



Effektivare frekvensutnyttjande för förbättrad samexistens

Omvärldsanalys

PATRIK ELIARDSSON, ERIK AXELL, BÖRJE ASP,
THOMAS RANSTRÖM, KRISTOFFER HÄGGLUND,
PETER JOHANSSON

Patrik Eliardsson, Erik Axell, Börje Asp,
Thomas Ranström, Kristoffer Hägglund,
Peter Johansson

Effektivare frekvensutnyttjande för förbättrad samexistens

Omvärldsanalys

Titel	Effektivare frekvensutnyttjande för förbättrad sam-existens – Omvärldsanalys
Title	Efficient frequency utilization for enhanced co-existence – Literature survey
Rapportnr / Report No.	FOI-R--4975--SE
Månad / Month	Juni / June
Utgivningsår / Year	2020
Antal sidor / Pages	59
ISSN	1650-1942
Kund / Customer	FM
Forskningsområde	Ledningsteknologi
FoT område	Ledning och MSI
Projektnr / Project No.	E72878
Godkänd av / Approved by	Christian Jönsson
Ansvarig avdelning	Informations- och aerosystem

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

Försvarsmaktens tillgängliga frekvensutrymme har minskat till följd av en stor efterfrågan från kommersiella intressen. För att möta förbandens informationsbehov ökar dessutom antalet kommunikationssystem, sensorer och andra emitterande system på moderna plattformar. Det är därför viktigt att de frekvensband som finns tillgängliga för Försvarsmakten används så effektivt som möjligt. En omvärldsanalys av tekniker från olika teknikområden som bedöms kunna bidra till effektivare frekvensutnyttjande och förbättrad samexistens har genomförts och visar att omfattande forskning har bedrivits inom dessa områden det senaste decenniet. I denna rapport presenteras ett urval av de tekniker som bedöms kunna bidra till effektivare frekvensutnyttjande och förbättrad samexistens. Några områden är identifierade redan i tidigare arbeten, exempelvis dynamisk allokering av radioresurser (t.ex. dynamisk spektrumaccess (DSA) och effekttreglering) och adaptiva sändar- och mottagartekniker som kan hantera dynamiska interferenssituationer.

Effektivare frekvensutnyttjande genom adaptivitet kräver ökad intelligens i systemen. Den snabba utvecklingen inom artificiell intelligens (AI) och maskininläring för intelligenta radiosystem bedöms bidra till detta. Fortsatta studier inom detta område krävs för att avgöra vilka nya möjligheter som ges av AI-tekniker och vilka tillämpningar av AI som har störst potential att bidra till effektivare frekvensutnyttjande, men också i vilka delar av militära radiosystem det är lämpligt eller olämpligt att använda AI-tekniker, speciellt med hänsyn till robusthet, säkerhet och samexistens.

Omvärldsstudien visar att intresset har ökat för *in-band full duplex* (IBFD), d.v.s. samtidig sändning och mottagning på samma frekvens. För fortsatta studier är användning av IBFD för DSA, reläfunktioner, samt simultan telekrig och kommunikation av intresse.

Inom den militära vågformsutvecklingen för frekvensområdet 30-88 MHz är trenden att bandbredden ökar från 25 till 50 eller 100 kHz, för att stödja både tal och data. UHF-bandet (240-380 MHz) är ett ganska splittrat band med en blandning av olika typer av system: smal- och bredbandiga, fixfrekvens och frekvenshoppande system. Tekniska lösningar med större flexibilitet som skulle kunna medföra tätare allokering av frekvenser, samt en uppmjukning av hur bandet kan användas skulle kunna öka frekvenseffektiviteten inom UHF-bandet.

Frekvensbehovet för 5G, för att realisera de scenarion som är specificerade inom 5G-utvecklingen, är enormt. Det pågår ständigt en debatt om att övriga frekvensanvändare, exempelvis militära, ska släppa fler frekvensband till mobiltelefonin. Specifikt för 5G, relativt tidigare cellulära system, är förmågan att använda stor dynamiskt varierbar bandbredd och höga frekvenser (tiotals GHz). Ännu högre frekvenser (upp mot en THz) är enligt de flesta bedömare nödvändigt för en eventuell uppföljande 6G. I och med detta förväntas korthållskommunikation bli mer vanligt, vilket innebär tätare placering av basstationer jämfört med idag.

Nyckelord: kognitiv radio, dynamisk spektrumaccess, full duplex, 5G, AI, ML, frekvenshantering.

Abstract

The Swedish Armed Forces available frequency bands has decreased as a result of high demand from commercial interests in the last decades. In addition, to meet the new information needs, the number of communication systems, sensors and other emitting systems on modern platforms increases. Therefore, it is important that the frequency bands available to the Swedish Armed Forces are used as effectively as possible. A literature survey on specific research areas that are expected to contribute to more efficient frequency utilization and enhanced co-existence has been carried out. The survey shows that a vast amount of research has been conducted on these subjects during the latest decade. Hence, the content of this report is a selection of techniques that are expected to contribute to a more efficient frequency utilization for enhanced coexistence. Some of the research areas were identified already in previous work, such as dynamic resource allocation (e.g. dynamic spectrum access (DSA) and power control) and adaptive transmit and receive techniques for handling of dynamic interference situations.

More efficient frequency utilization by use of adaptivity requires even more intelligent systems. The rapid development of AI and machine learning for intelligent radio systems is considered to help meet this requirement. However, future study of this area is necessary in order to determine new capabilities of AI and which uses of AI that can contribute to more efficient frequency utilization. Furthermore, it is also necessary to evaluate in which part of military radio systems it is appropriate, from a robustness, safety and coexistence concern, to implement AI.

The survey shows that the interest for simultaneous transmission and reception on the same frequency, so called in-band full duplex (IBFD), has significantly increased in recent years. For future studies, the usage of IBFD for DSA, relaying and simultaneous electronic warfare and communication is of considerable interest.

Within military waveform development in the 30 – 88 MHz frequency range, the trend is to increase the bandwidth from 25 to 50 or 100 kHz in order to support both speech and data. The UHF band (240 – 380 MHz) is a relatively diverse band with a mix of different types of systems: narrow band, wide band, fixed frequency and frequency hopping. Technical solutions that provide greater flexibility and denser frequency allocation, as well as relaxing the requirements on how spectrum is utilized, is expected to improve efficiency within the UHF band.

The frequency need of 5G, to realize the scenarios specified within the 5G development, is enormous. Accordingly, there is an ongoing debate that aims to get other frequency users, such as the military, to free up spectrum so it can be used by cellular networks. New for 5G, in comparison to previous cellular systems, is the possibility to use highly variable bandwidths and the utilization of very high frequencies (in the range of tens of GHz). Even higher frequencies (in the THz range) is by most assessors deemed necessary for 6G. As such, short distance communication is expected to become even more common which entails denser base station placement compared to today.

Keywords: cognitive radio, dynamic spectrum access, full duplex, 5G, AI, ML, frequency management.

Innehållsförteckning

1	Inledning	7
1.1	Bakgrund	7
1.2	Syfte	8
1.3	Mål	8
1.4	Metod	9
1.5	Läsanvisningar	9
2	Kognitiva nät och radio	11
2.1	Forskningsprojekt i andra organisationer	11
2.1.1	Nato	12
2.1.2	Darpa	13
2.1.3	European Defence Agency	14
2.1.4	FP7	15
2.2	Dynamisk spektrumaccess	16
2.3	Bredbandig kommunikation	18
2.4	Maskininlärning och artificiell intelligens	19
2.4.1	Tillämpningar	20
2.4.2	Utmaningar	21
2.5	Adaptiv kodning och modulation	21
3	Full duplex	25
3.1	Forskningsprojekt i andra organisationer	25
3.1.1	Nato	25
3.1.2	Darpa	27
3.2	Tillämpningar	27
3.2.1	Militär tillämpning	27
3.2.2	Full duplex relänoder	28
3.2.3	Full duplex för dynamisk spektrumaccess	28
3.3	Utmaningar	29
3.4	Digital predistortion	29
4	Utveckling av militära radiosystem	31
4.1	Smalbandiga vågformer på VHF	31
4.2	Bredbandiga vågformer på UHF	31
4.3	Smalbandiga vågformer på UHF	31
4.4	L-band (och S-band)	32
4.5	Intelligenta HF-system	32
5	Utveckling av civila radiosystem	35
5.1	Frekvenser för 5G	35
5.1.1	DSA i 5G	37
5.1.2	Satellitsegment för 5G	37
5.2	Frekvenser för satellitkommunikation	39
5.3	6G	39
5.3.1	Frekvenser i 6G	40
5.3.2	Spektrumhantering i 6G	41
5.4	IEEE 802-standarder	41
5.5	Forskning inom Horizon 2020	42
6	Diskussion	45
7	Slutsatser	49
	Referenser	51

1 Inledning

Försvarsmaktens tillgängliga frekvensutrymme har minskat till följd av ett starkt tryck från kommersiella intressen. För att möta förbandens informationsbehov ökar dessutom antalet kommunikationssystem, sensorer och andra emitterande system på moderna plattformar vilket medför interferensproblem och en komplex systemintegration. Det är därför av vikt att de frekvensband som finns tillgängliga för Försvarsmakten används så effektivt som möjligt. Frekvensanvändningen måste ta hänsyn till en mängd faktorer, såsom tjänstebehov, interferens, dynamik orsakad av plattformsförändringar och grupperingssituationer, störskydd och samexistens mellan flera system på en plattform.

1.1 Bakgrund

Frekvensspektrumet för radio är en ändlig resurs som många olika typer av system konkurrerar om. Det kan exempelvis vara radarsystem (militära, civila och väder), radiokommunikationssystem (militära, civila och blåljusmyndigheter), mobiltelefoni och TV-sändningar. Idag delas frekvensspektrumet upp i olika delar för olika ändamål av myndigheten Post- och telestyrelsen (PTS).

De kommersiella frekvensbehoven bedöms under många år ha prioriterats före de försvarsmässiga dito och (total)försvarsförmågerelaterade frekvensbehov har inte tillgodosetts på ett adekvat sätt. Detta har lett till en spektrumbrist som påverkat försvarsförmågan negativt och detta riskerar att bli än mer påtagligt om den utvecklingen inte bryts utan fortskrider i samma takt som under de senaste decennierna.

Bristande tillgång till frekvensband för radio är en signifikant riskfaktor för all militär förmåga där radiofrekvensspektrum nyttjas. Även kortvariga funktionsnedsättningar i en stridsituation orsakad av frekvensbrist kan medföra stora risker för såväl omfattande personskador som stora materiella skador, det senare exempelvis i form av skador på viktig infrastruktur.

Några exempel på totalförsvarsrelaterade användningsområden som berörs är

- taktiska mark-, luft- och havsbaserade radiokommunikationssystem
- transportabel radiolänk
- navigationssystem
- radar
- sensorer
- zonrör
- vapensensorer och deras datalänkar
- strategiska fasta system, exempelvis FTN¹.

Vidare omfattas även ryldbaserade system för kommunikation, fjärranalys, navigation och tids-hållning.

För många militära funktioner och tjänster är inte bara tillgång till en viss total bandbredd viktig. Genom ett aktivt val av frekvensområde kan specifika vågutbredningsegenskaper, kopplade till den aktuella taktiska eller strategiska situationen, erhållas. Det kan vara egenskaper som lång eller kort kommunikationsräckvidd, smygsegenskaper, positionsbestämning, hastighetsbestämning, klassificering och identifiering av mål, upptäcktsavstånd, upptäcktssannolikhet, samt kommunikation utan fast infrastruktur. Detta gör att specifika frekvensområden måste kunna utnyttjas och att Försvarsmakten, för de militära tillämpningarna, måste kunna disponera frekvenser inom ett

¹ Försvarets telenät

mycket stort frekvensomfång, från tiotals kHz upp till hundratals GHz.

För radiokommunikation finns en rad faktorer som driver frekvensbehovet inom den militära sektorn. Exempel på sådana faktorer är krav på robusthet mot exempelvis avsiktlig störning, telekonflikter, utslagning av godtyckliga enheter och förbindelsevägar samt robust infrastruktur och behov av mobilitet skapar betydande behov av tillgängligt frekvensspektrum. Dessutom är informationssäkerhet viktigt och där bidrar exempelvis kryptoanvändningen ytterligare till ökat behov av bandbredd. Flera av de faktorer som driver frekvensbehovet för radiokommunikation är i hög grad även giltiga för andra funktioner, exempelvis radar. Utöver detta finns en rad trender som driver på frekvensbehovet som helhet inom försvarssektorn. Några av dessa är:

- nätverksorienterade tjänster, där ett av målen är informationsöverläge
- nya sensorfunktioner och nätbaserad sensorfusion
- högre mobilitet och bättre konnektivitet mellan enskilda enheter
- högre krav på interoperabilitet med andra nationer för att bland annat kunna ge och ta emot militärt stöd samt nationellt för samverkan med civila aktörer
- nya applikationer och stödsystem som är till stor del baserade på COTS² och optimerade för överföringsmedier med stor bandbredd och hög tillgänglighet samt med höga krav på felfri överföring
- *force protection*³, medför högre skyddsnivåer och noll acceptans för att soldater dödas vid insats.

Radarsystem har många användningsområden inom Försvarsmakten och totalförsvaret. Exempel är territorialbevakning (inom och bortom nationella gränser), hjälpmedel till bekämpning och väderradar. Även skydd och perimeterbevakning av kritisk infrastruktur och samhällsviktiga byggnader kan omfattas. I vissa fall konkurrerar radarsystem och kommunikationssystem om samma frekvensområde på grund av vågutbredningsegenskaper.

Denna omvärldsanalys har gjorts inom FoT-projektet *Effektivare frekvensutnyttjande för förbättrad samexistens* (EVEREST). Projektet EVEREST ska utveckla metoder och tekniska lösningar för att uppnå effektivare frekvensutnyttjande och förbättrad samexistens för kommunikationssystem. EVEREST utgår från tidigare resultat och erfarenheter från de tidigare FoT-projekten KORINT (2017-2019), RICOM (2014-2016) och ROAM (2011-2013). Inom detta projekt är frekvensanvändningen en mer central del än den varit inom de tidigare projekten.

1.2 Syfte

Syftet med omvärldsanalysen är att identifiera tekniker och metoder som bidrar till effektivare frekvensanvändning för förbättrad samexistens inom Försvarsmakten. Detta genom en litteraturstudie avseende forskningen och teknikutvecklingen relaterat till effektivare frekvensanvändning och förbättrad samexistens i framtidens radiosystem. Speciellt intressant är nya tekniker från den civila forskningen som bedöms vara applicerbar på militära tillämpningar.

1.3 Mål

Målet med rapporten är att presentera en sammanställning av forskningen och teknikutvecklingen som bidrar till att radiosystem kan använda frekvensspektrumet effektivare i framtiden samt hur användningen av frekvensspektrumet påverkar framtida radiosystem. Målet med rapporten är också att, utifrån sammanställningen av forskningen och teknikutvecklingen, identifiera frågeställningar som är grund för forskningsaktiviteter, vilka medverkar till effektivare frekvensanvändning för förbättrad samexistens inom Försvarsmakten framgent.

²commercial off-the-shelf

³skydd för väpnade styrkor

1.4 Metod

Omvärldsanalysen utgår från några av de områden som identifierades i rapporten [1] men utökas också till att inkludera fler områden av betydelse. Studien baseras på öppna källor med fokus på vetenskapliga publikationer under senaste decenniet. Utöver vetenskapliga publikationer har projektbeskrivningar och resultat från civila och militära forskningsprogram analyserats. Omfattande forskning har gjorts inom områdena, varför en fullständig genomlysning inte utförts utan beskrivningar av tekniker och trender på en mer övergripande nivå har därför studerats.

1.5 Läsanvisningar

I kapitel 2 beskrivs konceptet kognitiv radio och hur forskningen utvecklats inom detta område genom åren. Flera centrala begrepp som dynamisk spektrumaccess, bredbandig kommunikation, maskininlärning, artificiell intelligens samt adaptiv kodning och modulation förklaras i detta avsnitt. I kapitel 3 beskrivs tekniker som möjliggör samtidig sändning och mottagning på samma frekvens *In-band Full Duplex*. Denna teknik möjliggör många nya militära scenarion som tidigare inte varit möjligt. Digital predistorsion har likheter med *In-band Full Duplex* och förklaras i samma kapitel. Vidare i kapitel 4 och 5 presenteras utvecklingen och trender inom militära- och civila radiosystem. I kapitel 6 analyseras och diskuteras de trender som vi ser inom forskningen i de områden som studerats och i kapitel 7 presenteras slutsatserna från denna analys.

2 Kognitiva nät och radio

Begreppet kognitiv radio brukar i allmänhet tillskrivas Joseph Mitola som introducerade det i slutet av 1990-talet [2], [3]. Enligt Mitolas definition är en kognitiv radio en apparat som anpassar sig efter rådande kommunikationsbehov och förhållanden för att välja det bästa sättet att kommunicera. Trots att begreppet kognitiv radio myntades först i slutet av nittioalet, fanns idéer om automatisk inläring och apparater som känner av radiospektrumet flera decennier tidigare [4].

En väsentlig del av kognitiv radio är dynamisk spektrumaccess (DSA) [5]. En stor del av forskningslitteraturen om kognitiv radio behandlar DSA, och i vissa fall har begreppen kognitiv radio och DSA t.o.m betraktats som ekvivalenta. I den vidare meningen av begreppet kognitiv radio är DSA dock bara en delkomponent. Kognitiv radio innefattar dessutom andra former av

- automatisk avkänning
- anpassning och inläring i kommunikationssystem
- länkadaption (effektkontroll, adaptiv modulation och kodning)
- kanal- och brusestimering
- adaptiv filtrering
- resurshantering av olika slag på olika nivåer i både enskilda radiolänkar och i hela radionät.

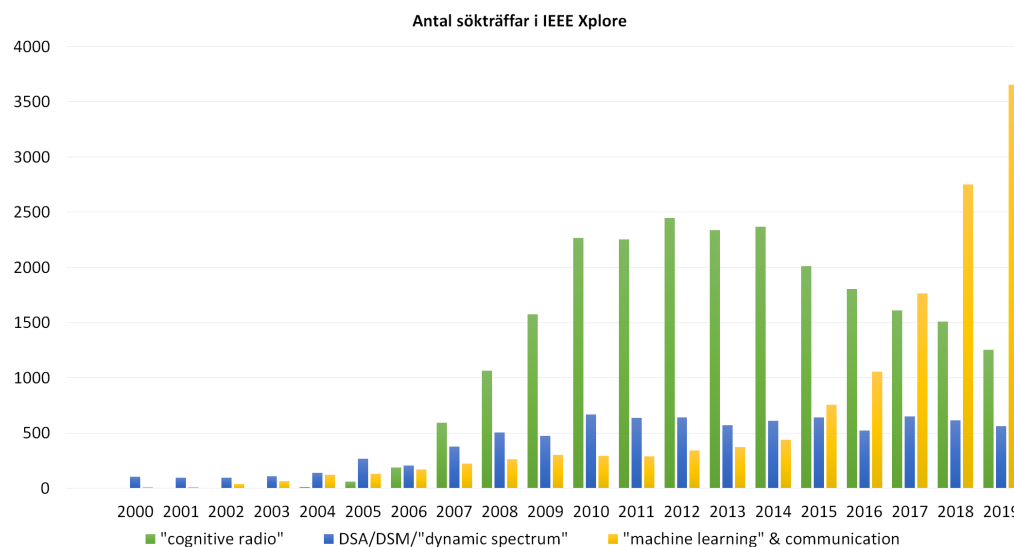
Den snabba utvecklingen inom maskininläring (ML), artificiell intelligens (AI) och autonomi under det senaste decenniet kan ge nya möjligheter till avkänning, inläring och anpassning även i radiokommunikationssystem. Detta har också en tydlig koppling till de ursprungliga idéerna kring kognitiv radio. Med begreppet AI avses i denna rapport alla former av intelligens i system i en vidare mening, medan ML syftar på tekniker som är inlärda baserat på träningsdata. En stor del av den senaste tidens AI-forskning har fokuserat på ML. I forskningslitteraturen under det senaste decenniet finns en ansevärd mängd publikationer som nämner kognitiv radio, men det har också dykt upp många nya begrepp inom AI, ML och deep learning som försöker lösa samma eller liknande problem med nya metoder. De senaste tjugo årens forskning inom kognitiv radio har på senare år gått över mot forskning inom AI och ML för kommunikation [6]. Figur 2.1 visar antalet vetenskapliga publikationer per år i databasen IEEE Xplore som nämner begreppen *cognitive radio*, *DSA/DSM*¹/*dynamic spectrum* respektive kombinationen av begreppen *machine learning* och *communication*. Det är tydligt att begreppet *cognitive radio* hade sin topp för 5-10 år sedan, men att *machine learning* istället är på stark uppgång i antal vetenskapliga publikationer. Antalet publikationer inom dynamisk spektrumhantering har varit ganska konstant under de senaste tio åren.

Resten av detta kapitel fokuserar på vad som gjorts in om andra organisationer inom detta område, DSA, bredbandig kommunikation, maskininläring samt adaptiv modulation och kodning. Dessa områden har en betydande potential att bidra till effektivare frekvensanvändning i militära radiosystem.

2.1 Forskningsprojekt i andra organisationer

Flera organisationer, som Nato, Darpa, European Defence Agency (EDA) och EU:s sjunde ramprogram har haft flera olika projekt som har studerat kognitiv radio och kognitiva nät. Några utvalda projekt från dessa organisationer beskrivs i detta avsnitt.

¹eng. *dynamic spectrum management*



Figur 2.1: Antal sökträffar i IEEE Xplore de senaste 20 åren.

2.1.1 Nato

Nato har genom åren haft ett flertal olika *Research Task Groups* (RTG) som undersökt och föreslagit åtgärder för hur Nato kan använda tilldelat frekvensspektrum mer flexibelt. Många av arbetena handlar om olika former av dynamisk spektrumaccess och kognitiv radio.

2007 startades RTG-035 med titeln *Cognitive Radio in NATO*, vilket är den första RTG om kognitiv radio. Gruppen skulle arbeta i tre år, till och med december 2010, men arbetet förlängdes med ett år [7]. I rapporten konstateras att frekvenstilldelningen inom Nato är väldigt statisk, och att medlemsländer försöker harmonisera frekvensspektrumet för militära system. Att genomföra förändringar i frekvenstilldelningen kan ta flera år. Vidare konstateras att de militära kommunikationssystemens krav tillsammans med den begränsade frekvenstillgången för militära system kommer oundvikligen att leda till spektrumbrist på grund av ineffektivt nyttjande av tillgängligt spektrum. Detta motiverar arbetet med att ta fram smartare och flexiblarare sätt att använda tillgängligt spektrum.

I rapporten [7] redovisas för- och nackdelar med att införa kognitiv radio och dynamisk spektrumaccess. De redovisar olika tekniker, exempelvis inom spelteori och iterativ *waterfilling* för att fördela frekvenser mellan olika noder och system. Behovet av att kunna utvärdera olika tekniker genom simuleringar identifieras. Ett simuleringskoncept baserat på vinjetter som utvecklats inom andra delar av Nato presenteras. I slutsatserna av rapporten konstateras bland annat att gapet mellan teoretiska koncept och riktiga implementationer är för stort och att det finns ett behov av ett experimentellt frekvensband för utveckling av föreslagna tekniker. En av de största utmaningarna är hur kognitiva radiosystem ska introduceras inom militären. Därför rekommenderas det att Nato tar fram en realistisk tidsplan för införandet.

RTG-050 *Cognitive Radio in NATO II - Towards Dynamic Spectrum Management in NATO* skapades som efterföljare till RTG-035 med uppgift att fortsätta att studera kognitiv radio inom Nato. Arbetsgruppen startade i januari 2012 och deras slutrapport utgavs 2016 [8]. Målet med arbetet var att föreslå små och enkla lösningar för att underlätta frekvensförvaltningen och för att förbättra frekvensutnyttjandet. Utöver dessa enklare lösningar föreslås tekniker som ligger längre fram i tiden, där exklusiv tillgång till frekvensspektrum frångås och istället baseras på delad användning av frekvensspektrum. De enkla lösningar som föreslås av arbetsgruppen är:

- Förkorta fördröjningen i tilldelningsprocessen, d.v.s. tiden mellan en förfrågan och ett utlåtande.
- Förfina tidsupplösningen (från en dag till några timmar) av frekvenstilldelningen.
- Introducera generisk tilldelning av spektrumband till nationer, där minimala tekniska krav ställs på spektrumbanden.
- Introducera spektrummedvetenhet i tilldelningsprocessen för att förbättra tilldelningarna.
- Förbättra spektrumhanteringsverktygen.

Baserat på de arbeten som genomförts inom RTG-035 och RTG-050 startades, 2015, RTG-065 *Cognitive Radio Networks*. Arbetetsgruppen var treårig och arbetet avslutades därmed 2017, men slutrapporten utgavs först 2019 [9]. Inom detta RTG fokuserades arbetet mer på nätrelaterade tekniker för att åstadkomma end-to-end-optimeringar inom ett nätverk. I de tidigare arbetsgrupperna var huvudfokus på dynamisk frekvenshantering, men för kognitiva radionätverk breddades området till att inkludera alla parametrar inom nätverket och hur kontrollinformation ska utbytas mellan nätverkslager och noder i nätverket. Arbetsgruppen konstaterar att TRL²-nivån för *Cognitive Radio Networks* är fortsatt låg och att ytterligare forskning krävs för att höja TRL-nivån så att system kan testas i verkligheten. Utifrån detta arbete föreslås en arkitektur för kognitiva radionät som kan användas som ett första steg i utvecklingen och standardiseringen av kognitiva taktiska radiosystem.

2.1.2 Darpa

Inom *Defense Advanced Research Projects Agency* (Darpa) finns en uppsjö olika projekt, eller program som de kallas inom Darpa, med koppling till hur frekvensresurser ska användas på ett effektivt sätt. Nedan beskrivs några av de projekten inom kognitiv radio som är av relevans.

Radio Frequency Machine Learning Systems (RFMLS) syftar till att tillämpa maskininlärning inom olika områden som nyttjar det radiofrekventa spektrumet t.ex. radar, signalspaning, telekrig och kommunikation för att pressa de klassiska prestandagränserna inom dessa områden ytterligare [10]. Fyra specifika uppgifter lyfts fram:

1. *RF fingerprinting* - Traditionell trådlös säkerhet bygger på att varje enhet har en mjukvarubaserad identitet, vilken ofta kan bli hackad eller klonad. Målet för RFMLS är att känna igen specifika radiosändare utifrån deras unika brister i hårdvaran (sändarens fingeravtryck).
2. *RF fingerprinting enhancement* - Utöka den trådlösa säkerheten genom att kommunikationssystem lär sig att modifiera vågformen för att förbättra det naturliga fingeravtrycket.
3. *Spectrum awareness* - Lära sig skillnaden mellan viktiga och betydelselösa signaler inom stora bandbredder för att skapa en mer användbar och pålitlig bild av det radiofrekventa spektrumet.
4. *Autonomous RF system configuration* - För att förbättra spektrumbilden ytterligare ska RFMLS lära sig hur tillgängliga hårdvaruparameter ska konfigureras för att hitta så många signaler som möjligt i våra RF-miljöer.

RFMLS-programmet gick till BAE Systems och kontraktet är värt 9,2 miljoner dollar. Arbetet är uppdelat i tre faser där vardera fas löper ett år. Fas ett startade i juni 2018 och programmet avslutas därmed 2021 [11].

Spectrum Collaboration Challenge (SC2) syftar till att säkerställa att det exponentiellt växande antalet militära och civila trådlösa enheter ska få full tillgång till det mycket allokerade elektromagnetiska spektrumet. Tävlingslag ska utveckla spektrumaccesstekniker som gör att

²Technology readiness level

radionätverk samarbetar om hur de ska dela på tillgängligt radiospektrum, för att undvika interferens och nyttja spektrumet så effektivt som möjligt [12]. Vid *Mobile World Congress* 2019 i Los Angeles avgjordes tävlingen och efter tre års tävlande stod GatorWings, ett lag från The University of Florida, som vinnare och fick motta 2 miljoner dollar [13].

Advanced RF Mapping (RadioMap) är ett projekt som strävar efter att skapa en lägesbild av den radiofrekventa (RF) miljön genom att använda lågkostnadssensorer utspridda över ett område. Visionen är att alla redan tillgängliga RF-enheter, t.ex. taktisk radio, ska bidra till skapande av RF-lägesbilden. RadioMap kan därigenom bidra till att göra spektrumhanteringen mer effektiv då operatörerna får ett verktyg som kan visualisera riktiga och potentiella interferenser samt frekvensanvändandet [14]. Lockheed Martin Corp. fick 11,8 miljoner dollar för fas 3 i programmet inom vilket ett färdigt system skulle tas fram och överlämnas till militären. Fas 3 pågick till sommaren 2016 [15]. RadioMap-projektet överlämnades till U.S. Marine Corps 2018. Även U.S. Army har visat intresse och har gjort försök med RadioMap [16].

Samexistens mellan radar och radio är vad projektet *Shared Spectrum Access for Radar and Communications* (SSPARC) vill skapa. Detta skapas genom att radio- och radarsystem delar på samma frekvensband. Två typer av frekvensdelning är i fokus inom projektet: militär radar delar frekvensområde med antingen militära radiosystem eller med civila radiosystem. SSPARC betraktar frekvensdelningen som ett samarbetsproblem, inom vilket information mellan systemen delas i realtid. Tidigare har antingen radar- eller radiosystemet ignorerat det andra systemet [17]. Fas 2 av projektet annonserades ut 2015 och det finns officiella planer på en fas 3 som innebär fältprov av framtagna teknik. Under fas 1 studerades samexistensen mellan två olika radarsystem och bl.a. *Joint Tactical Radio System* (JTRS) och *Long-Term Evolution* (LTE) i simulering. Målet för fas 2 är att utveckla spektrumdelningsteknik och genomföra en demonstration med den utvecklade tekniken [18].

2.1.3 European Defence Agency

Cognitive Radio for Dynamic Spectrum Management (CORASMA) var ett treårigt projekt inom EDA som startade i november 2010. Projektet finansierades av sju länder: Belgien, Frankrike, Tyskland, Italien, Polen, Portugal och Sverige [19]. Från Sverige deltog FMV och SAAB.

Syfte med CORASMA var att höja den europeiska försvarsindustrins kompetens inom kognitiv radio och utveckla metoder för att effektivt förbättra användandet av frekvensspektrumet. Projektet tog fram en dynamisk spektrumhanteringsmetod på systemnivå som också implementerades och utvärderades i en simulator [20]. Simulatorens utvecklades inom CORASMA och simulerar de tre första lagren i OSI-modellen, d.v.s. fysiska lagret, datalänklaget samt nätverkslaget. Kanalkodning och modulation är implementerat i fysiska lagret och det är I/Q-sampel som skickas mellan de olika noderna i nätverket, via en implementerad kanalmodell. Detta för att spektrumavkänningsfunktioner ska kunna arbeta med I/Q-sampel och inte behöva abstraheras ytterligare. Utöver simulatorens utvecklades en *Basic waveform* utan någon förmåga att dynamiskt välja frekvens. Vågformen användes som en referens till de olika partnernas implementationer av dynamisk spektrumaccess i simulatorens [19].

Inom EDA-projektet *Multi Band Efficient Networks for Ad Hoc Communications* (MAENA) är dynamisk spektrumhantering i fokus. MAENA syftar till att undersöka frågan om att kombinera dynamisk användning av VHF- och UHF-banderna för att optimera prestanda i kommunikationsnät. Projektet löper från 2018 till 2022. Inom ramen för projektet utförs en studie av nya koncept för dynamisk spektrumhantering (eng. *dynamic spectrum management*, DSM), med syfte att effektivare utnyttja frekvensutrymmet för radiokommunikation. De föreslagna lösningarna kommer att behandla frågan om hur radiosystemet på bästa sätt bör använda de två militära frekvensbanden VHF (30-88 MHz) och UHF (225-400 MHz). Stort fokus i projektet är vidareutvecklingen av den simulator som utvecklades i CORASMA, för utvärdering av nya koncept.

Deltagande partners kommer från Frankrike (Thales, koordinator), Sverige (FOI och SAAB AB), Belgien (Royal Military Academy), Tyskland (Thales och Rohde & Schwarz), Polen (Military University of Technology), Finland (University of Oulu) och Norge (SINTEF och FFI).

2.1.4 FP7

Projektet *Sensor Network for Dynamic and Opportunistic Radio Access* (SENDORA) och *Physical Layer for Dynamic Spectrum Access and Cognitive Radio* (PHYDYAS) är två projekt inom FP7³ som startade 2008 och varade till 2010. Inom SENDORA var fokus på olika sensornätverk och hur kognitiv radio kan användas för att hitta icke utnyttjat frekvensspektrum, så kallade spektrumhål. Nätverket skulle sedan använda dessa spektrumhål utan att skapa interferens [21]. Projektet PHYDYAS fokuserade istället på det fysiska lagret och hur det kan utformas med FBMC (eng. *filterbank multicarrier*) för att realisera dynamisk spektrumaccess och kognitiv radio-konceptet. En realtidsdemonstrator togs fram inom projektet för att visa det nydesignade fysiska lagret för dynamisk spektrumaccess [22].

Från 2010 till 2012 pågick det ett flertal projekt inom FP7 med koppling till kognitiv radio och dynamisk spektrumaccess. Inom projektet *Spectrum and Energy Efficiency Through Multi-Band Cognitive Radio* (SACRA) studerades en multibands kognitiv radio för mobilkommunikation i frekvensbanden 790-862 MHz och 2,6 GHz. Målet var att försöka minimera interferens genom att välja det mest lämpliga bandet utefter transmissionsavstånd samt att använda minimal uteffekt men med bevarad QoS [23].

Projektet *Quantitative Assessment of Secondary Spectrum Access* (QUASAR) studerade tekniska och ekonomiska aspekter av dynamisk spektrumaccess. Målet var att ta fram riktlinjer för hur affärsmodeller kan appliceras för opportunistisk spektrumaccess [24]. Några av de övergripande slutsatserna från projektet är att överlagrad interferens från multipla sekundära användare är den huvudsakliga begränsningen för opportunistisk spektrumaccess och därför är det viktigt att kontrollera den. Att använda sig av en geografisk databas över spektrumanvändningen i valet av frekvens visar sig vara mer effektivt än att använda spektrumavkänning. Samarbete mellan primära och sekundära användare och inom sekundära system är fördelaktigt men skapar overhead [25].

Inom projektet *Quality of Service and Mobility Driven Cognitive Radio Systems* (QoS MOS) eftersträvades effektivt användande av spektrum och uteffekt, samexistens med andra tjänster, samt bra och prisvärd användarupplevelse [26]. En geografisk databas över spektrumanvändningen ansågs vara den främsta tekniken för att realisera opportunistisk spektrumaccess även för detta projekt. Vidare ingår i konceptet även en resurshanterare och en spektrumhanterare med kognitiva algoritmer för att hantera frekvensvalet. Det visar sig att spektrumhanteraren fungerar väl i ett distribuerat självorganiserande nätverk (eng. *self-organizing network*, SON), vilket är ett bra steg mot att kunna sätta ut självkonfigurerade basstationer [27].

Projektet *Flexible and Spectrum-Aware Radio Access Through Measurements and Modelling in Cognitive Radio Systems* (FARAMIR) hade som mål att ta fram tekniker för att öka kännedomen om radiomiljön och frekvensspektrumet i kommande radiosystem. Projektet utvecklade algoritmer för att mäta radiomiljön för att sedan implementera dessa i olika prototyper. Detta gjordes genom att kombinera mätningar från flera noder för att hitta spektrumhål, andra sändare eller interferenskällor. På så sätt skapas en radiomiljökartan vilken ligger till grund för flera senare val av radiosystemet [28]. Projektet utvärderade metoderna för flertalet olika scenarion, bl.a. för flera ad hoc-nätverk [29].

³EU:s sjunde ramprogram för forskning och innovation.

2.2 Dynamisk spektrumaccess

Dynamisk spektrumaccess (DSA) benämns ibland också DSM (eng. *dynamic spectrum management*), och ett annat angränsande begrepp är spektrumdelning eller DSS (eng. *dynamic spectrum sharing*). DSA för kognitiv radio brukar ofta relateras till opportunistisk spektrumaccess, vilket innebär att frekvensspektrum utnyttjas av en sekundär användare utan att försämma kommunikationsmöjligheterna för den primära användaren (ofta spektrumägaren). Spektrumdelning brukar vanligen delas in i tre olika typer [30]:

- *underlay* (underliggande)
- *overlay* (överlagrad)
- *interweave* (sammanvävd).

Underliggande DSS innebär att en sekundär användare tillåts att kommunicera om den inte försämrar kommunikationsprestanda för primära användare. Den sekundära användaren är alltså i detta fall en kognitiv radio som måste känna till vilken påverkan den gör på primära användare, och kan anpassa sin kommunikation för att undvika försämring. I vissa sammanhang kallas detta också för att kommunicera på *non-interference basis* (NIB), d.v.s. utan att skapa interferens (med primära användare). NIB är i grunden ett begrepp som används för olika typer av radiokommunikation som inte nödvändigtvis innefattar kognitiv radio.

Överlagrad DSS innebär att en sekundär användare kommunicerar samtidigt som primära användare, och att den tillåts göra det eftersom den samtidigt bidrar till att kommunikationen inte försämras för de primära användarna. Detta kan göras exempelvis genom att fungera som relä, eller att utnyttja kunskap om de primära användarna för att anpassa sändningen så att den inte skapar interferens hos den primära mottagaren.

Sammanvävd DSS innebär att en sekundär användare utnyttjar lediga radioresurser, eller spektrumhål, som inte används av primära användare, exempelvis under tider då primära användare inte kommunicerar på ett visst frekvensband. För att identifiera dessa spektrumhål, vid en given tidpunkt, plats och frekvensband krävs också metoder för spektrumavkänning (eng. *spectrum sensing*) [31]–[33].

Inom dessa tre olika typer kan det också finnas varianter där spektrum delas på liknande sätt men på lika villkor, dvs utan att det finns primära och sekundära användare. Detta kan då också ske genom samarbete mellan olika kognitiva system eller användare för att på så sätt förbättra effektiviteten och spektrumutnyttjandet.

Begreppet DSS har också använts inom utvecklingen av 5G för spektrumdelning mellan 5G och LTE. För cellulära system är det främst en metod som möjliggör en enklare och snabbare övergång från LTE till 5G, och där LTE och 5G kan nyttja samma frekvensband. 5G kan på detta sätt introduceras i frekvensband som idag endast används av LTE och gör det möjligt för operatörerna att dynamiskt växla mellan LTE och 5G-täckning på befintliga 4G-sajter.

Begreppet spektrumavkänning brukar innebära detektering av lediga kanaler eller frekvensband som inte redan används av någon annan, men också att karakterisera kanaler för att kunna använda dem på bästa sätt. Det kan alltså även omfatta att identifiera och karakterisera störning, interferens eller andra kommunikationssignaler. Mycket av forskningen inom spektrumavkänning för kognitiv radio har behandlat just förmågan att upptäcka lediga kanaler [31]. För att upptäcka lediga kanaler finns ett antal olika typer av detektionsalgoritmer. Algoritmer som utnyttjar specifika egenskaper hos den signal som ska upptäckas brukar kallas *feature detection*. Detta är användbart exempelvis på frekvensband där det finns användare med en känd kommunikationssignal, som t.ex. följer en välkänd standard. De flesta kommunikationssignaler uppvisar exempelvis periodiska egenskaper som gör att signalen är korrelerad i tiden, vilket kan utnyttjas för detektion på olika sätt [31], [34]–[37]. Algoritmer som inte utnyttjar någon känd egenskap alls hos signalen brukar kallas *blind detection*. Exempel på denna typ av algoritmer

är energidetektion, som enbart mäter energin hos den mottagna signalen, eller olika varianter av egenvärdesdetektion. Dessa kan utnyttja korrelationsegenskaper hos den mottagna signalen exempelvis genom att använda flera antenner [31], [35], [38]. Ju mer information om den signal som ska upptäckas som kan utnyttjas, desto bättre detektionsprestanda kan uppnås. Men ju mer specifika egenskaper som utnyttjas, desto mindre generell blir detektorn. Vilken typ av detektionsalgoritm som är mest lämplig beror på tillämpningen, och vilken kunskap som finns om de signaler som ska upptäckas.

Spektrumavkänning kan också innebära att karakterisera kvaliteten på olika kanaler. Ett vanligt och enkelt mått är att estimerar bruseffekten, och på så sätt mäta kanalkvalitet genom signal-brus-förhållandet (SNR) på varje kanal. I vissa tillämpningar är detta inte tillräckligt för att bedöma kommunikationsprestanda. Mer detaljerad kanalestimering eller brusestimering kan då vara nödvändig för att karakterisera och utnyttja kanalerna på bästa sätt.

På FOI har flera tidigare projekt genomförts inom DSA och kognitiv radio för ungefär ett decennium sedan. FoT-projektet Dynamiska Telekommunikationslösningar (DynamiT, 2008-2010) hade som syfte att bedriva forskning och utveckling inom flexibla dynamiska lösningar för effektiv kommunikation i taktisk miljö. Ett annat syfte var att utreda hur den stora potentialen som finns i tekniken ska nyttjas på högre systemnivå. DSA och kognitiv radio var huvudfokus för projektet.

Projektet publicerade flera rapporter bland annat slutrapporten [39]. Rapporten [40] presenterade resultat från ett arbete med säkerhetslösningar och med algoritmer för dynamisk frekvensallokering. En arkitektur baserad på virtuella maskiner föreslogs. Den centrala egenskapen är förmågan hos en virtuell maskin-monitor att separera och isolera delar inom systemet. Detta kan användas för att separera olika klasser av information. I rapporten [41] värderades tidigare föreslagna algoritmer för spektrummätning och dynamisk frekvensallokering, benämnda ICF-detektion och APD-detektion. Utvärderingen visade att ICF- och APD-detektorerna ger bättre förmåga att upptäcka pulsad störning. Utvärderingen visade vidare att kommunikationssystem som använder dessa algoritmer för spektrummätning har lägre symbolfelssannolikhet än system som använder energidetektion.

Rapporten [42] beskrev dagsläget (2009) beträffande DSA inom både den militära och civila domänen. Vidare beskrevs vilka frågor som är viktiga att hantera vid en utveckling mot DSA och vilka tekniska problem som kräver fortsatt forskning för Försvarsmaktens behov. Bland slutsatserna kan nämnas att DSA på ett så stort frekvensutrymme som möjligt torde öka möjligheterna för fler aktörer att komma in på telekommunikationsmarknaden vilket i sin tur ökar konkurrensen och ökar antalet leverantörer att välja på vid anskaffning av system. Nyckelfrågan beträffande DSA för Försvarsmaktens behov är att sekundäranvändning sker på *non-interference basis*. Detta då tillförlitlig kommunikation (hög tillgänglighet och robusthet mot störningar och interferenser) är ett fundamentalt krav på militära system. Av det skälet krävs att för varje DSA-koncept som berör militära användare så är störningsproblematiken den fråga som automatiskt måste ligga högst på agendan.

Under perioden 2003-2004 genomförde Wireless@KTH, FOI, CIC (Handelshögskolan i Stockholm) och PTS på uppdrag av Vinnova en studie med titeln *Dynamic Spectrum Access, Phase I: Scenarios and Research Challenges*. Projektet delades in i en förstudie (fas ett) och en forskningsfas (fas två). Någon fas två blev det dock aldrig, men en rapport producerades inom fas ett [43].

Utgångspunkten för projektet var att de rådande spektrumhushållningsmekanismerna ansågs vara en viktig bidragande faktor till de långa ledtiderna från innovation till marknad inom radio-, teknik- och systemområdena. Detta har i sin tur medfört att de stora telekomföretagen varit framgångsrika i att styra den tekniska utvecklingen. Däremot har ytterst få mindre innovationsföretag haft en uthållig tillväxt, trots att kompetensen i Sverige inom dessa områden var och är mycket hög.

Projektet syftade till att studera nya, mer flexibla, spektrumallokeringsmetoder som i kombination med olika tekniker har potentialen att sänka inträdesgränserna för nya aktörer och ge radikal förbättring av effektiviteten i spektrumanvändningen. Teknikerna som studerades var exempelvis multiradioaccess, nya bredbandstekniker, mjukvarudefinierad radio och spatiala tekniker (t.ex. smarta antenner och flerhoppsscheman). Syftet var vidare att undersöka de ekonomiska och regulatoriska konsekvenserna av DSA-tekniker och frekvensförvaltningsregimer.

Den första fasen av projektet, hade som mål att ge en kvalitativ bedömning av de potentiella fördelarna med dynamiska spektrumåtkomstregimer. Analysen i rapporten indikerade att det finns potential att både sänka inträdesgränserna för nya aktörer såväl som att ge förbättring av effektiviteten i spektrumanvändningen. Slutsatsen från studien var att mer forskning behövs inom dessa områden för att uppnå ovannämnda fördelar. En biprodukt från studien blev ett antal nya och intressanta spektrumhanteringskoncept, exempelvis begreppen *realtidsspektrumhandel* och *användarrättigheter*. Flera av dessa har aktualitet än idag. Slutligen gav rapporten en översikt över de då viktigaste pågående forsknings- och policyarbetena inom DSA-området.

2.3 Bredbandig kommunikation

Krav på högre datatakt tillsammans med den begränsade tillgången på ledigt spektrum har drivit på den civila utvecklingen av extremt bredbandiga mottagare och sändare. Bredbandig kommunikation har flera olika tillämpningar, exempelvis

- stor momentan bandbredd för ökad kapacitet
- DSA
- bandspridning som skydd mot störning
- bandspridning som skydd mot avlyssning och upptäckt.

Kommunikation vid höga frekvenser (tiotals eller t.o.m. hundratals GHz) där det finns stora tillgängliga frekvensband ger möjlighet att utnyttja momentant hög bandbredd (hundratals MHz) vilket ger höga datatakt och systemkapacitet. Detta är den främsta anledningen för utvecklingen av bredbandiga mottagare och sändare inom 5G och 6G. Det skapar även ett flexiblere system, då resurserna (t.ex. frekvens) kan tilldelas mer dynamiskt än tidigare. För 5G tillåter standarden redan bandbredder upp till 400 MHz, framförallt vid frekvenser mellan 24-70 GHz, s.k. millimetervågor (eng. *mmWave*). Historiskt har millimetervågor inte använts för mobilt bredband p.g.a. stora vågutbredningsförluster och kraftig dämpning genom exempelvis byggnader eller skog. Med nya avancerade antenntekniker kan begränsningar i räckvidd minskas. I utvecklingen av 6G diskuteras användning av ännu högre frekvenser (hundratals GHz till någon THz) och större bandbredder (flera GHz) än i 5G, vilket sannolikt kommer driva på utvecklingen av bredbandig kommunikation ytterligare.

Ett annat användningsområde av bredbandig kommunikation är DSA, där det är av stort intresse att kunna övervaka ett extremt stort frekvensband simultant i syfte att adaptivt välja de bästa kanalerna för kommunikation. Allmänt kan bredbandiga mottagare och sändare ge ökade möjligheter till adaptiv spektrumanvändning, eftersom kommunikationen blir mer flexibel. Kontinuerlig övervakning av ett stort frekvensband, motsvarande många kanaler, är naturligtvis också av intresse ur ett signalspaningsperspektiv.

Bandspridning som skydd mot störning, avlyssning och upptäckt är klassiska tekniker för militär skyddad kommunikation. Möjligheten att använda större bandbredd ökar denna förmåga. I [44] visas att kommunikation är möjlig genom bandspridning till 6 GHz bandbredd med en signaleffekt lägre än bruseffekten. Detta ger möjligheter att kommunicera, men stora svårigheter för en utomstående att avlyssna eller upptäcka signalen. Fortsatt utveckling av denna typ av teknik genomfördes bl.a. inom DARPA-programmet *Hyper-Wideband Enabled RF Messaging* (HERMES) som strävade efter att utveckla en störskyddsförmåga som är flera magnituder bättre än den senaste tekniken. Detta för att tillhandahålla en garanterad anslutning för kritisk kommu-

nikation i miljöer där elektromagnetiska interferenser förekommer. För att åstadkomma denna extrema störskyddsförmåga fokuserade HERMES-programmet på extrem breddbandighet med momentana bandbredder över 10 GHz för RF-länkar under 20 GHz. Datatakten ska vara 100 kb/s med en processvinst som kan undertrycka en störsignal som är 70 dB starkare än kommunikationssignalen [45]. Ca 4,5 miljoner dollar kan fördelas till flera olika grupper och två områden specifikt är av intresse: utveckling av en systemarkitektur samt utveckling av fotonikmottagare. Projekten startade 2015 och pågick i 18 månader [46].

En svårighet med extremt breddbandig kommunikation är den stora dynamik som krävs för att detektera signaler med väldigt varierande effekt i olika delar av frekvensbandet. Att kunna hantera den stora dynamiken är nödvändigt för att kunna ta emot hela frekvensbandet samtidigt. DARPA-projektet *Protecting Wideband RF Systems in Congested Electromagnetic Environments* (WARP) är ett nytt projekt med utlysning i början av 2020. Projektets syfte är skydda breddbandiga mottagare (radio och radar) mot interferenser av olika slag, exempelvis aktiv störning eller egen-genererad störning (från t.ex. egna radiosändare). Det ska lösas genom att utveckla breddbandiga adaptiva filter och analoga kretsar som selektivt kan dämpa eller släcka ut interferenser för att skydda mottagaren från att mättas. En mottagare mättas då en mottagen signal överskrider mottagarens dynamiska område, d.v.s. skillnaden mellan den svagaste och starkaste signalen en mottagare kan ta emot. Filtren ska vara breddbandiga och styrbara så att de hela tiden kan anpassas till den omgivande elektromagnetiska miljön. De analoga kretsarna för att släcka ut interferenser är avsedda för tekniker för att sända och ta emot på en och samma frekvens samtidigt (*same-frequency simultaneous transmit and receive*, STAR) [47]. Att sända och ta emot samtidigt på samma frekvens benämns vanligen också full duplex eller *in-band full duplex* (IBFD), så även i denna rapport, se Avsnitt 3.

Även tidigare DARPA-projekt har behandlat olika aspekter för utveckling av breddbandig kommunikation, exempelvis hårdvaruutveckling i programmet *Adaptive RF Technologies* (ART) och signalbehandling för att kunna hantera den stora datamängden tillräckligt snabbt genom komprimerande sampling inom programmet *Analog to Information*.

2.4 Maskininlärning och artificiell intelligens

Maskininlärning (ML) är ett delområde inom AI, och innebär en algoritm eller *maskin* som tränas att utföra en uppgift utgående från en uppsättning träningsdata. ML och AI är teknikområden som bidrar till utvecklingen av intelligenta radiosystem som kan möjliggöra effektivare frekvensutnyttjande. Traditionella algoritmer utvecklade med en ingenjöransats kräver ett visst mått av domänkunskap. Exempelvis kan en felrättande avkodare baseras på kunskap om kanalen som ett kodord skickas på, och en optimal mottagare kan härledas enligt den antagna modellen. Inom maskininlärning kan avkodaren istället tränas från ett antal exempel av mottagna data, skickade data och något kriterium för optimering utan någon som helst kunskap om kanalen.

Maskininlärning delas vanligen in i följande tre olika typer [48], [49]:

- övervakad inlärning (*supervised learning*)
- oövervakad inlärning (*unsupervised learning*)
- förstärkt inlärning (*reinforcement learning*).

Övervakad inlärning innebär att algoritmen tränas baserat på en uppsättning indata med kända utdata, och målet med träningen är att lära algoritmen förhållandet mellan indata och utdata. Oövervakad inlärning innebär att träningsdata består av indata utan kända utdata. Ett exempel är att gruppera (eng. *cluster*) indata i olika kategorier. Förstärkt inlärning ligger någonstans mellan övervakad och oövervakad inlärning. Förstärkt inlärning innebär att träning av algoritmen sker genom att prova sig fram och förstärka val av utdata med belöning eller bestraffning. Algoritmen får återkoppling (belöning eller bestraffning) för varje val av utdata och kan närma sig en bästa lösning genom att maximera den ackumulerade förtjänsten.

Djupinlärning (eng. *deep learning*) är en grupp av algoritmer inom maskininlärning som baseras på neurala nätverk i många lager [50]. Det stora antalet lager har gett upphov till namnet *deep learning*.

ML kan ge många nya möjligheter, men är inte alltid ett lämpligt val av teknik för alla tillämpningar. I [49] ges följande krav för att maskininlärning ska vara en användbar teknik:

- Traditionella tekniker är inte tillämpbara p.g.a. brister i modellen eller algoritmen, t.ex. att det inte finns någon matematisk modell som är baserad på fysikaliska fenomen eller det finns en algoritm, men den kräver för komplexa beräkningar för att vara användbar.
- Det finns, eller kan skapas, tillräckligt mycket träningsdata.
- Problemet kräver ingen explicit domänkunskap, logik eller sunt förnuft.
- Uppgiften kräver ingen detaljerad förklaring till hur besluten tas.
- Fenomenet eller funktionen som tränas är stationär under tillräckligt lång tid.
- Problemet har åtminstone lösa prestandakrav, eller prestanda kan simuleras numeriskt.

Utveckling av ML-baserade metoder kräver stora mängder träningsdata av god kvalitet, vilket kan vara kostsamt att ta fram. Mycket av AI-forskningen har gjorts inom bild- och videobehandling, där det finns stora databaser med tränings- och testdata fritt tillgängliga. För kommunikationstillämpningar finns inte data tillgängliga i samma utsträckning. Att skapa bra data från mätningar under verkliga förhållanden är mycket komplext, tidskrävande och kostsamt. Nya möjligheter kan ges av de framsteg som gjorts inom utvecklingen att skapa syntetiserade data (s.k. generativa AI-metoder) som är svåra att särskilja från autentiska data [51], [52], vilket kan vara en väsentlig del för att möjliggöra implementation i framtida radiosystem. Utveckling av metoder för att syntetisera data och för att särskilja syntetiserad data från autentisk data är centralt vid användning av ML-tekniker, och kan innebära nya möjligheter till ökad robusthet i kommunikationssystem.

2.4.1 Tillämpningar

Maskininlärning har många olika tillämpningar i kommunikationssystem. Traditionellt görs signalbehandlingen i en mottagar- eller sändarkedja i olika block, exempelvis synkronisering, kanalestimering, kanalkodning och källkodning. Vanligen innehåller varje block algoritmer som är optimerade för just det blocket baserat på modellantaganden (lokal optimering). Det finns därmed ingen garanti för att hela mottagarkedjan presterar på bästa sätt (global optimering). AI-tekniker kan användas på olika sätt i mottagar- och sändarkedjan, antingen genom att ersätta enskilda signalbehandlingsblock eller genom att ersätta en sekvens av block. I extremfallet skulle AI-tekniker, åtminstone teoretiskt, kunna ersätta hela kedjan från exempelvis mottagen signal till extraherad information baserat på global optimering av hela kedjan (*end-to-end*) [53]. Att göra det med traditionella tekniker är alltför komplext.

Några specifika användningar av ML för kommunikationstillämpningar är [49], [54], [55] kanal-detektion (eller estimering) och avkodning, kanalutjämning, demodulation eller modulationsklassificering, effektkontroll, förkodning, undertryckning av interferens p.g.a. hårdvarubrister för exempelvis full duplex. Inom kognitiv radio finns ytterligare ett antal möjliga tillämpningar. En naturlig användning av maskininlärning är spektrumavkänning. Andra tillämpningar är olika former av anpassning för att optimera resursutnyttjandet, exempelvis genom anpassade val av frekvens, effekt, kodning och modulation.

Det finns också studier som indikerar att inlärda algoritmer kan vara mer beräkningseffektiva än traditionella algoritmer, d.v.s. att de kan exekveras snabbare och med lägre effekt konsumtion [53]. Anledningen sägs vara att algoritmerna kan parallelliseras i hög utsträckning samt att beräkningarna kan utföras bra med datatyper med låg precision. Detta är troligen ingen generell slutsats som gäller för alla typer av tillämpningar, men det kan finnas potential till förbättringar

genom att ersätta traditionella tekniker med inlärd ML-tekniker.

En annan fördel med inlärd ML-teknik är att de kan tränas på olika typer av data baserade på olika modeller eller mätningar. Traditionella tekniker är oftast utvecklade baserat på en modell med hänsyn till vissa icke-ideala förhållanden. Att anpassa en traditionell teknik för andra förhållanden kan vara mycket svårt och ibland krävs helt ny utveckling av algoritmer för att hantera detta. Med inlärd ML-teknik kan samma algoritmer användas genom att helt enkelt träna om algoritmen med nya data. På så sätt finns en potential att kunna göra algoritmer mer robusta mot olika former av icke-ideala förhållanden som uppstår i praktiken. ML kan alltså vara en teknik med stor fördel för att konstruera mer robusta kommunikationssystem.

2.4.2 Utmaningar

Inbyggnad av nya AI-tekniker i kommunikationssystem ger nya möjligheter, men också nya sårbarheter i systemen. Det är nödvändigt att känna till och förebygga dessa sårbarheter i framtida kommunikationssystem. Det finns stora svårigheter och utmaningar med ML-algoritmer, inte minst när det gäller robusthet och säkerhet. Att algoritmen är inlärd baserat på träningsdata, utan någon kunskap om de bakomliggande relationerna och fysikaliska principerna, innebär också att algoritmen blir som en okänd svart låda där insignalerna ger utsignalerna utan kända relationer. Det innebär också att avvikelser i indata som algoritmen inte har tränats för kan hanteras på ett okänt sätt. I en militär- eller säkerhetstillämpning är det inte önskvärt att bygga in sårbarheter som är okända och inte kan hanteras i ett kommunikationssystem. Det krävs därför ytterligare forskning för att öka kunskapen om de sårbarheter som utvecklingen av AI och maskininlärning, och införandet av sådan teknik, kan medföra i framtida militära och civila trådlösa kommunikationssystem.

Förklarbar AI (*Explainable AI*, XAI) är ett forskningsområde som syftar till att förstå AI-teknikers resonemang och beslutsfattande [56], [57]. Detta är nödvändigt för ökad tillit och transparens i AI-tekniker. XAI anses vara nödvändigt för den fortsatta utvecklingen av AI [56], och är avgörande för att AI ska kunna införas på bred front i militära system.

Inom den civila forskningen av nya kommunikationssystem är fokus främst på effektivisering och ökad kapacitet, och utvecklingen kring AI syftar till att ge nya möjligheter och förbättrad prestanda. I radiosystem för försvars- och säkerhetstillämpningar är det också nödvändigt att ta hänsyn till sårbarhet och robusthet.

Exempel på frågeställningar kring kognitiv radio, framförallt relaterat till maskininlärning och AI i radiokommunikationssystem, som är intressanta att studera och som kräver mer kunskap är

- Vilka nya möjligheter ges av AI-tekniker, och vilka tillämpningar av AI har potential att öka effektiviteten i trådlösa kommunikationssystem?
- Vilka sårbarheter och vilken robusthet kan AI-tekniker ge i radiosystem?
- I vilka delar av militära radiosystem är det lämpligt eller olämpligt att använda AI-tekniker?
- Hur kan korrekta och användbara data skapas för att träna ML-algoritmer?
- I alla former av anpassning måste hänsyn tas till olika tidsaspekter. Exempelvis, hur snabbt ändras förhållandena och hur snabbt kan anpassning ske?

2.5 Adaptiv kodning och modulation

Kodning och modulation är fundamentala aspekter på design av kommunikationssystem. Detta inkluderar exempelvis hur information förs över från en källa till en mottagare, hur kvaliteten hos den mottagna signalen mäts eller hur olika parametrar vägs mot varandra för uppnå olika mål under olika begränsningar.

Kodning syftar på att designa effektiva och pålitliga metoder för att komprimera, överföra eller skydda data. Några olika typer av kodning framtagna för olika aspekter är

- *källkodning* - kompression av data
- *kanalkodning* - felrättande kodning.

För telekommunikation är kanalkodning ett vanligt tillvägagångssätt. Vid överföring av sekvenser av bitar i en kommunikationskanal blir vissa bitar förvanskade på grund av störningar eller annat brus i kanalen. Kanalkodning är även känt som felrättande kodning vilket har att göra med att den ursprungliga sekvensen omkodas och struktureras på så sätt att redundans infogas i sekvensen. Mottagare kan utnyttja redundant data för att kontrollera och återskapa data som blivit korrupt.

Genom modulation skapas informationsbärande signaler genom att kombinera en bärvågform med en meddelandesignal. Olika typer av modulation lämpar sig för olika situationer, där det är viktigt att samma princip som tillämpas i sändaren också används i mottagaren, i demoduleringsfasen.

Valet av kodning- och modulationstyp är direkt avgörande för ett systems prestanda. Eftersom det finns många olika faktorer att ta hänsyn till i designen av ett kommunikationssystem är det extra viktigt att se till att kodningen och modulationen är lämpad för den situation som råder. För militära tillämpningar är ofta kommunikationssystemen utsatta för dynamiska interferensmiljöer samt plötsliga förändringar i tid och rum. Det bästa valet av kodningsteknik och modulationstyp som gäller vid en viss tid och plats kan vara ohållbart i en annan. Detta ställer ett krav på adaptiva system.

Med adaptiv kodning och modulation avses kommunikationssystem som tar hänsyn till omgivningen genom att variera parametrar inom kodningen eller modulationstypen för att optimera prestanda. Andra signalparametrar, exempelvis interferensmiljön, länkdämpning, sändareffekt, mottagarkänslighet och väderförhållanden påverkar också kommunikationssystemets prestanda. I allmänhet kan adaptiva system designas med en eller flera av dessa parametrar i åtanke.

I [58] undersöks effekten av att anpassa modulationstypen efter den brusnivå som mottagaren upplever. Lägre ordningens modulationstyper (BPSK och QPSK) har större begränsningar vad gäller möjlig datahastighet men är mer tåliga för brus. Högre ordningens modulationstyper (t.ex. 16-QAM, 64-QAM och 256-QAM) möjliggör snabbare dataöverföring, men påverkas lättare av brus. Brusnivån kan ändras avsevärt då kanalen förändras i tid och rum. Genom att implementera fixa modulationssystem av lägre ordning är det möjligt att prioritera robusthet över överföringskapacitet i en form av gardering mot höga interferensnivåer. Adaptiv modulation erbjuder både robusthet och ökad prestanda.

Estimat av signal-brus-förhållande (SNR) utnyttjas på mottagarsidan för att avgöra passande modulationsordning [58]. Skattningen av brusnivån antar att bruset kan beskrivas med en normalfördelning (AWGN). Informationen skickas tillbaka till sändaren som anpassar modulationstypen. Tekniken kombineras med ytterligare interferenshantering i form av pulsformningsfilter samt faltungs-kodning. Det är en form av självrättande kodning med syfte att förhindra intersymbolinterferens, vilket är en form av signaldistorsion där delar av signalen interfererar med efterföljande delar. Problemet med konceptet i [58] är att systemet är beroende av återkoppling från mottagaren till sändaren via en återkopplingskanal vilket kan ge upphov till mer overheadtrafik.

Några exempel på etablerade system där adaptiv kodning och modulation implementeras är *High Speed Downlink Packet Access* (HSDPA) samt *Worldwide Interoperability for Microwave Access* (WiMAX). I både HSDPA-protokoll som används för cellulär kommunikation och WiMAX som är en samling av trådlösa kommunikationsstandarder baserat på IEEE 802.16, anpassas modulationsschemat beroende på brusnivån i systemet. QPSK används för kraftigt brusiga kanaler

och upp till 64-QAM för renare kanaler med syfte att upprätthålla hög överföringshastighet. Även kodningstakten anpassas i förhållande till det modulationsschema som antagits, [59].

Moderna plattformar, både civila och militära, består av många elektroniska system och komponenter. Det brus som tas emot i mottagaren är en samverkan av interferens från elektroniska komponenter på plattformen och i omgivningen. Denna typ av brus har ofta en betydligt mer impulsiv karaktär jämfört med det termiska bakgrundsbruset. Impulsiv interferens är svår att förutse och hantera på mottagarsidan där det kan ha stora konsekvenser för kommunikationssystemets prestanda. Militära plattformar tenderar att befinna sig i miljöer omgivna av andra kommunikationssystem, avsiktliga störningssystem eller övriga situationer där interferensmiljön är mer dynamisk och impulsaktig.

Många befintliga system är designade utifrån det faktum att bruset kan anses vara normalfördelat genom en AWGN-kanal. Problemet är att normalfördelningen inte är tillräcklig för att modellera impulsbrus fullt ut. Arbetet inom KORINT har därför undersökt möjligheten att tillämpa beräkningar på mottagarsidan efter andra, mer lämpliga brusmodeller. Arbetet har fokuserats på den så kallade *Middleton Class A*-modellen men även den symmetriskt α -Stabila modellen har undersöks.

Adaptivitet har undersökts ur två perspektiv:

- adaptiv via klassificering [60], [61]
- adaptiv via estimering [61], [62].

Klassificering syftar på att brusmiljön klassas efter den modell som är bäst lämpad i ett givet tidsskede, dvs. mottagaren avgör i en given situation vilken modell som är lämpligast att beskriva brusmiljön under det tidsskedet. I [61] utsätts mottagaren för antingen normalfördelat eller impulsaktigt Class A-fördelat brus. Baserat på ett hypotestest väljer mottagaren i nästa steg vilken brusmodell som bäst beskriver den aktuella situationen.

Med estimering avses skattning av de specifika parametrar som beskriver de statistiska modellerna, via passande estimeringsmetod. Alla statistiska modeller karaktäriseras av variabler som avgör processens beteende. För impulsmodellerna finns det etablerade estimeringstekniker för att skatta dessa parametrar, vilket möjliggör korrekta beräkningar på mottagarsidan. Effektiviteten av estimeringen påverkar prestandan i stort för kommunikationssystemet. Det finns flera artiklar där olika metoder jämförs och utvärderas i olika miljöer för att verifiera hur pass effektiva och lämpade de är att implementera. För Class A-modellen undersöks flera metoder i [63] och för den symmetriskt α -Stabila modellen undersöks metoder i [62].

Den stora fördelen med att använda normalfördelningen i analyser och implementationer är att den är analytiskt enkel och effektiv implementationsmässigt. Impulsmodeller tenderar att vara mer matematiskt komplexa och kräver mer processorförmåga för att utföra beräkningar på samma nivå som med normalfördelningen. Vilket innebär att mer processorförmåga krävs för att vinna den prestanda som beräkningar med impulsmodeller ger.

Forskning som fokuserar på adaptiv mottagning tyder på att det finns mycket att vinna i form av prestanda jämfört med motsvarande icke-adaptiva system. Frågeställningen medför vissa tekniska krav och utmaningar som systemen står inför, framförallt ur ett komplexitetsperspektiv. Beräkningar med nya impulsmodeller kräver högre processeringsförmåga för att säkerställa noggrannhet med de tillhörande sannolikhetsfördelningarna. Generaliteten med nya impulsmodeller introducerar ett annat krav på precis estimering. Modellernas fördelningsparametrar påverkar sannolikhetsfördelningen kraftigt och kan återspegla väldigt olika beteenden hos funktionen. Estimeringsmetoder varierar i effektivitet och kräver ofta en tillgänglig sekvens av träningssampl för att utföra estimering av parametrarna. Vid dynamiska situationer, där miljön utsätts för snabba förändringar är det svårt att säkerställa att estimeringen är aktuell.

En annan forskningsinriktning för adaptiva mottagare är metoder baserat på AI i form av maskin-inläring och djupinläring. Artificell intelligens möjliggör nya närmanden och lösningar till etablerade problem genom att erbjuda automation i vissa aspekter av mottagardesignen. Maskin-inläring kan tillämpas för klassificering av impulsmiljöer för att avgöra vilken impulsmodell som är bäst lämpad för att beskriva den aktuella miljön. Det kan också användas för att dynamiskt skifta modulationsschema eller kodningstakt baserat på exempelvis SNR, sändareffekt eller andra systemparametrar. I [64] används djupinläring i form av neurala nätverk för att finjustera ett kommunikationssystem i realtid när kanalen utsätts för plötsliga förändringar. För att slippa overheadtrafik som induceras av pilotsekvenser, nödvändiga för att uppdatera vikterna på de olika neurala noderna, kombineras systemet med felrättande kodning. Detta gör det möjligt att generera kända sekvenser för att träna nätet och uppdatera vikterna. Arbetet möjliggör adaptivitet på mottagarsidan men visar också på svårigheten att korrigera problem på sändarsidan.

3 Full duplex

IBFD (*In-band Full Duplex*) eller SF-STAR (*same-frequency simultaneous transmit and receive*) som tekniken ibland kallas, syftar på samtidig sändning och mottagning på samma frekvens. Till skillnad från *time division duplex* (TDD) och *frequency division duplex* (FDD), nyttjar IBFD samma frekvens- och tidresurser i både sändning och mottagning. Detta effektivare resursutnyttjande innebär i teorin en möjlig kapacitetsdubbling för en given länk, vilket gör tekniken särskilt intressant i ett sammanhang där frekvensbrist råder. Simultan sändning och mottagning på samma frekvens, innebär dock att den önskade signalen och den utsända signalen kommer vara överlagrade i mottagaren. Interferensen som uppstår på grund av den utsända signalen benämns självinterferens och kan ofta vara mer än 100 dB starkare än nyttsignalen. För att hantera denna självinterferens behöver en IBFD sändtagare använda någon form av dämpning eller undertryckning [65]. Generellt brukar det talas om att undertryckning kan ske i olika domäner:

1. Utbredningsdomän - Undertryckning som sker utanför sändtagaren, till exempel på grund av separation mellan antennerna. Generellt inkluderas också cirkulator eller duplexer för sändtagare som använder samma antenn för sändning och mottagning.
2. Analog domän - Undertryckning i analog krets, antingen på RF-signalen eller efter nedkonvertering till basbandet.
3. Digital domän - Undertryckning som sker efter A/D omvandlaren i mottagaren.

Tillvägagångssätten och tekniker för undertryckning i de olika domänerna skiljer sig åt. I Tabell 3.1 finns en sammanfattning av de undertryckningstekniker som presenteras i [66] och [67], grupperade efter domän. Från publikationer gjorda under de senare fem åren finns en viss spridning av vilken kombination av undertryckningsdomän som används och hur hög total undertryckning som kan erhållas [67]. I en sammanställning i [67], visas hur ett flertal av de studerade IBFD testsystemen klarar av att åstadkomma en undertryckning på över 100 dB, vissa med en bandbredd som överstiger 20 MHz. Många av de system som finns beskrivna i litteraturen är testade i labbmiljö, under ideala förhållanden [68].

3.1 Forskningsprojekt i andra organisationer

IBFD och relaterade tekniker har studerats i flera internationella forskningsprojekt under de senaste åren. Några av dessa presenteras i detta avsnitt.

3.1.1 Nato

Ett *Exploratory Team* (IST-ET-101) under *Information Systems Technology Panel* (IST) inom Natos *Science and Technology* har studerat problemet med den begränsade tillgången till frekvensspektrum inom speciellt VHF- och UHF-bandet [72]. De har främst studerat vad IBFD-teknologin kan bidra med. Övriga teknologier de lyfter fram som har potentialen att förbättra användningen av frekvensspektrumet är:

- kompression av data, exempelvis talkodning och zip-komprimering
- fusion av data, exempelvis sammanslagning av flera sensordata för en och samma källa
- kognitiv radio
- adaptiv kodning och modulation
- MIMO-antennsystem.

Tabell 3.1: Tekniker för undertryckning av självinterferens.

Domän	Teknik	Kommentar
Utbredningsdomän	Antennseparation / antennplacering	Förutsätter att olika antenner används av sändare och mottagare
	Cirkulator och duplexer	Sändare och mottagare använder samma antenn
	Icke-magnetisk cirkulator	Cirkulator på ett integrerat chip och med mycket hög isolation (> 50 dB) [69].
	Riktantenn	Krävs att sändar- och mottagarantenn är olika
	Korspolarisationsantenn	Sändare och mottagare använder olika polarisation (vertikal eller horisontell)
Analog domän	Lobformning, sändare	Digital styrning kräver flera antenner
	Statisk analog undertryckning	Analog undertryckning där parameterval görs offline
	Digital-understödd analog undertryckning	Analog undertryckning där parameterval görs digitalt
	Undertryckning genom analog signalgenerering	En analog kopia av interferensen, med motsatt fas generas och adderas i mottagaren
	Undertryckning genom RF-kodning	Analog implementation av DSSS på RF-signalen [70]
Digital domän	Linjär undertryckningsmodell	Kan ej undertrycka olinjär distorsion
	Referensbaserad undertryckningsmodell	Använder en samplad kopia av utsända signalen
	Parallell-Hammerstein modell	Modellerar flervägskomponenter samt olinjär distorsion från effektförstärkaren
	Wiener-Hammerstein modell	Som Parallell-Hammerstein, men inkluderar olinjär distorsion från hela sändaren
	Maskininlärning	Kan använda neurala nätverk för undertryckning av olinjär distorsion [71]
	Lobformning, mottagare	Digital styrning kräver flera antenner

De har också identifierat andra fördelar utöver ökad spektrumeffektivitet för IBFD, såsom följande:

- Motverka problem med dolda noder. En nod kan samtidigt som den tar emot en signal sända svar tillbaka. Svaren kan då höras av andra noder som inte hörde ursprungssändningen och därmed kommer övriga noder inte att störa den pågående sändningen.
- Säkerhet på det fysiska lagret. En mottagare kan sända en störsignal samtidigt som den tar emot meddelandet. På det sättet blockeras andra i närheten av mottagaren från att också ta emot samma meddelande.
- Fyra gångers vinst i trådlösa nätverk. För en punkt-till-punkt-förbindelse blir kapacitetsvinsten två gånger, men för reläande nätverk kan vinsten för väldigt specifika fall bli upp till fyra gånger jämfört med halv duplex [73].

I rapporten [72] redovisas möjliga militära tillämpningar av IBFD. Tillämpningarna delas in i följande områden:

- spektrumeffektiv två-vägs taktisk kommunikation
- taktisk kommunikation med telekrig
 - mottagning samtidigt med störning
 - signalspaning samtidigt med sändning
- signalspaning samtidigt med störning.

Inom Nato arbetsgruppen påbörjades utvecklingen av en teknikdemonstrator som ska visa full duplex för militära ändamål. Teknikdemonstratorn är i princip en ihopslagning av två olika demonstratorer från två aktörer inom arbetsgruppen. Teknikdemonstratorn använder NATO-vågformen *Narrow Band Waveform* (NBWF) på centerfrekvensen 2,4 GHz och åstadkommer 95 dB undertryckning av den egenutsända radiosignalen. Anledningen till att de använder 2,4 GHz är att den befintliga analoga undertryckningskretsen var anpassad till just 2,4 GHz.

En fortsättning som föreslås i [72] är att tekniken behöver anpassas till militära frekvensband, uteffekter och mobila scenarion där flera noder bildar ett nätverk. Således har NATO valt att fortsätta arbetet med full duplex genom att 2019 starta en RTG med titeln *Full Duplex Radio Technology for Military Applications* som pågår till 2022 [74], där bland annat FOI har ett aktivt deltagande.

3.1.2 Darpa

Darpa-programmet *Signal Processing at RF* (SPAR) har som mål att undertrycka elektromagnetiska interferenser, både egengenererade (t.ex. samlokaliserade RF-system på en plattform) och externt genererade (t.ex. aktiv störning), med både känd och okänd karakteristik. Utmaningen är att designa och demonstrera komponenter som kan ta bort interferenserna från den önskade signalen i mottagarens RF *Front-end* innan signalen samplas. Framtagna tekniker kan på sikt användas till att sända och ta emot på samma frekvens samtidigt [75].

SPAR-programmet gick till Northrop Grumman 2016 och är på 2,9 respektive 2,3 miljoner dollar för fas ett och två med en option om en tredje fas. Projektet ska pågå till mars 2020. DARPA kan komma att spendera upp till 30 miljoner dollar inom SPAR [76].

3.2 Tillämpningar

Även om den främsta fördelen med full duplex anses vara den potentiella kapacitetsökningen, finns andra möjliga tillämpningar för IBFD-tekniken. I följande avsnitt diskuteras IBFD för militär tillämpning, för användning i relänoder samt i kombination med dynamisk spektrumaccess. Utöver detta tillämpas den adaptiva undertryckningen av interferens som IBFD i huvudsak bygger på även för

- undertryckning av brus
- undertryckning av utombandsinterferens [77]
- *non-orthogonal multiple access* (NOMA) [78].

3.2.1 Militär tillämpning

Intresset för potentiella militära tillämpningar av IBFD har ökat under de senaste åren [79]. Utöver en ren kapacitetsvinst, vilket självklart också är önskvärt för militära radiosystem, kan IBFD även bidra med en ny telekrigsförmåga eftersom den möjliggör

- samtidig signalspaning och störning
- samtidig sändning och signalspaning
- samtidig mottagning och störning.

Ofta är telekrigssystem och kommunikationssystem relativt isolerade system, men med IBFD förväntas telekrigsförmågan kunna bli del av de flesta kommunikationssystemen [80]. Konkreta militära applikationer återfinns i [80]–[82] och inkluderar

- blockering av fjärrutlösare för sprängladdning
- samtidig störning och detektering av UAV:er
- minskat (fientligt) detektionsavstånd av den egna kommunikationen genom IBFD och adaptiv effektkontroll med kontinuerlig återkoppling
- adaptiv lobformning med hjälp av IBFD och kontinuerlig återkoppling.

I telekrigssammanhang har också möjligheten med IBFD undersökts för samexisterande (olika plattformar) och samlokaliserade (samma plattform) radiosystem [81], [83]. I [83] antas störsändare och signalspanare vara två separata enheter utan fysisk koppling. Detta innebär att mottagaren (signalspaningsenheten) inte har direkt tillgång till interferenssignalen. Till skillnad från IBFD, behöver därför mottagaren estimeras interferenssignalen vars karaktär (svepstörare) antas vara känd. Mottagaren försöker sedan generera en identisk RF-signal som användas i analog undertryckning.

Likt IBFD finns även annan militär teknik som bygger på interferensundertryckning. Till exempel så diskuteras smygkommunikation med hjälp av artificiell brus-generering i [84]. I denna teknik överlagras sändaren nyttosignalen med en känd brussignal som sedan undertrycks i mottagaren.

3.2.2 Full duplex relänoder

Relänoder är sändtagare vars uppgift är att vidarebefordra en mottagen signal. Ofta används de för att höja kapaciteten i utkanten av ett nät eller för att öka täckningen. Medan relänoder med halv duplex generellt behöver dela upp mottagning och återsändning i olika faser (oftast i tid) så kan en IBFD-relänod göra det i en och samma fas. För ett enskilt datapaket som skickas via en IBFD-relänod kan återsändningen ske i samma fas (om avkodning inte är nödvändig), vilket innebär att tidsfördröjningen nästan kan halveras. Om en direkt länk mellan källan och mottagande radio (som relänoden vidarebefordrar till) existerar, så kan dessutom en viss diversitetsvinst erhållas på grund av flervägsutbredningen [85], [86]. Även för IBFD-relänoder där avkodning sker kan en kapacitetsvinst erhållas som följd av simultan sändning och mottagning. Enligt [73] kan kapacitetsökningen i vissa mycket specifika relänät och omständigheter till och med vara högre än det dubbla om IBFD används istället för HD.

Eftersom relänoder generellt har möjlighet att vara fysiskt större enheter, innebär detta att de ofta har större frihetsgrad gällande val av hårdvara och antennlösningar, vilket kan gynna undertryckningen av självinterferens avsevärt [66]. Ännu en fördel med IBFD för just relänoder är att de kan samverka med enheter som endast använder halv duplex. Detta betyder att de tänkta IBFD relänoderna kan användas med många av de befintliga radiosystemen.

3.2.3 Full duplex för dynamisk spektrumaccess

För dynamisk spektrumaccess (DSA) med halv duplex behöver radion först utföra spektrumavkänning och analysera om en kanal används av något annat radiosystem. Om så inte är fallet, kan radion själv påbörja en sändning. För att kontinuerligt uppdatera sin kunskap om kanal användningen måste dataöverföringen regelbundet avbrytas för att återigen utföra spektrumavkänning. I sådana situationer kan fördelningen mellan tiden som spenderas på spektrumavkänning och sändning för att maximera kapaciteten och samtidigt minimera risken för kollision bli mycket komplicerad. Utnyttjas mer tid för spektrumavkänning kommer radion vara bättre på att undvika en kollision med andra användare samt vara bättre på att detektera (fler sampel kan användas) ett tillfälle att själv sända. Detta innebär dock att den egna datasändningen får mindre resurser vilket leder till minskad kapacitet. En radio med IBFD kan å andra sidan samtidigt utföra sändning och avkänning, så kallad TS (eng. *transmit-and-sense*). Detta ger IBFD två fördelar gentemot halv duplex:

- Kontinuerlig sändning kan pågå tills dess att en annan radio verkligen påbörjat sin sändning.
- Tidsperioden för avkänning är längre, vilket ger bättre estimat och därmed bättre möjlighet att korrekt detektera en annan sändning.

Dessa två fördelar diskuteras utförligt i [87] där även fallet med icke-fullständig undertryckning av självinterferens tas upp. Även andra variationer av IBFD DSA har studerats, till exempel då sändtagaren har möjlighet att välja mellan att vara i ett TR- (eng. *transmit-and-receive*) eller TS-läge. Fördelen med TR-läget är att en högre kapacitet kan uppnås eftersom både sändning och mottagning av data sker samtidigt. Däremot kan inte simultan avkänning utföras, vilket potentiellt kan resultera i fler kollisioner med andra användare. Genom att antingen välja läge efter ett estimat av nätets trafikbelastning som i [88] eller genom att alternera TS och TR under en fix tidsperiod som i [89] kan kapaciteten ökas i jämförelse med att antingen endast använda TR eller TS.

3.3 Utmaningar

För att IBFD ska erhålla en dubbling av spektraleffektiviteten krävs att systemet klarar fullständig undertryckning av självinterferens. Kvarstår självinterferens efter undertryckning har detta en negativ inverkan på prestandan och i vissa fall är halv duplex med en högre modulation att föredra över IBFD med en signifikant mängd självinterferens [90]. I praktiken är fullständig undertryckning svårt att uppnå, i synnerhet eftersom icke-ideal hårdvara i både sändare och mottagare orsakar olinjär distorsion. Ännu en svårighet med undertryckningen är den stora effektskillnaden mellan den utsända och den önskade signalen i mottagaren. En för stor effektskillnad medför att A/D-omvandlaren måste ha ett orimligt stort antal bitar för att kunna genomföra omvandlingen utan att introducera avsevärda fel [65]. Av denna anledning krävs därför ofta hög undertryckning innan A/D-omvandlaren i utbredningsdomänen eller i den analoga domänen. Detta kan vara svårt, särskilt i mindre enheter med liten flexibilitet gällande antennlösning och hårdvara [66]. Generellt förvärras problematiken med A/D-omvandlaren om systemet kräver hög uteffekt och en känslig mottagare. Något som beskriver en typisk situation på militär plattformar där störsändare generellt använder mycket hög effekt och signalspaning utnyttjar väldigt känsliga mottagare.

Många forskningsfrågor och praktiska problem kvarstår för att avgöra exakt på vilket sätt, och i vilken utsträckning det lönar sig att använda IBFD för militära tillämpningar. Dessa frågor är exempelvis:

- Vilka svårigheter finns för IBFD i militära kommunikationssystem där lägre frekvensband, högre sändareffekt och känsligare mottagare ofta används? Kan undertryckning göras lika effektivt på lägre frekvensband som på frekvensband kring 2,4 GHz?
- Vilka ytterligare krav på exempelvis robusthet och störtålighet ställs på telekrig- och kommunikationssystem för militära tillämpningar, och kan dessa krav uppfyllas vid användning av IBFD?
- Vilka av de nya förmågorna, såsom samtidig telekrig och kommunikation kan, inte bara teoretiskt utan också i praktiken uppnås med IBFD? Kan dessa åstadkommas med dagens teknik, och vilka eventuella förluster kan detta leda till gällande systemprestanda hos olika delsystem?

3.4 Digital predistortion

Ett teknikområde som ligger nära full duplex är Digital predistortion (DPD), då de båda, i viss mån arbetar med en signal som genomgått någon form av distorsion. Till skillnad från IBFD där det generellt är mottagaren som kompenserar för den distorsion som skett, är idén bakom DPD att redan i förväg förvränga den digitala utsignalen på ett sådant sätt att den kommande distorsionen

annulleras. DPD implementeras generellt genom att först skapa en modell av distorsionskällan med olika reglerbara parametrar. Dessa parametrar estimeras och justeras sedan genom att först låta en känd signal passera DPD:n och distorsionskällan sekventiellt, och sedan jämföra utsignalen med en önskad signal. Estimering av DPD parametrarna kan antingen ske statisk eller dynamisk. Då estimeringen är statisk utförs den generellt vid ett tillfälle i förväg med hjälp av ett noggrant mätinstrument. Detta innebär att mycket exakta parametervärden kan erhållas, men medför även att DPD-steget kan vara känslig för förändringar i distorsionen. Dynamisk, eller adaptiv parameterestimering kan istället ske regelbundet eller kontinuerligt under användning. Detta medför att systemet kan kompensera för variationer i distorsionen, men innebär också att extra hårdvara behövs för att erhålla den förvrängda signalen eftersom återkoppling krävs [91].

Det huvudsakliga användningsområdet för DPD inom radiokommunikation är för att motverka den distorsion som sker i en sändares effektförstärkare (PA, från eng. *Power Amplifier*). PA:n är en komponent som återfinns i nästan alla radiosändare och har till uppgift att kraftigt förstärka den signal som ska sändas. På grund av den höga effekt som förbrukas i PA:n relativt andra komponenter är det viktigt att göra den effektiv. Generellt medför dock detta att den kommer vara olinjär, eftersom en PA:s linjäritet och effektivitet har ett approximativt omvänt förhållande. Desto mer effektivare en PA behöver vara, desto mer olinjär kommer den antagligen behöva konstrueras. Följden av en sådan PA blir således mer olinjär distorsion, vilket medför en viss minskad signalkvalité, men framförallt en ökning av utsänd effekt i närliggande frekvensområde, så kallad utombandsemission. För mottagare i närliggande frekvensband kan utombandsemissionen, beroende på effekt, få en avsevärd negativ påverkan eftersom den uppfattas som interferens [92]. Genom användning av DPD kan den olinjära distorsionen minskas, vilket medför en reducerad utombandsemission. Något som är svårt att åstadkomma utan att behöva byta PA eller implementera relativt komplexa filter.

Även om DPD:s huvudsakliga uppgift är att motverka utombandsemission, så har den även viss positiv inverkan gällande signalkvalitén hos den utsända signalen. Eftersom viss distorsion från PA:n även sker inom det avsedda frekvensbandet kommer DPD-steget också motverka denna distorsion. Detta uppmärksammas i [93], genom att jämföra EVM (eng. *Error Vector Magnitude*) med och utan DPD. EVM är i detta fall ett mått på hur stor avvikelse konstellationen hos utsignalen har i jämförelse med den ideala och kunde utan DPD vara runt 7 %. Med den föreslagna DPD-tekniken i [93] erhöles istället en EVM på 0,98 %, vilket är en anmärkningsvärd skillnad i jämförelse med fallet utan DPD.

På grund av den olinjära distorsionen i PA:n kan dess utsignal komma att uppta en bandbredd som är flera gånger större än dess insignal. Generellt innebär detta att den observerade bandbredden, det vill säga den bandbredd som krävs för estimering av PA:ns distorsion, kan komma att vara flera gånger större än den signal som önskas sända. För exempelvis en LTE-signal med 20 MHz bandbredd kan den observerade bandbredden behöva vara hela 100 MHz, alltså fem gånger större [94]. Om adaptiv parameterestimering ska användas, något som generellt är obligatoriskt då bredbandiga signaler används [91], behöver PA:ns utsignal samplas med en oerhört hög samplingsfrekvens. Vidare kräver adaptiv DPD att de komponenter som används för att erhålla PA:ns utsignal för återkoppling, är av hög kvalitet eftersom DPD:n även kommer att försöka kompensera för distorsionen i dessa. Om dessa komponenter introducerar en betydande mängd distorsion, kommer det resultera i att DPD:n överkompenserar, vilket ger låg prestanda [91].

En annan utmaning när det kommer till bredbandiga signaler såsom WCDMA och OFDM är att minnesaspekten i PA-distorsionen, det vill säga hur utsignalen beror på föregående värden (inte bara det nuvarande) inte är försumbar. Detta medför att mer komplexa modeller med fler parametrar kan komma att vara nödvändiga för att DPD ska kunna ha någon effekt.

4 Utveckling av militära radiosystem

I detta kapitel beskrivs den utvecklingen som skett av militära radiosystem för UHF, VHF och HF i västvärlden.

4.1 Smalbandiga vågformer på VHF

Frekvensområdet 30-88 MHz av VHF bedöms i framtiden kunna utnyttjas militärt som idag eller till och med i något högre utsträckning eftersom den civila användningen minskar kraftigt, särskilt över 60 MHz. Under de senaste 10-15 åren har det utvecklats en rad olika smalbandiga vågformer med någon form av ad hoc-funktionalitet (främst för att överbrygga större avstånd) som nyttjar frekvensområdet 30-88 MHz. Bland dessa vågformer bör t.ex. NATO:s *Narrow Band Waveform* (NBWF) omnämnas samt en rad proprietära vågformer från exempelvis Thales, R&S, Rockwell Collins och Elbit. Bandbredderna för dessa vågformer är 25 och 50 kHz, och i något fall även 100 kHz.

Flera av dessa vågformer har, eller kommer att få, störskydd som i de flesta fall består av frekvenshopp med medelhög hopptakt, i vissa fall med ortogonalt frekvenshopp. Ortogonalt frekvenshopp har potential att underlätta frekvensplanering samt fjärrinterferens och även i viss mån samlokalisering av flera radiostationer på en plattform. Antalet nät i kombination med ortogonalt frekvenshopp, antenncoppling samt andra samexistensegenskaper kommer att avgöra vilket störskydd som kan uppnås. Några av dessa vågformer kan även arbeta i UHF-bandet.

VHF-bandet kan användas för militära system mellan 30 och 88 MHz, dock får fixfrekvens för närvarande inte användas i Sverige över 68 MHz inom detta frekvensområde. Amatörradiobandet 50-52 MHz samt 75 MHz (± 200 kHz) som används för flygfyrar (så kallade *Markers*) ska dock inte användas militärt för fixfrekvens.

I övre delen av VHF-bandet är 138-144 och 146-156 MHz, med vissa undantag, avsett för smalbandig militär trafik. Till detta kommer ett duplexband på 163-164/171-172 MHz avsett för repeatertrafik, och används bl.a för säkerhetsradio vid skjutfält. Frekvensområdet från 156 upp till 174 MHz är i övrigt civilt men används även militärt för samverkan med t.ex. civila fartyg.

4.2 Bredbandiga vågformer på UHF

Under ett flertal år har det pågått vågformsutveckling i en rad olika konstellationer där målet har varit att ta fram en bredbandig vågform. Exempel på detta är samarbetsprojekten ESSOR och COALWNW, samt vågformerna HCDR, WNW, och vågformen i vår egen Ra460 och nu senast Ra570. Dessutom finns proprietära bredbandiga vågformer hos ett flertal tillverkare såsom Thales, Leonardo (Selex), Aselsan, Rockwell Collins, Elbit och R&S. De flesta av dessa vågformer är avsedda för frekvensområdet 225-400 MHz med en bandbredd på ungefär en MHz (1,0; 1,2 och 1,25 MHz).

Så länge som de bredbandiga systemen inte behöver störskyddas med exempelvis frekvenshopp går det, om än med vissa problem, att tilldela utrymme för de bredbandiga systemen. Vid behov av frekvenshopp, som för att bli effektivt bör nyttja ett tämligen stort frekvensområde och ett stort antal kanaler, blir det svårare. I Nato-planen [95] finns det fördelat bredbandsblock (*wideband mobile*) om 5×5 MHz samt 2×10 MHz i det militära UHF-bandet. Dessa block kan användas för bredbandiga system och är spridda över i princip hela frekvensområdet.

4.3 Smalbandiga vågformer på UHF

Det finns många typer av smalbandiga system i UHF-området; Ra1183, en av vågformerna för Ra1570, TETRA och AGA-systemen SATURN [96] och HQII [97] är exempel på detta.

SATURN har tre olika hopset, T40 (40 frekvenser för träning), T1600 (1600 frekvenser för träning) och wartime (fullband 225-400 MHz). Eftersom trycket på UHF-bandet successivt har ökat och användningen har förändrats har NATO genomfört ett större arbete kallat UHF *Reorganization* (Reorg.) [95]. Tanken var att effektivisera användningen av frekvensbandet samt att minska riskerna för störningar inom och mellan system. UHF Reorg. trädde i kraft 2019-12-05 och detta, samt att en ny edition av SATURN-standarden (Ed 4) har ratificerats och antagits (2019), har påverkat SATURN radikalt. I och med UHF Reorg. infördes en reviderad T40 i SATURN, dock endast för radioapparater som används i Europa. Några år senare kommer T1600 ersättas med T1120 och även ett nytt wartime kommer så småningom. Det bör tilläggas att förändringarna i SATURN:s hopset drivs av behovet av att begränsa cosite-problem, särskilt med flera mixade moder, och för att stötta införandet av SATURN *Enhanced Data Rate* (SEDR). Det innebär även att SATURN i framtiden kommer interferera mindre med *wideband mobile*-blocken i UHF-planen.

I fallet HQII/SATURN är det stor skillnad mellan fred (*training mode*) och krig (*war time mode*). I fredsfallet använder SATURN idag endast 1600 frekvenser (när UHF Reorg. införts blir det 1120 frekvenser) av de maximalt tillgängliga ca 7000 frekvenserna och det är i detta fall rimligt att lägga in relativt stora *guard-band* runt kritiska fixfrekvenser. Rent krasst är det dock så att i ett krigsläge kan man räkna med att flera fixfrekvenssystemen kommer att vara utstörda, antingen av avsiktliga störare eller egna FH-system exempelvis SATURN. Standardiserade nödfrekvenser är dock alltid skyddade, och får inte störas enligt internationella regelverk.

4.4 L-band (och S-band)

Flera nationer och koalitioner har på senare tid tittat på användning av L-bandet (1-2 GHz) för bredbandiga system. Här har både 1,25 och 5 MHz diskuterats som bandbredder. För svenskt vidkommande har detta band beskrivits och förändrats i flera omgångar. Idag har Försvarmakten bara tillgång till vissa delband. Militär utrustning som ska användas i detta band bör ha kapacitet att hantera ett stort frekvensområde och vara lätta att ändra frekvens på (samt även bandbredden i luften). Idag används detta band av Ra 371 (klarar 1350-1850 MHz) och Ra 373 (klarar 1350-2690 MHz). Framtida system måste kunna samexistera med dessa system så länge som de äldre systemen är i drift.

4.5 Intelligent HF-system

Även om automatisk länketablering (eng. *automatic link establishment*, ALE) har funnits sedan 70-talet var det inte förrän i slutet av 80-talet som det blev en standardiserad metod för uppkoppling av förbindelser mellan radiostationer från olika tillverkare. De två mest spridda varianterna kallas andra respektive tredje generationens ALE. 2G ALE baseras på protokollen i MIL-STD-188-141 Appendix A [98] och 3G ALE baseras på protokollen i STANAG 4538 [99] som även är amerikansk standard, se MIL-STD-188-141 Appendix C.

Både 2G ALE och 3G ALE innebär att anropande station väljer en frekvens ur en pool av frekvenser för sitt anrop och att alla stationer som för tillfället är lediga lyssnar efter anrop genom att scanna frekvenserna i frekvenspoolen. Skillnaden mellan 2G och 3G ALE är att scanningen är asynkron i 2G ALE och synkron i 3G ALE. Det innebär att anropet i 2G ALE måste vara så långt att anropad station garanterat hinner lyssna på alla frekvenser i frekvenspoolen. I praktiken ger det också en begränsning på hur stor frekvenspoolen kan vara eftersom uppkopplingstiden annars riskerar bli orimligt lång. I 3G ALE finns metoder för att etablera en gemensam tid och därför kan alla stationer lyssna på samma frekvens samtidigt oavsett hur stor frekvenspoolen är. Anropet behöver då inte vara längre än tiden för att lyssna av en frekvens. När länken är etablerad mellan sändare och mottagare så lämnar ALE-protokollet över den uppkopplade länken till andra protokoll för nyttotrafik.

Processen att välja frekvens är inget som finns standardiserat utan det är upp till varje tillverkare att utforma dessa regler. Den enklaste metoden är att välja närmaste frekvens i scannsekvensen.

Det är det snabbaste sättet men kan leda till ett frekvensval med dåliga vågutbredningsförhållanden eller kraftig interferens. De flesta tillverkarna har därför någon form av utvärdering av frekvenserna i frekvenspoolen för att kunna välja den bästa eller åtminstone en frekvens som är tillräckligt bra för den tilltänkta nyttotrafiken. Utvärderingen baseras ofta på mätningar av bitfelshalt eller signal-brusförhållande (SNR) och på så sätt lär sig radiostationerna vilka frekvenser som fungerar bra och vilka som fungerar mindre bra. När en ny frekvenspool tas i bruk finns inga gamla mätningar och valen av frekvens blir då slumpmässigt men, så länge det utväxlas radiotrafik så lär sig stationerna så småningom vilka frekvenser som är bra. Nackdelen med att bara förlita sig på mätningar är att om det inte finns tillräckligt mycket nyttotrafik så blir utvärderingen av frekvenspoolen med tiden gammal och frekvensvalen mer eller mindre slumpmässiga i alla fall.

Försvarsmaktens kortvågssystem HF2000 utvärderar inte bara frekvenserna i frekvenspoolen, utan sparar dessutom alla mätningar för varje motstation över tid och frekvens i ett särskilt minne med en upplösning av 500 kHz och ett mätvärde per timme [100]. Dessa historiska mätningar används för en första utvärdering av frekvenserna i en ny frekvenspool. Om HF2000 är i drift så kommer den med tiden att lära sig hur vågutbredningsförhållandena varierar över dygnet i det område där systemet verkar för alla använda delband av HF-bandet (1,6 - 30 MHz). HF2000 har också en inbyggd prediktionsmodell ITU-R P.533 [101] för vågutbredning genom jonosfären som används om mätningar helt saknas. Även om nya frekvenspooler relativt ofta tilldelas systemet kan HF2000 hela tiden göra nya intelligenta val av anropsfrekvens.

Datamodemens olika moder och dataakter som används för kortvågskommunikation definieras av MIL-STD-188-110 eller STANAG 4539 [102] och har hittills begränsats till 3 kHz kanalbandbredd. I och med att Appendix D infördes i MIL-STD-188-110 [103], som definierar kanalbandbredder upp till 48 kHz för datamodem, har också MIL-STD-188-141 uppdaterats med Appendix G som beskriver *wideband* ALE (WALE) [98]. Båda dessa uppdateringar fastställdes i december 2017 och bildar tillsammans grunden för *wideband* HF (WBHF).

I korthet innebär WALE att frekvenspoolen kompletterats med en högsta tillåten bandbredd som kan vara olika för olika frekvenser, att utrustning klassas i fyra olika kategorier efter vilken bandbredd de kan hantera (3, 12, 24 eller 48 kHz) sammanhängande och att ALE-anropen kompletteras med att stationerna utbyter information om lämplig kanalbandbredd. WALE-anropen görs alltid med en 3 kHz-signal där anropande station talar om sin uppfattning av användbar bandbredd och anropad station svarar med sin uppfattning. Därefter kan båda stationerna räkna ut lämplig gemensam bandbredd för länken. WALE medger även att olika bandbredder används i länkens båda riktningar men då krävs en extra bekräftelse från anropande station.

WALE kräver alltså att alla stationer har en uppfattning om användbar bandbredd för alla frekvenser i frekvenspoolen. Hur stationerna ska skapa denna information antyds bara. Ett alternativ är att under scanning mäta på alla sub-band för en frekvens och markera vilka som är fria och vilka som är upptagna. Ett sub-band har antingen 1,5 eller 3 kHz bandbredd. Det som krävs är att uppfattningen om användbar bandbredd ska vara individuell för varje motstation och frekvens samt att minst 100 frekvenser och minst 100 motstationer ska kunna ingå i ett nätverk, d.v.s. ganska likt det som HF2000 redan gör för 3 kHz-kanaler. Ett minsta krav i MIL-STD-188-141 Appendix G är att alla stationer ska mäta SNR på alla ALE-anrop som kan uppfattas även om de är adresserad till en annan station. SNR-mätningarna används sedan för att bestämma anropsfrekvens mot en given station.

Flera undersökningar i Europa har visat att det kan vara svårt att hitta kontinuerligt ledigt spektrum för WBHF [104]–[106]. Amerikanska undersökningar visar att om man bara söker ledigt spektrum för en kortare tid, i storleksordningen minut, så blir sannolikheten att man ska lyckas acceptabelt hög för att det ska vara meningsfullt med WBHF [107], [108]. Om man släpper kravet på kontinuerligt spektrum och i stället söker n stycken lediga 3 kHz-kanaler över 200 kHz total bandbredd så är sannolikheten att man ska lyckas större även för längre tidsperioder. HF XL är ett alternativ till WBHF och bygger på *multi-carrier* modulation för att utnyttja spridda lediga 3 kHz-kanaler [106]. Nackdelen med *multi-carrier* jämfört med *wideband single-carrier*

är att effekten i slutstegen måste begränsas för att undvika intermodulationsprodukter mellan underbärvågorna. I [106] påstås det att nackdelen med att tvingas begränsa slutstegens uteffekt fullt ut kompenseras av att HF XL kan välja 3 kHz-kanaler med låga interferensnivåer.

Gemensamt för HF XL och WBHF är att det finns många kombinationer av bandbredder och modulationsmetoder att välja mellan. För ett adaptivt system som har ambitionen att hela tiden följa HF-kanalens variationer krävs en avancerad modell för kontinuerlig utvärdering av kommunikationsprestanda i förhållande till tillgängliga och använda spektrum och modulationsmetod. De nya standarderna på HF-området innehåller metoder för att lagra och utbyta sådan information mellan stationer, men inte så mycket om hur informationen ska skapas. Det är upp till de olika tillverkarna av radioutrustning att utveckla sin egna metoder baserade på allt ifrån klassiska *if-then-else*-algoritmer till *deep learning* och kognitiv radio.

5 Utveckling av civila radiosystem

I det här kapitlet beskrivs den civila radiosystem utvecklingen som till stor del domineras av utvecklingen som sker inom de olika generationerna mobiltelefonisystem.

5.1 Frekvenser för 5G

Frekvensbehovet för 5:e generationens mobiltelefonisystem (5G) är enligt förespråkarna enormt och i princip skulle hela radiofrekvensområdet allokeras till 5G om de mest radikala förespråkarna av 5G fick bestämma. Detta är givetvis inte hela sanningen, frekvensbehovet är förvisso stort men det vore fullständigt orealistiskt att allt spektrum skulle tilldelas 5G (eller dess efterföljare). Många andra aktörer kan inte fungera utan relativt stor del av spektrum tillgängligt. Några exempel på totalförsvarsrelaterade användningsområden som skulle få betydande problem är; taktiska mark- luft- och havsbaserade radiokommunikationssystem, transportabel radiolänk, navigationssystem, radar, sensorer, zonnör, vapensensorer och deras datalänkar samt strategiska fasta system, exempelvis Försvarets telenät (FTN). Vidare gäller detta även rymdbaserade system för kommunikation, fjärranalys, navigation och tidshållning samt ett stort antal civila tjänster. För många militära funktioner och tjänster är inte bara tillgång till en viss total bandbredd viktig. Genom ett aktivt val av frekvensområde kan specifika vågutbredningsegenskaper, kopplade till den aktuella taktiska eller strategiska situationen, erhållas.

Runt om i världen förekommer försök med 4G-teknik för att tillföra nya önskvärda militära förmågor som har mindre krav på robusthet [109]. En liknande utveckling förutspås för 5G. I dessa 4G-försök används både helt civila men även militärmodifierade basstationer som kan vara inkopplade i ett nät alternativt verka autonomt. Dessa system förutsätts utnyttja militärt tillgängliga frekvensområden. Med den rådande frekvensbristen är det svårt att hitta fungerande frekvensområden för denna typ av system. Alternativet, att robusta (störtåliga) militära system, skulle frekvensmässigt göra plats för 4G- eller 5G-system är inte realistiskt. Detta medför att förutsättningarna för att utnyttja tekniken på detta sätt är små om inte världens försvarsmakter tilldelas större total bandbredd. Kommande civila systemgenerationer bedöms inte kunna påverka detta i någon nämnvärd utsträckning.

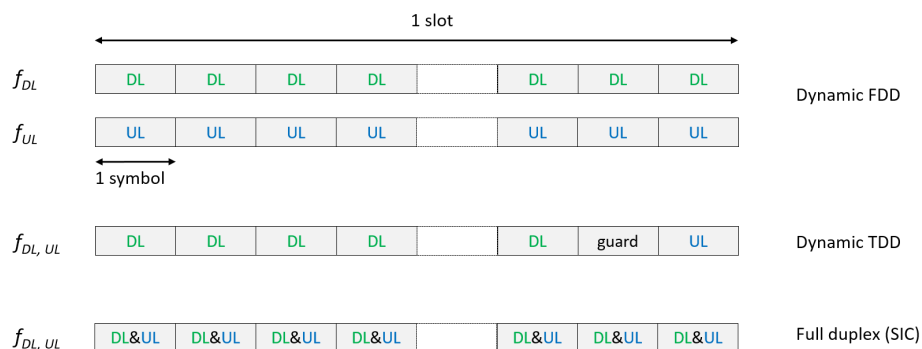
Specifikt för 5G relativt tidigare generationers cellulära system är förmågan att använda mycket stor kontinuerlig dynamiskt varierbar bandbredd och använda mycket höga frekvenser (upp till ca 52 GHz, tidigare gick gränsen under ca 4 GHz). Detta kan resultera i att IMT-industrin¹ lägger beslag på hela eller delar av frekvensband som tidigare i många fall endast haft militär användning och där just frekvensområdet spelar en viktig roll för de militära systemens egenskaper.

Utvecklingen har gått olika fort runt om i världen när det gäller etablering av 5G-nät. Det beror bland annat på att standarden inte är klar i alla avseenden, att många väntat på utfallet från världsradiokonferensen 2019 (WRC19), att operatörerna tvekat att införa tekniken i vissa fall samt att en del länder avvaktat med att genomföra frekvensauktioner. Inom EU är det frekvensbanden 700 MHz, 3,6 GHz och 26 GHz som främst kommer användas som 5G pionjärband [110], [111].

Hur påverkar standardiseringsarbetet för 5G frekvenssituationen? Detta påverkas i hög grad av arbetet inom 3GPP (*Third Generation Partnership Project*) som är den organisation som utvecklar standarder för cellulära system som 4G/LTE och 5G. En ny version kallas för en *Release* och första versionen av 5G, fas I, definierades i *Release 15* och fas II av 5G är på väg i form av *Release 16* (mitten/slutet av 2020).

Två frekvensområden är definierade i standarden, FR1 och FR2 motsvarande 410-7125 MHz och 24250-52600 MHz. I FR1 ingår för närvarande (april 2020 i *Release 16* (16.3)) 47 frekvensband och i FR2 fyra frekvensband. Detta är en betydande ökning sedan exempelvis introduktionen av UMTS (3G). Samtliga dessa band förväntas kunna nyttja det nya framtidssäkra radiogränssnittet, NR (*New Radio*), som definierats för 5G av 3GPP.

¹ International Mobile Telecommunications, en benämning på hela mobiltelefoniindustrin



Figur 5.1: Duplex-scheman i 5G.

Femton nya band tillkom inom FR1 mellan *Release 15* (15.6) och 16 (16.3). Antalet band förväntas öka ytterligare innan *Release 16* slutligen är fastlagd. Detta delvis på grund av att det som beslutades vid världsradiokonferensen hösten 2019 (WRC19) stegvis implementeras. Observera att detta anger identifierade band, vad som sedan är möjligt att använda beror dels på vilken region som avses (världen är indelad i 3 regioner) samt vad som frekvensmyndigheten i respektive land upplåtit. Ytterligare band förväntas tillkomma i senare *Releaser* från 3GPP (*Release 17* osv). För närvarande studeras frekvenser upp till och över 100 GHz för 5G (7,125-24,250 GHz och 52,600-116,000 GHz).

Förutom duplexmetoderna FDD och TDD förekommer i 5G även begreppen SUL (*supplemental uplink*) och SDL (*supplemental downlink*). SDL-banderna används när det krävs mer kapacitet i nedlänken och i samband med *carrier aggregation*. Nedlänksdelen av en *carrier* (där *carrier* är ett frekvenspar, en frekvens för nedlänk och en för upplänk, med en given frekvensseparation) bildas i SDL av en eller flera bandsegment från ett (eller flera) FDD-band och en del från ett eller flera SDL-band. Detta ger en mycket större bandbredd än vad som kan erhållas i ett enda band för DL.

SUL-banderna används för att utöka täckningen i upplänken. Exempelvis är det senare användbart när de höga frekvenserna i FR2 används. I de flesta fall när FR2 används har nedlänken, med hjälp av lobformning och hög uteffekt hos basstationen, lång räckvidd medan den effektsvaga mobilen inte kan nå lika långt. Genom att då använda en lägre frekvens från FR1 i upplänken kan mobilen ändå nå fram till basstationen.

I 5G kan FDD och TDD även vara dynamiska. I FDD bildar två frekvenser (med en viss frekvensseparation, denna varierar från frekvensband till frekvensband), en *carrier*. I tidigare generationer av mobiltelefonisystem, som exempelvis i LTE, är den lägsta frekvensen av de två alltid avsedd för upplänk och den högsta för nedlänk. Dynamisk FDD i 5G innebär att det kan vara samma som i LTE eller omvänt, d.v.s. upplänkfrequensen blir nedlänksfrekvens och vice versa. I dynamisk TDD kan sändningsriktningen ändras från symbol till symbol (dock med en lucka i sändningen på någon eller några symboler (utan information) för att radioenheterna ska hinna ställa om). I NR kan även en tidlucka (eng. *slot*) vara självständig (eng. *self-contained*) vilket innebär att den innehåller allt som behövs för sändning (resurstilldelning, dataöverföring och Ack/Nack).

Från *Release 17* kan även full duplex komma att introduceras. Detta kan åstadkommas med momentan sändning i upplänk och nedlänk på samma frekvens med användning av *self-interference cancellation* (SIC), se Figur 5.1.

NR-standarden kommer att hantera både licensierade såväl som olicensierade frekvensband. Det koncept som standardiserades redan i *Release 13/14*, *licensed assisted access* (LAA), kan användas även i NR. LAA är en metod där licensierade och olicensierade frekvensband i 5GHz-bandet med hjälp av *carrier aggregation* i nedlänken används för att förbättra kapaciteten i LTE. Lite förenklat arbetar LAA med dynamiskt frekvensval och använder *listen-before-talk* (LBT) för att

identifiera kanaler i 5 GHz-bandet som inte används av WiFi-användarna. Utöver LBT används även teknikerna *dynamic frequency selection* (DFS) och *dynamic channel selection* (DCS). DFS är en metod för att skydda andra användare (militär- och väderradar, satellitkommunikation) i C-bandet mot störning, till skillnad från DCS som är en funktion i WiFi-anslutningspunkterna för att välja en kanal med så låg interferensnivå som möjligt. På så sätt ska inverkan på befintlig WiFi-användning, åtminstone i teorin, minimeras. *Release 16* förväntas dessutom innehålla funktioner för att använda NR i olicensierade band helt stand-alone.

MulteFire™ är en i grunden LTE-baserad teknik som endast används i olicensierat spektrum [112], [113]. Den möjliggör nya typer av etableringar som exempelvis privata LTE nätverk (t.ex. i industrier). MulteFire studeras även för 5G (och 6G).

NR-U (U=Unlicensed), med andra ord, NR i olicensierade band, är en teknik sprungen ur bland annat LTE-U och LAA och som studerats inom ramen för *Release 16*. Exakt hur detta ska fungera i NR är inte fastställt och ull funktionalitet förväntas först i senare *Releaser*. LTE-U (definierat i *Release 12* och ytterligare beskrivit i LTE-U forum [114]) måste ha en koppling till licensierat spektrum och har bara använts i vissa områden i USA eftersom den saknar en bra mekanism för kanalaccessen, till skillnad mot LAA som nyttjar LBT. NR-U ska kunna användas i scenarier med *carrier aggregation*, *dual connectivity*² eller helt *stand-alone*. För att kunna samverka med WiFi används tekniker för kanalaccess (LBT, MCOT³), effektbegränsning, bandbreddskrav (OCB⁴) samt andra speciella funktioner (DFS, tekniker för frekvensåteranvändning), NR-U avses nyttjas både inomhus och utomhus och i frekvensbanden kring 2,4, 3,5, 5 och 6 GHz.

Vissa former av *licensed shared access* (LSA) kan också vara tänkbara för NR i 5G. Med LSA avses att ett visst frekvensområde är dedikerat för en viss teknologi men inte uppdelat och fördelat till flera operatörer. Istället kan hela frekvensområdet dynamiskt delas mellan två eller flera operatörer (system). Om detta kan användas eller inte är främst en regulatorisk fråga, inte en fråga om standardisering.

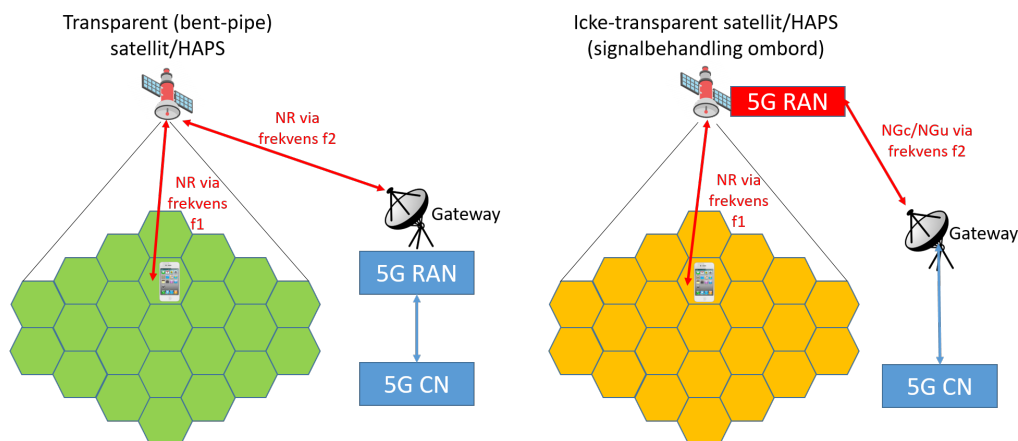
5.1.1 DSA i 5G

Inom 3GPP (och 5G/6G) används begreppet dynamisk spektrumdelning (*dynamic spectrum sharing*, DSS). För cellulära system är det främst en metod som möjliggör en smidig övergång från LTE till NR (5G) och där LTE och NR kan nyttja samma bärvåg (eng. *carrier*). NR kan på detta sätt introduceras i frekvensband som idag endast används av LTE och gör det möjligt för operatörerna att dynamiskt växla mellan både LTE och 5G NR-täckning på befintliga 4G-sajter. 3GPP standardiserade DSS redan i *Release 15* och tekniken har vidareutvecklats i *Release 16*. DSS påverkar både LTE- och 5G NR-standarderna. Effekten på LTE är dock marginell eftersom det är svårt att ändra en framgångsrik väletablerad och mycket spridd teknik för att möjliggöra dess efterträdare. För att kunna synkronisera en 5G-terminal på en frekvens som används för LTE, används en teknik som utvecklades för multimediadistribution över LTE, MBMS (*Multimedia Broadcast Multicast Services*) eller rättare sagt dess utvecklade variant eMBMS (*Evolved MBMS*). Hela mekanismen är mycket komplex och det finns en uppsjö av olika parameterkombinationer, varför en mer detaljerad beskrivning inte ges här, se istället exempelvis [115]–[117].

²en UE (eng. *user equipment*), exempelvis mobiltelefon, kan samtidigt sända och ta emot data via (flera) *carriers* från två celler (eller grupper av celler).

³Maximum Channel Occupancy Time

⁴Occupied Channel Bandwidth



Figur 5.2: Två exempel på ett 5G-koncept som utnyttjar satellitkommunikation, till vänster en så kallad *bent-pipe* lösning där satelliten repeterar inkommande signal från jorden på ett annat frekvensband än inkommande signal och till höger en mer avancerad lösning med delar av radioaccessnätet (5G RAN) i satelliten (CN=Core Network, kärnnät).

5.1.2 Satellitsegment för 5G

5G saknar en integrerad satellit- och markbaserad nätinфраstruktur. Det finns dock ett starkt kommersiellt intresse för detta inom ramen för 5G. Bland annat har 3GPP studerat betydelsen och användningen av satelliter för 5G.

I detta sammanhang har begreppet *non-terrestrial networks* (NTN) myntats. Med detta avses nätverk eller segment av nätverk som använder luftburna eller rymdburna (satelliter) farkoster [118]. Luftburna farkoster avser höghöjdsplattformar (eng. *High Altitude Pseudo Satellites* eller *High Altitude Platform Stations* (HAPS)) i form av obemannade flygplanssystem och som opererar kvasistationärt⁵ på typiska höjder mellan 20 (ibland anges ända ner till 8 km) och 50 km.

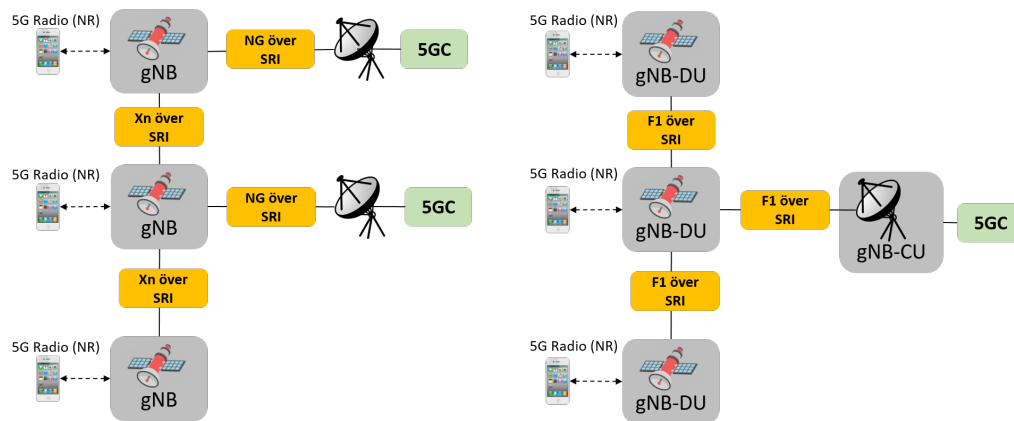
Exakt i vilken utsträckning NTN kommer att hanteras av *Release 16* är svårt att bedöma då 3GPP är mycket svävande kring detta. Det finns en hel del rykten och artiklar på internet men dessa är ofta motsägelsefulla och behandlas därför inte i denna sammanfattning. För *Release 17* är det mycket tydligare vad som kommer att standardiseras. I den nuvarande studieplanen [119] för arbetsgrupperna inom 3GPP (från mars 2020) finns ett *Rel 17 Work Item* som beskriver en rad ändringar och tillägg i radiogränssnittet NR NTN, men även ändringar och tillägg i kärnnätet.

Eftersom fördröjningarna som introduceras via satellitlänken är i spannet 50-700 ms är 5G via satellit inte lämpligt för tidskritiska tillämpningar. Geografiska områden med gles eller dålig 5G-täckning från marknätet nämns (se t.ex. [120]) som en tillämpning, distribution till accesspunkter och basstationer är en annan, kommunikation till flygplan (särskilt över oceanerna) och fartyg är en tredje samt kommunikation med IoT-enheter i avlägsna trakter en fjärde.

I Figur 5.2 visas två möjliga satellitbaserade 5G-koncept, den vänstra bilden visar ett koncept där dagens befintliga satelliter troligen kan användas direkt, konceptet till höger kräver i de flesta fall nya satelliter eftersom de även bär hela eller delar av 5G radioaccessnätet.

För fallet med icke-transparent satellit, se Figur 5.2, finns det ett flertal olika kombinationer av signalbehandling ombord. I Figur 5.3 visas några exempel. I vänstra delen av figuren innehåller satelliten en hel 5G basstation (gNB) och överföringen av det standardiserade gränssnittet NG till satelliten från 5G kärnnätet sker via det likaledes standardiserade *satellite radio interface* (SRI). I högra delen av figuren har basstationen delats upp i två delar, en central enhet (CU) på marken och en distribuerad enhet (DU) i satelliten. En DU hanterar endast de lägre kommuni-

⁵Upplevs befinna sig på en och samma (stationär) plats men kan flytta på sig över ytan.



Figur 5.3: Två, av flera, alternativ för en icke-transparent lösning. I vänstra fallet innehåller satelliten en hel 5G basstation, i högra fallet är denna delad i en central (*Central Unit*, CU) enhet på marken och en distribuerad (*Distributed Unit*, DU) enhet i satelliten.

kationslagren som RLC, MAC och PHY. Samma uppdelning förekommer även i rent terrestra nät. Mellan satelliterna, det som kallas *intersatellite links* (ISL) används SRI som kan bära de båda 5G gränssnitten Xn (till vänster) eller F1 (till höger). En del ISL använder dessutom optiska länkar istället för radio.

Värt att notera i sammanhanget är att frekvensbrist kan skapa problem med driftsättning av dessa stora konstellationer. På kort sikt, några år, får denna teknik ingen större betydelse. Från 2025 skapar den troligen ytterligare utvecklingsmöjligheter för 5G globalt.

5.2 Frekvenser för satellitkommunikation

Förutom alla satelliter som används för datatransmission, TV-distribution (feeder och direkt till kund), mobiltelefoni (exempelvis Iridium och Thuraya), vädersatelliter och fjärranalyssatelliter har ett nytt fenomen dykt upp under de senaste åren, nämligen massuppskjutning av LEO-satelliter. En betydande drivkraft bakom detta är att markbaserat trådlöst internet och liknande bara täcker ca 10 % av jordens yta. Ett flertal operatörer har ansökt om frekvenstillstånd hos FCC i USA för att erbjuda globalt tillgängligt bredband med hjälp av små LEO-satelliter. Terminalerna är främst i storlek av en pizzakartong med fasstyra antenner som kan följa de snabbt passerande LEO-satelliterna. Frekvensbanden som används är främst Ku/Ka kring 12-18 GHz respektive 26,5-40 GHz, men även högre frekvenser upp till 75 GHz för feeder-länkar (förbindelse mellan en fix jordstation och satellit). De flesta konstellationerna använder proprietär teknik. Bland konsortierna kan nämnas Starlink (SpaceX) med ett första mål om 12 000 satelliter (360 i mars 2020, slutmålet är 42 000 satelliter). Telesat planerar 360 satelliter i Ka-bandet och Kuiper (Amazon) siktar på 3 236 satelliter. LeoSat med 54 (av 108) satelliter och OneWeb med 74 (av 648) satelliter har båda under slutet 2019/början 2020 stängt ner verksamheten p.g.a. otillräcklig finansiering. Bland övriga aktörer kan omnämnas Samsung, Boeing, Apple och Google som alla lanserat egna koncept, kinesiska GalaxySpace som påstås komma att använda 5G-teknik samt AST&Science som satsar på 4G och 5G. Om alla dessa satelliter skjuts upp och kommer i drift kommer det att bli mycket trångt i de mest nyttjade frekvensbanden med en uppenbar frekvensbrist som följd. Den enorma mängden satelliter som avses skjutas upp bäddar dessutom för konflikter mellan företagen beträffande satellitbanor och skapar interferensproblem.

5.3 6G

5G, precis som tidigare generationers mobiltelefoni, kommer att utvecklas via ett antal iterationer av standarden. Dagens 5G NR, som nyttjar kärnnätet i LTE (*Non Stand Alone*, NSA), kommer att ersättas av 5G SA (*stand alone*) med ett nytt kärnnät, sedan kommer ytterligare ett par

standardrevisioner fram till år 2030. Vad det blir av de studier som nu pågår avseende 6G är svårt att bedöma och troligen kommer det hända mycket innan en första standard finns tillgänglig någon gång runt 2028-2030. 6G kommer troligen att leda till en ytterligare förtätning av antalet noder per ytenhet, siffror på 100-10 000 gånger nämns i litteraturen [121]. Även nya typer av noder i form av exempelvis bärbara enheter, integrerade headset och inopererade sensorer finns i visionen för 6G [122]. Många studier och debattartiklar förespeglar en radikal förändring av hela konceptet där bland annat en övergång från nätverksorienterade till användarorienterade nätverk är en vital del [122]–[124]. Definitionen av användarorienterade nätverk (*User Centric Network*, UCN) är inte entydig. I allmänhet innebär UCN metoder för att förbättra användarupplevelsen oberoende av exempelvis enhet, nätverk, plats och mobilitetsförhållanden i ett brett spektrum av användarfall. Med en användarorienterad nätverksarkitektur i 6G menas exempelvis att centrala delar av systemintelligensen flyttas ut i nätet, i flera fall ända till användarnas terminaler. Terminalerna som för detta antas använda artificiell intelligens, kan därmed fatta autonoma nätbeslut baserat på resultat från tidigare händelser, utan kommunikation med centraliserade system. Detta är tänkt att ge en mer responsiv nätverkshantering, något som bedöms nödvändigt för en del 6G-tjänster. I Tabell 5.1 redovisas karakteristika för de olika generationerna av cellulära system, enligt [122].

Tabell 5.1: Karakteristika för de olika generationerna av cellulära system, ur [122]. För 6G är beskrivs ett exempel då det är långt kvar till det finns mer konkret information.

Egenskap	1G	2G	3G	4G	5G	6G
Införandeperiod	1980-1990	1990-2000	2000-2010	2010-2020	2020-2030	2030-2040
Max dataakt	2,4 kb/s	144 kb/s	2 Mb/s	1 Gb/s	35,46 Gb/s	100 Gb/s
Högsta frekvens	894 MHz	1 900 MHz	2 100 MHz	6 GHz	90 GHz ⁶	10 THz
Servicenivå	Tal	Text	Bild	Video	3D VR/AR	Taktil
Standarder	MTS, AMPS, IMTS, PTT	GSM, IS-95, CDMA, EDGE	UMTS, WCDMA, IMT2000, CDMA2000, TD-SCDMA	WiMAX, LTE, LTE-A	5G NR, WWW ⁷	-
Multiplexing	FDMA	FDMA, TDMA	CDMA	OFDMA	OFDMA	Smart OFDMA plus IM ⁸
Arkitektur	SISO	SISO	SISO	MIMO	Massiv MIMO	Intelligenta ytor
Kärnnät	PSTN	PSTN	Paket-nätverk	Internet	Internet, IoT	IoE ⁹
Highlight	Mobilitet	Digitalisering	Internet	Strömning i realtid	Extremt hög dataakt	Säkerhet, sekretess, integritet

En aspekt som får allt större betydelse är hållbarhet. Bland annat har Ericsson gjort studier som visar hur olika branscher kan halvera CO₂-utsläppen till 2030 med hjälp av 5G och ytterligare en gång till år 2040. Mobilbranschen i sig står för 1,4 % av de globala CO₂-utsläppen, en siffra som spås minska framöver i och med införandet av 5G.

5.3.1 Frekvenser i 6G

Enligt många 6G-studier, exempelvis [121], [122], [124], är ännu högre frekvenser än vad som används för 5G nödvändigt för 6G. Ännu högre frekvenser innebär 100 GHz och däröver. Dessa frekvenser har mycket kort räckvidd och korthållskommunikation kommer därför att bli mer vanligt och bedöms till och med dominera i flera miljöer. Detta betyder många fler basstationer per km² jämfört med idag och att många av dessa kommer att placeras inomhus. Det finns krafter som förespråkar lokal frekvenslicensiering (för exempelvis lokala nät i en fabrik), bland annat verkar RSPG (*Radio Spectrum Policy Group*) inom EU-kommissionen för detta.

⁶Enl. [122]. 52,6 GHz enl. 3GPP Release 16.

⁷World Wide Wireless Web

⁸Index modulation [125]

⁹Internet of Everything

Att gå högre upp i frekvens relativt 5G innebär i praktiken frekvenser över 100 GHz och att begreppet TeraHerz-kommunikation blir relevant igen. Ofta diskuteras ultrasmå celler och *super-effektiv korthållsradio* (med liten effektförbrukning och kort räckvidd, typiskt ett fåtal meter) med bandbredder på $n \times 1$ GHz. Tekniker som LTE-LAA, MulteFire, NR-U och en utveckling av denna, 6G-U, diskuteras dessutom flitigt i litteraturen [113]. Även ljusvågor, *visible light communication* (VLC), omnämns i en del studier som möjliga att nyttja i 6G [122], [124].

5.3.2 Spektrumhantering i 6G

Blockchain är en teknik som bland annat används för att skapa och hantera elektroniska valutor, t.ex. bitcoin [126], [127]. Definitionsmässigt är blockchain en öppen och distribuerad databas där transaktionerna lagras i kryptografiskt säkrade block som bildar kedjor och där ingen enskild (individ, organisation, företag) har kontrollen. Tekniken påstås, t.ex. för 6G, kunna revolutionera resurs- och spektrumdelning (handel). Detta genom att eliminera den centrala kontrollen (myndigheter som PTS) och ersätta denna med en distribuerad dylik, vilket möjliggör höggradigt dynamisk handel med tillgångar (frekvenser) utan att någon central server behöver användas. Utöver detta påstås denna teknik kunna förbättra nätverkssäkerheten och minska kostnaderna [121], [122], [128].

5.4 IEEE 802-standarder

Trådlösa nätverk i licensfria frekvensband, WiFi (IEEE 802.11), Bluetooth (IEEE 802.15) och WiMAX (IEEE 802.16), måste kunna samexistera med sig själva, med varandra och andra system. Exempel på andra system är mikrovågsugnar, radarsystem och mobiltelefonisystem som alla delvis utnyttjar samma frekvensband som dessa trådlösa nätverk. Flera av dessa interferenser är dessutom intermittenta i den meningen att de inte alltid är aktiva. WiFi, Bluetooth och WiMAX innehåller i dag metoder för att upptäcka andra användare av spektrum och anpassa sin egen användning därefter. Dynamiskt frekvensval (DFS), kontroll av sändareffekt (TPC) och adaptiv kodning och modulation (ACM) är teknikerna som utnyttjas för att uppnå samexistens. I sin funktion är dessa tekniker en variant av dynamisk spektrumaccess även om DSA inte används som begrepp för dessa nätverk [129].

IEEE 802.22 definierar trådlösa regionala nätverk (WRAN, eng. *wireless regional area network*) som använder lokalt utnyttjade frekvenser avsedda för mark-TV liknar ett mobiltelefonisystem med basstationer (BS) och abonnenter (SS, *subscriber station*) i ett område med en radie på upp till 30 km per BS. 802.22 använder tekniker från kognitiv radio för att skapa radioförbindelser som inte interfererar med primäranvändarens användning av spektrum, d.v.s. TV-distributionen. Principen för WRAN är att varje SS rapporterar sin uppfattning av spektrumutnyttjandet med hjälp av spektrumavkänning till BS som analyserar insamlat data och instruerar varje SS hur spektrum ska utnyttjas för tillfället. WRAN har återanvänt mycket av fysiska- (PHY) och mediaaccessprotokollen (MAC) från WiMAX med några justeringar p.g.a. vågutbredningsförhållanden. Skillnaden mellan WRAN och WiMAX ligger mest i den kognitiva förmågan hos WRAN att analysera spektrum. Även WiFi (IEEE 802.11af) kan utnyttja TV-frekvenser på samma sätt med kommunikationsavstånd upp till 1 km [32].

Inom 802.11, 802.15, 802.16 och 802.22 är DFS, TPC och ACM standardiserade i PHY- och MAC-protokollen för samexistens inom respektive nätverk och för skydd av primäranvändarens tillgång till spektrum. Koordineringen mellan nätverken styrs av ytterligare en standardiseringsgrupp, IEEE 802.19 TAG (*Wireless Coexistence Technical Advisor Group*) som granskar nya förslag från standardiseringsgrupperna utifrån kravet på samexistens mellan de olika 802.xx-systemen. Arbetet inom IEEE 802.19 TAG resulterar i rekommendationer (eng. *Recommended Practice*) under respektive nätverksstandard[129].

Flera av byggblocken i 802-familjen som syftar till ökad samexistens mellan och inom olika nätverk är också etablerade metoder för militär användning. Spektrumavkänning, DFS, TPC och ACM medger att radiosystem kan analysera den egna elektromagnetiska miljön och anpassa

sin egen spektrumanvändning därefter, vilket är önskvärt för att lösa samexistens mellan olika radiosystem på små plattformar.

Utvecklingen av civila trådlösa nätverk går mot att spektrum delas mellan flera olika system och att system måste kunna anpassa sig till detta, vilket kan likna den interferensmiljö som förekommer i militära sammanhang. Ingen av 802-familjens metoder är utvecklad för miljöer med aktiva motståndare som försöker utnyttja svagheter i protokollen. Att direkt överföra civila metoder till militära system är tillrådligt, utan måste analyseras noggrant utifrån ett telekrigsperspektiv, speciellt i taktiska sammanhang.

Det som saknas i militära system i allmänhet är en kognitiv motor som kontinuerligt kan analysera och lära sig hur metoderna ska utnyttjas på bästa sätt. Kognitiva metoder skulle kunna användas för att opportunistiskt utnyttja ledigt spektrum för att öka tillgängligheten på sambandssystemen samtidigt som eventuella störare undviks. Inom 802.22 finns även metoder för dynamiskt frekvenshopp där datatransmission och spektrumavkänning utförs parallellt på olika frekvenser och där resultatet av spektrumavkänningen påverkar frekvenshoppsmönstret. Frekvenshopp tillsammans med spektrumavkänning och metoder för ökad samexistens i en kognitiv radio har förutsättningarna att vara både flexibelt och robust.

Utvecklingen av WRAN IEEE 802.22 är vilande sedan juli 2019 men arbetsgruppen för spektrumavkänning är överflyttad och ihopslagen med motsvarande grupp inom Bluetooth IEEE 802.15. WiMAX-utvecklingen är också vilande sedan mars 2018 medan Bluetooth och WiFi IEEE 802.11 utvecklas fortfarande ¹⁰.

5.5 Forskning inom Horizon 2020

Horizon 2020 (H2020) är EU:s ramprogram för forskning och innovation. Programmet är det åttonde i ordningen, startade 2014 och pågår till och med 2020. Den totala budgeten är 80 miljarder euro som fördelas ut till företag och organisationer efter ett projektansökningsförfarande [130].

Ett stort antal projekt har genomförts inom H2020 programmet, en del av dess har varit inom kommunikationsområdet. Nedan beskrivs kortfattat innehållet och resultat från några utvalda projekt som är intressanta därför att de studerat hur radiosystem ska använda frekvensspektrumet.

METIS-II var en uppföljare till projektet *Mobile and Wireless Communications Enablers for the Twenty-Two Information Society* (METIS). METIS-projektet tog fram nyckelscenarion, testfall och prestandakrav för det som skulle bli 5G. METIS-II förfinade arbetet från METIS och tog steget längre genom att utveckla och designa 5G RAN (*radio access network*) [131].

Tillgång till frekvensspektrum som är sammanhängande och som medger stora bandbredder samt är globalt harmoniserade anses vara nyckeln till om 5G kommer att lyckas. Exklusivt licensierat spektrum är essentiellt för att garantera täckning och servicekvalitet. Andra licensieringsmetoder som LSA eller *license exempt access* kan användas som komplement för att ytterligare öka tillgången till spektrum. För att flexibelt kunna hantera spektrum föreslogs av METIS-II-projektet en *holistic spectrum management architecture*, vilken inkluderar regulator- och operatör-domänerna. Dess övergripande uppgift är att fördela spektrumresurser utifrån det aktuella behovet men även ta hänsyn till regulatoriska regelverk [132]. Även om 5G och det som föreslogs inom de båda METIS-projekten gör anspråk på mer frekvensspektrum har de också mekanismer för att hantera tilldelat spektrum dynamiskt, där spektrumresurser kan omfördelas för att möta det aktuella behovet.

Målet för projektet *Shared Access Terrestrial-Satellite Backhaul Network Enabled by Smart Antennas* (SANSa) var att öka prestandan för backhaul-nätverket inom 5G, med avseende på kapacitet och motståndskraft till interferenser med ett effektivt användande av frekvensspektrum. Fokus för projektet var kombinationen av ett satellit- och markbundet backhaul där frekvensband

¹⁰Mer finns att läsa på IEEE hemsida <http://ieee802.org/>.

kan återanvändas mellan de båda segmenten. Hybridlösningen för backhaul gör systemet mindre känsligt för länkfel i marksegmentet och kan på så vis vara en fördel vid katastrofsituationer då inte marksegmentet fungerar tillfredsställande [133].

Inom SANSAs studerades användning av samma frekvenser för kommunikationen till satelliterna som mellan basstationerna, för att inte behöva ännu mer frekvensresurser. Detta ger upphov till ett samexistensproblem där frekvenserna måste kunna återanvändas. Detta löses i projektet med MIMO-antennstekniker vilket gör att lobstyrning av radiosignalerna kan göras för att undvika vissa frekvenskonflikter. Vidare, utvecklades en *radio resource management* (RRM) för den föreslagna hybridlösningen. I den dynamiska RRM som utvecklats inom projektet är lobstyrning av antenner, effekttreglering och frekvenstilldelning central, där olika varianter och kombinationer utvärderades. Även flödeskontroll användes för att i vissa fall avlasta marksegmentet så att inte trafikstockning uppstår [134]. Spektrumeffektiviteten kan öka med ungefär tre gånger med den RRM som utvecklades i projektet och MIMO-antennstekniken kan ge upp till nio gånger ökad spektrumeffektivitet [135].

Projektet *Remote Area Access Network for 5th Generation* (5G-RANGE) har som mål att ta fram tekniker som ger 5G-täckning i glesbefolkade områden. Projektet siktar på cellradier på minst 50 km och en datatakt på 100 Mbps vid cellkanten. I projektets koncept ingår att använda både licensierat och olicensierat spektrum tillsammans med kognitiva radiotekniker [136].

I [137] föreslås att en kognitiv cykel integreras i MAC-lagret. Den kognitiva cykeln använder kooperativa spektrumavkänningstekniker för att sedan göra dynamisk spektrumaccess av oanvända TV-frekvenser. Projektets studier av spektrumavkänning visar att kooperativa spektrumavkänningstekniker kan förbättra detektionsprestandan anmärkningsvärt speciellt för de scenarion som studerats med långgräckviddig kommunikation till avlägsna områden [138].

Målet med projektet *Coordinated Control and Spectrum Management for 5G Heterogeneous Radio Access Networks* (COHERENT) var att ta fram ett enat kontroll- och koordineringsramverk för 5G heterogena radioaccessnätverk. Ramverket i projektet ska bl.a. medge flexibel spektrumhantering och stödja flera olika spektrumaccessmetoder, exempelvis *licensed shared access* och *license assisted access* [139].

Projektet föreslog en *spectrum manager application* (SMA) vilken använder kognitiva algoritmer som kan använda flera olika abstraktionsmodeller av det underliggande nätverket för att effektivt hantera frekvensspektrumet. SMA arbetar med två olika tidshorisonter, en kortsiktig och en långsiktig. För den kortsiktiga tidshorisonten används data från en interferenskartan med SINR (signal-till-interferensförhållandet) från både fysiska och virtuella övervakningsenheter. För det längre tidsperspektivet används data från olika databaser med både nationella och internationella regulatoriska uppgifter om frekvensspektrumet. Dessa två tidshorisonter sammantaget gör att den föreslagna SMA:n kan hantera frekvensspektrumet effektivt [140].

6 Diskussion

Flera problemställningar som är fortsatt aktuella tar avstamp i tidigare arbeten. I [1] identifierades exempelvis följande områden för att uppnå effektivare frekvensutnyttjande och förbättrad samexistens:

- dynamisk allokering av radioresurser, t.ex. tilldelning av frekvensspektrum och effektreglering
- adaptiva sändar- och mottagartekniker som kan hantera dynamiska interferenssituationer
- flerantennsystem som kan ge möjlighet till ökat skydd mot störning och interferens, genom exempelvis diversitet, lobformning och undertryckning
- undertryckning av självinterferens, t.ex. utombandsemission, baserat på tekniker från utvecklingen av full duplex.

I denna omvärldsanalys har den senaste utvecklingen inom dessa områden undersökts och ytterligare teknikområden har identifierats som innefattar, men också utökar, dessa områden.

De senaste tjugo årens forskning inom kognitiv radio har på senare år flyttat fokus mot andra begrepp som intelligenta radiosystem samt AI och maskininläring för kommunikation [6]. Även om begreppen och benämningarna har förskjutits från att handla om kognitiv radio till att handla mer om AI och intelligenta radiosystem så är det liknande problem som studeras, men nya tekniker ger nya möjligheter och utmaningar. Inbyggnad av nya AI-tekniker i kommunikationssystem ger nya möjligheter, men också nya sårbarheter i systemen. Det är nödvändigt att känna till och förebygga dessa sårbarheter i framtida kommunikationssystem. Det finns stora svårigheter och utmaningar med ML-algoritmer, inte minst när det gäller robusthet och säkerhet. Inom den civila forskningen av nya kommunikationssystem är fokus främst på effektivisering och ökad kapacitet, och utvecklingen kring AI syftar till att ge nya möjligheter och förbättrad prestanda. I radiosystem för försvars- och säkerhetstillämpningar är det också nödvändigt att ta hänsyn till sårbarhet och robusthet.

Frågeställningar kring kognitiv radio och dynamisk spektrumaccess som är intressanta för fortsatta studier är exempelvis:

- Vilka nya möjligheter ges av AI-tekniker och vilka tillämpningar av AI har störst potential att bidra till effektivare frekvensutnyttjande för förbättrad samexistens av trådlösa kommunikationssystem?
- I vilka delar av militära radiosystem är det lämpligt eller olämpligt att använda AI-tekniker, speciellt med hänsyn till robusthet, säkerhet och samexistens?
- Hur snabbt ändras kommunikationsförhållandena i olika militära scenarier och hur snabbt kan anpassning ske i olika delar av kommunikationskedjan, exempelvis frekvensval i ett system, länkadaptation (t.ex. modulation, kodning, sändareffekt) eller mottagartekniker (t.ex. filtrering, demodulation och avkodning)?

Pågående forskning och utveckling om hårdvara och signalbehandling för extremt bredbandig kommunikation bör fortsatt följas. Speciellt intressant för området är nya tekniker som kan ge ökade möjligheter till

- stor momentan bandbredd för ökad kapacitet
- dynamisk spektrumaccess
- bandspridning som skydd mot störning
- bandspridning som skydd mot avlyssning och upptäckt.

Den främsta fördelen med *in-band full duplex* (IBFD) i civila system anses vara den potentiella kapacitetsökningen. För projektets fortsatta studier är dock även IBFD för militär tillämpning (samtidig telekrig och kommunikation), användning i relänoder och dynamisk spektrumaccess av stort intresse. Vidare är den adaptiva undertryckningen av interferens som IBFD bygger på intressant för exempelvis undertryckning av brus, undertryckning av utombandsinterferens samt *non-orthogonal multiple access* (NOMA).

Många forskningsfrågor och praktiska problem kvarstår för att avgöra exakt på vilket sätt, och i vilken utsträckning det lönar sig att använda IBFD för militära tillämpningar. Dessa frågor är exempelvis:

- Vilka svårigheter finns för IBFD i militära kommunikationssystem där lägre frekvensband, högre sändareffekt och känsligare mottagare ofta används? Kan undertryckning göras lika effektivt på lägre frekvensband som på frekvensband kring 2,4 GHz?
- Vilka ytterligare krav på exempelvis robusthet och störåtlighet ställs på telekrig- och kommunikationssystem för militära tillämpningar, och kan dessa krav uppfyllas vid användning av IBFD?
- Vilka av de nya förmågorna, såsom samtidig telekrig och kommunikation kan, inte bara teoretiskt utan också i praktiken uppnås med IBFD? Kan dessa åstadkommas med dagens teknik, och vilka eventuella förluster kan detta leda till gällande systemprestanda hos olika delsystem?

En annan teknik för att reducera utombandsemission, i det här fallet hos sändaren, är DPD (*digital predistortion*). Med den här tekniken kan den olinjära distorsionen från radiosändarens effektförstärkare minskas, vilket medför en reducerad utombandsemission. Något som typiskt är svårt att åstadkomma utan att behöva byta effektförstärkare. En reducerad utombandsemission skulle kunna medföra att en tätare packning av kanaler i frekvens blir möjlig. DPD ställer dock mycket höga krav på samplingsfrekvens eftersom den signal som DPD ska estimeras för att motverka effektförstärkarens distorsion ofta har flera gånger så stor bandbredd jämfört med den signal som sänds. Vidare kräver adaptiv DPD att de komponenter som används för att erhålla PA:ns utsignal är av mycket hög kvalitet eftersom DPD:n även kommer att försöka kompensera för distorsionen i dessa. Om dessa komponenter introducerar en betydande mängd distorsion, kommer det resultera i att DPD:n överkompenserar, vilket leder till dålig prestanda. För att DPD ska användas i större utsträckning krävs ytterligare utveckling på komponentnivå.

Idag går utvecklingen av smalbandiga militära system (främst för 30-88 MHz) från system med i princip enbart 25 kHz bandbredd till 50 och även 100 kHz bandbredd, främst för att flera av de nyare eller modifierade vågformerna både behöver hantera tal och ha en viss datakapacitet. Det medför att svårigheterna att frekvensplanera ökar samt att det blir svårare att hantera denna blandning av bandbredder på ett, ur frekvensperspektiv, effektivt sätt.

UHF-bandet (225-400 MHz, i Sverige för närvarande 240-380 MHz), ofta benämnt NATO-bandet, är trots en omfattande omorganisation (UHF Reorg.) ett ganska splittrat band med en blandning av många olika typer av system, smalbandiga som bredbandiga, fixfrekvens och frekvenshoppande system. Dessutom finns det fortfarande en del civil trafik, främst för flygnavigering, i detta frekvensband. Denna uppdelning gör det mycket svårt att uppnå en hög frekvenseffektivitet. Dessutom har flera system en freds- och en krigsmod, där den senare kan innebära att systemet, mer eller mindre, hoppar på hela bandet (225-400 MHz) och därmed riskerar att störa fixfrekvenssystem. Att frekvensbandet efter flera års arbete med att omstrukturera bandet fortfarande är splittrat och fragmenterat vittnar om hur svårt det är att effektivisera ett frekvensområde som har en omfattande mängd system och som brukats under lång tid. Tekniska lösningar med större flexibilitet, bland annat sådana som skulle kunna medföra tätare packning av frekvenser, samt en uppmjukning av hur olika delar av bandet kan användas skulle kunna vara en väg framåt för att öka frekvenseffektiviteten. Vägen dit bedöms inte vara enkel och det finns bland annat taktiska, strategiska, politiska och ekonomiska skäl som påverkar möjligheterna till en mer flexibel hantering.

För närvarande pågår en massuppskjutning av små LEO-satelliter, totalt upp emot 20 000 - 30 000, främst avsedda för att erbjuda internet i geografiska områden med gles eller dålig 5G-täckning (eller 2G/3G/4G) från marknätet. Andra tillämpningar är matning till accesspunkter och basstationer, kommunikation till flygplan (särskilt över oceanerna) och fartyg, samt kommunikation med IoT-enheter i avlägsna trakter. Företrädesvis används höga frekvenser (över 12 GHz). Det är dock en betydande risk att dessa stora konstellationer av satelliter kan skapa frekvensbrist inom dessa frekvensband. Utöver detta finns en risk att interferenser, inom och mellan systemen, samt med andra satellitkonstellationer och system på marken uppstår.

Frekvensbehovet för dagens mobiltelefonisystem (IMT), och särskilt 5:e generationens system (5G), är enormt om de specificerade scenarion i utvecklingen ska realiseras. Det pågår ständigt en debatt om att övriga frekvensanvändare, exempelvis militära men även t.ex. civila satellitoperatörer, ska släppa mer frekvensband till mobiltelefonin. IMT-utvecklingen är i detta hänseende det enskilt starkaste hotet mot bibehållandet (och vidareutveckling) av ett effektivt militärt radiosamband. Även annan militär frekvensanvändning, exempelvis radar, påverkas kraftigt. Efter varje världsradiokonferens under de senaste 10-20 åren har flera frekvensband allokerats för IMT och studier av andra frekvensband föreslagits med målet att även ta dessa i besittning för IMT. Världsradiokonferensen 2019 var i detta avseende inget undantag. Specifikt för 5G relativt tidigare generationers cellulära system är förmågan att använda mycket stor kontinuerlig dynamiskt varierbar bandbredd och att använda mycket höga frekvenser (upp till ca 52 GHz, tidigare under ca 4 GHz). Detta har resulterat i att IMT-industrin försöker lägga beslag på hela eller delar av de frekvensband som tidigare i många fall endast haft militär användning och där specifikt frekvensområdet spelar en viktig roll för de militära systemens egenskaper. Att försvara militära frekvensband och effektivisera frekvensanvändningen, exempelvis genom bättre förmåga att hantera samexistensproblem, är därför viktigt.

Enligt många studier är ännu högre frekvenser än vad som används för 5G nödvändigt för 6G, vilket innebär frekvenser över 100 GHz. Dessa frekvenser medger enbart kort räckvidd och korthållskommunikation kommer att bli mer och mer vanligt och bedöms dominera i vissa miljöer. Detta betyder många fler basstationer per km² jämfört med idag och även att ett stort antal av dessa kommer att placeras inomhus. Det finns krafter som dessutom förespråkar lokal frekvenslicensiering (för exempelvis lokala nät i en fabrik). Att gå högre upp i frekvens relativt 5G innebär i praktiken användning av frekvenser över 100 GHz, upp emot eller till och med över 1 THz, och där ultrasmå celler och supereffektiv korthållsradio med mycket stora bandbredder, upp till flera GHz, kan bli viktiga komponenter. Även ljusvågor, (eng. *visible light communication*) omnämns i en del studier som möjliga att nyttja i 6G. Om någon teknik eller metod som kommer att utvecklas för 6G skulle kunna tillämpas i militära system för att förbättra frekvenseffektiviteten och mildra samexistensproblemen är nästan omöjligt att förutspå idag. Dagens konceptstudier är fortfarande i ett tidigt skede och standardiseringsarbetet har i princip inte startat ännu. Inverkan på militära system i övrigt kan inte heller överblickas på annat sätt än att 6G, precis som övriga cellulära system, riskerar att ta över ytterligare frekvensområden från de militära användarna.

7 Slutsatser

Effektivare frekvensutnyttjande genom adaptivitet, exempelvis dynamisk hantering av spektrum, sändareffekt, kodning och modulation, kräver ökad intelligens i systemen. Den snabba utvecklingen inom artificiell intelligens (AI) och maskininlärning för intelligenta radiosystem bedöms bidra till detta. Fortsatta studier inom detta område krävs för att avgöra vilka nya möjligheter som ges och vilka tillämpningar av AI som har störst potential att bidra till effektivare frekvensutnyttjande. För försvars- och säkerhetstillämpningar är det också nödvändigt att studera i vilka delar av militära radiosystem det är lämpligt eller olämpligt att använda AI-tekniker med hänsyn till sårbarhet, robusthet och samexistens.

Utvecklingen av extremt bredbandig kommunikation bör fortsatt följas. Extremt bredbandiga sändtagare kan ge nya möjligheter till ökad kapacitet, dynamisk spektrumaccess samt bandspridning som skydd mot störning, avlyssning och upptäckt.

Omvärldsstudien visar att intresset har ökat för *in-band full duplex* (IBFD), d.v.s. samtidig sändning och mottagning på samma frekvens. För fortsatta studier är användning av IBFD för DSA, reläfunktioner, samt simultan telekrig och kommunikation av intresse.

Inom den militära vågformsutvecklingen för frekvensområdet 30-88 MHz är trenden att bandbredden ökar från 25 till 50 eller 100 kHz, för att stödja både tal och data. UHF-bandet (240-380 MHz) är ett ganska splittrat band med en blandning av olika typer av system: smal- och bredbandiga, fixfrekvens och frekvenshoppande system. Tekniska lösningar med större flexibilitet som skulle kunna medföra tätare allokering av frekvenser, samt en uppmjukning av hur frekvensbandet kan användas bedöms öka frekvenseffektiviteten inom UHF-bandet.

Frekvensbehovet för att realisera uppsatta scenarion inom 5G-utvecklingen är enormt. Det pågår ständigt en debatt om att övriga frekvensanvändare, exempelvis militära, ska släppa fler frekvensband till mobiltelefoniindustrin. Specifikt för 5G, relativt tidigare cellulära system, är förmågan att använda stor dynamiskt varierbar bandbredd och höga frekvenser (tiotals GHz). Ännu högre frekvenser (upp mot en THz) är enligt de flesta bedömare nödvändigt för en eventuell uppföljande 6G. I och med detta förväntas korthållskommunikation bli mer vanligt, vilket innebär tätare placering av basstationer jämfört med idag.

För närvarande pågår en massuppskjutning av upp emot 30 000 små LEO-satelliter, främst avsedda för att erbjuda snabbt internet i områden med dålig mobiltäckning. Det är en betydande risk att dessa stora konstellationer kan skapa frekvensbrist och kraftig interferens med andra satellitsystem och system på marken inom de frekvensområden som utnyttjas (över 12 GHz).

Referenser

- [1] B. Asp, E. Axell, S. Bergström, K. Hägglund, A. Komulainen, T. Ranström och P. Stenumgaard, *Metoder för hantering av dynamiska interferensmiljöer*, Totalförsvarets forskningsinstitut (FOI), FOI-R-4870-SE, 2019.
- [2] J. Mitola och G. Q. Maguire, "Cognitive radio: Making software radios more personal", *IEEE Pers. Commun.*, årg. 6, nr 4, s. 13–18, 1999.
- [3] J. Mitola, "Cognitive radio an integrated agent architecture for software defined radio", dissertation, Royal Institute of Technology (KTH), Sweden, 2000.
- [4] C. E. Shannon, "Computers and automata", *Proc. IRE*, årg. 41, s. 1234–1241, 10 1953.
- [5] S. Haykin, "Cognitive radio: Brain-empowered wireless communications", *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, årg. 23, s. 201–220, 2 2005.
- [6] Z. Qin, X. Zhou, L. Zhang, Y. Gao, Y. Liang och G. Y. Li, "20 years of evolution from cognitive to intelligent communications", *IEEE Trans. Cogn. Commun. Netw.*, årg. 6, nr 1, s. 6–20, 2020.
- [7] *Cognitive Radio in NATO*, NATO, 2014.
- [8] *Cognitive Radio in NATO II - Towards Dynamic Spectrum Management in NATO*, NATO, 2016.
- [9] *Cognitive Radio Networks: Efficient Solutions for Routing, Topology Control, Data Transport, and Network Management*, NATO, 2019.
- [10] *Radio Frequency Machine Learning Systems (RFMLS)*, Online, <https://www.darpa.mil/program/radio-frequency-machine-learning-systems>, (hämtad 2020-02-20).
- [11] *Matthew Beinart, DARPA Taps BAE Systems To Develop AI For Improved Radio Frequency Signal Detection*, Online, <https://www.defensedaily.com/darpa-taps-bae-systems-develop-ai-improved-radio-frequency-signal-detection/cyber/>, (hämtad 2020-02-20), 2018.
- [12] *Spectrum Collaboration Challenge (SC2)*, Online <https://www.darpa.mil/program/spectrum-collaboration-challenge>, (hämtad 2020-02-20), 2016.
- [13] *GatorWings Wins DARPA Spectrum Collaboration Challenge*, Online, <https://www.spectrumcollaborationchallenge.com/gatorwings-wins-darpa-spectrum-collaboration-challenge/>, (hämtad 2020-02-20), 2019.
- [14] *Advanced RF Mapping (Radio Map)*, Online, <https://www.darpa.mil/program/advance-rf-mapping>, (hämtad 2020-02-21).
- [15] *DARPA's RadioMap Program Enters Third Phase*, Online, <https://www.darpa.mil/news-events/2015-11-06>, (hämtad 2020-02-21), 2015.
- [16] *Kimberly Underwood, Mobile Spectrum Tool RadioMap Moves to the Marines*, Online, <https://www.afcea.org/content/mobile-spectrum-tool-radiomap-moves-marines>, (hämtad 2020-02-21), 2018.
- [17] *Shared Spectrum Access for Radar and Communications (SSPARC)*, Online, <https://www.darpa.mil/program/shared-spectrum-access-for-radar-and-communications>, (hämtad 2020-02-21).

- [18] *John Keller, Electromagnetic spectrum sharing among radar and communications systems moving forward*, Online, <https://www.militaryaerospace.com/rf-analog/article/16713734/electromagnetic-spectrum-sharing-among-radar-and-communications-systems-moving-forward>, (hämtad 2020-02-21), 2015.
- [19] L. Rose, R. Massin, L. Vijayandran, M. Debbah och C. J. L. Martret, *CORASMA Program on Cognitive Radio for Tactical Networks: High Fidelity Simulator and First Results on Dynamic Frequency Allocation*, nov. 2013.
- [20] *CapTech Information*, Online, <https://www.eda.europa.eu/what-we-do/activities/activities-search/captech-information>, (hämtad 2020-02-19), 2017.
- [21] *SENDORA sensor network for dynamic and opportunistic radio access*, Online, <https://cordis.europa.eu/project/id/216076>, (hämtad 2020-04-21).
- [22] *PHYDYAS physical layer for dynamic spectrum access and cognitive radio*, Online, <https://cordis.europa.eu/project/id/211887>, (hämtad 2020-04-21).
- [23] *SACRA spectrum and energy efficiency through multi-band cognitive radio*, Online, <https://cordis.europa.eu/project/id/249060>, (hämtad 2020-04-21).
- [24] *QUASAR quantitative assessment of secondary spectrum access*, Online, <https://cordis.europa.eu/project/id/248303>, (hämtad 2020-04-21).
- [25] *Final plan for using and disseminating knowledge*, QUASAR Deliverable D6.5, 2012.
- [26] *QoSMOS quality of service and mobility driven cognitive radio systems*, Online, <https://cordis.europa.eu/project/id/248454>, (hämtad 2020-04-21).
- [27] *Integrated final functional specification of spectrum management framework and procedures*, QoSMOS D6.7, 2012.
- [28] *FARAMIR flexible and spectrum-aware radio access through measurements and modeling in cognitive radio systems*, Online, <https://cordis.europa.eu/project/id/248351>, (hämtad 2020-04-21).
- [29] *Evaluation of selected measurement-based techniques*, FARAMIR D5.2, 2012.
- [30] A. Goldsmith, S. A. Jafar, I. Maric och S. Srinivasa, "Breaking spectrum gridlock with cognitive radios: An information theoretic perspective", *Proc. IEEE*, årg. 97, nr 5, s. 894–914, 2009.
- [31] E. Axell, G. Leus, E. G. Larsson och H. V. Poor, "Spectrum sensing for cognitive radio: State-of-the-art and recent advances", *IEEE Signal Process. Mag.*, årg. 29, nr 3, s. 101–116, 2012.
- [32] T. Yucek och H. Arslan, "A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications", *Commun. Surveys Tuts.*, årg. 11, s. 116–130, 1 jan. 2009.
- [33] Y. Zeng, Y.-C. Liang, A. T. Hoang och R. Zhang, "A review on spectrum sensing for cognitive radio: Challenges and solutions", *EURASIP J. on Advances in Signal Processing*, årg. 2010, 15 pages, 2010.
- [34] E. Axell och E. G. Larsson, "Optimal and sub-optimal spectrum sensing of OFDM signals in known and unknown noise variance", *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, årg. 29, nr 2, s. 290–304, 2011.

- [35] E. Axell och E. G. Larsson, "A unified framework for GLRT-based spectrum sensing of signals with covariance matrices with known eigenvalue multiplicities", i *Proc. IEEE Int. Conf. on Acoustics, Speech, and Signal Process. (ICASSP)*, Prague, Czech Republic, 2011.
- [36] S. Chaudhari, V. Koivunen och H. V. Poor, "Autocorrelation-based decentralized sequential detection of OFDM signals in cognitive radios", *IEEE Trans. Signal Process.*, årg. 57, s. 2690–2700, 7 2009.
- [37] A. V. Dandawaté och G. B. Giannakis, "Statistical tests for presence of cyclostationarity", *IEEE Trans. Signal Process.*, årg. 42, s. 2355–2369, 9 1994.
- [38] R. Wang och M. Tao, "Blind spectrum sensing by information theoretic criteria for cognitive radios", *IEEE Trans. Veh. Technol.*, årg. 59, nr 8, s. 3806–3817, 2010.
- [39] H. Tullberg, A. Bengtsson och J. Karlsson, *Dynamiska telekommunikationslösningar - slutrapport*, Totalförsvarets forskningsinstitut (FOI), FOI-R–3107–SE, 2010.
- [40] A. Bengtsson, P. Eliardsson, P. Stenumgaard, H. Tullberg och K. Wiklundh, *Novel DSA algorithms and virtual machines for SDR*, Totalförsvarets forskningsinstitut (FOI), FOI-R–2919–SE, 2009.
- [41] H. Tullberg, P. Eliardsson, J. Karlsson, P. Stenumgaard och K. Wiklundh, *Utvärdering av frekvensallokeringsalgoritmer för dynamisk spektrumaccess*, Totalförsvarets forskningsinstitut (FOI), FOI-R–3043–SE, 2010.
- [42] H. Tullberg, B. Asp och P. Stenumgaard, *Dynamisk spektrumaccess för försvarsmaktens behov*, Totalförsvarets forskningsinstitut (FOI), FOI-R–2636–SE, 2009.
- [43] F. Berggren, O. Queseth, J. Zander och B. Asp, *Dynamic spectrum access, phase 1 scenarios and research challenges*, KTH Royal Institute of Technology, TRITA-S3-RST, 0407, Stockholm, 2004.
- [44] D. Esman, V. Ataie, B. P.-P. Kuo, N. Alic och S. Radic, "Subnoise signal detection and communication", *Journal of Lightwave Technology*, årg. 34, nr 22, s. 5214–5219, 2016.
- [45] *Hyper-wideband Enabled RF Messaging (HERMES)*, Online, <https://www.darpa.mil/program/hyper-wideband-enabled-rf-messaging>, (hämtad 2020-02-20).
- [46] John Keller, *DARPA HERMES program seeks to defeat rf jamming and interference with low-power wideband signals*, Online <https://www.militaryaerospace.com/rf-analog/article/16719128/darpa-hermes-program-seeks-to-defeat-rf-jamming-and-interference-with-lowpower-wideband-signals>, (hämtad 2020-02-20), 2014.
- [47] *Protecting Wideband RF Systems in Congested Electromagnetic Environments*, Online, <https://www.darpa.mil/news-events/2020-01-22>, (hämtad 2020-02-20), 2020.
- [48] C. M. Bishop, *Pattern Recognition and Machine Learning*. Springer, 2007.
- [49] O. Simeone, "A very brief introduction to machine learning with applications to communication systems", *IEEE Trans. Cogn. Commun. Netw.*, årg. 4, nr 4, s. 648–664, 2018.
- [50] I. Goodfellow, Y. Bengio och A. Courville, *Deep Learning*. MIT Press, 2016.

- [51] I. Goodfellow, J. Pouget-Abadie, M. Mirza, B. Xu, D. Warde-Farley, S. Ozair, A. Courville och Y. Bengio, "Generative adversarial nets", i *International Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS)*, 2014.
- [52] T. Roy, T. O'Shea och N. West, "Generative adversarial radio spectrum networks", i *ACM Workshop on Wireless Security and Machine Learning*, Miami, FL, USA: Association for Computing Machinery, 2019, s. 12–15.
- [53] Z. Qin, H. Ye, G. Y. Li och B. F. Juang, "Deep learning in physical layer communications", *IEEE Wireless Commun.*, årg. 26, nr 2, s. 93–99, 2019.
- [54] T. O'Shea och J. Hoydis, "An introduction to deep learning for the physical layer", *IEEE Trans. Cogn. Commun. Netw.*, årg. 3, nr 4, s. 563–575, 2017.
- [55] Z. Xu, Y. Wang, J. Tang, J. Wang och M. C. Gursoy, "A deep reinforcement learning based framework for power-efficient resource allocation in cloud RANs", i *Proc. IEEE Int. Conf. on Commun. (ICC)*, 2017, s. 1–6.
- [56] A. Adadi och M. Berrada, "Peeking inside the black-box: A survey on explainable artificial intelligence (XAI)", *IEEE Access*, årg. 6, s. 52 138–52 160, 2018.
- [57] L. Luotsinen, D. Oskarsson, P. Svenmarck och U. W. Bolin, *Explainable artificial intelligence: Exploring XAI techniques in military deep learning applications*, Totalförsvarets forskningsinstitut (FOI), FOI-R–4849–SE, 2019.
- [58] M. N. Rajesh, B. K. Shrishna, N. Rao och H. V. Kumaraswamy, "An analysis of ber comparison of various digital modulation schemes used for adaptive demodulation", i *IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology (RTEICT)*, maj 2016.
- [59] A. Shami, M. Maier och C. Assi, *Broadband Access Networks: Technologies and Deployments*. Springer Science & Business Media, 2010.
- [60] E. Axell, S. Ö. Tengstrand och K. Wiklundh, "Online classification of class A impulse interference", i *Proc. IEEE Mil. Commun. Conf. (MILCOM)*, oktober 2017.
- [61] K. Hägglund och E. Axell, "Adaptive demodulation in class A impulse noise channels", i *Proc. IEEE Global Telecommun. Conf. (GLOBECOM)*, dec. 2019.
- [62] K. Hägglund och E. Axell, "Adaptive demodulation in symmetric alpha-stable impulse noise channels", i *IEEE Vehicular Technology Conference (VTC) Spring*, maj 2020.
- [63] L. J. Arnone, M. C. Liberatori, L. Rabioglio och J. C. Moreira, "Estimation strategies for channel side information applied to the decoding of ldpc codes over impulsive noise channels", i *Workshop on Information Processing and Control (RPIC)*, sept. 2019.
- [64] S. Schibisch, S. Cammerer, S. Dörner, J. Hoydis och S. ten Brink, "Online label recovery for deep learning-based communication through error correcting codes", i *International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS)*, sept. 2018.
- [65] A. Sabharwal, P. Schniter, D. Guo, D. W. Bliss, S. Rangarajan och R. Wichman, "In-band full-duplex wireless: Challenges and opportunities", *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, årg. 32, nr 9, s. 1637–1652, sept. 2014.
- [66] G. Liu, F. R. Yu, H. Ji, V. C. M. Leung och X. Li, "In-band full-duplex relaying: A survey, research issues and challenges", *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, årg. 17, nr 2, s. 500–524, 2015.

- [67] K. E. Kolodziej, B. T. Perry och J. S. Herd, "In-band full-duplex technology: Techniques and systems survey", *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, årg. 67, nr 7, s. 3025–3041, juli 2019.
- [68] M. Adrat, R. Keller, M. Tschauner, S. Wilden, V. L. Nir, T. Riihonen, M. Bowyer och K. Pärnin, "Full-duplex radio – increasing the spectral efficiency for military applications", i *International Conference on Military Communications and Information Systems (ICMCIS)*, maj 2019.
- [69] A. Nagulu, T. Chen, G. Zussman och H. Krishnaswamy, "A full-duplex radio using a cmos non-magnetic circulator achieving +95 db overall sic", i *2019 USNC-URSI Radio Science Meeting (Joint with AP-S Symposium)*, 2019, s. 71–72.
- [70] H. AlShammery, C. Hill, A. Hamza och J. F. Buckwalter, "A code-domain RF signal processing front end with high self-interference rejection and power handling for simultaneous transmit and receive", *IEEE J. Solid-State Circuits*, årg. 55, nr 5, s. 1199–1211, 2020.
- [71] A. Balatsoukas-Stimming, "Non-linear digital self-interference cancellation for in-band full-duplex radios using neural networks", i *Proc. IEEE Workshop on Signal Processing Adv. in Wireless Commun. (SPAWC)*, juni 2018.
- [72] *Full-Duplex Radio: Increasing the Spectral Efficiency for Military Applications*, NATO, 2020.
- [73] S. Haddad, A. Ozgur och E. Telatar, "Can full-duplex more than double the capacity of wireless networks?", i *Proc. IEEE Int. Symp. on Inf. Theory (ISIT)*, juni 2017.
- [74] *Full duplex radio technology for military applications*, Online, <https://www.sto.nato.int/Lists/test1/activitydetails.aspx?ID=16649>, (hämtad 2020-04-23), 2020.
- [75] *Signal Processing at RF (SPAR)*, Online <https://www.darpa.mil/program/signal-processing-at-rf>, (hämtad 2020-02-20), 2016.
- [76] *John Keller; Northrop to cut RF and microwave interference*, Online <https://www.militaryaerospace.com/computers/article/16714672/northrop-to-cut-rf-and-microwave-interference>, (hämtad 2020-02-20), 2016.
- [77] T. Ranström och E. Axell, "Full duplex based digital out-of-band interference cancellation for collocated radios", i *Proc. IEEE Wireless Commun. Network. Conf. (WCNC)*, 2020.
- [78] Y. Saito, Y. Kishiyama, A. Benjebbour, T. Nakamura, A. Li och K. Higuchi, "Non-orthogonal multiple access (NOMA) for cellular future radio access", i *IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, juni 2013.
- [79] T. Riihonen, D. Korpi, O. Rantula, H. Rantanen, T. Saarelainen och M. Valkama, "In-band full-duplex radio transceivers: A paradigm shift in tactical communications and electronic warfare?", *IEEE Commun. Mag.*, årg. 55, nr 10, s. 30–36, oktober 2017.
- [80] K. Pärnin, T. Riihonen, R. Wichman och D. Korpi, "Transferring the full-duplex radio technology from wireless networking to defense and security", i *Proc. IEEE Asilomar Conf. Signals, Systems, and Computers*, oktober 2018.
- [81] K. Pärnin, T. Riihonen och M. Turunen, "Sweep jamming mitigation using adaptive filtering for detecting frequency agile systems", i *International Conference on Military Communications and Information Systems (ICMCIS)*, maj 2019.

- [82] T. Riihonen, D. Korpi, M. Turunen, T. Peltola, J. Saikanmaki, M. Valkama och R. Wichman, "Military full-duplex radio shield for protection against adversary receivers", i *International Conference on Military Communications and Information Systems (ICM-CIS)*, maj 2019.
- [83] K. Pärlin och T. Riihonen, "Digitally assisted analog mitigation of narrowband periodic interference", i *International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS)*, aug. 2019.
- [84] Y. Zou, J. Zhu, X. Wang och L. Hanzo, "A survey on wireless security: Technical challenges, recent advances, and future trends", *Proc. IEEE*, årg. 104, nr 9, s. 1727–1765, sept. 2016.
- [85] B. C. Nguyen, X. N. Tran och D. T. Tran, "Performance analysis of in-band full-duplex amplify-and-forward relay system with direct link", i *International Conference on Recent Advances in Signal Processing, Telecommunications Computing (SigTelCom)*, 2018, s. 192–197.
- [86] P. Larsson och M. Prytz, "MIMO on-frequency repeater with self-interference cancellation and mitigation", i *IEEE Vehicular Technology Conference VTC Spring*, april 2009.
- [87] Y. Liao, L. Song, Z. Han och Y. Li, "Full duplex cognitive radio: A new design paradigm for enhancing spectrum usage", *IEEE Commun. Mag.*, årg. 53, nr 5, s. 138–145, maj 2015.
- [88] W. Afifi och M. Krunz, "Exploiting self-interference suppression for improved spectrum awareness/efficiency in cognitive radio systems", i *Proc. IEEE INFOCOM*, IEEE, april 2013.
- [89] L. Yang och F. Li, "Spectrum sensing in non-time-slotted full-duplex cognitive radio networks", i *IEEE Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC)*, mars 2017.
- [90] L. J. Rodriguez, N. H. Tran och T. Le-Ngoc, "Performance of full-duplex AF relaying in the presence of residual self-interference", *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, årg. 32, nr 9, s. 1752–1764, sept. 2014.
- [91] K. N. Tarasov, E. J. McDonald och E. Grayver, "Power amplifier digital predistortion - fixed or adaptive?", i *Proc. IEEE Mil. Commun. Conf. (MILCOM)*, nov. 2008.
- [92] R. Marsalek, T. Gotthans, M. Harvanek och L. Polak, "On the sensitivity of digital predistortion to impairments of time-interleaved A/D converters", i *International Conference Radioelektronika (RADIOELEKTRONIKA)*, april 2018.
- [93] J. Zhao, Y. Liu, C. Yu, J. Yu och S. Li, "A modified band-limited digital predistortion technique for broadband power amplifiers", *IEEE Commun. Lett.*, årg. 20, nr 9, s. 1800–1803, sept. 2016.
- [94] K. K. S. Pillai, S. Sagar, S. K. Parambeth och N. P. Krishnan, "Implementation of digital pre-distortion for power amplifier linearisation in software defined radio", i *National Conference on Communications (NCC)*, mars 2017.
- [95] *Covering ASP-01 (edition a version 1): Spectrum management in military operations*, STANAG 5641, 2019.
- [96] *SATURN-a fast frequency hopping ECCM mode for UHF radio*, STANAG/ACoMP 4372.
- [97] *HAVE QUICK UHF secure and jam-resistant communications equipment*, STANAG/ACoMP 4246.

- [98] *Interoperability and Performance Standards for Medium and High Frequency Radio*, MIL-STD-188-141, sept. 1988.
- [99] *Technical Standards for an Automatic Radio Control System for HF Communication Links*, NATO Standardization Agreement 4538, 2007.
- [100] *HF2000 Contract Specification appendix 2*, Försvarets materielverk (FMV), ProjLed 33 196:54106/2.
- [101] *HF Propagation Prediction Method*, ITU Recommendation ITU-R P.533.
- [102] *Technical Standards for Non-hopping HF Communication Waveforms*, NATO Standardization Agreement 4539, 2005.
- [103] *Interoperability and Performance Standards for Data Modems*, MIL-STD-188-110, juli 2011.
- [104] D. Warner, S. Bantseev och N. Serinken, "Spectral occupancy of fixed and mobile allocations within the High Frequency band", i *IRST 2012 conference, York, UK*, maj 2012.
- [105] R. Berg, B. Johansson och P. Nagy, "Wideband measurement of HF spectral occupancy in the Baltic region", i *HFIA meeting 2013, San Diego, USA*, jan. 2013. URL: [http : hfindustry.com](http://hfindustry.com).
- [106] C. Lamy-Bergot, J.-B. Chantelouve och C. Laménager, "Spectrum issues of HF wideband communications", i *HFIA meeting 2012, York, UK*, sept. 2012. URL: [http : hfindustry.com](http://hfindustry.com).
- [107] W. Furman, J. Nieto och E. Koski, "Interference environment and wideband channel availability", i *HF13*, aug. 2013.
- [108] M. Jorgensen, R. Nelson och J. Lehart, "Wideband HF Spectral Sensing Results", i *HFIA meeting 2012, York, UK*, sept. 2012.
- [109] B. Asp, J. Nilsson, K. Fors och K. Wiklundh, *Sårbarhetsaspekter vid militär användning av LTE*, Totalförsvarets forskningsinstitut (FOI), FOI-R-4231-SE, 2016.
- [110] *European commission to harmonise the last pioneer frequency band needed for 5G deployment*, Online, [https : // ec . europa . eu / digital - single - market / en / news / european - commission - harmonise - last - pioneer - frequency - band - needed - 5g - deployment](https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/news/european-commission-harmonise-last-pioneer-frequency-band-needed-5g-deployment), (hämtad 2020-05-15), 2020.
- [111] *Spectrum for 5G: EU-level developments*, Online, [https : // www . itu . int / en / ITU - D / Regional - Presence / Europe / Documents / Events / 2018 / 5G % 20Greece / Session % 205 % 20Stantchev - Athens _ 12102018 . pdf](https://www.itu.int/en/ITU-D/Regional-Presence/Europe/Documents/Events/2018/5G%20Greece/Session%205%20Stantchev-Athens_12102018.pdf), (hämtad 2020-05-15), 2020.
- [112] Online, [https : // www . multefire . org /](https://www.multefire.org/), (hämtad 2020-05-15).
- [113] S. Lagen och L. Giupponi., "From NR to 6G in Unlicensed Spectrum: The RAT for Wireless Private Networks in Industry 4.0", i *Proc. 6G Wireless Summit*, Lapland, Finland, mars 2019.
- [114] *LTEU tech forum*, Online [http : // www . lteuforum . org /](http://www.lteuforum.org/), (hämtad 2020-05-20), 2020.
- [115] *5G NR and 4G LTE Coexistence - A Comprehensive Deployment Guide to Dynamic Spectrum Sharing*, Online [https : // www . mediatek . com / blog / mediatek - whitepaper - dynamic - spectrum - sharing](https://www.mediatek.com/blog/mediatek-whitepaper-dynamic-spectrum-sharing), (hämtad 2020-05-20), 2020.

- [116] L. Wan, Z. Guo och X. Chen, "Enabling Efficient 5G NR and 4G LTE Coexistence", *IEEE Wireless Communications*, årg. 26, nr 1, s. 6–8, 2019.
- [117] *Breakthrough 5G data call using dynamic spectrum sharing to accelerate nationwide 5G deployments*, Online <https://www.ericsson.com/en/news/2019/9/ericsson-spectrum-sharing>, (hämtad 2020-05-20), 2019.
- [118] *Study on NR to support non-terrestrial networks*, 3GPP, TR 38.811.
- [119] Online, <https://www.3gpp.org/release-17>, (hämtad 2020-05-15).
- [120] Z. Ghadialy, *Connectivity: From top to bottom*, Online, <https://www.comsoc.org/publications/ctn/connectivity-top-bottom>, (hämtad 2020-05-15), 2019.
- [121] P. Yang, Y. Xiao, M. Xiao och S. Li, "6G Wireless Communications: Vision and Potential Techniques", *IEEE Network*, årg. 33, nr 4, s. 70–75, 2019.
- [122] S. Dang, O. Amin, B. Shihada och M.-S. Alouini, "What should 6G be?", *Nature Electronics*, nr 3, s. 20–29, 2020.
- [123] G. Interdonato, E. Björnson, H. Q. Ngo, P. Frenger och E. G. Larsson, "Ubiquitous cell-free massive MIMO communications", *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, nr 197, 2019.
- [124] M. Giordani, M. Polese, M. Mezzavilla, S. Rangan och M. Zorzi, "Towards 6G Networks: Use Cases and Technologies", *IEEE Commun. Mag.*, årg. 58, nr 3, s. 55–61, 2020.
- [125] M. Wen, X. Cheng och L. Yang, *Index Modulation for 5G Wireless Communications*. MIT Press, 2017.
- [126] K. Werbach, *The Blockchain and the New Architecture of Trust*. 2017.
- [127] M. Crosby, Nachiappan, P. Pattanayak, S. Verma och V. Kalyanaraman, "BlockChain Technology Beyond Bitcoin", i *Berkely Univerity of California*, 2015.
- [128] M. B. H. Weiss, K. Werbach, D. C. Sicker och C. E. C. Bastidas, "On the Application of Blockchains to Spectrum Management", *IEEE Trans. Cogn. Commun. Netw.*, årg. 5, nr 2, s. 193–205, 2019.
- [129] A. N. Mody, M. J. Sherman, R. Martinez, R. Reddy och T. Kiernan, "Survey of iee standards supporting cognitive radio and dynamic spectrum access", i *MILCOM 2008 - 2008 IEEE Military Communications Conference*, 2008, s. 1–7.
- [130] *What is Horizon 2020*, Online, <https://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/en/what-horizon-2020>, (hämtad 2020-03-25).
- [131] P. Marsch, O. Queseth, S. E. E. Ayoubi, M. Maternia, M. A. Uusitalo, R. Ruismaki, M. Tesanovic, A. Kaloxylas, I. D. Silva och M. Boldi, "5G Radio Access Network Design - A Brief Overview on the 5G-PPP Project METIS-II", i *European Conference on Networks and Communications (EuCNC)*, 2015. URL: <https://doi.org/10.5281/zenodo.60907>.
- [132] T. Rosowski, D. H. Kang, S. Sharma, Y. Changqing, K. W. Sung, R. Ruismäki, M. Uusitalo, F. Chaves, E. Mohyeldin, D. Kifle, Y. Q. C. Markwart, L. M. Campoy och G. D'Aria, "Enablers to secure sufficient access to adequate spectrum for 5G", 2017.

- [133] X. Artiga och A. I. Pérez-Neira, "Shared Access Terrestrial-Satellite Backhaul Network enabled by Smart Antennas: SANSA", i *European Conference on Networks and Communications (EuCNC)*, 2015. URL: <https://doi.org/10.5281/zenodo.35353>.
- [134] *Dynamic Radio Resource Management for Hybrid Terrestrial-Satellite Backhauling*, SANSA Deliverable D3.6, 2017.
- [135] *WP3 extended executive summary*, SANSA Deliverable D3.8, 2017.
- [136] *5G-RANGE: Remote Area Access Network for the 5th Generation*, Online, <https://cordis.europa.eu/project/id/777137>, (hämtad 2020-04-20).
- [137] *D4.3 cognitive cycle for dynamic spectrum access, resource allocation and mac protocols*, 5G-RANGE, 2019.
- [138] *D4.2 spectrum sensing to complement databases*, 5G-RANGE, 2018.
- [139] *COHERENT coordinated control and spectrum management for 5G heterogeneous radio access networks*, Online, <https://cordis.europa.eu/project/id/671639>, (hämtad 2020-04-20).
- [140] *Final report on flexible spectrum management*, COHERENT Deliverable D4.2, 2017.

FOI är en huvudsakligen uppdragsfinansierad myndighet under Försvarsdepartementet. Kärnverksamheten är forskning, metod- och teknikutveckling till nytta för försvar och säkerhet. Organisationen har cirka 1000 anställda varav ungefär 800 är forskare. Detta gör organisationen till Sveriges största forskningsinstitut. FOI ger kunderna tillgång till ledande expertis inom ett stort antal tillämpningsområden såsom säkerhetspolitiska studier och analyser inom försvar och säkerhet, bedömning av olika typer av hot, system för ledning och hantering av kriser, skydd mot och hantering av farliga ämnen, IT-säkerhet och nya sensorers möjligheter.



FOI
Totalförsvarets forskningsinstitut
164 90 Stockholm

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

www.foi.se