

Flexibel frekvensanvändning för Försvarmaktens radiosystem

Slutrapport

PATRIK ELIARDSSON, ERIK AXELL,
KRISTOFFER HÄGGLUND, JAN NILSSON,
JONATHAN ANDERSSON OCH JOHN NORDIN



Patrik Eliardsson, Erik Axell, Kristoffer Hägglund,
Jan Nilsson, Jonathan Andersson och John Nordin

Flexibel frekvensanvändning för Försvarens radiosystem

Slutrapport

Titel	Flexibel frekvensanvändning för Försvarsmaktens radiosystem – Slutrapport
Title	Flexible frequency use for the Armed Forces' radio systems – Final report
Rapportnr / Report No.	FOI-R--5839--SE
Månad / Month	December / December
Utgivningsår / Year	2025
Antal sidor / Pages	24
ISSN	1650-1942
Kund / Customer	FM
Forskningsområde	Ledningsteknologi
FoT område	Ledning och MSI
Projektnr / Project No.	E51581
Godkänd av / Approved by	Christian Jönsson
Ansvarig avdelning	Telekrig

Bild/Cover: Shutterstock, AI-genererad

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

Försvarsmakten genomgår en period av tillväxt, där armén utökas med fler brigader, inom marinen planeras det för nya ytfartyg och flera andra plattformar moderniseras. Behovet av trådlös kommunikation kommer därmed att öka, men det tillgängliga frekvensutrymmet kommer inte öka. Det tillgängliga frekvensspektrumet för radiokommunikation är en begränsad resurs som är konkurrensutsatt av kommersiella intressen. Med växande försvar är det inte möjligt att göra konfliktfri frekvenstilldelning till alla radiosystem, vilket innebär att samutnyttjande av tillgängligt frekvensutrymme är nödvändigt. Därför är det av stor vikt att tillgängligt frekvensspektrum nyttjas så effektivt som möjligt av radiosystemen för att erhålla robusthet och tillgänglighet. Samutnyttjande av frekvenser kan innebära försämrade prestanda på grund av frekvenskonflikter, om inga åtgärder vidtas. Konsekvenser av frekvenskonflikter och metoder för att reducera påverkan från dessa konflikter har studerats i denna rapport.

Rapporten sammanfattar aktiviteter och resultat från FoT-projektet *Flexibel frekvensanvändning för Försvarsmaktens radiosystem* under 2023-2025. Projektets resultat har också spridits via en årlig workshop med deltagare från FOI, Försvarsmakten, FMV och FRA. Workshopen har bidragit till att öka tillgängliggörandet av producerade forskningsresultat, men även till dialog mellan forskare och uppdragsgivare avseende deras utmaningar och behov av kunskap.

Frekvenskonflikter för ett bataljonsnät har utvärderats i scenarion där brigadytan samt antalet tillgängliga frekvenser varierar. Nyttjande av färre frekvenser ger högre paketfelshalt. Olika frekvenshoppstakter vid frekvenskonflikter har betydelse för hur paketfelshalten påverkas. Radionät med högre hopptakt påverkas mer av ett radionät med lägre hopptakt än vice versa. I vissa situationer behöver frekvenstilldelningen anpassas för att motverka förstörande interferens.

Effektreglering har studerats, som en metod för att reducera konsekvenserna av frekvenskonflikter, förbättra smygförmågan och minska energiförbrukningen. Studien visar att uteffekten kan minskas samtidigt som paketfelshalten inom radionätet bibehålls. Den reducerade uteffekten innebär också att signalspanare måste komma närmare sändaren för att bibehålla sin detektionssannolikhet.

Ett sätt att undvika interferens orsakad av frekvenskonflikter är att flexibelt dela upp tillgängliga frekvenser mellan radionäten. Metoder för att avgöra när och hur frekvenserna ska fördelas mellan radionät har studerats. Resultaten visar att andelen paket som kan skickas i ett radionät med många paketförluster kan öka, på bekostnad andelen paket som kan skickas av det andra radionätet. Fördelen blir att båda radionäten får mer jämlik prestanda. Metoden behöver utvecklas och utvärderas för scenarion med fler radionät, noder och frekvenser.

En elektromagnetisk lägesbild är nödvändig för att samutnyttja spektrum i större utsträckning. Hur en elektromagnetisk lägesbild ska skapas, lagras, skyddas, distribueras och visualiseras kräver fortsatt arbete.

Nyckelord: frekvens, frekvenskonflikt, spektrum, radio

Abstract

The Swedish Armed Forces are currently undergoing a period of growth, with the Army being expanded with several brigades, the Navy planning for new surface vessels, and several platforms being modernized. The need for wireless communications will therefore increase, but the available frequency spectrum will not. With a growing defense force, it is not possible to allocate frequencies to all radio systems without conflicts, which means that spectrum sharing is necessary. It is therefore very important that the available frequency spectrum is used as efficiently as possible by radio systems in order to achieve robustness and availability. Shared use of frequencies can lead to impaired performance due to frequency conflicts if no measures are taken. The consequences of frequency conflicts and methods for reducing the impact of these conflicts have been studied in this report.

The report summarizes the activities and results of the R&D project *Flexible Frequency Use for the Swedish Armed Forces' Radio Systems* during 2023-2025. The project's results have also been disseminated through an annual workshop with participants from FOI, the Swedish Armed Forces, FMV and FRA. The workshop has contributed to increasing the availability of research results, but also to dialogue between researchers and clients regarding their challenges and knowledge needs.

Frequency conflicts for a battalion network have been evaluated in scenarios where the brigade area and the number of frequencies vary. Using fewer frequencies results in a higher packet error rate. Radio networks with higher hopping rates are more affected by frequency conflicts from radio networks with lower hopping rates than vice versa. In certain situations, frequency allocation needs to be adjusted to counteract destructive interference.

Power control has been studied as a method for reducing the consequences of frequency conflicts, improving stealth capabilities, and reducing energy consumption. The study shows that the output power can be reduced while maintaining the packet error rate within the radio network. The reduced output power also means that signal interceptors must come closer to the transmitter to maintain their detection probability.

One way to avoid interference caused by frequency conflicts is to flexibly divide available frequencies between radio networks. Methods for determining when and how frequencies should be allocated between radio networks have been studied. The results show that the proportion of packets that can be sent in a radio network with many packet losses can increase, at the expense of the proportion of packets that can be sent by the other radio network. The advantage is that both radio networks achieve more equal performance. The method needs to be developed and evaluated for scenarios with more radio networks, nodes, and frequencies.

An electromagnetic environment situational awareness is necessary in order to share spectrum to a greater extent. How an electromagnetic environment situational awareness should be created, stored, protected, distributed, and visualized requires further work.

Keywords: frequency, frequency conflict, spectrum, radio

Innehållsförteckning

1	Inledning	6
1.1	Mål	6
1.2	Läsanvisningar	6
2	Omvärldsbevakning	7
3	Frekvenskonflikter och utombandsegenskapers påverkan	8
3.1	Metod och antaganden	8
3.2	Paketfelshalt orsakad av frekvenskonflikter	9
3.3	Paketfelshalt orsakad av utombandsegenskaper	10
3.4	Slutsatser	11
4	Adaptiv effektanvändning	12
4.1	Metod och antaganden	12
4.2	Utvärderade effektregeringsmetoder	13
4.3	Resultat	14
4.4	Slutsatser	15
5	Flexibel frekvenshantering	16
5.1	Föreslagen frekvensvalsmetod	16
5.2	Resultat	16
5.3	Slutsatser	18
6	Resultatspridning	19
7	Projektets frågeställningar	20
8	Slutsatser	22
	Referenser	23
A	Projektets publikationer	24

1 Inledning

Försvarsmakten genomgår nu en period av tillväxt, där t.ex. armén utökas med fler brigader, inom marinen planeras det för nya ytfartyg och flera andra plattformar moderniseras. Kommande utmaningar är gränsöverskridande över nationsgränser, traditionella organisationsgränser och domäner. Ledningsstödsystem ska stödja gemensamma operationer, såväl nationellt som internationellt, genom hög interoperabilitet där standardiserade gränssnitt medför förmåga att på kort tid etablera ledningsstöd med utbyte av information.

Tillgängligt frekvensspektrum för radiosamband är en begränsad resurs som är konkurrensutsatt av kommersiella intressen. Med ett växande försvar är det därför av stor vikt att tillgängligt frekvensspektrum nyttjas så effektivt som möjligt av radiosystemen för att samtidigt erhålla robusthet och tillgänglighet. Med växande försvar är det inte möjligt att göra konfliktfri frekvenstilldelning till alla radiosystem i Försvarsmakten, vilket innebär att samutnyttjande av tillgängligt frekvensutrymme är nödvändigt. Samutnyttjande av frekvenser kan innebära försämrade prestanda på grund av frekvenskonflikter, om inga åtgärder vidtas.

Dagens militära radiokommunikationssystem är rigida och medger ingen eller liten flexibilitet avseende nyttjandet av frekvenser. För att hantera de dynamiska situationer som kan uppstå i en krigs- eller krissituation i kombination med ökande informationsbehov krävs en högre grad av intelligens och adaptivitet i framtida radiosystem. Konsekvenser av frekvenskonflikter och adaptiva metoder för att reducera påverkan från dessa konflikter har studerats i denna rapport.

Denna rapport sammanfattar aktiviteter och resultat från FoT-projektet *Flexibel frekvensanvändning för Försvarsmaktens radiosystem* (F4R) under 2023-2025. Projektets syfte var att studera och utveckla nya tekniker och metoder för att flexibelt använda radiosystems frekvenser för att tillgodose det ökande behovet av informationsutbyte. Arbetet baseras på resultat och erfarenheter från föregående FoT-projekt EVEREST [1].

1.1 Mål

Målet med rapporten är att redovisa resultat från genomförda aktiviteter inom projektet. F4R-projektet har arbetat med två övergripande frågeställningar.

- Hur kan radiosystems tillgängliga frekvensutrymme användas flexibelt för att säkerställa samband när det behövs och där det behövs för militära operationer?
- Hur kan spektrum samutnyttjas inom Försvarsmakten samt med civila aktörer och internationella samarbetspartners?

1.2 Läsanvisningar

I kapitel 2 sammanfattas den omvärldsbevakning som genomfördes under 2023. Kapitel 3 beskriver studien om frekvenskonflikter mellan bataljoner som samutnyttjar frekvenser. Ett sätt att reducera frekvenskonflikter är att minska uteffekten vilket undersöks i kapitel 4. Frekvenserna som samutnyttjas kan tillfälligt fördelas mellan nät så att ingen risk för konflikter kvarstår. I kapitel 5 beskrivs metoder för när och på vilka villkor en sådan fördelning ska göras. Kapitel 6 beskriver de aktiviteter som genomförts för att sprida resultat från projektet. I kapitel 7 besvaras projektets frågeställningar och slutligen i kapitel 8 redovisas rapportens slutsatser.

2 Omvärldsbevakning

En omvärldsbevakning av tekniker avsedda för att använda frekvenser flexibelt i trådlösa kommunikationssystem har genomförts inom projektet [2]. Omvärldsbevakningen baseras på öppna källor såsom publikationer i vetenskapliga tidskrifter och konferenser samt standarder för trådlösa kommunikationssystem. Även öppna källor om militära forskningsprogram från DARPA¹ och Nato STO² inkluderades.

I litteratursökningen observerades trenden att maskininlärning används i ökande omfattning för att lösa forskningsfrågor kring hur spektrumresurser ska fördelas mellan flera användare. Vid sökningar på IEEE Xplore innehöll 2013 30 % av sökträffarna på "dynamic spectrum" begreppen "AI" eller "learning" vilket 2023 hade ökat till 75 %.

Två olika standarder för spektrumdelning existerar. I USA finns Citizen Broadband Radio Service (CBRS) och i Europa Licensed Shared Access (LSA). CBRS är operationellt i USA sedan 2020 för delning av frekvensspektrumet (3 550-3 700 MHz) mellan federala och icke-federala användare. CBRS har tre prioritetsnivåer, för att hantera spektrumdelning mellan US Navy, 4G- och 5G-nät samt fri användning.

LSA är sedan 2014 standardiserat av European Telecommunications Standards Institute (ETSI) tekniska kommitté Reconfigurable Radio Systems. Standarden är framtagen för att medge delning av frekvensspektrumet från 2 300 till 2 400 MHz med syftet att mobiltelefonisystemet (eng. mobile/fixed communication networks (MFCN)) ska få tillgång till det. I LSA finns två prioritetsnivåer av användare. LSA används i Nederländerna för delning av frekvensspektrum till trådlös eventutrustning (PMSE³).

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

I omvärldsbevakningen [2] konstateras att det finns fundamentala skillnader mellan civila trådlösa kommunikationssystem och militära taktiska radiosystem, exempelvis att militär radiotrafik oftast är av typen multicast medan den civila är unicast och att militära system är ofta decentraliserade medan civila system har centraliserade funktioner. Dessa skillnader komplicerar delning av frekvensspektrum. Civila system är dessutom standardiserade för att olika leverantörer ska kunna konkurrera med olika terminaler som tillhör samma system. För militära radiosystem finns inga gemensamma standardiseringsorgan med stark gemensam drivkraft, även om det pågår arbete med standardisering av gemensamma protokoll inom Nato. Taktiska radiosystem inom Försvarmakten har snarare upphandlats och utvecklats med ett nationellt perspektiv och egna krav, där spektrumdelning inte prioriterats. Därför kan Försvarmaktens befintliga radiosystem inte utbyta information sinsemellan på det sätt som är nödvändigt för att dela frekvensspektrum.

¹Defense Advanced Research Projects Agency

²Science and Technology Organization

³Programme Making and Special Events

3 Frekvenskonflikter och utombands-egenskapers påverkan

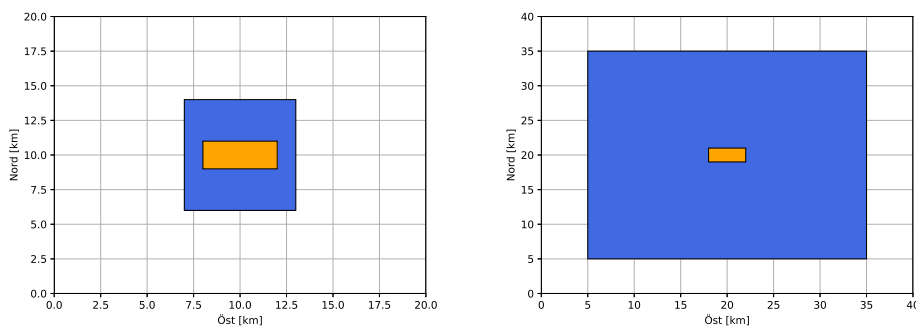
Inom divisioner och brigader behövs flera radionät för att tillhandahålla nödvändig kommunikation. Dessa radionät kommer att störa varandra mer eller mindre beroende på ett antal faktorer såsom tillgängligt frekvensutrymme, avstånd mellan radionäten och hur radionäten allokerar sina frekvenser. Med störning avses i detta kapitel interferenser från angränsande radionät i egna förband. För att skapa bättre förståelse för när det är problem och inte med egenstörning från angränsande radionät har studier utförts [3–6]. Fokus för studierna har varit att undersöka hur störda radionäten i en bataljon blir inom ett brigadområde.

3.1 Metod och antaganden

I studierna analyserades interferenser mellan två eller flera frekvenshoppande radionät. Alla radionät antogs använda frekvenshoppande VHF-radiosystem med en kanalbandbredd på 50 kHz. I princip skulle det tillgängliga VHF-frekvensbandet 30 – 88 MHz, dvs. drygt 50 MHz, räckta till åtminstone 1000 stycken 50 kHz frekvenskanaler, men i praktiken är färre frekvenskanaler tillgängliga. Antalet frekvenskanaler som används per radionät varierades i studierna.

Varje bataljon antogs använda upp till 20 radionät och en brigad antogs bestå av sex bataljoner. Brigadnäten som sammanbinder de olika bataljonerna inkluderades inte. Radionäten inom en bataljon är ortogonala, dvs. de interfererar inte med varandra om utombandsegenskaperna inte beaktas. Däremot är radionäten i de olika bataljonerna inte synkroniserade och inte ortogonala. En bataljon inom ett brigadområde kan då utsättas för de andra fem bataljonernas totalt 100 störande nät. Flertalet scenarier med olika storlekar på bataljonsområdena studerades i [3, 4], men resultaten som presenteras i denna rapport baseras på scenariot som visas i figur 3.1. Figur 3.1 visar två brigadområden, ett kompakt och ett expanderat, med ett bataljonsområde inom brigadområdet. För mera detaljer kring scenariot se [7].

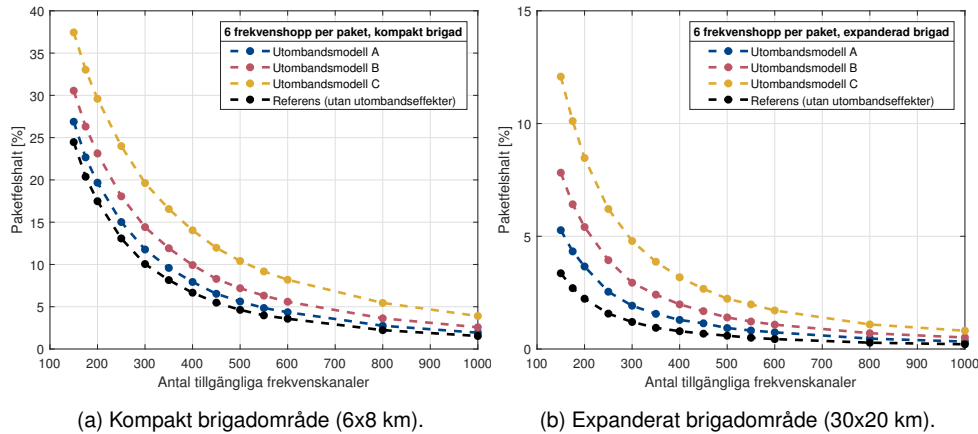
Den sändande och den mottagande nodens, samt de störande nodernas positioner genererades slumpmässigt inom sina respektive områden. För kommunikationslänken görs beräkningar på om paketet kommer fram eller ej. Endast fungerande kommunikationslänkar innan störningar från angränsande radionät inkluderades i beräkningen av paketfelshalten.



(a) Kompakt brigadområde (yta 48 km²).

(b) Expanderat brigadområde (yta 600 km²).

Figur 3.1: En kompakt (6x8 km) och ett expanderat brigadområde (30x20 km) (blåfärgade). Offerbataljonen (orange-färgad) är alltid 4x2 km².



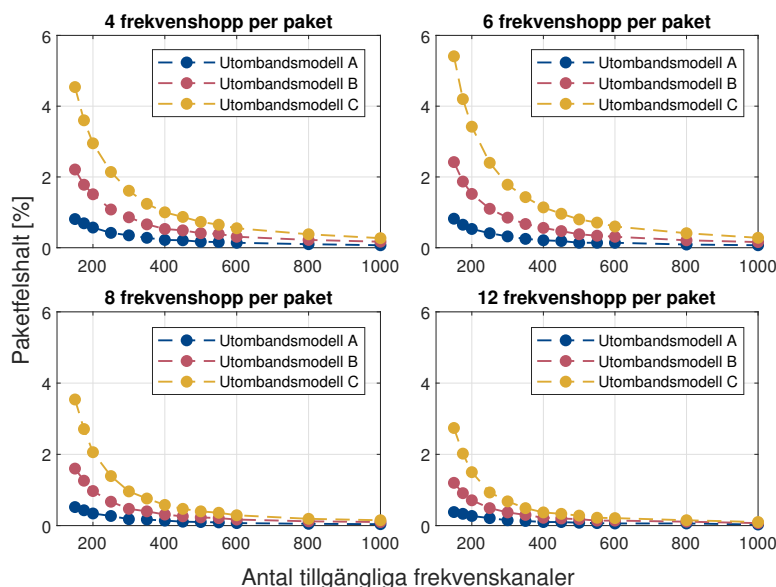
Figur 3.2: Paketfelshalt som funktion av antalet tillgängliga frekvenskanaler för ett radiosystem utsatt av interferens från samtliga bataljoner för sex frekvenshopp per paket.

För varje kommunikationslänk och störande länk användes en stokastisk kanalmodell [8] med både storskalig och småskalig fädning. Endast den småskaliga fädningen varierades över ett sänt paket, där varje frekvenshopp utsattes för oberoende realiseringar av den småskaliga fädningen. Två olika terrängar, vilka påverkar den storskaliga fädningen, har undersökts. En platt terräng i Östergötland och en kuperad i Jämtland. Terrängen i Jämtland ger en något högre paketfelshalt [4] och är den terräng som användes för resultaten som presenteras nedan. För att bestämma om ett paket kunde tas emot, användes en mottagarmodell baserad på uppnåelig datatakt. Den modellen inkluderar också radiosystemparametrar. I studien antogs typiska radiosystemparametrar, såsom modulationen QPSK och en felrättande kod med takt 1/2, vilket ger en signaleringshastighet av 1 bit/s/Hz.

Slutligen är alla resultat som visas i kapitlet framtagna för sex frekvenshopp per paket och för aktivitetsfaktorn 100 procent, dvs. alla radionät sänder hela tiden. I praktiken är aktivitetsfaktorn oftast lägre vilket leder till färre interferenser och lägre paketfelshalter.

3.2 Paketfelshalt orsakad av frekvenskonflikter

I detta avsnitt visas resultat från synkron interferens, men även asynkron interferens har analyserats i [4, 7]. Asynkron interferens uppkommer när radionäten inte är synkroniserade, alternativt använder olika radiosystem med olika ramlängder och hopptakter. Slutsatserna beror på flera antaganden och parametrar, och i analyserna har det bland annat antagits ett krav på paketfelshalten 1 % vid full belastning. Utan interferens orsakad av utombandsegenskaper är paketfelshalten för hög i scenariot med den kompakta brigadytan, medan den är acceptabel i den stora brigadytan om minst 400 frekvenser används, se figur 3.2. Denna slutsats baseras på medelvärden över alla länkar, men det är främst de långa länkarna som drabbas medan de korta länkarna har en betydligt lägre paketfelshalt. Asynkron störning kan eventuellt leda till högre paketfelshalter än synkron störning, men tidigare resultat [5, 6] visar på att det bara inträffar i vissa specialfall. Det vill säga, i medel blir inte paketfelshalten högre med asynkron än med synkron störning. Då radionät med olika hopptakter stör varandra så störs det radionät med högre hopptakt mera av det med lägre hopptakt än vice versa. Interferens från snabbare frekvenshoppande radiosystem inträffar oftare men med kortare varaktighet i jämförelse med system av samma eller långsammare hopptakt, vilket visar sig vara lättare att hantera [5, 6].



Figur 3.3: Paketfelshalt som funktion av antalet tillgängliga frekvenskanaler för ett radiosystem som drabbas av interferens från enbart den egna bataljonen på grund av utombandseffekter för 4, 6, 8 och 12 frekvenshopp per paket.

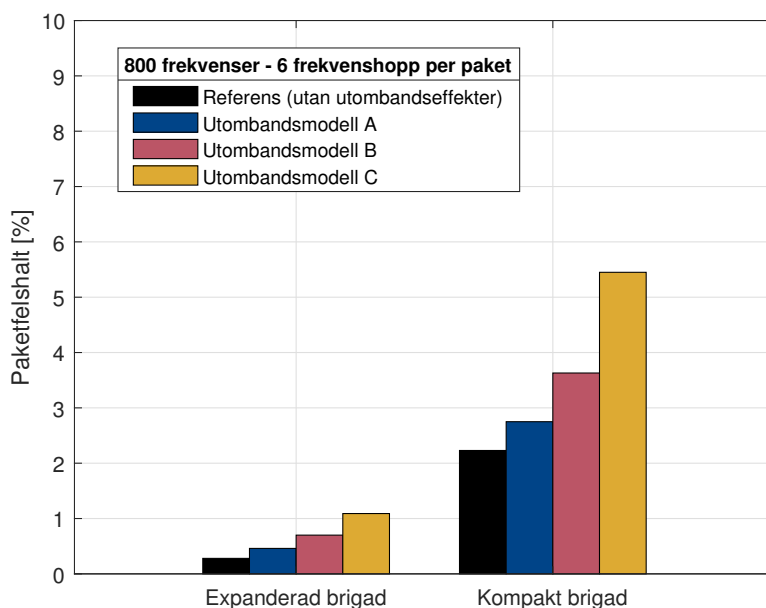
3.3 Paketfelshalt orsakad av utombandsegenskaper

I detta avsnitt inkluderas interferenser orsakade av utombandsegenskaperna hos sändare och mottagare i analyserna. I detta avsnitt ges en sammanfattning av resultaten, men en mer utförlig redovisning av ges i [7]. Hur stor sidobandsundertryckningen är får stor betydelse. Tre olika modeller för sidobandsundertryckningen har undersökts, se tabell 3.1. Modell B har mindre dämpning i de tre närmaste grannkanalerna jämfört med Modell A. Modell C har ännu sämre dämpning i de två närmaste grannkanalerna, men i kanaler längre bort är dämpningen bättre än både Modell A och Modell B. Om endast interferenser från egna bataljonen på grund av utombandseffekter inkluderas fås resultaten i figur 3.3. Figuren visar den paketfelshalt som uppstår på grund av interferensbidraget från den egna bataljonen, för 4, 6, 8 respektive 12 frekvenshopp per paket för terrängen i Jämtland. Notera att då radionäten är ortogonala inom bataljonen fås inga direktträffar utan det är endast utombandsegenskaperna som orsakar interferenser. Det är framförallt undertryckningen i grannkanalen som är viktig (vilken är 40 dB med modell A). Paketfelshalten är relativt låg med sidobandsundertryckning enligt modell A men betydligt högre med sidobandsundertryckning enligt modell C. Resultaten indikerar att närmaste grannkanalen inte bör användas om inte undertryckningen är minst 40 dB.

För paketfelshalt orsakad av hela brigadens utombandsegenskaper illustreras resul-

Tabell 3.1: Dämpning i grannkanaler för tre olika utombandsmodeller.

Kanalseparation	Sidobandsundertryckning [dB]		
	Modell A	Modell B	Modell C
0	0	0	0
1	40	30	20
2	60	50	45
3	70	60	70
4	70	70	80
5	70	70	120
6 eller mer	≥ 70	≥ 70	≥ 120



Figur 3.4: Jämförelse av paketfelshalter på grund av frekvenskonflikter och utombandsegenskaper i de två brigadområdena för 800 tillgängliga frekvenskanaler och sex frekvenshopp per paket.

taten i figur 3.4, för 800 tillgängliga frekvenskanaler och sex frekvenshopp per paket för de två brigadområdena. Notera att aktivitetsfaktorn i fallet är 100 %. En halvering av aktiviteten motsvarar en dubbling av antalet tillgängliga frekvenskanaler, så om exempelvis 400 frekvenskanaler använts med 50 % aktivitet skulle det motsvara situationen med 800 frekvenskanaler och 100 % aktivitet. Om vi antar att upp till en procents paketfelshalt kan tillåtas så visar resultaten i figuren att paketfelshalterna är acceptabla för den expanderade brigaden, men inte för den kompakta brigaden.

3.4 Slutsatser

Samexistens mellan frekvenshoppande smalbandiga taktiska radionät har undersökts inom arbetet. Konsekvenser på grund av frekvenskonflikter kan innebära försämrad prestanda. Andelen paketfel minskar i regel med fler tillgängliga frekvenskanaler, fler frekvenshopp per informationspaket, större avstånd mellan sändande noder eller färre aktiva radionät per bataljon. Analysen av asynkrona radionät visar på att den genomsnittliga paketfelshalten blir lägre än i det synkrona fallet. Då radionäten modelleras med olika frekvenshoppaktar visas det i de fall som undersökts att ett radiosystem som utsätts för interferens från system med långsammare hopptakt påverkas mer än om de interfererande systemen har snabbare hopptakt. Med inkluderande av utombandsegenskaper visar resultaten att interferens från den egna bataljonen på grund av frekvenskonflikter i regel inte kan ignoreras, och tillsammans med frekvenskollisioner på grund av icke-ortogonalitet mellan radionäten riskerar att ha stora konsekvenser för radiosystemens prestanda. I vissa situationer kan frekvensseparationen mellan radionät behöva ökas eller frekvenstilldelningen anpassas för att motverka den typen av interferens.

4 Adaptiv effektanvändning

Vid samutnyttjande av frekvenser mellan radionät finns risk för störning mellan radionäten. Ett sätt att minska risken för egenstörningar är att anpassa sin egen uteffekt för att minska störningar till angränsande radionät. Syftet är att utvärdera möjligheten att använda effektregering som metod för att minska störning mellan radionät och samtidigt utvärdera hur upptäckts sannolikheten för en signalspanare påverkas. I detta avsnitt ges en sammanfattning av studien. En mer utförlig beskrivning finns i [9].

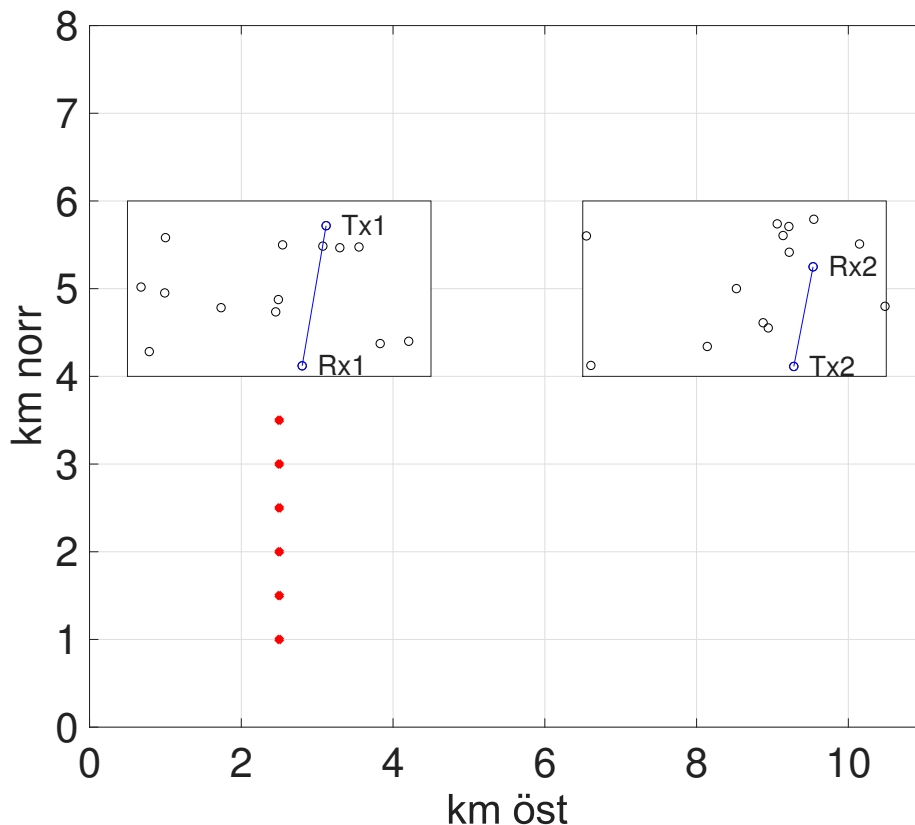
4.1 Metod och antaganden

Ett scenario antagits bestående av två radionät för att simulera störningseffekterna orsakade av närliggande radionät. Vardera radionät är frekvenshoppande och hoppar över samma mängd av frekvenskanaler, varvid frekvenskollisioner kan uppstå mellan radionäten. Frekvenskanalerna som används har 50 kHz bandbredd. Vidare har det antagits att radiosystemen är fordonsmonterade, därav används en antennhöjd om 3 m, samt en maximal effekt på 50 W.

I båda radionäten väljs slumpmässigt en nod till sändare (Tx) och en annan till mottagare (Rx), vilket utgör en länk, inom ett 4×2 km stort område. Vardera länk frekvenshoppar över en sekvens av frekvenser för att skicka ett paket. Om båda radionäten använder samma frekvens under samma del av sekvensen stör länkarna varandra. Är så inte fallet upplever länkarna ingen störning. En stokastisk kanalmodell används för att modellera utbredningen mellan sändaren och mottagaren. Sändareffekten väljs utifrån den information som finns tillgänglig för sändaren. Den uppnåeliga datatakten beräknas vid mottagaren som funktion av signalstyrka och störning för att avgöra om paket kommer fram. Paketfelshalten används som metrik för att avgöra hur väl länkarna fungerar.

Smygförmågan utvärderas i termer av upptäckts sannolikhet. Upptäckts sannolikheten utgörs av risken att en signalspanare kan upptäcka en sändare i radionätet. Signalspanaren befinner sig på varierande avstånd från mitten av bataljonsytan. Kanalen mellan sändare och signalspanare modelleras på samma sätt som för länkarna. Om signalstyrkan som når signalspanaren från en sändning är tillräckligt stark blir den upptäckt. Figur 4.1 visar scenariot i sin helhet, där Tx1 och Tx2 är sändare, medan Rx1 och Rx2 är mottagare i respektive radionät. De svarta cirklarna i bataljonsområdena är radionoder, medan de röda prickarna nedanför bataljonsområdet är signalspanare. Paketfelshalt och upptäckts sannolikhet utvärderas för varierande avstånd mellan radionäten och antal delade frekvenskanaler.

Den stokastiska kanalmodellen [8] tar hänsyn till både storskalig och småskalig fädning. Den storskaliga fädningen tar hänsyn till terrängberoende skuggfädningsfenomen. I studien används parametrar för kanalmodellen som representerar en öppen plan terräng i Östergötland. En mer kuperad terräng ger större variationer i dämpningen. Den småskaliga fädningen (modelleras med en rayleighfördelning) orsakas av flervägskomponenter som summeras vid mottagaren. Eftersom avstånden är långa och antennhöjderna låga antas ingen fri sikt mellan antennerna. Det är endast flervägskomponenter som når mottagaren. Dämpningen orsakad av småskalig fädning antas vara frekvenssektiv och varierar därmed mellan frekvenshopp, till skillnad från den storskaliga fädningen som är konstant över ett helt paket.



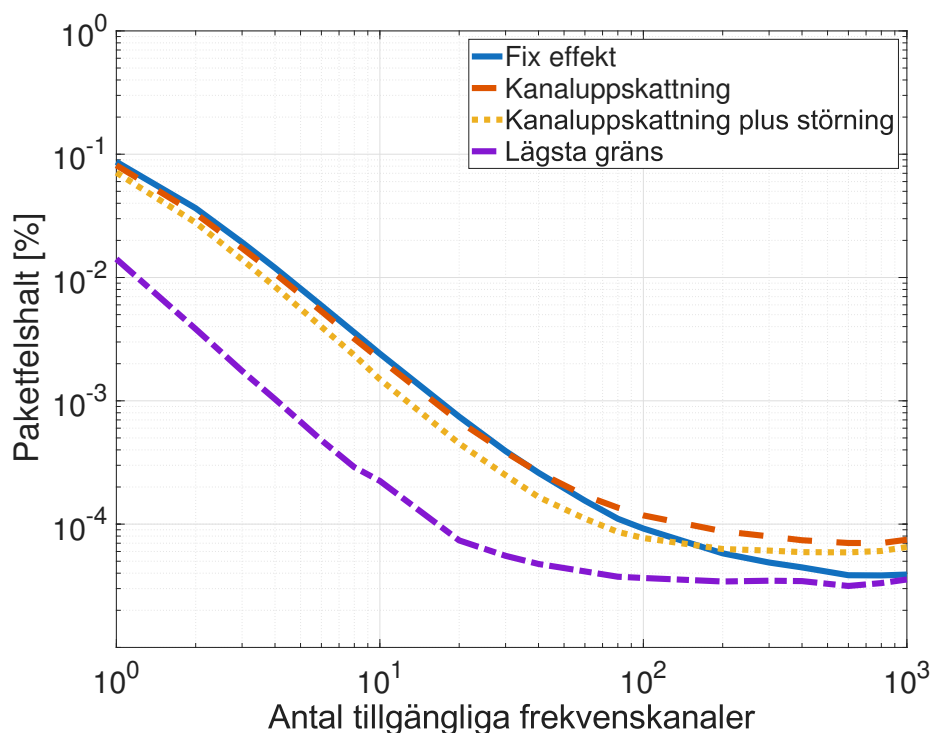
Figur 4.1: Scenario med två radionät där svarta cirklar utgör radionoder. De slumpmässiga sändarna och mottagarna är markerade med Tx respektive Rx. Röda prickar symboliserar signalspannare.

4.2 Utvärderade effekterregleringsmetoder

Fyra effekterregleringsmetoder utvärderas:

- Fix effekt, använder alltid 50 W oberoende av kanal eller störning.
- Lägsta gräns, använder den lägsta effekten som är teoretiskt möjligt för att uppfylla kapacitetskravet för länken. I praktiken är detta svårt eftersom utbredningsdämpningen i förväg måste estimeras exakt så att uteffekten uppfyller minimikravet på mottagen signalstyrka. Resultatet från metoden är fortsatt intressant då de andra undersökta metoderna kan komma olika nära den lägsta gränsen.
- Kanaluppskattning, antar att den storskaliga fädningen kan uppskattas perfekt. Därmed kan sändaren anpassa uteffekten med dämpningsfaktorn, orsakad av skuggning, så att kravet på mottagen signalstyrka uppfylls. Då den småskaliga fädningen fortsatt är okänd görs även ett effektpåslag för att ha en effektmarginal som skyddar mot variationer i kanalen. Storleken på effekttökningen anpassas för att ge en förutbestämd felsannolikhet när länken existerar utan störning. Är risken för störning liten konvergerar då paketfelshalten mot den valda felsannolikheten.
- Kanal- plus störningsuppskattning, där kanaluppskattnings-metoden utvidgas med en uppskattning av störningen från det andra radionätet. För denna metod antas det att ledningsstödsystemet distribuerar nodernas positioner mellan närliggande radionät. Därmed kan avståndet till närliggande sändare användas för att uppskatta störningen.

I alla simuleringar antas att båda radionäten använder samma metod för att effekterreglera.

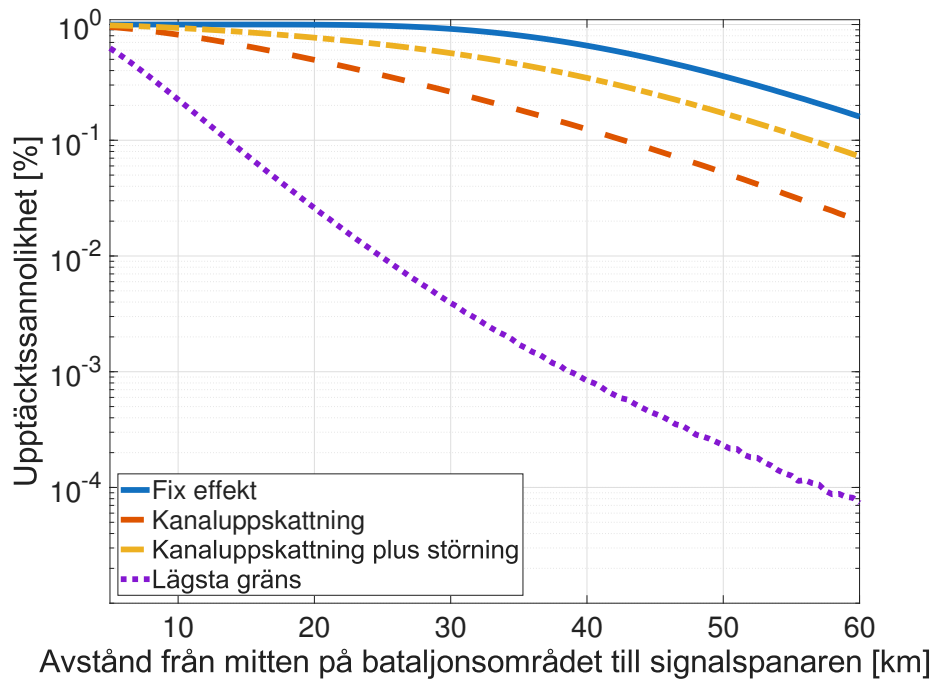


Figur 4.2: Paketförlust beroende av antalet tillgängliga frekvenskanaler när avståndet mellan radionäten är 6 km.

4.3 Resultat

I figur 4.2 visas paketförlusten som funktion av antalet tillgängliga frekvenskanaler för scenariot när avståndet mellan bataljonsområdena är 6 km. Lägsta gräns-metoden uppnår, som förväntat, lägre paketförlust än de andra metoderna. Övriga metoder har liknande prestanda i termer av paketförlust. Den resulterande uteffekten för kanaluppskattningsmetoden är i medel 10 W. Sätts detta i relation till fix effekt-metoden som använder 50 W blir det tydligt att effektanvändningen kan sänkas utan förluster i prestanda. Lägsta gräns metoden använder 1 till 0,13 W beroende på antalet frekvenskanaler, vilket visar på stor möjlighet till förbättring även om det i praktiken är svårt att uppnå. När många frekvenskanaler är tillgängliga är risken för störning låg. Att adaptivt välja uteffekt påverkar då störningen betydligt mindre. Det blir då bättre att välja en hög uteffekt som tar höjd för kanalens variationer, än att välja en lägre för att minska störningen. Kanaluppskattnings-metoderna konvergerar mot en felsannolikhet som antas vara acceptabel när ingen störning sker.

Sänkningen av uteffekt har även påverkan på smygförmågan. Figur 4.3 visar upptäckts sannolikheten som funktion av avståndet till signalspanaren. Sannolikheten att en sändning med fix effekt upptäcks av en signalspanare på 40 km avstånd blir drygt 50%. På samma avstånd minskar risken för att bli upptäckt till drygt 10% för sändare som använder kanaluppskattningsmetoden. Vidare är upptäckts sannolikheten 50% för en signalspanare på 15 km avstånd, när sändaren använder kanaluppskattningsmetoden. Det innebär att en signalspanare behöver ta sig 25 km närmare ett bataljonsområde där kanaluppskattningsmetoden används istället för fix effekt, för att bibehålla samma upptäcktsförmåga.



Figur 4.3: Upptäckts sannolikhet beroende av avståndet till signalspannare då det är 6 km mellan radionät som delar 10 frekvenskanaler.

4.4 Slutsatser

Resultaten visar att adaptiv effektanvändning kan användas för att minska uteffekten men bibehållen paketfelshalt. Den lägsta gränsen visar att det är möjligt att även paketfelshalten skulle kunna förbättras med andra adaptiva effektregeringsmetoder än vad som här har undersökts. Det finns möjlighet att ytterligare förbättra prestandan genom att minska störningsnivåerna, men detta kan vara svårt i praktiken. En annan fördel som erhålls av att adaptivt sänka sin ut effekt är att upptäcktsavstånden för en signalspannare reduceras. Det gör att signalspannaren måste ta större risker genom att gruppera närmare det den ska spana på.

Den antagna modellen inkluderar dock inte några utombandsegenskaper. Även om sådan störning normalt är svagare än störning på samma frekvensband, är risken att påverkas av utombandsegenskaper större, eftersom det räcker att en närliggande frekvenskanal är i bruk. Störningsrisken ökar dessutom med antalet närliggande radionät. Det skulle därför vara värdefullt att vidareutveckla scenariot genom att även beakta utombandsegenskaper och ett större antal radionät.

5 Flexibel frekvenshantering

Två intilliggande nät som använder sig av samma frekvenser kan störa varandra. Ett sätt att undvika denna störning är att de två näten får dela upp tillgången till frekvenser sinsemellan. Detta behöver övervägas med den datataktförlust och sårbarhet för avsiktlig störning en sådan reducering av frekvenser leder till.

5.1 Föreslagen frekvensvalsmetod

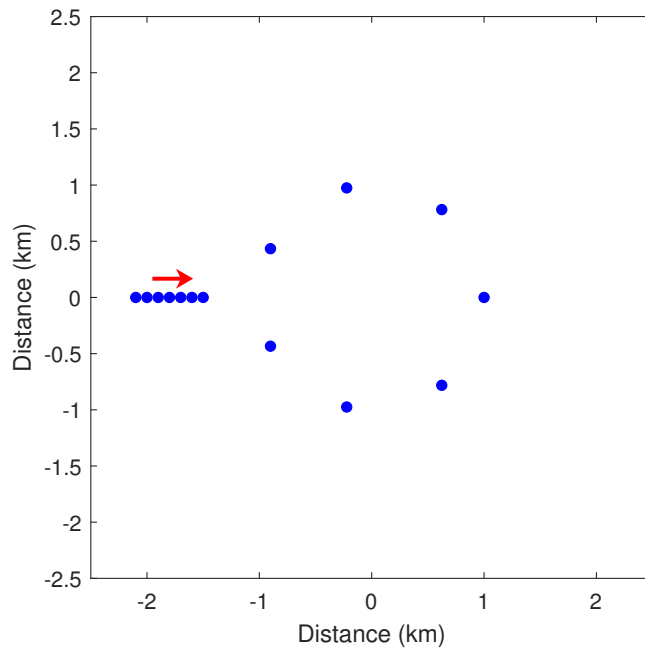
En metod för att flexibelt fördela om frekvenserna mellan näten har tagits fram och studerats. För metoden har beslutsvillkoren signal-till-interferens-och-brus-förhållandet (eng. Signal to Interference plus Noise Ratio, SINR), minsta avstånd mellan näten, total kapacitet och andel paket som tas emot korrekt (eng. Packet Delivery ratio, PDR) studerats. Minsta avstånd mellan näten och minsta SINR ger en grov uppskattning av hur nära näten är. Med beslutsvillkoren minsta avstånd mellan näten och minsta SINR tas hänsyn till de noder som har värsta störningarna, men ingen hänsyn tas till störningar i övriga noder. Studeras istället den totala kapaciteten i näten så tas hänsyn till alla noder i näten. Problemet med att betrakta total kapacitet är att det inte tas någon hänsyn till hur störningarna är fördelade bland noderna. Detta kan leda till att noder tolereras att bli helt utstörda när de kunde räddats genom att det störande nätet offrat en andel frekvenser. Generellt sett finns två faktorer som tenderar att avgöra hur bra ett nät anses vara, dels hur bra noderna är sammanlagt i näten och dels hur bra de mest utsatta delarna av näten presterar.

Prestandamått i analysen är andel paket som tas emot korrekt medelvärdesbildat. Detta beräknas som ett genomsnitt över alla sändande noder i näten per tidsenhet. Frekvenser som tagits bort från frekvenspoolen ses analytiskt som frekvenser som fortfarande används men aldrig bär någon information. På så sätt bestraffas en reduktion av frekvenspoolen. PDR:n tas fram baserat på förkalkylerade länkdämpningar uträknade i programmet Detvag.

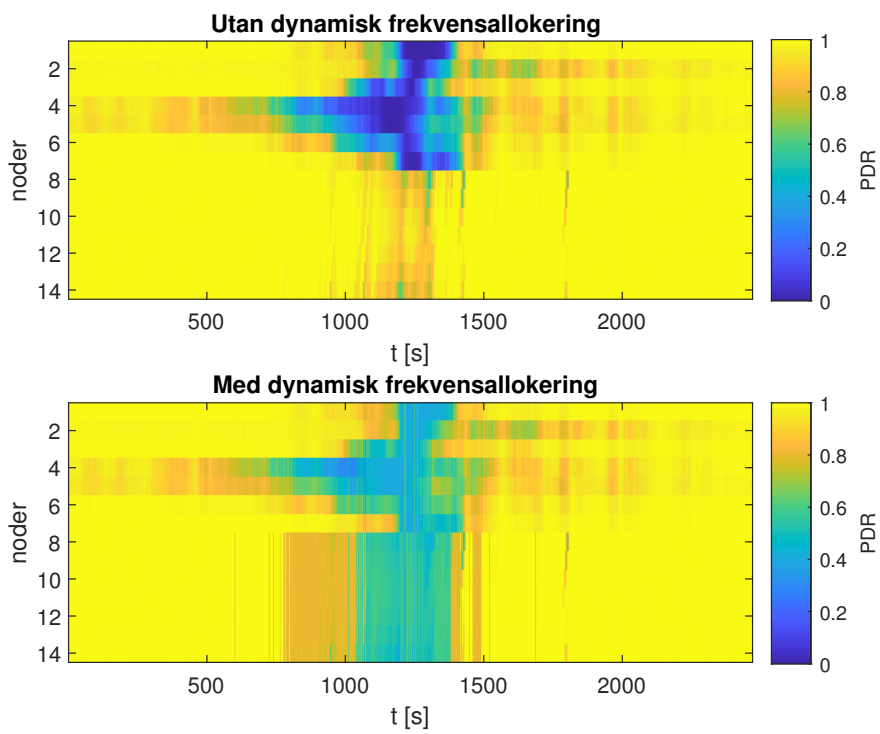
För en sammanvägd bedömning av näten har vi som metod valt att betrakta p -normen av nodernas paketfelshalt. En önskvärd egenskap hos p -normen är att en genomgående försämring av nodernas datatakt leder till en ökning av p -normen för felet. En annan önskvärd egenskap är att p -normen bestraffar en total datataktförlust mer om den förlusten skett i ett fåtal noder jämfört med att felet fördelats ut över en större mängd noder. I grunden är nätets kvalitet subjektiv och beror på hur en värderar att felet är koncentrerat i ett fåtal noder kontra utspritt bland ett stort antal noder. Parametern $p \geq 1$ kan justeras så att p -normen tar den hänsyn till fördelningen av felet som önskas. Med växande p så blir p -normen alltmer bestraffande avseende ojämlikheter i näten, från att vid $p = 1$ endast ta hänsyn till summan av felet till då $p = \infty$ endast ta hänsyn till den sämsta noden. p -normen är konvex vilket potentiellt öppnar möjlighet att använda vissa optimeringsalgoritmer.

5.2 Resultat

Ett förenklat scenario (figur 5.1) har använts för att utvärdera metoden med olika beslutsvillkor. Scenariot består av två nät med 7 noder vardera. Noderna i ett av näten står stilla i en gles cirkel med radie 1 km och det andra nätet är en 600 meter lång kolonn som rör sig mot, igenom, och förbi cirkelnätet. Därtill har vi ett antagande om att en nod sänder per tidsenhet och frekvens. Antalet noder som sänder per tidsenhet är alltså proportionellt mot antalet frekvenser som nätet använder.



Figur 5.1: Nodernas placering i de två näten, strax innan kolonn-nätet nåt fram till cirkel-nätet. Kolonnen befinner sig 25 km bort från origo i början av scenariot.



Figur 5.2: PDR över tid och noder. De övre 7 noderna i respektive bild tillhör cirkelnätet, resterande 7 tillhör kolonn-nätet. Näten samsas om en gemensam resurs med 5 frekvenser.

Figur 5.2 visar PDR för varje nod över simuleringstiden i hela scenariot, då båda näten använder antingen samtliga fem frekvenser samtidigt (överst) eller då frekvensanvändningen är flexibel genom optimering av p -normen (nederst). Figur 5.2 visar hur frekvensallokering kan resultera i en reduktion av helt utstörda noder. Metoden som använts är optimering med avseende på p -normen där $p = 2,8$. Det glesa cirkelnätet får kraftiga störningar när kolonn-nätet passerar igenom. Detta motverkas genom att kolonn-nätet successivt reducerar antalet frekvenser. Även cirkelnätet reducerar sina frekvenser. I mitten av scenariot är frekvenspoolen helt uppdelad med 3 frekvenser tilldelade till kolonn-nätet och 2 till cirkelnätet. Frekvenserna återfås sedan successivt när näten rör sig ifrån varandra.

5.3 Slutsatser

Utvärderingen av metoden i det förenklade scenariot visar på att principen fungerar. Vid tidpunkten då båda näten befinner sig inom samma område delas frekvenserna mellan näten för att undvika konflikter. Båda näten fungerar vid det tillfället på bekostnad av att det ena nätet kan skicka färre paket. Med den här typen av metod kan större risker för frekvenskonflikter tas i frekvensplaneringen eftersom metoden som hanterar frekvenskonflikterna när de uppstår. Metoden och beslutsvillkoren behöver fortsättningsvis vidare utvecklas och utvärderas för större scenarion, med flera nät, noder och frekvenser.

6 Resultatspridning

F4R-projektet har årligen arrangerat en tvådagars workshop till vilken representanter från Försvarmakten, FMV och FRA bjudits in. De tre workshopparna var uppskattade av deltagarna och välbesökta med mellan 65 och 101 personer [10–12]. Syftet med workshopparna har varit att

- sprida och tydliggöra projektets forskningsresultat
- skapa ett forum för informationsutbyte mellan myndigheterna
- bidra till ökad kompetens och medvetenhet om spektrumanvändning.

På workshopparna har FOI, FMV och FM gett presentationer kring pågående arbete och forskningsresultat. Presentationerna har genererat intressanta frågor och diskussioner mellan deltagarna. Under pauserna har det varit många diskussioner mellan deltagarna och nya kontakter skapades.

I senaste workshoppen breddades innehållet till att inkludera forskningsresultat inom robust radiokommunikation som även omfattar verksamhet utanför FoT-projektet F4R. I fortsättningen planeras det för att fortsätta med den breda omfattningen. Workshoppen kommer fortsätta att arrangeras av det efterföljande FoT-projektet.

Utöver workshoppen har projektets forskningsresultat dokumenterats i FOI-rapporter och i bidrag på vetenskapliga konferenser med peer-review granskning. En lista på publikationer från projektet återfinns i appendix A.

7 Projektets frågeställningar

En växande försvarsmakt innebär personella och materiella satsningar inom flertalet områden däribland ledningsområdet. Detta medför både nya och en större mängd radiosystem med olika förmågor. Radiosystem kommer att användas i större utsträckning än tidigare för trådlös överföring av information och styrning av obemannade system. Sammantaget kommer det att innebära ökad användning av det elektromagnetiska spektrumet, vilket fortsatt kommer vara en begränsad resurs och konkurrensutsatt av kommersiella intressen. För att hantera denna situation behöver det elektromagnetiska spektrumet användas effektivt.

Tidsdimensionen spelar en viktig roll för hur effektivt frekvensspektrumet kan användas. I många fall sker planering och fördelning av frekvenser med relativt lång tidshorisont, vilket begränsar möjligheterna att anpassa användningen efter förändrade behov och förutsättningar. För att förbättra spektrumeffektiviteten genom ökad flexibilitet krävs mekanismer som möjliggör mer frekventa justeringar av frekvensanvändningen. Det finns forskning kring radiosystem som autonomt växlar frekvens från en tidlucka till nästa baserat på exempelvis tillgänglighet och interferensnivåer. Denna typ av realtidsallokering representerar dock ett ytterläge som är svårt att realisera i dagens taktiska radiosystem. För att effektivisera frekvensanvändning för dagens militära radiosystem bör fokus vara på att möjliggöra mer frekventa justeringar av frekvensanvändningen än idag, men inte på så kort tidshorisont som mellan enstaka tidluckor. Nedan besvaras de frågeställningar som varit styrande inom projektet.

Hur kan radiosystems tillgängliga frekvensutrymme användas flexibelt för att säkerställa samband när det behövs och där det behövs för militära operationer?

En grundförutsättning är att radiosystem och radionät kan omkonfigureras med nya frekvenstabeller under pågående operation. Omkonfigurationen kan antingen initieras av radiosystemet själv eller med manuella metoder. I båda fallen är analyser av riskerna för, och konsekvenserna av, frekvenskonflikter beslutsunderlag för när frekvensbyten ska ske. Dessa frekvenskonflikter kan uppstå med andra radiosystem, t.ex. närliggande förband eller fasta radiosystem, men även med motståndarens telekrigsinsatser. Detta ställer krav på att det finns en aktuell lägesbild över spektrumanvändningen. Lägesbilden bör visa egna förbands radiosystem och telekrigsinsatser samt fiendens telekrigsinsatser och radiosystem för det aktuella området. Lägesbilden över spektrumanvändningen behöver innehålla information om förbands positioner och vilka frekvenser som används vid vilken tidpunkt. Denna information är även fienden intresserad av, varför informationen behöver skyddas på lämpligt sätt. Hur den elektromagnetiska lägesbilden ska skapas, lagras, skyddas, distribueras och visualiseras kräver fortsatt arbete.

Utgående från en elektromagnetisk lägesbild med information om noders position och frekvensanvändning bör det finnas kvalitativa mått för att indikera när det är fördelaktigt att fördela om frekvenser mellan radionät för att uppnå bästa möjliga prestanda. Samma typ av mått kan även användas i ett planeringsskede för att avgöra om en planerad frekvensanvändning innebär reducerad prestanda för någon nod. Den geografiska återanvändningen av frekvenser kan då ökas eftersom måttet indikerar risk för reducerad prestanda och åtgärder kan därmed vidtas för att reducera riskerna.

Eventuella begränsningar av radiosystems frekvensområden som introduceras vid integration av radiosystem på plattformar måste noggrant övervägas. Begränsningar inför exempelvis av filterlösningar som används för att uppnå samexistens mellan flera radiosystem på en och samma plattform eller då antennen har ett begränsat frekvensområde. Detta leder till att radiosystemets frekvensflexibilitet reduceras.

Hur kan spektrum samutnyttjas inom Försvarmakten samt med civila aktörer och internationella samarbetspartners?

Samutnyttjande av spektrum inom Försvarmakten och med andra aktörer kan ske genom geografisk återanvändning av frekvenser eller tidsdelning mellan radiosystem, men även genom att använda civila trådlösa transmissionslösningar som exempelvis 5G. Vid stora avstånd mellan radionät är geografisk återanvändning att föredra, medan för små avstånd mellan radionäten är tidsdelning fördelaktigt [13]. Användning av 5G innebär att flera olika frekvensområden kan användas och även samutnyttjas med civila användare, detta hanteras automatiskt med inbyggda funktioner i 5G-systemet.

Samutnyttjande av frekvensspektrum mellan Försvarmaktens radiosystem ställer krav på att det finns metoder för att snabbt ändra frekvenstilldelningar för radiosystemen samt att radiosystemen är frekvensflexibla. Om samutnyttjande av frekvenser sker mellan olika radiosystemtyper ökar komplexiteten eftersom radiosystemen kan skilja sig åt med avseende på exempelvis kanalbandbredd, uteffekt, räckvidd, tålighet mot störning och accessteknik. Detta gör att risken för att systemen oavsiktligt stör varandra blir asymmetrisk, dvs. ett radiosystem kan vara relativt opåverkat av störning från det andra systemet, medan det andra systemet störs kraftigt av det första. Därför behövs automatiska funktioner i en elektromagnetisk lägesbild som kan varna för frekvenskonflikter mellan radiosystem.

Samutnyttjande av spektrum med andra nationers försvarsmakter och civila aktörer ökar komplexiteten ytterligare på grund av utomstående aktörer som inte Försvarmakten har rådighet över. Detta påverkar tidsperspektivet av frekvenstilldelningarna, det kommer att vara långsammare med utomstående aktörer. En lägesbild avseende användningen av det elektromagnetiska spektrumet kommer fortfarande vara av betydelse. Gemensamma kommunikationsprotokoll, exempelvis 5G eller Nato-standarder, underlättar samutnyttjande av spektrum och interoperabilitet mellan aktörer.

8 Slutsatser

Samutnyttjande av frekvenser mellan taktiska radionät kan innebära försämrad prestanda på grund av frekvenskonflikter. Andelen paketfel minskar med fler nyttjade frekvenskanaler och med felrättande kodning över fler frekvenshopp. Vid samlokalisering av radionät med olika frekvenshopptakter påverkas det radiosystem som utsätts för interferens från system med långsammare hopptakt mer än vice versa. På grund av sändares och mottagares utombandsegenskaper kan interferens inom ortogonala radionät inte ignoreras, och tillsammans med frekvenskollisioner mellan radionät riskerar detta att ge negativa konsekvenser för radiosystemens prestanda. I vissa situationer kan frekvensseparationen mellan radionät behöva ökas eller frekvenstilldelningen anpassas för att motverka förstörande interferens.

Ett sätt att minska energianvändning, risken för interferens mellan och inom radionät samt upptäcktsrisken är att reglera uteffekten adaptivt. Analyser av två interfererande radionät visar att frekvenshoppande radionät har liknande prestanda vid adaptiv effektregering som vid fix, maximal uteffekt. En fördel med adaptiv effektregering är att upptäcktsavstånden för en signalspanare kan reduceras.

Ett annat sätt att undvika interferens är att radionäten flexibelt delar upp tillgängliga frekvenser sinsemellan. Vid uppdelning av frekvenser behöver övervägas den eventuella datataktförlust som reduktion av antalet använda frekvenser kan leda till. Utvärdering av frekvensvalmetoder, baserade på andel korrekt mottagna paket, visar på att den föreslagna principen fungerar. Vid en tidpunkt då båda radionäten befinner sig inom samma område delas frekvenserna mellan radionäten för att undvika frekvenskonflikter. Metoden och beslutsvillkoren behöver utvecklas och utvärderas för större scenarion, med fler radionät, noder och frekvenser.

En elektromagnetisk lägesbild är nödvändig för att samutnyttja spektrum i större utsträckning. Utifrån lägesbilden kan då metoder användas för att flexibelt dela upp frekvenser sinsemellan som annars riskerar att orsaka frekvenskonflikter. En elektromagnetisk lägesbild kommer också att underlätta arbetet med att identifiera outnyttjat spektrum. Lägesbilden ger även information om hur mycket egna förband syns i det elektromagnetiska spektrumet hos fienden. Hur den elektromagnetiska lägesbilden ska skapas, lagras, skyddas, distribueras och visualiseras kräver fortsatt arbete.

Referenser

- [1] P. Eliardsson, E. Axell, K. Hägglund, P. Johansson, G. Eriksson och J. Nilsson, "Effektivare frekvensanvändning för försvarsmaktens radiokommunikationssystem - Slutrapport," Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI-R--5384--SE, maj 2022.
- [2] P. Eliardsson, E. Axell, K. Hägglund och G. Bark, "Flexibel frekvensanvändning för försvarsmaktens radiosystem - omvärldsbevakning," Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI-R--5601--SE, maj 2024.
- [3] K. Hägglund, J. Nilsson och G. Eriksson, "Analysis of link performance degradation in military networks," *International Conference on Military Communications and Informations Systems (ICMCIS)*, okt. 2023.
- [4] —, "Analysis of link performance degradation from interferences in military networks," Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI-D--1191--SE, 2022.
- [5] —, "Samexistens mellan smalbandiga taktiska radionät," Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI-R--5681--SE, 2024.
- [6] —, "Link performance degradation from frequency-hop collisions in asynchronous military networks," *International Conference on Military Communications and Informations Systems (ICMCIS)*, okt. 2024.
- [7] —, "Samexistens mellan smalbandiga taktiska radionät - utombandsegenskaper och störning," Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI-R--5858--SE, 2025.
- [8] J. Nilsson, K. Fors, P. Holm, G. Eriksson och Å. Waern, "Underlag för kravställning av radiosystem på plattformar," Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI-R--3699--SE, juni 2013.
- [9] J. Nordin, "Adaptive power control in frequency hopping VHF networks to reduce inter-network interference," Linköpings universitet, Examensarbete, kommande publikation.
- [10] P. Eliardsson, "Redovisning av genomförd workshop inom fot-projektet flexibel frekvensanvändning för försvarsmaktens radiosystem (F4R)," Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI Memo 8267, 2023.
- [11] —, "Redovisning av genomförd workshop inom fot-projektet flexibel frekvensanvändning för försvarsmaktens radiosystem (F4R)," Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI Memo 8590, 2024.
- [12] —, "Redovisning av genomförd workshop inom fot-projektet flexibel frekvensanvändning för försvarsmaktens radiosystem (F4R)," Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI Memo 8997, 2025.
- [13] P. Eliardsson, P. Johansson och E. Axell, "Radiospektrum i markarenan – Geografisk återanvändning och bredbandigt frekvenshopp," Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI-R--5743--SE, april 2025.

A Projektets publikationer

FOI Rapporter och memon

- Patrik Eliardsson, Erik Axell, Kristoffer Hägglund, Jan Nilsson, Jonathan Andersson, John Nordin “Flexibel frekvensanvändning för Försvarmaktens radiosystem - Slutrapport”, FOI-R--5839--SE, 2025.
- Kristoffer Hägglund, Jan Nilsson, Gunnar Eriksson, “Samexistens mellan smalbandiga taktiska radionät - utombandsegenskaper och störning”, FOI-R--5858--SE, 2025.
- Patrik Eliardsson, “Redovisning av genomförd Workshop inom FoT-projektet Flexibel frekvensanvändning för Försvarmaktens radiosystem (F4R)”, FOI Memo 8997, 2025.
- Kristoffer Hägglund, Jan Nilsson, Gunnar Eriksson, “Samexistens mellan smalbandiga taktiska radionät”, FOI-R--5681--SE, 2024
- Patrik Eliardsson, “Redovisning av genomförd Workshop inom FoT-projektet Flexibel frekvensanvändning för Försvarmaktens radiosystem (F4R)”, FOI Memo 8590, 2024.
- Patrik Eliardsson, Erik Axell, Kristoffer Hägglund, Gunnar Bark, “Flexibel frekvensanvändning för Försvarmaktens radiosystem - Omvärldsbevakning”, FOI-R--5601--SE, 2024.
- Patrik Eliardsson, “Redovisning av genomförd Workshop inom FoT-projektet Flexibel frekvensanvändning för Försvarmaktens radiosystem (F4R)”, FOI Memo 8267, 2023.

Vetenskapliga publikationer

- Kristoffer Hägglund, Jan Nilsson, Gunnar Eriksson, “Link Performance Degradation from Frequency-Hop Collisions in Asynchronous Military Networks”, *International Conference on Military Communications and Information Systems (ICMCIS)*, 2025.
- Kristoffer Hägglund, Jan Nilsson, Gunnar Eriksson, “Analysis of Link Performance Degradation from Interferences in Military Networks”, *International Conference on Military Communications and Information Systems (ICMCIS)*, 2023.
- Gunnar Eriksson, Erik Axell, “Physical Limits for In-Band Full Duplex in Frequency-Hopping Tactical Radio Systems”, *International Conference on Military Communications and Information Systems (ICMCIS)*, 2023.



FOI
Totalförsvarets forskningsinstitut
164 90 Stockholm

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

www.foi.se