



## In-Band Full-Duplex -radion sotilaalliset sovellukset

Heikki Rantanen, Sami Peltotalo  
Puolustusvoimien tutkimuslaitos

Taneli Riihonen  
Tampereen yliopisto

**In-Band Full-Duplex (IBFD) -radio pystyy samanaikaisesti vastaanottamaan ja lähettämään radiosignaaliin moduloitua informaatiota samalla taajuudella. Tämän päivän radioita, kuten 5G-kännykkä ja sen tukiasema, kutsutaan usein myös full-duplex-radioiksi, mutta sitä ne ovat oikeasti vaan näennäisesti – todellisuudessa lähetykset ja vastaanotto tapahtuvat vuoro- ja taajuusjakoon. Tässä artikkelissa kerrotaan mikä IBFD-radio on ja miksi niin sotilastietoliikenne kuin myös viimeistään mobiiliverkkojen seuraava sukupolvi, 6G, on ottamassa tämän tekniikan käyttöön. Niin sotilas- kuin siviiliradiojärjestelmissä IBFD-radiolla saavutetaan merkittävä uutta suorituskykyä. Tässä yleistajuisessa artikkelissa käsitellään IBFD-tekniikan perusteita, tekniikan kehityspolkua ja erityisesti saavutettavaa uutta sotilaallista suorituskykyä.**

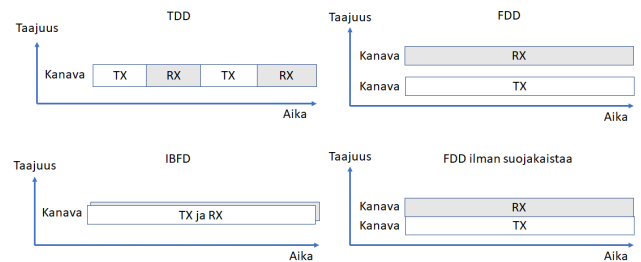
### Taustaa

Perinteisesti radioissa käytetään tiedonsiirron OSI-mallin siirto-kerroksella (Medium Access Control, MAC) joko aika- tai taajuusjakoon perustuvia kanavointitekniikoita, jotta fyysisen kerroksen radion lähetin ja vastaanotin eivät ole toiminnassa samanaikaisesti. Vanhassa GSM-tekniikassa oli päätelaitteissa jopa yhtä aikaa sekä aika- että taajuusjako. Tämän vakiintuneen lähtökohdan kyseenalaistaa moderni In-Band Full-Duplex (IBFD) -tekniikka, jossa lähetyksen ja vastaanoton vuoro- ja taajuusjakoon luovutaan, koska siitä aiheutuvat tekniset haasteet kytetään nykyään ratkaisemaan.

TDD (Time-Division Duplexing) -kanavoinnissa lähetykset ja vastaanotto tapahtuvat vuoron perään ja yhden aikavälin pituus on luokkaa muutaman millisekunteja. Kun nämä lyhyet puhe- tai -vastaanotot koostetaan peräkkäiseksi joukoksi, esimerkiksi puhe on kuulijan kannalta reaaliaikaista. Perinteisen kenttäradioiden käyttäjällä aikaväli määräytyy siitä, kun hän painaa tangenttia ja puhuu itse eikä pysty samalla kuulemaan muiden lähetteitä. FDD (Frequency-Division Duplexing) -kanavointi tarkoittaa käytännössä sitä, että radion lähetykset ja vastaanotto tapahtuvat taajuusalueella niin kaukana toisistaan, että ne voidaan tehdä toisiaan häiritsemättä niin sanotulla duplex-suodattimella, joka muodostaa suuren passiivisen vaimennuksen lähettimen ja vastaanottimen välille, vaikka ne kytetään samaan antenniin. Näiden sijaan IBFD-radio pystyy samanaikaisesti vastaanottamaan ja lähettämään radiosignaaliin moduloitua informaatiota samalla taajuudella. Kuva 1 on esitetty eri tekniikoiden toiminta aika- ja taajuustasossa.

Kuva 1 myös osoittaa graafisesti hyvin, kuinka radiokanavan kapasiteetti tiedonsiirtoon varattua taajuusyksikköä kohti voidaan jopa kaksinkertaistaa IBFD-radiolla. Mobiilin tietoliikenteen operaattorin näkökulmasta tämä tarkoittaa parhaimmillaan

tiedonsiirtokapasiteetin tuplaamista tai saman kapasiteetin saavuttamista puolitetulla taajuusvarauksella, jotka kulminoituvat suoraan taloudelliseksi voitoksi tai kustannusten alentamiseksi. Kuinka suureen kapasiteettiä hyödynnetään riippuu käytännössä siitä, ovatko tiedonsiirtosuunnat tasapainossa, eli onko edes tarpeen lähettää ja vastaanottaa yhtä paljon informaatiota, ja siitä, kuinka hyvin IBFD-radiolle ominainen itseishäiriösignaali kyettään vaimentamaan modernilla radiotekniikalla. Juuri itseishäiriö, eli radion vastaanoton häiriintyminen sen oman lähetyksen takia, on perinteisesti vältetty TDD- tai FDD-kanavoinnilla lähtökohtaisesti.



**Kuva 1.** Aikajakaisen kanavoinnin (TDD), taajuusjakaisen kanavoinnin (FDD) ja IBFD-radioiden toiminta aika- ja taajuustasossa. TX tarkoittaa lähetystä ja RX vastaanottoa.

Aiheesta tieteellistä lisätietoa etsivän kannattaa tiedostaa, että rakkaalla lapsella on usein monta nimeä – myös tässä tapauksessa. Usein puhutaan lyhyesti Full Duplex (FD) -radiosta vaikka tarkoitetaan IBFD-radiota ja sekaannusta aiheuttaa se, että perinteistä FDD:tä on kutsuttu FD:ksi. Samoin IBFD:n sijasta käytetään usein nimitystä Same-Frequency Simultaneous Transmit-and-Receive (SF-STAR)<sup>1</sup>, varsinkin kun sovellus on jotain muuta kuin tiedonsiirtoa, johon sana duplex viittaa. Erityisesti tutkatekniikassa SF-STAR on oikeaoppinen termi. Myös Division-Free Duplex ja Listen-and-Talk on käytössä kirjallisuudessa, joskin harvinaisemmin, ja FD on saanut muitakin etuliitteitä kuin sanat In-Band.

### Sotilasradioihin kehittyneitä suorituskykyjä

Sotilasradioiden tapauksessa taajuuskäytön tehokkuuden lisäksi merkittävää uutta suorituskykyä saadaan elektronisessa sodankäynnissä. IBFD-radio mahdollistaa radion lähettimen ja vastaanottimen samanaikaisen päällä olon. Käytännössä siis saadaan reaaliaikaisesti tietoa, onko sotilasradion taajuudelle tullut nopeasti seuraava häirintälähetin, onko taajuus muuten häiriöllinen ja tähän perustuen voidaan tehdä hyvin nopeaa kognitiivista spektrin hallintaa ja poistaa käytöstä häirityt tai muuten huonosti toimivat radiokanavat.

<sup>1</sup> Janes, 1.2.2021, *US Army seeking simultaneous transmit and receive tactical radios*. [Online], [Viitattu 31.1.2023]. Saatavissa:

<https://www.janes.com/defence-news/news-detail/us-army-seeking-simultaneous-transmit-and-receive-tactical-radios>



Edellä mainitun lisäksi IBFD-radio voi suorittaa yhtä aikaa tiedonsiirtoa ja vastapuolen häirintää. Afganistanin sodassa suureksi ongelmaksi muodostuivat kauko-ohjattavat radioteitse laukaistavat tienvarsipommit. IBFD-radio kykenee hoitamaan tiedonsiirtoa sotilasajoneuvosaattueen jäsenten kesken ja samalla rinnakkaisesti tarkkailemaan ilmaantuuko radiospektriin esimerkiksi uusi potentiaalinen tienvarsipommin RC (Radio Control) -lähete, jonka se voi nopeasti peitota omalla kohinalähetteellä ja näin estää räjähdysten. Perinteinen radioteknologia ilman IBFD-kykyä jättää haavoittuvuuden, koska vastapuolen kannattaa käyttää haitallisiin lähettesiiin samoja taajuuksia kuin oma puoli, jolloin niitä ei ole mahdollista häiritä ilman osumista samalla myös omaan nilkkaan. Sama periaate pätee myös lennokkien RC-lähettesiiin.

Sotilasradioiden linkkaaret ovat pitkiä, usein kymmeniä vuosia. Siksi markkinoilla on tänä päivänä ulkoisia lisälaitteita, joihin edellä kuvatun mukainen saattueetta tukeva häirintälähetin ja kommunikointiin käytettävä sotilasradio kytketään ja tämä ulkoinen lisälaitte suorittaa häirintäsignaalin poiston samalla periaatteella kuin oman lähetteen aiheuttaman itseishäiriön poisto tehdään IBFD-radiossa. Esimerkki lisälaitetuotteesta on TrellisWare Technologies -yhtiön Joint Analog and Digital Interference Cancellation (JADIC) -järjestelmä<sup>2</sup>.

### Ohjelmistoradioiden uusi sukupolvi

Tämän päivän uusimmat 5G-kännykät, 5G-tukiasemat ja myös sotilasradiot ovat ohjelmistoradioiden muokattavia radioita, eli ohjelmistoradioita (SDR, Software Defined Radio). SDR-radiot toteutetaan vain erilainen kaupallisissa ja sotilasohjelmistoradioissa. Moderneimman tämän päivän sotilasohjelmistoradioiden ydinkomponenttina on yleiskäyttöinen RFSoc (Radio-Frequency System-on-Chip) -piiri, johon on integroitu laajakaistainen RF-taajuusosa, useita ohjelmoitavia prosessoriytimiä ja nopean laskennan FPGA (Field Programmable Gate Array) -piirejä. Tällaisella RFSoc-piirillä voidaan toteuttaa niin 5G-puhelin kuin myös sotilasradio. Näin ei kuitenkaan tehdä. 5G-kännykkä rakentuu erityisesti 2G-, 3G-, 4G- ja 5G-radioaaltomuotojen optimaaliseen toteutukseen räätälöityjen, erittäin tiheästi integroitujen ja erittäin suuren laskentakyvyn Mobile SoC -piirien ympärille, joiden valmistajia ovat Qualcomm, Mediatek, Apple, Samsung jne. Markkinat ovat niin tavattoman suuret, että voidaan käyttää optimoituja, juuri tähän käyttötarkoitukseen räätälöityjä piirejä ja silti piirin hinta on sen suorituskykyyn nähden uskomattoman halpa.

IBFD-radio voidaan nähdä ohjelmistoradioiden (SDR) uutena sukupolvena. Se on samalla tavalla ohjelmoitava radio kuin aikaisempi sukupolvi, mutta siihen on lisätty kolme toimintalohkoa, jotka vaihtelevat lähettimestä antennin kautta omaan vastaanottiimeen kytkeytyvän itseishäiriösignaalin (SIC, Self-Interference Cancellation) vaihe vaiheelta niin pieneksi, että jäljelle jää käytännössä vain haluttu antennin vastaanottama signaali. Tätä pidettiin vielä noin 15–20 vuotta sitten täysin mahdottomana asiana ja siksi perinteisesti on turvauduttu TDD- ja FDD-ratkaisuihin ilman mahdottomuuden kyseenalaistamista.

Aivan oikeutetusti IBFD-radiota on kuvattu paradigman muutoksena taktisissa kommunikaatioissa ja elektronisessa sodankäynnissä, kun tulevaisuudessa yksi laite voi toteuttaa yhtä aikaa useita toimintoja sekä tehtäviä ja niiden suorittaminen on joustavaa ilman, että laitteen täytyy jakaa niiden kesken aika- tai

taajuusvarauksia lähetykseen ja vastaanottoon. Kuvassa 2 on hahmoteltu IBFD-radioiden sovellusalueita sotilaallisessa käytössä.



**Kuva 2.** IBFD-radioiden sotilaallisia sovellusluokkia. Spektritehokkuuden parantaminen on yhteinen intressi kaupallisten 5G- ja 6G-yhteisöjen kanssa. (Muokattu lähteestä<sup>3</sup>)

### Spektrinkäytön tehostuminen

Kuten jo aiemmin todettiin, IBFD-radio voi kaksinkertaistaa spektritehokkuuden sotilas- ja siviiliradioverkoissa ja tekniikan laajamittaisemman käyttöönoton myötä erityisesti tulevissa 6G-verkoissa. Spektrinkäytön tehokkuuden tuplaantuminen on merkittävä asia, mutta tiedonsiirron muuttuessa yhä enemmän langattomaksi on väistämättä siirryttävä taajuuksien staattisesta jakamisesta dynaamiseen spektrin hallintaan siviili- ja sotilasradiojärjestelmien välillä. Jo nyt 5G- ja tulevien 6G-verkkojen taajuusstarve on niin suuri, että aikaisemmin sotilaskäyttöön tarkoitettujen taajuuksien pakko ainakin osittain antaa mobiiliin tietoliikenteen käyttöön, kun ne eivät ole sotilaskäytössä. Tästä löytyy esimerkkejä jo Yhdysvalloissa. Siellä eräässä tapauksessa kaupallinen toimija saa käyttää alun perin vain sotilaskäytössä ollutta taajuutta, jos sillä on todennetusti käytössä laadukas spektrin sensorointijärjestelmä ja taajuuksien yhteiskäytön tietokanta, jotka takaavat spektristä poistumisen välittömästi, kun ensisijainen käyttäjä, eli tässä tapauksessa sotilaskäyttö sitä vaatii.

Dynaamisesta spektrinkäytöstä käytetään myös nimitystä kognitiivinen spektrinkäyttö. Vuonna 2021 päättyneen Euroopan puolustusviraston EDA:n (European Defense Agency) tutkimusprojekti MAENA<sup>4</sup> (Multiband Efficient Networks for Ad Hoc Communication) tutki VHF-radioverkon (siis sotilaskenttäradioverkon) ja suuremman datanopeuden UHF-sotilasradioverkon tehokasta yhteiskäyttöä erityisesti kognitiivisen spektrinkäytön näkökulmasta. Tutkimuksessa päädyttiin ratkaisuun, että VHF-radioverkon jokainen solmu tekee TDMA (Time-Division Multiple Access) -kehyksen aikaväleissä, joissa se ei itse lähetä tai vastaanota informaatiota, oman toimintaympäristönsä spektrintarkkailua. Tämän perusteella VHF-radioverkko voi tehdä alemman tason dynaamista spektrinkäyttöä sulkeamalla häiriölliset/häiritetyt taajuudet pois käytöstä. Toisaalta dynaamisen spektrinkäytön ylempällä tasolla oli oikeus ja mahdollisuus antaa uusia taajuuksia vaikkapa UHF-verkon käyttöön. Konsepti siis mahdollistaisi dynaamisen spektrinkäytön siviili- ja sotilasradioverkojen välillä. Jos käytössä olisi IBFD-radio, vaste häirintää vastaan olisi äärimmäisen nopeaa.

Tänä päivänä suuri tekninen ongelma on sotilasajoneuvoihin asennetut useat radiot, jotka toimivat samanaikaisesti eri komentoverkoissa. Antennit on tyypillisesti sijoitettu katon äärimmäisiin nurkkiin mahdollisimman suuren keskinäisvaimennuksen aikaan-

<sup>2</sup> TrellisWare Technologies, *Joint Analog and Digital Interference Cancellation (JADIC)*, [Verkkosivu], [Viitattu 31.1.2023]. Saatavissa: <https://www.trellisware.com/advanced-communications/interference-cancellation/>

<sup>3</sup> NATO, STO Technical Report TR-IST-ET-101, 2020, *Full-Duplex Radio: Increasing the Spectral Efficiency for Military Applications*.

<sup>4</sup> Jerzy Lopatka, Tuomas Paso, Raphaël Massin & Xavier Leturc, 2022, *Multi band efficient networks for ad hoc communications*, International Conference on Military Communications and Information Systems (ICMCIS 2022), Procedia Computer Science.

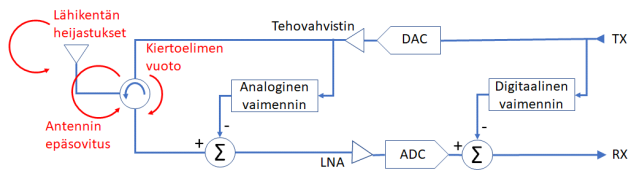


saamiseksi, mutta silti niin sanottu radioiden keskinäishäiriö (engl. co-site interference) voi häiritä vastaanotinta niin paljon, että radiokantama merkittävästi lyhenee. Tässä tapauksessa pitää siis pystyä dynaamisesti hallitsemaan kaikista vierekkäisistä lähettestä tuleva häiriö oman radion vastaanottimeen sen lisäksi että radioyhteys voi olla vastapuolen häiritsemä. Eri verkkojen välinen keskinäinen häiriö voi olla haastava ja jopa todellinen ongelma. Ratkaisua on haettu samasta tekniikasta, jota IBFD-radio käyttää oman lähetyssignaalin vaimentamiseen omissa vastaanottimissa, erityisesti digitaalisesta signaalinkäittelystä. Tässä tekniseksi ongelmaksi muodostuu, että vaimennettavia signaaleja on useampia.

### IBFD-tekniikan perusteet ja kehitysnäkymät

IBFD-radio poikkeaa perinteisestä radiosta siten, että siinä on a) kiertoelin, b) analoginen vaimennin ja c) digitaalinen vaimennin, joilla antennista lähtevä voimakas lähetyssignaali vaimennetaan vastaanottimen puolella niin pieneksi, että se lopulta voidaan vaiheistaa pois, kun tunnetaan tarkalleen lähetetty signaali. IBFD-radion yleinen arkkitehtuuri on esitetty kuvassa 3. Siinä esitetty yhden antennin ratkaisu on ihanteellinen mobileille laitteille, mutta joissain sovelluksissa on mahdollista saavuttaa kiertoelintä parempi eristys käyttämällä erillistä lähetys- ja vastaanottoantennia.

Yhteensä vaimennusta voidaan saada jopa 100–150 dB<sup>5, 6</sup>, joka siis käytännössä mahdollistaa samalla taajuudella hyvin pienitehoisen vastaanottosignaalin ja hyvin suuritehoisen lähteen kulkemisen eri suuntiin samassa antennirajapinnassa. Arvioiden mukaan noin 100 dB, ehkä hieman enemmän, riittää vaimennukseksi kaupallisissa radioissa, kun taas sotilasradioissa vaadittava vaimennus voisi olla jopa 150 dB luokkaa.<sup>7</sup> Asia ei tietenkään ole ihan näin yksioikoinen, sillä hyvin laajakaistaisen signaalin vaimentaminen on haastavampaa kapeakaistaiseen signaaliin verrattuna.



**Kuva 3.** IBFD-radioiden yleinen arkkitehtuuri sisältäen itseishäiriön analogisen ja digitaalisen poistamisen. DAC tarkoittaa digitaalialogiamuunninta ja ADC analogiadigitaalimuunninta. (Muokattu lähteestä<sup>8</sup>)

Tähän mennessä erilaisissa IBFD-radiodemonstraattoreissa, joissa tekniikan kypsyyssaste (Technical Readiness Level, TRL) on siis tasolla 5–6, on raportoitu luokkaa 100–130 dB vaimennuksista.<sup>9</sup> On myös hyvä muistuttaa, että reaali maailma ei ole ideaalinen. Edellä kuvattiin, että oma lähetyssignaali vaimennettiin vaiheistamalla kätevästi pois. Käytännössä tilanne ei välttämättä ihan näin ole, vaan jonkin tasoinen häiritsevä signaali saattaa jäädä jäljelle.

### Sotilaallisten sovellusten tutkimusta

Naton tiede- ja teknologiaorganisaatiossa toimi esiselvitystyöryhmä (Exploratory Team, ET) IST-ET-101 vuonna 2018, jonka tuloksena syntyi raportti Full-Duplex Radio: Increasing the Spectral Efficiency for Military Applications<sup>3</sup>. ET-työryhmän jälkeen päädyttiin perustamaan varsinaisen tutkimusryhmä IST-175, johon Tampereen yliopisto osallistuu Puolustusvoimien toimeksiantosta tenure track -professori Taneli Riihosen johdolla. Riihonen osallistui myös jo ET-työryhmän toimintaan. IST-175-työryhmä aloitti toimintansa vuonna 2019 ja jatkaa toimintaa vuoden 2023 loppupuolelle asti.

IST-175-työryhmä ehdottaa julkaisussaan<sup>8</sup>, että IBFD-radio voisi olla monitoimiradio, joka yhdistää tiedonsiirron, signaalitiedustelun ja häirinnän paikallisella tasolla. Tänä päivänä ne ovat enemmän tai vähemmän erillisiä yksiköitä. Paikallisella tasolla suoritettuna edelliset kolme toimintaa tuottavat optimaalisen tuloksen, jolloin reaaliaikaisen paikallisen verkottuneen signaalitiedustelun tiedoilla kognitiivista spektrinkäyttöä käyttävän tiedonsiirtoverkon suorituskyky optimoituu ja samoin vastapuolen häirintä voidaan toteuttaa lähihäirintänä optimaalisesti.

Kuvassa 4 on esitetty yksi työryhmän laatima skenaario, jossa puolustaja kykenee torjumaan drooniparven hyökkäyksen IBFD-radioiden tuoman kyvykkyyden turvin. Radiosuojakilveksi nimetty skenaario etenee seuraavasti:

1. Sinisten radiotiedonsiirto perustuu IBFD-radioiden mahdollistamaan omaan reaaliaikaiseen spektritilannekuvaan ja vastapuolen signaalitiedusteluun. Näillä tiedoilla omissa radioverkossa sinisten tiedonsiirron suorituskyky optimoituu.
2. Sinisten itseorganisoituva radioverkko havaitsee lähes reaaliaikaisesti häirinnän ja voi optimoida radiotiedonsiirron parametrit niin, että häirinnän vaikutus voidaan minimoida.
3. Kaikki sinisten solmut osallistuvat vastapuolen signaalitiedusteluun oman radiotiedonsiirron ohella. Näin havaitaan drooniparven hyökkäys omalle toiminta-alueelle. Signaalitiedustelun tiedot ovat kaikkien sinisten solmujen tiedossa.
4. Samalla, kun sinisten verkossa viestitetään tietoa hyökkäysten torjuntaan liittyen kaikille solmuille, kukin solmu on käynnistänyt samanaikaisen optimoidun häirinnän signaalitiedusteluun perustuen.
5. Lisäksi sinisten drooni lähetetään suorittamaan tehokasta vaapaan tilan etenemisen häirintää drooniparvea vastaan. Viimeistään tässä vaiheessa hyökkäävä parvi tuhoutuu, kun ne ohjausyhteyden ja paikannustiedon menettämisen vuoksi törmäilevät toisiinsa, hajaantuvat tai putoavat maahan. Siniset ottivat voiton uuden sukupolven IBFD-radion ylivoimaisen suorituskyvyn turvin.

<sup>5</sup> Miika Vuorenmaa, Mikko Heino, Matias Turunen & Taneli Riihonen, 2022, *RF self-interference canceller prototype for 100-W full-duplex operation at 225–400 MHz*, International Conference on Military Communications and Information Systems (ICMCIS 2022), Procedia Computer Science.

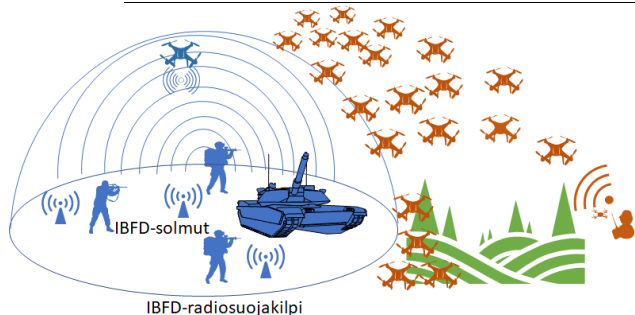
<sup>6</sup> Anh Tuyen Le, Xiaojing Huang & Y. Jay Guo, 2022, *A Two-Stage Analog Self-Interference Cancellation Structure for High Transmit Power In-Band Full-Duplex Radios*, IEEE Wireless Communications Letters, Vol. 11, No. 11, November 2022.

<sup>7</sup> Mark Hickley, 2021, *Providing Simultaneous Transmit and Receive Capabilities for Defense Systems*, Microwave Journal, June Supplement 2021, Aerospace & Defense Electronics, Volume: 64, Edition: 06 Sup, [Online], [Viitattu 31.1.2023]. Saatavissa:

<https://www.microwavejournal.com/articles/36133-providing-simultaneous-transmit-and-receive-capabilities-for-defense-systems>

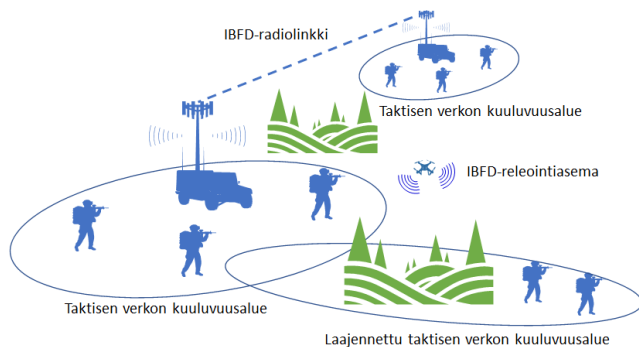
<sup>8</sup> Karel Pärilin, Taneli Riihonen, Vincent Le Nir, Mark Bowyer, Thomas Ranstrom, Erik Axell, Börje Asp, Robert Ulman, Matthias Tschauner & Marc Adrat, 2021, *Full-Duplex Tactical Information and Electronic Warfare Systems*, IEEE Communications Magazine, August 2021.

<sup>9</sup> Business Wire, 19.8.2021, *Kumu Networks Awarded \$1.5M Applied SBIR Phase 2 Contract to Develop the Highest Performing Self-Interference Cancellation Module to Date*, [Online], [Viitattu 31.1.2023]. Saatavissa: <https://www.businesswire.com/news/home/20210819005032/en/Kumu-Networks-Awarded-1.5M-Applied-SBIR-Phase-2-Contract-to-Develop-the-Highest-Performing-Self-Interference-Cancellation-Module-to-Date>



**Kuva 4.** IBFD-radioiden radiosuojakilpikenaario. Sininen kykenee puolustautumaan drooniparven hyökkäystä vastaan. (Muokattu lähteestä<sup>8</sup>)

Kuvassa 5 on esitetty taktisen verkon kantaman laajentamiseen liittyvä IBFD-radioiden releointikenaario sekä IBFD-radiolinkki. IBFD-radioiden avulla releointikanavan kapasiteetti lisääntyy merkittävästi perinteisiin menetelmiin verrattuna, koska kanavalla voidaan samanaikaisesti vastaanottaa ja lähettää releoitavaa liikennettä. Kahden viestikeskuksen väliset kaksisuuntaiset radiolinkit ovat suoraviivainen keino hyötyä spektritehokkuuden tuplaantumisesta ja niissä tyypillisesti käytettävät korkeammat taajuudet joksikin helpottavat itseishäiriön vaimennusta.



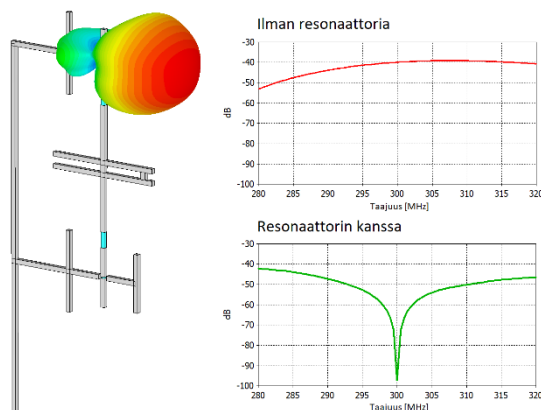
**Kuva 5.** IBFD-radioiden sovelluksia johtamisjärjestelmissä. Taktisen verkon kantamaa voidaan kasvattaa spektritehokkaasti maassa olevien tai lentävien IBFD-releointiasemien välityksellä ja erilliset taktiset verkot voidaan yhdistää toisiinsa kaksisuuntaisilla IBFD-radiolinkeillä.

### UHF-taajuusalueen prototyypit

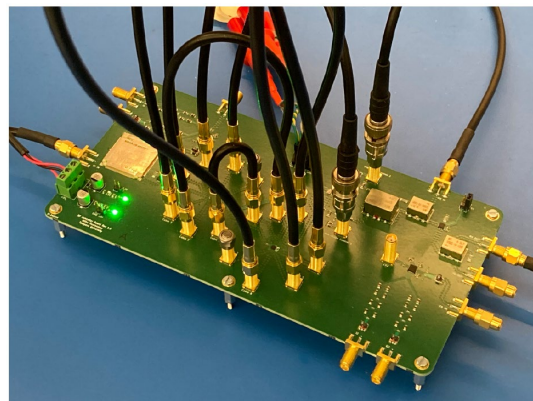
IST-175-työryhmä kehittää kahta prototyyppiä ja radiodemonstraattoria sotilaallisiin sovelluksiin, jotka ovat kuvassa 2 keskirivin molemmilla laidoilla: ensimmäinen demonstraattori keskittyy spektritehokkaaseen taktiseen kommunikaatioon ja toinen kehittää kyvykkyyttä signaalitiedusteluun ja yhtäaikaiseen elektroniseen häirintään. Tähän liittyen Tampereen yliopistolla on kehitteillä IBFD-radion itseishäiriön analogisen vaimentimen ja antennin prototyypit UHF-taajuusalueelle<sup>5</sup> (NATO Band I 225–400 MHz) Maanpuolustuksen kannatussäätiön projektirahoituksella.

Suunnitellussa kompaktissa antenniprototyypissä suuntaavat (Yagi–Uda) lähetyksen- ja vastaanottoantennit on sijoitettu 1,4 metrin etäisyydelle toisistaan kuvan 6 mukaisesti. Antennien väliin suunniteltu resonattori kaappaa tehoa lähetyksiantennista ja kytkee sen vastakkaisessa vaiheessa vastaanottoantenniin vaimentaen itseishäiriön. Antennien välinen eristys paranee 300 MHz:n suunnittelutaajuudella 40 dB:stä yli 90 dB:iin resonattorin kanssa kuten kuvassa 6 oikealla puolella esitetystä simuloidusta taajuusvastuksesta näkyy. Täten käyttämällä erillisiä antennia itseishäiriö vaimenee jopa miljoonasosaan (-60 dB) siihen 30 dB:hen verrattuna, mitä yhden antennin ratkaisussa voidaan kiertoelimellä parhaimmillaan saavuttaa. Toisaalta kiertoelin olisi laajakaistaisempi ratkaisu kuin resonattori, jonka sovitus on vain pistetaajuudelle.

Suunnitellussa analogisessa vaimentimessa (kuva 7) on tavoitteena suuri tehonkesto ja toimintataajuuden ohjelmallinen säädettävyys koko laajan 225–400 MHz:n kaistan yli. Vaimennin toimii kuvan 3 mukaisesti jakamalla tehovahvistimen jälkeen lähetyksiantennille menevästä signaalista osan vaimennuspiiriin, joka säätää amplitudin ja vaiheen vastaanottamaan signaalista. Vaimennin suorittaa ensin erillisten kaapelien viivepankilla karkean 90 asteen tarkkuuden vaihesäädön ja sitten amplitudin sekä vaiheen hienosäädön erillisillä PIN-diodeilla toteutetulla 90-asteen vektorimodulaattorilla. Prototyypin itseishäiriön vaimennus on luokkaa 40–50 dB.



**Kuva 6.** IBFD-radion itseishäiriötä vaimentavan antennin konsepti UHF-taajuusalueelle ja antennien välinen passiivinen eristys. (Kuva: Mikko Heino/Tampereen yliopisto)



**Kuva 7.** IBFD-radion itseishäiriön vaimentimen prototyyppi UHF-taajuusalueelle<sup>5</sup>. (Kuva: Miika Vuorenmaa/Tampereen yliopisto)

Digitaaliset itseishäiriönvaimennusalgoritmit eivät juurikaan ole toimintataajuudesta riippuvia, joten antennieristyksen ja analogisen vaimentamisen jälkeen digitaalinen signaalinkäsittely lopun itseishäiriön vaimentamiseksi voidaan suorittaa IBFD-kirjallisuudesta löytyvin menetelmin. Mittausten ja laskennallisen analyysin avulla on jo nyt demonstroitu, että vaimenninta ja suunniteltua antennia käyttäen sotilaallinen IBFD-radio voi esimerkiksi lähettää häirintäsignaalia 100 W teholla, ja samaan aikaan kykenee tiedustelemaan 10 kilometrin päästä 5 W teholla lähetettyä signaalia.



### Markkinoille 2030-luvulla?

Tammikuussa vuonna 2021 uutisoitiin<sup>10</sup>, että yhdysvaltalaisen TrellisWare Technologies yhtiön johtama monitoimittajatiimi oli onnistuneesti demonstroinut IBFD-radiolla 200 Mbps tiedonsiirtoyhteyttä. Heidän SF-STAR-termillä markkinoimansa IBFD-prototyypiradio kehitettiin ja sitä demonstroititiin Yhdysvaltojen maavoimien Military Full Duplex Radio (MFDR) -ohjelmassa. Prototyypin kehittämiseen tähdännyt sopimus allekirjoitettiin vuonna 2017 ja se oli arvoltaan 15,7 miljoonaa dollaria, johon verrattuna Suomessa on vain parin–kolmen prosentin tutkimusrahoituksella saatu aikaan aivan huikeita tuloksia. Äkillinen kaupallisten langattomien tiedonsiirtopalveluiden kasvu on luonut painetta myös Yhdysvaltojen puolustushallinnolle poistua tai jakaa spektriä taajuusalueilta, jotka ovat varattuna taktisille radiojärjestelmille. IBFD-radiolla voidaan siirtää suurempi määrä dataa samalla kaistanleveydellä tai sama määrä dataa pienemmällä kaistanleveydellä kuin perinteisillä radioilla, mikä osaltaan helpottaa spektrin niukkuuden haastetta. Prototyyppi soveltuu suurinopeuksiseen tiedonsiirtoon sekä kaupallisissa että sotilaallisissa järjestelmissä.

SF-STAR-radio kehitettiin tasolle TRL-6 ja se tukee taajuusalueita UHF-kaistalta S-kaistalle. Vastaanottimen herkkyyden kerrotaan olevan vähintään yhtä hyvä tai parempi kuin perinteisissä radioissa. TrellisWaren kehittynyt häiriönvaimennusteknologia mahdollistaa 50 W:n lähetystehon samaan aikaan kun vastaanotetaan kaukaa lähetettyä signaalia, joka voi olla 130 dB heikompi kuin lähetetty signaali. Seuraavaksi lähivuosien tavoitteeksi TrellisWare on asettanut 1 Gbps tiedonsiirtoyhteyden mahdollistamisen.

Äsken mainittua prototyyppiprojektia referenssinä käyttäen voidaan arvioida, että IBFD-radioita voisi tulla sotilasradiomarkkinoille 2030-luvulla, ehkä jo kuluvaan vuosikymmenen lopulla. Paljon riippuu myös siitä, lähteekö suomalainen puolustusteollisuus kaupallistamaan konseptia täällä tieteessä ja tutkimuksessa hankitusta vankasta johtoasemasta eteenpäin.

Mobiiliverkkojen standardoinnista vastaava 3GPP-organisaatio julkaisee uusia toiminnallisuuksia iteratiivisesti kullekin standardin sukupolvelle. Nykyisestä viidennen sukupolven (5G) standardista on jo nyt julkaistu kolme versiota (Release 15, Release 16 ja Release 17). Tyypillisesti versioiden julkaisujen välinen aika on noin 1,5–2 vuotta. Ennen kuudennen sukupolven (6G) standardia 5G-standardista on suunniteltu julkaistavan vielä kolme versiota (Release 18, Release 19 ja Release 20), jotka tulevat määrittelemään niin sanotun 5G Advanced -vaiheen. 6G-standardin ensimmäinen versio on suunniteltu julkaistavan 2030-luvun alussa.

Uusien duplex-toiminnallisuuksien soveltamista 5G/6G-verkoissa aletaan tutkia Release 18 -versiossa, johon liittyvä työ on käynnistynyt vuonna 2022. Tavoitteena on identifioida ja evaluoida potentiaalisia keinoja kehittää dupleksointia 5G NR TDD (New Radio, Time-Division Duplexing) -spektrissä. Ensimmäiset full duplex -toiminnallisuudet sisällytetään kuitenkin vasta Release 19:ään ja sitä seuraaviin versioihin. Yksi ensimmäisistä toiminnallisuuksista tällä kehityspolulla on Sub-Band Non-overlapping Full Duplex (SBFD), joka toteutetaan vain verkon tukiasemaradiossa eikä lainkaan verkon käyttäjän päätelaitteissa. Aidossa IBFD-radiossa lähetys- ja vastaanottosignaali lomittuvat koko käytettävissä olevalle taajuuskaistalle (kuva 1). SBFD-tukiasemassa esimerkiksi

kokonaiskaistan ollessa 100 MHz, downlink voisi käyttää 2x40 MHz ja uplink 20 MHz taajuuskaistaa. Käyttämällä IBFD-radion vaimennustekniikoita voidaan toteuttaa ”vanhanajan” FDD-duplex-suodatin ilman suojakaistaa.<sup>11 12</sup>

Kehityspolulla eteenpäin mentäessä 6G-standardin tavoitteena on toteuttaa myös aito IBFD, josta 3GPP käyttää nimitystä Single-Frequency Full-Duplex (SFFD), ja myös tätä tekniikkaa voitaneen myöhemmin soveltaa tulevaisuissa 6G-verkoissa. Suuren mielenkiinnon kohteena on ollut myös niin sanottu ”5G/6G full-duplex MIMO”, jossa tavoitteena on saavuttaa jo etenemistiellä ennen radiovastaanotinta voimakkaasti suuntaavia MIMO-antenneja käyttäen spatiaalisesti suuri vaimennus lähetys- ja vastaanottosignaalin välillä. Laboratoriomittauksissa on saavutettu millimetriaaltoalueella jo 80–90 dB isoalaatio lähetin- ja vastaanotinpaneelin välillä.<sup>12 13</sup>

Mutta miksi siis SBFD- ja 5G/6G full-duplex MIMO -tekniikat kiinnostavat 5G/6G-tekniikoiden kehittämisen 3GPP-organisaatiota? Selkeä syy on tehokkaampi spektrinkäyttö, suuri askel kohti hyvin pienen viiveen samanaikaista lähetystä ja vastaanottoa, mutta myös se, että nämä tekniikat voivat toimia rinnan aikaisempien tukiasematekniikoiden kanssa. Päätelaitteena olla voi periaatteessa perinteinen päätelaite ilman IBFD-toteutusta.

### Alustava arvio IBFD-radioiden käyttöönnotosta ja hyödyistä

IBFD-radio voidaan nähdä ohjelmistoradion toteutuksen uutena hardware-sukupolvena, jolla voidaan saavuttaa uusia kyvykkyyksiä ja uutta suorituskykyä taistelukentällä. IBFD-radion käyttöönnottoa tiedonsiirron käyttötapauksessa hidastavat perinteisten sotilasradioiden suuri määrä ja niiden todella pitkät linkkaaret. Niin ikään ohjelmistoradioissa ajettavien elektronisen sodankäynnin uhkakuvien pohjalta kehitettyjen aaltomuotojen linkkaaret ovat pitkiä. IBFD-radiot arveltiin otettavan käyttöön jo kaupallisissa 5G-tukiasemissa, mutta käyttöönotto on siirtymässä seuraavaan 6G-sukupolveen. Joka tapauksessa kaupallisen sektorin kehitys antaa yleisesti ottaen lisäpotkua IBFD-tekniikan kehitykseen.

Aikaa siis kuluu ennen kuin siirrytään massamaisesti IBFD-tekniikan käyttämiseen sotilasradioissa. Ennen kuin teknologia integroidaan osaksi jokaista sotilasradiota, sitä voitaisiin hyvin todennäköisesti soveltaa yksittäisissä käyttötapauksissa esimerkiksi tekniikkana, jolla voitaisiin lievittää viestijoneuvojen eri radioverkkojen välistä keskinäishäiriötä. Toinen aiemmin mainittu käyttötapausmerkki oli erillislaite, joka mahdollistaa ajoneuvosaattueen samanaikaisen radioliikenteen ja RC-ohjattujen tienvarsipommien ja droonien ohjauksen eston peittohäirinnällä.

IBFD-radiotekniikan käyttö elektronisessa sodankäynnissä voi tehostaa häirintää ja säästää resursseja, jos esimerkiksi IST-175-ryhmän ehdotuksen mukaisesti hylättäisiin erillinen kaukovaikutteinen häirintä ja häirintä toteutettaisiin paikallisesti yhdistettynä radiotiedonsiirtoon. Tänä päivänä tyypillisesti häirinnän vaikutusten arviointi vaatii häirintälähteen keskeyttämistä, tai erillisen elektronisen tiedusteluaseman käyttöä. IBFD-radiotekniikalla voidaan samanaikaisesti häiritä ja havainnoida tapahtuuko kohdejärjestelmän spektrinkäytössä muutoksia. Korkealentoisessa

<sup>10</sup> Business Wire, 21.1.2021, *TrellisWare Demonstrated Full Duplex Radio Capable of 200 Mbps Throughput Developed Under U.S. Army Program*. [Online], [Viitattu 31.1.2023]. Saatavissa: <https://www.businesswire.com/news/home/20210121005173/en/TrellisWare-Demonstrated-Full-Duplex-Radio-Capable-of-200-Mbps-Throughput-Developed-Under-U.S.-Army-Program>

<sup>11</sup> 3GPP, November 2022, draft version 0.1.0, *3GPP TR 38.858 Study on Evolution of NR Duplex Operation*.

<sup>12</sup> Qualcomm, January 2022, *Setting off the 5G Advanced evolution*, [Online], [Viitattu 31.1.2023]. Saatavissa: [https://www.qualcomm.com/content/dam/qcomm-martech/dm-assets/documents/setting\\_off\\_the\\_5g\\_advanced\\_evolution\\_web.pdf](https://www.qualcomm.com/content/dam/qcomm-martech/dm-assets/documents/setting_off_the_5g_advanced_evolution_web.pdf)

<sup>13</sup> Qualcomm, November 2022, *Why and what you need to know about 6G in 2022*, [Online], [Viitattu 31.1.2023]. Saatavissa: <https://www.qualcomm.com/content/dam/qcomm-martech/dm-assets/documents/web-why-and-what-you-need-to-know-about-6G-in-2022.pdf>



visiossa joka ikinen kenttäradio voisi osallistua elektronisen sodankäynnin operaatioihin silloin kun sillä on resursseja vapaana.

IBFD-radio tuo uutta, jopa mullistavaa, suorituskykyä niin radiotiedonsiirtoon kuin elektroniseen sodankäyntiin. Tässä artikkelissa esitettyä uutta suorituskykyä ei voida saavuttaa perinteisillä sotilasradioaalto-tyypeillä, vaan aaltomuotojen suunnittelu ja toteutus on tehtävä täysin uudelta pohjalta. Jos IBFD on SDR-radion seuraavan sukupolven ominaisuus, myös uudessa radiossa ajettava aaltomuoto pitää kehittää uudeksi versioksi, ja ottaa käyttöön uuden sukupolven radion mahdollistama uusi suorituskyky digitaalisella taistelukentällä.

### Lisätietoja

*DI, Heikki Rantanen (p. 0299 800) on Puolustusvoimien tutkimuslaitoksen Informaatiotekniikkaosaston erikoistutkija.*

*DI, Sami Peltotalo (p. 0299 800) on Puolustusvoimien tutkimuslaitoksen Informaatiotekniikkaosaston vanhempi tutkija.*