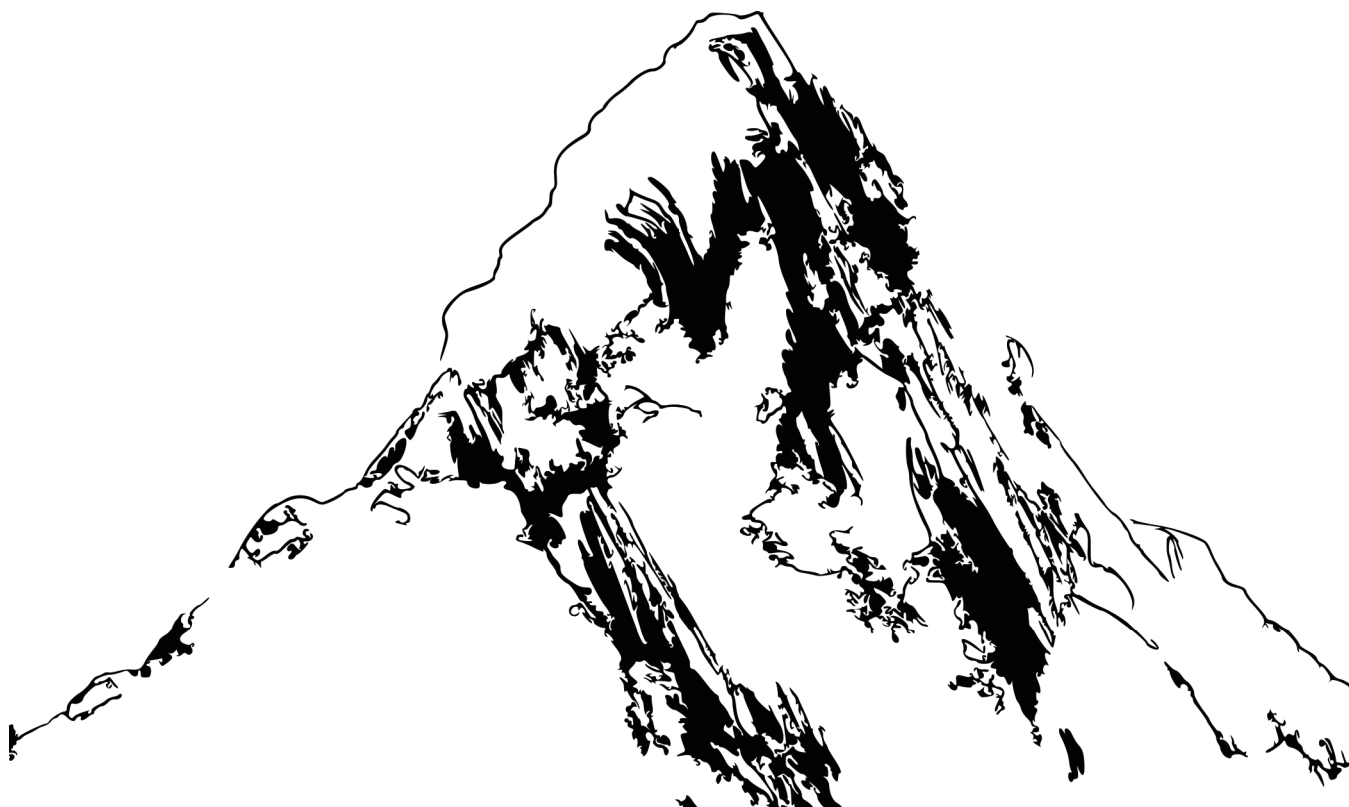


Effektivare frekvensutnyttjande för förbättrad samexistens

Slutrapport

PATRIK ELIARDSSON, ERIK AXELL,
KRISTOFFER HÄGGLUND, PETER JOHANSSON,
GUNNAR ERIKSSON, JAN NILSSON



Patrik Eliardsson, Erik Axell, Kristoffer Hägglund,
Peter Johansson, Gunnar Eriksson, Jan Nilsson

Effektivare frekvensutnyttjande för förbättrad samexistens

Slutrapport

Titel	Effektivare frekvensutnyttjande för förbättrad samexistens – Slutrapport
Title	Efficient Frequency Use for Improved Co-Existence - Final Report
Rapportnr/Report no	FOI-R--5384--SE
Månad/Month	December
Utgivningsår/Year	2022
Antal sidor/Pages	24
ISSN	1650-1942
Uppdragsgivare/Client	Försvarsmakten
Forskningsområde	Ledningsteknologi
FoT-område	Ledning och MSI
Projektnr/Project no	E716588
Godkänd av/Approved by	Christian Jönsson
Ansvarig avdelning	Ledningssystem

Bild/Cover: FOI

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

Frekvensspektrumet är en begränsad resurs som består av ett antal frekvenser vilka är möjliga att använda till informationsöverföring via radio. Försvarsmaktens tillgängliga frekvensutrymme är begränsat och konkurrensutsatt av kommersiella intressen. För att möta förbandens informationsbehov ökar dessutom antalet kommunikationssystem, sensorer och andra emitterande system på moderna plattformar vilket medför interferensproblem och komplex systemintegration. Det är därför av vikt att de frekvenser som finns tillgängliga för Försvarsmakten används så effektivt som möjligt. Denna rapport sammanfattar verksamheter och resultat från FoT-projektet *Effektivare frekvensutnyttjande för förbättrad samexistens* (EVEREST). EVEREST-projektet startade i januari 2020 och avslutades i december 2022.

Projektet har studerat både teknik och metod för att uppnå ett effektivare frekvensutnyttjande. Exempel på teknik är adaptiva radiomottagare i impulsrik miljö och exempel på metod är att använda dynamisk spektrumtilldelning i stället för statisk tilldelning.

En adaptiv radiomottagare som anpassar sig efter brusets karakteristik gör det, till en viss grad, möjligt att ta emot information i situationer som konventionella radiomottagare inte klarat av. Den adaptiva tekniken hanterar impulsiva interferenser från system på andra plattformar och från omgivningen.

Opportunistisk användning av TV-kanaler ger tillgång till större bandbredd och därmed ökad systemkapacitet och utrymme för fler radionät. Om valet görs på ett bra sätt ger den extra bandbredden ett ökat störskydd genom den processvinst som erhålls med en större bandbredd.

Risken för frekvenskonflikter i en bataljons radionät beror på brigad- och bataljonsområdets storlek, men framför allt på antalet tillgängliga frekvenser. Det viktigaste för att minska påverkan av frekvenskollisioner för frekvenshoppande system är att använda många frekvenser i förhållande till antalet nät.

Initiala studier av möjligheten att använda full duplex i taktiska radiosystem inom VHF- och UHF-banden visar att utmaningarna är betydligt större än för de korthållssystem (exempelvis WiFi) som oftast presenteras i forskningslitteraturen. Snabbt frekvenshopp innebär ytterligare begränsningar och utmaningar för full duplex. För att full duplex ska kunna bli en användbar teknik för ökad spektraleffektivitet i taktiska radionät krävs fortsatt omfattande forskning och utveckling.

För att sprida resultaten och skapa ett nätverk för kommande uppgifter har EVEREST-projektet arrangerat två workshoppar där representanter från Försvarsmakten, FMV och FRA har deltagit. Vid workshopparna har forskningsresultat presenterats och diskuterats och Försvarsmakten har presenterat sina erfarenheter av spektrumhantering och frekvenskonflikter under övningar och insatser, både nationellt och internationellt. Workshopparna har varit mycket uppskattade och förväntas fortsätta även efter att EVEREST-projektet har avslutats.

Nyckelord: Radio, frekvenshantering, frekvenskonflikt, opportunistisk frekvensanvändning, adaptiv mottagare

Summary

The frequency spectrum is a limited resource consisting of a number of frequencies, which can be used for information transmission via radio. The Swedish Armed Forces' available frequency spectrum is limited and subject to competition from commercial interests. In order to meet the units' information needs, the number of communication systems, sensors and other emitting systems on modern platforms is also increasing, which leads to interference problems and complex system integration. It is therefore important that the frequencies available to the Armed Forces are used as efficiently as possible. This report summarizes activities and results from the R&D project *Efficient Frequency Use for Improved Co-Existence* (EVEREST). The EVEREST project started in January 2020 and ended in December 2022.

The project has studied both technology and method to achieve more efficient frequency utilization. Examples of technologies are adaptive radio receivers in impulse-rich environments and examples of methods are dynamic spectrum allocation instead of static allocation.

An adaptive radio receiver that adapts to the characteristics of the noise makes it, to a certain extent, possible to receive information in situations that a conventional radio receiver could not cope with. This technology handles impulsive interference from systems on other platforms or from the surrounding environment.

Opportunistic use of TV channels gives access to more bandwidth and thus increased system capacity and the possibility to use more radio networks. If the choice is made in a good way, the extra bandwidth provides increased interference protection through the process gain obtained from a larger bandwidth.

The risk of frequency conflicts in a battalion's radio network depends on the size of the brigade and battalion area, but most important is the number of available frequencies. The most important thing is to increase the number of available frequencies to reduce the risk of frequency conflicts.

Initial studies of the potential and applicability of in-band full duplex for tactical radio systems within the VHF and UHF frequency bands indicate that the challenges are significantly greater than for the short-ranges systems (e.g. WiFi) that are usually discussed within the research literature. Fast frequency hopping renders additional constraints and challenges for full duplex systems. To make full duplex a viable technique for increased spectral efficiency in tactical radio networks, continued extensive research and development are required.

To spread the results and create a network for future tasks, the EVEREST project has arranged two workshops where representatives from the Swedish Armed Forces, FMV and FRA have participated. Research results have been presented and discussed at the workshops and the Swedish Armed Forces have presented their experiences of spectrum management and frequency conflicts during exercises and operations, both nationally and internationally.

The workshops have been highly appreciated and are expected to continue even after the EVEREST project has ended.

Keywords: Radio, frequency management, frequency conflict, opportunistic frequency use, adaptive receiver

Innehållsförteckning

1	Inledning	7
1.1	Mål och syfte.....	8
1.2	Workshop.....	8
2	Taktisk frekvenshantering	9
3	Adaptiv mottagare.....	11
4	Frekvenskonflikt inom brigad.....	15
4.1	Metod och antaganden.....	15
4.2	Resultat.....	16
5	Full-duplex	18
6	Opportunistiskt frekvenshopp.....	20
7	Slutsatser	21
8	Referenser.....	23
	Appendix A. EVEREST publikationer	24

1 Inledning

Frekvensspektrumet är en begränsad resurs som består av ett antal frekvenser vilka är möjliga att använda till informationsöverföring via radio. Frekvenserna kan utsättas för störningar från andra radiosystem och elektronik som försvårar och omöjliggör informationsöverföringen. Tillgång till störningsfria frekvenser är viktig för att all typ av radiokommunikation ska fungera.

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

För många militära funktioner och tjänster är inte bara tillgång till en viss mängd frekvensutrymme 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, smygegenskaper, positionsbestämning, hastighetsbestämning, klassificering och identifiering av mål, upptäcktsavstånd, upptäcktssannolikhet samt kommunikation utan fast infrastruktur. Detta gör att specifika frekvensutrymmen måste kunna utnyttjas och att Försvarsmakten, för de militära tillämpningarna, måste kunna disponera frekvenser inom ett mycket stort frekvensutrymme från tiotals kHz till hundratal GHz.

Under 1990-talet myntades begreppet kognitiv radio av Joseph Mitola [1] [2]. En kognitiv radio är ett radiosystem som anpassar sig efter rådande kommunikationsbehov och förhållanden för att välja det bästa sättet att kommunicera. En central funktion hos en kognitiv radio är dynamisk spektrumaccess (DSA), dvs. en funktion som automatiskt ska välja en lämplig frekvens till radiosystemet. Sedan starten på 1990-talet har forskning pågått och pågår fortfarande inom den akademiska världen och industri för att realisera kognitiva radiosystem.

Över 20 års forskning har dock resulterat i flertalet civila standarder som till viss del använder sig av DSA-teknik exempelvis IEEE 802.22 för trådlösa regionala nätverk, IEEE 802.11 WiFi, IEEE 802.15 Bluetooth samt WiMAX 802.16. Några militära standarder eller system med DSA teknik finns inte idag, enligt vad författarna känner till. Flertalet forskningsprojekt har under åren bedrivits inom Nato, EDA och DARPA med syftet att utveckla militära radiosystem med funktioner som inkluderas i begreppet kognitiv radio.

Denna rapport sammanfattar verksamheter och resultat från FoT-projektet *Effektivare frekvensutnyttjande för förbättrad samexistens* (EVEREST). EVEREST-projektet startade i januari 2020 och avslutades i december 2022. Projektets syfte var att utveckla metoder och tekniska lösningar för att uppnå effektivare frekvensutnyttjande och förbättrad samexistens för sambandssystem. Arbetet baserades på resultat och erfarenheter från de tidigare FoT-projekten KORINT och RICOM [3] [4].

Denna rapport redovisar översiktligt resultat från de aktiviteter som genomförts inom projektet EVEREST. Resultat från simuleringar av frekvenskonflikter för en bataljon i olika scenarios redovisas i rapporten. Ett frekvensområde för bredbandiga kanaler föreslås för opportunistisk frekvensanvändning. Tekniken för en adaptiv radiomottagare beskrivs i rapporten samt hur den adaptiva mottagaren får bättre mottagningsförmåga för vissa typer av bakgrundsbrus.

1.1 Mål och syfte

Målet med rapporten är att redovisa resultat från genomförda aktiviteter inom projektet. EVEREST-projektet har arbetat med följande övergripande frågeställningar:

- Hur kan Försvarsmakten använda tillgängliga frekvenser på ett mer effektivt sätt?
- Hur kan ett bättre frekvensutnyttjande minska integrationsproblemen och förbättra samexistensen?

De projektaktiviteter som genomförts har syftat till att försöka besvara ovan nämnda frågor. I slutsatserna, se kapitel 7, för denna rapport besvaras frågeställningarna utifrån vad projektet arbetat med.

1.2 Workshop

EVEREST-projektet har arrangerat två workshoppar i vilka representanter från Försvarsmakten, FMV och FRA bjudits in. En tredje workshop var planerad men ställdes in på grund av den då rådande pandemin, 2020. Workshopparna genomfördes som en hybrid-variant där majoriteten deltog på plats i Kista och ett tiotal på distans. Vid vardera workshop deltog cirka 55 personer. Syftet med workshopparna har varit att

- sprida och tydliggöra projektets forskningsresultat
- öka forskningens relevans genom dialog och återkoppling från huvudintressenter
- skapa förståelse för internationella och nationella regulatoriska processer som styr frekvensanvändning
- bidra till en ökad dialog om sambandsfrågor.

Under två dagar varvades presentationer från FOI och Försvarsmakten med diskussioner relaterat till presentationerna. Båda workshopparna avslutades med en paneldiskussion, där inbjudna representanter från Försvarsmakten och FMV diskuterade olika frågor. Denna typ av workshop har också arrangerats av föregående FoT-projekt och är en uppskattad mötesform. Workshopen kommer att fortsätta att arrangeras av det efterföljande FoT-projektet *Flexibel frekvensanvändning för Försvarsmaktens radiosystem* som startar i januari 2023.

2 Taktisk frekvenshantering

Dagens frekvensplanering för frekvensområdet 30 – 88 MHz, även kallat UK-bandet, är gjord i ett 25 kHz raster. I denna text används begreppet *kanal* som betecknar en 25 kHz bred allokering för ett visst ändamål.

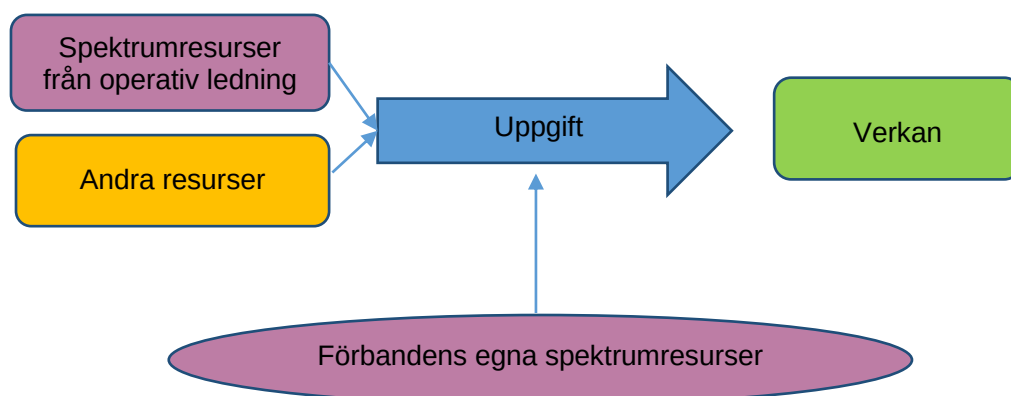
Ca 85 % av allt spektrum i halva UK-bandet används för att skapa en nästan helt konfliktfri allokering för hela armén inklusive amfibie. Det har fördelen att enheter kan sättas samman godtyckligt inför en uppgift utan att planera om frekvensallokeringen för respektive enhet.

Regeringen har beslutat att armén ska växa och på sikt bli dubbelt så stor som idag. Ett överslag ger att behovet av kanaler då ökar i motsvarande grad. Då är det inte möjligt att konfliktfritt tillgodose så många kanaler i bara halva UK-bandet.

Den lösning som är mest uppenbar är att utnyttja en större del av det totala frekvensområdet 30 – 88 MHz, men under 35 MHz är inte fordonsmonterade antenner effektiva så det området är inte användbart för rörliga förband. Över 35 MHz finns det potentiellt ca 2200 kanaler, och om alla allokeras skulle det precis kunna täcka behovet men det blir inga reservkanaler över.

En annan lösning bygger på att förband bara tilldelas en liten del av behovet så länge som förbandet är i beredskap och inte är insatt i strid, se Figur 1. När förbandet får order om att gå i strid så tilldelas det också nya resurser i form av mer spektrum för radiosamband. För att detta ska fungera krävs utveckling av både teknik och metod. Radiosystemen måste snabbt kunna konfigureras om på ett för användaren automatiskt sätt och planeringen av militära insatser måste även innefatta hur tillgängligt frekvensspektrum ska användas. För det behövs nya planeringsverktyg utvecklas. Distributionen av nya kommunikationsplaner är också en kritisk funktion som måste utvecklas, den måste kunna ske med hjälp av de begränsade resurser som förbanden har från början. När förbandet sen blir avlöst och drar sig tillbaka för återhämtning måste resurser (frekvensspektrum) lämnas tillbaka, även detta är en funktion som inte är självklar hur den ska gå till och som kräver utveckling.

Bedömningen är att i ett koncept med dynamisk fördelning av spektrumresurser så fördelas högst 25 % av tillgängligt frekvensspektrum som en bas till förbanden och resten finns som en resurs att hos den operativa ledningen. Det skulle ge utrymme för en större armé än dagens utan att det momentana behovet av frekvensspektrum och radiokanaler ökar jämfört med dagens statiska fördelning.



Figur 1: Förstärkning i form av dynamisk tilldelning av spektrum och andra resurser kommer tillsammans med uppgiften från den operativa ledningen.

En annan lösning är att nyttja geografisk återanvändning av frekvenser. En och samma frekvens tilldelas således till flera förband vars geografiska separation är tillräckligt stor för att de inte ska störa varandra. Detta ställer krav på att frekvenstilldelningen kan uppdateras och frekvenser i radiosystemen kan ändras med relativt kort varsel när förband omgrupperar, för att undvika frekvenskonflikter mellan förbanden. Med denna lösning skulle varje förband kunna ha fler frekvenser tilldelade i ett utgångsläge. Denna tilldelning ändras sedan med uppgiften och det geografiska området.

Ett radiosystem som på kort varsel kan anpassa sin frekvensallokering till lokala förhållanden skulle kunna utnyttja att behoven ser olika ut i olika delar av landet. Exempelvis vid försvar mot angrepp i övre Norrland från öster. Behovet av militärt spektrum i södra Sverige är då litet, kanske är det till och med så att det civila samhället har större behov än den militära verksamheten. Förstärkningar på väg till Norrland har ett mellanhögt behov av frekvensspektrum medan de som faktiskt försvarar svenskt och finskt territorium har ett stor behov av frekvensspektrum. När förstärkningarna når operationsområdet ökar även deras behov. Idag finns varken teknik eller metod som inte bygger på en statisk och lika fördelning av frekvensspektrum för de militära förbanden oavsett lokal konfliktnivå.

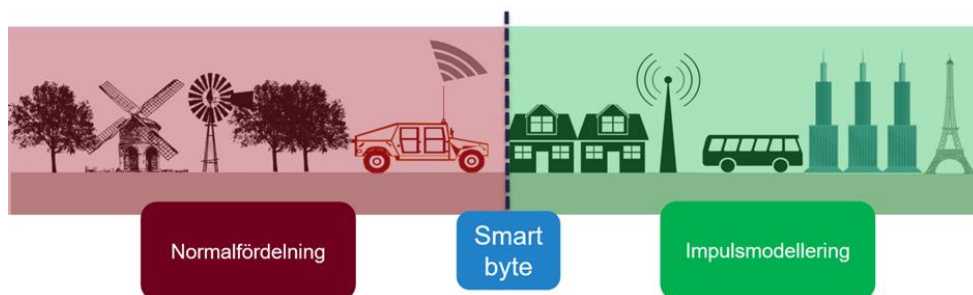
3 Adaptiv mottagare

Moderna plattformar, såväl militära som civila, består av många olika elektroniska komponenter och system. På en plattform kan det finnas flertalet oavsiktliga störningskällor, exempelvis vid tändning av en motor där plötsliga impulser av energi kan uppstå, eller från generellt undermåliga kablar och elektroniska komponenter i transformatorer, laddare, datorer eller annan elektronisk utrustning. Den omgivande externa miljön bidrar också till en mottagarens brusmiljön. Modern infrastruktur, som exempelvis järnvägar, kraftledningar, elnät, vindkraftverk och solcellsanläggningar kan introducera interferenser hos radiosystem som befinner sig i närheten [5]. Vanliga hushållsartiklar som hårtorkar, mikrovågsugnar och LED-lampor är andra exempel på interferenskällor. Prestandan hos en given radiomottagare påverkas negativt av den omgivande interferensmiljön, speciellt om interferenserna har impulskaraktär och radiosystemet är ett digitalt system. Med begreppet interferens avses i detta fall oönskade signaler och generellt bakgrundsbrus.

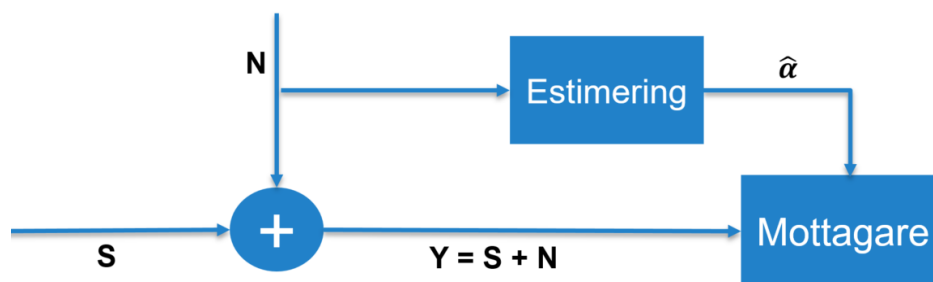
Vanligtvis antas bakgrundsbruset i en mottagare vara normalfördelat. I situationerna som beskrivs ovan tenderar dock interferensen i den mottagna signalen att vara mer sporadisk och oförutsägbar, med plötsliga utbrott av energi från interfererande system. Därför utnyttjar en adaptiv mottagare andra modeller för att modellera interferenserna och kan på så vis anpassa demodulationen och avkodningen. Anpassning av mottagaralgoritmer efter dessa brusmodeller har visat på stora prestandavinster, upp till 25 dB jämfört med ett traditionellt system baserat på normalfördelningen [3] [6] [7] [8] [9]. I en relativt plan terräng motsvarar det en tvåfaldig till trefaldig ökning av kommunikationsräckvidden. Nackdelen, som påvisas är att exekveringstiden tar mer än 1000 gånger så lång tid att genomföra för en impulsmodellsanpassad mottagare jämfört med en normalfördelningsbaserad mottagare [7].

Eftersom interferensmiljön sällan är statisk kan bruset i en mottagare bestå av olika grad av impulser, förutom normalfördelat brus. Därför kan bättre prestanda uppnås med en adaptiv modell och för detta föreslås en metod som utför komplex mottagning när interferensmiljön är krävande, men växlar över till normalfördelningen när situationen tillåter, se Figur 2. Baserat på interferensen statistiska karaktär avgör metoden när övergången från en modell till den andra sker. Beslutet baseras på signal-till-brusnivån (SNR) samt interferensens impulsaktighet, och relateras till en förbestämd prestandanivå (bitfelshalt), som exempelvis en bitfelhaltsgräns på 10^{-4} , vilket innebär att högst en av 10 000 bitar får vara fel för att prestandan ska anses vara acceptabel.

Med begreppet impulsaktighet eller impulsgrad menas hur interferensen kan karaktäriseras med hjälp av parametern α , som sträcker sig mellan ett maxvärde på 2 (motsvarar normalfördelat brus, minimalt impulsbeteende) till det lägsta simulerade värdet 1. Teoretiskt är värdena ner till 0 möjliga. Parametern och begreppet impulsaktighet kan därför tolkas som ett mått på hur mycket en sekvens avviker från normalfördelningen.



Figur 2. En adaptiv radiomottagare växlar modell beroende på impulsaktigheten hos den närliggande interferensmiljön. Vid låg impulsgrad används normalfördelningen och vid mer krävande interferensmiljöer nyttjas impulsmodellering.



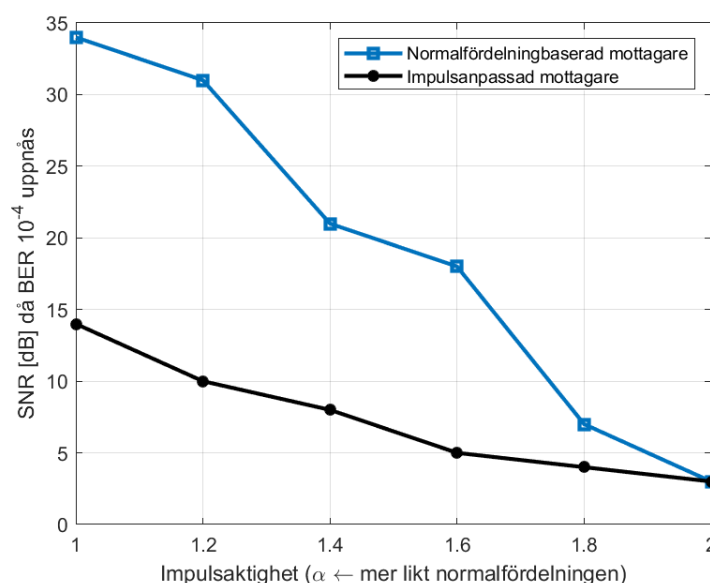
Figur 3. Simuleringsmodell i vilken en signal S påverkas av en interferens N . Summan av S och N tas emot i mottagaren samtidigt som N skattas av mottagaren till $\hat{\alpha}$.

Ju lägre värde på α , desto mer avviker fördelningen och desto mer impulsaktig kan interferensen anses vara.

Figur 3 illustrerar metoden, i vilken en nyttsignal S med given styrka utsätts för interferensen N med impulsaktighet α . Mottagaren tar emot signalen Y som består av en blandning av den ursprungliga signalen och interferensen. Mottagaren antas också ha tillgång till sampel av interferensen genom sändning av en träningssekvens, där mottagare och sändare vet vad som skickas. Genom att subtrahera den kända sekvensen från den mottagna signalen kan interferenssampil erhållas. Utifrån dessa sampel estimeras impulsgraden, $\hat{\alpha}$. Genom att variera interferensens impulsaktighet bestäms vilket SNR som krävs för att mottagaren ska uppnå den förutbestämda prestandanivån.

Detta genomförs för en mottagare anpassad efter normalfördelningen och en mottagare anpassad efter den adaptiva metoden. Resultatet erhålls i form av SNR samt graden av impulsaktighet hos interferensen.

I simuleringen antas att signalen S är QPSK-modulerad och att en turbokod används för felrättande kodning. Två gränser erhålls från simuleringarna, en för vardera typ av mottagare, se Figur 4. Gränserna visar när respektive mottagare klarar av att uppnå en bitfelshalt på 10^{-4} , givet ett mått på impulsaktigheten α och SNR. Med förhållanden som resulterar i området ovanför den blå linjen klarar den normalfördelningsbaserade



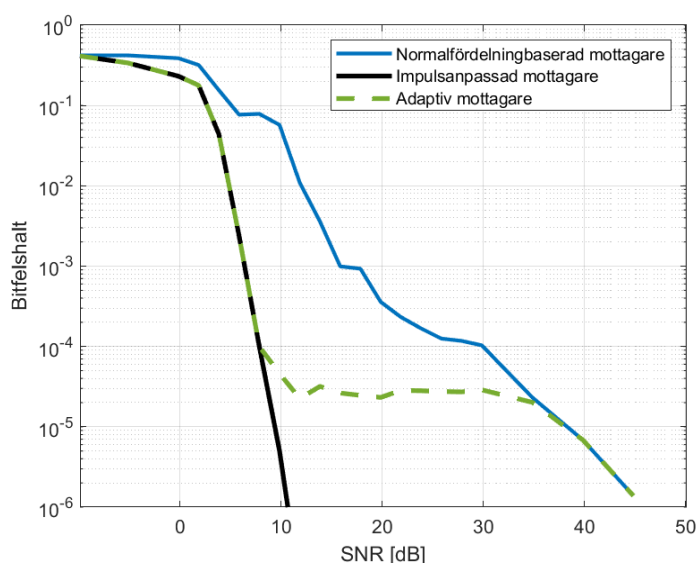
Figur 4. Simuleringsresultat. Kurvorna representerar begränsningen för när mottagarna kan uppnå den önskade bitfelshalten, i det här fallet 10^{-4} . Den blå linjen motsvarar en traditionell mottagare baserad på normalfördelningen, och den svarta representerar en adaptiv impulsanpassad mottagare med kännedom om interferensens statistiska karaktär.

mottagaren att uppnå den önskade prestandan. På samma sätt visar den svarta linjen gränsen för den komplexa impulsanpassade mottagaren. Denna mottagare behöver inte ha ett lika högt SNR som i det normalfördelade fallet eftersom den är anpassad för att hantera just impulsaktig interferens.

Med hjälp av begränsningarna definierade enligt Figur 4 kan en tredje, adaptiv mottagare designas. Denna mottagare har funktionaliteten att växla mottagaralgoritm baserad på estimat av rådande SNR och impulsaktighet. Valet av algoritm baseras på om den resulterande datapunkten hamnar över eller under linjerna i Figur 4.

Prestandan hos den föreslagna mottagaren utvärderas i en simulering med ett bitfelshaltsmål på 10^{-4} . Interferensens grad av impulsinnehåll slumpas enligt en likformig fördelning ($\alpha \in [1,2]$) för varje kodord, i vilken mottagaren antas kunna nyttja kända träningssekvenser för att skapa sampel av interferensen och kunna estimerar impulsparametern. Figur 5 visar mottagarprestanda i form av bitfelshalt som funktion av SNR. Den svarta linjen motsvarar den impulsanpassade mottagaren. Denna mottagaralgoritm är konstruerad för att hantera impulsbrus och bidrar som förväntat med den bästa prestandan, med nackdelen att algoritmen är beräkningskrävande. Den blå linjen motsvarar prestandan för en traditionell mottagare, baserad på normalfördelningen. Denna mottagare fungerar sämre med impulsbrus och kräver riktigt bra signalförhållanden för att uppnå en acceptabel prestanda. Den grönstreckade linjen motsvarar prestandan för den föreslagna, adaptiva mottagaren. Algoritmen byter successivt beräkningsmodell baserad på de rådande signalförhållandena efter de gränser som identifierats i Figur 4. Vid lägre SNR (under 10 dB) använder mottagaren exklusivt den impulsanpassade modellen eftersom normalfördelningen inte uppnår bitfelshalten i den regionen. Med bättre signalförhållanden förekommer det fall när normalfördelningen är tillräcklig, vilket visas genom att den adaptiva metoden stagnerar under den önskade bitfelshalten. I detta område (10-30 dB) växlar metoden mellan båda modellerna och kurvan når en plattå. När SNR överstiger 35 dB går modellen helt över till normalfördelningen eftersom signalen är så pass stark att prestandamålet uppnås oavsett impulsnivå.

Resultaten är lovande eftersom det påvisar att önskad prestanda erhålls och metoden kombinerar impulsmodellens prestandavinst i krävande interferensmiljöer, samt normalfördelningens analytiska enkelhet när förhållanden tillåter. Den föreslagna metoden bibehåller prestandavinsten och sparar samtidigt in på beräkningskraft när det är möjligt. Även om normalfördelningen endast används i ett fall av tio är det ändå 10 % reducerad



Figur 5. Mottagarprestanda från tre typer av mottagare utsatta för impulsbrus. Den grönstreckade linjen motsvarar den adaptiva metoden som växlar mottagaralgoritm beroende på signalens styrka och interferensens impulsaktighet.

komplexitet jämfört med en mottagare som utför de komplexa beräkningarna som impulsfördelningen kräver, med normalfördelningens grundkomplexitet som referensvärde. En nackdel med den framtagna metoden är att beslutsområdet är empiriskt framtaget för just den modulation och kodningstyp som ansatts och är inte direkt applicerbart på ett godtyckligt system. Framtida arbeten bör studera möjligheten till att generalisera modellbegränsningarna så att metoden kan appliceras på godtyckliga mottagarsystem. En mer detaljerad och teknisk rapport hittas i [10].

4 Frekvenskonflikt inom brigad

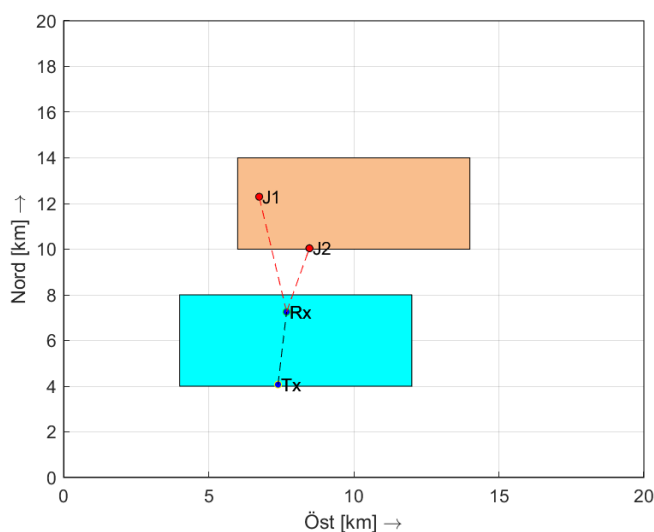
Inom en brigad behövs ett stort antal radionät för att tillhandahålla nödvändig kommunikation. Dessa nät kommer att störa varandra mer eller mindre beroende på ett antal faktorer såsom tillgängligt frekvensutrymme och hur näten allokerar sina frekvenser. Med störning i detta kapitel avses interferenser orsakade av egenstörning från angränsande nät i egna förband. För att skapa bättre förståelse för när det är ett problem och inte ett problem med egenstörning från angränsande nät är en studie utförd. Fokus för studien var att undersöka hur störda näten blir i en bataljon på grund av kommunikationen i andra bataljoner, eller i hela brigaden.

Alla nät, både det kommunicerande och de interfererande, använder samma frekvenshoppande VHF-radiosystem med en kanalbandbredd på 50 kHz. I princip skulle det tillgängliga VHF-bandet 30-88 MHz, dvs. drygt 50 MHz räcka till åtminstone 1000 stycken 50 kHz frekvenskanaler. Eftersom inte hela bandbredden kan användas i praktiken antas att maximalt 800 frekvenskanaler är tillgängliga för en brigad. Alternativt, om vi antar frekvenserna delas mellan fyra brigader, skulle 200 frekvenskanaler vara tillgängliga.

4.1 Metod och antaganden

Paketfelshalten för fungerade nät utsatta för störning undersöktes. Varje paket sändes över F frekvenshopp, i vilka värden på F upp till 16 frekvenshopp per paket studerades. Först bestämdes ett scenariorråde för det kommunicerade nätet och ett för de störande näten. Sedan genererades fungerande kommunikationslänkar. Endast felhalten orsakad av de störande näten undersöktes, så beräkningen utgick från fungerande länkar. Positionerna för den sändande och den mottagande noden, samt de störande noderna genererades slumpmässigt inom sina respektive områden.

När en fungerande länk genererats, slumpades antalet frekvenshoppskollisioner i paketet, från noll till F . Därefter genererades motsvarande antal störande noders positioner slumpmässigt i området i vilka de störande näten befann sig. Slutligen beräknades om paketet fortfarande kunde tas emot. För det förbestämda scenariorområdet upprepades sedan processen tills tillräcklig statistik för paketfelhalten erhållits. I Figur 6 illustreras ett fall med en kommunikationslänk utsatt för två kollisioner. Länken är mellan sändande nod T_x och mottagande nod R_x i blått område som störs av de två noderna $J1$ och $J2$ i ett orange område.



Figur 6. En kommunikationslänk där två hopp störs av två olika störande noder.

För varje kommunikationslänk och störande länk användes en stokastisk kanalmodell med både storskalig och småskalig fädning. Endast den småskaliga fädningen varierades över ett sänt paket, i vilket varje frekvenshopp utsattes för oberoende realiseringar av den småskaliga fädningen. Terrängen påverkar den storskaliga fädningen och därför undersöktes två olika typer av terräng. En platt terräng i Östergötland och en kuperad i Jämtland.

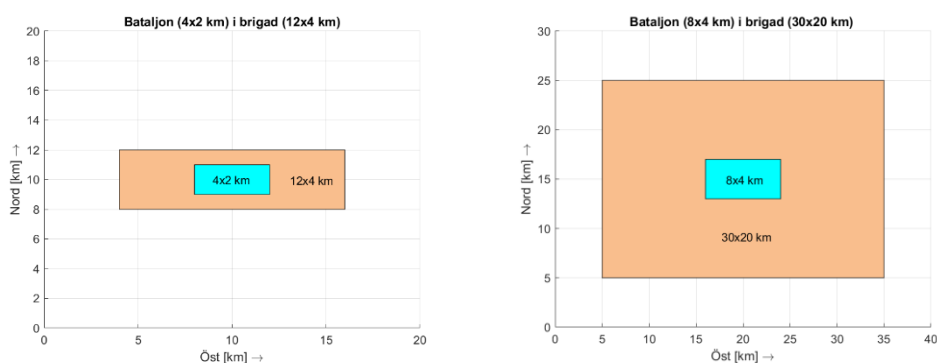
För att bestämma om ett paket kunde tas emot, användes en kapacitetsbaserad länkmodell. Förutom nämnd kanalmodell inkluderade simuleringen också typiska radiosystemparametrar, såsom modulationen QPSK och en felrättande kod med takt 1/2, vilket ger en signaleringshastighet av 1 bit/s/Hz.

Varje bataljon antogs använda 20 nät och en brigad antogs bestå av sex bataljoner. Brigadnäten som sammanband de olika bataljonerna inkluderades inte. Näten inom en bataljon var ortogonala, dvs. de interfererade inte med varandra medan för näten i de andra bataljonerna antogs att de inte var synkroniserade eller ortogonala. En bataljon inom ett brigadområde kan med dessa förutsättningar utsättas för 100 störande nät.

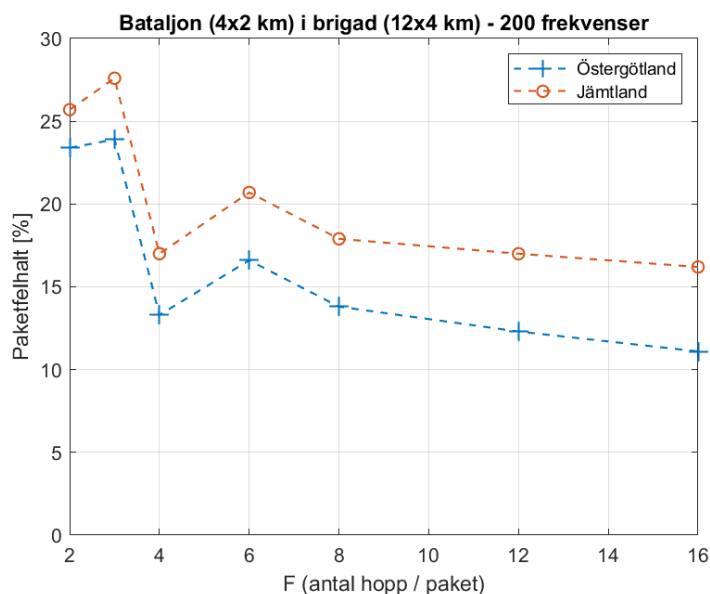
4.2 Resultat

När en bataljon befann sig inom samma område som en annan bataljon blev störningarna begränsade [11]. Huvudorsaken är att högst 20 nät i en bataljon kan störa ett nät i den andra bataljonen. Om bataljonen befann sig i ett kompakt brigadområde blev påverkan större. I det fallet orsakade alla 100 nät från de andra bataljonerna störningar. Ett av de svåraste scenarion som undersöktes illustreras i Figur 7 till vänster, vilket motsvarar strid över landsgräns. Till höger i Figur 7 illustreras ett annat scenario med ett större bataljons- och brigadområde.

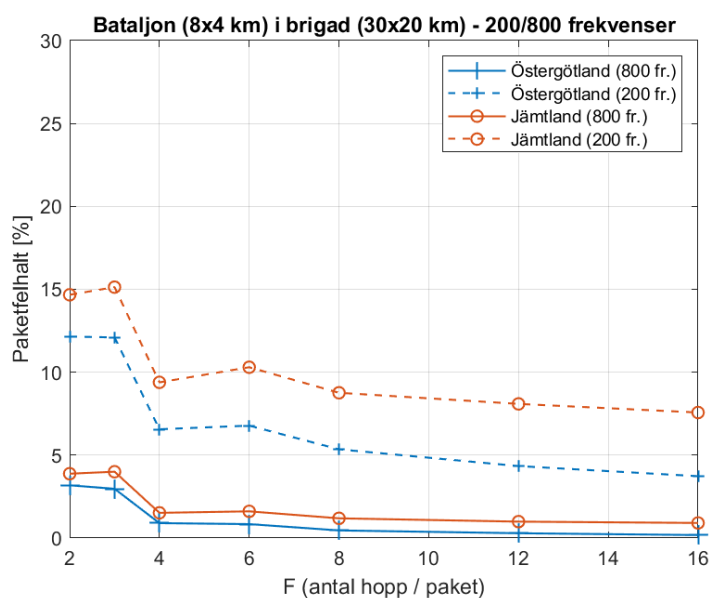
Användes samtliga 800 frekvenser blev paketfelhalten som högst några procent för fyra eller fler hopp per paket även i det svåra scenariot, dvs. det vänstra i Figur 7. Användes däremot bara 200 frekvenser blev paketfelhalten hög i det scenariot, mellan 15 och 20 procent, se Figur 8. För det högra scenariot med ett stort brigadområde i Figur 7 visas resultaten i Figur 9. Antal frekvenser som användes fick en betydande påverkan. Om alla 800 frekvenser användes blev paketfelhalten begränsad, men för hög, mellan 5 och 10 procent, om enbart 200 frekvenser användes. Det ska påpekas att aktivitetsfaktorn var 100 procent i undersökningarna, dvs. näten användes hela tiden. En aktivitetsfaktor på 50 procent istället för 100 procent gav en dryg halvering av paketfelhalten. Vid färre än fyra hopp per paket gick paketfelhalten upp märkbart, vilket beror på att den använda länkmodellen inte var anpassad för det fallet. Vid fyra hopp eller fler per paket avtog paketfelhalten succesivt med antal hopp, men skillnaderna var inte så stora. Terrängen hade en viss påverkan och resultaten visar att paketfelhalten blev högre i det kuperade området.



Figur 7. En bataljon spridd på 4x2 km befinner sig inom ett brigadområde på 12x4 km till vänster och en bataljon på 8x4 km inom ett brigadområde på 30x20 km till höger.



Figur 8. Paketfelhalten som funktion av antal hopp per paket i det kompakta scenariot.



Figur 9. Paketfelhalten som funktion av antal hopp per paket i det stora brigadområdet.

Undersökningarna visade att hur störda bataljonens nät blir beror på brigad- och bataljonsområdets storlek, men framförallt på antalet tillgängliga frekvenser. Det viktigaste är att använda många frekvenser. Används alla 800 frekvenser blir störningarna begränsade. Om däremot bara 200 frekvenser används blir störningarna i många fall inte acceptabla. Fler scenarion och en beskrivning av använda modeller redovisas i [11].

5 Full-duplex

Med full duplex avses i denna rapport samtidig sändning och mottagning på samma frekvens. Tekniken benämns ibland även *in-band full duplex* (IBFD) eller SF-STAR (*same-frequency simultaneous transmit and receive*) [12]. Till skillnad från *time division duplex* (TDD) och *frequency division duplex* (FDD), nyttjar full duplex samma frekvens- och tidresurser i både sändning och mottagning. Detta innebär teoretiskt under ideala förhållanden en möjlig kapacitetsdubbling för en given länk, vilket gör tekniken intressant för effektivare frekvensutnyttjande.

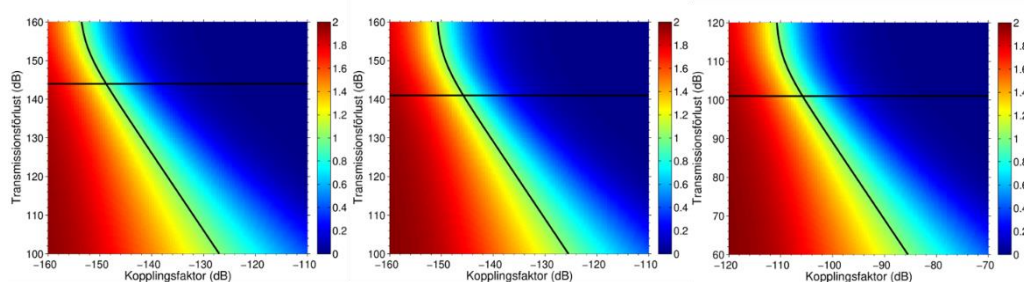
Vid samtidig sändning och mottagning på samma frekvens är den mottagna nyttsignalen och den utsända signalen överlagrade i mottagaren. Den interferens som uppstår på grund av den egna utsända signalen benämns självinterferens och kan vara i storleksordningen 100 – 150 dB starkare än den mottagna nyttsignalen. Denna självinterferens måste därför undertryckas kraftigt, vilket i allmänhet sker i flera steg och i olika domäner:

- Utbredningsdomän - Undertryckning sker utanför sändtagaren, till exempel genom isolation mellan sändar- och mottagarantennerna genom fysisk separation, eller med en cirkulator för sändtagare som använder samma antenn för sändning och mottagning.
- Analog domän - Undertryckning i analog krets, oftast direkt på RF-signalen före mottagarens ingångsförstärkare för att minska dynamikkrafter i senare steg, men kan också förekomma efter nedkonvertering till basbandet.
- Digital domän - Undertryckning som sker efter A/D-omvandlaren i mottagaren.

I en sammanställning visas hur ett flertal av de studerade testsystemen klarar av att åstadkomma en undertryckning på över 100 dB, vissa med en bandbredd som överstiger 20 MHz [13]. De system som finns beskrivna i litteraturen är testade i labbmiljö, under idealiserade förhållanden, och inte i operativa system.

De flesta system som finns beskrivna i litteraturen är utvecklade för betydligt högre frekvenser och större bandbredder än de som används i taktiska radiosystem. En studie har därför genomförts för att skapa en bättre förståelse för de svårigheter detta kan innebära, och vilka prestanda som kan förväntas, om full duplex skulle utnyttjas i taktiska radiosystem som använder frekvensbanden VHF och UHF.

Figur 10 visar en jämförelse mellan tre exempelsystem, ett VHF-system, ett UHF-system och ett WiFi-system. De två första systemen har parametrar som är representativa för taktiska radiosystem inom respektive frekvensområde (50 W uteffekt och en bandbredd på 50 kHz respektive 1 MHz), medan det tredje systemet motsvarar någon form av generiskt bredbandigt system för höga datahastigheter över korta avstånd (100 mW uteffekt och 20 MHz bandbredd). Färgskalan i Figur 10 visar kvoten mellan den teoretiskt uppnåeliga datahastigheten för full duplex, respektive halv duplex, som funktion av transmissionsförlusten, och självinterferensens kopplingsfaktor (dvs. dämpningen av självinterferensen). De horisontella linjerna i Figur 10 anger systemgränsen med avseende på transmissionsförlust för respektive system. Kvoten mellan de uppnåeliga datahastigheterna måste vara större än ett för att full duplex ska ge någon vinst över huvud taget jämfört med halv duplex. Gränsen då kvoten är lika med ett illustreras med en svart linje i varje delfigur. Till höger om denna linje (dvs. vid en högre kopplingsfaktor och/eller en högre transmissionsförlust) ger full duplex en lägre datahastighet än halv duplex. Till vänster om linjen (lägre kopplingsfaktor och/eller lägre transmissionsförlust) kan full duplex ge en vinst jämfört med halv duplex. Skallorna för de tre exempelsystemen skiljer sig åt på grund av olika systemparametrar. En slutsats är att en betydligt lägre kopplingsfaktor krävs för att dra nytta av full duplex i ett taktiskt radiosystem på VHF eller UHF jämfört med ett WiFi-system. Detta beror på en kombination av systemparametrarna, exempelvis att WiFi-systemet opererar vid högre frekvens med större bandbredd, högre spektraleffektivitet och på kortare avstånd. Sannolikt är det alltså betydligt svårare, och det krävs därför mer forskning och



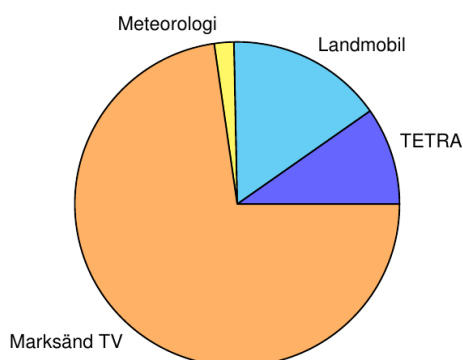
Figur 10. Jämförelse av kvoten mellan uppnåelig dataakt för full duplex och halv duplex i de tre systemexemplen: VHF (till vänster), UHF (mitten) och WiFi (till höger).

utveckling, för att full duplex ska nå samma prestanda i ett taktiskt radiosystem som i de WiFi-system som hittills har utvärderats i labbmiljö.

En inledande studie av att använda full duplex i frekvenshoppande system har också genomförts. Frekvenshopp kräver kanalestimering och kanalutjämning vid varje hopp, vilket minskar andelen av tiden som kan utnyttjas för dataöverföring. Snabbare frekvenshopp ger i allmänhet större förluster eftersom en mindre andel av tiden då kan utnyttjas för den faktiska dataöverföringen. Vid full duplex krävs på samma sätt som för halv duplex estimering och utjämning av kommunikationskanalen mellan de kommunikerande noderna, men det krävs också en estimering (och eventuellt kanalutjämning) av den egna självinterferenskanalen hos de båda sändtagarna. Detta leder till att en ännu mindre andel av tiden kan utnyttjas för dataöverföring vid full duplex än vid halv duplex. Därmed blir den relativa förlusten, i termer av spektraleffektivitet, större. Den relativa förlusten kan vara signifikant vid extremt snabbt frekvenshopp, men med mer modesta hopptakter är förlusten förhållandevis liten. Den skillnad mellan olika typer av system som beror på självinterferens, illustrerat i Figur 10, har i allmänhet en mer signifikant påverkan på den uppnåeliga informationsdataakten än den relativa förlusten som orsakas av frekvenshopp.

6 Opportunistiskt frekvenshopp

Försvarsmaktens tillgång till frekvenser i det militära UHF-bandet avsett för bredbandiga kanaler är begränsat. Bredbandiga kanaler i det militära UHF-bandet är i det här fallet kanaler med bandbredden 1 MHz kring en bärvågsfrekvens inom frekvensområdet 225-380 MHz. I detta kapitel sammanfattas en studie med mål att föreslå alternativa frekvensområden för opportunistiskt frekvenshopp. Opportunistiskt frekvenshopp innebär att frekvensspektrum utnyttjas av en sekundär användare (i detta fall Försvarsmakten, med frekvenshoppande radiosystem) utan att försämra kommunikationsmöjligheterna för den primära användaren (ofta spektrumägaren). Den genomförda studien har redovisats i en FOI rapport [14].



Figur 11. Fördelning av bandbredd uppdelat på olika typer sändningstillstånd inom 380-790 MHz.

Inom frekvensområdet 380-790 MHz finns i huvudsak fyra kategorier av sändningstillstånd: TETRA, landmobil, meteorologi och marksänd TV, se Figur 11. Sändningstillstånd för marksänd TV är den kategori som bedöms mest lämplig att studera för opportunistisk användning, medan övriga inte bedöms vara lämpliga. Marksänd TV upptar den största andelen av bandbredd inom frekvensområdet 380-790 MHz. TV-sändarna har bestämda platser och respektive sändares masthöjd och utstrålad uteffekt är känd. Detta gör det möjligt att beräkna områden för var och en av TV-kanalerna som går att använda i ett taktiskt radiosystem.

Beräkningar av möjliga områden där TV-kanalerna kan användas opportunistiskt, visar på att det finns åtminstone tio TV-kanaler tillgängliga (om 8 MHz vardera) om inget skyddsavstånd används i norra Sverige. För att realisera opportunistisk användning av TV-kanaler kommer dock ett skyddsavstånd att krävas för inte störa TV-mottagare vid dess räckviddsgräns. Skyddsavståndet reducerar antalet tillgängliga TV-kanaler samt gör områdena mindre. Bedömningen från studien är att det kommer att finnas åtminstone fem 8 MHz kanaler tillgängliga i norra Sverige även med ett skyddsavstånd. Detta innebär tillgång till ytterligare 40 bredbandiga kanaler för ett taktiskt radiosystem.

För att utnyttja dessa ytterligare tillgängliga kanaler opportunistiskt i ett mobilt taktiskt radiosystem så krävs en dynamisk allokering av frekvenserna. Detta är nödvändigt både för att skydda TV-mottagarna, men också för att erhålla önskad prestanda i det taktiska radiosystemet. Inom varje område måste de TV-kanaler identifieras som har alltför hög mottagen effekt från TV-sändare. Dessa kanaler kan inte användas av det taktiska radiosystemet eftersom de ger alltför stor försämring av prestanda.

Att utnyttja TV-kanaler opportunistiskt ger tillgång till större bandbredd och därmed ökad systemkapacitet och möjlighet för fler radionät. Om valet görs på ett bra sätt ger den extra bandbredden ett ökat störskydd genom den processvinst som erhålls av en större bandbredd.

7 Slutsatser

Försvarmakten har flertalet radiosystem som tillsammans bildar en sambandsförmåga. Radiosystemen är av olika teknikgenerationer, allt ifrån teknik utvecklad under 1980-talet fram till idag. Respektive radiosystem är att betrakta som separata system som saknar gemensamma systemgränssytor sinsemellan. Dock utnyttjar de alla samma fysiska resurs, frekvenser, för att överföra information. Eftersom de olika radiosystemen inte går att betrakta som ett enda sambandssystem bestående av flera radiosystem måste respektive radiosystems frekvensanvändning i förväg planeras för att inte orsaka frekvenskonflikter med andra radiosystem.

Med en växande Försvarmakt, fler radiosystem, snabbare förlopp som skapar nya förbandssammansättningar och dynamiska grupperingssituationer (från utspritt till tätt grupperat), blir det svårt att förutse alla möjliga utfall vid frekvensplaneringen. Dessutom kanske inte frekvenserna räcker till för konfliktfria tilldelningar. Detta skapar ett behov av att snabbare kunna uppdatera frekvensplanerna. Men om det skulle finnas ett sambandssystem bestående av flera samverkande radiosystem finns möjligheten att låta sambandssystem hantera de dynamiska situationerna som uppstår. Nedan besvaras de frågeställningar EVEREST-projektet arbetat med.

Hur kan Försvarmakten använda tillgängliga frekvenser på ett mer effektivt sätt?

Genom delning och geografisk återanvändning av frekvenser mellan Försvarmaktens radiosystem men också med civila radiosystem då det är möjligt, ökar sannolikheten att tillgodose den ökade efterfrågan av frekvenser. Det leder också till att beläggningsgraden ökar och frekvenserna nyttjas därmed effektivare.

Tidscykeln från en frekvensplan till att ett radiosystem omkonfigurerats tar i många fall lång tid. Genom att korta denna tid kan exempelvis geografisk återanvändning nyttjas i större grad i frekvensplaneringen.

Behovet av mängden frekvenser och sambandsresurser skiljer sig mellan de olika typer av uppgifter som ett förband tilldelas. En ny metod i vilka frekvenser och sambandsresurser tilldelas med en uppgift på samma sätt som andra resurser tilldelas, skulle öka effektiviteten. För att klara av detta krävs bättre samordning av frekvensspektrumet och en ansvarig som vet hur resurserna används och kan fördelas för varje given tidpunkt.

Beläggningsgraden för somliga frekvenser, i vilka civila system innehar tillstånd, är på vissa platser låg och skulle kunna användas av Försvarmaktens radiosystem så länge de inte har negativ inverkan på de civila systemen. För att Försvarmaktens system ska kunna hantera detta krävs att information om spektrumanvändningen finns tillgänglig så att det är möjligt att taktisera med frekvensspektrum. Detta skulle skapa en större manöverbefähighet i frekvensspektrumet.

Hur kan ett bättre frekvensutnyttjande minska integrationsproblemen och förbättra samexistensen?

En del integrationsproblem beror på att plattformen eller andra system ombord orsakar störningar hos radiosystemet på grund av kompromisser i system [3]. Genom att låta radiomottagaren anpassa sig efter brusets eller störningarnas karakteristik är det till en viss grad möjligt att ändå ta emot radiosignalerna. Med denna teknik omhändertar radiosystemen de problem som inte är lösta med elmiljöarbetet på plattformen.

Frekvenskonflikter undviks genom metod och teknik för att förbättra samexistensen. Genom att tillföra information från frekvensplaneringen, till exempelvis ledningsstödsystemet, och nyttja dess information om andra förbands positioner kan varningar för frekvenskonflikter skapas. Frekvenskonflikterna hanteras sedan med metoder för att byta frekvens hos ett av förbanden.

Idag bidrar störskyddet, frekvenshopp, till viss del till att skapa samexistens. Men detta sker på bekostnad av ett minskat störskydd mot en fientlig telekrigsinsats. Störskyddet ska

användas för att vara ett störskydd och inte en teknik för att skapa samexistens mellan Försvarsmaktens förband.

En bättre förståelse för frekvensanvändningen inom Försvarsmakten kan minska integrationsproblem och förbättra samexistensen. Använder ett system på en plattform specifika frekvenser, så behöver användarna ha kunskap om detta och förstå innebörden av en frekvenskonflikt samt kunna ändra frekvens när det är nödvändigt. Att ett system fungerar på ett övningsfält ger inga garantier för att det fungerar på en annan plats i en annan miljö exempelvis tillsammans med en annan nations förband i ett annat land.

Kompetensen vad gäller frekvenshantering innehas av för få individer och behöver utökas för att möta det behov som uppstår när Försvarsmakten växer och nya system och funktioner införs.

8 Referenser

- [1] J. Mitola, "Cognitive Radio An Integrated Agent Architecture for Software Defined Radio," 2000.
- [2] J. Mitola och G. Q. Maguire, "Cognitive Radio: Making Software Radios More Personal," *IEEE Pers. Commun.*, vol. 6, pp. 13-18, August 1999.
- [3] B. Asp, E. Axell, S. Bergström, K. Häggglund, A. Komulainen, T. Ranström och P. Stenumgaard, "Metoder för hantering av dynamiska interferensmiljöer," FOI-R--4870--SE, 2019.
- [4] B. Asp, K. Wiklundh, S. Örn Tengstrand, E. Axell, P. Eliardsson och B. Johansson, "RICOM Slutrapport," FOI-R--4317--SE, 2016.
- [5] S. Linder, K. Wiklundh och M. Alexandersson, "Measurements of Conducted and Radiated Emissions From Solar Panel Installations," FOI-R--5308--SE, 2022.
- [6] K. Häggglund och E. Axell, "Adaptive Demodulation in Class A Impulse Noise Channels," i *IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM)*, 2019.
- [7] K. Häggglund och E. Axell, "Adaptive Demodulation in Impulse Noise Channels," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 71, nr 2, pp. 1685-1698, February 2022.
- [8] K. Häggglund och E. Axell, "Adaptive Demodulation in Symmetric Alpha-Stable Impulse Noise Channels," i *IEEE 91st Vehicular Technology Conference (VTC-Spring 2020)*, 2020.
- [9] P. Eliardsson, E. Axell, K. Häggglund, P. Johansson, J. Nilsson och G. Bark, "Effektivare frekvensutnyttjande för Försvarsmaktens radiokommunikationssystem," FOI-R--5166--SE, 2021.
- [10] K. Häggglund, E. Axell och P. Eliardsson, "Reduced Complexity Adaptive Demodulation in Impulse Noise Channels," i *Military Communications Conference (MILCOM)*, 2022.
- [11] K. Häggglund, J. Nilsson och G. Eriksson, "Analysis of link performance degradation from interferences in military networks," FOI-D--1191--SE, 2022.
- [12] K. Pärilin, T. Riihonen, V. L. Nir, M. Bowyer, T. Ranström, E. Axell, B. Asp, R. Ulman, M. Tschauner och M. Adrat, "Full-Duplex Tactical Information and Electronic Warfare Systems," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 59, nr 8, pp. 73-79, 2021.
- [13] K. E. Kolodziej, B. T. Perry och J. S. Herd, "In-band full-duplex technology: Techniques and systems survey," *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 67, nr 7, pp. 3025-3041, 2019.
- [14] P. Eliardsson, E. Axell, B. Asp och P. Johansson, "Opportunistisk frekvensanvändning för taktiskt radiosamband," FOI-R--5385--SE, 2022.
- [15] P. Eliardsson, E. Axell, B. Asp, T. Ranström, K. Häggglund och P. Johansson, "Effektivare frekvensutnyttjande för förbättrad samexistens - Omvärldsanalys," FOI-R--4975--SE, 2020.

Appendix A. EVEREST publikationer

FOI rapporter och memon

- Patrik Eliardsson, Erik Axell, Börje Asp, Thomas Ranström, Kristoffer Hägglund, Peter Johansson, "Effektivare frekvensutnyttjande för förbättrad samexistens - Omvärldsanalys", FOI-R--4975--SE, 2020
- Patrik Eliardsson, "Genomförd verksamhet 2020 inom FoT-projektet Effektivare frekvensutnyttjande för förbättrad samexistens (EVEREST)", FOI Memo 7398, 2020
- Patrik Eliardsson, Börje Asp, Erik Axell, Peter Johansson, "Förutsättningar för frekvenshantering inom Försvarsmakten - Specifikt för radiosamband", FOI-R--5158--SE, 2021
- Patrik Eliardsson, Erik Axell, Kristoffer Hägglund, Peter Johansson, Jan Nilsson, Gunnar Bark, "Effektivare frekvensanvändning för Försvarsmaktens radiokommunikationssystem - Tekniker och metoder", FOI-R--5166--SE, 2021
- Patrik Eliardsson, "EVEREST workshop 2021", FOI Memo 7661, 2021
- Patrik Eliardsson, "Redovisning av genomförd Workshop inom FoT-projektet Effektivare frekvensutnyttjande för förbättrad samexistens (EVEREST)", FOI Memo 7944, 2022
- Patrik Eliardsson, Erik Axell, Kristoffer Hägglund, Peter Johansson, Gunnar Eriksson, Jan Nilsson, "Effektivare frekvensutnyttjande för förbättrad samexistens - Slutrapport", FOI-R--5384--SE, 2022
- Patrik Eliardsson, Erik Axell, Börje Asp, Peter Johansson "Opportunistiskt frekvensanvändning för taktiskt radiosamband", FOI-R--5385--SE, 2022
- Kristoffer Hägglund, Jan Nilsson, Gunnar Eriksson "Analysis of link performance degradation from interferences in military networks" FOI-D--1191--SE, 2022

Vetenskapliga publikationer

- Thomas Ranström, Erik Axell, "Full Duplex Based Digital Out-of-Band Interference Cancellation for Collocated Radios", IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2020.
- Kristoffer Hägglund, Erik Axell, "Adaptive Demodulation in Symmetric Alpha-Stable Impulse Noise Channels", IEEE Vehicular Technology Conference (VTC2020-Spring), 2020.
- Karel Pärlin, Taneli Riihonen, Vincent Le Nir, Mark Bowyer, Thomas Ranström, Erik Axell, Börje Asp, Robert Ulman, Matthias Tschauner, Marc Adrat, "Full-Duplex Tactical Information and Electronic Warfare Systems", IEEE Communications Magazine, vol. 59, no. 8, pp. 73-79, 2021.
- Kristoffer Hägglund, Erik Axell, "Adaptive Demodulation in Impulse Noise Channels", IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 71, no. 2, pp. 1685-1698, 2022.
- Kristoffer Hägglund, Erik Axell, Patrik Eliardsson "Reduced Complexity Adaptive Demodulation in Impulse Noise Channels", IEEE Military Communications Conference (MILCOM), 2022.

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