



Flexibel frekvensanvändning för Försvarmaktens radiosystem

Omvärldsbevakning

PATRIK ELIARDSSON, ERIK AXELL,
KRISTOFFER HÄGGLUND OCH GUNNAR BARK

Patrik Eliardsson, Erik Axell, Kristoffer Hägglund
och Gunnar Bark

FOI-R--5601--SE

Flexibel frekvensanvändning för Försvarsmaktens radiosystem

Omvärldsbevakning

| | |
|--------------------|---|
| Titel | Flexibel frekvensanvändning för Försvarsmaktens radiosystem – Omvärldsbevakning |
| Engelsk titel | Flexible frequency use for the Armed Forces' radio system – Literature review |
| Rapportnr | FOI-R--5601--SE |
| Månad | April / April |
| Utgivningsår | 2024 |
| Antal sidor | 32 |
| ISSN | 1650-1942 |
| Uppdragsgivare | FM |
| Forskningsområde | Ledningsteknologi |
| FoT område | Ledning och MSI |
| Projektnr | E51543 |
| Godkänd av | Mattias Verona |
| Ansvarig avdelning | Telekrig |
| Exportkontroll | Innehållet är granskat och omfattar ingen information som är underställd exportkontrollagstiftningen. |

Detta verk är skyddat enligt lagen (1960:729) om upphovsrätt till litterära och konstnärliga verk, vilket bl.a. innebär att citering är tillåten i enlighet med vad som anges i 22 § i nämnd lag. För att använda verket på ett sätt som inte medges direkt av svensk lag krävs särskild överenskommelse.

This work is protected by the Swedish Act on Copyright in Literary and Artistic Works (1960:729). Citation is permitted in accordance with article 22 in said act. Any form of use that goes beyond what is permitted by Swedish copyright law, requires the written permission of FOI.

Sammanfattning

Försvarmaktens tillgång till adekvat frekvensspektrum är vital för ett fungerande radiosamband och ledningsförmågan. Frekvensspektrumet är begränsat och konkurrensutsatt av kommersiella intressen vilket begränsar Försvarmaktens exklusiva tillgång till frekvensspektrum. Med en större Försvarmakt ökar också sambandsbehoven och därmed behovet av frekvensspektrum. Syftet med denna rapport är att öka kunskapen om tekniker som används i trådlösa kommunikationssystem för att nyttja frekvensspektrumet flexibelt. Målet är att presentera tekniker som medger flexibilitet med avseende på hur frekvensspektrumet används av trådlösa kommunikationssystem samt vilka utmaningar som finns för att använda sådana tekniker i militära radiosystem.

Omvärldsbevakningen baseras på öppna källor såsom artiklar från vetenskapliga tidskrifter och standarder för trådlösa kommunikationssystem. Omfattningen av den civila forskningen inom området är stor. Därför är inte en fullständig omvärldsbevakning realistisk utan delar som vi funnit relevanta presenteras.

Under de senaste åren har maskininlärning används i större grad än tidigare i forskningen för att lösa problem inom området. En trend är multifunktionssystem, dvs. radiosystem som har andra funktioner än att enbart kommunicera, exempelvis radar, störsändning eller signalspaning, vilket är relativt nytt och av intresse. Det finns två standarder för delning av frekvensspektrumet, CBRS i USA och LSA i Europa. Inom mobilsystem finns ett flertal tekniker för att hantera frekvensspektrumet flexibelt för att öka dataakten för användarna.

Fundamentala skillnader mellan civila trådlösa kommunikationssystem och militära taktiska radiosystem existerar, vilket påverkar förutsättningarna för flexibel frekvensanvändning. Exempelvis är civila system ofta centraliserade och standardiserade medan militära system är decentraliserade och sällan standardiserade. Ett första steg för Försvarmakten är att utöka delningen inom det frekvensspektrum som är exklusivt tilldelat Försvarmakten. Befintliga taktiska radiosystem har begränsade möjligheter till att göra det automatiskt, därför krävs manuella metoder och på sikt att nya radiosystem krävs att hantera delning av frekvensspektrum.

Nyckelord: spektrum, frekvens, spektrumdelning, DSM, radio, CBRS, LSA

Summary

The Armed Forces' access to adequate frequency spectrum is vital for functioning radio networks and the command and control capability. The frequency spectrum is limited and subject to competition from commercial interests, which limits the Armed Forces' exclusive access to frequency spectrum. With the growth of the Armed Forces, the communication demands increase and thus access to frequency spectrum increases. The purpose of this report is to increase the knowledge of techniques used in wireless communication systems for flexible spectrum use. The aim is to present techniques that allow flexibility in the way the frequency spectrum is used by wireless communication systems and challenges of using such technologies in military radio systems.

The survey is based on open sources such as articles from scientific journals and standards for wireless communication systems. The scope of civilian research in this area is extensive, so a complete survey is not realistic, but parts that we have found relevant are presented.

Research in this field has increasingly utilized machine learning to solve these problems in recent years. One trend is multi-functional systems, that is radio-systems with additional functions other than communication, for example radar applications, jamming or signal intelligence. There are two standards, CBRS in the US and LSA in Europe, for sharing of the frequency spectrum. In cellular systems, there are several techniques to manage the frequency spectrum flexibly to increase data rates for the user.

Fundamental differences between civilian communication systems and military tactical radio systems exist, for example, the civilian systems are often centralized and standardized while military systems are decentralized and rarely standardized, which affect the conditions for flexible frequency use. The initial step for the Armed Forces is to broaden the sharing of the frequency spectrum that is exclusively allocated to them. Current tactical radio systems have limited automatic capabilities, so manual methods are necessary. In the long term, new radio systems will be required to have the capability to share spectrum.

Keywords: spectrum, frequency, spectrum sharing, DSM, radio, CBRS, LSA

Innehåll

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Inledning | 6 |
| | 1.1 Mål och syfte | 6 |
| | 1.2 Metod | 6 |
| | 1.3 Läsanvisningar | 6 |
| 2 | Bakgrund | 8 |
| 3 | Forskning och teknikutveckling | 11 |
| | 3.1 Nato | 12 |
| | 3.2 Radiosystem med multifunktionalitet | 14 |
| 4 | Standarder | 16 |
| | 4.1 Licensed shared access | 16 |
| | 4.2 Citizen broadband radio service | 17 |
| | 4.3 Frekvenstilldelning i mobilsystem | 19 |
| | 4.4 Modellering av spektrumanvändning | 22 |
| 5 | Diskussion | 24 |
| 6 | Slutsatser | 27 |
| | Referenser | 32 |

1 Inledning

Tillgängligt frekvensspektrum för radiosamband är en begränsad och vital resurs. Med en växande Försvarsmakt kommer sambandsbehoven öka, samt att datamängden från sensorer som ska överföras trådlöst via radiosystemen också kommer öka. Frekvensspektrumet är dessutom konkurrensutsatt av kommersiella intressen. Detta sammantaget gör att frekvensspektrumet behöver användas effektivt för att tillgodose ökande behov.

Det är inte enbart tillgång till en viss total bandbredd som är nödvändig för militära system. Genom att välja olika frekvensområden kan specifika vågutbredningsegenskaper utnyttjas för att erhålla exempelvis kort- eller långräckviddig kommunikation, vilket ger taktiska och strategiska fördelar. Detta gör att specifika frekvensområden måste kunna användas av Försvarsmakten, vilket omfattar ett stort frekvensomfång från tiotals kilohertz till hundratals gigahertz.

1.1 Mål och syfte

Syftet med denna rapport är att öka kunskapen om tekniker som används i trådlösa kommunikationssystem för att utnyttja frekvensspektrumet flexibelt. Detta genom en omvärldsbevakning avseende forskning och teknikutveckling relaterat till frekvensanvändning inom trådlös kommunikation samt att undersöka civila standarder för trådlösa kommunikationssystem.

Målet är att presentera tekniker som medger flexibilitet med avseende på hur frekvensspektrumet används av trådlösa kommunikationssystem samt vilka utmaningar som finns för att använda sådana tekniker i militära radiosystem. Vidare kan dessa tekniker vara en lösning för hur utnyttjandet av frekvensspektrumet ska bli mer effektiv.

1.2 Metod

Omvärldsbevakningen omfattar teknikområden som adresserar hur frekvenser används eller hanteras av trådlösa kommunikationssystem. I omvärldsbevakningen har öppna källor använts som artiklar från vetenskapliga tidskrifter och konferenser, men även standarder för trådlösa kommunikationssystem. Relevanta militära forskningsprogram inom DARPA¹ och Nato STO² som tillkommit sedan den genomförda omvärldsanalysen 2020 [1] har inkluderats.

Omfattningen av den civila forskningen som bedrivs inom området är stor. Därför är det inte realistiskt att genomföra en fullständig omvärldsbevakning utan de delar vi funnit som relevanta presenteras, vilket huvudsakligen innefattar högt citerade översiktsartiklar som är publicerade under de senaste fem åren.

1.3 Läsanvisningar

I kapitel 2 ges en bakgrund till delning av frekvensspektrumet. Olika principer för delning av frekvensspektrum och hur harmoniseringen av frekvensspektrumet har förändrats över tiden redovisas. I kapitel 3 presenteras forskning och teknikutveckling som har skett inom området de senaste åren.

¹Defense Advanced Research Projects Agency

²Science and Technology Organization

I standarder för trådlösa kommunikationssystem finns tekniker som medger flexibilitet och delning av frekvensspektrumet vilket beskrivs i kapitel 4. Kapitel 5 diskuterar skillnaden mellan civila och militära radiosystem och ger en förklaring till varför dessa skillnader finns, samt vilka förutsättningar det ger för flexibel frekvensanvändning. Slutligen, presenterar kapitel 6 slutsatserna från omvärldsbevakningen.

2 Bakgrund

Sedan internationella teleunionen (ITU) bildades i början av 1900-talet har dess syfte varit att harmonisera frekvensspektrumet över nationsgränser. Hanteringen av frekvensspektrumet har förändrats genom åren och kan delas in i tre generationer: administrativ, marknadsstyrande och teknikdriven [2]. Ingen av dessa generationer har ersatt den föregående utan nästa generation har istället försökt anpassa sig och komplettera föregående generation. ITU är idag ett FN-organ som administrativt via världsradiokonferensen (WRC) harmoniserar frekvensspektrumet över nationsgränserna. WRC inträffar ungefär var fjärde år. Delar av frekvensspektrumet allokteras för tjänster som medger att vardera nation tillåts sälja rättigheterna till en specifik del av frekvensspektrumet under begränsad tid till marknadspriser, ofta via spektrumauktioner. Den administrativa och marknadsstyrande hanteringen av frekvenser har existerat sedan 1990-talet.

Efter att begreppet kognitiv radio myntades på 1990-talet har det tredje, teknikdrivna, sättet att hantera frekvenser utvecklats under 2000-talet. Det teknikdrivna angreppssättet syftar till att med tekniska lösningar låna, återanvända eller utnyttja en del av frekvensspektrumet som för tillfället inte används. 2012 förordar Europeiska kommissionen att tekniker, metoder och standarder ska utvecklas för delning av frekvensspektrumet för att effektivisera användningen av frekvensspektrumet [3]. I USA har diskussioner om spektrumdelning pågått sedan 2004 då US Department of Commerce i en rapport konstaterar att National Telecommunications and Information Administration (NTIA) i samarbete med Federal Communications Commission (FCC) ska ta fram en plan och därefter starta ett pilotprogram för ökad spektrumdelning mellan federala och icke-federal användare [4, 5].

Det finns flera principer för hur frekvensspektrum kan delas mellan användare och system (figur 1). De olika paradigmen för spektrumdelning kan kortfattat beskrivas enligt följande:

Underliggande Användare tillåts kommunicera om det inte försämrar kommunikationsprestanda för andra användare.

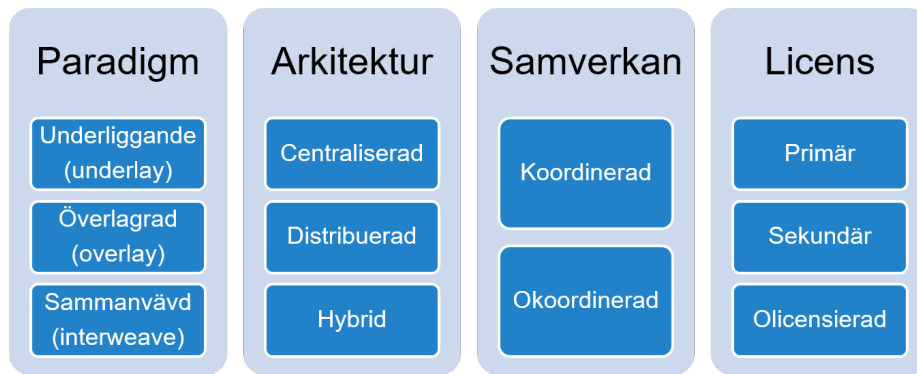
Överlagrad Användare tillåts kommunicera samtidigt som andra användare genom att samtidigt bidra till att kommunikationen inte försämras för de andra användarna, exempelvis genom att också agera relä.

Sammanvävd Användare utnyttjar lediga radioresurser, så kallade spektrumhål, som inte används av andra användare.

Utförligare beskrivningar av de olika paradigmen finns i [1].

Arkitekturen för hur kontroll och styrning av spektrumanvändning görs kan vara centraliserad, distribuerad eller en hybrid av dessa. Centraliserad arkitektur innebär att en central nod fattar beslut om spektrumnyttjande för användare i systemet. Distribuerad arkitektur innebär att besluten fattas hos enskilda användare eller delsystem. Hybridarkitektur är en kombination av centraliserad och distribuerad arkitektur, vilket kan innebära exempelvis att styrning görs centraliserat på en långsam tidskala och att snabbare beslut fattas distribuerat.

Användare kan samverka koordinerat för att fatta beslut om hur spektrumanvändningen fördelas, eller nyttja frekvensspektrumet helt okoordinerat.

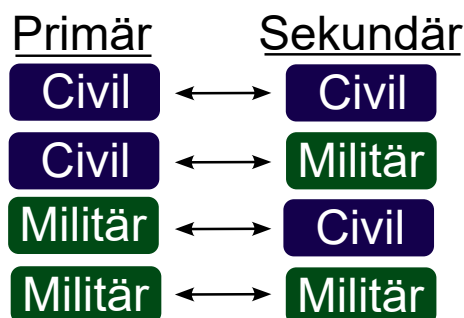


Figur 1: Principer för spektrumdelning.

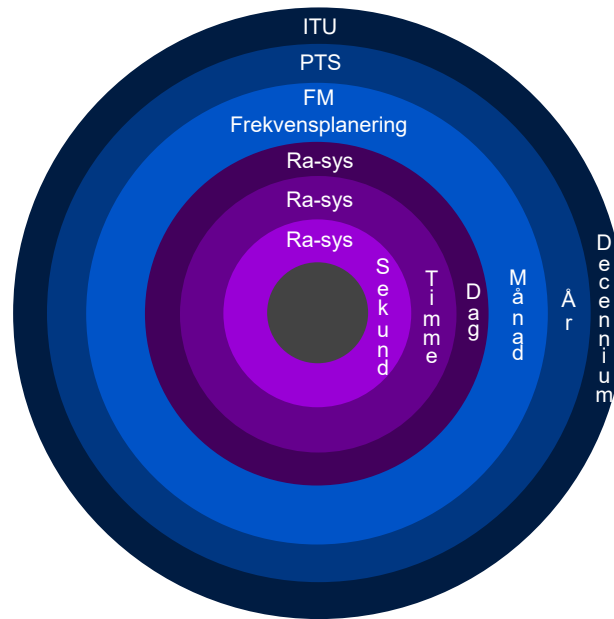
Det finns också olika varianter av licensiering som påverkar spektrumdelning. Primär användare är den som har prioritet till ett visst frekvensspektrum. Sekundär användare är den som kan använda frekvensspektrum under förutsättning att det inte påverkar primära användare mer än vad som är acceptabelt. Det kan även finnas fler än två prioriteringsnivåer av användare. Olicensierad användning innebär att alla användare har samma rätt att använda (olicensierat) frekvensspektrum på lika villkor och, oftast, med vissa krav för att minska interferens mellan användare, exempelvis begränsning av sändareffekt.

Användarna av frekvensspektrumet kan delas in i civil- och militäranvändare, där militäranvändare avser Försvarsmaktssystem som använder frekvensspektrumet. Figur 2 visar olika kombinationer av hur frekvensspektrumet kan delas, enligt ovan beskrivna principer, mellan dessa användarkategorier.

Allokeringen av frekvensspektrum kan förändras med olika tidsintervall (figur 3). Genom den harmonisering som sker av ITU tar förändringar i frekvensallokering flera år eller decennier [6]. Vid dynamisk spektrumaccess hanteras frekvensskiften ned till enstaka tidluckor, dvs. i storleksordningen millisekunder. Vilket tidsperspektiv som egentligen avses med dynamisk spektrumhantering är alltså inte entydigt bestämt. För att nyttja Försvarsmaktens tillgängliga frekvensspektrum mer effektivt krävs ökad flexibilitet, dvs. snabbare förändringar av frekvensanvändningen, än vad som är fallet idag. I praktiken innebär det ett behov av att utveckla tekniker och metoder för att kunna förändra frekvensplaner i Försvarsmaktens radiosystem inom sekunder, minuter eller i vissa fall timmar istället för veckor eller månader.



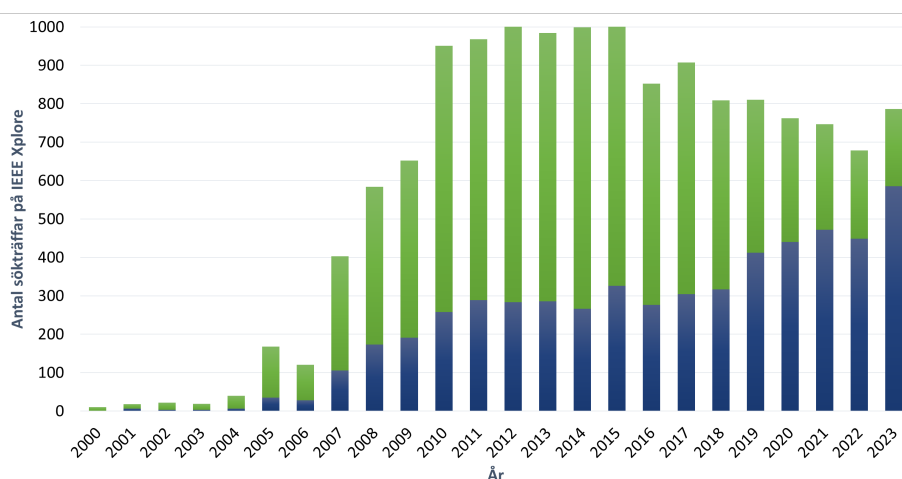
Figur 2: Delning mellan olika användarkategorier.



Figur 3: Olika tidsperspektiv på delning av frekvensspektrum och inom vilket system delningen sker.

3 Forskning och teknikutveckling

En övervägande majoritet av vetenskapliga publikationer om dynamisk spektrumhantering (eng. dynamic spectrum management, DSM) och kognitiv radio under de senaste åren utnyttjar maskininlärning för att lösa problemen, (figur 4). Detta avsnitt handlar därför till stor del om olika sätt att använda maskininlärning för DSM. Översikten fokuserar på tekniker som vi bedömt mest relevanta för militär trådlös kommunikation, såsom robusthet mot störning och distribuerade lösningar för mobila ad hoc-nät.



Figur 4: Antal sökträffar per år på IEEE Xplore med sökorden "dynamic spectrum". De blå staplarna visar andelen av dessa som dessutom innehåller begreppen "AI" eller "learning".

I [7, 8] presenteras tekniker för DSM med skydd mot störning. Artiklarna beskriver översiktligt tidigare angreppssätt där matematisk spelteori och Markov-beslutsprocesser har använts för att ta beslut om frekvensval i en duell mellan kommunicerande noder och störsändare. Stor del av den vetenskapliga litteraturen behandlar inte risken för fiendlig störning i samband med DSM. De senaste åren har studier gjorts för att hantera fiendlig störning i DSM-system med maskininlärning och mer specifikt med så kallad djup förstärkningsinlärning (eng. deep reinforcement learning) [9]. För att kunna nyttja DSM och garantera robust kommunikation i militära system måste hänsyn tas till störhot. Därför är denna typ av forskning av särskilt intresse för utveckling och studier av militär trådlös kommunikation. I [7, 8] beskrivs utmaningar och möjligheter med störskyddstekniker för DSM. En slutsats är att en algoritm kan tränas för att ta optimala beslut. Detta gäller dock under vissa idealiserade förutsättningar, exempelvis att störsändningar sker stationärt enligt samma strategi över tid, att återkoppling till beslutsprocessen sker felfritt och med tillräcklig dataakt samt att algoritmen kan tränas över relativt lång tid med en stor mängd data. För att överkomma dessa utmaningar och kunna nyttja liknande teknik i operativ tillämpning krävs ytterligare forskning inom detta område.

Flertalet studier av dynamisk frekvensallokering och andra typer av radioresursallokering under de senaste fem åren är baserade på djup förstärkningsinlärning [10–19]. Att dynamiskt tilldela frekvenser i givna tidsintervall till användare är ett kombinatoriskt problem som snabbt växer i beräkningskomplexitet med antal användare och tillgängliga frekvenser. Om frekvensallokeringen dessutom ska göras decentraliserat tillkommer ytterligare utmaningar på grund av att användare har olika uppfattning om

sin omgivning, exempelvis om andra användares eller andra systems frekvensutnyttjande och kommunikationsbehov. Dessutom kan användare och system agera på olika sätt med avseende på samarbete och hänsynstagande till andra system och användare i samma frekvensspektrum. Förstärkningsinlärning är en teknik som har visats fungera bra för att lösa denna typ av problem med målet att hitta bättre lösningar för att allokera radioresurser.

I [15] studeras underliggande spektrumdelning, dvs. att användare tillåts kommunicera om det inte försämrar prestanda för högre prioriterade användare. I detta fall innebär underliggande spektrumdelning att två noder (sekundära användare) kommunicerar direkt med varandra på kort avstånd i samma spektrum som ett cellulärt system (primär användare). Den algoritm som föreslås i [15] för att dynamiskt allokera frekvensspektrum är baserad på förstärkningsinlärning som tränas centraliserat men exekveras distribuerat. Den föreslagna algoritmen tränas baserat på historisk information om användares beslut och tillstånd, men kräver ingen informationsöverföring mellan användare i exekveringsfasen.

En utmaning med förstärkningsinlärning är förmågan att generalisera lösningen till radionät av olika storlek och arkitektur. Många lösningar fungerar bra för det radionät de har tränats på, men fungerar sämre om systemparametrarna ändras. Detta studeras bland annat i [16] för samtidig frekvensallokering och effekttreglering i ett CDMA¹-system. Dessutom behandlas tålighet mot störning genom både träning och utvärdering med en fiendlig störare. Störaren antas i detta fall sända på en kanal och slumpvis byta frekvens med en viss period.

En teknik som diskuteras inom utvecklingen av sjätte generationens mobiltelefoni (6G) för att öka spektraleffektiviteten är indexmodulation (IM). Via IM är det möjligt att överföra information genom att indexera kanalresurser i exempelvis tid eller frekvens, istället för signalens amplitud eller fas för att bära data. På så sätt är det möjligt att överföra information utan att emittera effekt vid vissa tidpunkter eller frekvenser, och istället låta avsaknaden av effekt motsvara informationen [20]. Inom 6G hypotiseras det att IM kan bidra till effektivare användning av frekvensspektrum genom att bland annat utnyttja mindre bandbredd för sändning, exempelvis genom OFDM-IM där IM appliceras i frekvensdomän på OFDM-symboler, men även genom mer flexibel hantering av spektrum där tilldelning av indexpositioner kan anpassas dynamiskt efter krav och rådande belastningsförhållanden [21, 22]. IM diskuterades även som en kandidat inför standardiseringen av 5G [20, 23], men fanns inte med i den slutgiltiga standarden. Det är inte helt klart huruvida IM kommer spela in i 6G-standarderna men fördelarna med effektivare användning av spektrum gör det till en attraktiv kandidat för forskning och utveckling inom området [24, 25].

3.1 Nato

Inom Nato pågår arbeten med att införa dynamisk spektrumhantering, syftet är att effektivisera användningen av det elektromagnetiska spektrumet och utöka delningen av spektrum mellan militära enheter samt mellan militära och civila användare [26]. Frekvenshanteringen inom Nato sker idag i huvudsak manuellt. Till hjälp har de olika databaser och system för att utbyta information mellan nationerna, men informationen och planeringen hanteras manuellt.

¹Code Division Multiple Access

Nuvarande ramverk för frekvenshantering begränsar Natos förmåga till effektiv och ändamålsenlig användning av frekvensspektrumet. Med verktyget SMIROnline kan det ta upp till dagar eller veckor att tilldela frekvenser. En fallstudie av CBRIS (CBRS beskrivs i avsnitt 4.2) har genomförts för att undersöka möjligheterna till att använda denna standard för att förbättra frekvenshanteringen inom Nato. Slutsatserna i [26] är att Nato ska skapa en vision och mål som stödjer implementering av DSM, utveckla befintliga verktyg för att underlätta en mer dynamisk hantering av frekvenser, utforska operationella scenarios där DSM-lösningar kan introduceras samt definiera krav för skalbara DSM-lösningar och slutligen implementera och skala upp användningen av DSM.

Nato-projektet IST²-146 *Electromagnetic Environment Situational Awareness* syftade till att utvärdera de operativa fördelarna för Nato i linje med den elektromagnetiska spektrumstrategin samt utvärdera tekniken *Radio Environmental Map* (REM). Arbetet inom IST-146 bedrevs av RTG³-069 som avslutade sitt arbete i november 2020. Syftet med REM är att skapa en detaljerad kartläggning av det elektromagnetiska spektrumets användning i en given region. REM samlar in data om spektrumaktivitet från olika källor, som sensorer, mottagare och andra enheter, för att bygga upp en helhetsbild över den elektromagnetiska miljön. REM ska sedan kunna integreras i olika försvarsapplikationer för att underlätta planering, övervakning och styrning av trådlösa kommunikationssystem och andra elektromagnetiska system. REM förser applikationerna med realtidsinformation över spektralmiljön så att spektrumresurser kan frekvensplaneras. Ett förslag på arkitektur för REM samt hur REM kan utnyttjas operativt är framtaget av RTG-069 [27]. Ett fiktivt scenario bestående av tolv vinjetter med ett antal olika sensorer placerade i ett 4 km² stort område har utarbetats [28, 29].

Vinjetterna inkluderade tolv identifierade operationer som REM ska kunna nyttjas inom. En typisk operation kan omfatta generell frekvensplanering och samexistens i spektrum, men också mer specificerade scenarier, som hantering av egen störkälla, eller hur en UAS (*unmanned aerial system*) ska planeras för ett uppdrag där det krävs ett frekvensbyte vid passering av landsgräns. I [27] fokuseras det mer på hur sensorerna ska placeras, samt hur många som behöver användas för att bygga upp en tillräckligt detaljerad spektrumkarta. Fyra interpolationsmetoder för hur information från sensorerna kan grupperas utvärderas och resultatet visar på att fler sensorer ökar kvaliteten av spektrumkartan.

Relaterat till arbetet inom IST-146 har en annan forskargrupp skapat ett system med maskininlärning som visar överlagrat på en karta om frekvensen är ledig eller ej [30]. Indata till systemet är effektmätningar från flertalet sensorer som är geografisk utspridda. Det tränade maskininlärda systemet är robust mot variationer i antalet sensorer och emitterar och deras placering. Saker som de ej omhändertog är fädning av signalen samt imperfektioner i sensorerna.

²Information Systems Technology

³Research Task Group

Allt frekvensspektrum för VHF samt UHF är i princip allokerat idag, vilket har väckt intresset att undersöka lämpligheten hos högre frekvenser (exempelvis på EHF- och THF-banden) för trådlös kommunikation. Nato-aktiviteten IST-181 *Terahertz-band communications and networking* fokuserar på kommunikation i THF-bandet (100 GHz – 10 THz) för att undvika de traditionella, fullbelagda lägre frekvenserna [31].

In-Band Full Duplex (IBFD), dvs. samtidig sändning och mottagning på samma frekvens, sägs kunna ge fördelar för dynamisk spektrumhantering [32]. Dessa fördelar kommer av mer effektivt spektrumutnyttjande samt minskad risk för kollisioner och interferens med andra spektrumanvändare. Detta gäller under förutsättning att IBFD faktiskt fungerar tillräckligt bra, t.ex. avseende förmågan att undertrycka självinterferens [33].

FOI har deltagit i Nato IST-175-RTG *Full Duplex Radio Technology for Military Applications* under 2019-2023. Inom detta samarbete studerades IBFD för militära tillämpningar, exempelvis avseende dynamisk spektrumhantering, undertryckning av självinterferens i UHF-området, frekvenshopp, multifunktionsradio, utombandsinterferens och telekrigstillämpningar [33–35]. Inom IST-175 var två scenarier i fokus, ett för kommunikation kring 300 MHz samt ett för telekrig med samtidig bredbandig störning och mottagning av en motståndares kommunikationssignal. För båda dessa scenarier utvecklades demonstratorsystem.

Kommunikationsdemonstratorn utvecklades för att visa talkommunikation med Nato *Narrowband Waveform*, utökad med full duplex-förmåga, vid 300 MHz. Utmaningen med arbetet var framförallt att utveckla teknik för undertryckning av självinterferens vid 300 MHz, vilket gjordes både analogt och digitalt.

Telekrigsdemonstratorn utvecklades för att dessutom hantera hög effekt, upp till 100 W, på 5 MHz bandbredd i UHF-området och samtidigt ta emot en smalbandig (100 kHz) signal inom denna 5 MHz-bandbredd. För att åstadkomma detta användes en antenn med hög isolation, vilken utvecklades av en partner inom IST-175, samt analog undertryckning.

Sammantaget visar resultaten från IST-175 att IBFD fungerar konceptuellt, men att det återstår flera utmaningar att lösa för att göra det användbart i operativa system. Dessa utmaningar är exempelvis att uppnå tillräcklig undertryckning av självinterferens och att anpassa undertryckningen dynamiskt när radiokanalen förändras, exempelvis vid byte av frekvens och vid mobilitet.

3.2 Radiosystem med multifunktionalitet

Med begreppet multifunktionalitet i radiosystem syftas det oftast på egenskapen att samtidigt kunna utföra två eller flera funktioner, som kombinationer av kommunikation, avkänning (både spektrummässigt och sensoriskt, dvs. radar), störning eller annan funktionalitet. Möjligheter och begränsningar med multifunktionalitet i radiosystem inom telekrig har undersökts i [36]. En av slutsatserna i rapporten är att många av teknikerna för radiosystem med multifunktionalitet fortfarande befinner sig i ett första stadium rent utvecklingsmässigt och har inte nått den mognadsgrad som krävs för att implementeras fullt ut. Eftersom moderna radiosystem, såväl civila som militära, baseras på mjukvaruradio öppnas dock möjligheten att på sikt implementera multifunktionalitet.

Intresset för system i vilka kommunikation och telekrigsfunktionalitet är integrerat har ökat under den senaste tiden, både i den öppna litteraturen och ur ett militärt perspektiv, där samverkande system med spaning- och störningsförmåga kan leda till nya möjligheter. En annan form av multifunktionalitet är ett frekvensmedvetet radiosystem, som kommunicerar samtidigt som frekvensspektrumet monitoreras för att adaptivt anpassa exempelvis valet av frekvens efter rådande förhållanden. Ett sådant radiosystem är mjukvaruradion THOR från norska Kongsberg [36]. THOR är en taktisk tvåkanalsradio där kanalerna kan användas oberoende av varandra för både tal- och data. Radion stöder många Nato-vågformer, men det är främst den egna smalbandiga och frekvenshoppande EPM⁴-vågformen som marknadsförs i databladet. THOR marknadsförs som en spektrummedveten radio som verkar i VHF och UHF-bandet, 30 MHz till 1 525 MHz, där radion själv påstås kunna navigera och användas i ett hårt ansatt radiospektrum [37]. THOR har köpts in av norska FMA (Forsvarsmateriell) till ett värde av 320 miljoner NOK och är en del av moderniseringen av den norska arméns taktiska radiosystem [38].

Inom arbetsgruppen IEEE 802.11bf undersöks möjligheten att standardisera avkänningstekniker med WiFi. Området kallas för WiFi-sensing och omfattar allt från avkänning i form av radar för smarta hem (i form av avkänning av luftmiljö, övervakning, ljus- och displaykontroll), till mer traditionell sensor- och signalanalys på de licensfria frekvensbanden under 7 GHz (2,4 GHz, 5 GHz, 6 GHz), samt bandet 60 GHz. För de lägre frekvenserna kallas tillägget för *WLAN sensing procedure* och för 60 GHz kallas det *directional multi-Gigabit sensing procedure*. Det är nödvändigt att hålla isär sensing-standarden för dessa frekvensband eftersom vågutbredningsförhållanden och övriga specifikationer för PHY- och MAC-lagren skiljer sig åt väsentligt för låga och höga frekvenser [39]. Arbetsgruppen, som är en del av det större IEEE 802.11-paraplyet som arbetar med den generella WiFi-standarden (IEEE 802.11) fokuserar på att skapa en standard så att WiFi-sensing ska fungera sömlöst för både existerande och kommande enheter. Poängen med avkänning på WiFi-frekvenser är bland annat att kunna mäta upp kanalförhållanden och avgöra om en viss funktion eller egenskap kan användas. Problemen som standarden måste lösa är främst hur själva avkänningen ska kunna genomföras utan att störa den existerande kommunikationen eller hur mängden overhead-data som tillförs av avkänningsalgoritmerna påverkar prestandan [36]. Ratificering av tillägget 802.11bf förväntas ske i september 2024 [39].

Inom forskningen för det som ska bli (6G) studeras hur radiosignalen samtidigt kan användas för andra applikationer än trådlös kommunikation. 6G förväntas nyttja högre frekvenser (från 300 GHz - 3 THz) med större bandbredder än vad som används i 4G och 5G. Detta bidrar att 6G radiosignalen möjligen också kan användas för att exempelvis automatiskt skapa kartor av komplexa inomhusmiljöer, passiv och aktiv avkänning av personer och objekt eller andra radarfunktioner. Högre frekvenser innebär kortare räckvidder och känslighet för interferens [22]. Effektiv och flexibel spektrumhantering är nödvändigt för att garantera robust kommunikation inom 6G, och har identifierats som en av de viktigare utmaningarna för samexistens av smarta tekniker, exempelvis intelligenta hus, bilar, trafik, som ska kommunicera med varandra [40, 41].

⁴Electro Protective Measures

4 Standarder

Detta kapitel beskriver tekniker för dynamisk användning av frekvensspektrum i civila system och standarder.

4.1 Licensed shared access

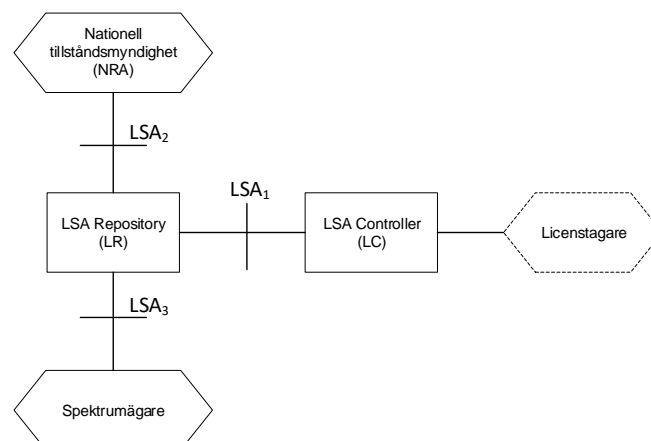
Licensed Shared Access (LSA) är ett europeiskt ramverk för delning av ett givet frekvensspektrum [42, 43]. Sedan 2014, är LSA standardiserat av *European Telecommunications Standards Institute* (ETSI) tekniska kommitté *Reconfigurable Radio Systems* (RRS) [44–46]. Standarden är framtagen för att medge delning av frekvensspektrumet 2 300 till 2 400 MHz med syftet att mobiltelefonisystemet (eng. mobile/fixed communication networks (MFCN)) ska få tillgång till det.

Två nivåer av användare, spektrumägaren (eng. Incumbent) och licenstagaren (eng. LSA Licensee), stöds i LSA. I standarden [46] definieras två logiska element, LSA Repository och LSA Controller se figur 5.

LSA Repository (LR) lagrar spektrumägarens användning av frekvensspektrum och vilka krav på skydd för störningar som krävs. Tillgänglig information kommuniceras med auktoriserade LSA Controllers och information från LSA Controllers omhändertas. En gränssyta mot nationell tillsynsmyndighet (i Sverige, Post- och telestyrelsen (PTS)) finns för kontroll och övervakning av systemet.

LSA Controller (LC) finns hos licenstagaren som vill nyttja frekvensspektrumet. LSA Controller interagerar både med LSA Repository och med MFCN. Interaktionen sker med LSA Repository för att om möjligt få tillgång till frekvensspektrum och med MFCN för exempelvis radiokonfiguration.

I standarden [46] definieras tre olika gränssnitt: LSA₁, LSA₂ och LSA₃. Gränssnitten är mellan LC och LR, nationella tillsynsmyndigheten och LR samt spektrumägaren och LR (se figur 5). Grundläggande funktioner för gränssnitt LSA₂ och LSA₃ beskrivs i annex B i [46] medan LSA₁ är standardiserat i [45].



Figur 5: Översiktlig LSA arkitektur.

Flera fältförsök och demonstrationer har genomförts inom olika nationer, exempelvis Finland och Portugal. I Finland genomfördes redan 2013 fältförsök som demonstrerade hur ett TD-LTE (Time Division - Long-Term Evolution) nät kan använda frekvensbandet kring 2,3 GHz när trådlös eventutrustning (PMSE¹), i det här fallet en trådlös kamera, inte använde frekvensbandet. Resultaten visar att LTE-nätet kan lämna ifrån sig spektrumet utan att förlora anslutningen med anslutna terminaler. Ur spektrumägarens perspektiv (trådlösa kameran) var evakueringstiden rimlig men kan bli förbättrad [47]. I Portugal genomfördes 2019 framgångsrikt tester med LSA enligt specifikationerna [44–46]. Med i försöken var ANACOM (Portugals motsvarighet till PTS), mobiloperatörer, TV-operatörer och industri. Utöver LSA-specifikationerna implementerade de en LSA Warner vars syfte var att detektera LTE-signaler och via samverkan med LSA-systemet få basstationen som använde det frekvensbandet att byta band. Vid försöken visades hur ett LTE-nät använde frekvensbandet kring 2,3 GHz när inget PMSE system fanns i närheten. När ett PMSE startade tog det 50 sekunder för LTE-basstationen att lämna spektrumet så att videokameran kunde skicka bilden trådlöst. När sedan videokameran inte längre använde spektrumet tog det 50 sekunder innan LTE basstationen åter använder spektrumet [48].

Idag är LSA-systemet operativt i Nederländerna för delning av frekvensspektrum mellan PMSE-användare. PMSE-användare hade tidigare klagat på långa ledtider för att få rättigheter till att nyttja frekvensspektrumet; med LSA-systemet kortades ledtiden. Nederländska National Digital Infrastructure Inspectorate har en bokningssida där PMSE-användare kan ansöka om att få använda frekvensspektrumet [49, 50].

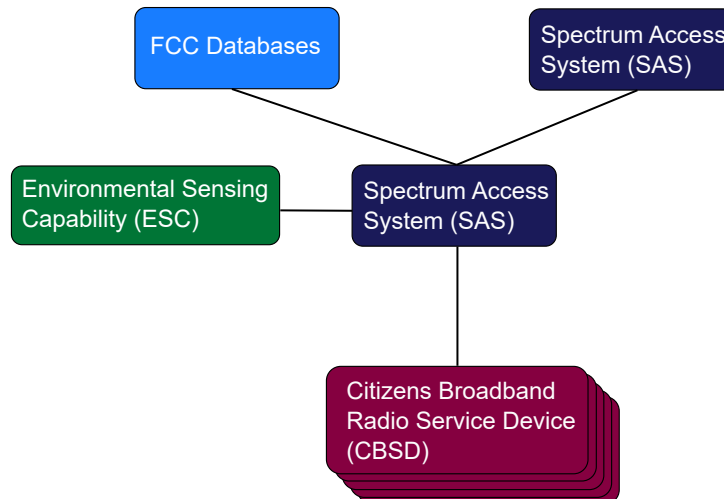
4.2 Citizen broadband radio service

Citizen Broadband Radio Service (CBRS) är ett system i USA för delning av frekvensspektrumet (3 550-3 700 MHz) mellan federala och icke-federala användare. 2015 antog FCC ett regelverk som möjliggjorde införandet av CBRS [51, 52]. CBRS har tre prioritetsnivåer:

- **Incumbent** – Federala system som exempelvis radar och satellit.
- **Priority Access Licensee (PAL)** – Rättigheterna till att nyttja frekvensspektrumet köps för tjänster som exempelvis MFCN (4G/5G mobilnät).
- **General Authorized Access (GAA)** – Avser fri användning.

Incumbent är den typ av användare som har högst prioritet och ska skyddas från skadlig störning från PAL och GAA. En PAL får köpa rättigheterna till att använda frekvensspektrumet. PAL får dock använda det köpta frekvensspektrumet endast om ingen Incumbent använder frekvensspektrumet för tillfället. Rättigheterna för frekvensspektrumet auktioneras ut per län. PAL måste uppfylla en mängd krav för att få en licens och de måste acceptera störning från Incumbent. På samma sätt får GAA använda frekvensspektrumet endast om varken Incumbent eller PAL använder frekvensspektrumet. GAA ska acceptera störningar från PAL och Incumbent.

¹Eng. programme making and special events.



Figur 6: CBRS systemöversikt.

Centralt för CBRS är Spectrum Access System (SAS), vilket är ett system med syfte att säkerställa att alla uppsatta riktlinjer för användningen av frekvensspektrumet efterlevs. SAS funktion regleras av *Code of Federal Regulations Title 47 Part 96 Subpart F - Spectrum Access System* [51]. Exempel på funktioner som SAS utför:

- Tilldela Citizens Broadband Radio Service Devices (CBSD) frekvenser.
- Hantera interferens mellan de olika användarkategorierna.
- Ta emot störrapporter och hantera utökade skyddsavstånd för Incumbent-användare för att skydda dessa från störningar.
- Spara information om registrerade CBSD som exempelvis geografisk position, systemkonfiguration och skyddsområden för Incumbent.

Även om SAS är en centraliserad funktion så kan flera SAS finnas och utbyta information mellan varandra via ett standardiserat gränssnitt [53]. Wireless Telecommunications Bureau and Office of Engineering and Technology har i nära samråd med National Telecommunications and Information Administration (NTIA) och Department of Defense (DoD) godkänt följande företag som SAS: Amdocs, Federated Wireless, Google, Sony, Key Bridge [52]. Den centraliserade SAS-lösningen innebär vissa sårbarheter, exempelvis om en SAS-databas blir korrupt hos ett företag replikeras den till övriga SAS. Därför har en decentraliserad lösning av SAS med blockchain undersökts och visats vara en lovande lösning som är mer robust och feltolerant [54].

Environmental Sensing Capability (ESC) är ett delsystem med passiva sensorer för att detektera Incumbent-användare. Sensorer kopplade till ESC är utplacerade bl.a. längs kusterna i USA för att detektera militära radarsystem. När ett radarsystem detekteras som en Incumbent-användare kommunicerar ESC det till SAS. SAS vidtar då åtgärder för att skydda den detekterade användaren. Den exakta positionen av detekterade system (exempelvis en radar på ett militärt fartyg) kan vara känslig information. Därför har ESC krävts så att exakta positioner inte lagras eller kan fås ut ur systemet; exempelvis registreras enbart mottagen effekt och ESC-noder får inte använda antenner med smala lobber [51, 55].

Fasta sändare eller nät som tillhör användarkategorin PAL eller GAA benämns som CBSD. Innan CBSD får börja använda frekvensspektrumet måste de registrera sig hos en auktoriserad SAS och exempelvis ange sin geografiska position. En CBSD måste uppfylla en rad krav för att få vara en CBSD; exempelvis finns krav på maximal uteffekt om 23, 30, eller 47 dBm/10 MHz beroende på kategori av CBSD [51].

Ett första fältförsök med CBRs genomfördes 2016 i Finland [56]. I försöket utvärderades hur snabbt den sekundära användaren lämnar frekvensspektrumet, dvs. hur snabbt CBSD-användaren överlämnar frekvensspektrumet till Incumbent. I det genomförda försöket tog det i medel 103 sekunder för en basstation att lämna frekvensspektrumet efter det att ESC hade detekterat en radarsignal och skickat en notis om det till SAS. Kravet från FCC på att lämna frekvensspektrumet är 300 sekunder [51].

Monitorering av spektrum med syfte att upptäcka om obehöriga användare utnyttjar frekvensspektrumet utan tillåtelse är viktigt för att upprätthålla ett spektrumdelningssystem som CBRs. Möjligheten till att övervaka och upptäcka obehörig användning av frekvensspektrumet studeras i [57, 58]. En vanlig metod är *crowdsourcing*, där frivilliga användare som utöver att utföra sin egen kommunikation, övervakar en liten del av spektrumet och rapporterar eventuella inkräktare till SAS. Hur effektiv monitoreringen eller själva upprätthållandet av spektrumpolicys är, beror ofta på hur de frivilliga övervakarna väljs, samt hur pålitliga de är. I [57] väljs användare genom en central DSA-basstation, som utvärderar övervakare enligt ett antal mått som exempelvis rykte och vistelsetid i ett visst frekvensband och lyckas klassificera användare som pålitliga eller korrupta. Dock tas ingen hänsyn till övervakarens egna kapacitet eller prestanda som kan försämrans genom rollen som övervakare. I ett försök att garantera robusthet och prestanda för användarna av ett spektrum, använder författarna i [58] en annan typ av spektrumsampling och utvärdering av sina övervakande användare. Bland annat introduceras en ny typ av övervakare som oberoende övervakar en viss kanal som också övervakas av en vanlig frivillig användare, i ett försök att utvärdera den frivilliga användarens trovärdighet. På så sätt införs en typ av kontroll av korrupta övervakare och processen blir mer robust, vilket visas i experiment där inkräktare och korrupta övervakare upptäckts i större grad [58].

4.3 Frekvenstilldelning i mobilsystem

Frekvensband för användning av cellulära mobilsystem kräver först en allokering av FN-organet ITU sector R (ITU-R). ITU-R bestämmer inte om ett specifikt frekvensband ska användas till 2G, 3G, 4G eller 5G. Istället skrivs att frekvensbanden är identifierade för *International Mobile Telecommunications* (IMT). Det betyder att alla frekvensband som nu är IMT-band, kan användas för 5G utifrån ett frekvensstandardiseringsperspektiv. Frekvensband beslutas på den internationella konferensen World Radiocommunication Conference (WRC). WRC som hölls år 2015 (WRC-15) var speciellt viktigt för nya 5G-frekvensband. För Sveriges del tilldelades nya IMT-frekvensband på 700 MHz-bandet, L-bandet samt 3 GHz-bandet.

Speciellt 3 GHz-bandet är intressant för 5G. Det är nämligen så brett i frekvens att varje nätbolag kan få ungefär 100 MHz bandbredd, vilket behövs för att kunna realisera de utlovade 5G datatakterna. Detta band delar upplänk (från mobil till basstation) och nedlänk (från basstation till mobil) med duplexmetoden *Time Division Duplex* (TDD). IMT-banderna på lägre frekvenser än 3 GHz-bandet använder istället *Frequency Division Duplex* (FDD). Exempelvis används 713 – 733 MHz bandet för IMT-upplänk medan 768 – 788 MHz används för IMT-nedlänk.

Varje mobil kan sända och ta emot signaler på mer än tio olika bärvågsfrekvenser (de flesta mobiler kan många fler) med de olika standarderna 2G, 3G, 4G, 5G, Wifi, Bluetooth. Detta skiljer dem signifikant från militära system, som inte kan använda lika många bärfrekvenser, eller olika standarder. En anledning till denna skillnad är den enorma marknaden för mobiler jämfört med militära system. Det finns exempelvis mer än 1,5 miljarder 5G-mobiler, samt mer än 8 miljarder mobiler som har 4G implementerat. Det finns mer än 1000 olika mobilmodeller som stödjer 5G. Allt detta ger stordriftsfördelar för mobiltillverkning jämfört med militära system. Det gör att mobilchiptillverkarna kan satsa på mer komplexa implementeringar än militära systemleverantörer. Ett problem är dock att det inte finns något specifikt frekvensband för 5G globalt. Det är därför en ytterligare anledning att mobiler har så många olika bärfrekvenser, dvs. för att kunna användas i alla världsdelar.

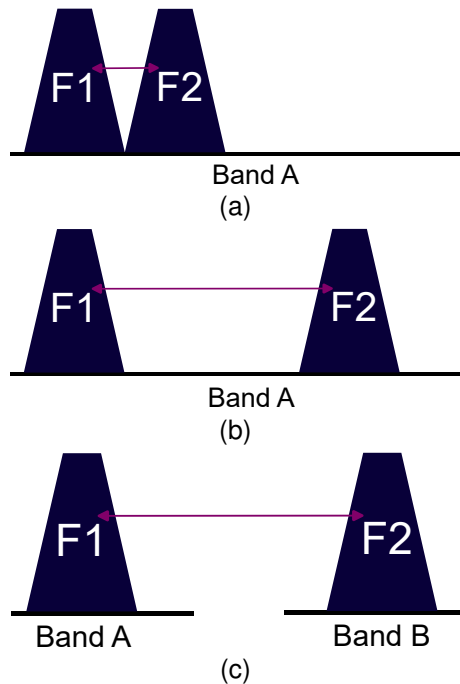
En till egenskap som gör 5G frekvensagilt är att 5G-standarden inte varierar för olika frekvensband, utan är bärfrekvens-agnostisk. Det finns 5G-frekvenser standardiserade från 400 MHz upp till 71 GHz. Bandbredderna kan variera från 5 MHz till 400 MHz, men standarden är alltså lika för alla bärfrekvenser och bandbredder. Samma protokollmekanismer används för alla olika frekvensband och bandbredder. Att 5G-standarden är så generell för olika frekvensband gör det lättare för mobiltillverkarna att implementera många frekvensband. Ett nytt frekvensband i en mobil medför därför ingen ytterligare komplexitet, förutom i RF-delarna. En tredje anledning till att mobiler har så många frekvensband implementerade är den globala standardiseringen som görs inom 3GPP (3rd Generation Partnership Project).

Nedan beskrivs tre olika sätt som 5G har för att tilldela mobilerna frekvenser på ett agilt sätt. Beskrivningen stöder sig i huvudsak 5G NR [59].

4.3.1 Aggregering av 5G frekvensband

Precis som för 4G, har 5G standardiserat aggregering av frekvensband (eng. carrier aggregation) så att mobilerna får större momentan bandbredd och därmed möjlighet till högre datatakter. Bandbredderna för varje enskilt band kan variera från 5 MHz till 400 MHz. Vanligast är 20 MHz breda frekvensband, inte minst för att harmonisera med 4G, där 20 MHz är den vanligaste bandbredden. Det finns tre olika moder för aggregering av frekvensband i 5G:

- De olika bärvågsfrekvenserna F1 och F2 ligger sammanhängande bredvid varandra (figur 7a).
- De olika bärvågsfrekvenserna F1 och F2 är ej bredvid varandra, men tillhör samma frekvensband (band A) (figur 7b).
- De olika bärvågsfrekvenserna F1 och F2 ligger i olika frekvensband (band A och B) (figur 7c).



Figur 7: Exempel på aggregering av frekvensbandens bärvågsfrekvens.

Även för aggregering av 5G-frekvensband är standarden generell så att samma protokollmekanismer används i alla tre moder i figur 7, vilket förenklar implementeringen i mobilerna. Standarden tillåter aggregering av upp till 16 frekvensband som maximalt är 400 MHz breda vardera, dvs. maximal bandbredd blir $16 \cdot 400 \text{ MHz} = 6,4 \text{ GHz}$ enligt standarden. Så breda frekvensband är dock sällan tillgängliga för mobiloperatörerna. Aggregering av frekvensband används framför allt i nedlänk, som ofta är bandbredds begränsad, eftersom basstationen har stor sändareffekt. Upplänken är ofta effektbegränsad, eftersom mobilen har lägre sändareffekt än basstationen. Därför används carrier aggregation sällan i upplänk, men ofta i nedlänk. Vid aggregering är alltid ett frekvensband primärt och bär all nödvändig kontrollsignalering mellan basstationen och mobilen. De andra frekvensbanden används bara för att öka bandbredden och dataakten i främst nedlänken.

Utöver aggregering av 5G-frekvensband finns det även en liknande funktion för aggregering av frekvensbanden, som bara gäller för upplänken. Den kallas supplementär upplänk (eng. supplementary uplink) och innebär att basstationen tilldelar mobilen en extra upplänk på lägre frekvens än nedlänken. Upplänken är ofta effektbegränsad, p.g.a. mobilens låga sändareffekt. Genom att tilldela mobilen en extra upplänk på exempelvis 700 MHz-bandet kan mobilens upplänkstäckning signifikant förbättras och därmed kommer upplänkens dataakt öka.

4.3.2 Dual connectivity

Ytterligare ett sätt att dynamiskt tilldela mobilerna frekvenser i 5G är *tvåfaldig uppkoppling* (eng. dual connectivity). Det används för att koppla upp mobilerna till två basstationer samtidigt för att öka nedlänksdataakten. Detta till skillnad från carrier aggregation och supplementary uplink, då mobilen bara är uppkopplad till en bassta-

tion. Dual connectivity används framför allt när ena basstationen är en 4G-basstation och den andra är en 5G-basstation. Genom att låta all kontrollsignalering gå via 4G-basstationen till ett 4G-kärnnät, kunde operatörerna snabbt implementera 5G, som en ”data booster” i nedlänk, innan 5G-kärnnät blev standardiserat.

När mobilen är uppkopplad till både en 4G- och 5G-basstation kallas konfigurationen 5G non-standalone, dvs. när 5G behöver ett 4G-kärnnät för att fungera. Numera är den vanligaste konfigurationen 5G standalone där 5G-mobiler och basstationer bara kopplas till ett 5G-kärnnät, eftersom 5G-kärnnät är tillräckligt standardiserat nu. Detta är viktigt för Försvarmakten eftersom säkerhetsluckor täppts till från 4G-kontrollsignalering i 5G. Därför är 5G standalone-konfigurering av nätet en viktig förutsättning för Försvarmaktens användning av 5G.

4.3.3 5G på olicensierade frekvensband

Den typiska användningen av 5G är att basstationen och mobilen kommunicerar på så kallade licensierade frekvensband, som operatören har frekvenslicens för och ensam förfogar över. På det viset vet operatören att 5G-systemen inte kommer störas av andra typer av mobiler än 5G-mobiler och 5G-basstationer på samma frekvensband, som operatörens 5G-system själv kontrollerar. Dessa interferenser från andra användare är 5G-systemen optimerade att klara av, för att kunna få in så många användare som möjligt på operatörens begränsade licensierade frekvensutrymme.

5G har dessutom möjligheten att använda olicensierade frekvensband, de så kallade ISM-banderna, med störst fokus på 5 GHz-bandet. Dessa band används annars mest för WiFi (WLAN-standarden IEEE 802.11) och Bluetooth. Eftersom vem som helst kan använda ISM-banderna, så länge som man följer frekvensvillkoren för exempelvis sändareffekt, är interferenssituationen svårare att förutse än för de licensierade frekvensbanden. Dessutom är maximalt tillåten sändareffekt så låg att ISM-banderna inte lämpar sig för annat än korthållskommunikation inomhus, och inte för att täcka stora områden, som mobilsystem typiskt gör. Men för inomhustäckning på korta avstånd kan 5G på ISM-band vara ett alternativ.

För 4G var operatören tvungen att ha en licensierad 4G-frekvens för att kunna använda ISM-banderna. Detta kallas för *Licence Assisted Access* (LAA). I 4G skickas kontrollsignalering på den licensierade 4G-frekvensen, medan ISM-bandet används för användardata. Samma konstruktion finns för 5G, men dessutom finns en mod i 5G, där mobilerna inte behöver ha någon bärare för 4G eller 5G, utan bara kommunicerar med 5G basstationen på ISM-bandet. Så i teorin skulle en operatör inte behöva något licensierat frekvensband utan bara använda de olicensierade frekvenserna. Det är dock ingen operatör som gått den vägen, eftersom ISM-banderna inte klarar av stor utomhustäckning och har okontrollerade interferenser.

4.4 Modellering av spektrumanvändning

En beskrivning av hur trådlösa enheter använder frekvensspektrumet är standardiserat i standarden IEEE 1900.5.2, *Standard Method for Modeling Spectrum Consumption*, som godkändes 2017 [60]. Syftet med standarden är att beskriva trådlösa enheters användning av frekvensspektrumet med en spektrumförbrukningsmodell (eng. spectrum consumption models (SCM)) för att exempelvis underlätta spektrumdelning, ta fram strategier för att motverka störningar mellan system.

Spektrumförbrukningsmodell enligt SCM beskrivs med följande elva modellparametrar.

1. **Reference power** Ett referensvärde för spektrummasken. För en sändare anges sändareffekten och för en mottagare anges tillåten interferenseffekt.
2. **Spectrum mask** En datastruktur för relativ emitterad effekt.
3. **Underlay mask** En datastruktur för tillåten interferensnivå.
4. **Power map** Effektflödestäthet per rymdvinkel dvs. inverkan från antennen.
5. **Propagation map** Specificerar utbredningsdämpningen för olika riktningar.
6. **Intermodulation mask** Specificerar känsligheten hos sändare eller mottagare för att generera intermodulationsprodukter med externa signaler.
7. **Platform** Namn som beskriver placeringen. Användbart exempelvis för samlokalisering av trådlösa enheter.
8. **Location** Geografisk plats där enheten kan finnas exempelvis en punkt, ett område, en volym eller en bana.
9. **Schedule** På- och avtider för enheten.
10. **Minimum power spectral flux density** Anger när sändande signaler inte längre behöver skyddas.
11. **Protocol or policy** Tillåter system att samlokaliseras och att samexistera i samma spektrum.

De här elva modellparametrarna används för att skapa SCM för sändare respektive mottagare. Utifrån spektrumförbrukningsmodellen går det sedan att identifiera överlapp i frekvensanvändning. Beroende på avståndet mellan enheterna så kan överlappet i frekvens innebära ett interferensproblem.

I [61] ges en översiktlig beskrivning av standarden IEEE 1900.5.2 tillsammans med exempel på användarfall för standarden. Vidare ges exempel på hur standarden kan användas för att snabbt göra samexistensbedömningar för CBRS. SCM kan användas för att anonymisera information om CBSD för SAS. SCM kan också användas av ESC leverantörer för att överföra information om detekterade incumbent-användare. En mjukvara, *Spectrum Consumption Model Builder and Analysis Tool* (SCMBAT), för att definiera SCM och göra samexistensutvärderingar beskrivs också i [61].

5 Diskussion

Det finns flertalet civila standarder och system som har stor frekvensflexibilitet. Många civila tekniker medger även att frekvensanvändningen allokeras mer eller mindre dynamiskt i meningen att en specifik del av frekvensspektrumet tilldelas när den används eller när systemet upprättas. I civil trådlös kommunikation ser vi också samtidig användning och sömlös övergång mellan flera kommunikationssystem. Ett tydligt exempel är en mobiltelefon som arbetar sömlöst för användaren mellan flera generationer av mobiltelefonisystem och WiFi-system som arbetar på skilda frekvensband, vilka dessutom delas med andra användare. Tekniker för att använda frekvensspektrumet mer flexibelt och med delning (eng. sharing) mellan flera användare finns alltså i civila system, men inte i lika stor utsträckning i militära radiosystem. Varför används inte dessa tekniker i militära system? Skulle det vara möjligt att använda liknande tekniker även i militära system för att öka spektrumeffektiviteten och samtidigt bevara eller till och med förbättra robustheten mot exempelvis fientlig störning?

Det finns ett antal militära särkrav som, av olika skäl, försvårar eller åtminstone historiskt har försvårat dynamisk spektrumhantering. Ett sådant krav är att ha garanterad tillgång till rätt spektrum när och där det behövs. Detta krav löses i praktiken genom att varje radiosystem har dedikerat spektrum. I Försvarmaktens taktiska radiosystem är det till och med så att varje enskilt radionät har dedikerat spektrum enligt en förutbestämd frekvensplan, vilken är statisk över lång tid (månader eller år). Tekniskt är det möjligt att justera frekvensplaner med betydligt kortare tidsintervall. Befintliga radiosystem i Försvarmakten har inte stöd för att göra detta automatiskt och vad vi känner till har det heller inte kravställts. Redan idag finns möjligheten att förprogrammera ett taktiskt radiosystem med flera frekvensplaner, för att möjliggöra snabbare byte av frekvensplan under pågående operation. Detta kan dock inte göras automatiskt av systemet. Att göra detta byte i fält skulle därför kräva rätt kompetens hos operatören.

Statisk frekvensallokering är inte nödvändigtvis den bästa lösningen för att få garanterad tillgång till rätt spektrum när och där det behövs. Egentligen är det tillgång till väl fungerande samband med tillräcklig prestanda som bör vara kravsättande, och inte tillgång till specifikt frekvensspektrum.

Ett annat militärspecifikt krav är robusthet mot störning. Med spektrumdelning finns alltid en risk för interferens mellan system som nyttjar samma frekvensband, vilket minskar skyddet mot störning. Med ökande antal användare och radionät, på grund av växande försvar, är det inte möjligt att allokera spektrum statiskt och samtidigt undvika spektrumkollisioner. Detta kan gälla exempelvis i scenarier med hög rörlighet och stort spektrumutnyttjande, i vilka statisk frekvensallokering kan ge kollisioner och därmed interferens. Då kan flexibel frekvensanvändning och spektrumdelning snarare ge fördelar avseende både effektivitet och robusthet och i vissa fall vara nödvändig, åtminstone mellan Försvarmaktens egna system och inom det frekvensspektrum som finns tilldelat. En farhåga med att anpassa spektrumanvändningen och förändra frekvensplaner dynamiskt är att det finns risk för extern påverkan av en antagonist. Det vill säga, en intelligent störsändare kan potentiellt påverka spektrumallokeringen och skapa kommunikationsproblem om detta inte motverkas.

Ett önskemål för militära radionät är att de ska fungera oberoende av fast infrastruktur och att radionätet inte ska falla om någon enskild nod försvinner ur nätet. Det finns också incitament att enskilda noder i nätet ska vara svåra att identifiera. Sammantaget innebär detta att taktiska radionät är av typen mobila ad hoc-nät med decentraliserad kontroll, till skillnad från jämförbara civila system som har en central kontrollnod. Med centraliserad kontroll, t.ex. i en basstation i mobiltelefonisystem, är det lättare att anpassa frekvensanvändningen i hela nät. Såväl nätnoder som användarnoder i militära radionät kan vara mobila, till skillnad från civila system i vilka nätnoder i allmänhet är en del av fast infrastruktur. Att samtliga radionoder är mobila medför att radioförhållandena förändras snabbare och därmed kräver snabbare anpassning och uppdatering.

Gemensamma överenskommelser genom standardisering är en avgörande faktor för att civila radiosystem från olika leverantörer kan verka i samma frekvensband och dynamiskt allokera frekvensspektrum till användare. För militära radiosystem finns inte gemensamma standardiseringsorgan med stark gemensam drivkraft på samma sätt, även om det pågår arbete med standardisering av gemensamma protokoll inom Nato. Taktiska radiosystem inom Försvarsmakten har snarare upphandlats och utvecklats med ett nationellt perspektiv och egna krav. Den svenska anslutningen till Nato kan eventuellt förändra det.

Krav på informationsskydd i militära system är ytterligare en faktor som skapar utmaningar för flexibel frekvenshantering och spektrumdelning. Exempelvis kan begränsningar av informationsspridning hindra att hela arméns frekvensplan finns tillgänglig hos samtliga radionoder, trots att det sannolikt skulle underlätta för att allokera spektrum mer dynamiskt.

I militära taktiska radionät är en stor del av trafiken av typen multicast, till skillnad från i de flesta civila system där unicast-trafik dominerar. Att trafiken är av typen multicast innebär att många noder samtidigt tar emot samma signal och kommunicerar på samma kanal. Det innebär att hela nätet måste vara överens om aktuell frekvensplan, vilket är svårare än för unicast-trafik där endast en sändare och en mottagare måste vara överens. Att dela information om aktuell frekvensplan och spektrumanvändning till alla noder i radionätet kräver överföring av extra kontrollinformation. I militära radiosystem, som ofta har relativt låg dataakt och kapacitet, blir denna ytterligare kontrollinformation relativt sett större än i kommunikationssystem med högre kapacitet. Det finns därmed en kompromiss mellan hur mycket extra kontrollinformation som kan skickas i näten och hur mycket det kan öka spektraleffektiviteten.

Försvarsmaktens plattformar, exempelvis fordon eller fartyg, har flera radiosystem som nyttjas fristående från varandra. Valet av system och frekvens görs till stor del manuellt. I många civila plattformar, exempelvis mobiltelefoner, finns också flera radiosystem som samverkar så att det för tillfället mest gynnsamma systemet används automatiskt utan att användaren behöver göra ett aktivt val. Mobiltelefonen tar själv beslut om den ska använda t.ex. WiFi eller ett mobiltelefonisystem (t.ex. 4G eller 5G). Tekniskt bör en militär plattform (t.ex. en stridsvagn), på liknande sätt som en mobiltelefon, kunna ha flera samverkande kommunikationssystem som nyttjar flera skilda frekvensband och teknologier. Stora variationer i kommunikationsprestanda, t.ex. avseende dataakt och

fördröjning, kan förväntas mellan olika kommunikationssystem och måste hanteras på applikationsnivå. Sömlös övergång mellan flera kommunikationssystem och tillgång till totalt sett fler frekvensband för enskilda radionät och noder ger dessutom möjlighet till ökad redundans.

6 Slutsatser

Användning av frekvensspektrumet kan effektiviseras genom delning (gemensam användning (eng. spectrum sharing)) mellan olika användare och system. Både inom EU och USA finns direktiv om att frekvensspektrumet ska delas. Ett första steg för Försvarsmakten är att utöka delningen inom det frekvensspektrum som är tilldelat Försvarsmakten. Befintliga taktiska radiosystem har ingen eller begränsade möjligheter till att göra det automatiskt. För att kunna hantera delning av frekvensspektrum krävs manuella metoder och på sikt att nya radiosystem krävs att hantera delning av frekvensspektrum.

Det finns fundamentala skillnader mellan civila trådlösa kommunikationssystem och militära taktiska radiosystem, exempelvis att militär radiotrafik oftast är av typen multicast medan den civila är unicast, och att militära system är ofta decentraliserade medan civila system har en centraliserade funktioner. Dessa skillnader komplicerar delningen av frekvensspektrum. Civila system är dessutom standardiserade för att olika leverantörer ska kunna konkurrera med olika terminaler som tillhör samma system. För militära radiosystem finns inga gemensamma standardiseringsorgan med stark gemensam drivkraft, även om det pågår arbete med standardisering av gemensamma protokoll inom Nato. Taktiska radiosystem inom Försvarsmakten har snarare upphandlats och utvecklats med ett nationellt perspektiv och egna krav, där spektrumdelning inte prioriterats. Därför kan Försvarsmaktens befintliga radiosystem inte utbyta information sinsemellan på det sätt som är nödvändigt för att dela frekvensspektrum.

Genomförd omvärldsbevakning inom området hantering av frekvensspektrum för trådlös kommunikation visar på omfattande civil forskning där maskininlärning i stor utsträckning används för att lösa frågeställningarna. Multifunktionssystem, dvs. radiosystem som har andra funktioner än att enbart kommunicera, exempelvis radar, störsändning eller signalspaning, är något som är relativt nytt och av intresse. Även civil forskning i utvecklingen av 6G-mobilsystem studerar multifunktion, exempelvis studeras hur nedlänken kan användas för en radar-funktion.

Det finns två standarder, en europeisk och en amerikansk, för hierarkisk delning av frekvensspektrum. Den amerikanska, CBRS, är implementerad i ett operativt system medan den europeiska, LSA, används i Nederländerna. Flertalet fältförsök har genomförts med prototypsystem av LSA. Båda systemen är centraliserade och håller reda på spektrumanvändningen över geografiska områden.

Nato har med sina forskningsprojekt studerat och bedriver fortfarande forskning som syftar till att dela frekvensspektrumet effektivt. Exempelvis har en fallstudie av CBRS genomförts i syfte att undersöka om standarden kan användas för dynamisk spektrumhantering inom Nato. Ett annat Nato-projekt har studerat hur en lägesbild av det elektromagnetiska spektrumet kan skapas och vilka operativa fördelar det skulle ge i olika scenarion.

Referenser

- [1] P. Eliardsson, E. Axell, B. Asp, T. Ranström, K. Hägglund och P. Johansson, "Effektivare frekvensutnyttjande för förbättrad samexistens - Omvärldsanalys," Totalförsvarets forskningsinstitut (FOI), FOI-R--4975--SE, juni 2020.
- [2] M. Massaro, "Next generation of radio spectrum management: Licensed shared access for 5G," *Telecommunications Policy*, vol. 41, nr. 5, s. 422–433, 2017.
- [3] EUROPEAN COMMISSION, "Communication from the commission to the european parliament, the council, the european economic and social committee and the committee of the regions - Promoting the shared use of radio spectrum resources in the internal market," 2012.
- [4] D. L. Evans och M. D. Gallagher, "Spectrum Policy for the 21st century – The President's Spectrum Policy Initiative: Report 1 Recommendations of the Federal Government Spectrum Task Force," juni 2004.
- [5] National Telecommunications and Information Administration, "Spectrum Sharing Innovation Test-Bed," Federal register, E8-2050, 2008.
- [6] P. Eliardsson, B. Asp, E. Axell och P. Johansson, "Förutsättningar för frekvenshantering inom Försvarsmakten - Specifikt för radiosamband," Totalförsvarets forskningsinstitut (FOI), FOI-R--5158--SE, juni 2021.
- [7] X. Wang, J. Wang, Y. Xu, J. Chen, L. Jia, X. Liu och Y. Yang, "Dynamic Spectrum Anti-Jamming Communications: Challenges and Opportunities," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 58, nr. 2, s. 79–85, 2020.
- [8] W. Li, J. Chen, X. Liu, X. Wang, Y. Li, D. Liu och Y. Xu, "Intelligent Dynamic Spectrum Anti-Jamming Communications: A Deep Reinforcement Learning Perspective," *IEEE Wireless Commun.*, vol. 29, nr. 5, s. 60–67, 2022.
- [9] I. Goodfellow, Y. Bengio och A. Courville, *Deep Learning*. MIT Press, 2016.
- [10] S. Hu, X. Chen, W. Ni, E. Hossain och X. Wang, "Distributed machine learning for wireless communication networks: Techniques, architectures, and applications," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 23, nr. 3, s. 1458–1493, 2021.
- [11] X. Tan, L. Zhou, H. Wang, Y. Sun, H. Zhao, B.-C. Seet, J. Wei och V. C. M. Leung, "Cooperative multi-agent reinforcement-learning-based distributed dynamic spectrum access in cognitive radio networks," *IEEE Internet Things J.*, vol. 9, nr. 19, s. 19 477–19 488, 2022.
- [12] O. Naparstek och K. Cohen, "Deep multi-user reinforcement learning for distributed dynamic spectrum access," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 18, nr. 1, s. 310–323, 2019.
- [13] H.-H. Chang, Y. Song, T. T. Doan och L. Liu, "Federated multi-agent deep reinforcement learning (Fed-MADRL) for dynamic spectrum access," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 22, nr. 8, s. 5337–5348, 2023.
- [14] X. Dong, Z. You, X. Liu, Y. Guo, Y. Shen och Y. Gong, "Federated and online dynamic spectrum access for mobile secondary users," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 23, nr. 1, s. 621–636, 2024.

- [15] Z. Li och C. Guo, "Multi-agent deep reinforcement learning based spectrum allocation for D2D underlay communications," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 69, nr. 2, s. 1828–1840, 2020.
- [16] S. Kaffle, J. Jagannath, Z. Kane, N. Biswas, P. S. V. Kumar och A. Jagannath, "Generalization of deep reinforcement learning for jammer-resilient frequency and power allocation," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 27, nr. 7, s. 1789–1793, 2023.
- [17] Y. Yu, S. C. Liew och T. Wang, "Multi-agent deep reinforcement learning multiple access for heterogeneous wireless networks with imperfect channels," *IEEE Trans. Mobile Comput.*, vol. 21, nr. 10, s. 3718–3730, 2022.
- [18] L. Liang, H. Ye och G. Y. Li, "Spectrum sharing in vehicular networks based on multi-agent reinforcement learning," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 37, nr. 10, s. 2282–2292, 2019.
- [19] S. Zhang, Z. Ni, L. Kuang, C. Jiang och X. Zhao, "Traffic priority-aware multi-user distributed dynamic spectrum access: A multi-agent deep RL approach," *IEEE Trans. on Cogn. Commun. Netw.*, vol. 9, nr. 6, s. 1454–1471, 2023.
- [20] P. Eliardsson, E. Axell, K. Häggglund, P. Johansson, J. Nilsson och G. Bark, "Effektivare frekvensanvändning för försvarsmaktens radiokommunikationssystem - tekniker och metoder," Totalförsvarets forskningsinstitut (FOI), FOI-R--5166--SE, juni 2021.
- [21] J. Li, S. Dang, M. Wen, Q. Li, Y. Chen, Y. Huang och W. Shang, "Index Modulation Multiple Access for 6G Communications: Principles, Applications, and Challenges," *IEEE Netw.*, vol. 37, nr. 1, s. 52–60, 2023.
- [22] C. De Lima, D. Belot, R. Berkvens, A. Bourdoux, D. Dardari, M. Guillaud, M. Isomursu, E.-S. Lohan, Y. Miao, A. N. Barreto, M. R. K. Aziz, J. Saloranta, T. Sanguanpuak, H. Sardeddeen, G. Seco-Granados, J. Suutala, T. Svensson, M. Valkama, B. Van Liempd och H. Wymeersch, "Convergent Communication, Sensing and Localization in 6G Systems: An Overview of Technologies, Opportunities and Challenges," *IEEE Access*, vol. 9, s. 26 902–26 925, 2021.
- [23] E. Basar, "Index modulation techniques for 5G wireless networks," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 54, nr. 7, s. 168–175, juli 2016.
- [24] S. Dang, O. Amin, B. Shihada och M.-S. Alouini, "What Should 6G Be?" *Nature Electronics*, vol. 3, nr. 1, s. 20–29, jan. 2020.
- [25] S. Dogan Tusha, A. Tusha, E. Basar och H. Arslan, "Multidimensional Index Modulation for 5G and Beyond Wireless Networks," *Proc. IEEE*, vol. 109, nr. 2, s. 170–199, 2021.
- [26] P. Flavell, P. Adams, G. Capela och L. Bastos, "Adopting a dynamic spectrum management philosophy in NATO," *Proc. IEEE Mil. Commun. Conf. (MILCOM)*, 2021, s. 366–371.
- [27] Y. Livran, I. V. Le Nir, S. Couturier, M. Suchanski, P. Kaniewski, J. Romanik, A. Hamilton, P. Howland och M. D. Tracy, "Electromagnetic Environment Situational Awareness," *Proc. Int. Conf. on Mil. Commun. and Inf. Syst. (ICMCIS)*, 2021, s. 1–8.

- [28] M. Suchanski, P. Kaniewski, J. Romanik, E. Golan och K. Zubel, "Radio Environment Maps for Military Cognitive Networks: Deployment of Sensors vs. Map Quality," *Proc. Int. Conf. on Mil. Commun. and Inf. Syst. (ICMCIS)*, 2019, s. 1–6.
- [29] M. Suchanski, P. Kaniewski och J. Romani, "Radio Environment Maps for Military Cognitive Networks: Density of Small-Scale Sensor Network vs. Map Quality," *EURASIP J. on Wireless Comm. and Netw.*, vol. 189, juli 2020. [Online]. URL: <https://doi.org/10.1186/s13638-020-01803-4>
- [30] A. Termos och B. Hochwald, "Robust neural network-based spectrum occupancy mapping," *Proc. IEEE Int. Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN) symposium*, 2021, s. 296–301.
- [31] IST-181, "Terahertz-band communications and networking," <https://www.sto.nato.int/Lists/test1/activitydetails.aspx?ID=16829>, hämtad den 2024-03-15.
- [32] S. Biswas, A. Bishnu, F. A. Khan och T. Ratnarajah, "In-Band Full-Duplex Dynamic Spectrum Sharing in Beyond 5G Networks," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 59, nr. 7, s. 54–60, 2021.
- [33] G. Eriksson och E. Axell, "Physical Limits for In-Band Full Duplex in Frequency-Hopping Tactical Radio Systems," *Proc. Int. Conf. on Mil. Commun. and Inf. Syst. (ICMCIS)*, Skopje, North Macedonia, 2023.
- [34] K. Pärilin, T. Riihonen, V. L. Nir, M. Bowyer, T. Ranström, E. Axell, B. Asp, R. Ulman, M. Tschauner och M. Adrat, "Full-Duplex Tactical Information and Electronic Warfare Systems," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 59, nr. 8, s. 73–79, 2021.
- [35] T. Ranström och E. Axell, "Full Duplex Based Digital Out-of-Band Interference Cancellation for Collocated Radios," *Proc. IEEE Wireless Commun. Network. Conf. (WCNC)*, 2020.
- [36] E. Becirovic, L. Festin, K. Hägglund och J. Nilsson, "Radiosystem med multifunktion," Totalförsvarets forskningsinstitut (FOI), FOI-R--5566--SE, jan. 2024.
- [37] Kongsberg Defence & Aerospace AS, "THOR tactical SDR," <https://www.kongsberg.com/globalassets/kongsberg-defence-aerospace/2.-what-we-do/1.3-defence-security/defence-communications/thor-tactical-software-defined-radio-datasheet-2024.pdf>, hämtad den 2024-02-19.
- [38] Forsvarsmateriell, "Forsvarsmateriell og kongsberg utvikler ny taktisk radio," <https://www.fma.no/aktuelt-og-media/2020/forsvarsmateriell-og-kongsberg-utvikler-ny-taktisk-radio>, hämtad den 2024-02-19.
- [39] T. Ropitault, S. Blandino, A. Sahoo och N. T. Golmie, "IEEE 802.11bf: Enabling the Widespread Adoption of Wi-Fi Sensing," *IEEE Commun. Stand. Mag.*, maj 2023.
- [40] S. Nayak och R. Patgiri, "6g communication: A Vision on the Potential Applications," *Edge Analytics: Select Proceedings of 26th International Conference—ADCOM 2020*. Springer, 2022, s. 203–218.

- [41] A. Patel, A. Shukla och J. Bhalani, “A Comprehensive Survey on 6G Networks: Key Technologies and Challenges,” *Int. Conf. on Simulation, Automation & Smart Manufacturing (SASM)*, 2021, s. 1–6.
- [42] M. D. Mueck, V. Frascolla och B. Badic, “Licensed shared access — State-of-the-art and current challenges,” *Int. Workshop on Cognitive Cellular Systems (CCS)*, 2014, s. 1–5.
- [43] CEPT, “ECC Report 205: Licensed Shared Access (LSA),” 2014.
- [44] ETSI TS 103 154, “Reconfigurable Radio Systems (RRS); System requirements for operation of Mobile Broadband Systems in the 2 300 MHz - 2 400 MHz band under Licensed Shared Access (LSA),” ETSI, Standard, 2014.
- [45] ETSI TS 103 379, “Reconfigurable Radio Systems (RRS); Information elements and protocols for the interface between LSA controller (LC) and LSA Repository (LR) for operation of Licensed Shared Access (LSA) in the 2 300 MHz - 2 400 MHz band,” ETSI, Standard, 2017.
- [46] ETSI TS 103 235, “Reconfigurable Radio Systems (RRS); System architecture and high level procedures for operation of Licensed Shared Access (LSA) in the 2 300 MHz - 2 400 MHz band,” ETSI, Standard, 2015.
- [47] M. Palola, M. Matinmikko, J. Prokkola, M. Mustonen, M. Heikkilä, T. Kippola, S. Yrjölä, V. Hartikainen, L. Tudose, A. Kivinen, J. Paavola och K. Heiska, “Live field trial of Licensed Shared Access (LSA) concept using LTE network in 2.3 GHz band,” *Proc. IEEE Int. Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN) symposium*, 2014, s. 38–47.
- [48] ANACOM, “Final Report - Study on the Licensed Shared Access (LSA) Spectrum Sharing Model in Portugal,” https://anacom.pt/streaming/Final_Report_LSA_EN.pdf?contentId=1636566&field=ATTACHED_FILE, 2020.
- [49] The National Digital Infrastructure Inspectorate (RDI), “Book frequency space via LSA booking system,” <https://www.rdi.nl/onderwerpen/draadloze-apparatuur-uitzendingen-en-evenementen/audio--en-videoverbindingen/lsa-boekingssysteem>, 2022, hämtad den 2024-02-06.
- [50] S. Antipolis, “ETSI specifications on licensed shared spectrum successfully implemented in the netherlands for the entertainment industry,” <https://www.etsi.org/newsroom/news/1625-2019-07-etsi-specifications-on-licensed-shared-spectrum-successfully-implemented-in-the-netherlands-for-the-entertainment-industry?jij=1706169701590&jjj=1707226839314>, 2019, hämtad den 2024-02-06.
- [51] Electronic Code of Federal Regulations, “Title 47, Chapter I, Subchapter D, Part 96 — Citizens Broadband Radio Service,” <https://www.ecfr.gov/current/title-47/part-96>, 2015, hämtad den 2024-02-08.
- [52] Federal Communications Commission, “3.5 GHz Band Overview,” <https://www.fcc.gov/wireless/bureau-divisions/mobility-division/35-ghz-band/35-ghz-band-overview>, 2023, hämtad den 2024-02-07.

- [53] Wireless Innovation Forum, “Signaling Protocols and Procedures for Citizens Broadband Radio Service (CBRS): Spectrum Access System (SAS) - SAS Interface Technical Specification,” Document WINNF-TS-0096, Version 1.3.2, mars 2020.
- [54] Y. Xiao, S. Shi, W. Lou, C. Wang, X. Li, N. Zhang, Y. T. Hou och J. H. Reed, “Decentralized Spectrum Access System: Vision, Challenges, and a Blockchain solution,” *IEEE Wireless Commun.*, vol. 29, nr. 1, s. 220–228, 2022.
- [55] Spectrum Sharing Committee (SSC) Work Group 2 (WG2) (Security), “CBRS Operational Security,” Document WINNF-TS-0071, Version V1.0.0, juli 2017.
- [56] M. Palola, M. Höyhtyä, P. Aho, M. Mustonen, T. Kippola, M. Heikkilä, S. Yrjölä, V. Hartikainen, L. Tudose, A. Kivinen, R. Ekman, J. Hallio, J. Paavola, M. Mäkeläinen och T. Hänninen, “Field trial of the 3.5 GHz citizens broadband radio service governed by a spectrum access system (SAS),” *Proc. IEEE Int. Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN) symposium*, 2017, s. 1–9.
- [57] D. Das, T. Znati, P. Bustamente, M. Weiss och G. M., “Spectrum Misuse Detection in Cooperative Wireless Networks,” *Proc. IEEE Consumer Communications and Networking Conference*, 2020, s. 1–6.
- [58] D. Das, T. Znati och M. Weiss, “Efficient Monitoring of Dynamic Spectrum Access for Robust and Reliable Detection of Unauthorized Access,” *Proc. IEEE Mil. Commun. Conf. (MILCOM)*, 2022, s. 728–734.
- [59] E. Dahlman, S. Parkvall och J. Sköld, *5G NR: The Next Generation Wireless Access Technology*. Elsevier Science, 2018.
- [60] IEEE 1900.5.2, “IEEE Standard for Method for Modeling Spectrum Consumption,” IEEE Standard Association, Standard, 2017.
- [61] C. E. C. Bastidas, J. A. Stine, A. Rennier, M. Sherman, A. Lackpour, M. M. Kokar och R. Schrage, “IEEE 1900.5.2: Standard Method for Modeling Spectrum Consumption: Introduction and Use Cases,” *IEEE Commun. Stand. Mag.*, vol. 2, nr. 4, s. 49–55, 2018.



FOI
Totalförsvarets forskningsinstitut
164 90 Stockholm

Tel: 08-55 50 30 00
Fax: 08-55 50 31 00

www.foi.se