja että nyt esitetyt suositukset voivat olla vanhentuneita jo seuraavana vuonna.

Kognitiivisen radion tulee:

- 1) olla erittäin laajakaistainen (esimerkiksi 3–3000 MHz)
- 2) voida käyttää muille järjestelmille allokoituja taajuuksia häiritsemättä niitä
- 3) perustua ohjelmistopohjaiseen arkkitehtuuriin
- 4) olla tietoinen ympäröivän spektrin tilasta
- 5) olla tietoinen järjestelmässä liikkuvasta datasta
- 6) voida ottaa vastaan radion ulkopuolelta tuotettua tietoa
- 7) olla riittävältä osin yhteensopiva aiemman sukupolven radiojärjestelmien kanssa
- 8) voida liittyä myös olennaisimpiin kaupallisiin ja viranomaiskäytössä oleviin radiojärjestelmiin
- 9) toteuttaa itsenäisesti sille ohjelmoituja toimintatapamalleja
- 10) mukautua muuttuvaan toimintaympäristöönsä vaihtamalla toimintataajuuttaan, fyysisen kerroksen parametreja, MAC-kerroksen parametreja ja verkkokerroksen parametreja.

Lisäksi sotilaallisessa käytössä spektrin tilaa tulisi voida hallita useammalla kuin yhdellä tekniikalla.

Alustavat tekniset suositukset ovat:

- 1) Kognitiivisen radion yhteensopivuus aiemman sukupolven radioihin sekä kaupallisiin radiojärjestelmiin voidaan toteuttaa gateway-ratkaisujen kautta.
- 2) Sotilaalliseen käyttöympäristöön suunniteltu kognitiivinen radio voi toimintaperiaatteeltaan ja rakenteeltaan perustua kaupallisiin tuotteisiin (COTS). Sovellusten ja ohjelmistojen tulisi olla sotilaalliseen käyttöön suunniteltuja ja mielellään kotimaisia turvallisuuskulman ja huoltovarmuuden takia.
- 3) Päätelaitteiden ja kognitiivisen radion välisten tiedonsiirron vaatimusten ei tule rajoittua pelkästään sotilaallisiin tai kaupallisiin ratkaisuihin. Tärkein vaatimus on yhteyksien toimivuus ja luotettavuus. Turvallisuuskulma tulee ottaa huomioon erityisen tarkasti tiedonsiirtoprotokollien ja salausten valinnassa.
- 4) Kognitiivisten radioiden tulee voida vaihtaa ja välittää keskenään informaatiota (esimerkiksi spektrin tilasta tai siirrettävän tiedon laadusta). Kognitiivisten radioiden väliset, nk. sisäiset yhteydet voivat olla itse kehitettyjä, kaupallisia tai MIL-standardoituja, mutta ensisijaiset vaatimukset ovat luotettavuus ja turvallisuus. Kansainvälinen yhteensopivuus tulee ottaa huomioon erikseen vaatimusmäärittelyssä, mikäli sellaista ominaisuutta halutaan.

5.4.4 Kognitiivisen radion käyttöönoton esteitä

Tässä alaluvussa vastataan tutkimuskysymykseen: *Mitkä ovat keskeisimmät esteet kognitiivitekniikan yleistymiselle ja kognitiivisten ominaisuuksien käyttöönotolle?*

Merkittävimmiä kognitiivitekniikan käyttöönoton ja tekniikan kehityksen esteiksi tunnistettiin tässä tutkimuksessa viisi eri kategoriaa:

- 1) Merkittävimmiä esteiksi tunnistettiin Puolustusvoimien oman henkilöstön ja erityisesti upseerien operatiivisen ymmärryksen kapea-alaisuus. Osaamisen puute johtaa vajaaseen kykyyn kehittää johtamisjärjestelmiä.
- 2) Kognitiivitekniikka vaatii kehitystyötä. Tekniikkaa ei ole operatiivisesti testattu, ja tuotekehityksen hinta tulee olemaan kohtuullisen korkea. Kehittämättömyyden riskinä on myös se, että luodaan liian monimutkainen järjestelmä, jota ei ymmärretä ja jota ei osata määrittellä.
- 3) Tekniseen kehitystyöhön kiinteästi liittyvä este Puolustusvoimissa on rahoituksen vähäisyys. Kognitiivitekniikan kehittämisen on kallista, ja Puolustusvoimien kykyä rahoittaa kehityshankkeita on rajallinen.

- 4) Lainsäädäntö ja taajuusregulaatio kehittyvät liian hitaasti. Toimenpiteet kognitiivitekniiikan käytön mahdollistamiseksi on kyllä aloitettu, mutta asenteet teknologiaa kohtaan ovat vielä epäileviä. Regulaation jäykkyys voi pahimmillaan estää teknisen kehityksen.
- 5) Merkittävimpänä perinteistä uhkakuvaa edustavana esteenä nähtiin tietoturva monimutkaisissa, automatisoiduissa ja älykkäissä radioverkoissa, joissa loppukäyttäjä ei ole välttämättä tietoinen siitä, miten radio toimii erilaisissa tilanteissa.

5.5 Jatkotutkimustarpeet ja -mahdollisuudet

Tämä diplomityö on tulevaisuutta kartoittava tutkimus. Siinä on esitetty useita kysymyksiä, jotka ovat tähän asti jääneet avoimiksi, koska kognitiivista radiota ei vielä ole olemassa. Vaikka asetettuihin tutkimuskysymyksiin saatiin vastaukset, tutkimus kirvoittaa useita selkeitä lisätutkimuksen tarpeita. Tutkimuksen laajentaminen tässäkin työssä sivuttuihin kognitiivisiin radioverkkoihin ja niissä tapahtuviin verkonmuodostuksiin ja liikkuvuuden hallintaan ovat kokonaisuuksia, joita tulisi tutkia sotilaallisesta näkökulmasta.

Myös kognitiivisen radion seurannaisvaikutusten tutkiminen tulisi aloittaa esimerkiksi DOTMLPFI-menetelmän¹⁶ mukaisesti pureutuen ensin niihin osa-alueisiin, jotka ovat hahmotettavissa. Kyseinen menetelmä on varsin kattava ja edellyttäne useita erillisiä tutkimuksia.

Niin ikään spektrissä tapahtuviin muutoksiin eriasteisissa kriisitilanteissa tulisi panostaa aiempaa enemmän: Miten spektri muuttuu eri skenaarioissa ja miten muutos tulisi ottaa huomioon? Onko mahdollista rakentaa uutta tiedonsiirtoinfrastruktuuria tuhoutuneen tilalle? Miten tuhoutuneelta infrastruktuurilta vapautunutta spektriä voidaan hyödyntää, tai onko se ylipäättään mahdollista edes regulaation puitteissa? Omana kokonaisuutenaan tulisi tarkastella myös kognitiivitekniikan disruptiivisuutta ja sitä, miten se voisi ilmetä.

Puolustusvoimien henkilökuntaan kuuluvien erityisesti johtamisjärjestelmien vaatimusmäärittelyyn osallistuvien upseereiden osaamistarpeiden tunnistaminen ja kehittäminen tulisi asettaa tulevaisuudessa tutkimuksen kohteeksi. Myös suunnitteluprosessia tulisi kehittää tukemaan selkeämmin jo nyt johtamisjärjestelmien käytön suunnittelua ja toimeenpanoa tukevaksi kokonaisuudeksi.

¹⁶ DOTMLPFI tulee sanoista Doktriini, Organisaatio, Koulutus (training), Materiaali, Johtaminen (leadership), Henkilöstö (personnel), Fasiliteetit, ja yhteistoiminta (interoperability). Nämä kuvaavat toiminnallisia osa-alueita, jotka tulee ottaa huomioon, kun uusia suorituskykyjä hankitaan tai korvataan (Kosola 2013, vaatimusten hallintaopas, s. 147).

Tämä tutkimuksen perusteella keskustelu sotilaallisten johtamisjärjestelmien kehityksestä ja konsepteista, taajuuksien hallinnoinnin tulevaisuuden vaatimuksista sekä Puolustusvoimien henkilöstön koulutuksesta tulisi aloittaa heti, jotta olisimme valmiina muutokseen 2020-luvulla.

LÄHTEET

1 JULKAISEMATTOMAT LÄHTEET

1.1 Puolustusvoimien asiakirjat

Puolustusvoimien vaikuttaminen, v. 0.9 luonnos, Puolustusvoimien vaikuttamisen konsepti. 2013, STIV viranomaiskäyttö, Puolustusvoimien asianhallintajärjestelmä. 33 s. Materiaali tutkijan hallussa.

PVTO2013, soveltuvuustutkimus loppuraportti TN26, Langattoman rajapinnan taistelunkes- tävyys 2013, STIV käyttö rajoitettu, 96 s. materiaalitutkijan hallussa.

PVTO2013, soveltuvuustutkimus loppuraportti TN32, Kognitiivinen toiminnallisuus LRV- verkon toiminnassa, 2013, STIV käyttö rajoitettu, 216 s. materiaali tutkijan hallussa.

Yhtymän viestitoimintaopas, 2001. PUMA 7610-448-7250, Ykkös-Offset Oy, Vaasa 2001, 121 s.

1.2 Haastattelut

Karsikas, J. YE-upseeri, operaatiopäällikkö, PVJJK. Jyväskylä. Haastattelu radioverkoista ja operatiivisista vaatimuksista, 28.3.2014, materiaali tutkijan hallussa.

Linden, T. upseeri, toimitusjohtaja, Kyynel OY. Oulu, tutkimuksen kommentointi, sähköpos- tikeskustelu, 27.3.2014 materiaali tutkijan hallussa.

Prokkola, J. Tekniikan tohtori, vanhempi tutkija, VTT. tutkimuksen kommentointi, sähköpos- tikeskustelu, 27.3.2014 materiaali tutkijan hallussa.

Rantanen H, DI, johtava tutkija (principal scientist), PVTT, Riihimäki. 25.3.2014, tutkimuk- sen kommentointi, materiaali tutkijan hallussa.

1.3 Muut julkaisemattomat lähteet

Asiantuntijakyselyn vastausaineistot (delfoin kierrokset 1 v. 2014 ja 2 v. 2015), materiaali tutkijan hallussa.

Kognitiivisen radion seminaari, Oulussa 11.11.2014, materiaali tutkijan hallussa.

2 JULKAISTUT LÄHTEET

2.1 Tutkimukset, opinnäytteet ja raportit

Ben Letaief, K. & Zhang, W. Cooperative communications for cognitive radio networks. *Proceedings of the IEEE*, Vol. 97, No. 5, s. 878–893. ISSN: 0018-9219, 2009.

Bose, T. *Efficient Jammers Using a Cognitive Radio Network, Summary of Projects*, Institute for Critical Technology and Applied Science at Virginia Tech, 2009.

Buddhikot, M. *Understanding dynamic spectrum access: Models, taxonomy and challenges. New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks*, DySPAN 2007. 2nd IEEE International Symposium on. IEEE, 2007.

CEPT Report 24, *A preliminary assessment of the feasibility of fitting new/future applications/services into non-harmonised spectrum of the digital dividend (namely the so-called "white spaces" between allotments)*, June 2008.

Filin, S., Harada, H., Murakami, H. & Ishizu, K. International standardization of cognitive radio systems. *IEEE Communications Magazine*, Vol. 49, No. 3, s. 82–89. ISSN: 0163-6804, 2011.

Goldsmith, A., Jafar, S. A., Maric, I. & Srinivasa, S. Breaking spectrum gridlock with cognitive radios: An information theoretic perspective. *Proceedings of the IEEE*. Vol. 97, No. 5, s. 894–914. ISSN: 0018-9219, 2009.

Gordon, T. J. "The delphi method." *Futures research methodology* 2, 1994.

Haykin, S. Cognitive radio: Brain-empowered wireless communications. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. Vol. 23, No. 2, s. 201–220. ISSN: 0733-8716, 2005.

Huutoniemi, K. *Frameworks for Interdisciplinary Environmental Analysis (FIDEA)*, Helsinki, 2010., viitattu 1.7.2015, saatavissa lähteestä:
<http://www.fidea.fi/index.php?page=tieteidenvalisyys>

ITU-R Report M.2072. *World mobile telecommunication market forecast. International Telecommunication Union Radio-communication sector*. 132 s., 2005.

ITU-R Report SM.2152. 2009. *Definitions of software defined radio (SDR) and cognitive radio system (CRS). International Telecommunication Union Radiocommunication sector*. 3 s., 2009.

ITU-R Report M.2243. 2011d. *Assessment of the global mobile broadband deployments and forecasts for International Mobile Telecommunications. International Telecommunication Union Radiocommunication sector*. 96 s., 2011.

ITU-R Report M.2225. 2011b. *Introduction to cognitive radio systems in the land mobile service. International Telecommunication Union Radiocommunication sector*. 17 s., 2011.

Karsikas, J. *Maavoimien verkostokeskeisen tiedonsiirtojärjestelmän arkkitehtuuri ja sen toteuttaminen*, YEK-diplomityö, Helsinki, MPKK, sotatekniikanlaitos. 152 s., 2007.

Kuosmanen, P. *Taktisten Adhoc-verkkojen toteuttamismahdollisuudet erilaisissa ympäristöissä*. YEK-diplomityö, MPKK, sotatekniikanlaitos. 179 s., 2004.

Kärkkäinen, A. *Kognitiiviset tietoliikenneverkot verkostopuolustuksessa*. EUK-tutkielma, MPKK. 50 s., 2011.

Kärkkäinen, A. *A cyber security architecture for military networks using a cognitive network approach*, YEK-diplomityö, MPKK. 114 s., 2013.

Ma, J., Li, G. Y. & Juang, B. H. Signal processing in cognitive radio. *Proceedings of the IEEE*, Vol. 97, No. 5, s. 805–823. ISSN: 0018-9219, 2009.

Matinmikko, M. *Spectrum sharing using cognitive radio system capabilities: Methods to obtain and exploit knowledge of spectrum availability*. väitöskirja, VTT science 20. 77 s., 2012.

Matrosov, A., Rodionov, E., Harley, D & Malcho, J. *Stuxnet Under the Microscope*. 66 s., 2010. viitattu: 21.3.2014 Saatavissa: http://www.eset.com/us/resources/white-papers/Stuxnet_Under_the_Microscope.pdf

Mitola, J. *Cognitive radio model-based competence for software radios*. Lisensiaatintyö. Stockholm, Sweden: Royal Institute of Technology. 1999. 146 s. ISSN 1403-5286, 1999.

Mitola J. & Maguire, G. Q. Cognitive radio: Making software radios more personal. *IEEE Personal Communications*, vol 6, No. 4, s. 13–18. ISSN: 1070-9916, 1999.

Mitola, J. Cognitive radio architecture evolution. *Proceedings of the IEEE*, Vol. 97, No. 4, s. 626–641. ISSN: 0018-9219, 2009.

Munkki, A., *Merivoimat ja viranomaisten tukeminen 2030*. Diplomityö. Maanpuolustuskorkeakoulu, yleisesikuntaupseerikurssi 54, merisotalinja, 2009.

NATO, *Cognitive Radio in NATO, Findings of Task Group, IST-077*, STO Technical report, AC/323(IST-077)TP/497, 124 s., 2014.

Perich, F., Morgan, E., Ritterbus O., McHenry M. & D'Itri S. Efficient Dynamic Spectrum Access Implementation, *The 2010 Military Communication Conference, Networking Protocols and Performance Track*, 6 s., 2010. Viitattu 17.6.2015, saatavissa lähteestä: <http://www.sharedspectrum.com/wp-content/uploads/Perich-et-al-on-Efficient-DSA-Implementation-MILCOM-2010.pdf>

Raniwala, A. & Tzicker C. Architecture and algorithms for an IEEE 802.11-based multi-channel wireless mesh network. INFOCOM 2005. 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. *Proceedings IEEE*. Vol. 3. IEEE. 12 s., 2005.

Thoresen, T. & Ulversoy T., *MILKOG – a cognitive radio electronics warfare agent architecture*, FFI-rapport 2012/00419, Norwegian Defence Research Establishment (FFI), May 2012, ISBN 978-82-464-2108-7, 65 s., 2012. Viitattu 2.1.2015, saatavissa lähteestä: <http://www.ffi.no/no/Rapporter/12-00419.pdf>

Tuukkanen T., Pouttu A., & Leppänen P. *Finnish Software Radio Programme*. Oulu: Telecommunication Laboratory and Centre for Wireless Communications, 2003.

Tuukkanen, T. & Anteroineen, J. Initial Assessment of Proposed Cognitive Radio Features from a Military Perspective In: *18th International Command and Control Research and Technology Symposium*, 18th ICCRTS conference, Alexandria Virg., 19.–12. kesäkuuta 2013. 20 s., 2013.

Valtonen, V. *Turvallisuustoimijoiden yhteistyö operatiivis-taktisesta näkökulmasta*. Väitöskirja. MPKK:n Julkaisusarja 1 nro 3, 2010.

Wireless Innovation Forum. Quantifying the Benefits of Cognitive Radio. 2010 2nd Dec 2010; WINNF-09-P-0012-V1.0.0. 122 s., 2010.

Yoshino, H. ITU-R standardization activities on cognitive radio. *IEICE Transactions on Communications*, Vol. E95-B, No. 4, s. 1036–1043. ISSN: 1745-1345, 2012.

Zhao, Y., Mao, S., Neel, J. O. & Reed, J. H. 2009. Performance evaluation of cognitive radios: Metrics, utility functions, and methodology. *Proceedings of the IEEE*, Vol. 97, No. 4, s. 642–659, 2009. ISSN: 0018-9219.

2.2 Kirjallisuus

Heikkilä, T. *Tilastollinen tutkimus*, 5 -6. painos, Edita Prima oy, ISBN 951-37-4135-4, 2005.

Häder, M. & Häder, S., Delphi und Kognitionspsychologie: Ein Zugang zur theoretischen Fundierung der Delphi-Methode. *ZUMA-Nachrichten*, Vol 37, s. 8–34, 1995.

Kosola, J. *Suorituskyvyn elinjakson hallinta*, Maanpuolustuskorkeakoulu, Sotatekniikan laitos, julkaisusarja 5, nro7, ISBN 978-951-25-1816-6, 393 s., 2004.

Kosola, J. *Disruptiiviset teknologiat puolustuskontekstissa*, Puolustusvoimat, materiaaliosasto, ISBN 978-951-25-2519-5, 2013.

Kosola, J. *Vaativuustenhallinnan opas*, Maanpuolustuskorkeakoulu, Sotatekniikan laitos, Julkaisusarja 5. No 12, ISBN 978-951-25-2454-9 (PDF), 2013.

Kosola J. & Jokinen J. *Elektroninen sodankäynti osal – taistelukentän viides dimensio*. MPKK julkaisusarja 5, nro 2. 200 s., 2004.

Kuusi, O. Delfoi-menetelmä, julkaisussa Kamppinen, M., Kuusi, O. & Söderlund, S. (2003), *Tulevaisuudentutkimus*. Tammer-Paino Oy, Tampere, 2002.

Linstone, H. A., & Murray T. (toim.), *The Delphi method: Techniques and applications*. Vol. 29. Reading, MA: Addison-Wesley, 1975, 2002.

Linstone, H. A., & Murray T. (toim.), *The Delphi Method. Techniques and Applications*. <http://is.njit.edu/pubs/delphibook/index.html>, 2002.

Metsämuuronen, J. (toim.), *Laadullisen tutkimuksen käsikirja*. Gummerus Kirjapaino Oy, Jyväskylä, 2006.

Tuomivaara, T. Kvantitatiivinen ja kvalitatiivinen tutkimus. *Tieteellisen tutkimuksen perusteet*, 28–40, 2005.

Vehkalahti, K. *Kyselytutkimuksen mittarit ja menetelmät*. Tammi, 2008.

Woudenberg, F. *An Evaluation of Delphi. Technological Forecasting and Social Change* 40, s. 131–150, 1991.

2.3 Lehdet

Parkatti, V-P. Maavoimien taistelu uudistuu. *Sotilasaikakauslehti* 9/2012, s. 11–19, 2012.

2.4 Viranomaisten tuottamat asiakirjat, lait ja muut lähteet

Alahuhta, M., haastattelu, *Ylen Ykkösaamu*, 21.2.2015. viitattu 15.3. 2015, saatavissa lähteestä: <http://arena.yle.fi/1-2449063>

Federal Communications Commission, *Connecting America: The National Broadband Plan*, March 2010.

Hoppe, J. S. & TCD *Activities in Cognitive Policy and Antennas*, JTRS Science and Technology Forum (JSTeF) 3, January 26-30, 2009.

Hon T. H. *Multiple antennas for MIMO communication – basic theory*, 2014. luentomateriaali, University on Singapore, 48 s. viitattu 29.3.2014, saatavissa lähteestä: <http://www.ece.nus.edu.sg/stfpage/elehht/Teaching/EE6832/Lecture%20Notes%5CMultiple%20Antennas%20for%20MIMO%20Communications%20-%20Basic%20Theory.pdf>

IEEE Standard. *IEEE Standard Definitions and Concepts for Dynamic Spectrum Access: Terminology Relating to Emerging Wireless Networks, System Functionality, and Spectrum Management*. 2008; 1900.1-2008.

Korkiamäki, I., *Kenraali, Puolustusvoimien johtamisjärjestelmäpäällikkö*, AFCEA:lle (Armed Forces Communication and Electronics Association) pidetty esitelmä 6.11.2013, 11 s.

Liikenne- ja viestintäministeriö, *Communications Policy Program for Electronic Media*, Government report to the Parliament on Finland 2012. 2012. 105 p.

Linturi, Hannu (2007), Delfoin metamorfooseja. *Futura* 1/2007.

Puiteohjelma 7, Euroopan komissio, tutkimuksen pääosasto, viitattu 1.7.2015, saatavissa lähteestä: https://ec.europa.eu/research/fp7/pdf/fp7-brochure_fi.pdf

Puolustusministeriö, *Tulevaisuuden katsaus*, 2012, 16 s. viitattu 16.2.2015, saatavissa lähteestä: http://www.defmin.fi/files/693/Tulevaisuus_katsaus_PLM.pdf

Redi, J. & Ramanathan, R. *The DARPA WNaN network architecture*. Military communication conference 2011, 2011-MILCOM 2011. IEEE, 2011. p. 2258-2263.

Scheers, B. How to introduce Dynamic Spectrum Access technology in NATO tactical communications? In: *SDR conference*. Bryssel, 2.–3.12. 2013 Belgium. 37 p. Materiaali tutkijan hallussa.

Suomen kyberturvallisuusstrategia, valtioneuvoston periaatepäätös 24.1.2013, ISBN: 978-951-25-2434-1 pdf, 38 s.

Tietoyhteiskuntakaari, 7.11.2014/917, viitattu 30.4.2015, saatavissa lähteestä:

[https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2014/20140917?search\[type\]=pika&search\[pika\]=tietoyhteiskuntakaari#L38P303](https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2014/20140917?search[type]=pika&search[pika]=tietoyhteiskuntakaari#L38P303)

Viestintävirasto, *Taajuusjakotaulukko*, 2013. 191 s., viitattu: 21.2.2014. saatavissa lähteestä:

https://www.viestintavirasto.fi/attachments/Taajuusjakotaulukko_31122013.pdf

Viestintävirasto, *Taajuussuunnittelu*, 8.3.2013, viitattu: 16.5.2015. saatavissa lähteestä:

<https://www.viestintavirasto.fi/taajuudet/taajuussuunnittelu.html>

Viestintävirasto, *Esittely ja tehtävät*, 25.2.2015, viitattu: 17.5.2015. saatavissa lähteestä:

<https://www.viestintavirasto.fi/viestintavirasto/virastonesittelyjatehtavat.html>

Valmiuslaki, §61, 29.12.2011/1552: Radiotaajuuksiin kohdistuvat toimenpiteet. viitattu:

15.1.2014, saatavissa lähteestä:

[http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2011/20111552?search\[type\]=pika&search\[pika\]=valmiuslaki#L9P61](http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2011/20111552?search[type]=pika&search[pika]=valmiuslaki#L9P61)

Valtioneuvoston asetus radiotaajuuksien käytöstä ja taajuussuunnitelmasta, 18.12.2014, vii-

tattu 30.4.2015, saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2014/20141246>

Valtioneuvoston periaatepäätös kokonaisturvallisuudesta, 2012, viitattu 29.12.2014, saatavissa lähteestä:

<http://valtioneuvosto.fi/tiedostot/julkinen/periaatepaatokset/2012/kokonaisturvallisuus/fi.pdf>

LIITTEET

- LIITE 1 Asiantuntijapaneelin asiantuntijat ja roolit
- LIITE 2 Saatekirje asiantuntijoille
- LIITE 3 Delfoin 1. kierroksen kysymykset
- LIITE 4 Delfoin 2. kierroksen kysymykset ja asiantuntijoiden vastaukset
- LIITE 5 Kognitiivisten ominaisuuksien vaikutuksia elektronisessa suojautumisessa
- LIITE 6 Kognitiivisten ominaisuuksien vaikutuksia uhkan näkökulmasta
- LIITE 7 Toiminnallisten väittämien vastausjakaumat ja johtopäätökset
- LIITE 8 Teknisten väittämien vastausjakaumat ja johtopäätökset

Taulukko 1: Delfoi – asiantuntijapaneelin asiantuntijat

Nimi	Organisaatio	Asiantuntijaryhmä
Topi Tuukkanen	PVTUTKL	Operatiivinen + tutkimus
Heikki Rantanen	PVTUTKL	Tutkimus
Jarmo Prokkola	VTT	Tutkimus
Jan Engelberg	Viestintävirasto	Regulaatio
Toni Lindén	Kyynel Oy	Operatiivinen + teollisuus
Matti Raustia	Kyynel Oy	Tutkimus + Teollisuus
Reima Kettunen	Elektrobit Oy	Teollisuus
Ari Hulkkonen	Elektrobit Oy	Teollisuus
Petteri Kuosmanen	Pääesikunta	Operatiivinen + regulaatio
Rami Helander	Pääesikunta	Regulaatio
Simo Penttinen	PVJJK	Regulaatio
Jarkko Karsikas	PVJJK	Operatiivinen + regulaatio
Kimmo Welling	PVTIEDL	Operatiivinen
Mika Hyytiäinen	MPKK	Operatiivinen+ tutkimus

Saatekirje YEK:n diplomityöhön liittyen

Tervehdys

Pyydän teitä osallistumaan asiantuntijana diplomityöni kognitiivista radiota ja sen kehitystä koskevaan paneeliin. Paneeli toimii sähköisesti sähköpostin välityksellä, ja siihen kuuluu yhteensä 12–16 asiantuntijaa. Osallistujien henkilöllisyyttä ei paljasteta muille panelisteille tutkimuksen aikana. Loppuraportissa panelistit esitellään asiantuntijaroolinsa kautta erillisessä liitteessä. Asiantuntijat on valittu siten, että heidän voidaan katsoa edustavan vähintään yhtä seuraavista aloista: 1) tutkimus, 2) teollisuus, 3) regulaatio ja lainsäädäntö sekä 4) sotilasasiantuntija (operatiivinen näkemys). Koska panelistiryhmä on tarkkaan harkittu ja suljettu, on hyvin tärkeää, että jokainen panelisti osallistuisi tutkimuskyselyyn sen jokaisessa vaiheessa (2–3 kyselykertaa).

Tutkimuksessa sovelletaan delfoi-tutkimusmenetelmää, jota tyypillisesti käytetään tulevaisuuteen suuntautuvassa tutkimuksessa. Menetelmän mukaisesti tutkimuksen ensimmäisellä kierroksella kartoitetaan asiantuntijoiden perusteltuja mielipiteitä tutkittavasta asiasta, tässä tapauksessa kognitiivisesta radiosta. Toisella vastauskierroksella (alustavasti marras-joulukuussa 2014) asiantuntijat kommentoivat ohjatusti ensimmäisen kierroksen havaintoja tarkoituksena synnyttää dialogia eri näkemysten välillä ja syventää jo esitettyjä perusteluja. Lisäksi tarkoituksena on arvioida kognitiivisen radion luomia uhkia ja mahdollisuuksia. Mahdollisella kolmannella vastauskierroksella vuodenvaihteessa 2014/2015 pyydetään vielä asiantuntijoiden palautetta edellisten vastauskierrosten perusteella saatuihin alustaviin tutkimustuloksiin.

Perinteisesti delfoi-menetelmällä on pyritty löytämään konsensus asiantuntijoiden kesken. Tässä tutkimuksessa ei niinkään tavoitella yhtenäistä näkemystä, vaan tavoitteena on laaja-alaisesti selvittää eri toimijoiden käsityksiä kognitiivisen radion ja sen ominaisuuksien käytettävyydestä ja mahdollisista vaikutuksista sotilaallisessa toimintaympäristössä. Tärkeimpänä tutkimuskysymyksenä on saada selville, mitkä kognitiiviset sovellukset tai ominaisuudet panelistien mielestä ovat tai eivät ole olennaisia Puolustusvoimille.

Tutkimuskyselyt on pyritty suunnittelemaan siten, että niihin vastaaminen ei vie kohtuuttomasti osallistujien työaika (vastaajasta ja osiosta riippuen arviolta 30–60 minuuttia kierrosta kohden). Tutkimuksen valmistuttua tutkimusraportti ja sen tiivistelmä toimitetaan sähköisessä muodossa kaikille kyselyyn vastanneille.

Ohessa lähetän teille kyselyni Word-muodossa. Tämä tiedostomuoto on valittu, jotta kysely olisi vastaajan nähtävissä kokonaisuudessaan ja vastauksia olisi mahdollista tarvittaessa täydentää useaan otteeseen. Mikäli tiedoston avaamisessa tai luettavuudessa on ongelmia, pyydän ottamaan yhteyttä viipymättä sähköpostitse.

Pyydän vastaamaan kyselyihin mahdollisimman pian, kuitenkin **viimeistään 30.10.2014 mennessä**, ja lähettämään ne sitten takaisin sähköpostin liitetiedostona (mielellään doc-, dcox-, rtf- tai pdf-muodossa) osoitteeseen jussi.honko@mil.fi. Vastaan tarvittaessa mielelläni tutkimusta koskeviin lisäkysymyksiin. Suurkiitos osallistumisesta!

KOGNITIIVISET OMINAISUUDET, NIIDEN MERKITYS JA ARVOTTAMINEN

Taustatietokysymys

Tutkimuksen asiantuntijat on pyritty valitsemaan 4 eri roolista. Edustatko mielestäsi yhtä tai useampaa seuraavista rooleista? Rastita sopivat vaihtoehdot.

1) tutkimus	<input type="checkbox"/>
2) teollisuus	<input type="checkbox"/>
3) regulaatio	<input type="checkbox"/>
4) operatiivinen (sotilaallinen)	<input type="checkbox"/>

Kysely

Kirjoita vastaukset annettuihin soluihin. Vastausten pituutta ei ole rajoitettu.

Kysymys 1: Mitkä seuraavista kognitiivisista ominaisuuksista ovat mielestäsi tärkeimmät, kun puhutaan radion käytöstä sotilaallisessa käyttöympäristössä?

a) Merkitse annettujen ominaisuuksien paremmuusjärjestys taulukkoon numeroilla 1 - 7(/n). Viereiseen kommenttikenttään voit perustella valintaa ja/tai kommentoida ominaisuutta tai annettua määritelmää.

Lisää mielestäsi olennaiset puuttuvat ominaisuudet annettujen ominaisuuksien alapuolella oleville riveille ja perustele valintasi. Ota tällöin myös lisätyt ominaisuudet mukaan numerointiin ja perustele lisäys viereiseen kommenttikenttään.

b) Perustele lopuksi laatimaasi paremmuusjärjestystä.

Radion sotilaallisella käyttöympäristöllä tarkoitetaan tässä tutkimuksessa laajalle alueelle levittäytynyttä, hierarkkisesti järjestäytynyttä ja usean eri tiedonsiirtojärjestelmän käsittävää verkkoa, jossa spektrin käyttömahdollisuudet vaihtelevat nopeasti sekä ajallisesti että paikallisesti.

Ominaisuus <i>tarkemmat kuvaukset liitteenä tiedoston lopussa</i>	Ominaisuuden tärkeys asteikolla 1 - 7(/n)	Huomioita ominaisuuksista ja määritelmästä sekä perustelut mahdollisiin lisäominaisuuksiin
Dynaaminen spektrin hyväksikäyttö (DSA)		

Kognitiivinen verkonmuodostus (mm. self-organized networks ja rolebased reconfiguration)		
Kognitiiviset häirintäjärjestelmät		
Moniantennijärjestelmät (MIMO ym.)		
Radioresurssien hallinta (radioparametrien optimointi)		
Yhteyksien adaptiivisuus		
Reaaliaikaisesti toimivat kaupalliset spektrimarkkinat		
lisäys 1		
lisäys 2		
lisäys 3		
lisäys n		
Perustelee laatimaasi paremmuusjärjestystä:		
<i>Kysymys 2: Mitkä ovat mielestäsi merkittävimmät esteet kognitiivitekniikan sekä kognitiivisen radion käyttöönotolle puolustusvoimien näkökulmasta?</i>		

Kysymys 3: Kuvaa ideaalinen kognitiivinen radio ja kerro, mitä ominaisuuksia siihen kuuluu.

Kysymys 4: Arvioi lyhyesti omaa kompetenssiasi tähän kyselyyn vastaamisessa. (Kuinka paljon ja mistä näkökulmista olet aiemmin työstänyt yllä olevia kysymyksiä? Miksi vastaaminen oli helppoa/vaikeaa?)

Liite 1: Ominaisuuksien kuvaukset

Dynaaminen spektrin hyväksikäyttö (DSA): Dynaaminen spektrin hyväksikäyttö on kuvattu IEEE:n standardissa reaaliaikaiseksi spektrin hyväksikäytöksi, jossa radio sopeutuu ympäristöön ja tehtäviin. DSA:n on kuvattu parantavan spektrin käyttöastetta ja tehokkuutta.

Kognitiivinen verkonmuodostus (mm. self-organized networks ja rolebased reconfigurati-on): SON:llä tarkoitetaan verkkoa, joka voi automaattisesti laajentua, muuntua ja konfiguroitua sekä optimoida verkon peittoaluetta, kapasiteettia, solukokoa, topologiaa, taajuusallokointia ja kaistanleveyksiä. Optimointikyky perustuu verkon kykyyn reagoida häiriöiden muutoksiin, signaalin vahvuuteen, paikkaan, viestiliikenteen toimintamalliin (traffic pattern) ja muihin ympäristöllisiin ominaisuuksiin. RBR-konseptilla tarkoitetaan sitä, että laite tai laitteet voidaan konfiguroida yksilön tehtävän mukaan.

Kognitiiviset häirintäjärjestelmät: Kognitiivinen radio, joka pystyy itsenäisellä päätöksenteolla väistämään häiriöt ja häirinnän, herättää kysymyksen vastajärjestelmästä. Kognitiivinen häirintäjärjestelmä kykenee maksimoimaan häirinnän vaikutuksen häirittävään kohteeseen ja minimoimaan häiriöt omiin järjestelmiin, eli se muuntuu ja konfiguroiduu tilanteen mukaan.

Moniantennijärjestelmät (MIMO ym.): Moniantennijärjestelmillä voidaan parantaa tiedonsiirtojärjestelmän suorituskykyä, kuten datansiirtonopeuksia, ja kohentaa yhteyden toimintavarmuutta. Niiden avulla voidaan myös lisätä suorituskykyä esimerkiksi kasvattamalla peittoalueita, verkonmuodostusta ja yhteysetäisyyksiä sekä vähentämällä energiankulutusta.

Radioresurssien hallinta (radioparametrien optimointi): Prosessia, jolla radion eri parametreja, kuten teho, taajuus ja hyytynopeus, hallitaan järjestelmätasolla, kutsutaan radioresurssien hallinnaksi (RRM).

Yhteyksien adaptiivisuus: Adaptiivisuuden kautta datan siirtonopeuksia voidaan kasvattaa, peittoalueet laajenevat, yhteyksien luotettavuus paranee.

Reaaliaikaisesti toimivat kaupalliset spektrimarkkinat: Spektri on vapaammin kaikkien käytettävissä siten, että myös muut toimijat (toissijainen käyttäjä, engl. secondary user) voivat käyttää jollekin tietylle toimijalle dedikoitua taajuuskaistaa (ensisijainen käyttäjä, engl. primary user). Edellytyksenä on, että toissijaiset käyttäjät eivät häiritse ensisijaista käyttäjää.

Delfoi 2. kierros _Honko

1. Ovatko järjestys ja perustelut mielestäsi valideja seuraavista näkökulmasta?

Vastaajien määrä: 13

	eivät ole	ovat vähän	ovat koh- tuulli- sesti	ovat hyvin	ovat erittäin hyvin	ei kantaa	Yhteensä	Keskiarvo
Suorituskykyllisän näkökulmasta	0	1	1	3	8	0	13	4,38
Teknisen toteutuksen näkökulmasta	0	2	2	5	4	0	13	3,85
Tuotekehityksen (kognitiiviteknikan kypsyyden) näkökulmasta	0	2	5	3	3	0	13	3,54
PV:n johtamisjärjestelmien kehityksen näkökulmas- ta	0	1	1	5	6	0	13	4,23
Yhteensä	0	6	9	16	21	0	52	4

2. kommentti

Vastaajien määrä: 8

kommentti (suorituskykyllisä)

- Täytyy kuitenkin muistaa, että dynaaminen spektrin käyttö ei ole sama kuin kognitiiviradio. Se on yksi työkalu, jota kognitiiviradio käyttää.
- Taajuusresurssien dynaamisen käytön ja ympäristön tilannekuvan hyödyntämisen suhteen.
- Oletuksena on, että olemme "alivoimaisia" ja tämä on sen keskeinen kompensatiotapa vs Venäjä
- Esitetty kolmikko on myös oma suosikkini tässä aihepiirissä, joten olen täysin samaa mieltä. Toisaalta esim. moniantennijärjestelmät tuovat huomattavaa suorituskykyllisää, mutta mielestäni ne eivät alun perinkään olleet varsinaisia kognitiivisia menetelmiä.
- Sotilaallisesti paras suorituskykyllisä nimenomaan DSAsta, muut tukevia/täydentäviä ominaisuuksien hienosäätöjä
- liikenteiden priorisointi spektrin ruuhkautuessa tulee huomioida
- Konginiivisen radion tulokulma on hyvin radio, fyysinen kerros ja ilmarajapintaorientoitunutta. Radio tulisi nähdä osana verkkoa, joko langatonta tai hybridiä, jolloin verkkotason ominaisuudet ovat kokonais-suorituskyvyn kannalta merkittävämpiä. Taajuuden merkitystä korostetaan siksikin liikaa, että fyysiset radion rajoitukset (analogiset osat) rajoittavat radion mahdollisuutta hyödyntää spektriä vapaasti.

kommentti (tekninen toteutus)

- Kolme ensimmäistä ovat mielestäni korkeamman tason "toiminnallisuksi", jotka voidaan toteuttaa useilla erilaisilla tavoilla eivätkö siten sisällä tarkkaa kuvausta teknisestä toteutuksesta.
- Nämä kolme valittua ovat avainasemassa suorituskykyllisessä, mutta ne ovat haastavia toteuttaa.
- DSA tunnetaan heikosti ja tutkittu enimmäkseen siviilisov näkökulmasta. Sotilaall DSA-sovelluksia ei ole tutkittu juurikaan ja SONitkin vielä aluillaan
- Kuten yllä: Dynaamisen radion toteuttamisen haasteet ovat analogisissa osioissa eli antennin ja muuntimen välissä. verkkotason ratkaisuja voidaan toteuttaa nopeammin ja saada ne parantamaan suorituskykyä.

kommentti (tuotekehitys)

- DSA on vielä tutkimusaihe, eikä siten tuotekehitys- ja tuotantotasolla kuten 2) ja 3) ovat.
- Järjestys olisi toinen ja mm moniantenni on teknisesti todennäköisesti kypsempää
- Kyseiset valitut menetelmät ovat vielä osittain tutkimusasteella.
- DSA:n sot sov jja SONit tutkittu vähän, tuotteistaminen kesken

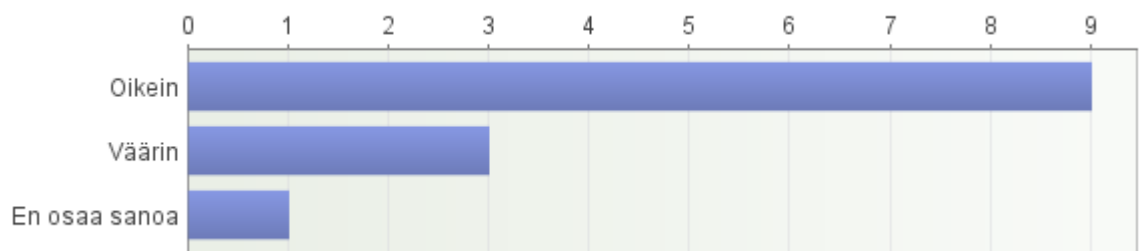
- Tuotekehityksen ja tutkimuksen kannalta spektrin käytön laajentamisen mahdollistaminen on toki tärkeää.

kommentti (johtamisjärjestelmien kehitys)

- Vastaus yllä olevan kohdan perusteella näin.
- Mikäli PV haluaa hyödyntää kognitiivisia menetelmiä, näistä se on aloitettava.
- Oikeastaan PV:n johtamisjärjestelmän kehityksen näkökulma muodostuu noista kolmesta aiemmasta. Eli pitää saada suorituskkyä, teknisesti riittävän pienellä riskillä ja mielekkäällä hinnalla. Näin ollen nuo 3 kriteeriä on hyvin valittu.
- DSAn merkitystä sotilaallisille toiminnoille ei vielä täysin tunneta saati ymmärretä
- Johtamisjärjestelmien kehittämisen ei tarvitse välittää infran kehittämisestä, riittää, että tunnistaa sen asettamat rajoitteet (joita ei ole aina kylläkään tunnistettu)

3. Kognitiivisella radiolla tulee olla laaja toimintakaista (esimerkiksi 3 - 3000 MHz).

Vastaajien määrä: 13



4. kommentti

Vastaajien määrä: 10

Kommentti (oikein)

- Ideaalitilanteessa näin. MUTU tuntumalla tästä ehkä voidaan joutua tinkimään ja erottelemaan taajuusalueita ainakin alkuvaiheessa.
- Tällä mahdollistetaan taajuusresurssien mahdollisimman tehokas käyttö ja radion tarkoituksenmukainen toiminta eri skenaarioissa.
- Laaja toimintakaista antaa suuremman todennäköisyyden ajassa/paikassa käyttömättömien taajuusresurssien hyödyntämiseen. TOimintakaista tulee olla suhteutettuna hyötysignaalien läheteiden leveyksiin luonnollisesti.
- Mitä laajempi toimintakaista, sitä paremmat mahdollisuudet suorituskkyilyksykseen.
- Periaatteessa kyllä, mutta menetelmien tulisi myös mukautua huomattavasti suppeampaa kaistaan (esim. vaikka vain 225-400)
- Tekniikat pääsevät oikeuksiinsa vasta, kun kaistaa on riittävästi käytössä. Ongelman tulee muodostamaan radiohallintojen nihkeä suhtautuminen kognitiivisiin radiotekniikoihin. Joka tapauksessa radioiden toimintakaistat tulee pitää mahd.laajoina.

Kommentti (väärin)

- Pitää olla myös mahdollisuus rajoittaa kaistaa tarvittaessa, toiminnan ei pidä perustua siihen, että koko kaista on käytössä.
- Ei kokonaiskaistalla ja kognitiivisuudella ole mitään tekemistä keskenään, mistäs moinen tuli - tuskin ainakaan asiantuntijoilta?

Toki kognitiiviradio voi toimia laajalla kaistallakin!

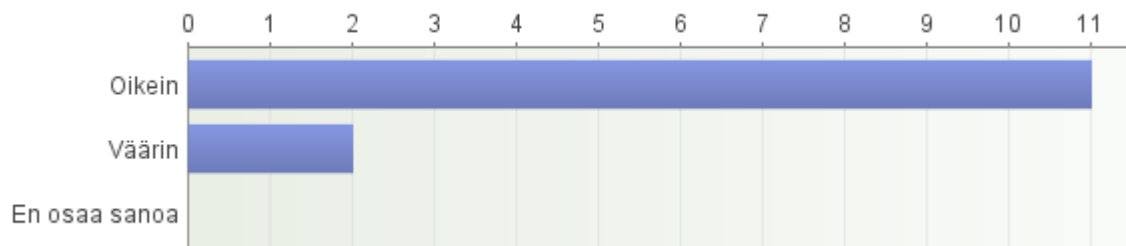
- Riippuu radion käyttötarkoituksesta. Ei kannata tehdä radiosta kalliimpaa kuin on tarve.

Kommentti (En osaa sanoa)

- Riippuu sovelluksesta. Voisi ajatella, että on usea alue muttei jatkumoa (esim 3 - 60, 600 - 900, 1700 - 3000) tai vahvuus jollakin tietyllä alueella

5. Kognitiivisen radion perusedellytys on tilannetietoisuus spektristä.

Vastaajien määrä: 13



6. kommentti

Vastaajien määrä: 11

Kommentti (oikein)

- Vastaan "oikein", vaikka tämä on varsin suppea näkemys, varsinkin jos tämä tulkitaan spektrin mittaamiseksi ja analysoinniksi. Kognitiiviradion tulee olla tietoinen kaikista käytettävissä resursseista oman kyvykkyytensä (hyödyntää niitä) puitteissa.
- Muuten lienee mahdotonta löytää sopivaa/parastamahdollista taajuutta käyttöön
- Jotta radio voi sopeuttaa toimintaansa vallitseviin olosuhteisiin, tulee sen olla tietoinen olosuhteista.
- Tietoisuuden ympäristön tilanteesta on oleellinen toiminnallinen ominaisuus ja vaatimus.
- Adaptiota ei synny ilman tätä - tosin tiedon voinee tuoda osin ulkopuoleltakin jotta radion koko resurssi ei mene spektrinmittaamiseen
- Perusedellytys
- Periaatteessa kyllä ja on varmastikin ensisijainen alue, missä kognitiivisuutta kannattaa implementoida. Mutta voihan olla, että tästä tietoisuudesta riippumatta päätöksiä voidaan tehdä kognitiivisesti muilla kerroksilla.
- Miten se ylipäättään voisi muutoin toimia?
Tässä kuitenkin lyödään poskelle ELSU-suorituskykyä, jos radiot tekevät jatkuvasti tilannekuvaa spektristä erilaisin koelähetyksin ja tilannekuvaviestein.
- Määritelmän mukaan CR:n perustoiminnallisuutta.

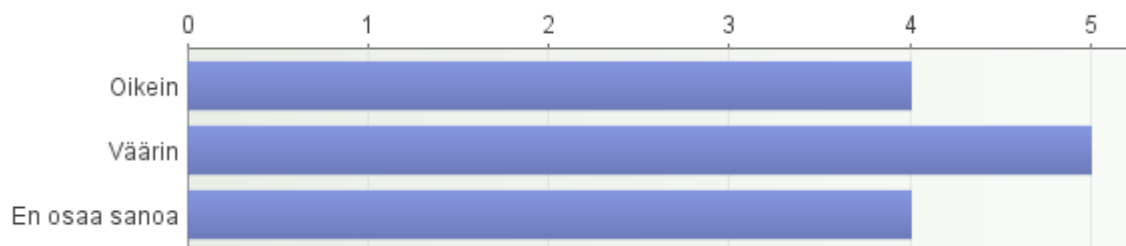
Kommentti (väärin)

- Aikafunktio !!!
..tulee olla tietoisuusbn spektristä jota itse käyttää kyseisellä hetkellä ja tietoisuus spektrin osista joita suunnittelee/hahmottelee (mutta ei ole vielä päättänyt) käyttävänsä N hetken / M hypyn kuluttua tai ajan.
- Mahdollistaa taajuuselementit, mutta ei tarvita esim verkkotason ratkaisuissa ollenkaan.

Kommentti (En osaa sanoa)

7. Kognitiivisen radion arkkitehtuurin tulee perustua ohjelmistoradioon SR (ei siis SDR).

Vastaajien määrä: 13



8. kommentti

Vastaajien määrä: 8

Kommentti (oikein)

- Tällä taataan mahdollisimman suuri vapaus toiminnan määrittelyssä sekä kyetään optimoimaan kognitiivitoiminnallisuuden käyttö ja sitä kautta suorituskyky.
- Kognitiivisuuden oleellinen osa on kyky reagoida ja se vaatii ohjelmistollisuutta

Kommentti (väärin)

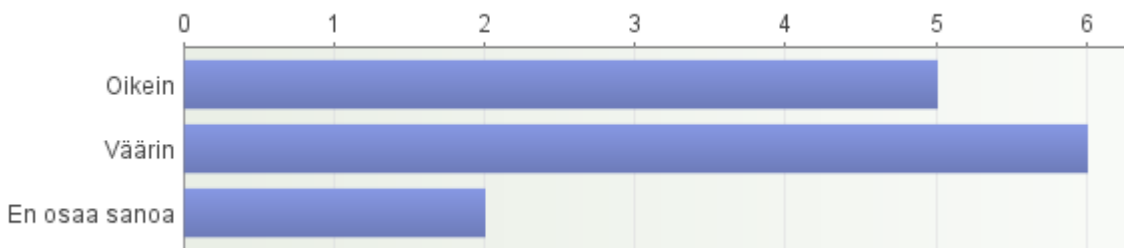
- a) Ideaalista ohjelmistoradiota ei ole olemassakaan
- b) kognitiiviradio tarvitsee toimiakseen riittävän joustavuuden, joka voidaan tuottaa eri menetelmillä
- c) SDR tai SR ei ole sama kuin kognitiiviradio. En usko, että kukaan "asiantuntija" on tästä eri mieltä.
- d) SDR on toki hyvä toteutusalue
- Ohjelmistoradiosta on aivan kiistatonta ja huomattavaa etua kognitiivisen radion kannalta, mutta arkkitehtuurin ei ole pakko perustua ohjelmistoradioon.
- Ihanteellinen/ideaalinen ohjelmistoradio tekee vielä tuloaan ja etenkin näytteistäminen suoraan antennista vielä haasteena ==> SDR on realistinen alusta vielä hyvän aikaa enkä näe erityistä syytä tai perustetta pakottaa CRää SR-alustaiseksi nopeammin kuin komponenttitekniologian luontainen kehitys mahdollistaa
- EI tarvitse, HF:ää ylempillä taajuuksilla se ei ole vielä edes mahdollista.

Kommentti (En osaa sanoa)

- Rajanveto hankalaa, jotkut SDR toteutukset ovat käytännössä SR toteutuksia.
- En oikein ole varma mitä SR sitten loppujen lopuksi on ja mistä se alkaa ja mihin SDR loppuu

9. Kognitiivinen radio pystyy luokittelemaan havaitsemansa signaalityypit sekä erittelemään omat, vihollisen ja neutraalit lähetteet.

Vastaajien määrä: 13



10. kommentti

Vastaajien määrä: 9

Kommentti (Kyllä)

- Ainakin jollain karkealla ns. taulukkotasalla tämä toiminnallisuus olisi hyödyllinen. Reaaliaikainen kirjastoisiin perustuva luokittelu voi suorituskyky mielessä olla haastavaa.

Kommentti (Ei)

- Luokittelua olennaisempi on yhteyden muodostaminen.
- Nämä ovat hyviä ominaisuuksia, mutta eivät kuulu kognitiiviradion määritelmään.

Käytännössä kognitiivien MIL-SDR varmaan ohjelmoitaisiin tätäkin tekemään.

- HUOM: Kognitiivinen radio VOI tehdä tätä, mutta radio voi olla kognitiivinen myös tekemättä tätä. Toki tämä on yksi kognitiivisen radion ominaisuus ja hyvä sellainen. Tässä, kuten myös edellisessä kysymyk-

sessä ei ole suoraa vastausta: kyllä/ei

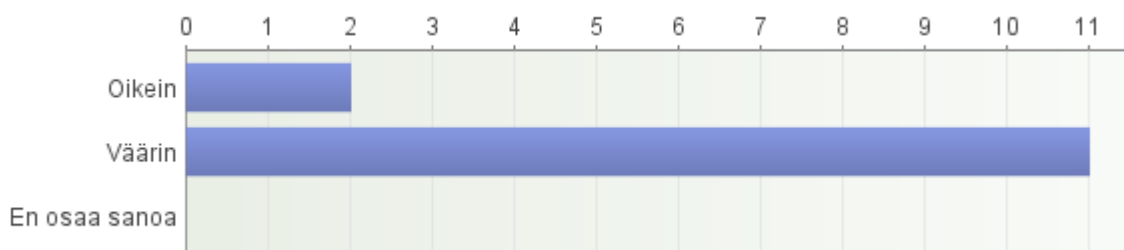
- Voi olla mahdollista, mutta ei ehkä välttämätöntä.
- Tietysti näin olisi hyvä, mutta onko todellisuudessa enemmän tiedustelujärjestelmän tehtävä.
- Luokittelu on turhaa, jos muiden kuin oman järjestelmän/verkon läheteiden katsotaan olevan primääri-käyttäjä. Käytännössä näin on lienee toimittava, jotta esim. häirinnänväistö voisi toimia.

Kommentti (En osaa sanoa)

- Riippuu toteutuksesta eli onko signaalien tunnistaminen vaadittava ominaisuus, tekee havainnoinnista (sensing) haasteellisen toteuttaa (etenkin laajakaistaina).
- Ehkäpä käyttämään jo luokiteltuja ja tuottamaan uutta tietoa luokittelemattomasta? Seuraava vaade olisi-kin jo, että sen on oikeasti opittava itse ...

11. Kognitiiviradion tulee olla täysin yhteensopiva aiemman sukupolven radiojärjestelmien kanssa eri OSI-mallin mukaisilla kerroksilla.

Vastaajien määrä: 13



12. kommentti

Vastaajien määrä: 12

Kommentti

- Kun sana täysin korvataan riittävän yhteensopiva jossa riittävyys on sama kuin kommunikaatiokyky - kaikkea ei tarvitse osata emuloida
- Mikäli kustannussäästöjä halutaan pitkällä tähtäimellä niin kyllä.

Kommentti

- Soveltuvilta osin yhteensopiva.
- Täyttä huuhaata. Ei tämä liity kognitiiviradioon eikä sen määrittelyyn mitenkään.

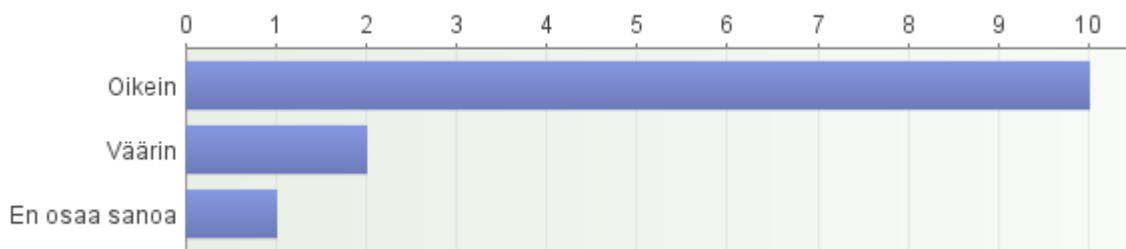
Voi olla, että käytännössä ihan hyviä ominaisuuksia, mutta tässä menee kyllä puurot ja vellit sekaisin

- Ehkä täydellinen yhteensopivuus ei ole tarpeen. Jollakin tasolla yhteensopivuus lienee syytä olla, jotta ylimenovaiheesta selvittää. Liski voidaan joutua tilanteeseen, jossa on pakko operoida aiankin tilappäisesti jollakin old school radiolla
- Todennäköisesti tällä rajoitettaisiin liikaa kognitiiviradion toiminnallisuutta. Todennäköisesti järkevää olisi tehdä yhteensopivuus rajoitetusti valituilla kerroksilla tai GW-toiminnallisuuden kautta.
- Mielestäni ei tarvitse olla, taaksepäin täysin yhteensopiva. Yhteensopivuuden vaatiminen on rasite itse toteutukselle ja rajaa innovatiivisuutta toiminnallisuuksia. Tietysti haluttuja ominaisuuksia on hyvä voida hyödyntää, mutta ei täydellistä yhteensopivuutta.
- Tämä on täysin tuotekehityksen määrittelykysymys. Ei liity sinänsä millään tavalla kognitiiviseen radioon.
- Varmastinkin tietty yhteensopivuus tai yhteentoimivuus on edellytys, mutta täysin yhteensopiva tuskin.
- CRS voi sisältää toimintatiloja tai osia aaltomuotojen toiminnallisuuksista joilla RAJOITETTU yhteensopivuus tietyissä toiminnoissa/moodeissa/tiettyjen legacy-järjestelmien kanssa voidaan toteuttaa. Taaksepäin yhteensopivuutta KAUTTA LINJAN ei saa missään tapauksessa tavoitella!!
- Aivan liian laaja katsanto "aiemmat sukupolvet"
- Miljardien dollarien epäonnistunut JTRS-hanke kaatui legacy-yhteensopivuuden vaatimukseen.

Kommentti

13. Kognitiivisen radion perusedellytys on, että se on tietoinen omassa järjestelmässään liikuvan tietoliikenteen määrästä ja laadusta.

Vastaajien määrä: 13



14. kommentti

Vastaajien määrä: 8

Kommentti

- Tämä on perusedellytys sille, että järjestelmätasolla toimintaa kyetään optimoimaan.
- Oman toiminnan muutoksista tulee voida "oppia", jotta oman toiminnan sääntöjä voidaan muokata opitun perusteella. Esim. suuri tietoliikenteen määrä voi vaatia paremman laatuisten yhteyden, jolloin data siirtyy nopeammin ja radioyhteys voidaan hoitaa nopeammin.
- Heikko kyllä. Kognitiivisen radion pitää tietää jotain omastakin liikenteestään. Mitä enemmän se tietää, sen parempi. Toisaalta tarkka laatumittaus ei ole ehkä perusedellytys, mutta erittäin tärkeä apu kylläkin.
- Priorisointi tulee jollakin tapaa kyetä toteuttamaan.
- CR voi tällöin sopeuttaa toimintaansa paremmin.

Kommentti

- **KÄSITTEET HUOM:**
CR=laite ? // CRS=järjestelmä?
Ei hämeen metsässä sijaitsevan yksittäisen laitteen tarvitse tietää kainuussa toimivan järjestelmän liikennemääriä. Laitteen kuitenkin lienee syytä tietää oman kuulumusalueensa liikennetilanne ja ainakin naapuriensa liikennetilanteiden yleiskuvaus/tiivistelmä. Tämä kuitenkin spekulointia ja kysymys edellyttäisi ihan omaa tutkimusta aiheesta.

- Ei perusedellytys, mutta merkittävä etu

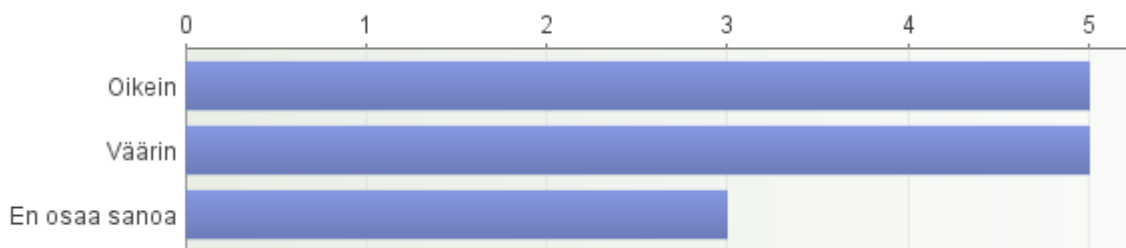
Kommentti

- Perusedellytys? Hmm.. tieto siirtokapasiteetin tarpeesta, sallituista viiveistä jne QoS, kieltämättä voivat auttaa päätöksenteossa liittyen siihen, mitä käytettävissä olevaa resurssia / tiedonsiirtokanavaa käytetään.

Onko tämä kuitenkaan perusedellytys, sitä en osaa sanoa. Riippuu ihan siitä, mikä on kognitiiviradion sovellus.

15. Kognitiivinen radio pystyy liittymään kaupallisiin radiojärjestelmiin.

Vastaajien määrä: 13



16. kommentti

Vastaajien määrä: 12

Kommentti

- Joustava käytettävyys on etu mutta ei perusedellytys
- Ainakin joidenkin GW toimintojen kautta. Myös yhteensopivuus ilmarajapinnan yli on täysin mahdollinen.
- Kun tarkoitetaan, että vastakohtana on "ei voi liittyä". Ei jokaiseen, mutta tärkeisiin ja keskeisiin.
- Yksi radio / yksi alusta olisi tietysti hyvä tavoite.

Kommentti

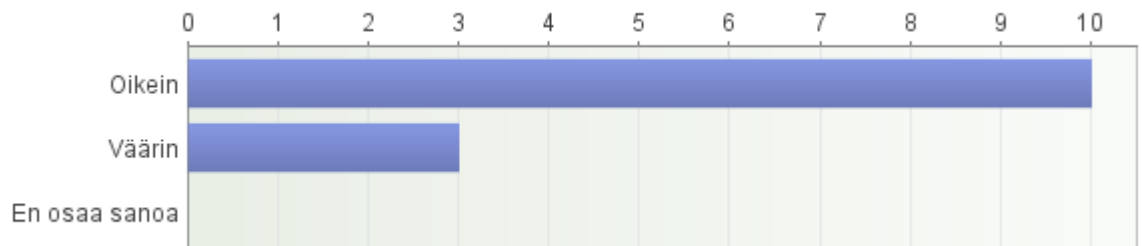
- Tälläkään ei ole mitään tekemistä kognitiivisuuden kanssa.
- Ei siitä varmaan haittaa ole, mutta ei mielestäni ole ainakaan olennainen ominaisuus. Mahtaako liittymisen luoda myös tietoturvariskin ?
- Jälleen tuotekehityksen määrittelykysymys. Eli ei liity varsinaisesti kognitiiviseen radioon.
- Auditointi ja sertifiointi ei kannatta! Toiminnalliset tarpeet ei koskaan kata toteuttamis- ja todentamiskustannuksia!
JÄRJESTELMÄ-JÄRJESTELMÄ-rajapinnan toteuttaminen sadan euron android kännykästä muutaman euron microusb kaapelilla on varmasti halvempaa.
- Lisää tarpeettomasti CR:n kehitys- ja valmistuskustannuksia.

Kommentti

- Kaupallisiin järjestelmiin liittyminen vaatii täyttä taaksepäin yhteensopivuutta, rankkaa standardointia jne. Jos kaupalliset verkot tarkoittavat esim. yleisiä matkaviestinverkkoja. Kaupallisten verkkojen sähkösyöttö tulee olemaan kriisitilanteissa nopeasti paheneva ongelma.
- Pystyy ehkä, mutta onko tarpeen?
- Mitähän tällä tarkoitetaan?

17. Kognitiivinen radio pystyy käyttämään hyväkseen kaupallisia radioresursseja häiritsemättä niitä.

Vastaajien määrä: 13



18. kommentti

Vastaajien määrä: 9

Kommentti

- Perus edellytys tulevaisuuden spektrinkäytössä.
- Jos ympäröivän radioympäristön havainnointi toimii kunnolla niin ongelmaa ei ole. Esim. Turussa AMK:n kognitiiviradiot toimivat häiritsemättä kaupallista TV:n vastaanottoa. Häiriöriski pienenee kun noudatetaan yhteensopivuuden vaatimia säteilytehoja ja suojaetäisyyksiä.
- Tämä on yksi kognitiivisen radion perusajatuksia. Eli mitä tahansa käyttämätöntä tai vajaakäyttöistä resurssia se pystyisi hyödyntämään.

- yhteistyössä on voimaa
- radioresurssi = taajuus?
jos näin, niin kyllä
- Hyvä lisä.

Kommentti

- Ei tämä ole mikään kognitiiviradion määritelmän mukainen vaatimus.

Kognitiiviradio voi toki toimia näin / mahdollistaa kaupallisten radioresurssien käytön, ja varmasti käytännössä tämä on yksi kognitiiviradion etu ja perustelu sille, miksi tällaista tekniikkaa halutaan käyttää.

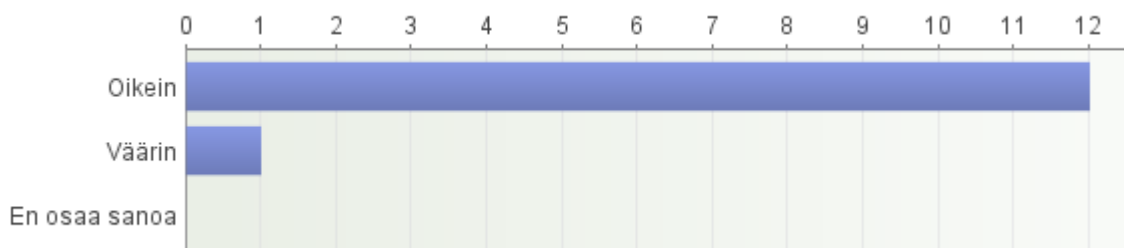
Ei kuitenkaan voi esittää väittämään, että kognitiiviradio määritelmän mukaan omaa tällaisen kyvyn.

- Perusvalmiudessa niitä voitaneen väistää ja SA tilanteessa ne voitannan ottaa käyttöön
- Väärä kysymyksen asettelu!! Kysy uudestaan eritellen onko kyseessä siviiliCRS siviilikäytössä, publicafetyCRS siviili, safety vai sotilaskäytössä vai sotilasCRSsiviili-publicafety- vai militäärimoodissa?? Entä resurssi: onko cots-spektrin tilanteen mukainen varaaminen viranomaiskäyttöön häiritsemistä? Entä onko se häiritsemistä jos kansall/kv lainsäädännössä on tähän lainmukaiset toimivaltuudet? Mitä muuta kaupalliset resurssit ovat kuin taajuutta? Tukiasemien priosessointia sotilasaaltomuodon ajamiseksi?
Runkoverkon liikennekapasiteetin hyödyntämistä?

Kommentti

19. Kognitiiviselle radiolle voidaan ohjelmoida erilaisia toimintatavamalleja (esimerkiksi tiedustelulta suojautuminen), joita se toteuttaa itsenäisesti.

Vastaajien määrä: 13



20. kommentti

Vastaajien määrä: 11

Kommentti

- Vastaan vaihteeksi "oikein", vaikka tässä varmasti sovketaan nyt SDR ja kognitiiviradio.

Ohjelmallisesti toteutettuun kognitiiviradioon varmasti pystytään tällaisia toimintoja toteuttamaan ja ne voivat olla hyvinkin tärkeitä, mutta nämä eivät kuitenkaan ole kognitiiviradion määritelmän mukaisia vaatimuksia.

- Jos tällä tarkoitetaan esim sitä, että käyttäjä / vast on valinnut moodin tiedustelulta suojautuminen ja sen jälkeen järjestelmä hoitaa homman itsenäisesti
- Tämän toiminnan toteuttaminen voi olla teknisesti haastavaa, mutta tavoitteena tämä on hyvä olla.
- Läheteiden kestot, taajuushyppely, laajakaistaiset läheteet jne.
- Mitä tarkoittaa itsenäinen toiminta? Yleensä se vaatii tarkasti määriteltyjen olosuhteiden toteutumista. Tämän lisäksi tietenkin tarvitaan ns. manuaalinen override mahdollisuus järjestelmän operaattoreille...
- Ehdoton vaatimus, kognitio on kykyä ymmärtää ja käyttäytyä erilaisissa tilanteissa = olla tietoinen ja valita sopiva malli ko tilanteeseen
- Kognitiivisen radion ajatus on nimenomaan itsenäinen, älykäs ja oppiva ohjaustoiminta.
- Tässä olisi selkeästi suorituskykyisää
- Ainakin radion tulee kyetä suojautumaan tiedustelulta ja toimimaan EMCON tasojen mukaisesti.

- Tämä on aitoa kognitiivisuutta

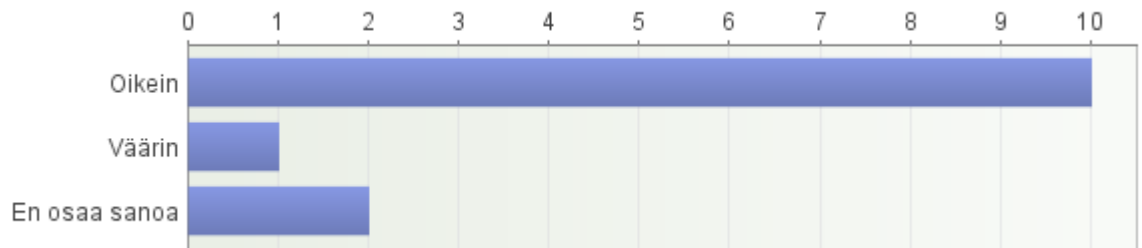
Kommentti

- Mistä radio tietää, että sen tulee suojautua tiedustelulta? Käytännössä käyttäjän tai verkonhallinnan lienee kerrottava haluttu toimintamoodi radiolle.

Kommentti

21. Kognitiiviradion ja aiemman sukupolven radiojärjestelmien yhteensopivuus on järkevää toteuttaa rajoitetusti esimerkiksi gateway-ratkaisujen kautta.

Vastaajien määrä: 13



22. kommentti

Vastaajien määrä: 10

Kommentti

- gateway ratkaisu ei sinänsä ole minulle ihan selvä, mutta jollain tasolla ehdottomasti yhteensopivuus löydyttävä
- Täten uusien ratkaisuiden suorituskykyä ei turhaan rajoiteta.
- Perusteena tälle on kustannustehokkuus.
- Tämä olisi siinä mielessä järkevää, että uusi radiojärjestelmä voitaisiin näin suunnitella puhtaalta pöydältä ilman aiempien järjestelmien painolastia.
- GW-ratkaisut ovat usein hankalia, mutta niistä ei voi kokonaan päästä eroon, joten lienee totta
- Sukupolvien yli tapahtuva yhteensopivuusvaatimus rajoittaisi liikaa uuden järjestelmän rakentamista
- Lienee ainoa keino, jolla kehityskustannukset ja tekniset riskit saadaan pidettyä kurissa, vrt. JTRS.

Kommentti

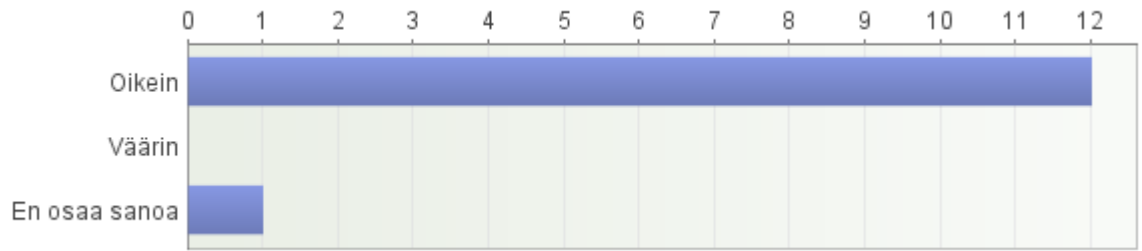
- Liian hankala hallinnoitava, eikä kustannussäästöjä synny, kun joukon jatkoksi tulee vaan yksi uusi radio.

Kommentti

- Tähän vastaaminen vaatii järjestelmien ja sovellusten tarkemman määrittelyn.
- Osassa kyllä, mutta joissakin nosissa ei, jotta ad hoc onnistuu. Riippuu arkkitehtuurista ja taktiikasta, jota eri tasoisten tekniikoiden käyttäjät tekevät yhdessä.

23. Kognitiivinen radio mukautuu eri tilanteisiin vaihtamalla fyysisen kerroksen parametreja, kuten symbolinopeutta ja modulaatiota.

Vastaajien määrä: 13



24. kommentti

Vastaajien määrä: 7

Kommentti

- Vastaan "oikein", vaikka kyseinen ominaisuus liittyy enemmän radiorajapinnan adaptiivisuuteen (link adaptation).

Kognitiiviradio voi hyödyntää adaptiivisuutta, mutta kognitiivisen siitä tekee kyky oppia eikä vain reagoida, kuten linkin adaptointi / RRM tekee.

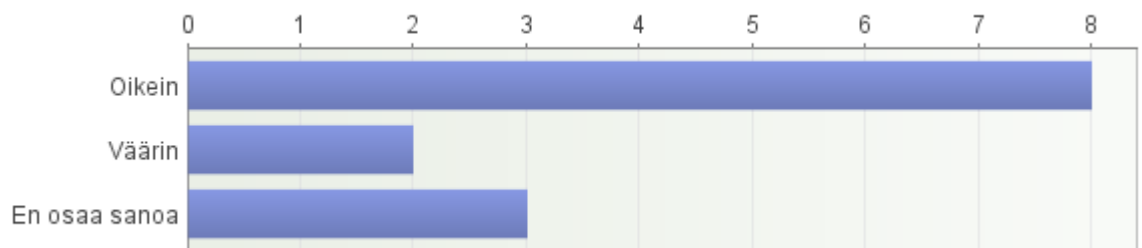
- Ihan perusominaisuus, joka on oltava
- Nämä ovat varmaan fyysisen kerroksen toiminnallisuuksia. Mukautumista voidaan tehdä myös muilla tietoliikennekerroksilla.
- Perusjuttuja. Tätähän tekevät jo lähes kaikki modernit kaupalliset radiot. Sinänsä mukautuminen ei ole vielä varsinaisesti "kognitiota", eli oppivuutta, mutta ajatus onkin, että tilanteista opitaan ja parametreja opitaan vaihtamaan tilanteisiin nähden optimaalisesti.
- Vasta-aseman ja spektrin käytettävyyden mukaisesti.
- Käytössä jo
- Perustoimintaa.

Kommentti

Kommentti

25. Kognitiivista radiota voidaan käyttää gateway:nä kaupallisten ja sotilaallisten radiojärjestelmien välillä.

Vastaajien määrä: 13



26. kommentti

Vastaajien määrä: 10

Kommentti

- Tällöin kyseessä on mielestäni gateway toimintaan optimoitu kognitiivinen radio, toisaalta kaupallisten

- verkkojen taajuudet on tiedossa etukäteen, jolloin gw:n ei tarvitse olla puhtaasti kognitiivinen radio.
- Pelkkä radiolaite ei riitä tähän. Gateway toiminnallisuus vaatii riittävät lisälaitteet kuten VPN/salauslaitteet jne. Lisäksi liian monimutkainen tekninen rakenne tekee laitteesta erittäin vaikeasti hallittavan.
- Kaupallisten määrä myös sotilaskäytössä kasvaa, samoin 3.sektorin käytöissä. J6 pohtii asiaa juuri näin.
- Erityisesti legacy-cots ja legacy-mil välillä
- Ehdottomasti näin. Yksi radio / alusta on hyvä lähtökohta.
- Voisi olla hyödyllinen toiminnallisuus.

Kommentti

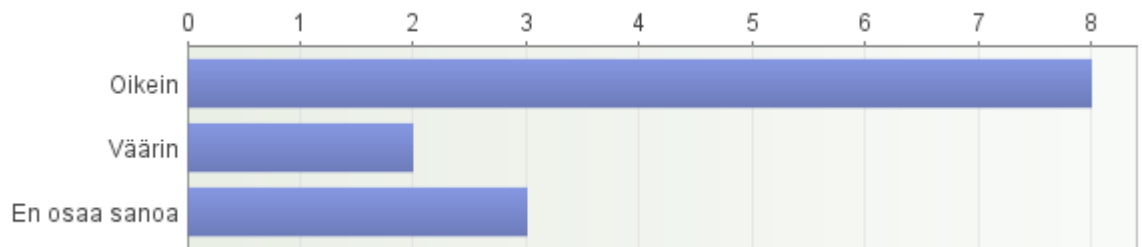
- Mielestäni sotilaalliset ja kaupalliset ratkaisut on pidettävä erillään
- Miksi ei teoriassa sinänsä voitaisi, mutta ei kognitiivinen radio ole millään tavalla tuollaiseen käyttötarkoitukseen erityisesti tarkoitettu.

Kommentti

- Voi olla tai sitten ei. Miten kognitiivisuus liittyy tuohon - ei ainakaan määritelmän mukaan mitenkään
- Ei tähän kognitiivisuutta tarvita

27. Tulevaisuudessa (vuonna 2020) radiotaajuinen spektri tulee olemaan yhä sirpaleisempi.

Vastaajien määrä: 13



28. kommentti

Vastaajien määrä: 6

Kommentti

- Jo pelkästään kasvavat häiriöt käytännössä aiheuttavat tämän. Lisäksi paine kaupallisella ja viranomaia-puolella ajaa todennäköisesti tähän.
- 2020 mennessä spektrin käyttöön liittyvä kansainvälinen normisto muuttuu, muttei radikaalisti. Ennuste on, että kognitiivisuuden salliva normiston pohja on luotu tuolloin, muttei se ole vielä laajasti käytössä.
- Taajuuksien käyttö lisääntyy jatkuvasti.

Kommentti

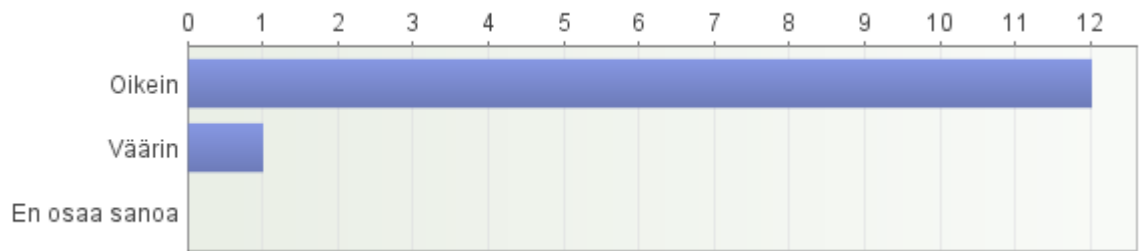
- Radiokonferensseissa on tarkoitus tutkia keinoja yhtenäistää taajuuksien käyttöä eri liikennelajien välillä, jolloin esim. siirtyvän liikenteen taajuuskaistoista tehdään nykyistä levempi yhdistämällä niitä. Paljon riippuu maailman radiokonferenssin tuloksista. Toisaalta voidaan sanoa, että kyllä erityyppisten käyttäjien lisääntyessä (M2M). Riippuu miltä tasolta asiaa katsoo.
- Isot massamediat (IMT, BC) vievät hiljalleen enenevässä määrin kaistoja itselleen, jolloin nomadi-tyyppinen radioliikenne ajautuu kapeammille kaistoille.

Kommentti

- Periaatteessa pitäisi pystyä hyödyntämään nykyistä sirpaleisempaa spektriä. Mutta onko se sitä jo 2020, ei ole minulle täysin varmaa. Tn. kyllä

29. Kognitiivinen radio mukautuu eri tilanteisiin vaihtamalla verkkokerroksen parametreja, kuten reititystä tai osoitteistusta.

Vastaajien määrä: 13



30. kommentti

Vastaajien määrä: 6

Kommentti

- Tämä voi olla yksi tapa toteuttaa kognitiivisuutta ja adptiivisuutta radiojärjestelmässä spektrin dynaamisen ja linkkiadaptaation lisäksi.

Määritelmä ei kuitenkaan erikseen nimeä niitä tekniikoita, joita kognitiiviradio hyödyntää.

Senpä vuoksi tähänkään ei yksikäsitteistä vastausta ole.

- Tarpeen mukaan voidaan siirtyä kevyempään reititykseen ja osoitteistukseen, jotta toiminta nopeutuu ja tehostuu.
- Nämä ovat keskeisiä ominaisuuksia.
- Kun liikennöidään erilaisten verkkojen kanssa, niin näin tietysti on kyettävä toimimaan.
- Voi toimia myös näin.

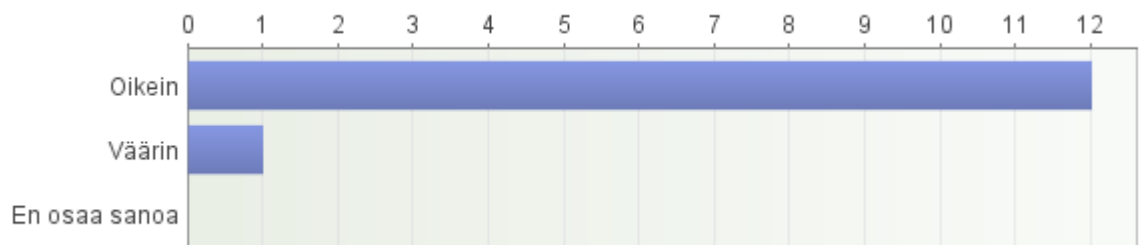
Kommentti

- Kyllä ja ei. Sinänsä tämä ei ole varsinainen nykymääritelmän mukainen kognitiivisen radion piirre, vaan pikemminkin kognitiivisen verkon piirre. Eli nyt kannattaa tässä vaiheessa erottaa kognitiivinen verkko ja radio toisistaan.

Kommentti

31. Kognitiivinen radio mukautuu eri tilanteisiin vaihtamalla toimintataajuutta automaattisesti/itsenäisesti.

Vastaajien määrä: 13



32. kommentti

Vastaajien määrä: 6

Kommentti

- Vastaan tähänkin "oikein", vaikka jälleen kerran määritelmä ei esitä tällaista vaatimusta.

- Tämä on kuitenkin tyypillinen toimintatapa kognitiiviradiolle.
- Tarpeen mukaan. Jos taajuustason hallinta sitä siis vaatii.
- Perusjuttuja.
- Annettujen reunaehtojen puitteissa kyllä. Tulee kuitenkin muistaa, että hallinnot eivät tule hyväksymään kognitiivisia tekniikoita laajamittaiseen käyttöön vielä vuosiin.
- Perustoimintaa.

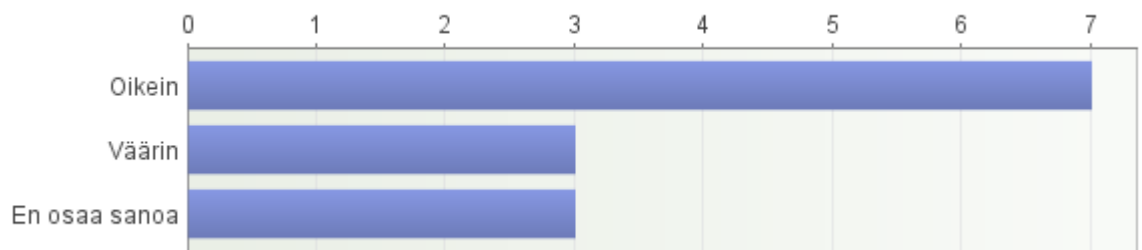
Kommentti

- Toimintataajuuden vaihtuminen pitää perustua muiden taajuuskien käyttäjien suojaamiseen itsenäisesti ja automaattisesti. Toisaalta automaattinen/itsenäinen taajuuksien vaihtaminen lienee haluttu toiminnallisuus käytössä, jossa viestintää halutaan "piilottaa".

Kommentti

33. Tulevaisuudessa (vuonna 2020) suurin osa (yli 50 %) radiotaajuisesta spektristä on edelleen dedikoitu sellaisille järjestelmille (esim. DIGITV tai GSM), joita kognitiivinen radio ei voi käyttää hyväkseen.

Vastaajien määrä: 13



34. kommentti

Vastaajien määrä: 12

Kommentti

- Todennäköisesti. Lähtisin siitä, että näitä taajuusoikeuksia pitäisi voida poikkeusoloissa rajoittaa.
- Regulaatiomielessä 5 vuotta on lyhyt aika. Toivoisin, että väittämä ei pitäisi paikkaansa, mutta pelkään, että muutokset ottavat kauan.
- 2020 muutokset nykyiseen tilanteeseen ovat vielä varsin vaatimattomia. 2030 tilanne voi olla parempi.
- Suurella todennäköisyydellä näin. Toisaalta lainsäädäntö voi muuttaa tilannetta nopeastikin.
- 2020 on aika pian...
- Näin se vaan tulee menemään. WRC15 asialistalla ei ole kognitiiviteknologiohin liittyviä asioita. ITU tosin edistää asiaa WRC12 resoluutioiden pohjalta, mutta valmistelu kohdistuu erittäin kapeisiin osakais-toihin.
- Vuoteen 2020 on vain viisi vuotta ja se on lyhyt aika taajuuksien vapauttamisesta puhuttaessa.

Kommentti

- Langattoman laajakaistan tarpeet kasvavat olennaisesti.
- En osaa sanoa spektrin allokaatiosta, siihen parhaat asiantuntijat löytyvät Viestintävirastosta.

Mutta, toiminta telkkaribändillä TV-lähetteen seassa on itse asiassa ensimmäinen kaupallinen kognitiiviradiation sovellus, "TV-white space" -käyttö!

Joten väite ei pidä paikkaansa riippumatta siitä, mikä on spektriallokaatio.

- CRS ja erit DSA voidaan toteuttaa lukuisilla underlay, overlay tai DSSS tekniikoilla jotka voivat toimia muiden järjestelmien kanssa samanaikaisesti.

Kommentti

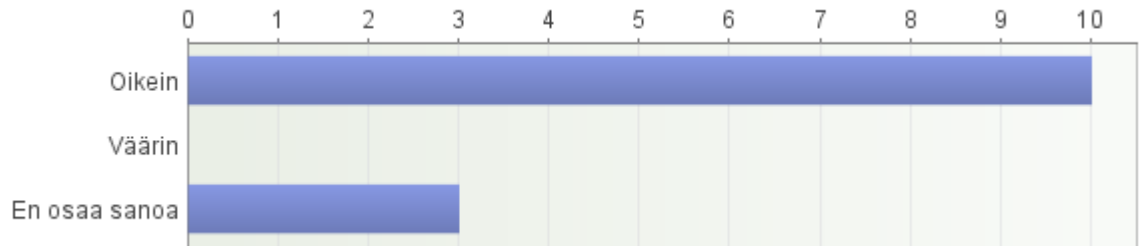
- Kognitiivinen radio voi hyödyntää em. taajuusalueita, TV-alueen kognitiiviradiokäyttö on kansallisessa määräyksessä ja valtioneuvoston asetuksessa nyt jo. Yhteiskäyttöä on myös GSM-verkkojen taajuuksilla

900 MHz alueella. Taajuusalueet on kuitenkin osoitettu ensisijaisesti ko. kaupallisille järjestelmille. Taajuuksien käytön joustavuutta tullee lisäämään vuoteen 2020 luomalla sääntöjä, joilla joustava yhteiskäyttö mahdollistetaan.

- Kognitiivisuus kasvaa myös näillä alueilla, mutta tarkka vuosi on haastava määrittää - ehkä 2020 on näin, mutta 2024 ei enää? Ko kymmenluvulla muutos tapahtunee.

35. Kognitiivinen radio mukautuu eri tilanteisiin vaihtamalla MAC-kerroksen parametreja, kuten kättely- ja suoja-aikoja.

Vastaajien määrä: 13



36. kommentti

Vastaajien määrä: 6

Kommentti

- Vastaan "oikein", vaikka määritelmä ei esitä tällaista vaatimusta, mutta tämä voi olla yksi tapa, jolla linkin adaptaatio toteutetaan.

Kognitiiviradio kuitenkin pystyy tilanteesta vielä oppimaan ja hyödyntämään "kokemusta", kun se säätää mainittuja parametreja.

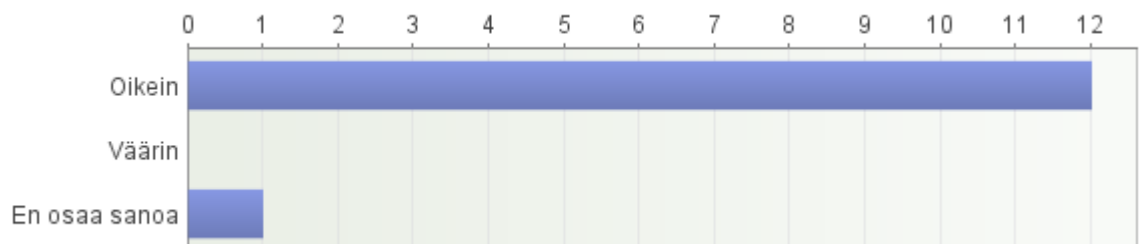
- Tarpeen mukaan.
- Tämä liittyy todennäköisesti ns. toimintamoodiin. Häiriölliset olosuhteet saattavat vaatia tätä.
- Voi tehdä myös tätä.
- Jos olisi tarkoitus toimia eri siirtonopeuksilla ja eri protokollien kanssa, niin olisihan se välttämätöntä.
- Jos fyysisen kerroksen parametreja muutetaan, voidaan joutua muuttamaan myös MAC-kerroksen parametreja.

Kommentti

Kommentti

37. Liikkuvuuden hallinta korostuu, mikäli toimintaympäristössä on käytössä useita erilaisia verkkotekniikoita.

Vastaajien määrä: 13



38. kommentti

Vastaajien määrä: 5

Kommentti

- Mikäli tällä tarkoitetaan samassa kokonaisuudessa toimivia verkkotekniikoita, niin väite pitää paikkansa. Mikäli kyse on täysin erillisistä kokonaisuuksista samassa toimintaympäristössä tällä ei ole merkitystä.
- No näinhän se todellakin on. Toisaalta tämä taas liittyy kognitiivisiin verkkoihin pikemminkin kuin kognitiivisiin radioihin.
- Osin oikein. Liikkuvuudenhallinta aina tärkeää jos tiedonsiirtotapahtuman kumpikaan osapuoli on liikkuva.
- Sotilaskäytössä toiminta on aina liikkuvaa ja verkkoja on aina paljon.

Kommentti

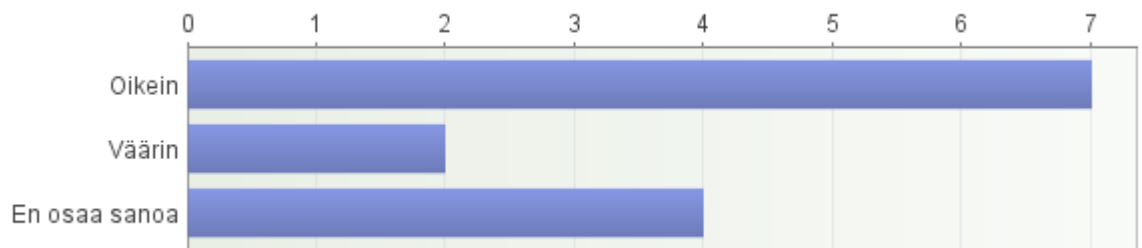
Kommentti

- Mikäli toimintaympäristössä on käytettävissä useita erilaisia verkkotekniikoita, suurin haaste on järjestelmien välisessä yhteistoiminnassa (onko sitä ollenkaan), jotta esim. IP-verkon liikenne pystytään reitittämään oikein. Lisäksi päätelaitteiden tulee tukea verkkoihin liittymistä, mikä lisää laitteiden monimutkaisuutta.

Liikkuvuuden hallinta on vähän eri juttu.. Sen toteuttaminen eri järjestelmien välille voi olla iso haaste, toki.

39. Komponenttitekniologian kehittymättömyys rajoittaa tällä hetkellä kognitiivisen radion tuotekehitystä.

Vastaajien määrä: 13



40. kommentti

Vastaajien määrä: 7

Kommentti

- Laskentateho ja tehonkulutus ovat ongelma erityisesti SDR -pätelaitteissa.
- Väite tosin liittyy enemmän ohjelmistoradioon kuin kognitiivisuuteen.
- Ohjelmistoradion laskentakapasiteetti, laajakaistaisten vahvistimien lineaarisuus, suodattimien toteutus, jne.
- Vasta HF alueen kaistoja voidaan käsitellä suoraa kaupallisilla digitaalisilla piireillä. Korkeammat taajuudet vaativat sitten enemmän diskreettiä elektroniikkaa.
- tietyiltä osin kyllä, kuten olen aiemmin asiaa avannutkin

Kommentti

- Komponentit eivät vaikuttaisi olevan suurin ongelma tällä hetkellä. Sen sijaan komponenttien ohjelmitavuudessa on rajoitteita (alkeelliset korkeamman tason ohjelmointimahdollisuudet)

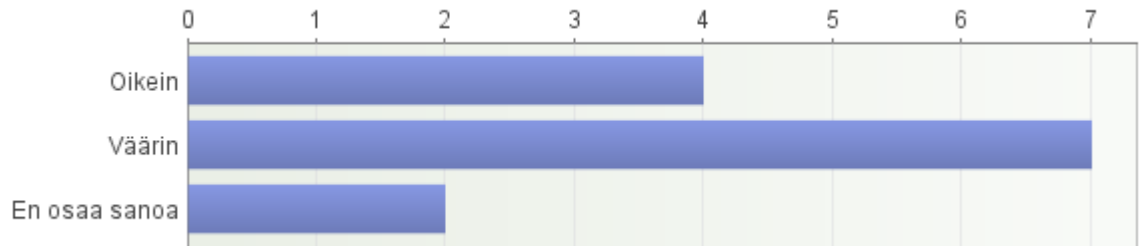
- Teknologia on kyllä jo riittävää, mutta useita muita ongelmia on ratkaistavana. Yksi homma on, että perinteisen radion tekeminen on huomattavasti halvempaa kuin kognitiivisen radion.

Kommentti

- Veikkaisin kyllä, mutta se ei perustu tietoon.

41. Kognitiivisella radiolla ei tule olemaan suurta merkitystä viranomaisyhteistyölle ja sen kehittymiselle Suomessa.

Vastaajien määrä: 13



42. kommentti

Vastaajien määrä: 8

Kommentti

- Ei pidä kuitenkaan sulkea pois.
- Ei lyhyellä aikavälillä, suurin osa viranomaisviestinnästä tulee olemaan VIRVE:ssä vielä pitkään. Laajakaistaiset ratkaisut tulevat myös perustumaan kaupalliseen verkko- ja päätelaiteteknologiaan.
- Laitteiden vaikutus toimintaan on kuitenkin rajallinen. Esim VIRVE on mahdollistanut jo viranomaisyhteistyön kehittymisen kentän tasolla.
- En usko, että vuosiin päästään hallinnollis-polittis-teknoogisesti tilanteeseen, missä kaikilla viranomaisilla olisi yhteinen kognitiivinen verkko. TETRA-teknologia kuitenkin hoitaa valtaosan yhteistoimintatarpeista.

Kommentti

- Kognitiiviradio tulee toimimaan viranomaisjärjestelmien käytölle merkittävänä enablerina tulevaisuudessa.

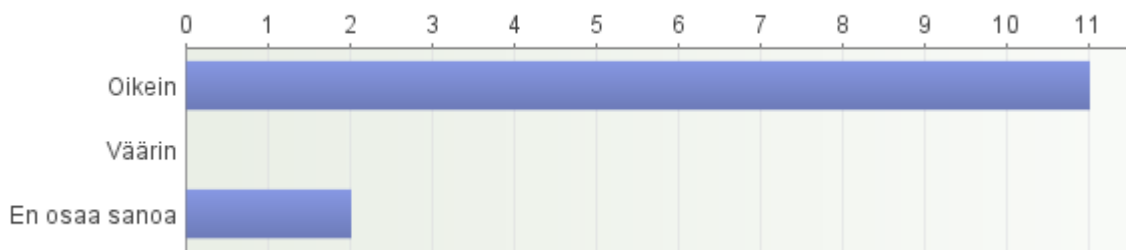
Viranomaisyhteistyö voi tietysti olla eri juttu...

- Toteutuessaan se voisi hyvinkin soveltua myös viranomaisyhteistyöhön erinomaisesti,
- Päin vastoin. Yhä useampi toimija on jatkossa turvallisuusviranomainen ja kalliita resursseja käytetään tukemisiin. SD on asia, joka mahdollistaa "yhden raiteen" toimivuuden myös jatkossa.
- Tällaista on täysin mahdotonta sanoa tässä vaiheessa.

Kommentti

43. Kognitiivista radiota tulisi kehittää taajuusvapaasti ennakoiden mahdollista taajuuksien yhteiskäyttöä.

Vastaajien määrä: 13



44. kommentti

Vastaajien määrä: 8

Kommentti

- Tähän suuntaan EU skeä kansallisesti lainsäätäjä ja Viestintävirasto ovat asiaa aktiivisesti vieneet.

Tosin, taajuusvapautta tuskin koskaan saavutetaan siinä mielessä, että mikä tahansa taajuus olisi vapaasti käytettävissä. Käyttö ohjataan tietyille alueille, mutta niiden puitteissa yhteiskäyttö tulee olemaan mahdollinen.

Esim. LSA/ASA ovat yksi hyvä esimerkki tästä.

- Alkuvaiheessa oli kysymys taajuuskaistan leveydestä, se tulee nähdä ns. virityskäistatyyppisenä, jolloin kognitiivinen radio voisi toimia mahdollisimman laajalla alueella optimoiden käytettävissä olevan taajuusresurssin tilanteen mukaan. Aiemmin sivuttu tätä asiaa.
- Tämä on visio
- Periaatteessa näin, mutta eihän sinänsä menetelmät ole juurikaan riippuvaisia käytetystä taajuusalueesta.
- Osin oikein, osin väärin: CR tekniikoita ja järjestelmiä (CRS) tulisi kehittää kaikkien parametri- ja toimintaympäristöjen yhteiskäyttöön perustuen, ei ainoastaan taajuuksien. Taajuudet vain helpoin käsittää ja ymmärtää. Muilla osi-kerroksilla myös rajoitteita tai ratkaisuja joiden yhteiskäytöstä voisi olla hyötyä.
- On paljon elementtejä, joissa taajuudella ei ole merkitystä
- Toimintatavat kannattaa kehittää universaaleiksi ja sitten rajoittaa käyttöön annettuja taajuusalueita tilanteen ja sääntelyn mukaan.

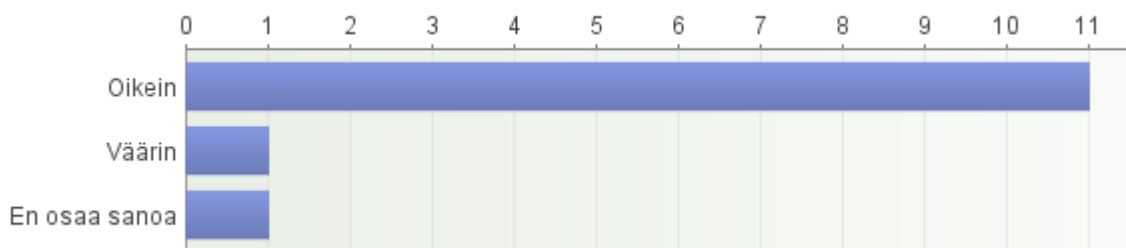
Kommentti

Kommentti

- Mitä taajuuksien ennakoitua yhteiskäyttöä? Ehkäpä WRC18 asialistalle saadaan sellainenkin aihe...

45. Puolustusvoimien tulisi osallistua kognitiiviradiolle tarkoitettujen yhteiskäyttötaajuuksien/taajuusalueiden kehittämiseen.

Vastaajien määrä: 13



46. kommentti

Vastaajien määrä: 7

Kommentti

- PV suurena taajuuksien käyttäjänä kykenee olemaan tässä suunnannäyttäjäksi ja viemään regulaatiota eteenpäin. Tämä vaatisi PV:ssa selkeän kannanoton asian puolesta ja PV:n oman käsityksen selkeää muodostamista.
- Ei ainakaan haittaa, pyrimme huomioimaan jo nyt ns. erilaiset NATO-kaistat työssämme.
- Jos ei olla mukana, ei ole mahdollisuutta vaikuttaa.
- Mikäli PV haluaa kehittää kognitiiviradioita, on sen jollain tavalla osallistuttava taajuushallintaan. En puhuisi "kehittämisestä", koska tämä on lähinnä poliittista peliä, eli kuinka saada käyttöön taajuusalueita, joilla kognitiivisia radiojärjestelmiä voitaisiin kehittää ja testata.
- Ehdottomasti kaikessa tähän alueeseen vaikuttamisessa tulee olla mukana.
- Jos teknologiaa halutaan soveltaa, olisi lienee tarpeen pyrkiä edistämään aihetta myös radiohallintojen kautta.

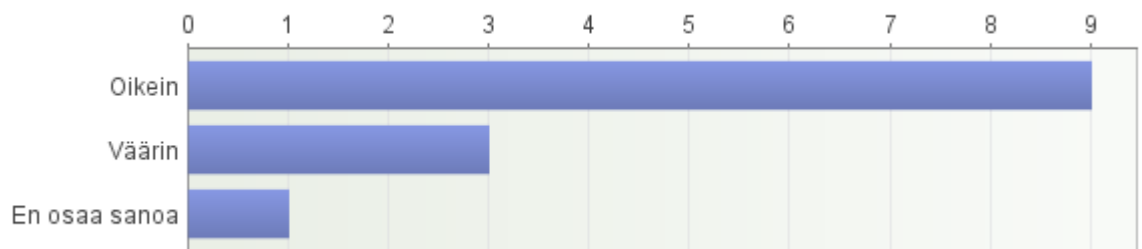
Kommentti

- CR vai CRS?
Tälle teknologialle EI tulisi tavoitella omia dedikoituja taajuuksia

Kommentti

47. Puolustusvoimien tulisi aktiivisesti rohkaista muita toimijoita kognitiiviradiolle tarkoitettujen yhteiskäyttötaajuuksien/taajuusalueiden kehittämiseen.

Vastaajien määrä: 13



48. kommentti

Vastaajien määrä: 7

Kommentti

- Kuten edellisessä vastauksessa.
- Ei haittaa! Aikataulun hitaus on tunnustettava tosiasia.
- Turvaviranomaisten "ytimelle" olisi saatava yhteinen agenda ml VIRVEN seuraaja ja erilaisten sensorien ja robottien käyttö.
- Aktiivinen vaikuttaminen tärkeää

Kommentti

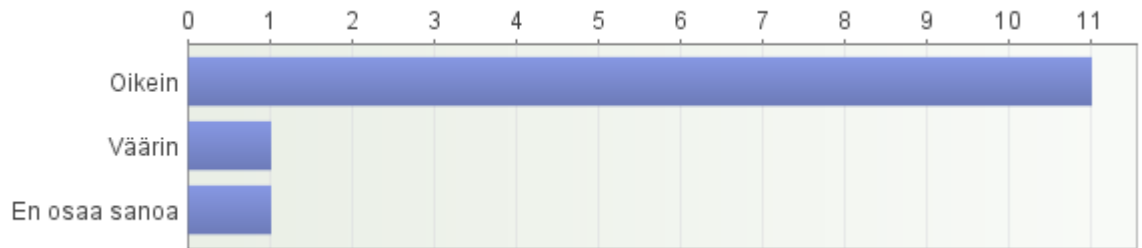
- KTS 23
- Ei lienee PV:n tontille kuuluvaa asiaa.

Kommentti

- En edelleenkään ymmärrä oikein termiä "taajuusalueiden kehittäminen". Eli kyseessä lienee taajuusalueiden hallinta ja hankinta kognitiiviradioiden käyttöön?

49. Kognitiivisen radion tulisi tulevaisuudessa voida käyttää muiden järjestelmien taajuusresursseja.

Vastaajien määrä: 13



50. kommentti

Vastaajien määrä: 8

Kommentti

- Joustavasti
- Tämä koskee erityisesti taajuuksien yhteiskäyttöä siviili- ja rauhan ajan aplikaatioissa.
- Ennalta sovittujen ja määriteltyjen sääntöjen (policies) mukaisesti.
- Vaatii pelisäännöistä sopimista sekä laitteiden hyväksyntämenettelyiden kehittämistä.
- Tämä oli ihan alun perin yksi kognitiivisen radion perusajatuksista, eli hyödyntää ajallisesti ja paikallisesti vajaakäytöllä olevaa taajuusresurssia.
- YKSIKÄSITTEISEN OIKEA LÄHTÖKOHTA
- CR:n perustoimintaa.

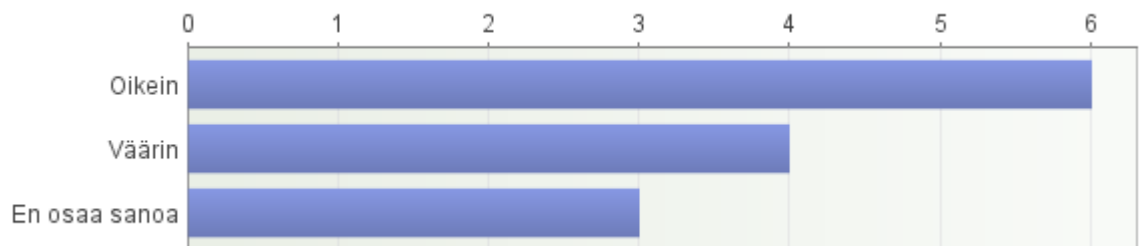
Kommentti

- Yleisesti lausuttuna ei. Jos joitakin yksittäisiä taajuuskaista - radioliikennetyyppi-yhdistelmiä löytyy, jotka tähän soveltuvat, niin kyllä.

Kommentti

51. Kognitiivinen radio ei vuoteen 2020 mennessä saa käyttää muiden järjestelmien taajuusresurssia, mikä johtuu regulaatiosta.

Vastaajien määrä: 13



52. kommentti

Vastaajien määrä: 12

Kommentti

- Sotilaskäyttöön tarkoitettujen taajuuksien osalta on mahdollista.
- Todennäköisesti näin
- Valitettavasti regulaatio laahaa asian suhteen.
- Tämä vaikuttaisi todennäköiseltä kehitysskenaariolta.

- Hitaus on näissä ilmeistä

Kommentti

- esim. LSA/ASA -konseptia kehitetään tälläkin hetkellä ja Suomessakin on jo koejärjestelmä olemassa.

Toiseksi: esim TV-White Space on jo jenkeissä kaupallisessa käytössä.

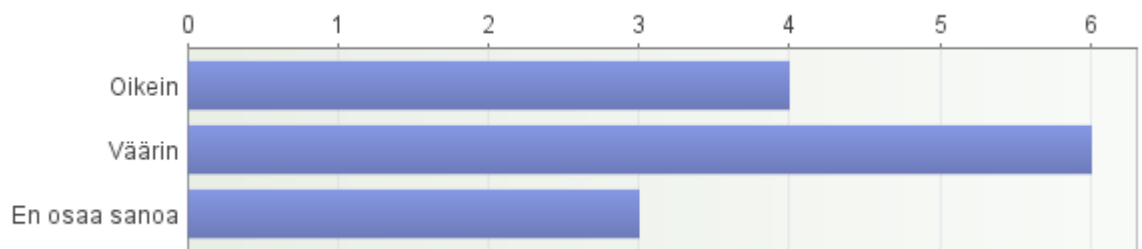
- TV UHF-alue jo nyt kognitiivisen radion käytössä. Erilaisia esim. tietokantoihin perustuvi ratkaisuja tulee varmaan aikaisemmin mahdollistamaan taajuuksien yhteiskäyttöä, eikä silloin ole pakosti kyseessä yhteiskäyttö vain kognitiivisen radion kanssa vaan laitteiden, jotka hyödyntävät kognitiivisia kyvykkyys-
- Väittämä lähtökohtaista potaskaa.
KV-standardi IEEE 802.22 sanoo toisin
- Uskon, että joitakin taajuusalueen osia vapautetaan nopeastikin.

Kommentti

- Todennäköisesti näin on, vaikka tekniikka mahdollistaisikin - säätelyn purku on hidasta.
- Hyvin todennäköisesti ei, mutta toki viidessä vuodessa voi tapahtua, mikäli asioita pusketaan kunnolla eteenpäin. Mikäli halua on, se voisi onnistuakin, mutta vaatii työtä etenkin PV:ltä.
- mahdoton ennustaa

53. Puolustusvoimien tulisi avata merkittävä määrä omia taajuusallokaatioitaan muiden käyttöön.

Vastaajien määrä: 13



54. kommentti

Vastaajien määrä: 10

Kommentti

- Juuri näin tulisi toimia ja vastavuoroisesti PV voisi neuvotella kaupallisten toimijoiden kanssa heidän taajuuksiensa yhteiskäytöstä.

Tämä voisi mahdollistaa cots-tekniikan, kaupallisten päätelaitteiden jne käytön sotilassovelluksissa.

Erittäin tärkeä pointti!!

- Ehkäpä ainakin osin näin. Ainakin se tekisi tiedustelusta haastavampaa. Mutta edelleen PV:lla tulisi olla siis oikeus näiden taajuuksien käyttöön
- Tällä tavoin PV:lla olisi painoarvoa vaatia myös muita toimijoita toimimaan samoin ja siten edesauttaa regulaation kehittymistä.
- Yhteiskäytön mahdollistamisen tulee toimia kumpaankin suuntaan.

Kommentti

- Vanhaa allokaatiota tulee kuitenkin muuttaa, ei saa jumittua perinteiseen .. ja tietenkin pitää huolta legacyn toimimisesta myös jatkossa.
- Vastavuoroisuusperiaatteen mukaisesti allokaatioita voidaan avata.
- Ei merkittävässä määrin, mutta ehkä kannattaa tässä tarjota jotain, niin jotain voi vastavuoroisesti saada.
- Vain ankanan viivytystaistelun ja etujen lypsämisen jälkeen
- Sotilashallinnot läpi Euroopan ovat olleet jo vuosia tilanteessa, missä kaistaa siirretään hiljalleen siviili-toimijoille. Omien kaistojen avaaminen siviilitoimijoiden käyttöön tarkoittaa käytännössä sitä, että luovu-

taan myös loppuresursista vapaa-ehtoisesti. Tämänkaltaiset näkemykset ovat vaarallisia.

Kommentti

- Tämä on pohjimmiltaan PV:n oma asia - en osaa ottaa kantaa. PV:llä lienee taajuudet vähissä muutenkin, joten niiden supistaminen entisestään tuskin on hyvä asia. Toisaalta, mikäli taajuuksia lainattaisiin muiden käyttöön siten, että PV voi halutessaan käyttää niitä kuitenkin vapaasti myös omiin tarkoituksiin, tämä olisi varmastikin hyvä asia. Tämän avulla PV voisi ehkä saada myös lisää taajuuksia itselleen.

55. Jos Puolustusvoimat avaa omat taajuusallokaationsa muiden tahojen käyttöön, Puolustusvoimien tulisi samalla saada oikeus käyttää näiden tahojen taajuuksia toissijaisena käyttäjänä (secondary user).

Vastaajien määrä: 13



56. kommentti

Vastaajien määrä: 8

Kommentti

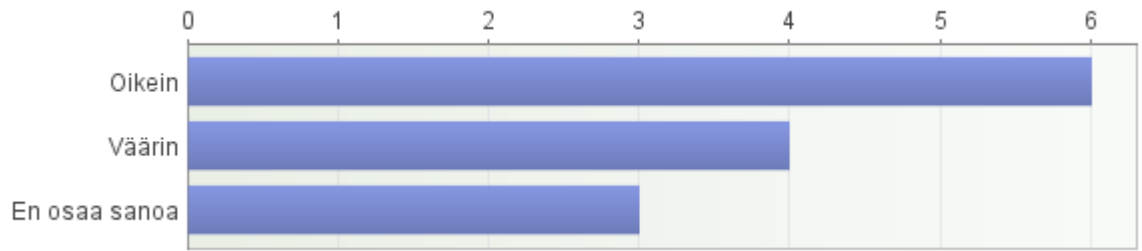
- Vastaus jo edellisessä kohdassa
- Viitataan edelliseen kommenttiin
- Kunhan selkeät pelisäännöt on määritelty kaikkien toimijoiden kesken, esim. LSA-menettelyn kaltainen taajuuksien yhteiskäyttö. Olemme aloittaneet työn kansallisen säädösten luomiseksi LSA/ASA-menettelylle, työ on aivan alkuvaiheessa.
- Tämä voisi olla neuvottelustrategia.
- Tämä olisi varmastikin oikea taktiikka.
- Vastavuoroisuus ja siihen liittyvät pelisäännöt tärkeitä.
- Näin siis pitäisi tapahtua, mutta ei tule tapahtumaan. Sotilasyhteisöt ovat jo 30 vuoden ajan hävinneet nämä kamppailut siviilitoimijoita vastaan. Raha puhuu.
- Reilu peli rosvojen kesken.

Kommentti

Kommentti

57. Puolustusvoimien tulisi olla näyttää esimerkkiä muille taajuuksien yhteiskäytön avaajana.

Vastaajien määrä: 13



58. kommentti

Vastaajien määrä: 10

Kommentti

- Miksi ei, kannattaa arvoida tarkasti? UK MoD vapautti taajuusalueelta 2300-2400 MHz taajuuksia kaupallisille toimijoille, UK:ssa tosin MoD spektrillä on myös kaupallinen arvo määriteltynä erilailla kuin Suomessa.
- Näin, mikäli PV haluaa olla mukana kehittämässä kognitiivisia radiotekniikoita. Tämä voisi edesauttaa taajuuksien vapautumista.
- Ainakin viranomaisista ollaan se, joka eniten näistä huolta kantaa
- Miksipä ei

Kommentti

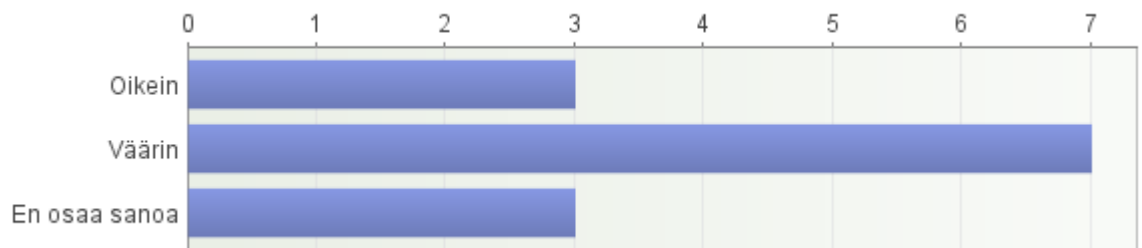
- Muttei olla viimeinen jääräkään - meillä pitää olla neuvottelunhalua.
- VIVI on keskeisin toimija jonka tulee viedä asiaa eteenpäin. Esimerkin näyttäminen ei auta mitään, sillä regulaation purkaminen on keskeisintä.
- Ei kukaan pidä PVtä kovinkaan edistyksekkäänä organisaationa, turha mennä alueille jota kukaan ei meiltä odota
- Jos joskus Euroopassa alkaa tämänkaltaisen tredi, niin voidaan ottaa meilläkin harkintaan. Omaehtoisesti ei missää tapauksessa.

Kommentti

- Toisaalta tokkopa kukaan muukaan sitä avausta tekisi...
- Voi olla ongelmallista, jos pv:llä ei itsellään ole CR:ä käytössä.

59. Tulevaisuudessa puolustusvoimien tiedonsiirtojärjestelmän päätelaitteet perustuvat puhtaasti kaupallisiin ratkaisuihin.

Vastaajien määrä: 13



60. kommentti

Vastaajien määrä: 13

Kommentti

- Tämä varmaan tulee olemaan suuntaus - itse kehittäminen on kallista ja hidasta... Olennaista on pitää ohjelmisto-oikeudet omissa käsissä.
- Arvion mukaan puhtaasti sotilaskäyttöön tarkoitetut päätelaitteen muodostavat tulevaisuudessa alle 10% päätelaittekannasta. Luku voi olla myös huomattava pieni (1-2%). Kuitenkin tietyissä erityisjärjestelmissä (lentokoneet jne.) päätelaitteet ovat todennäköisesti erikoisratkaisuja
- Valitettavasti olemme tätä kohti olemme menossa, kun puolustusbudjetissa ei rahaa ole riittävästi. Kaupallisten päätelaitteiden käyttö valitettavasti tarkoittaa sitä, että päivityksiä tulee jatkuvasti ja tekniikka vanhenee parissa vuodessa. Tätä vaan ei nähdä toimialaa ohjaavilla tahoilla.

Kommentti

- Varmasti kuitenkin suurilta osin.
- Taktisen tiedonsiirron sovellukset ja käyttöympäristö ja -tilanteet poikkeavat "normaalista" kaupallisen tekniikan käytöstä.

Tällaiseen tilanteeseen ei koskaan tulla pääsemään, eikä se ole edes tarkoituksenmukaista.

Kaupallisen tiedonsiirtotekniikan ja -järjestelmien kehitys on kuitenkin nopeampaa kuin puhtaasti sotilaskäyttöön kehitetyn tekniikan. Tästä syystä johtuen kaupallisten ratkaisujen käyttö tulee yleistymään ja ehkä korvaamaan tulevaisuudessa osan sotilaskäyttöön tehdyistä ratkaisuista.

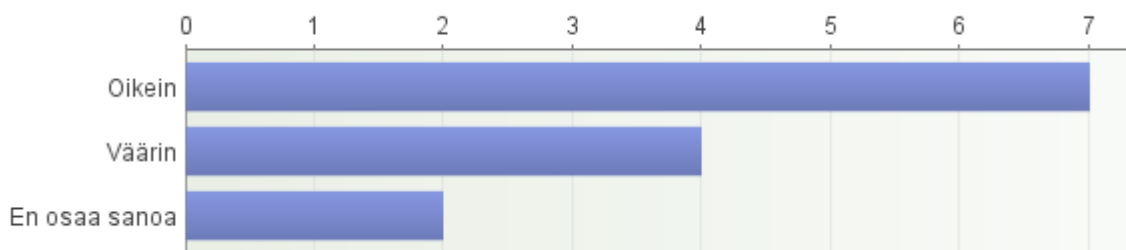
- On vaikea nähdä, että taistelukentällä käytettäisiin pelkästään kaupallisia siivililaitteita. Toki voi olla, että tekniikoissa on yhtäläisyyksiä kaupallisiin laitteisiin, kuten tänäkin päivänä on.
- Ei ihan kokonaisuudessaan, mutta merkittävässä roolissa kyllä
- TLL IV:
Tulee jatkossa perustumaan terävän operatiivisen kärjen koviin sotilastietoliikennetarkaisuihin, jotka toimivat yhdessä alueellisten ja paikallisjoukkojen käyttämien kaupallisten/OTTO- järjestelmien kanssa.
- Liian kategorinen. Voi olla pääosin kuitenkin näin
- Varmasti suuremmissa määrin näin, mutta vaikea uskoa, että aivan kaikessa voisi olla näin.

Kommentti

- Joissain ratkaisuissa edelleen dedikoidut päätelaitteet voivat olla perusteltuja, mutta kaupallisten laitteiden laajamittaisempaa hyödyntämistä tulisi ehdottomasti selvittää ja viedä eteenpäin.
- Ei tietoa.
- Oikein kun tulevaisuus on 2035+ aikaa ja unohdetaan esim HN seuraaja tai sofistikoitunut ohjustekniikka. COTS voi hyvin nielaista 80% jo 2030 mennessä.

61. Taajuuksien yhteiskäyttö korostuu sotaa alempiasteisissa kriiseissä (suuronnettomuus, terrori-isku). Taajuuksien yhteiskäytöllä tässä tarkoitetaan oikeutta käyttää toisiokäyttäjänä (secondary user) muille järjestelmille/käyttäjille allokoituja taajuuksia.

Vastaajien määrä: 13



62. kommentti

Vastaajien määrä: 8

Kommentti

- Pitää paikkansa. Sodan ajan tilanteessa ei välttämättä ensimmäinen prioriteetti ole välttää radiohäiriöiden aiheuttamista kaupallisille toimijoille, kun pitää yrittää pysyä hengissä...

Toisaalta kriisitilanteissa kommunikaatio pitää saada toimimaan, jolloin kaikki resurssit pitäis olla käytössä, mikä korostaa kognitiivista taajuuksien yhteiskäyttöä, sillä kaupallista verkkoa ei välttämättä ole saatavilla, esim suuronnettomuuden (vrt. Katrina) tuhotessa infran.

- Tällä hetkellä kuitenkin ratkaisut pohjautuvat VIRVEen, kaupallisten verkkojen hyödyntämistä priorisoinilla selvitetään käsittääkseni Suomessa.
- Yhteiskäyttö korostuu kaikissa kriisitilanteissa joissa taajuuksien yleinen käyttötarve kasvaa merkittävästi.

Kommentti

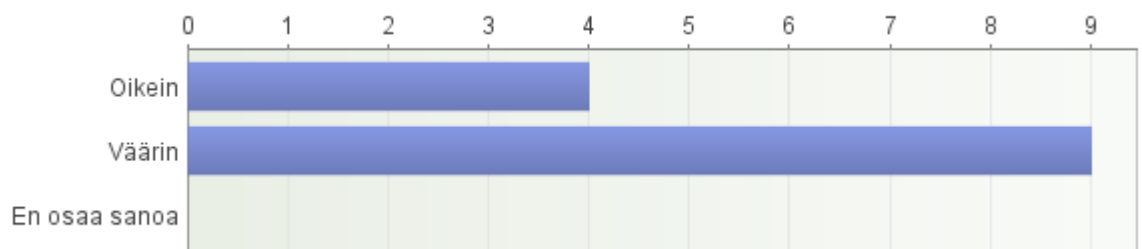
- Ei mielestäni korostu.
- ref: prof andrey manoilo/vladimir surkov: hybridisodankäynnissä EI ole rajaa/eroa alemman asteiselle kriisille-Koko pv:n valmiudenkohottamisjärjestelmän voimakas sidonnaisuus tiettyihin vaiheisiin on UKR tapahtumien valossa täyttä sontaa ja HAITALLISTA omalle ajattelullemme. Ei ole vaiheita, on vain ekaksi muutama ja sitten vähän enemmän tunnuksettomia vihreitä ukkeleita.
- Nykyisessä regulaatiossa asia ei mene näin yksioikoisesti. Kaista on käytettävissä yhteisesti (myös toisijaisen radioliikenteen tarpeisiin), mikäli ensisijaista radioliikennettä ei kaistalla ko. alueella ole. Jos on, sekundäärisellä käyttäjällä ei ole mahdollisuutta saada kaistaa.
- Eikö tämän merkitys ole nimenomaan sodassa suurempi? Suuronnettomuus tms. tilanteessa ei ehkä ole esim. häirintää tai pulaa mil-taajuuksista suurten joukkomäärien takia.

Kommentti

- Vaikutusta sillä varmaan on, mutta korostuuko - esn osaa sanoa

63. Taajuuksien yhteiskäytöllä ei ole juurikaan merkitystä laajamittaisessa sodassa. Taajuuksien yhteiskäytöllä tässä tarkoitetaan oikeutta käyttää toisiokäyttäjänä (secondary user) muille järjestelmille/käyttäjille allokoituja taajuuksia.

Vastaajien määrä: 13



64. kommentti

Vastaajien määrä: 11

Kommentti

- Siinä vaiheessa, kun ammutaan kovilla, taitaa olla toissijainen juttu, kenelle käytetyt taajuudet kuuluvat.
Sen sijaan kognitiiviradion kyvykkyys (sikäli kun tällaisia on radioon ohjelmoitu) olla tuottamatta häiriötä ja väistää niitä ovat ensiarvoisia myös sotatilanteessa.
- Taajuuksia vapautuu automaattisesti esim. TV-lähettimien tuhoamisen seurauksena vrt. Bosnian pommitukset, Irakin sodat. Samalla päältä putoaa paljon muitakin järjestelmiä: kunnallistekniikan, sähköverkkojen, rautateiden yms. radioverkot ja tietysti kaupalliset matkaviestinverkot.
- Kun tällä ajatellaan lyhyttä muutaman viikon ratkaisuvaihetta - mutta jos käsittää koko kriisin ajan, ei ole oikein.
- Asialla olisi merkitystä, jos sitten sodan syttyessä olisi sellaista kalustoa, millä siviilikaistoja voidaan hyödyntää. Usein vaan on niin, ettei homma onnistu, koska sellaista kalustoa ei ole. Jos kalustoa on, miten koordinoidaan taajuuksien käyttö siten, että sotilaskäyttö ei häiriinny siviiliraadioliikenteistä.

Kommentti

- Mielestäni nimeen omaa tässä tilanteessaa korostuu (häirityt olosuhteet, tiedustelu, verkkojen lukumäärän

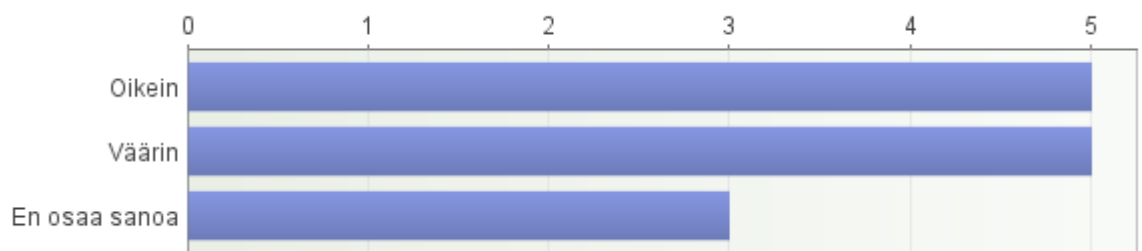
moninkertaistumien jne)

- Nykyaikaisessa sodassa yhteiskunnan infra on kuitenkin pääosin pystyssä ainakin rajoitettuna. Tällöin esim. poikkeustilalain mukaisia taajuuksien ottoa PV:n käyttöön voi olla hyvin hankala toteuttaa.
- Laajamittainen sota on laajamittainen kriisi. Silloin aikaan ja paikkaan sitoen kaikilla on tarvetta taajuuksille.
- Laajassa sodassa toki taajuuskäyttöä ei juurikaan voi valvoa, mihin tässä ehkä viitataan. Toisaalta mikäli yhteiskäyttöä ei ole rauhan aikana sallittu, tarkoittaa se käytännössä sitä, että myöskään tällaiseen kykeneviä laitteita ei ole. Mikäli yhteiskäyttö on sallittua, ovat radiot jo lähtökohtaisesti laajakaistaisempia, jolloin siitä kyllä on hyötyä myös laajamittaisessa sodassa. Eli vastaaja uskoo, että yhteiskäyttö tuo markkinoille todennäköisesti laajakaistaisempia ja kyvykkäämpiä radiolaitteita, joista on hyödyä myös sotatilanteessa.
- Mikään ei ole niin mustavalkoista, että tätä voisi näin jyrkästi todeta.
- Laajamittaisen sodan käsite lienee korkeajännityksen lukijoilta saatua. Kts vast kys 31.
- Sota-aikana tarvitaan paljon taajuuksia käyttöön, jotta vihollisen häirintää voidaan väistää ja käyttää kulloisenkin tilanteen mukaan optimaalisia taajuuksia.

Kommentti

65. Tulevaisuudessa puolustusvoimien kannattaa kehittää oma toimintaympäristönsä optimoitu johtamisjärjestelmän päätelaite.

Vastaajien määrä: 13



66. kommentti

Vastaajien määrä: 11

Kommentti

- Tarvitaan myös, kaupallisten välineiden rinnalle.
- Ilman muuta, kunhan tämä hankitaan suomalaiselta toimittajalta!
- Jos lähtökohta on se, että rauta on kaupallinen ja ohjelmistojen oikeudet ovat omissa käsissä.
- Toki tämä siinä mielessä olisi hyvä, että silloin kaikki kortit olisivat PV:n omassa hallussa.
- Juuri näin. Ei kaupallisia radioita vaan sotilaskäyttöön dedikoitu järjestelmä.

Kommentti

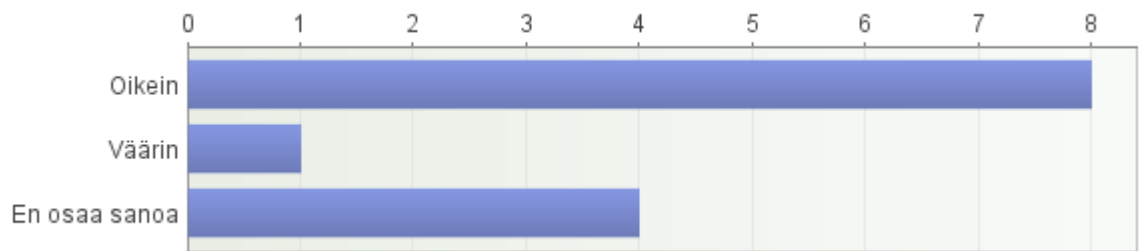
- Enemmän resurssit kannattaa suunnata kaupallisten päätelaitteiden hyödyntämiseen dokumentoitujen rajapintojen kautta (esim. tj-appsi IOS ja Android alustalle...).
- Näin pienessä maassa ja massakäyttöön tarkoitettuna olisi suoranaista hulluutta. Mieluummin omia appseja kohtuu nopeasti kansalaisten laitteisiin vrt ennen "tuo polkupyörä mukanas!"
- Ei ole kustannustehokasta
- Laite vai ohjelmisto?
Ruggeroidut android-päätteet ovat nykyiselläänkin jo varsin hyviä.
- Kallista ja laite on jo valmistuessaan vanhentunut. Kannattaisi enemmän toteuttaa toiminnot kaupallisiin ruggeroituihin tabletteihin tms. joita voi sitten ostaa lisää, kun tarvitaan.

Kommentti

- Mahdollisuuksien mukaan yhteistyössä jonkun toisen valtion kanssa olisi taloudellisempaa.

67. Päätelaitteiden ja radioiden välisten yhteyksien tiedonsiirtoprotokollat voivat yhtä hyvin olla joko kaupallisia, itse kehitettyjä tai MIL-standardoituja menetelmiä, kunhan yhteys päätelaitteen ja radion välillä toimii.

Vastaajien määrä: 13



68. kommentti

Vastaajien määrä: 7

Kommentti

- Periaatteessa näin, tosin protokollan valinta tulee vaikuttamaan jatkossa siihen, onko päätelaitteita ja radioita kuinka helposti saatavilla, mistä niitä saa, ovatko ne yhteensopivia, miten huolto ja ylläpito hoidetaan jne.

Toinen kysymys on, onko yleensä MIL-päätelaitteen ja radion väliin standardoitua tiedonsiirtoprotokollaa niin, että laitteet aidosti ovat yhteensopivia.

- Miksipä ei.
- vaatimukset ratkaisevat

Kommentti

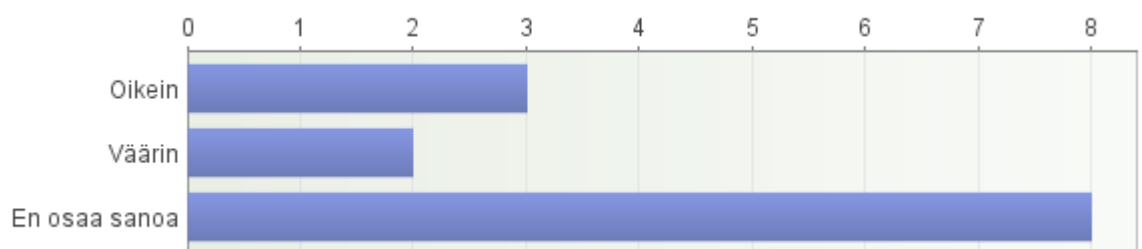
- Kustannustehokkainta on käyttää yleisiä protokollia

Kommentti

- Toimivuus on olennainen. tutut protokollat jossain määrin helpompia tiedustella, omat ovat tn. turvallisempia mutta erottuvat massasta...
- Jos täyttää PV:n asettamat vaatimukset, toisaalta yhteiskäyttövaatimuksia tulee yhteisoperaatioissa eli osa MIL-standardeista lienee täytettävä kuitenkin. (Voisi olla myös OIKEIN).
- Tässä pohdinnassa olisi lienee syytä ottaa huomioon myös KV yhteensopivuus.

69. Tiedonsiirron kognitiiviradiojärjestelmässä päätelaitteiden ja radioiden välisen yhteyden tulee perustua kaupallisiin standardeihin (BT, WLAN, NFC).

Vastaajien määrä: 13



70. kommentti

Vastaajien määrä: 10

Kommentti

- Yleisesti koestettuja ja luotettavia!
- Kaupall std ok, langattomuus ??
- Etuna mahdollisuus käyttää kaupallisia päätelaitteita.

Kommentti

- Jälleen tuotekehityksen määrittely kysymys täysin. Ei kognitiiviradiossa kuitenkaan ole tällaista rajoitusta.

Kommentti

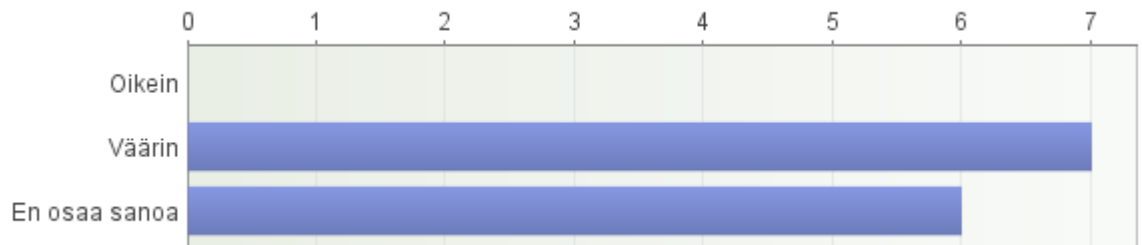
- Osittain vastattu jo edellisessä, mutta nyt on epäselvää, mikä on päätelaitteen ja radio välinen yhteys? (BT, WLAN jne) viittaavat lyhyen kantaman langattomaan tiedonsiirtoon.

Mitä tässä oikein tarkoitetaan?

- Viittaa edelliseen kommenttiin
- Myös omia menetelmiä voidaan käyttää.
- Oikeastaan missään ei ole standardoitu tätä yhteyttä siten, että se olisi käytössä kaupallisessa radiossa. Ensimmäisenä tulee käyttöön WLAN pohjaiset TV-alueen radiot WLAN IEEE802.11 af (käsitkseni mukaan). Nyt saatavat TV White Space -radiot ovat muutaman pienen valmistajan omia ratkaisuja (esim Carlson Wireless). Standardoinnista on aina hyötyä ja haittaa. (Voisi olla myös Väärin).
- Yleinen mil-standardikin käy. Joku osia voisi olla aivan oma, muttei saa olla pääperiaate.
- kts. edellä

71. Tiedonsiirron kognitiiviradiojärjestelmässä päätelaitteiden ja radioiden välisen yhteyden tulee perustua MIL-standardeihin tai puolustusvoimien kehittämiin omiin menetelmiin.

Vastaajien määrä: 13



72. kommentti

Vastaajien määrä: 9

Kommentti

Kommentti

- Rajoittaminen vain MIL-menetelmiin lisää kohtuuttomasti laitteiden kehityskustannuksia ja sitä kautta hintaa sekä lisää riskejä sekä hankinnan, että ylläpidon kannalta.
- Jälleen tuotekehityksen määrittely kysymys täysin. Ei kognitiiviradiossa kuitenkaan ole tällaista rajoitusta.
- Voi olla cots
- Kannattaisi käyttää mahdollisimman paljon kaupallisia standardeja jotta päätelaitevalikoima olisi mahdollisimman suuri.

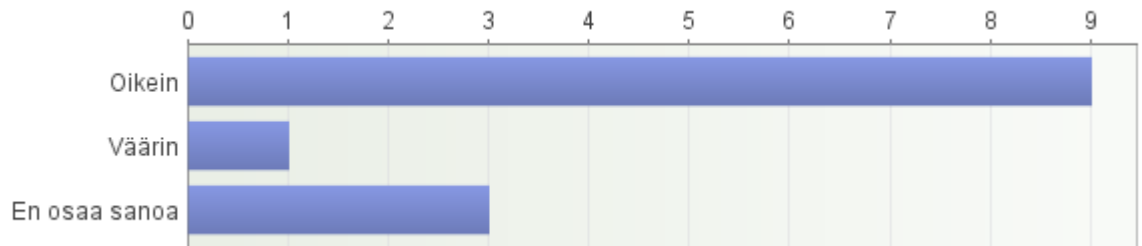
Kommentti

- Kuten ed.
- Viittaa edelliseen kommenttiin
- Vastannut tähän jo aikaisemmin mielestäni.

- Jokin osa näin, mutta ei pääasiana - tietoturva huomioiden kaupallisten käyttö on tehokkaampaa.
- Kv-yhteensopivuus huomioitava.

73. Kognitiiviradiojärjestelmän sisäisten yhteyksien tiedonsiirtoprotokollat voivat yhtä hyvin olla joko kaupallisia, itse kehitettyjä tai MIL-standardoituja menetelmiä, kunhan yhteys järjestelmän sisällä toimii ja täyttää sille asetetut yhteys- ja yhteensopivuusvaatimukset.

Vastaajien määrä: 13



74. kommentti

Vastaajien määrä: 4

Kommentti

- Kuten aiemmin.

Periaatteessa näin, mutta yhteensopivusseikat jne tulee huomioida kokonaisuudessa.

Kommentti

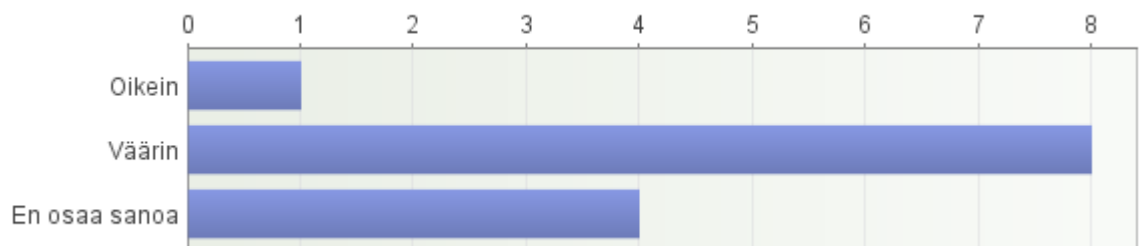
- Toki väitteen mukainen voidaan hyväksyä. Itse kehittäminen on kuitenkin niin tuskainen kehityspolku, ettei se käytännössä kannata. MIL-menetelmät ovat usein myös liian vähän testattuja

Kommentti

- Viittaaan edelisiin kommentteihini
- KV-yhteensopivuudet huomioitava

75. Tiedonsiirron kognitiiviradiojärjestelmässä radioiden välisten yhteyksien tulee perustua kaupallisiin standardeihin (LTE, 3G, Virve).

Vastaajien määrä: 13



76. kommentti

Vastaajien määrä: 9

Kommentti

Kommentti

- Mistä tällainen vaatimus tulee?

Toiseksi "virve" ei ole kaupallinen standardi...

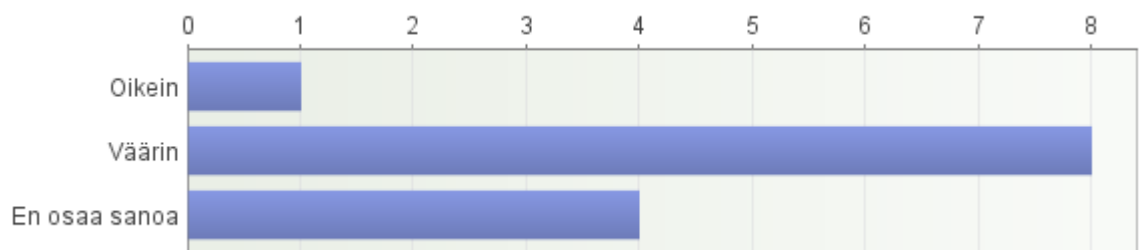
- Tiedusteltavuus lienee liian helppoa
- Jälleen tuotekehityksen määrittely kysymys täysin. Ei kognitiiviradiossa kuitenkaan ole tällaista rajoitusta.
- Voi sisältää yhtsopiv toiminnallisuuksia mutta taistelukentän yhteydet ei voi olla cots aaltomuotojen varassa
- Näitä kannattaa hyödyntää, mutta voi olla, että lisäksi tarvitaan parempaa häirinnänsietoa joka voi edellyttää proprietary-ratkaisujen kehittämistä.

Kommentti

- Tämän lisäksi myös muita standardeja tulee voida käyttää, mutta kaupalliset standardit tulee olla tuettuna.
- Edelleen vastannut tähän jo aikaisemmin, ei vahvaa näkemystä kaupallisten ja ei-kaupallisen/MIL ratkaisujen välillä.
- Todennäköisesti kaupalliset standardit ovat suuressa roolissa. Tähän kysymykseen ei ole yksiselitteistä vastausta.
- KV-yhteensopivuus huomioitava

77. Tiedonsiirron kognitiiviradiojärjestelmässä radioiden välisten yhteyksien tulee perustua MIL-standardeihin tai puolustusvoimien kehittämiin omiin menetelmiin.

Vastaajien määrä: 13



78. kommentti

Vastaajien määrä: 7

Kommentti

Kommentti

- Ei tämäkään voi olla vaatimuksena, mutta verrattuna edelliseen on todennäköisesti lähempänä käytännön tilannetta :)
- Nämä ovat yksi vaihtoehto, mutteivat voi olla ainoat menetelmät. Todennäköisesti sekoitus kaikkea on paras vaihtoehto.
- Jälleen tuotekehityksen määrittely kysymys täysin. Ei kognitiiviradiossa kuitenkaan ole tällaista rajoitusta.
- Kyllä pääosin mutta voi yhtsopiv takia sisältää jonkin cotys-toiminnallisuuden
- Kaupallisella puolella käytetään valtavasti resursseja tekniikan kehittämiseen, joten niitä tuloksia kannattaa ilman muuta hyödyntää. CR voi vaihtaa toimintatapaansa tilanteen mukaan.

Kommentti

- Jossakin määrin kyllä, mutta ei kokonaan
- KV-yhteensopivuudet huomioitava.

79. Vapaa sana/kommentit kyselystä

Vastaajien määrä: 4

- Hyviä kysymyksiä. Tuntuu vain siltä, että kovin nopeasti järjestelmää ei saada muutettua ainakaan juuri sellaiseksi, kuin PV halkuaisi. Kaupallisten toimijoiden tahto painanee liikaa ja toisaalta voi olla, että PV:n kaipaamat ratkaisut eivät ole samaa "main streamia" kaupallisten toimijoiden kanssa. Tämä puolestaan voi johtaa kalliseen kehittämiseen.
- Osa "En osaa sanoa" vastauksista olis sopinut myös Okei/Väärin kohtaan. Sanalliset kuvauksesta toivottavasti näkee luokittelun jos tarpeen painottaa Oikein/Väärin kohtia.
- Kysymykset olivat hyviä, mutta ehdottomia vastauksia ei ole.
- Hieman vaihtelevuutta kysymyksien laadussa. Tämä työkalu on varmaan ihan hyvä tietojen keräämisessä, mutta olisi jossain määrin ehkä tarvinnut jonkilaisen tukidokumentin, jossa kysyttäviä asioita olisi hieman avattu. Nyt jäin tuntuma, että vastasinkohan ihan oikeaan asiaan jokaisessa kohdassa.

Taulukko 2: Kognitiivisten ominaisuuksien vaikutuksia elektronisessa suojautumisessa

	SUOJAUTUMISEN MENETELMÄT				
KOGNITIIVISET OMINAISUUDET	minimi-lähetyste-hot	suunta-antennit	maastoeste uhkan suuntaan	viestiliikenne-kuri (EMCON)	Tietoliikenne-parametrien muutos (modulaatio, kaistanleveys, koodisuhde jne.)
DSA= Dynaaminen spektrin hyväksikäyttö	DSA:n luomalla tilan-tietoisuudella voi hallita lähetystehoja.	Ei	Ei	DSA monitoroi spektriä, joten voidaan havainnoida myös esim. EMCON-tason rikkomuksia.	Kertoo muulle järjestelmälle, mikä osa spektristä on vapaa (taajuus- ja aikadimensio).
Moniantenni-järjestelmät	MIMOilla voidaan optimoida siirtotietä ilman, että radioparametreihin tarvitsee tehdä muutoksia.	Minimin/maksimim muodostaminen tilanteen mukaan uhkan suuntaan	Ei	Ei	Aaltomuodon tai taajuuden muuttuessa oikeiden antenniryhmien käyttö
RRM= Radioresursien hallinta	RRM on toteutustapa kogn. ominaisuuksille. Hallinnoi esim. kokonaisuuksia SLA:n alla.	Ei	Ei	RRM hallinnoi radioresursia, jolloin mahdolliset rajoitteet toteutetaan RRM:n kautta.	RRM voi vastata käytetyistä aaltomuodoista ja koodauksesta.
SLA Yhteyksien adaptiivisuus	AMC, AFC, ATC, kuuluvat osaksi suojautumisen menetelmiä.	otetaan huomioon osana RRM:ää	otetaan huomioon osana RRM:ää	otetaan huomioon osana RRM:ää	otetaan huomioon osana RRM:ää
Tietokannat	Ei	Ei	Paikkatietokantojen hyväksikäyttö yhdessä DSA:n kanssa (uhkan suunnan määrittäminen)	Käyttäjätietokannat, esim. joja-käskyn ja EMCON-tasot	Mahdollisesti, jos järjestelmässä signaalitietokannat ja esim. häirintäjärjestelmä ja sen rajoitukset tunnistetaan, voidaan vastatoimet optimoida.
Verkonmuodostus	Voi olla SON:n ominaisuus	Topologian hallinnan kautta mahdollinen	Voi olla tietoinen paikoistaan verkonmuodostukseen liittyen, ei pakollinen	Kyllä	Kyllä

Taulukko 3: Kognitiivisuus ja uhka

<p>punainen = kogn. omin. vaikutus ELTI- ja ELVA-järjestelmiin</p> <p>sininen = ominaisuuden vaikutus johtamisjärjestelmiin</p>	<p>UHKAT</p>		
<p>KOGNITIIVISET OMINAISUUDET</p>	<p>TIEDUSTELU</p>	<p>HÄIRINTÄ</p>	<p>KYBER</p>
<p>DSA</p>	<ul style="list-style-type: none"> - mahdollisuus merkittävästi laajempaan ja monipuolisempaan spektrin hyväksikäyttöön - useita potentiaalisia tiedustelusensoreita verkottuneena toisiinsa - tiedustelualue laajenee - verkkorakenteet voivat poistua, tiedustelu-analyysi vaikeutuu - päätelaitteet voivat homogenoitua, vaikutuksia analyysiin - häiriöiden hyväksikäyttö tietyissä EMCON-tasoissa, maskien etsiminen (edellyttää myös muiden solmujen tai sensoreiden tietojen saatavuutta). 	<ul style="list-style-type: none"> - automaattinen häirinnän tunnistus ja väistö - häirintäalue laajenee spektrin leventymisen myötä - häirinnän peruseräteet voivat muuttua estävästä ohjaavaksi: ohjataan viestiliikenne halutulle alueelle tai moodeille/ aaltomuodoille, jotka ovat edullisempia esim. tiedustelulle - älykäs häirinnän väistäminen, jos käytössä signaalitietokannat ja luokitustiedot - spektrin aukkojen luominen kognitiiviselle järjestelmälle "varaamalla" jokin spektrin alue häirinnällä. 	<ul style="list-style-type: none"> - Mahdollinen kohde vaikuttaa myös kyberilä. Merkittävimpänä uhkana on järjestelmän toimintakyvyttömäksi saattaminen. Tiedon varastaminen ei suoraanaisesti tässä yhteydessä koske DSA:ta, koska tietokannat, rootit ja verkonmuodostus on käsitelty erikseen.
<p>Moniantenni-järjestelmät</p>	<ul style="list-style-type: none"> - suojaus tiedustelulta hallitsemalla säteilykuvioita - voidaan ottaa osaksi emissionkontrollointia. - tiedusteluetaisyys kasvavat jos tiedustelu-järjestelmillä on käytössä älykkäät antennit. 	<ul style="list-style-type: none"> - tehokkaampi häirinnänväistäminen, minimien ja maksimien hallinta - voidaan väistää nopeasti ilman parametri-muutoksia signaalissa → vaikeuttaa häirinnän ohjausta. 	<ul style="list-style-type: none"> - Haittaohjelmilla voidaan vaikuttaa myös moniantennijärjestelmään, esimerkiksi suuntaamalla minimi hyötylähetteen suuntaan.
<p>RRM</p>	<ul style="list-style-type: none"> - aaltomuotojen hallinta uhkan mukaan, esimerkiksi ennakkotiedot vastustajan sigintyvyydestä voivat vaikuttaa - EMCON - kontrolliliikenne (machine –to-machine) voi olla tiedustelun kohde - mikäli järjestelmän hallinta on liian kognitiivinen, voi emissioiden kontrollointi olla vaikeaa. 	<ul style="list-style-type: none"> - häiriöisen yhteyden hallinta, EMCON - aaltomuotojen hallinta uhkan mukaan, esimerkiksi ennakkotiedot vastustajan ELVA-kyvystä voivat vaikuttaa - kontrolliliikenne (machine –to-machine) voi joutua häirinnän kohteeksi. 	<ul style="list-style-type: none"> - Haittaohjelmilla voidaan vaikuttaa RRM:n estämällä sen toimivuus tai muuttamalla sen toimintaa epäedulliseksi paljastumatta itse (vrt. ,Stuxnet Matrosov ym. 2010).
<p>SLA</p>	<p>kuuluu kokonaisuutena</p>	<p>kuuluu kokonaisuutena</p>	<p>kuuluu kokonaisuutena</p>

Single link adaptati- on	RRM:n alle	RRM:n alle	RRM:n alle
Tietokannat	<ul style="list-style-type: none"> - tiedustelu tuottaa osan järjestelmien vaatimista tietokannoista (signaali-kirjastot, luokittelijat) - tietokannat ovat jatkuvan tiedustelu-uhan alla - CR voivat tuottaa ympäristöstään tietokantamuotoista dataa, jota käytetään hyväksi esim. .ELTI-järjestelmille (esim. tilastot eri taa-juuksien toimivuudesta yhteyden muodostuksessa sidottuna aikaan ja paikkaan). 	<ul style="list-style-type: none"> - häirinnän kohdentaminen voi perustua tietokantatietoihin - häirinnän väistäminen voi perustua tietokantatietoihin (yhteyksiin vaikuttavan häirintäjärjestelmän tunnistaminen) - häirinnän väistäminen voi perustua oman tiedustelun antamaan ennakkovaroitukseen, järjestelmät voidaan etukäteen konfiguroida oikeanlaisiin vastatoimiin. 	<ul style="list-style-type: none"> - tietokannat ovat jatkuvan tiedustelun ja vaikuttamisen uhan alla - tietokantojen korruptoituminen - väärän tai harhauttavan informaation syötäminen tietokantaan - suurimpina uhkina voidaan katsoa olevan esimerkiksi sellaisten käyttäjätietokantojen menettäminen, joista voidaan selvittää koko organisaatio, avainkohteet ja operaationvaiheistukset - paikkatietokannoista voidaan selvittää kaikkien solmujen koordinaatit, historia tietoi- neen - kirjastotiedot ovat tyyppillisesti suojaustasoa I, erittäin salainen.
Verkonmuodostus	<ul style="list-style-type: none"> - SON ja RBR voivat toteutuessaan vaikeuttaa tiedustelua, verkko-rakenteet poistuvat, käyttömahdollisuudet lisääntyvät, spektrin käyttö monipuolistuu - verkkojen tulee lähettää tietoja solmuilta toisille, jolloin kontrolliliikenne on potentiaalinen tiedustelun kohde. 	<ul style="list-style-type: none"> - häirinnän kohdistaminen haluttuun kohteeseen vaikeutuu, koska kohdetta on vaikeampi tunnistaa (ks. tiedustelu) tai häirinnän kohdentaminen yksittäiseen yhteyteen ei vaikuta, koska liikenne reititetään toiselle yhteydelle - SON voi adaptoitua vallitsevan tilan mukaisesti (Ks. RRM) - verkkojen kontrolliliikenne on potentiaalinen häirinnän kohde. 	<ul style="list-style-type: none"> - SON ja RBR tietojen vuotaminen tai järjestelmään tunkeutuminen voidaan katsoa vaarallisimmaksi vaihtoehdoksi. - voidaan arvioida, että onnistuneella kyberope-raatiolla kognitiivisen radiojärjestelmän tiedot voidaan varastaa ja sille voidaan aiheuttaa merkittävää tuhoa.

TAULUKKO 9: Toiminnallisuusväittämien tulokset ja johtopäätökset

VÄITTÄMÄ	Oikein/Väärin/EOS	Varaukset (kommentit)	Johtopäätökset
7. Kognitiivisen radion arkkitehtuurin tulee perustua ohjelmistoradioon SR (ei siis SDR)	4/5/4	Ohjelmallisuus radiossa mahdollistaa vapauden radion määrittelyssä sekä käytön optimoinnissa. Ideaalinen ohjelmistoradio on vasta tulossa ja rajanveto SR:n ja SDR:n välillä on hankalaa.	Kognitiivisen radion arkkitehtuurin ei tarvitse perustua ideaaliin ohjelmistoradioon. Kognitiivinen radio tarvitsee toimiakseen riittävän joustavuuden, jonka esimerkiksi SDR voi tuottaa.
3. Kognitiivisella radiolla tulee olla laaja toiminta-kaista (esimerkiksi 3–3000 MHz),	9/3/2	Pitää olla mahdollisuus rajoittaa kaistaa tarvittaessa, toiminta ei saa perustua siihen, että koko kaista on käytössä.	Kognitiivisella radiolla tulee olla laaja toiminta-kaista, jolla mahdollistetaan taajuusresurssien mahdollisimman tehokas käyttö ja radion tarkoituksenmukainen toiminta eri skenaarioissa.
5. Kognitiivisen radion perusedellytys on tilannetietoisuus spektristä,	11/2/0	Tietoisuus spektristä tulee ulottua sekä nykyiseen hetkeen että tulevaan (eli minnesuunnittelee siirtyvänsä, jos ylipäätään siirtyy).	Kognitiivisen radion tulee olla tietoinen käytävissä olevissa resursseistaan. Tilannetietoisuus voidaan tuoda radiolle myös ulkopuolelta.
13. Kognitiivisen radion perusedellytys on, että se on tietoinen omassa järjestelmässään liikkuvan tietoliikenteen määrästä ja laadusta.	10/2/1	Kognitiivisen radion tulee tietää jotakin liikenteestään. Mitä enemmän sitä parempi, mutta toisaalta pystyy toimimaan ilmankin tarkkaa tietoa. Optimoinnin kannalta on perusedellytys.	Liikenteen priorisoinnin ja optimoinnin kannalta kognitiivisen radion tulee tietää, mitä ja millaista tietoa järjestelmässä kulkee. Kognitiivinen radio voi kuitenkin toimia ilman tätä kognitiota.
9. Kognitiivinen radio pystyy luokittelemaan havaitsemansa signaalityypit sekä erittelemään	5/6/2	Kyseessä ei ole kognitiivisen radion perustoiminnallisuus. Kognitiivinen radio voidaan	Sotilaallisessa käytöympäristössä kognitiiviselle radiolle voidaan kirjata kyseinen vaati-

omat, vihollisen ja neutraalit lähetteet.		ohjelmoida toimimaan näin. Tieto voidaan tuoda myös ulkopuolelta esimerkiksi kirjastolla.	mus. Tieto voidaan tuoda myös ulkopuolelta esim. tiedustelujärjestelmältä, mutta tällöin CR:n tulee voida ottaa vastaan reaaliaikaista tietoa.
11. Kognitiiviradion tulee olla täysin yhteensopiva aiemman sukupolven radiojärjestelmien kanssa eri OSI-mallin mukaisilla kerroksilla.	2/11/0	Sana <i>täysin</i> tulisi korvata sanalla <i>riittävä</i> . Täyttä yhteensopivuutta ei tule tavoitella, tiettyjä haluttuja ominaisuuksia on hyvä voida hyödyntää. Gateway-toiminnallisuuksia voisi käyttää hyväksi.	Täyttä yhteensopivuutta ei kannata tavoitella. Yhteensopivuus tulee olla tietyillä erikseen määritettävillä tasoilla.
15. Kognitiivinen radiopystyy liittymään kaupallisiin radiojärjestelmiin	5/5/3	Jokaiseen ei tarvitse voida liittyä, mutta tärkeimpiin kyllä. Kustannusten nousu voi olla merkittävää, tulee harkita miten siirtyminen tehdään.	Ne kaupalliset järjestelmät, joihin yhteensopivuus halutaan, tulee määritellä, samoin kuin tapa, jolla kaupallisiin järjestelmiin liitytään. Kaupallisten järjestelmien hyväksikäyttö tuo lisää erilaisia toimintamahdollisuuksia, mutta se ei ole perusedellytys kognitiiviselle radiolle.
17. Kognitiivinen radiopystyy käyttämään hyväkseen kaupallisia radioresursseja häiritsemättä niitä.	10/3/0	Edellyttää toimivaa ympäristön havainnointia. Radioresursseilla ymmärretään ensisijaisesti taajuusdimensio.	Sotilaalliseen käyttöön tarkoitetun kognitiivisen radion tulee pystyä jakamaan radioresursseja muiden toimijoiden kanssa.
19. Kognitiiviselle radiolle voidaan ohjelmoida erilaisia toimintatapamalleja (esimerkiksi tiedustelulta suojautuminen), joita se toteuttaa itsenäisesti	12/1/0	Kognitiiviselle radiolle ”kerrotaan”, miten sen halutaan toimivan (luonnollisesti!).	Kognitiivinen radio voidaan ohjelmoida toimimaan ennalta halutulla tavalla, eli esimerkiksi käyttämään mahdollisimman alhaisia lähetystehoja tai käyttämään maksimaalista tiedonsiirtonopeutta

			<i>(datarate).</i>
31. Kognitiivinen radio mukautuu eri tilanteisiin vaihtamalla toimintataajuutta automaattisesti/itsenäisesti.	12/1/0	Muut taajuuksien käyttäjät tulee huomioida. Edellyttää merkittävää kehittymistä regulaatiossa.	Kognitiivisen radion perusominaisuus. Myös oleellinen, jotta CR pystyy selviytymään sotilaallisessa käyttöympäristössä.
23. Kognitiivinen radio mukautuu eri tilanteisiin vaihtamalla fyysisen kerroksen parametreja, kuten symbolinopeutta ja modulaatiota.	12/0/1	Ominaisuus (adaptiivisuus) on kuvattu jo edellisen sukupolven radioihin.	Perusvaatimus kognitiiviselle radiolle.
35. Kognitiivinen radio mukautuu eri tilanteisiin vaihtamalla MAC-kerroksen parametreja, kuten kättely- ja suoja-aikoja.	10/0/3	Häiriölliset olosuhteet voivat johtaa tähän vaatimukseen.	Voidaan asettaa vaatimukseksi kognitiiviselle radiolle. Vaatimusmäärittelyasiaa, johon vaikuttaa tekninen kypsyyt.
29. Kognitiivinen radio mukautuu eri tilanteisiin vaihtamalla verkkokerroksen parametreja, kuten reititystä tai osoitteistusta.	12/1/0	Kyseessä ei ole varsinaisesti kognitiivisen radion piirre vaan ennemminkin kognitiivisen (radio)verkon tai -järjestelmän (CRS) ominaisuus.	Yksi tapa toteuttaa kognitiivisuutta ja adaptiivisuutta radiojärjestelmässä. Esim. voidaan siirtyä kevyempään reititykseen ja osoitteistukseen.

TAULUKKO 10: Teknisten väittämien tulokset ja johtopäätökset

VÄITTÄMÄ	Oikein/Väärin/EOS	Varaukset (kommentit)	Johtopäätökset
21. Kognitiiviradion ja aiemman sukupolven radiojärjestelmien yhteensopivuus on järkevää toteuttaa rajoitusti esimerkiksi gateway-ratkaisujen kautta.	10/1/2	Gatewayn rakentaminen riippuu osin arkkitehtuurista ja operatiivisista vaatimuksista.	Yhteensopivuus legacy-järjestelmiin on kustannustehokasta rakentaa GW:n kautta ja myös perusteltua uuden järjestelmän kehittämisen kannalta, jolloin uusien ratkaisuiden suorituskykyä ei rajoiteta turhaan.
25. Kognitiivista radiota voidaan käyttää gateway:nä kaupallisten ja sotilaallisten radiojärjestelmien välillä.	8/2/3	Gatewayn toiminnallisuudessa on huomioitava myös käyttöympäristöstä johtuvat lisävaateet, kuten salaus.	Sitä mukaan kun kaupallisten laitteiden ja teknisten ratkaisuiden määrä sotilaskäytössä kasvaa, myös yhteensovittamisen tarve kasvaa. Erityisesti legacy-järjestelmät tuovat lisähaasteen tähän toimintakenttään.
39. Komponenttitekniikan kehittymättömyys rajoittaa tällä hetkellä kognitiivisen radion tuotekehitystä.	7/2/4	Komponentit eivät välttämättä ole suurin ongelma, vaan ongelmia on erityisesti niiden ohjelmoitavuudessa.	Komponenttitekniikan haasteet ovat osin SDR:n vaatimuksista johtuvia. Tämä vaikuttaa kognitiiviseen radioon, koska CR:n alustan on oltava ohjelmoitava radio.
59. Tulevaisuudessa Puolustusvoimien tiedonsiirtojärjestelmän päätelaitteet perustuvat puhtaasti kaupallisiin ratkaisuihin.	3/7/3	Todennäköinen kehitysuunta, koska kaupallisen puolen kehitys on nopeampaa kuin miljärjestelmien. Kokonaan näin ei tn. tule tapahtumaan. Olennaista tulevaisuudessa on hallita ohjelmistoja.	Kaupallisten järjestelmien merkitys tulee kasvamaan merkittävästi seuraavalla vuosikymmenellä. Kaupalliset ratkaisut tulevat osin korvaamaan vain sotilaskäyttöön tarkoitettuja järjestelmiä, kaksoiskäyttömateriaali ja sovellukset lisääntyvät.
65. Tulevaisuudessa Puolus-	5/5/3	Kustannustehokkuutta ei	Puhtaasti sotilaalliseen

<p>tusvoimien kannattaa kehittää oma toimintaympäristönsä optimoitu johtamisjärjestelmän päätelaite.</p>		<p>ole. Hyvänä puolena olisi, että järjestelmien hallinta olisi kokonaisuudessaan PV:llä.</p>	<p>käyttöön suunnitellut päätelaitteet vähenevät, ne jäänevät käyttöön erikoistoimintaan suunnitelluissa järjestelmissä (LEKot, ohjukset). Massoille tarkoitetut tuotteet tullevat perustumaan raudaltaan COTS-tuotteisiin, mutta sovellukset ja ohjelmistot voivat olla sotilaalliseen toimintaan suunniteltuja.</p>
<p>67. Päätelaitteiden ja radioiden välisten yhteyksien tiedonsiirtoprotokollat voivat yhtä hyvin olla joko kaupallisia, itse kehitettyjä tai MIL-standardoituja menetelmiä, kunhan yhteys päätelaitteen ja radion välillä toimii.</p>	<p>8/1/4</p>	<p>Kaupalliset protokollat tn. helpompia tiedustella ja murtaa, mil-protokollat on helpompi tunnistaa massasta. Kustannustehokkainta olisi käyttää yleisiä protokollia. Oma vaikutuksensa on myös KV-yhteensopivuudella.</p>	<p>Kognitiivisen radion vaatimusmäärittely viime kädessä sanelee, millaisia protokollia voidaan käyttää. Tärkein vaatimus on kuitenkin yhteyksien toimivuus ja luotettavuus. Toissijaisina vaatimuksina ovat tiedusteltavuus ja kustannukset.</p>
<p>69. Tiedonsiirron kognitiiviradiojärjestelmässä päätelaitteiden ja radioiden välisen yhteyden tulee perustua kaupallisiin standardeihin (BT, WLAN, NFC).</p>	<p>3/2/8</p>	<p>Tätä yhteyttä ei ole standardoitu siten, että se olisi käytössä kaupallisessa radiossa.</p>	<p>Kaupalliset standardit ovat yleisesti koestettuja ja toimivia. Niiden käyttö mahdollistaa kaupalliset päätelaitteet ja ne ovat näin ollen kustannustehokkaita. Kaupalliset järjestelmät ovat kuitenkin haavoittuvaisia, eikä niitä ole suunniteltu sotilaalliseen toimintaympäristöön.</p>
<p>71. Tiedonsiirron kognitiiviradiojärjestelmässä päätelaitteiden ja radioiden välisen yhteyden tulee perustua MIL-standardeihin tai Puolustusvoimien kehittämiin omiin menetelmiin.</p>	<p>0/7/6</p>	<p>Katso kohdat 67 ja 69.</p>	<p>Ei ole kustannustehokasta, päätelaitevalikoima jää hyvin suppeaksi.</p>
<p>73. Kognitiiviradiojärjes-</p>	<p>9/1/3</p>	<p>Aaltomuodot eivät voi</p>	<p>Vaatimusten määrittelys-</p>

<p>telmän sisäisten yhteyksien tiedonsiirtoprotokollat voivat yhtä hyvin olla joko kaupallisia, itse kehitettyjä tai MIL-standardoituja menetelmiä, kunhan yhteysjärjestelmän sisällä toimii ja täyttää sille asetetut yhteys- ja yhteensopivuusvaatimukset</p>		<p>olla pelkästään COTS:n varassa</p>	<p>sä tähän voidaan ottaa kantaa. Kaupallisella puolella on kuitenkin suuret resurssit kehittää eri teknologioita. Kansainvälinen yhteensopivuusvaade asettaa omat vaatimuksensa</p>
<p>75. Tiedonsiirron kognitiiviradiojärjestelmässä radioiden välisten yhteyksien tulee perustua kaupallisiin standardeihin (LTE, 3G, Virve).</p>	<p>1/8/4</p>	<p>Aaltomuodot eivät voi olla pelkästään COTS:n varassa.</p>	<p>Ei voi perustua pelkästään siviilitekologiaan.</p>
<p>77. Tiedonsiirron kognitiiviradiojärjestelmässä radioiden välisten yhteyksien tulee perustua MIL-standardeihin tai Puolustusvoimien kehittämiin omiin menetelmiin.</p>	<p>1/8/4</p>		<p>Puhtaasti mil-standardien käyttö ei ole kustannustehokasta, mikä rajaa pois mahdollisuuksia kaupallisten järjestelmien hyväksikäytöstä. Myös viranomaisyhteistyö voi vaikeutua.</p>