



Samexistens mellan smalbandiga taktiska radionät

KRISTOFFER HÄGGLUND, JAN NILSSON OCH
GUNNAR ERIKSSON

Kristoffer Hägglund, Jan Nilsson och Gunnar Eriksson

Samexistens mellan smalbandiga taktiska radionät

Titel	Samexistens mellan smalbandiga taktiska radionät
Title	Co-existence of narrowband tactical radio networks
Rapportnr / Report No.	FOI-R--5681--SE
Månad / Month	December / December
Utgivningsår / Year	2024
Antal sidor / Pages	29
ISSN	1650-1942
Kund / Customer	FM
Forskningsområde	Ledningsteknologi
FoT område	Ledning och MSI
Projektnr / Project No.	E51543
Godkänd av / Approved by	Christian Jönsson
Ansvarig avdelning	Telekrig

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 står inför en period av tillväxt. Fler militära enheter av bataljon- och brigadstorlek innebär fler radiosystem som måste samsas om tillgängliga kanalresurser, såsom antalet frekvenser. Frekvensspektrumet är dock begränsat och radiosystemen inom en brigad kan komma att dela på en gemensam frekvenspool.

Frekvenshopp är en beprövad metod för att undvika taktisk störning, men kräver stor bandbredd för att bilda ett effektivt skydd. Då många radiosystem ska samexistera frekvensmässigt inom brigader som är geografiskt begränsade, kan frekvenshoppskollisioner vara svåra att undvika. Hur det påverkar kommunikationsprestanda beror på ett antal faktorer, såsom antalet tillgängliga frekvenser, antalet kommunicerande nät och vågutbredningsförhållanden inom området. Flera typer av radiosystem, som skiljer sig i tidssynkronisering eller hopptakt, kan antas nyttja samma frekvensområde inom en brigad.

Målet med detta arbete är att analysera prestandan för frekvenshoppande VHF-radiosystem i en bataljon som utsätts för interferenser från övriga VHF-nät inom en brigad med antagandet att näten alltid är aktiva. Utvärderingen sker genom Monte Carlo-simuleringar, i vilka positioner för sändare, mottagare och interfererande sändare slumpas ut över ett brigadområde. Radiosystemen är generiska och modelleras utifrån ett antal systemparametrar, såsom antalet frekvenshopp per paket, antalet tillgängliga frekvenskanaler, antalet aktiva nät per bataljon samt relativ hopptakt och tidssynkronisering för de interfererande systemen. Resultaten visar att paketfelshalten för en utsatt radio i regel minskar med fler tillgängliga frekvenser, fler frekvenshopp per paket, längre medelavstånd till interfererande sändare och färre aktiva nät per bataljon. Det visas också att den genomsnittliga paketfelshalten inte blir högre då näten inom en brigad är asynkrona, än om de är synkrona.

För radiosystem med olika hopptakt blir paketfelshalten högre om de interfererande radiosystemen har långsammare hopptakt än det utsatta systemet. Om de interfererande radiosystemen har snabbare hopptakt blir paketfelshalten mindre. Det vill säga, om två frekvenshoppande radiosystem nyttjar samma frekvensområde, kommer det system med långsammast hopptakt att drabbas minst när de sänder på samma frekvenskanal. Vid det längsta undersökta kommunikationsavståndet inom en bataljon (ca 4,5 km) måste interfererande sändare befinna sig på minst det dubbla avståndet för att ge paketfelshalter på under 1 %, i de fall som har undersökts.

Nyckelord: Frekvenshopp, interferens, samexistens, VHF-radio

Abstract

The Swedish Armed Forces are facing a period of growth. More military units in the size of battalions or brigades mean more radio systems that must share available resources, such as the number of frequencies. However, the frequency spectrum is limited and the radio systems within a brigade may need to share a common pool of frequencies.

Frequency hopping is a well established technique to mitigate intentional jamming, but requires large bandwidths in order to provide sufficient protection. As many radio systems need to co-exist in the frequency domain within brigades that are geographically limited, interference from frequency collisions may not be avoidable. The impact on communication performance depends on a number of factors, such as the number of available frequencies, the number of communicating networks and the propagation conditions within the area. It is expected that several different types of frequency hopping radio systems, with different synchronization or hop rates, may share the same frequencies within a brigade.

The main objective of this work is to analyze the performance of frequency hopping VHF-radio systems in a battalion subjected to interferences from the other VHF-networks within a brigade with the assumption that all networks are always actively transmitting. The evaluation is performed using Monte Carlo-simulations, where the transmitter, receiver and interferers are randomly positioned in a brigade area. The radio systems are generic and modelled using a number of parameters such as the number of frequency hops per packet, the number of available frequencies, the number of active networks per battalion and relative hop rates and time synchronization for the interfering systems.

The results show that the packet error rate for a radio subjected to interference generally decreases as the number of frequencies increase, a greater number of frequency hops per packet is used, the average distance to interfering transmitters increases and if fewer number of networks per battalion are active. Moreover, the average packet error rate does not increase when the networks within a brigade are asynchronous, as opposed to when they are synchronous.

When the radio systems use different hop rates, the packet error rate increases if the interfering radio systems use lower hop rates than the affected radio system. If the interfering radio systems use quicker hop rates, the packet error rate decreases. That is, if two frequency hopping radio systems utilize the same frequency space, the slower-hopping radio system is affected the least when they use the same frequency. At the longest communication range examined in the simulations (ca 4.5 km), the interfering transmitters must be at a distance of at least twice the communication range in order to provide packet error rates lower than 1%.

Keywords: Frequency hopping, interference, co-existence, VHF radio

Innehållsförteckning

1	Inledning	7
1.1	Syfte	7
1.2	Läsanvisning	8
2	Metod	9
2.1	Simuleringsmodell	9
2.2	Kanalmodell	12
2.3	Mottagarmodell	12
3	Scenario	15
3.1	Nätverksparametrar	15
3.2	Brigadområde	17
4	Resultat	19
4.1	Synkron och asynkron interferens	19
4.2	Asynkrona nät med olika hopptakt	19
4.3	Antal nät per bataljon	22
4.4	Återupprepningsavstånd	23
5	Slutsatser	27
	Referenser	29

1 Inledning

Med dagens tillgängliga frekvensutrymme för Försvarsmakten räcker inte frekvenserna till för det operativa frekvensbehovet för alla radiosystemen om en statisk frekvenstilldelning används. Frekvenser kan dock återanvändas, vilket är möjligt i de fall då radiosystemen används inom en stor geografisk yta. Större förband såsom en brigad kan innehålla ett flertal radionät och i vissa fall befinna sig inom en begränsad geografisk yta. Då kan det vara svårt att återanvända frekvenserna och att administrera frekvenstilldelningen mellan näten, speciellt vid mobilitet då radionoderna rör på sig.

Målet med rapporten är att undersöka hur mycket frekvenshoppande smalbandiga VHF-nät inom en brigad interfererar med varandra. I ett tidigare arbete studerades detta för radionät som antogs vara tidssynkroniserade, vilket innebär att interferens påverkar hela frekvenshoppet [1, 2]. I detta fortsatta arbete har vi utvidgat undersökningarna till att inkludera asynkrona nät med olika frekvenshopptakter. I det fallet påverkar interferens oftast bara en del av frekvenshoppet, däremot ökar sannolikheten för interferens. I en tidigare studie från 1981 [3] undersöks egenstörningar vid långsamt frekvenshopp för många samexisterande asynkrona VHF-nät med bandbredd 25 kHz. I den studien används en förenklad mottagarmodell och en kanalmodell som inte inkluderar storskalig och småskalig fädning. I [4] analyseras interferenser mellan två bataljoner med bredbandiga flerhoppsnät med synkroniserad kooperativ broadcast (SKB). Bortsett från dessa arbeten har inga andra liknande arbeten hittats i litteraturen.

1.1 Syfte

Syftet med rapporten är att, genom en stokastisk simuleringsmodell, få förståelse för hur störda frekvenshoppande VHF-nät i en bataljon blir av andra bataljoner inom en brigad givet vissa tekniska eller geografiska begränsningar. Behovet av studier och förståelse inom samexistensproblem är stort givet de utmaningar som den växande Försvarsmakten står inför, både i den interna frekvenshanteringen och i samverkan med andra nationer.

Frågeställningarna som arbetet ämnar att ge insikt i kan presenteras mer konkret som hur prestandan i ett bataljonsnät påverkas av de övriga bataljonsnäten i en brigad vid beaktande av ett antal föränderliga faktorer, exempelvis

- antal tillgängliga frekvenskanaler för hela brigaden,
- antal frekvenshopp per informationspaket,
- antal radionät per bataljon,
- frekvenshopptakt för radiosystemen,
- tidssynkronisering mellan näten,
- brigadens geometriska utsträckning, och
- avstånd till interfererande system.

Utöver att ge förståelse för samexistensproblematiken som en brigad kan utsättas för, kan resultaten utgöra underlag för framtida metoder eller planeringsverktyg för en mer flexibel frekvensanvändning för Försvarsmaktens radiosystem.

1.2 Läsanvisning

Arbetets tillvägagångssätt presenteras i kapitel 2, där simuleringsmodellens metodik och uppbyggnad presenteras tillsammans med kanal- och mottagarmodellen. I kapitel 3 presenteras antaganden om brigadens, bataljonens och radiosystemens viktigaste simuleringsparametrar tillsammans med de scenarier som undersöks. Resultaten redovisas i kapitel 4, och slutsatserna i kapitel 5.

Rapporten är skriven översiktligt, utan att beskriva tekniska detaljer. Grundläggande kunskaper i radiokommunikation underlättar förståelsen av innehållet, men är inte nödvändigt. För fördjupad bakgrundskunskap hänvisas läsaren till [1, 2].

2 Metod

Studien genomfördes baserat på resultaten från en simuleringsmodell som tar hänsyn till, bland annat antal radionät, tidssynkronisering och radiosystem av olika frekvenshopp-takt. Modellen utgår från ett nätverk i en bataljon som påverkas av oberoende transmissioner från taktiska VHF-radiosystem i de övriga bataljonerna i en brigad. Genomgående i rapporten används prefixet "offer" för att indikera det radionät, länk eller system vars prestanda studeras.

2.1 Simuleringsmodell

Simuleringarna är baserade på en Monte Carlo-modell, där simuleringsprocessen upprepas ett stort antal gånger och resultaten aggregeras för att ge pålitlig statistik. Den metrik som används för att kvantifiera kommunikationsprestandan är paketfelshalt, vilken anger den andel av informationspaketen som inte lyckades avkodas av mottagaren på grund av interferens.

Varje simuleringscykel initieras genom att en offerlänk genereras baserat på en tvådimensionell rumslig fördelning av sändande stationer i en brigad. Hur brigaden ser ut beror på scenariot, där flertalet olika situationer undersöks (se kapitel 3). Ett exempelscenario visas i Figur 2.1a, där två ytor markerade med blått och orange representerar två bataljoner i ett 20x20 km brigadområde.

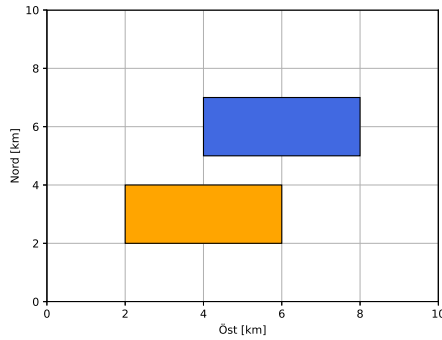
2.1.1 Generering av offerlänk

I det orangea området i Figur 2.1b genereras slumpvis två positioner motsvarande en sändar- och mottagarstation. Dessa punkter dras från en likformig fördelning. Sändar- och mottagarstationen bildar en kommunikationslänk, där nyttotrafik skickas. Det är denna länk vars prestanda utvärderas genom simuleringsprocessen. Offerlänken definieras enligt rådande simuleringsparametrar, som antalet tillgängliga frekvenskanaler och antal frekvenshopp per paket, kanalförhållanden och inställningar för mottagarmodell. Trafiken antas utgöras av ett informationspaket som delas upp över ett antal frekvenshopp. Paketet skickas över länken och avkodas genom mottagarmodellen utan några externa interferenskällor. Om paketet inte kan tas emot enligt givna parametrar, exempelvis om kanalen är för dålig, genereras två nya positionspunkter och processen upprepas. På så sätt försäkras att offerlänken som analyseras i simuleringen existerar utan någon extern interferens från början. Om paketet däremot kan tas emot i mottagaren går simuleringsprocessen vidare till nästa steg.

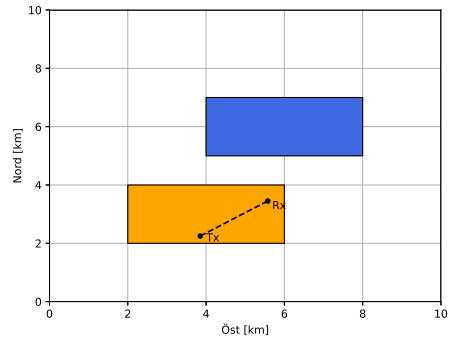
2.1.2 Generering av interfererande länk

Exemplet med det blå området i Figur 2.1b motsvarar en bataljon vars trafik sker på samma frekvensområde som offerlänken. Näten i den blå bataljonen antas vara icke-ortogonala gentemot näten i den orangea bataljonen. Då finns det en nollskild sannolikhet att något av näten i den blå bataljonen sänder på samma frekvenskanal under samma tidsram som offerlänken, vilket genererar interferens som kan orsaka att paketet inte kan tas emot av mottagaren. Sannolikheten för en frekvenskollision i ett frekvenshopp kan teoretiskt beskrivas genom formeln

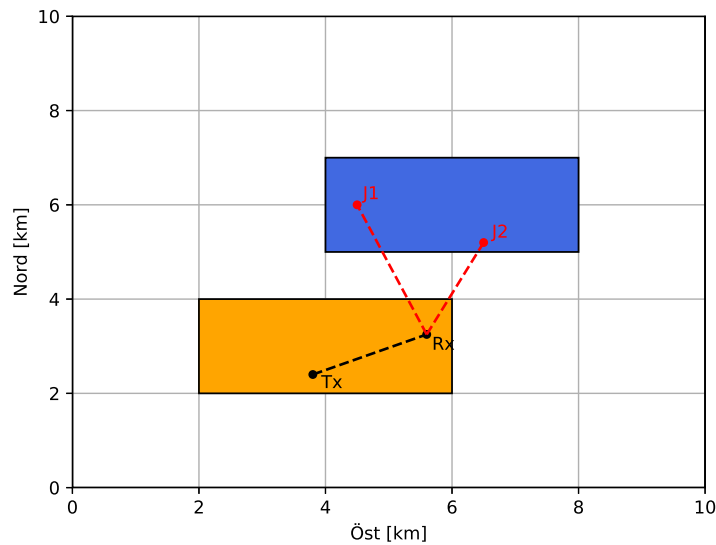
$$p = \frac{M}{N_f} I, \quad (2.1)$$



(a) Två bataljoner definieras.



(b) En offerlänk genereras inom orange bataljon.

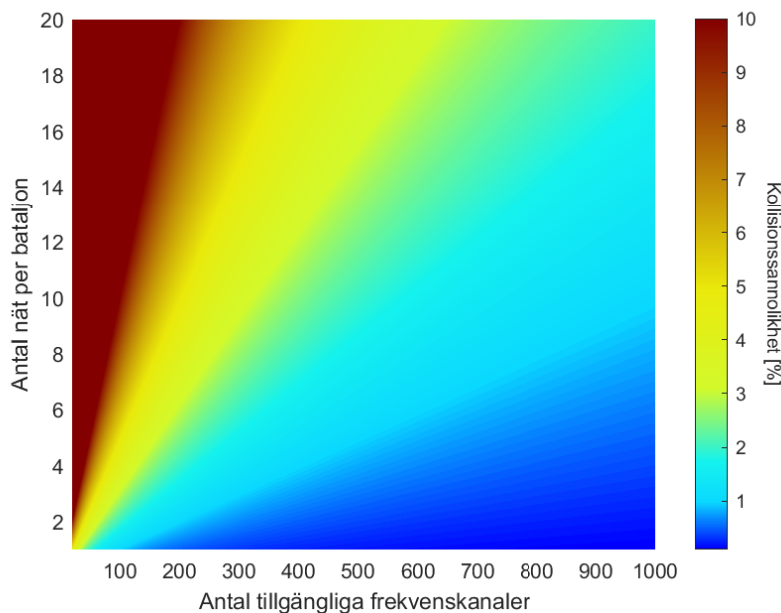
(c) Interfererande länkar genereras inom blå bataljon, och den mottagna effekten i mottagaren (R_x) beräknas.

Figur 2.1: Exempel på simuleringsprocessen med två bataljoner.

där M är antalet radionät i den blåfärgade bataljonen och N_f är antalet frekvenskanaler. Storheten I är trafikintensiteten som antas vara konstant och gälla för alla nät och uttrycks inom intervallet $I \in [0, 1]$. För enkelhets skull kan ekvationen reduceras genom att ansätta den högsta möjliga, d.v.s. $I = 1$, motsvarande ett värsta fall då alla nät trafikeras 100 % av tiden. Sannolikhetsrummet som representeras av ekvation 2.1 visas i Figur 2.2, där kollisionssannolikheten beräknas som funktion av parametrarna $M \in [1, 20]$ och $N_f \in [50, 1000]$. Enligt ekvationen kommer kollisionssannolikheten variera mellan $p_{\max} = 20/50 = 0.4$ som högst och $p_{\min} = 1/1000 = 0.001$ som lägst. Färgerna i Figur 2.2 motsvarar olika sannolikhetsområden. Skalan är kapad vid 10 %, men den mörkröda färgen representerar kollisionssannolikheter för spannet 10-40 %. De blåfärgade områdena motsvarar sannolikheter under 2 %, vilket täcker drygt hälften av sannolikhetsutrymmet. Det handlar alltså om överlag låg sannolikhet att generera en frekvenskollision i ett frekvenshopp för majoriteten av punkterna. De högsta kollisionssannolikheterna erhålls för många nät och få frekvenskanaler.

Ekvation 2.1 appliceras för varje frekvenshopp som utgör ett paket. I fall där kollisioner inträffar i något av frekvenshoppen måste positioner för de interfererande sändarna genereras. Detta sker på samma sätt som för offernätets sändar- och mottagarposition.

För varje interfererande länk slumpas sändarpositioner från det blå området utifrån en likformig fördelning. En exempelsituation visas i Figur 2.1c, där mottagaren (R_x) utsätts från interferenser i två frekvenshopp, på grund av de slumpmässigt utplacerade sändarna markerade J_1 och J_2 , respektive.



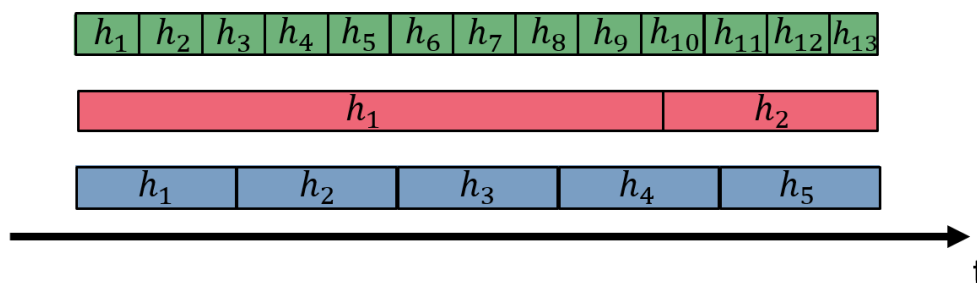
Figur 2.2: Kollisionssannolikhetsrummet i procent beroende på antal nät per bataljon (1–20) samt antal frekvenskanaler (50–1000) för exemplet med två bataljoner som använder samma frekvenspool.

2.1.3 Asynkrona nät med olika hopptakt

Simuleringsprocessen fortsätter genom att räkna ut inverkan av sändarnas interferens givet kanalmodellen som beskrivs i kapitel 2.2. I det enklaste fallet, där radiosystemen i den orangea och den blå bataljonen består av identiska typer, är det rättframt att beräkna hur mycket energi som introduceras i det utsatta frekvenshoppet. Om systemen däremot skiljer sig åt tidsmässigt, i hopptakt eller bandbredd blir det mer komplicerat.

Ett exempel visas i Figur 2.3 där paketet är representerat i tidsdomänen, med frekvenshoppet som utgör offerlänkens paket (blåfärgad) noterade h_1, h_2, h_3, h_4 och h_5 . Varje frekvenshopp motsvarar en slumpmässigt vald frekvens från en gemensam pool av frekvenser. En interfererande bataljon med radiosystem som hoppar långsammare (längre hopplängd, rödfärgad) hinner under offerpaketets gång sända i två frekvenshopp, markerade h_1 och h_2 . På så sätt blir det en frekvenskollision i offernätets frekvenshopp om frekvensen i röd h_1 är densamma som någon av frekvenserna i blå h_1, h_2, h_3 eller h_4 , eller om röd h_2 går på samma frekvens som blå h_4 eller h_5 . I alla blå frekvenshopp förutom h_4 , innebär en frekvenskollision att 100 % av hoppet blir stört, eftersom den röda sändningen varar längre än ett frekvenshopp för den blå signalen. I h_4 är endast en delmängd av hoppet stört, eftersom röd sändning byter frekvens mellan h_1 och h_2 .

En motsvarande situation visas där det interfererande systemet (grönfärgad) har en snabbare hopptakt (kortare hopplängd) jämfört med den blå offersignalen. Eftersom grön signal byter frekvens betydligt oftare än offersignalen, kan en frekvenskollision inträffa mitt i ett frekvenshopp, men varaktigheten blir kortare än i det röda fallet och interferensen partiell. Givet en hopptakt för de interfererande radiosystemen, slumpas start- och sluttid för samtliga interferenser i simuleringarna och effekterna från de interfererande



Figur 2.3: Illustration av radiosystem med olika hopptakt i tidsdomänen. Blå signal gör fem frekvenshopp under samma tid som röd signal byter frekvens två gånger medan grön signal byter frekvens 13 gånger.

sändarna aggregeras i offerlänkens frekvenshopp beroende på hopptakten och bandbredden hos de interfererade systemen. Till slut avgör mottagarmodellen om paketen kan avkodas i den tänkta mottagaren. Hela processen upprepas för en ny slumpad offersignal och statistiken aggregeras.

Exemplet ovan var med två bataljoner. Resterande scenarier behandlar ytterligare bataljoner, vilket innebär att en interferenssituation kan bestå av multipla samtida interferenssändningar, både från en eller flera bataljoner.

2.2 Kanalmodell

För samtliga transmissioner används en avståndsberoende, stokastisk kanalmodell. Kanalmodellen är parametriserad efter en kuperad terräng, där parametrarna har härletts från ett stort antal beräkningar med en deterministisk vågutbredningsmodell baserad på en parabolisk ekvationsmetod. Parameteruppsättningen för den kuperade terrängen är baserat på ett område i Jämtland. Mer detaljer finns i [5]. Ytterligare en terräng baserat på det plattare Östergötland har studerats i tidigare arbeten [1, 2], men i detta arbete används endast den kuperade terrängen. Kanalmodellen var ursprungligen framtagen för frekvensen 49 MHz och antennhöjden 3 m, men vi har i denna studie antagit att den är applicerbar över hela frekvensområdet 30–88 MHz.

Kanalmodellen kan delas in i tre faktorer, varav en är en deterministisk avståndsberoende faktor och de andra två är stokastiska variabler som beskriver stor- respektive småskalig fädning. Den storskaliga fädningen beskriver fluktueringar av transmissionsförlusten på grund av exempelvis kullar och andra terrängegenskaper, medan den småskaliga fädningen varierar på grund av konstruktiv och destruktiv interferens mellan olika vågutbredningskomponenter. Den storskaliga fädningskomponenten antas vara log-normalt fördelad och korrelationsavståndet är inom storleken av tiotals meter. Den småskaliga fädningskomponenten har en korrelationslängd i storleksordningen av en våglängd.

För varje beräkning av mottagen effektnivå spelar alltså först den avståndsberoende faktorn in, som tar hänsyn till sändarens och interferenskällans positioner i förhållande till mottagaren. Därtill appliceras den storskaliga fädningen som är konstant över ett informationspaket, och den småskaliga fädningen som är konstant under ett frekvenshopp.

2.3 Mottagarmodell

För att avgöra om ett paket kan avkodas används en mottagarmodell baserad på uppnåelig datatakt. Den småskaliga fädningen innebär att varje frekvenshopp utsätts för en ny realisering av kanalen, och detta måste mottagarmodellen ta hänsyn till. Dessutom

kan asynkron interferens från andra radionät innebära att interferensnivåerna både under och mellan hoppen varierar. Enligt modellen kan ett paket avkodas om den totala uppnåeliga datatakten i medel över hela paketlängden, det vill säga spektraleffektiviteten, i bitar/s/Hz, överskrider ett tröskelvärde.

I simuleringarna används en kanalbandbredd på 50 kHz och en datatakt på 50 kb/s, vilket ger en spektraleffektivitet på 1 bit/s/Hz som då representerar tröskelvärdet. Samma värde på spektraleffektivitet erhålls exempelvis för ett system med QPSK-modulering och en 1/2-taktskod.

Modellen är även begränsad uppåt för att undvika orealistiskt hög spektraleffektivitet när kanalen är bra (høgt SNR). En övre gräns på den maximalt uppnåeliga spektraleffektiviteten $R_{\max} = 1,4$ bit/s/Hz introduceras, vilket motsvarar i grova drag att drygt ett av fyra utstörda frekvenshopp kan korrigeras så länge som de övriga frekvenshopp har tillräckligt hög kapacitet. Med andra ord kan en dryg fjärdedel av paketlängden räddas vid interferens.

Eftersom effektnivåerna kan variera under ett frekvenshopp på grund av asynkron interferens måste spektraleffektiviteten räknas ut för varje unikt tidssegment och spektraleffektiviteten för ett helt frekvenshopp blir ett medelvärde av spektraleffektiviteten för de olika tidssegmenten som utgör frekvenshoppet.

Samtliga radiosystem i hela brigaden antas sända med samma uteffekt, 50 W och nyttja samma kanalbandbredd på 50 kHz. Implementationsförlusten L_{imp} består av skillnaden mellan teoretisk och praktisk prestanda samt dämpning i utrustning, exempelvis förluster i kabel. Samtliga parametrar för det fysiska lagret visas i Tabell 2.1.

Tabell 2.1: Systemparametrar

Parameter	Beskrivning	Värde	Enhet
P	Sändareffekt	47	dBm
B_c	Bandbredd	50	kHz
L_{imp}	Implementationsförlust	5	dB
F	Brusfaktor	25	dB
$R_{\max}$	Max. uppnåelig spektraleffektivitet	1,4	bit/s/Hz
R	Datatakt	50	kb/s
N_h	Frekvenshopp per paket	4–12	-

3 Scenario

I detta kapitel presenteras de tekniska antaganden och begränsningar som utgör de scenarier som studeras. Simuleringarna är stokastiska och styrs av antaganden representerade som simuleringsparametrar. Dessa kan klassas som nätverks- eller geometriska parametrar, där båda grupperingarna behövs för att modellera radiosystemen eller brigadområdet.

3.1 Nätverksparametrar

Nätverksparametrar motsvarar de tekniska aspekterna av simuleringsmodellen, såsom antal tillgängliga frekvenser, antal nät per bataljon, radiosystemens hopptakter eller antal frekvenshopp per paket.

3.1.1 Frekvenshopp per paket

Offerlänkens informationspaket sänds över ett antal frekvenshopp. Ett paket antas utgöras av mellan fyra och 12 frekvenshopp. Med fler frekvenshopp per paket ökar robustheten eftersom informationen sprids över ett större antal frekvenser och en eventuell frekvenskollision påverkar en mindre del av paketets totala längd. Men med fler frekvenshopp ökar också risken att utsättas för en frekvenskollision. Färre antal frekvenshopp per paket innebär färre potentiella frekvenskollisioner, men en kollision kan bli mer förödande eftersom en större del av paketet riskerar att störas ut.

3.1.2 Brigadens frekvenspool

Antalet frekvenser som utgör brigadens gemensamma frekvenspool varierar, vilket är en direkt avgörande parameter för frekvenskollisionssannolikheten. Kommunikationen antas ske på VHF-bandet, mer specifikt i truppradiobandet (30–88 MHz). Hela bandbredden 30–88 MHz ger rum åt drygt 1100 stycken 50 kHz-kanaler. I praktiken är inte hela bandet tillgängligt på grund av spektrumrestriktioner eller andra tilldelningar. I simuleringarna antas därför ett maximalt antal på 1000 frekvenskanaler och ett värsta fall där brigaden antas dela på endast 150 frekvenskanaler, vilket ger ett intervall från 150 till 1000 tillgängliga frekvenskanaler för radiosystemen att hoppa på.

3.1.3 Antal radionät och ortogonalitet

En brigad antas bestå av sex bataljoner, varav en bataljon innehåller offernätet. Varje bataljon består av mellan två och 20 radionät. Samtliga bataljoner består av lika många radionät, vilket innebär att hela brigaden kommunicerar över minst 12 och högst 120 radionät. Brigadnät (för kommunikation mellan bataljoner inom brigaden) berörs inte i simuleringarna.

Vidare antas att radionäten inom en bataljon är ortogonala, det vill säga att näten inom en bataljon alltid kommer välja olika frekvenskanaler. Däremot antas näten mellan olika bataljoner vara icke-ortogonala. Detta innebär att offernätet, som tillhör en av de sex bataljonerna, kan uppleva interferens från någon av näten i var och en av de övriga fem bataljonerna. Totalt finns det mellan 10 och 100 möjliga källor för interferens, men maximalt fem samtida nät kan sända på en given frekvens eftersom näten inom respektive bataljon är ortogonala.

Trafikintensiteten i samtliga radionät antas vara det högsta möjliga, det vill säga att näten alltid är aktiva. Detta representerar ett värsta fall. Hur intensiteten påverkar sanno-

likheten för en frekvenskollision framgår av ekvation 2.1, där en halvering av trafikintensiteten motsvarar en dubbling av antalet tillgängliga frekvenskanaler.

3.1.4 Frekvenshopptakt

Beroende på scenario ansätts olika frekvenshopptakter för de interfererande systemen. Alla hopptakter anges relativt radiosystemet som används för offerlänken. Dessa kan innebära snabbare eller långsammare frekvenshoppande radiosystem, vilket kan motsvara både äldre eller nyare svenska eller utländska radiosystem. Mer specifikt beskrivs radiosystemen som modelleras i simuleringarna enligt följande:

- Identiska system,
 - samma hopptakt som offersystemet.
- Långsammare interfererande system,
 - utvärderade hopptakter relativt offersystemet: 1/3 och 1/1000.
- Snabbare interfererande system,
 - utvärderade hopptakter relativt offersystemet: 3 och 1000.

Stora skillnader i hopptakt motsvarar yttre gränser. Ett långsamt system med hopptakten 1/1000 relativt offersystemet liknar ett fixfrekvenssystem från offersystemets perspektiv. Ju mer hopptakten minskar desto mer närmar det sig ett fixfrekvenssystem. En frekvenskollision kommer då främst uppstå genom att offersystemet hoppar in på den frekvens som ockuperas av det långsammare systemet, och hela frekvenshoppet riskerar att bli utstört.

Då hopptakten ökar innebär det istället att offersystemet liknar ett fixfrekvenssystem ur det interfererande systemets perspektiv. En frekvenskollision i detta fall kommer främst från att det snabbare systemet hoppar in på offersystemets sändning och interferensen kommer stötvis i frekvenshoppet istället för att täcka hela hoppet. Nackdelen är att interferensstötarna kan inträffa oftare, även flera gånger i samma frekvenshopp om hopptakten är snabb nog, relativt sett.

3.1.5 Avgränsningar

Design och modellering av simuleringar av radionät på brigadskala medför en serie av utmaningar och en uppsjö av möjliga parameterintervall och egenskaper som kan ha betydelse. Detta arbete är en statistisk analys vilket innebär vissa begränsningar. Tillvägagångssättet med Monte Carlo-simuleringar kan användas för denna typ av stokastiska processer med många nät.

I analysen betraktas endast bataljonsnät. Ett informationspaket antas inte ha någon intern struktur, det vill säga innehålla någon slags specifik information som exempelvis synkroniserings- eller pilotdata. På så sätt blir inte olika delar av paketet mer eller mindre känsligt, utan all information betraktas som likvärdig. Interferens som påverkar en del av ett frekvenshopp gör därför inte mer eller mindre skada beroende på vilken del av hoppet som utsätts.

Analysen behandlar enhoppsnät och det finns inte någon kooperativ broadcast- eller reläfunktion, det vill säga ingen återutsändning av paket, som i [4]. Ett paket som tappas på grund av interferens kan därför inte räddas via reläande från någon annan nod.

Utombandseffekter lämnas också utanför studien. Frekvenskanalerna antas vara separerade på ett tillräckligt bra sätt så att interferenser från grannkanaler är försumbara och kommer exklusivt från sändare på samma frekvenskanal.

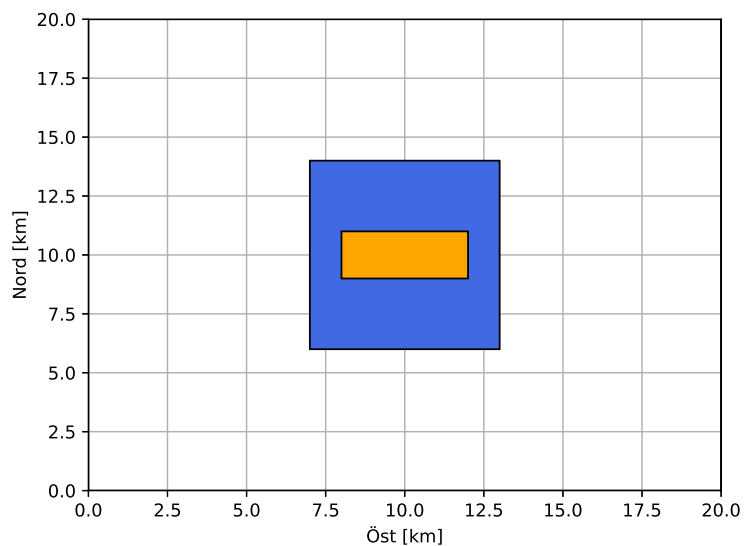
3.2 Brigadområde

Hur brigaden ser ut rent geografiskt är en avgörande faktor på hur starkt interferensen upplevs av en radiomottagare. Ett mer kompakt brigadområde innebär att sändare i andra nät i regel hamnar närmare varandra, och på så sätt upplevs som starkare, än i en mer expanderad brigadyta.

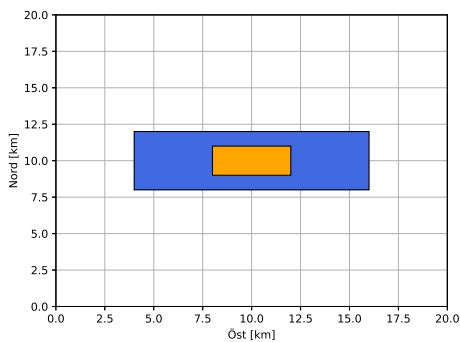
I simuleringarna används totalt tre olika geometriska områden, men främst behandlas en kompakt yta, vilket illustreras i Figur 3.1a. Scenariot kan tolkas som en väl samlad brigad som grupperar sig inför ett luftanfall. Hela brigaden är spridd över en rektangulär yta på 6x8 kilometer, där varje enskild bataljon antas vara 4x2 km. På så sätt får det precis plats med sex stycken bataljoner i den 48 km² stora brigadytan. Vidare modelleras offerbataljonen som centralt belägen i brigaden, så att nord/syd- och öst/väst-riktningarna blir likvärdigt långa i genomsnitt. Detta motsvarar också ett värsta fall, där starka interferenser kan komma från vilken riktning som helst. De resterande fem bataljonerna innehållande potentiella interferenskällor modelleras inte explicit, utan interfererande sändare genereras slumpmässigt i den övriga brigadytan.

En variant av det kompakta brigadområdet visas i Figur 3.1b, där brigaden istället är spridd över en yta på 12x4 kilometer. Den totala arean bevaras medan området är mer horisontellt utsträckt, vilket kan tolkas som en strid över nationsgräns. Offerbataljonen är igen placerad i mitten och i genomsnitt kan avståndet till interfererande länkar bli längre än det föregående fallet eftersom brigadgränsen i öst/väst-ledd hamnar längre bort (Figur 3.1a).

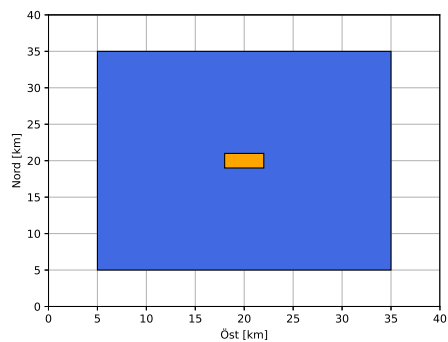
Dessutom undersöks ett betydligt större område motsvarande en expanderad brigad på en 30x20 kilometer stor yta, vilket visas i Figur 3.1c. Offerbataljonen är kompakt 4x2 km och placerad i mitten av brigaden, och interfererande sändare kommer i genomsnitt genereras på betydligt större avstånd än i de kompakta fallen.



(a) Kompakt $6 \times 8 \text{ km}^2$ brigadområde (blå) och $4 \times 2 \text{ km}^2$ bataljonsområde (orange). Total yta 48 km^2 .



(b) Kompakt brigadområde (yta 48 km^2).



(c) Expanderat brigadområde (yta 600 km^2).

Figur 3.1: Två kompakta och ett expanderat brigadområde (blåfärgade). Offerbataljonen (orange) är alltid $4 \times 2 \text{ km}^2$.

4 Resultat

Detta kapitel presenterar resultaten av simuleringarna. I samtliga figurer representerar den vertikala axeln den resulterande paketfelshalten, i procent. Paketfelshalten är ett bra prestandamått eftersom det visar hur stor andel av paketen som skickas mellan en sändare och en mottagare som inte kan avkodas på grund av interferens från närliggande bataljonsnät. Notera att eftersom det är många simulerings- och modellparametrar som spelar in och påverkar paketfelshalten, är de faktiska siffrorna inte huvudfokus. Värden i figurerna gäller endast för det scenario som simulerats. Det är trenden i paketfelshalt som är av största intresse.

4.1 Synkron och asynkron interferens

Den första delen undersöker frågan om interferens från asynkrona nät blir värre än den synkrona motsvarigheten. I Figur 4.1 visas resultat från två fall. I den vänstra figuren (Figur 4.1a) antas ett informationspaket bestå av fyra frekvenshopp och i den högra (Figur 4.1b) är det sex hopp per paket. Alla radiosystem i brigaden har i dessa fall samma frekvenshopptakt och antalet nät per bataljon är 20. Brigadstorleken är $6 \times 8 \text{ km}^2$, enligt Figur 3.1a.

För fyra frekvenshopp per paket är skillnaden i paketfelshalt mellan det synkrona (blåstreckad linje) och det asynkrona (röd heldragen linje) fallet liten, med i princip identiska resultat för fler än 400 tillgängliga frekvenskanaler. Simuleringar har även genomförts för fler val av antalet frekvenshopp per paket som inte illustreras i bild. Majoriteten av antalet hopp per paket mellan fyra och 12 ger snarlika resultat med marginell skillnad mellan synkron och asynkron interferens.

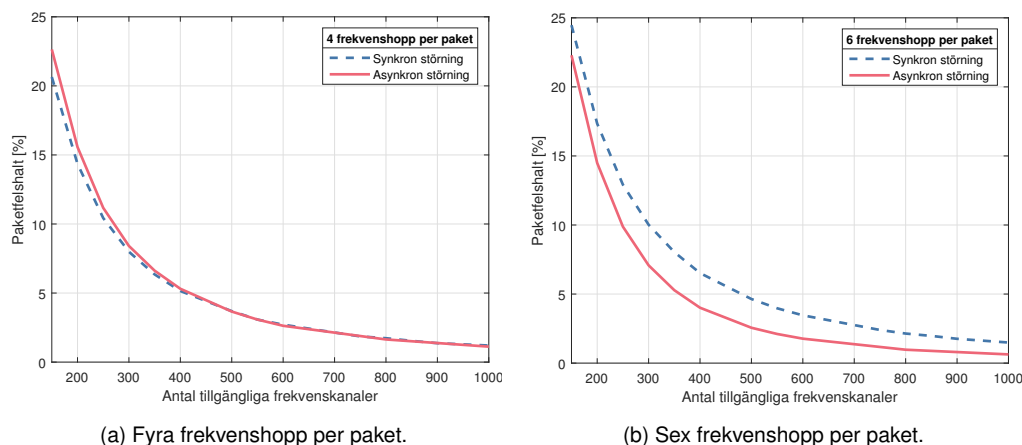
Undantagen är som i Figur 4.1b, vid sex frekvenshopp per paket där den synkrona interferensen ger en konstant högre paketfelshalt för alla fall av antal frekvenskanaler. Denna effekt är en konsekvens av parametriseringen av mottagarmodellen (val av kodning och modulation), där den maximala spektraleffektiviteten i ett frekvenshopp anges av $R_{\max} = 1,4$ vilket innebär att det går att rätta ett av fyra utstörda frekvenshopp. Ett ytterligare utstört hopp kan inte korrigeras förrän vid åtta hopp per paket. För sex frekvenshopp per paket är det då möjligt att endast korrigera ett utstört hopp, vilket resulterar i högre paketfelshalt än för fyra hopp per paket. Detta är också mer påtagligt i fallet med synkron interferens, där en frekvenskollision betyder att 100 % av hoppet täcks av interferens, vilket gör att det endast krävs en frekvenskollision av tillräckligt hög effekt för att misslyckas med att ta emot hela paketet bestående av sex frekvenshopp. Detta jämfört med asynkron interferens, där den totala interferensmängden måste överstiga en fjärdedel av paketlängden. Sammantaget kan det konstateras att paketfelshalten generellt inte blir högre för asynkrona interferenser.

4.2 Asynkrona nät med olika hopptakt

I föregående del bestod både offer och interfererande bataljon av identiska system. I detta avsnitt ansåts de interfererande radiosystemen med olika hopptakter relativt offersystemet och i varje scenario är hopptakten densamma för samtliga interfererande system. Radionäten antas vara asynkrona, varje bataljon har 20 nät vardera och ett informationspaket består av sex frekvenshopp, eftersom det resulterade i det värsta fallet i föregående del.

Totalt modelleras fem system med olika hopptakt:

- Mycket långsammare interfererande system (en tusendel av hopptakten),



Figur 4.1: Paketfelshalt som funktion av antalet tillgängliga frekvenskanaler för ett radiosystem som drabbas av interferenser från identiska system som antingen är synkrona (blåstreckad linje) eller asynkrona (röd linje).

- Långsammare interfererande system (en tredjedel av hopptakten),
- Identiska interfererande system (samma hopptakt),
- Snabbare interfererande system (tre gånger hopptakten),
- Mycket snabbare interfererande system (tusen gånger hopptakten).

Via detta breda intervall av hopptakter kan paketfelshalten på grund av interferens från system med godtycklig hopptakt framgå utifrån resultaten, givet att den relativa skillnaden i hopptakt mellan systemen är känt. Resultaten utvärderas i samtliga tre brigadområden: de två kompakta ytorna samt det expanderade området.

4.2.1 Lägre hopptakt (långsammare interfererande system)

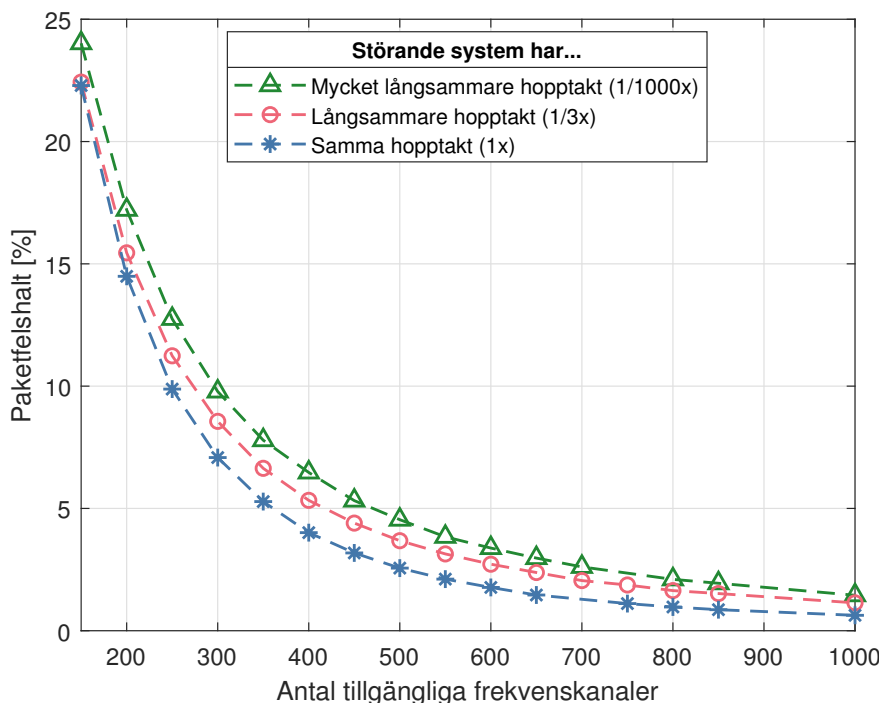
I Figur 4.2 visas resultaten för ett offersystem drabbat av interferens från system med samma (blå linje), långsammare (röd linje) samt mycket långsammare hopptakt (grön linje). Figuren visar paketfelshalten som funktion av antalet tillgängliga frekvenskanaler för dessa tre systemtyper.

Utöver den tydliga trenden att paketfelshalten minskar med fler tillgängliga frekvenskanaler, visar det sig att ju långsammare de interfererande systemen hoppar, desto högre blir paketfelshalten. Interferens från de mycket långsammare systemen resulterar i högst paketfelshalt, i snitt 2-3 % högre vid varje punkt jämfört då systemen har samma hopptakt. Den högre paketfelshalten kommer från att frekvenskollisionerna oftare täcker ett helt frekvenshopp när de interfererande systemen hoppar långsammare, vilket vid sex hopp per paket medför en större risk att tappa hela paketet. Samexistens med långsammare frekvenshoppande radiosystemen innebär därmed högre paketfelshalt för offersystemet.

4.2.2 Högre hopptakt (snabbare interfererande system)

I Figur 4.3 visas situationen där de interfererande systemen har snabbare hopptakt än offersystemet, mer specifikt tre gånger så snabb hopptakt (ljusblå linje) samt extremfallet med 1000 gånger snabbare hopptakt (lila linje). Den mörkblå linjen visar igen referenssituationen när alla system har samma hopptakt.

I detta fall är resultaten de motsatta jämfört med resultaten i Figur 4.2. Paketfelshalten för offersystemet är högst vid interferens från system med samma hopptakt och lägre



Figur 4.2: Paketfelshalt som funktion av antalet tillgängliga frekvenskanaler för ett radiosystem som drabbas av interferens från system med samma och långsammare hopptakt i ett brigadområde på 6x8 km².

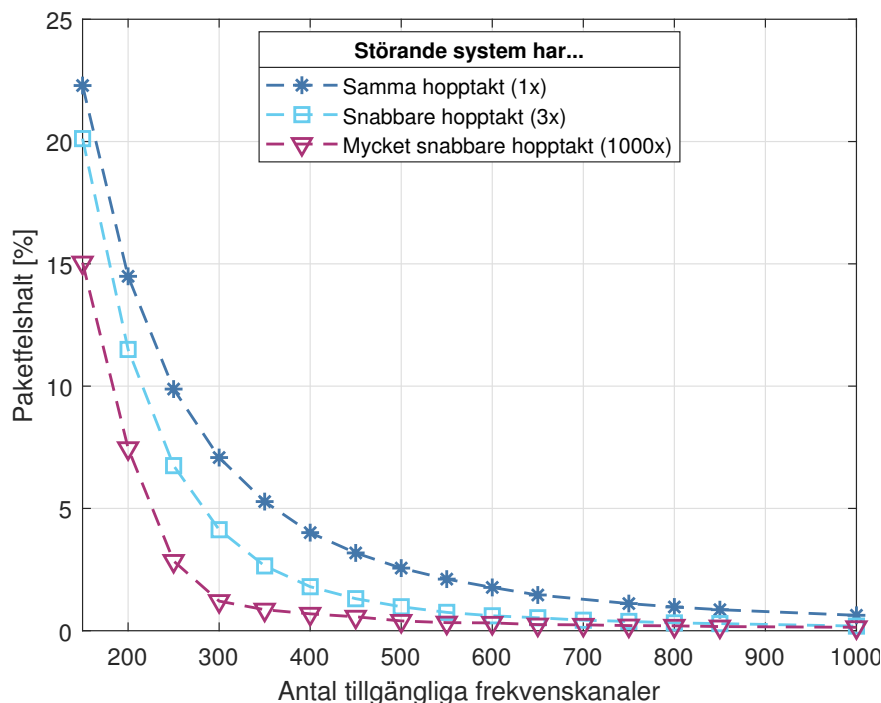
när hopptakten för de interfererande systemen ökar. När de interfererande systemen har mycket snabbare hopptakt blir paketfelshalten relativt begränsat även för 300 frekvenskanaler. Samma paketfelshalt erhålls i de andra fallen för 500 frekvenser (interferens från system med tre gånger snabbare hopptakt) respektive 800 frekvenskanaler (samma hopptakt).

Tillsammans visar Figur 4.2 och Figur 4.3 hela räckvidden av paketfelshalter som kan uppnås i detta scenario, där de mycket snabbare och mycket långsammare fallen utgör gränsvärden för lägsta respektive högsta erhållna paketfelshalt. Slutsatsen baserat på figurerna är att paketfelshalten på grund av interferens från snabbare frekvenshoppande radiosystem blir mindre i jämförelse med system av samma eller långsammare hopptakt. Om två radiosystem ska samexistera inom ett frekvensområde bör det prioriterade systemet därför ha långsammare hopptakt.

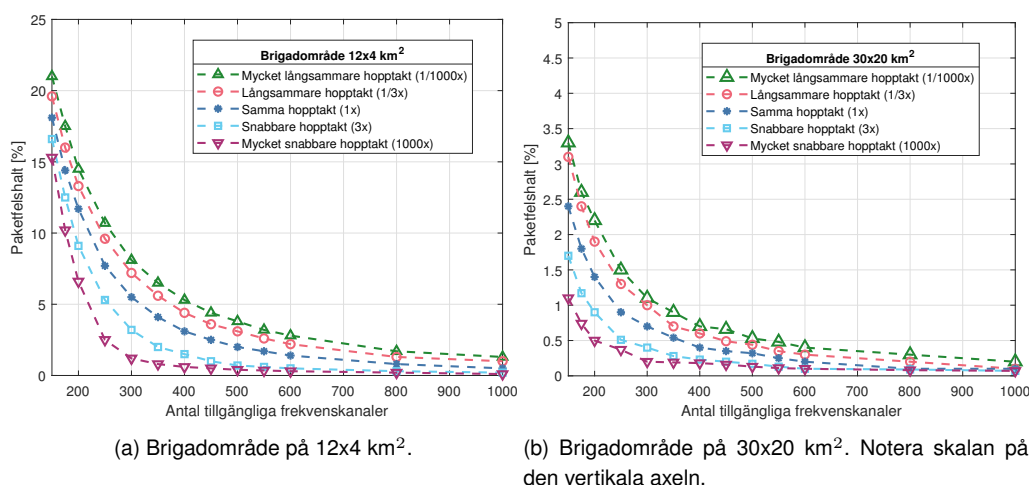
4.2.3 Andra brigadområden

Figur 4.4a visar den resulterande paketfelshalten på grund av interferens från system med olika hopptakt för brigadområdet 12x4 km². Samma trend som i Figur 4.2 och 4.3, med lägre paketfelshalt för högre hopptakter, är synligt även för detta scenario. Skillnaden är att paketfelshalterna är lägre i genomsnitt än för 6x8 km²-scenariot. Även om den totala ytan är densamma så blir den genomsnittliga längden till den interfererande sändaren längre i 12x4 km²-brigaden än i 6x8 km², vilket resulterar i att interferens har lägre energinivåer in i mottagaren hos offersystemet som därmed oftare får ett effektövertag.

Detta är ännu tydligare i Figur 4.4b, där brigadytan är 600 km². Paketfelshalterna är i detta fall betydligt lägre. Medelavståndet mellan interfererande sändare och mottagaren blir mycket längre än avståndet mellan sändaren och mottagaren i offerbataljonen. Avstånd är således en avgörande faktor för denna typ av samexistensproblem.



Figur 4.3: Paketfelshalt som funktion av antalet tillgängliga frekvenskanaler för ett radiosystem som drabbas av interferens från system med samma och snabbare hopptakt i ett brigadområde på 6x8 km².

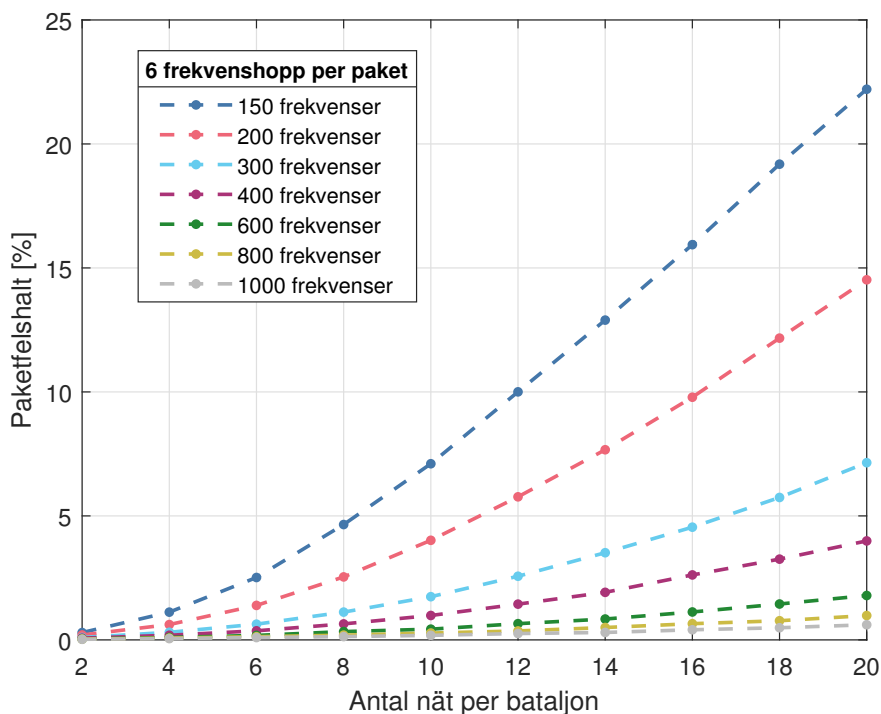


Figur 4.4: Paketfelshalt som funktion av antalet tillgängliga frekvenskanaler för ett radiosystem som drabbas av interferens från system med olika hopptakter i olika brigadområden.

4.3 Antal nät per bataljon

En annan faktor som påverkar kollisionssannolikheten och därmed den resulterande paketfelshalten, är antalet nät per bataljon. Hittills har varje bataljon antagits bestå av 20 nät. I detta avsnitt varieras istället antalet nät, från två per bataljon som lägst, upp till 20.

Figur 4.5 visar paketfelshalten som funktion av antalet nät per bataljon för olika antal tillgängliga frekvenskanaler och med sex frekvenshopp per paket. Brigadområdet är här 6x8 km². Resultaten visar att paketfelshalten är högre med fler aktiva nät per bataljon, vilket stämmer överens med den ökande kollisionssannolikheten. För 150 och 200 frekvenskanaler är paketfelshalten mycket hög relativt kurvorna för 300 eller fler frekvenser, och en skillnad på några procentenheter kan antydans redan vid sex nät per bataljon.



Figur 4.5: Paketfelshalt som funktion av antal nät per bataljon, för olika antal tillgängliga frekvenskanaler och sex frekvenshopp per paket. Interfererande system har samma hopptakt som offersystemet. Brigadscenariot är 6x8 km².

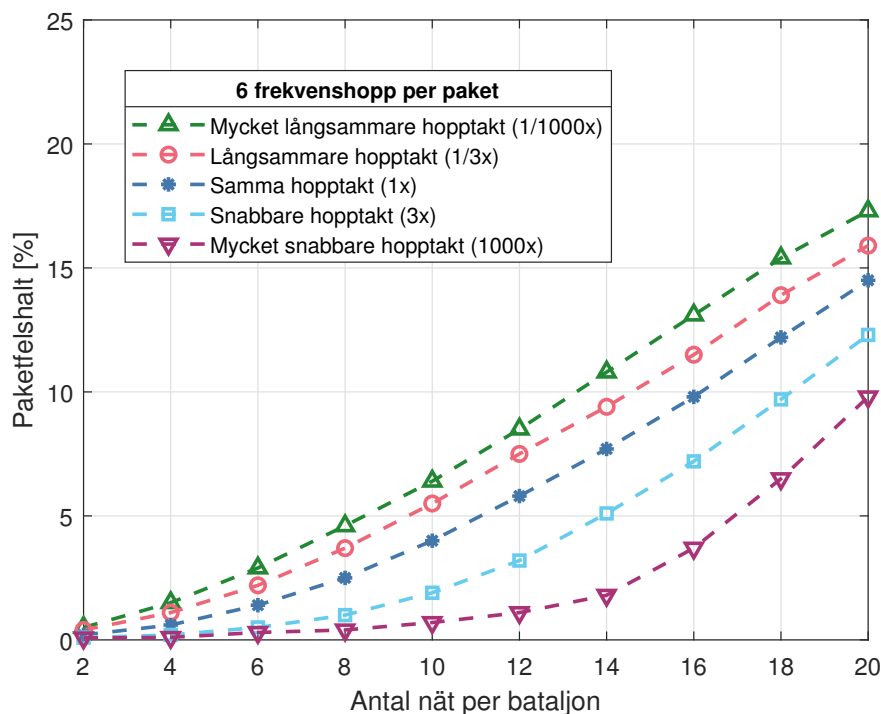
För att undersöka inverkan av skillnaden i hopptakt i kombination med olika antal nät per bataljon visas i Figur 4.6 paketfelshalten som funktion av antal nät per bataljon när de interfererande radiosystemen har olika hopptakter, i fallet med 200 tillgängliga frekvenser. Figuren visar på samma trend som i Figur 4.2-4.4, där ett långsammare frekvenshoppssystem resulterar i högre paketfelshalter för offersystemet för varje givet antal nät per bataljon.

4.4 Återupprepningsavstånd

I tidigare delkapitel genereras interfererande sändare slumpmässigt i brigadytan och den resulterande paketfelshalten är ett medelresultat för kombinationen av sändarens-, mottagarens- och interfererande sändares avstånd gentemot varandra. Avståndet är en avgörande faktor för scenariot, som visat i kapitel 4.2.3 där det större brigadområde resulterar i lägre paketfelshalter. En intressant förlängning av den analysen är hur stort avståndet till interfererande sändare måste vara innan interferensen är hanterbar ur ett mottagarperspektiv. Med andra ord, på vilket avstånd kan frekvensen återanvändas av andra bataljonsnät utan att det stör offersystemet för mycket?

För att undersöka frågan låses positionerna för sändaren och mottagaren inom offerbataljonen genom att placera dem i varsitt hörn för att ansätta den längsta möjliga förbindelsen inom bataljonen. Offerlänken blir då ett värsta fall i en 4x2 km² stor bataljon och kommunikationsavståndet kan beräknas genom $d_{\text{ref}} = \sqrt{4^2 + 2^2} \approx 4,5$ km. Detta avstånd används som ett referensavstånd. Interfererande sändare genereras på en cirkel med radie r från offerlänkens mottagare. Genom att successivt öka radien och beräkna den resulterande paketfelshalten erhålls ett avståndsberoende för de interfererande sändarna relativt längden på offerlänken.

Resultatet visas i Figur 4.7. Den horisontella axeln representerar avståndet till de in-

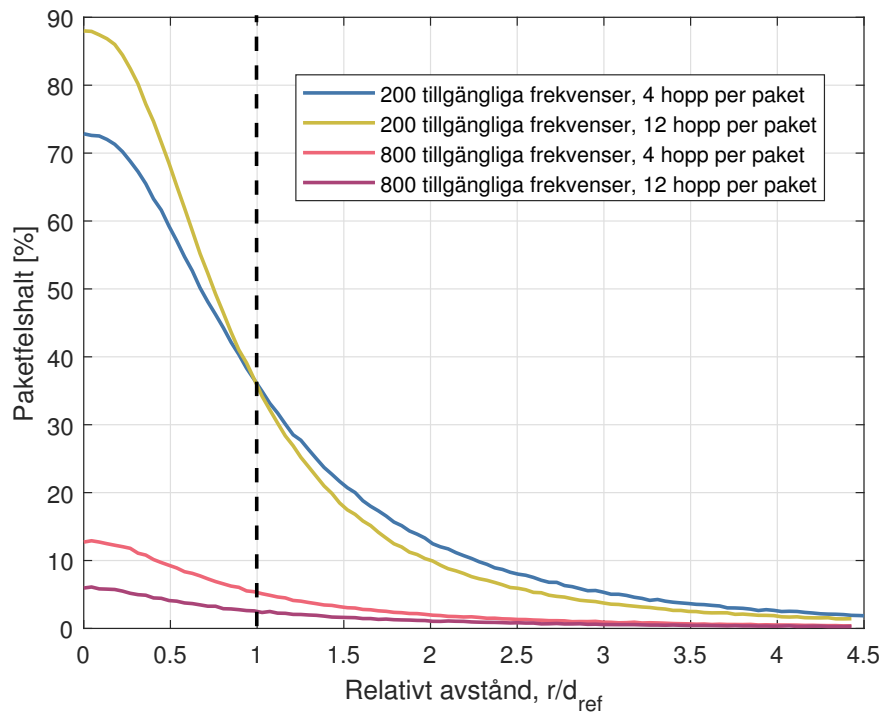


Figur 4.6: Paketfelshalt som funktion av antal nät per bataljon, för 200 tillgängliga frekvenskanaler och sex frekvenshopp per paket, när interfererande system har olika hopptakt. Brigadscenariot är 6x8 km².

terfererande sändarna relativt offerlänkens kommunikationsavstånd som kvoten r/d_{ref} . Figuren visar fyra fall, för 200 och 800 frekvenskanaler med fyra och 12 frekvenshopp per paket. Den svarta linjen motsvarar den punkt där avståndet från mottagaren till interfererande sändare är lika långt som till nyttsändaren. Figuren visar att det är stor skillnad i paketfelshalt beroende på hur många tillgängliga frekvenskanaler som används. En paketfelshalt på ca 1 % erhålls exempelvis i fallet med 800 frekvenser då avståndet till de interfererande sändarna är två gånger så stort (ca 9 km) relativt kommunikationslängden. För 200 frekvenskanaler är avståndet 4,5 gånger (ca 20 km) relativt kommunikationslängden för att hålla paketfelshalten runt 1,5 %. Återupprepningsavståndet som en annan bataljon behöver befinna sig på från offerbataljonen i detta scenario är alltså som minst 9 km och i det värsta fallet över 20 km, för att andelen förlorade paket ska vara runt 1 %.

En annan effekt som illustreras i Figur 4.7 är att den generella trenden (enligt tidigare kapitel) att paketfelshalten minskar vid fler frekvenshopp per paket inte gäller i alla fallen. När avståndet till interferenskällan är kortare än till sändaren (till vänster om det svarta strecket) och för 200 tillgängliga frekvenskanaler är paketfelshalten högre för 12 frekvenshopp per paket än för fyra hopp per paket. Anledningen till att det blir värre i detta fall är att mängden förväntade frekvenskollisioner ökar för fler frekvenshopp per paket, samt att styrkan hos de interfererande sändarna är större än för nyttsändaren som är placerad längre bort från mottagaren.

Vilken systemdesign som är bäst beror på mängden frekvenskollisioner och interferensnivåerna som förväntas, vilket i sin tur beror på hur nära varandra de interfererade näten befinner sig. Avståndet som två bataljoner behöver befinna sig på beror på hur många frekvenskanaler som är tillgängliga.



Figur 4.7: Paketförlust som funktion av avståndet till interfererande sändare relativt ett fixt kommunikationsavstånd. Till vänster om den svarta linjen är interferenskällan närmare mottagaren än vad sändaren är, och till höger om den svarta linjen är det tvärtom.

5 Slutsatser

I denna studie undersöks samexistens mellan smalbandiga taktiska radionät. Mer specifikt, hur VHF-näten i en bataljon påverkas av övriga bataljoners VHF-nät i en brigad.

Resultaten visar att andelen paketfel på grund av interferens från andra bataljonsnät i regel minskar med

- fler tillgängliga frekvenskanaler,
- fler frekvenshopp per informationspaket,
- större brigadområde, eller
- färre aktiva nät per bataljon.

Den generella trenden i de framtagna scenarierna gäller dock inte i alla fall. Ett undantag observeras för antalet frekvenshopp per paket, där mängden förväntade frekvenskollisioner tillsammans med närheten till de interfererande näten är avgörande. Resultaten visar att det är fördelaktigt med få frekvenshopp per paket i fallet där antalet kollisioner är höga samtidigt som interfererande signaler är mycket starka.

Analysen av asynkrona radionät med olika frekvenshopptakt visar på tre egenskaper. (1) I de scenarier som har undersökts blir den genomsnittliga paketfelshalten lägre då näten inom en brigad är asynkrona jämfört med om de är synkrona. (2) Då radiosystemen modelleras med olika frekvenshopptakter visas det att ett radiosystem som utsätts för interferens från system med långsammare hopptakt påverkas mer än om de interfererande systemen har snabbare hopptakt, i de fall som har undersökts. Det vill säga, om två frekvenshoppande radiosystem ska samexistera och dela ett gemensamt frekvensutrymme, kommer det system med långsammare hopptakt klara sig bättre från interferenser inom brigaden. (3) Återupprepningsavståndet, det vill säga det avstånd som behövs mellan bataljoner för att en frekvenskanal kan användas på nytt, beror främst på antalet tillgängliga frekvenskanaler. I det undersökta fallet när kommunikationslänken är den längsta möjliga i en bataljon (4,5 km) visar resultaten att övriga bataljoner måste befinna sig på minst det dubbla avståndet (ca 9 km) för att hålla en paketfelshalt kring 1 % med 800 frekvenskanaler. I det värsta fallet med 200 frekvenskanaler är avståndet nästan 20 km för att hålla paketfelshalten runt 1,5 % i de fall som har undersökts.

Sammantaget visar analysen de faktorer som påverkar frekvenshoppande VHF-nät i en brigad. Hur allvarlig interferens från andra nät inom brigaden blir beror på scenariot, där antalet tillgängliga frekvenskanaler är den viktigaste aspekten.

Referenser

- [1] K. Hägglund, J. Nilsson och G. Eriksson, "Analysis of link performance degradation from interferences in military networks," Totalförsvarets Forskningsinstitut, tekn. rapp. FOI-D--1191--SE, 2022.
- [2] —, "Analysis of link performance degradation in military networks," *International Conference on Military Communications and Informations Systems (ICMCIS)*, okt. 2023.
- [3] K. Gunmar, "Simulering av egenstörningar vid långsamt frekvenshopp," Försvarets Forskningsanstalt, tekn. rapp. FOA C 30230-E2, 1981.
- [4] U. Uppman, "Samutnyttjande av frekvenser mellan flera bredbandiga bataljonsnät," Totalförsvarets Forskningsinstitut, Rapport FOI-R--5520--SE, 2023.
- [5] J. Nilsson, K. Fors, P. Holm, G. Eriksson och Åsa Waern, "Underlag för kravställning av radiosystem på plattformar," Totalförsvarets Forskningsinstitut, Rapport FOI-R--3699--SE, 2013.

