

Metoder för hantering av dynamiska interferensmiljöer

BÖRJE ASP, ERIK AXELL, SOFIA BERGSTRÖM, KRISTOFFER HÄGGLUND,
ARWID KOMULAINEN, THOMAS RANSTRÖM, PETER STENUMGAARD



Börje Asp, Erik Axell, Sofia Bergström, Kristoffer
Hägglund, Arwid Komulainen, Thomas Ranström,
Peter Stenumgaard

Metoder för hantering av dynamiska interferensmiljöer

Titel	Metoder för hantering av dynamiska interferensmiljöer--
Title	Methods for handling dynamic interference environments
Rapportnr/Report no	FOI-R--4870--SE
Månad/Month	December
Utgivningsår/Year	2019
Antal sidor/Pages	82
ISSN	1650-1942
Kund/Customer	Försvarsmakten
Forskningsområde	Ledningsteknologi
FoT-område	Ledning och MSI
Projektnr/Project no	E72783
Godkänd av/Approved by	Christian Jönsson
Ansvarig avdelning	Ledningssystem

Bild/Cover: Bezav Mahmod/Försvarsmakten

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

Fungerande telekommunikationssystem är viktiga för militära förbands förmåga att lösa sina uppgifter. Även med ett väl genomfört elmiljöarbete uppstår ofta samexistensproblem orsakade av interferensproblem. Detta gäller både för kommunikationssystemen sinsemellan och med andra system som har stor betydelse för plattformens skydd, verkan och rörlighet. Integrationsarbetet för att uppnå önskad kommunikationsförmåga är komplext och innebär kompromisser mellan olika lösningar och åtgärder.

Rapporten är en slutrapport för projektet KORINT som haft som uppgift att besvara följande frågeställning:

Hur ska funktionssäkerheten hos kommunikationssystemen på militära plattformar garanteras när nödvändiga kompromisser i systemintegrationen måste göras för att plattformens huvuduppgifter (skydd, verkan och rörlighet) inte ska försämrats?

KORINT samt tidigare projekt vid FOI har visat att de fyra viktigaste faktorerna som påverkar funktionssäkerheten för kommunikationssystem på militära plattformar är:

- Begränsad frekvenstillgång: Påverkar skydd mot aktiv störning och förmågan att med dagens radiosystem effektivt hantera samlokaliserings- och interferensproblem.
- Otillräckliga standarder beträffande utombandsegenskaper: Dagens standarder är otillräckliga och behöver bli mer anpassade till den kravbild som föreligger för att sambandssystemen ska leverera den efterfrågade funktionssäkerheten.
- Otillräcklig styrning av hela processen vid framtagning av nya (och modifiering av äldre) system: Under tidigare projekt lanserades tankar kring integrationsansvariga. Den tanken gäller än idag med tillägg att någon form av metodstöd för en dokumenterad och spårbar kompromisshantering måste ingå.
- För mycket utrustning som emitterar elektromagnetisk strålning på små plattformar: Endast de för uppgiften viktiga systemen bör tillåtas och dessa måste specificeras utifrån den uppgift plattformen ska lösa.

Några garantier för kommunikationssystemens funktionssäkerhet kan inte ges då militära plattformar är oerhört komplexa system-av-system där en kombination av arvet, civila komponenter, frekvensbrist och många aktörer med varierande kunskap och erfarenhet skapar svårigheter att skapa, driva och underhålla dessa system.

Rapporten behandlar tekniker avsedda främst för dynamiska situationer, där den elektromagnetiska miljön och vågutbredningen varierar över tid p.g.a. exempelvis förflyttning mellan olika miljöer eller oförutsedd samgruppering. Flera intressanta lösningar har potential att förbättra funktionssäkerheten, exempelvis adaptiv demodulation och avkodning i miljöer med impulsbrus, dynamisk spektrumhantering och effektregering samt full duplex för undertryckning av utombandsemission.

På det metodmässiga planet görs bedömningen att delar av en mer systematisk process som bidrar till en bättre helhet beträffande integrationen är möjlig att införa, trots svårigheten att införa en systematisk kompromisshantering. Någon av de studerade metoderna för kompromisshantering bör kunna utgöra basen för detta arbete. Ett alternativ är att använda den FOI-utvecklade metoden COAT.

Nyckelord: Samexistens, systemintegration, utombandsegenskaper, frekvenshopp, adaptiva mottagare, full duplex, frekvens.

Summary

Reliable communication systems are crucial in order for the armed forces to fulfil their mission. Despite assuring electromagnetic compatibility (EMC) for subsystems on a platform, there are risks for intersystem interference. These problems can manifest both between different radio communication systems, and between a communication system and other systems vital for the mobility, effect and protection of the platform.

The main objective of the project KORINT is to answer the following question:

How can the required reliability of the communication systems on board military platforms be guaranteed, when compromises in system integration need to be made with the premise of not degrading the performance of the primary functions of the platform (protection, effect and mobility)?

KORINT and previous projects at FOI have shown that the four most prominent factors affecting the reliability of the communication systems on military platforms are:

- Limited access to frequency spectrum: Affects protection against electro-magnetic warfare and the ability to handling problems due to co-location and interference effectively.
- Insufficient standards for out-of-band emissions: Current standards are insufficient and need to be modified according to the actual demands for reliable communication systems.
- Insufficient management of the entire process for procurement of new (and modification of old) systems: In previous projects, the concept of a person responsible for the system integration of a platform was introduced. This concept is still valid with the addition of methodological support for making the compromises made well-documented and traceable.
- Too many emitters of electromagnetic radiation on small platforms: Only those systems crucial for the task of the platform should be active and the set of allowed systems should be task-specific.

It is important to point out that total reliability of the communication systems on a platform cannot be guaranteed. This is because a platform is a complex system-of-systems where factors such as legacy equipment, civilian commercial components, lack of frequency spectrum and many actors with varying knowledge and experience, leads to difficulties in procuring, using and maintaining all systems.

This report is primarily concerned with dynamic situations where the electromagnetic environment and signal propagation vary over time, for instance due to changing environments or unexpected co-location scenarios. Several presented technics in the report have a potential to improve communication systems reliability, for example adaptive demodulation in impulse noise environments, dynamic spectrum and power allocation as well as full duplex techniques for reducing out-of-band emissions.

In terms of methodology, our assessment is that some parts of a more systematic process that contributes to better overall system integration is possible to apply, despite the difficulties associated with such processes. Some of the processes studied in this report could form a foundation for such work. Another alternative is to use the method called COAT, which has been developed at FOI.

Keywords: Co-location, system integration, out-of-band emissions, frequency hopping, adaptive receivers, full duplex, frequency.

Innehållsförteckning

1	Inledning	7
1.1	Statiska och dynamiska interferensscenarier	8
1.2	Systemintegration - problembeskrivning	9
1.3	Funktionssäkerhet	10
1.4	Utombandsegenskaper	11
2	Dynamisk resursallokering.....	13
2.1	Dynamisk frekvenshantering	13
2.1.1	Allmänt om dynamisk frekvenshantering	13
2.1.2	Frekvensval baserat på lokal störningsmiljö	14
2.1.2.1	Lokal störningsmiljö	14
2.1.2.2	Dynamiskt frekvensval i unicast- och multicast-nät	16
2.2	Anpassad sändareffekt.....	17
2.2.1	Begränsning av interferens genom effekthereglering	17
2.2.2	Fördelning av effekt på flera kanaler	19
2.2.3	Sammanfattning av anpassad sändareffekt.....	20
2.3	Påverkan av utombandsemission i nätverk	20
2.3.1	Synkroniserad kooperativ broadcast.....	21
2.3.2	Scenario.....	22
2.3.3	Modell för utombandsegenskaper	24
2.3.4	Resultat.....	24
2.3.5	Slutsatser.....	27
2.4	Tjänstehantering.....	28
3	Adaptiva sändar- och mottagartekniker	29
3.1	Adaptiv demodulation och avkodning.....	29
3.1.1	Parameterestimering	30
3.1.2	Adaptiv demodulation för Class A-anpassade tekniker.....	31
3.1.3	Resultat för Class A-anpassade tekniker	33
3.1.4	Adaptiv demodulation för SsS-anpassade tekniker	36
3.1.5	Resultat för SsS-anpassade tekniker	37
3.1.6	Implementationsproblem och komplexitetsanalys.....	39
3.1.7	Sammanfattning och slutsats.....	41
3.2	Antennsystem	41
3.3	Predistorsion	43
4	Undertryckning av utombandsemission	45
4.1	Systembeskrivning	46
4.2	Prestanda och resultat för undertryckning av utombandsinterferens.....	47
4.3	Inverkan av analog till digital omvandling på undertryckning.....	50
4.4	Systembeskrivning av undertryckning med analog till digital omvandling.....	51
5	Systematisk kompromisshantering	56

5.1	Formella metoder för kompromisshantering.....	58
5.2	Värderingsmetoden COAT	61
5.3	Slutsatser och rekommendationer	61
6	Slutsatser, kommentarer och rekommendationer	63
6.1	Dynamisk resursallokering	63
6.2	Adaptiva sändar- och mottagartekniker	64
6.3	Undertryckning av utombandsemission	64
6.4	Systematisk kompromisshantering	64
6.5	Projektets frågor och framtida arbete	65
7	Referenser	67
8	Appendix A: Standarder för utombandsemission och spuriouser	70
8.1	Smalbandiga system.....	70
8.2	Bredbandiga system	70
8.3	Övriga standarder	70
9	Appendix B: Brusmodeller	72
9.1	Normalfördelningen.....	73
9.2	Middletons Class A-modell.....	74
9.3	Symmetrisk α -Stabil modell.....	76
10	Appendix C: COAT-metoden	78
10.1	COAT-metoden i korthet	78
10.2	COAT användningsområden.....	79
10.2.1	Sambandslösningar för nationella och internationella uppdrag	79
10.2.2	Underlag inför kravställning på ny materiel.....	79
10.2.3	Upphandling av tekniska system	79
10.2.4	Underlag till Försvarsmaktens förmågeutveckling, den evolutionära processen.....	80
10.3	COAT-metodens styrka.....	80
11	Appendix D: KORINT-publikationer	82
11.1	Vetenskapliga publikationer	82
11.2	Rapporter och memon	82

1 Inledning

Fungerande telekommunikationssystem är viktiga för militära förbands förmåga att lösa sina uppgifter. Även med ett väl genomfört elmiljöarbete uppstår ofta samexistensproblem orsakade av interferensproblem. Detta gäller både för kommunikationssystemen sinsemellan och med andra system som har stor betydelse för plattformens skydd, verkan och rörlighet. Problemen förstärks ytterligare av de nya krav som kan bli följden av förändrad frekvenstillgång för militär användning. Integrationsarbetet för att uppnå önskad kommunikationsförmåga är komplext och innebär kompromisser mellan olika lösningar och åtgärder. En åtgärd kan vara teknisk, som innefattar både hård- och mjukvara, men den kan också bestå av att införa en metod för att undvika eller hantera problem.

Arbetet som har lett fram till denna rapport har gjorts inom ramen för FoT-projektet KORINT (Kompromisshantering vid systemintegration av trådlösa kommunikationssystem). Projektet ska utveckla metoder och studera tekniska åtgärder för att hantera kompromisser vid systemintegration av trådlösa kommunikationssystem. Metoderna baseras på resultat och erfarenheter från ett tidigare projekt, RICOM [1]. Av särskild vikt är att metoderna kan hantera oförutsägbara grupperingssituationer som är typiska för arméfordon. Även organisatoriska åtgärder är viktiga för att hantera samexistensproblem, men att studera dessa typer av åtgärder är mer omfattande och ligger utanför detta projekt.

Verksamheten inom KORINT har delats upp i två delar beträffande interferensscenarier och åtgärder: en del definierat som det *statiska fallet* och en del som det *dynamiska fallet*, se kapitel 1.2. Metoder för att hantera det statiska fallet behandlades i [2], och denna rapport redovisar därför enbart det dynamiska fallet.

Projektets övergripande frågeställning är:

Hur ska funktionssäkerheten hos kommunikationssystemen på militära plattformar garanteras när nödvändiga kompromisser i systemintegrationen måste göras för att plattformens huvuduppgifter (skydd, verkan och rörlighet) inte ska försämrats?

I denna rapport belyses nedanstående delfrågeställningar kopplade till den övergripande frågeställningen:

1. Hur kan funktionssäkerheten hos kommunikationssystem på militära plattformar ökas i dynamiska situationer genom
 - flexibel frekvenstilldelning, effektjustering, nätplanering och tjänstehantering
 - att använda mottagartekniker som automatiskt anpassar sig till omgivningen
 - utnyttjande av full duplex-tekniker för exempelvis hantering av utombandsemissioner?
2. Är det praktiskt möjligt att använda systematisk kompromisshantering för att hantera integrationsproblem relaterade till statiska och dynamiska scenarier?

Kommande avsnitt i detta kapitel beskriver följande begrepp som är centrala inom projektet KORINT och denna rapport: statiska och dynamiska interferensscenarier, problem med bristande systemintegration, funktionssäkerhet, samt dynamiska tekniker och metoder.

1.1 Statiska och dynamiska interferensscenarier

Statiska scenarier är sådana som är likartade över tid, vilket gör det möjligt att manuellt mäta upp interferenser och vidta lämpliga åtgärder. Interferenser i ett statiskt scenario kommer vanligen från samma plattform som mottagaren sitter på. Det statiska fallet omfattar åtgärder och metoder som i första hand avser att ta hand om problem och störkällor redan från början och beskrevs mer utförligt i [2].

I det dynamiska fallet tillkommer metoder som behövs för att ta hand om en varierande elektromagnetisk miljö, exempelvis att ett arméförband rör sig från en gles gruppering med långt mellan fordonen och liten påverkan mellan dessa, till en tätare gruppering med ett fåtal meter mellan fordonen med risk för att fordonen stör varandra (Figur 1). Det kan även handla om att ett förband rör sig in i tätbebyggda områden med höga bakgrunds-nivåer av elektromagnetisk emission. De dynamiska metoderna ska därför ta hand om mer oförutsägbara situationer som varierar över tid. För att hantera störningar i dynamiska scenarion krävs adaptiva åtgärder vilket innebär system som kan anpassa sig efter rådande förhållanden.

Utmärkande för alla dessa åtgärder är att det finns ett stort behov av kompromisser och prioriteringsfunktioner samt att utfallet av åtgärderna måste värderas utifrån ett helhetsperspektiv. Denna rapport fokuserar på olika metoder som kan tillämpas för att hantera problem i det dynamiska fallet.

Det finns generellt tre olika tillvägagångssätt att angripa ett interferensproblem efter att det identifieras, både för statiska och dynamiska scenarier. Interferensproblemet kan angripas genom att:

- begränsa emitterad effekt från en störkälla eller annan sändare
- begränsa överförd effekt mellan emitterande källa och radiomottagare
- begränsa oönskad effekt in i mottagaren.

Ibland kan lösningen vara att kombinera olika åtgärder från samtliga eller två av de ovan nämnda angreppssätten.

Dynamiska metoder för att minska emitterad effekt kan vara exempelvis:

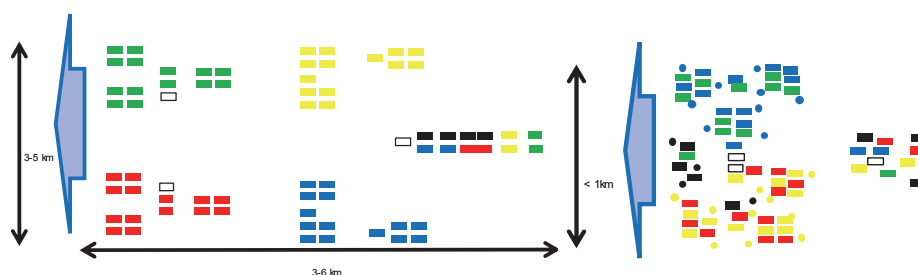
- att anpassa utsänd effekt så att inte mer effekt än nödvändigt för kommunikationen används
- förkodning (t.ex. pre-distorsion) för att minska exempelvis utombandsemission.

Exempel på dynamiska metoder för att begränsa överförd effekt mellan källa och radiomottagare kan vara:

- dynamiskt valbara och/eller styrbara antenner
- dynamiskt frekvensval.

Dynamiska metoder för att begränsa oönskad effekt i mottagaren kan vara exempelvis:

- adaptiv filtrering
- mottagartekniker, t.ex. demodulation och avkodning, som anpassar sig till störningsmiljön
- interferensundertryckning med t.ex. full duplex-teknik
- dynamiskt valbara och/eller styrbara antenner.



Figur 1. Ett exempel på en statisk och en dynamisk situation. Till vänster en mekaniserad bataljon under förflyttning, till höger bataljonen under anfall i bebyggelse. I det senare fallet ändras avstånden mellan fordonen kontinuerligt och i vissa fall är fordonen mycket nära varandra.

1.2 Systemintegration - problembeskrivning

Systemintegration är i sig inte ett problem, men kan lätt skapa problem

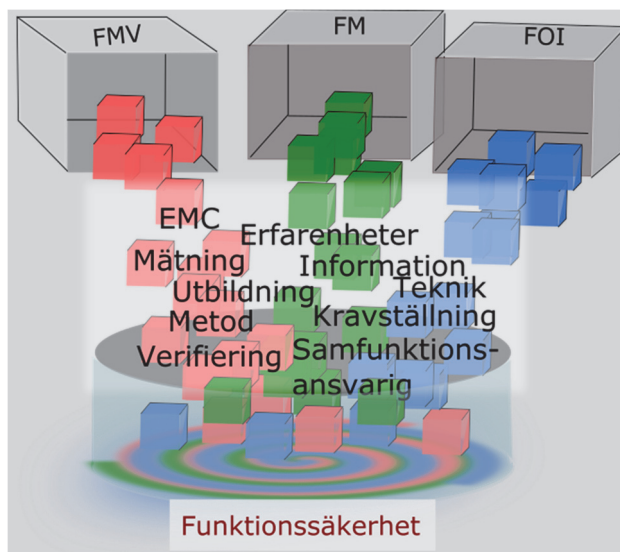
Problem med interferenser kan få som konsekvens att radiosystemens prestanda degraderas så att de inte kan nyttjas med den förmåga som de i grunden besitter. Det kan innebära kraftigt begränsad räckvidd och minskad robusthet mot telekrigsinsatser eller att vissa frekvenser inte får användas. I värsta fall innebär det att vissa radiosystem inte kan användas samtidigt med andra system eller att de inte fungerar alls. Brister i systemintegrationen påverkar således ytterst förbandens förmåga att genomföra sin uppgift. Dessa brister är ett komplext och växande problem, särskilt för plattformar där flera kommunikationssystem samlokaliseras med andra emitterande källor.

Om brister i systemintegrationen leder till bristfällig kommunikationsprestanda behövs åtgärder för att eliminera eller reducera problemen. Generellt gäller att en optimal lösning i praktiken inte är rimlig att sträva efter eller är ekonomiskt försvarbar. Den stora mängden av svårjämförbara parametrar, plattformsbegränsningar samt taktiska, praktiska, verifieringsmässiga och arbetsmiljömässiga krav medför att den slutliga lösningen måste vara en rimlig kompromiss. Konsekvensen är att det finns ett stort behov av ett systematiskt integrationsarbete där kompromisser är absolut nödvändiga och gjorda med ett helhetsperspektiv i fokus. Detta har tidigare beskrivits i en annan rapport utgiven inom ramen för projekt RICOM [1].

En komplicerande faktor är att genomförda åtgärder, inklusive modifieringar och underhåll, kan medföra nya oönskade problem om inte hänsyn samtidigt tas till hela plattformens funktion. Typiska exempel på sådana åtgärder kan vara att flytta (eller byta) antenner, införa nya system eller (del)komponenter, eller att byta kablage.

Tröskeleffekter i de tjänster som används över radiosystemet kan innebära att en åtgärd som ger en signifikant förbättring i radiosystemets prestanda inte ger någon förbättring alls i tjänstens prestanda, eller att en liten förändring i radiosystemets prestanda har avgörande betydelse för om tjänsten ska fungera eller inte. Detta innebär att alla planerade åtgärder behöver utvärderas tillsammans för att avgöra om de ger en tillräckligt stor förbättring utan att orsaka nya försämringar.

NATO har under 2018-2019 genomfört en "EW threat analysis". Studien indikerar att redan dagens hotnivå och definitivt den förväntade framtida hotnivån är hög relativt det hot som varit dimensionerande de senaste 10-20 åren. Detta betyder att egengenererade interferenser och samlokaliseringsproblem (både statistiska och dynamiska) måste hållas på ett absolut minimum för att störskyddet inte ska ätas upp av dessa störningar. I annat fall kommer de störskyddade system som är operativa idag och de som är på väg att införas inte hantera hotet särskilt väl. I klartext betyder det att nu är det ännu viktigare än tidigare att hantera egengenererade interferenser och samlokaliseringsproblem.



Figur 2. Systemintegration är mycket mer än bara teknik.

Detta projekt är en liten del i arbetet för effektivare systemintegration av kommunikationssystem på militära plattformar. Det är viktigt med samverkan mellan alla berörda parter: Försvarmakten med bland annat Högkvarteret, de olika staberna, skolor och förband samt FOI och FMV med dess kontakter mot industrin (Figur 2).

1.3 Funktionssäkerhet

För att öka sannolikheten att radiosystemen kan användas som det var tänkt och utan degraderad prestanda när de är integrerade på en plattform, behöver begreppet *Funktionssäkerhet* för radiosystem införas. Redan i kravställningen av vad en plattform ska ha för förmåga till att samverka trådlöst med andra enheter bör funktionssäkerhet införas. Funktionssäkerhet definieras generellt som

förmågan hos en enhet eller ett system att utföra en krävd funktion under givna förhållanden under ett givet tidsintervall. [3]

En utmaning med funktionssäkerheten för radiokommunikation på olika plattformar är att plattformar och radiosystem upphandlas vid separata tillfällen och har olika långa livscykler. Detta gör att de inte kan upphandlas samtidigt och att deras krav inte alltid kan anpassas till varandra. Radiosystemen är generellt avsedda för att användas på ett flertal olika typer av plattformar. Plattformarna i sig är framtagna som en basplatta för att tillhandahålla en given militär förmåga. Basplattan bestyckas sedan med olika system för verkan och ledning (bl.a. radiosystemen). Detta kan göra att krav på emissionsnivåer för en plattform kan bli för höga eller för låga beroende på vilket radiosystem den bestyckas med.

I vissa fall är det radiosystemet som är gränssättande för vilken prestanda som är möjlig att uppnå, medan det i andra fall kan vara plattformen eller radiosystemets integration på plattformen som blir gränssättande. Denna diskrepans mellan emissionsnivåer för en plattform och mottagarkänslighet hos ett radiosystem innebär att det finns en resurs, antingen i radiosystemet eller i plattformen, som inte nyttjas fullt ut och därmed troligen varit onödigt kostsam vid anskaffningen. Att pressa ner emissionsnivåerna lite extra eller att öka mottagarkänsligheten innebär ofta stora kostnader.

1.4 Utombandsegenskaper

Ett begrepp som dyker upp på flera ställen i denna rapport är utombandsegenskaper, som omfattar de båda begreppen utombandsemission och mottagarselektivitet. De är centrala begrepp i detta projekt och mycket viktiga faktorer som påverkar en rad olika delar för kommunikationssystemets prestanda. Nedan följer därför våra definitioner av begreppen utombandsemission och mottagarselektivitet.

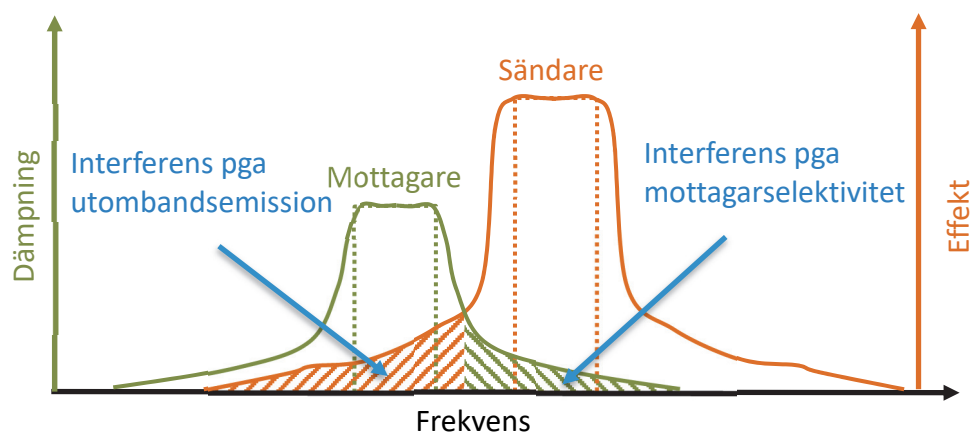
En radiosändare är inte ideal i den meningen att den sänder all sin effekt inom den tilldelade kanalen. Generellt skickar en sändare ut energi i intilliggande kanaler, så kallad *utombandsemission*. Den utsända effekten som hamnar i intilliggande kanaler avtar med frekvensen så därmed påverkas de närmaste kanalerna mest av denna utombandsemission. På liknande sätt är inte heller en mottagare ideal. En mottagare har generellt en viss känslighet även i intilliggande kanaler, vilket gör att en icke önskvärd sändning i de närmaste kanalerna uppfattas som en störning av mottagaren. I Figur 3 illustreras hur en sändare påverkar en mottagare då sändaren sänder på en grannkanal. Två typer av interferenser uppstår, dels på grund av sändarens utombandsemission och dels på grund av mottagarens (begränsade) selektivitet.

Problemet med interferenser från ett annat radiosystem på grund av utombandsemission och mottagarselektivitet blir extra påtagligt då två system samgrupperas på en och samma plattform och ska operera i samma frekvensområde. Ett konkret exempel är när två likadana radiosystem placeras på en och samma plattform och de ska fungera samtidigt. Är radiosystemet dessutom ett modernt radiosystem för dataöverföring kommer trafik att skickas utan att användare trycker in push-to-talk knappen. Detta gör det svårt för användare att kontrollera att radiosystemen inte används på ett sådant sätt att de stör varandra.

Även om utombandsemission och mottagarselektivitet inte förändras drastiskt över tid, så är problematiken runt utombandsegenskaper ibland av dynamisk karaktär. Detta beror på att effekten av interferens avtar med avstånd mellan storkällan (i detta fall det system som sänder) och mottagare. Är grupperingen av radiosystem dynamisk, som ofta är fallet för mobila radiosystem, kan interferensen förändras med tiden. Även variationer i vågutbredningsmiljön bidrar till variationer i mottagen effekt av utombandsemission.

De typer av interferenser som illustreras i Figur 3, kan uppstå både för ett fixfrekvenssystem och för ett frekvenshoppande system i ett givet tidsögonblick. Problematiken finns därmed oberoende av om systemet är frekvenshoppande eller ej.

Det finns många sätt att hantera problematiken kring radiosystems utombandsegenskaper, ett är att konstruera sändaren på så sätt att nivåerna på utombandsemissionen hålls på låg nivå. Helst ska dessutom utombandssignalerna vara av bruskaraktär såsom AWGN (*Additive White Gaussian Noise*) och inte vara starkt impulsaktiga. Ett annat sätt är att hantera utombandsemissionen i mottagaren. I denna rapport redovisas några exempel av vardera angreppssätten.



Figur 3. Interferenser som uppstår på grund av utombandsemission och mottagarselektivitet i en mottagare som är samlokaliserad med en sändare.

Den begränsade möjligheten till bra antennplacering på plattformar och den begränsade spektrumtillgången gör att tuffare krav på utombandsemission måste ställas i framtiden. Standarder och vedertagna mätmetoder saknas för att säkerställa en viss nivå av prestanda hos ett radiosystem som är integrerat i en plattform, med andra ord funktionssäkerheten. Bara för att plattformen i sig själv uppfyller relevanta EMC-normer är det ingen garanti för att ett radiosystem kan uppnå förväntade radioprestanda i form av exempelvis räckvidd, dataakt och tillgänglighet efter att det integrerats på plattformen. På en plattform finns flertalet sändare och andra system som konkurrerar om antennplaceringar. Alla sändande och mottagande system på plattformen påverkar dessutom varandra sinsemellan i olika utsträckning. Detta är aspekter som inte löses helt av nuvarande EMC-standarder, vilket beskrivs kortfattat i Appendix A: Standarder för utombandsemission och spuriöser. Dessa standarder är i detta sammanhang inte tillräckliga eftersom de har ett annat syfte än att skapa förutsättningar för en viss funktionssäkerhet hos radiosystem. Befintliga standarder är heller inte anpassade för att säkerställa god kommunikationskvalitet vid samlokalisering av frekvenshoppande radiosystem som har tillgång till ett begränsat antal frekvenser. I ett sådant scenario måste systemen kunna använda intilliggande kanal utan att orsaka oacceptabla störningsproblem.

Generellt är dagens EMC-standarder därför inte tillräckliga för att garantera samexistens, och behöver anpassas och kompletteras med specifika krav på spektrummasker för att sambandssystemen ska leverera den efterfrågade funktionssäkerheten. Bland annat gäller detta nivåer och form på spektrummasker samt att dagens standarder inte hanterar påverkan från impulsaktiga utombandsemissioner.

2 Dynamisk resursallokering

I dynamiska scenarier, när plattformars grupperingar och användning av sambandsmedel varierar över tid, krävs också att tillgängliga radioresurser kan omfördelas dynamiskt. Det kan exempelvis innebära att

- tillgängliga frekvenser omfördelas mellan användare
- sändareffekt begränsas till behovet i varje situation för att minimera interferens mellan radiosystem
- kommunikationsvägar i nätverk kan uppdateras dynamiskt beroende på interferensmiljö och kanalutnyttjande
- tjänster kan omfördelas eller prioriteras mellan olika sambandsmedel.

Generellt är dagens standarder därför otillräckliga och behöver anpassas och kompletteras till den kravbild som föreligger för att sambandssystemen ska leverera den efterfrågade funktionssäkerheten. Bland annat gäller detta nivåer och form på spektrummasker samt att dagens standarder inte på något sätt hanterar impulsaktiga utombandsemissioner, se Appendix A: Standarder för utombandsemission och spuriöser.

2.1 Dynamisk frekvenshantering

Tillgång till enskilda frekvenser och frekvensområden är en förutsättning för att sambandssystemen ska leverera önskad förmåga. Detta kapitel behandlar ett urval av tekniker för förbättrat frekvensutnyttjande och minskade samlokaliseringsproblem, genom mer dynamisk frekvensallokering.

2.1.1 Allmänt om dynamisk frekvenshantering

Den bandbredd som kan användas av ett radiosystem skapar nödvändiga förutsättningar för datatakt, antalet användare och störtålighet. Försvarmaktens frekvenstillgång har ändrats med tiden och tyvärr även minskat. Därför är det önskvärt att radiosystemen är flexibla i sin frekvensanvändning för att på bästa sätt utnyttja tillgängligt frekvensspektrum.

Flera internationella forskningsprojekt har under de senaste åren arbetat med olika utmaningar kopplat till dynamisk frekvenshantering, exempelvis *Spectrum Collaboration Challenge* (SC2), *Radio Frequency Machine Learning Systems* (RFMLS), *Advanced RF Mapping* (Radio Map) och *Shared Spectrum Access for Radar and Communications* (SSPARC) finansierade av den amerikanska forskningsorganisationen *Defense Advanced Research Projects Agency* (DARPA), samt projektet *Multi bAnd Efficient Networks for Ad hoc communications* (MAENA) finansierat av EDA där även FOI deltar. Projektet MAENA fokuserar främst på dynamisk spektrumhantering mellan VHF- och UHF-vågorformer, med frågeställningar kring hur de tillgängliga frekvensbanden ska karakteriseras (*spectrum sensing*) samt hur de ska utnyttjas på bästa sätt. En stor utmaning inom MAENA är också hur detta ska hanteras i kommunikationsnät, vilken information som måste överföras, och hur den ska överföras mellan noder i nätet för att spektrumhanteringen ska fungera dynamiskt.

I valet av frekvens eftersträvas naturligtvis alltid att välja den frekvens som ger bäst prestanda. För att avgöra vilken frekvens som ger bäst prestanda, så måste det tydligt definieras vad som avses med bäst och vilket mått av prestanda som avses.

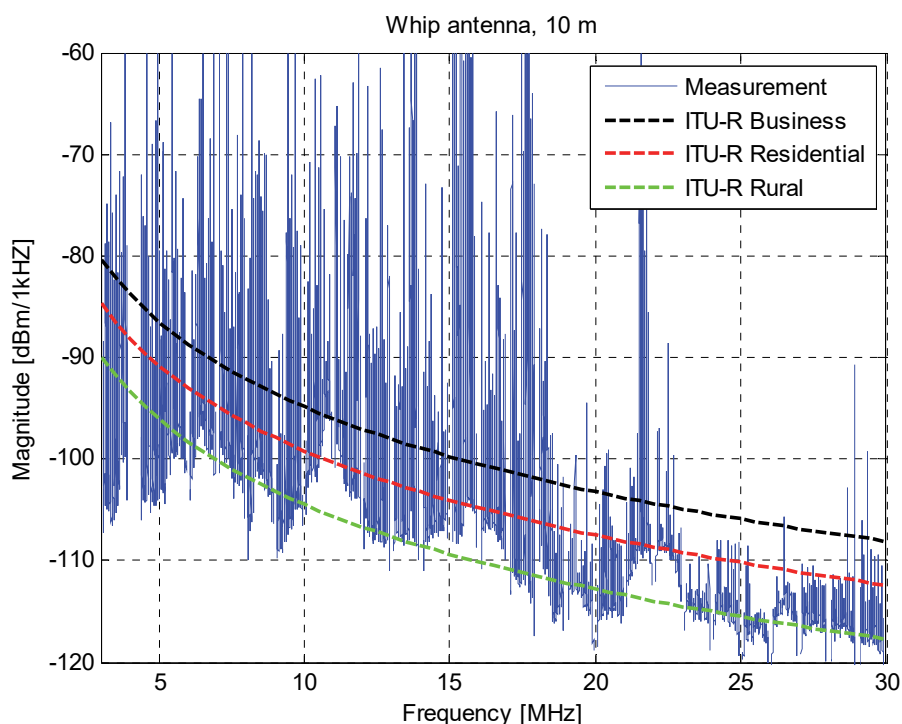
I kommande exempel används enbart bitfelshalt som mått på kommunikationsprestanda. I vissa tillämpningar kan andra mått, exempelvis kommunikationsavstånd, datatakt, fördröjning eller någon kombination av dessa vara mer lämplig. Olika prestandamått och olika definitioner av vad som är bäst kan ge olika uppfattning om vilken frekvens som är mest passande att använda. Även om det går att hitta den frekvens som är bäst att använda i något avseende, så är det alltså ändå en subjektiv bedömning eftersom det beror helt på i vilket avseende den är att betrakta som bäst.

2.1.2 Frekvensval baserat på lokal störningsmiljö

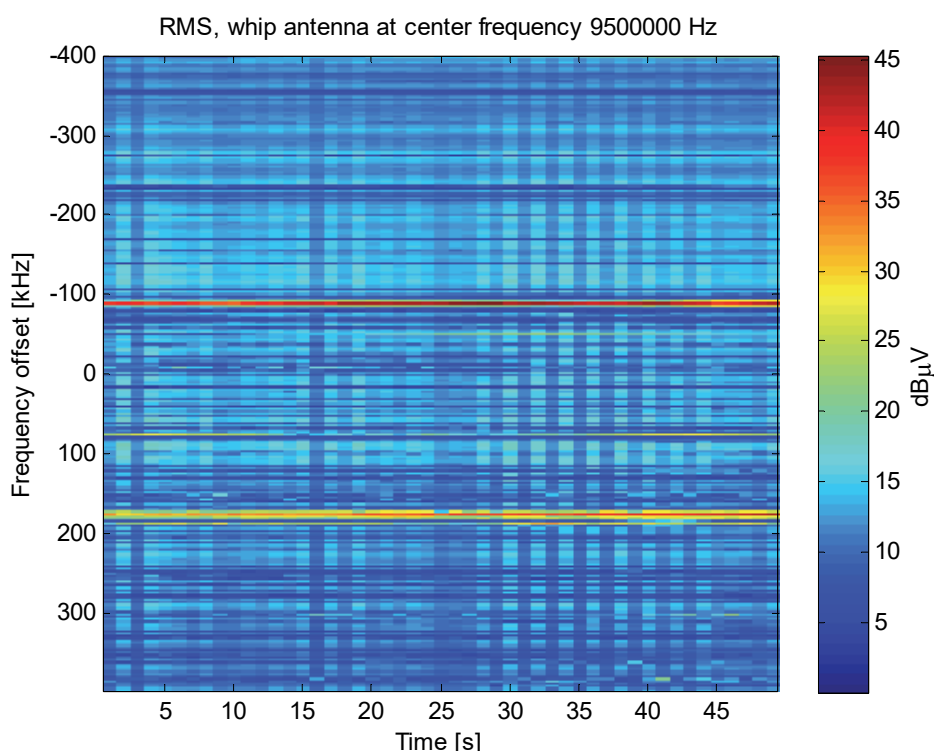
Vågutbredningsförhållanden och interferensmiljö hos en mottagare kan starkt påverka radiosystemets möjligheter att kommunicera. I dag sker automatiskt frekvensval i exempelvis HF2000-systemet. HF2000 genererar automatiskt en frekvenspool baserat på typsträckor och vågutbredningsprognoser för ett område. I projekten ROAM (2011-2013) och RICOM (2014-2016) studerades möjligheten att också ta hänsyn till den faktiska interferensmiljön på plattformar för att förbättra valet av frekvenser [4] [5].

2.1.2.1 Lokal störningsmiljö

Det har visat sig att den lokala störningsmiljön i många fall är mycket besvärlig på militära plattformar [6] [7]. Figur 4 visar exempel på hur den lokala störningsmiljön kan se ut på kortvågsbandet hos en marin plattform. I samma figur visas även nivåerna för ITUs kategorier för olika typer av störningsmiljöer: *Business*, *Residential* och *Rural*. Figuren visar att störningsnivåerna kraftigt överstiger ITU-R *Business* för ett stort antal frekvenser. Störningsnivåerna kan för vissa frekvenser överstiga ITU-R *Business* med över 30 dB. De allra högsta nivåerna kommer, på kortvågsbandet, normalt från andra avlägsna sändare men även den lokala störningsmiljön från plattformen kan överskrida ITU-R *Business* med 10-20 dB. Långväga signaler och den lokala störningsmiljön är två komponenter som inte tas hänsyn till vid traditionell prognostiserad prestanda för de olika frekvenserna.



Figur 4. Exempel på uppmätta störningsnivåer över kortvågsbandet på en militär marin plattform.

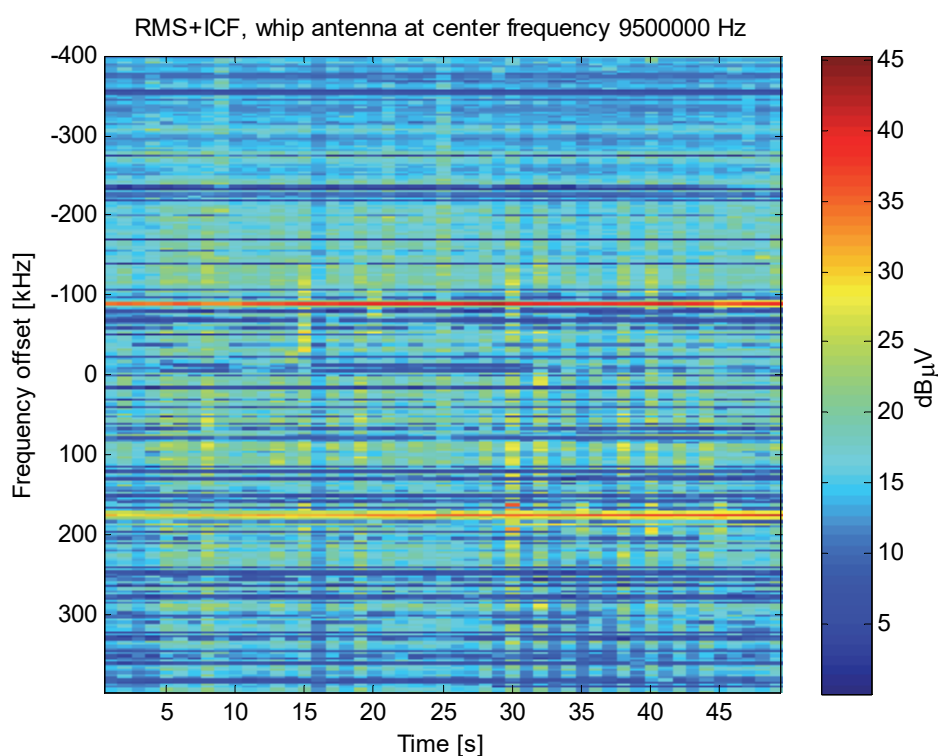


Figur 5. Medeleffekten under 1 sekund i taget, över 3 kHz-kanaler runt centerfrekvensen 9,5 MHz.

I Figur 5 visas ett exempel på hur störningssignalens medeleffekt (RMS-värde) varierar i tid. Störningens medeleffekt är beräknad över en-sekunds perioder och visas i detta fall för flertalet 3 kHz-kanaler där centerfrekvensen i figuren är 9,5 MHz. Störningssignalen uppvisar också ett kraftigt impulsaktigt beteende (vilket inte syns i figuren då signalen är medelvärdesbildad över en sekund). Eftersom störningssignaler som har ett impulsaktigt beteende ofta ger en mycket större radiopåverkan än icke impulsaktiga signaler har även den lokala störningsmiljöns impulsaktighet kartlagts.

Även vid samma medeleffekt, kan olika typer av störningar ge olika bitfelshalt i ett kommunikationssystem, beroende på störningens impulsaktighet. Med en *Impulsiveness correction factor* (ICF) [5] kan påverkan på bitfelshalten korrigeras baserat på störningens impulsaktighet. I Figur 6 har störningens medeleffekt korrigerats med ICF för dess impulsaktighet. Det är tydligt att den lokala störningsmiljön varierar kraftigt i både tid och frekvens. En analys av mätningarna visar att ICF ofta varierar mer än störningens effekt. Värden mellan 5 och 25 dB är inte ovanliga, vilket tyder på bitvis mycket impulsaktigt brus. Ett bra dynamiskt frekvensval är därför väsentligt för att upprätthålla kommunikation av god kvalitet. Att störningsmiljön kan variera kraftigt i tid och frekvens gör att det kan finnas stora förbättringar att hämta i kommunikationsprestanda genom ett förbättrat och framförallt mer dynamiskt frekvensval.

De redovisade mätningarna har gjorts på kortvågsbandet, men även på VHF- och UHF-området finns mätningar som tyder på att störningsnivåerna kan vara höga och varierande [6]. Det innebär också att metoder för att ta hänsyn till lokal störningsmiljö i valet av frekvens gäller för kommunikation på kortvåg såväl som på andra frekvensband, exempelvis VHF och UHF.



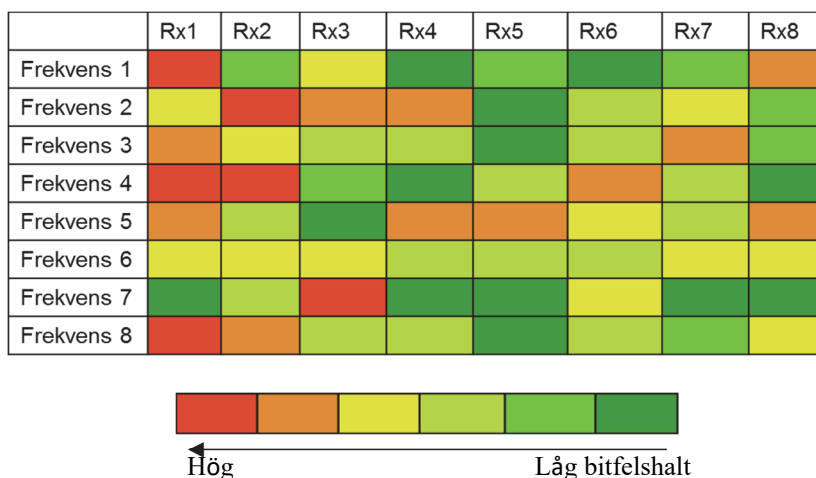
Figur 6. Summan av medeleffekten och korrigering för impulsaktighet under 1 sekund i taget, över 3 kHz-kanaler runt centerfrekvensen 9,5 MHz.

2.1.2.2 Dynamiskt frekvensval i unicast- och multicast-nät

Även när det finns information om hur den lokala störningsmiljön ser ut på de plattformar som ingår i ett nät, är frågan hur valet av frekvens ska ske. Vid *unicast*-trafik, d.v.s. kommunikation med en enskild mottagare, är situationen relativt enkel. Däremot vid kommunikation till flera mottagare i ett nät, s.k. *multicast*- eller *broadcast*-trafik, blir valet av frekvens mer besvärligt. Eftersom de olika radiomottagarnas interferensmiljö och vågutbredningsförhållande från sändaren för varje frekvens kan skilja sig åt, behövs ett beslutsriterium för vilken gemensam frekvens som ska väljas. Ofta måste en kompromiss göras, där det bästa valet av frekvens för systemet som helhet inte är det absolut bästa valet för alla enskilda mottagare.

I Figur 7 visas en principiell bild över hur mottagningsförhållandena kan se ut för de olika mottagarna Rx1-Rx8 på olika frekvenser 1-8. I exemplet varierar mottagningsförhållandena relativt mycket mellan de olika mottagarna och mellan de olika frekvenserna. Genom att exempelvis välja frekvens 7 kommer mottagarna att få lägst bitfelshalt i medel. Flera av mottagarna, Rx 1, 4, 5, 7 och 8, har mycket bra mottagningsförhållanden (låg bitfelshalt). Däremot har Rx3 väldigt dåligt mottagningsförhållande på frekvens 7, vilket skulle kunna innebära att Rx3 inte kan ta emot den utsända informationen. För att säkerställa att ingen av mottagarna får riktigt dåliga mottagningsförhållanden, illustrerat med röd eller orange, bör istället frekvens 6 väljas. Ett alternativt val kan vara att välja den frekvens som är bäst för en viss mottagare, t.ex. Rx1, om den av någon anledning är prioriterad. Det är en mycket enklare metod som bara kräver information från en mottagare, men som inte garanterar bra prestanda för samtliga mottagare.

En alternativ lösning kan vara att välja en frekvens som ger så stabila förhållanden som möjligt i form av liten variation av kanalkvaliteten mellan de olika användarna. I detta fall ska frekvenser väljas så att variansen (spridningen) hos felhalten är så låg som möjligt mellan de olika användarna.



Figur 7. Principiellt utseende över varierande mottagningsförhållande hos Rx1-8 över frekvenserna 1-8.

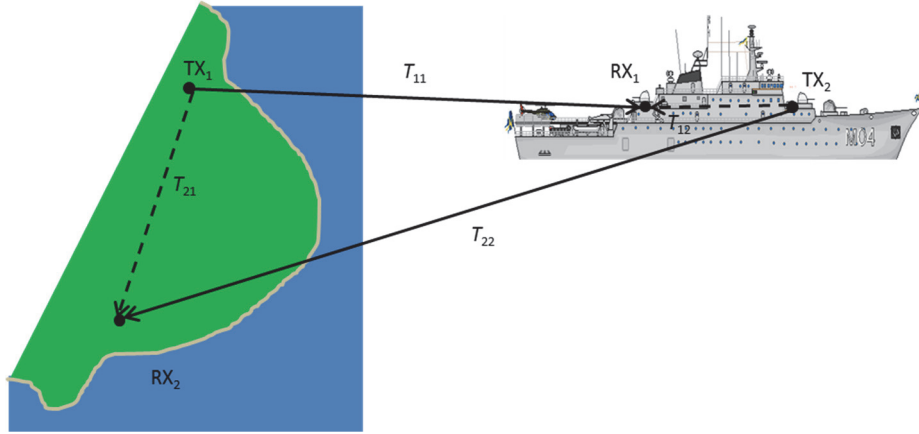
Sammanfattningsvis har Försvarsmaktens tillgängliga frekvensutrymme minskat till följd av ett starkt tryck från kommersiella intressen under de senaste åren, samtidigt som förbandens informationsbehov ökar. Det är därför av vikt att de frekvenser som finns tillgängliga för Försvarsmakten används så effektivt som möjligt. Dynamisk tilldelning av frekvensspektrum är en möjlig komponent för att uppnå effektivare frekvensutnyttjande och förbättrad samexistens för framtida militära kommunikationssystem. Det finns dock många kvarstående svårigheter för att på bästa sätt utnyttja tillgängliga frekvenser. Både möjligheter och svårigheter med dynamisk spektrumhantering är speciellt framträdande i dynamiska situationer. Frekvensanvändningen måste ta hänsyn till faktorer såsom tjänstebehov, interferenser, dynamik orsakad av plattformsförändringar och grupperingssituationer, störskydd och samexistens mellan flera system på en plattform.

2.2 Anpassad sändareffekt

Ett annat sätt att förbättra funktionssäkerheten i sambandssystem i dynamiska scenarier är att reglera uteffekten i radiosändare så att den är anpassad till rådande förhållanden. Detta avsnitt visar exempel på några olika användningsområden och vinster med anpassad sändareffekt.

2.2.1 Begränsning av interferens genom effektregering

Samtidig sändning och mottagning på samma plattform, eller på flera samgrupperade plattformar, skapar interferens mellan sambandssystemen. Detta gäller även om systemen är separerade i frekvens, beroende på radiosystemens utombandsegenskaper. I många fall används en radios högsta uteffekt trots att det inte är nödvändigt för väl fungerande kommunikation. I själva verket skapas högre interferensnivåer av att alla sändare alltid använder högsta effekt. Onödigt hög sändareffekt ökar dessutom riskerna för upptäckt och avlyssning av kommunikationen. I följande avsnitt visas exempel på hur utombandsinterferens kan minskas genom effektregering. Att reglera sändareffekten är särskilt viktigt i dynamiska scenarier. Minskad interferens ger bättre kommunikationsprestanda och bättre frekvensutnyttjande. En mer utförlig beskrivning finns i [5].



Figur 8. Illustration av signaldämpningen mellan två sändare TX₁ och TX₂, och två mottagare RX₁ och RX₂.

Betrakta två sändar- och mottagarpär, {TX₁, RX₁} and {TX₂, RX₂} i Figur 8, som kommunicerar samtidigt. Anta att mottagare RX₁ och sändare TX₂ är samlokaliserade på ett fartyg, och deras respektive sändare (TX₁) och mottagare (RX₂) är placerade på land enligt Figur 8. De heldragna pilarna visar signalvägen för de önskade kommunikationssignalerna, och de streckade pilarna visar signalvägarna för oönskad utombandsinterferens. I detta scenario är det stor risk att den utsända signalen från TX₂ interfererar med den önskade kommunikationssignalen i den samlokaliserade mottagaren RX₁. Låt T_{ij} beteckna kanaldämpningen mellan mottagare i och sändare j , och låt P_j beteckna effekten som emitteras av sändare j . Det innebär att mottagare i tar emot effekten $P_j T_{ij}$ från sändare j .

Mottagare RX _{i} påverkas förutom av utombandsinterferens också av termiskt brus, betecknat N_i . Signal-interferens-förhållandet (SIR), betecknat γ_i , definieras som kvoten mellan nytto signalens effekt och summan av effekt från interferens och brus,

$$\gamma_1 \triangleq \frac{T_{11}P_1}{T_{12}P_2 + N_1},$$

$$\gamma_2 \triangleq \frac{T_{22}P_2}{T_{21}P_1 + N_2}.$$

Anta att mottagare RX _{i} kräver ett minsta SIR, betecknat R_i , för att ta emot data korrekt, så att

$$\frac{T_{11}P_1}{T_{12}P_2 + N_1} \geq R_1,$$

$$\frac{T_{22}P_2}{T_{21}P_1 + N_2} \geq R_2.$$

Ekvationerna kan också skrivas som

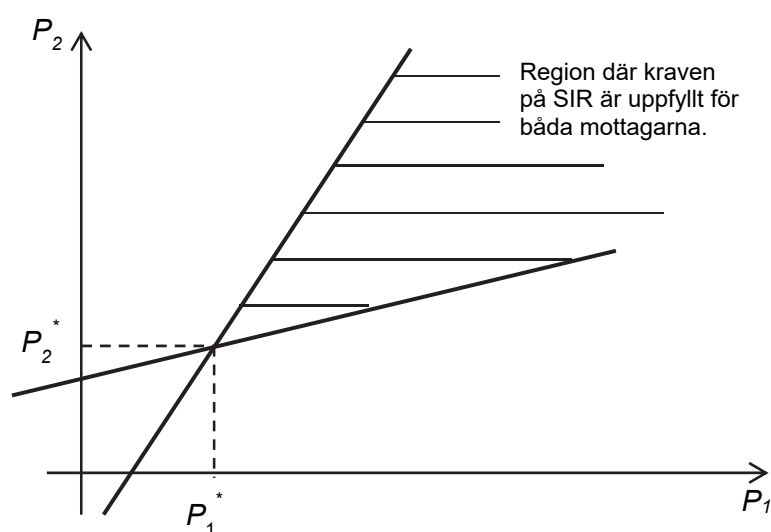
$$T_{11}P_1 - T_{12}R_1P_2 \geq R_1N_1,$$

$$T_{22}P_2 - T_{21}R_2P_1 \geq R_2N_2.$$

Baserat på dessa ekvationer, och i enlighet med [8], kan en övre och undre gräns för sändareffekten P_2 uttryckas som en funktion av sändareffekten P_1 genom

$$P_2 \leq \frac{T_{11}}{T_{12}R_1} P_1 - \frac{N_1}{T_{12}},$$

$$P_2 \geq \frac{T_{21}R_2}{T_{22}} P_1 + \frac{R_2N_2}{T_{22}}.$$



Figur 9. Illustration av regionen där båda mottagarna uppfyller kraven på SIR.

Den övre och under gränsen för sändareffekten P_2 som funktion av P_1 kan alltså illustreras som rätta linjer enligt Figur 9. De kombinationer av sändareffekter som uppnår kraven på SIR för båda mottagarna illustreras av det streckade området i figuren. Den minsta totalt utsända effekten ($P_1 + P_2$) betecknat (P_1^*, P_2^*) nås i skärningen mellan linjerna. All effekt högre än dessa ($P_1 > P_1^*$ och/eller $P_2 > P_2^*$) är alltså onödig eftersom kraven för tillförlitlig kommunikation är uppfyllda. En ökning av sändareffekt kan dessutom göra att SIR-kraven för den samlokaliserade sändaren inte längre uppfylls p.g.a. ökad interferens.

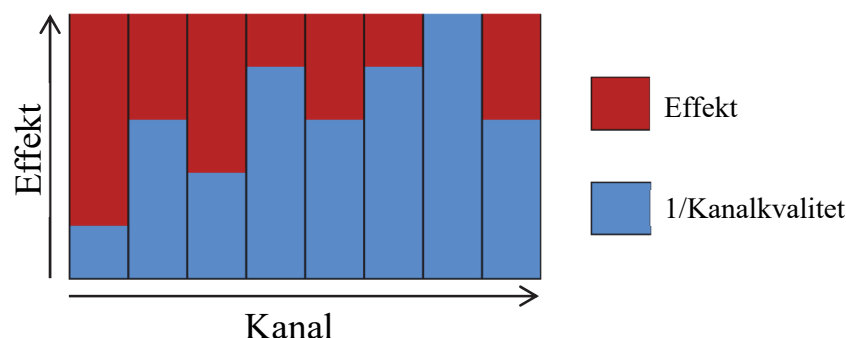
I dynamiska scenarier, där plattformar förflyttar sig och kanaldämpningen varierar är det särskilt viktigt att även effekten kan regleras dynamiskt. I verkligheten är det dock svårt att reglera effekten perfekt så att den totalt utsända effekten alltid minimeras. Dessutom krävs en viss marginal för att hantera snabba förändringar i störningsmiljö och kanaldämpning. I praktiken är det därför nödvändigt att öka sändareffekten något.

2.2.2 Fördelning av effekt på flera kanaler

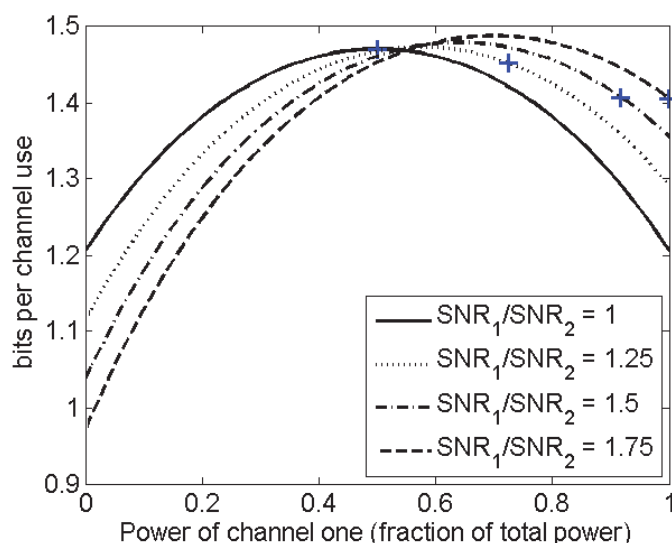
Inom senaste generationernas mobiltelefonisystem 4G (LTE) och 5G kan flera frekvensband utnyttjas samtidigt genom s.k. *carrier aggregation*. På så vis kan kommunikation ske över större bandbredd än vad som annars kan åstadkommas med ett sammanhängande frekvensband. Liknande tekniker har diskuterats även för bredbandig kortvågskommunikation (eng. *wideband HF*).

För att uppnå maximal datatakt vid kommunikation över flera kanaler bör utsänd effekt fördelas på bästa sätt över de olika kanalerna. Att fördela effekten jämnt på alla kanaler, ger i allmänhet inte högst total datatakt. Det är exempelvis väl känt att för Gaussiskt brus uppnås högst teoretisk datatakt (kanalkapacitet) genom att den tillgängliga effekten fördelas på kanalerna i relation till varje kanals signal-till-brus-förhållande (SNR), enligt s.k. *waterfilling* som illustreras i Figur 10. Det betyder att en större andel av effekten bör fördelas på kanaler med högre SNR. I allmänhet räcker det dock inte heller att enbart ta hänsyn till kanalernas SNR för att fördela effekten på bästa sätt. Om bruset är mer impulsaktigt måste hänsyn även tas till brusets impulskaraktär.

Figur 11 visar den totala datatakt som erhålls för olika fördelning av effekten på två kanaler, där bruset är impulsaktigt. Båda kanalerna har samma impulskaraktär, men olika SNR. Kryssen i figuren visar effektfördelningen för *waterfilling*, d.v.s. den fördelning som hade gett högst datatakt om bruset hade varit Gaussiskt. Figuren visar tydligt att varken lika fördelning av effekten eller *waterfilling* ger högst datatakt, förutom i specialfallet när kanalerna har exakt samma SNR (och impulsaktighet).



Figur 10. Traditionell metod att fördela effekt, utan hänsyn tagen till impulsaktighet.



Figur 11. Dataakt för olika fördelning av effekten i en impulsaktig störningsmiljö.

2.2.3 Sammanfattning av anpassad sändareffekt

I dynamiska scenarier varierar kanalkvalitet och störningsmiljö på olika frekvenser över tiden. För att utnyttja radioresurserna på bästa sätt och minska problem med samexistens i dynamiska scenarier, är det därför nödvändigt att allokera radioresurserna dynamiskt efter de varierande förhållandena, exempelvis genom dynamiskt frekvensval och anpassad sändareffekt på de använda frekvenserna.

2.3 Påverkan av utombandsemission i nätverk

Syftet med ortogonal frekvensallokering är att undvika interferens mellan noder eller nät som använder olika, ortogonala, kanaler. Tekniken innebär att flera, typiskt två, nät kan frekvenshoppa inom samma frekvensband utan att riskera använda samma kanal samtidigt, ortogonalt i tid- och frekvensledd. I praktiken förekommer dock alltid utombandsemission i någon utsträckning, vilket innebär att kanalerna inte längre är ortogonala. Denna delstudie inom KORINT-projektet har syftat till att försöka kvantifiera vilka effekter utombandsemission kan ha på nätnivå. Mer specifikt undersöks ortogonalt frekvenshoppande UHF-nät liknande bredbandsvågformen i Ra570. Tidigare studier har visat att effekterna kan bli stora på länknivå, i synnerhet för en länk på räckviddsgränsen för kommunikation [9]. Ra570 och liknande radiosystem använder dock återsändningar och paket skickas längs flera länkar på vägen till destinationen. I detta arbetet används därför nätverkssimuleringar med modeller för utombandsemission för att undersöka hur prestandan på nätnivå påverkas.

Det enda krav som finns att förhålla sig till för utombandsegenskaper hos bredbandig militär radioutrustning är MIL-STD 461 RE103/CE106 (se Appendix A: Standarder för utombandsemission och spuriöser). Dessa krav innebär att effekten på utombandssignaler ska vara dämpade 80 dB relativt centerfrekvensen för frekvenser 5% bort från centerfrekvensen. Vid en centerfrekvens på exempelvis 300 MHz börjar kravet gälla 15 MHz bort från centerfrekvensen. Inom dessa 15 MHz ryms 15 grannkanaler (för ett typiskt radiosystem med 1 MHz kanalbandbredd) för vilka utombandseffekten inte är kravställd. Resultaten i [9] visade vidare att även om dämpningen antas vara 80 dB även inom $\pm 5\%$ från centerfrekvensen, påverkas samlokaliserade radiosystem av utombandssignalen.

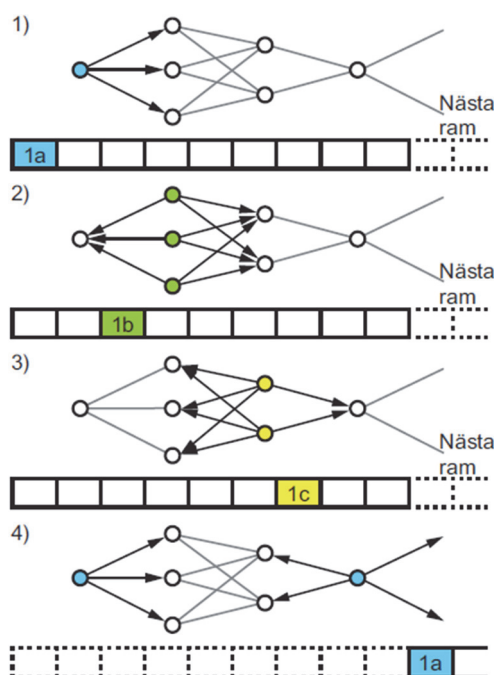
Att enstaka länkar kan drabbas är tydligt från de beräkningar och simuleringar som presenterats i [9]. Nästa fråga är vilken påverkan utombandsemissionerna får i ett nät där data skickas över flera länkar. De data som skickas i dessa nät är i huvudsak av typen *en-till-många (broadcast/multicast)* och därför används nätverksprotokoll anpassade för denna typ av trafik. FOI har tidigare studerat effekten av utombandsinterferenser i ortogonalt frekvenshoppande nät för två sådana nätverksprotokoll och detta finns redovisat i två konferensbidrag, [10] och [11]. De två konferensbidragen finns beskrivna och jämförda på svenska i [12]. I [10] analyseras MPR-flödning (*Multi Point Relay*) och i [11] synkroniserad kooperativ broadcast (SKB). Båda protokollen utnyttjar omsändningar över flera länkar vilket i varierande grad hanterar effekterna av utombandsinterferenserna. Båda protokollen klarar att behålla en hög andel levererade paket vid höga nivåer på utombandsinterferenserna. För MPR-flödning bidrar dock utombandsinterferenserna till minskad kapacitet för nyttotrafik då fler relänoder används vid ökande interferenser. SKB å andra sidan utnyttjar att alla noder kooperativt sänder vidare data och antalet relänoder påverkar inte kapaciteten för nyttotrafik. Däremot kan behovet av fler återsändningar leda till något ökad fördröjning. Vid en jämförelse av resultaten framstår SKB som bättre lämpat att hantera dålig länkprestanda på grund av utombandsegenskaper. Tekniker för kooperativa omsändningar, som SKB bygger på, används även i bredbandsvägformen i Ra570, vilket gör resultat för ett SKB-baserat protokoll särskilt relevanta.

I både [10] och [11] analyseras nät med hög förbundenhetsgrad, dvs. det finns många länkar och de flesta nodpar kan kommunicera direkt med varandra utan att utnyttja en relänod. I ett sådant scenario finns mycket redundans, i form av bra SNR och hög nätverksdiversitet, för att hantera utombandsemissionerna. Nätverksdiversiteten förstärks dessutom av att noderna rör sig enligt en slumpvandrande modell och därmed är relativt jämnt spridda över det geografiska området som nätet verkar inom.

I denna studie analyseras ett SKB-baserat system för ett scenario som inte är lika välförbundet som scenariot i [10] och [11] för att se om utombandsemissionerna kan få större effekter på nätnivå i ett mer relevant militärt scenario.

2.3.1 Synkroniserad kooperativ broadcast

Synkroniserad kooperativ broadcast (SKB) är en teknik för att effektivt distribuera broadcast-trafik i mobila ad hoc-nät. Kooperativ reläteknik används tillsammans med en tidluckestruktur för att på ett effektivt sätt förmedla trafik. Alla noder som tar emot ett nytt paket skickar vidare det samtidigt i en gemensam tidlucka. Grundprincipen för hur paketförmedlingen sker illustreras i Figur 12, där tre tidluckor används per källsändning. I exemplet kan en tredjedel av kapaciteten användas för att skicka nyttotrafik medan två tredjedelar används för vidareändningar. Detta förhållande är fixerat när antalet tidluckor, som är en systemparameter, har bestämts (typiskt valt till fyra tidluckor). Detta skiljer sig från många andra protokoll som adapterar antalet relänoder över tiden, vilket leder till en varierande kapacitet för nyttotrafik. Adaptionen kräver dock en icke försumbar mängd kontrolltrafik och i de flesta mobila nät är ett SKB-baserat protokoll att föredra. För en mer detaljerad beskrivning av SKB rekommenderas [13].



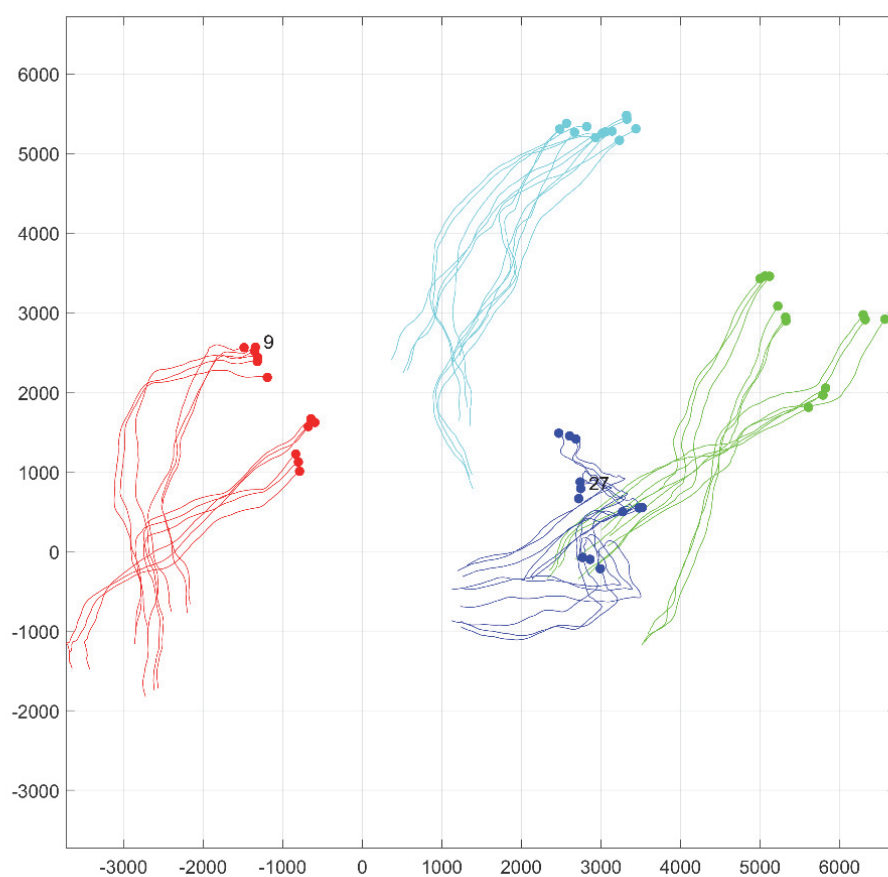
Figur 12. Exempel på hur ett paket sänds vidare i SKB.

2.3.2 Scenario

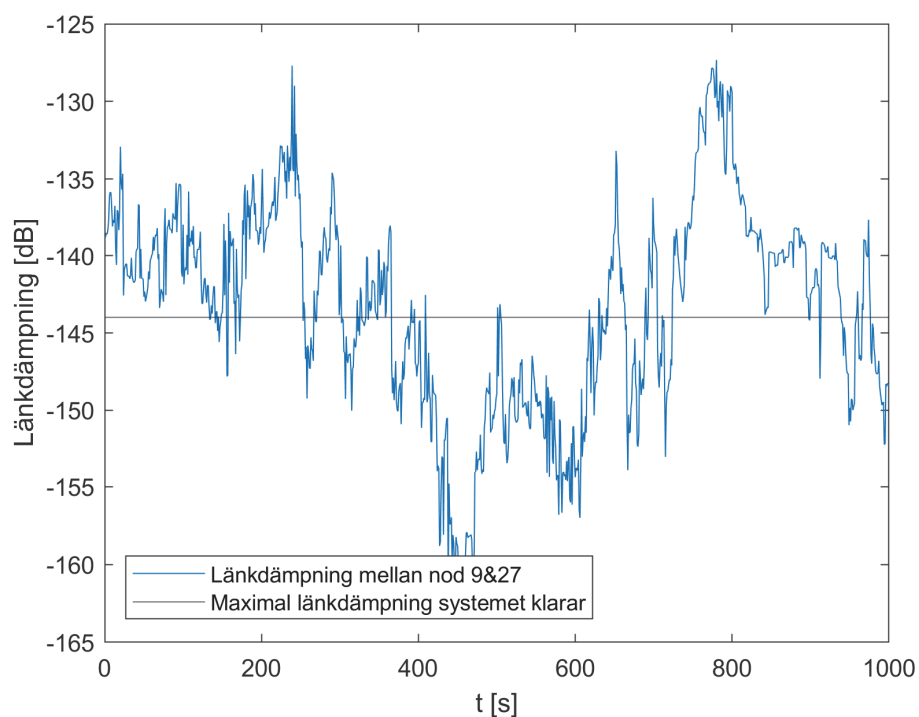
I scenariot som undersökts rör sig noder i grupper motsvarande kompanier. Två ortogonala UHF-nät frekvenshoppar ortogonalt inom samma frekvensområde. Alla noder (fordon) är med i och sänder och tar emot i det ena nätet. Ett fåtal av noderna har två samlokaliserade nät på sitt fordon: dels nätet som alla noder är med i och dels ett nät som enbart ett fåtal noder är med i. Detta scenario kan exempelvis realiseras vid sammanbindning av bataljoner inom en brigad. Ett mindre antal fordon skulle då behöva förmåga att kommunicera både i bataljonlednings- och brigadledningsnät och ett möjligt sätt att hantera detta på är med två Ra570 på en plattform och där dessa hoppar ortogonalt inom samma frekvensband.

Rörelsemönstren för fordonen i scenariot visas i Figur 13. Rörelserna är beräknade med en gruppmodell [14]. Färgerna representerar olika kompanier. Varje kompani består av fyra grupper om tre noder vardera. Strecken anger hur noderna rör sig under scenariots gång. De två noderna som kommunicerar i bägge näten är markerade i figuren med respektive nodnummer. De fordon som är bestyckade med samlokaliserade radiosystem är som grundförutsättning nod 9 och 27 i figuren (rött respektive blått kompani). Rörelsemodellen är baserad på den gruppmodell som togs fram vid kravställningen av Ra570 [14]. Länkdämpningar mellan noderna är beräknade med FOIs vågutbredningsmodellpaket detvag90 för ett terrängområde i Skåne. Noderna 9 och 27 är valda för att få ett kommunikationsscenario där de noder som riskerar störas befinner sig på räckviddsgränsen för radiosystemet. I Figur 14 visas hur länkdämpningen varierar mellan dessa två noder under scenariots gång. Det är stora variationer över tid, på grund av att noderna rör sig genom en terräng.

De två noderna som valts har en länkdämpning som över tid är närmast räckviddsgränsen, totalt sett är länkdämpningen över räckviddsgränsen ca 60% av tiden. För att undersöka hur effekterna av utombandsegenskaperna förändras när fler noder bestyckas med samlokaliserade radiosystem undersöks även ett antal fall där fler än två noder deltar i båda näten.



Figur 13. Scenario som simulerats. Avstånd anges i meter.



Figur 14. Länkdämpning mellan noder med samlokaliserade radiosystem över scenariot. Den maximala länkdämpningen som radiosystemet klarar med använda parametrar är markerat.

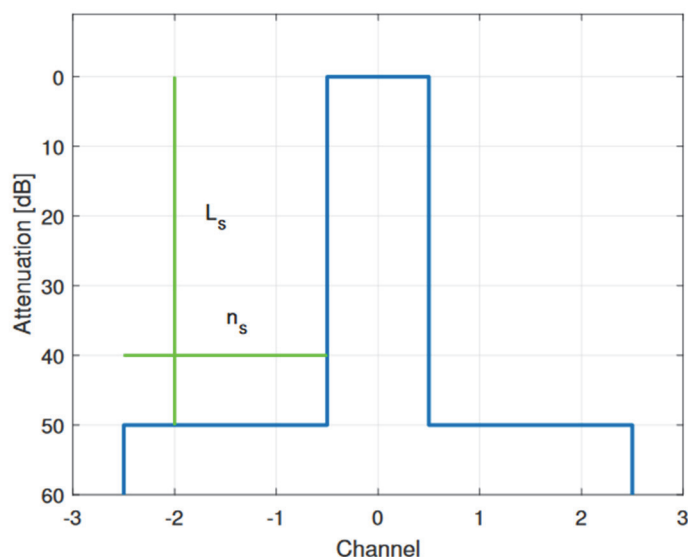
2.3.3 Modell för utombandsegenskaper

Samma modell för spektrum hos en sändare med utombandsegenskaper som användes i [9] och [10] används i denna studie. I Figur 15 återges en schematisk skiss av modellen för sändarens frekvensspektrum från [9]. Modellen medger att sändarens effekt sprids symmetriskt på ett antal kanaler på vardera sidan om den huvudsakliga kanalen, där varje kanal har samma bandbredd som kommunikationskanalen. Det går att simulera en rad olika sändarspektrum genom att variera de två parametrarna

- L_s , dämpningen mellan huvudkanalen och sidokanalerna. Observera att alla sidokanaler dämpas lika mycket.
- n_s , antalet sidokanaler på vardera sida huvudkanalen.

Den totala bandbredden som de ortogonala näten kan hoppa inom kan också varieras i form av det totala antalet kanaler. En begränsning med denna modell är att alla kanaler antas ligga inom ett kontinuerligt band. Detta innebär ett värsta fall i termer av utombandsinterferenser. I praktiken kan de frekvenser som en radio tillåts hoppa på ligga utspridda över ett större band vilket kan ge ett visst ”skyddsavstånd” mellan kanalerna.

Vidare antas isolationen mellan antennerna på en plattform vara 30 dB, i likhet med vad som antagits i tidigare studier [12]. Om isolationen i praktiken är sämre leder det till en ökad påverkan från utombandsemissionerna.

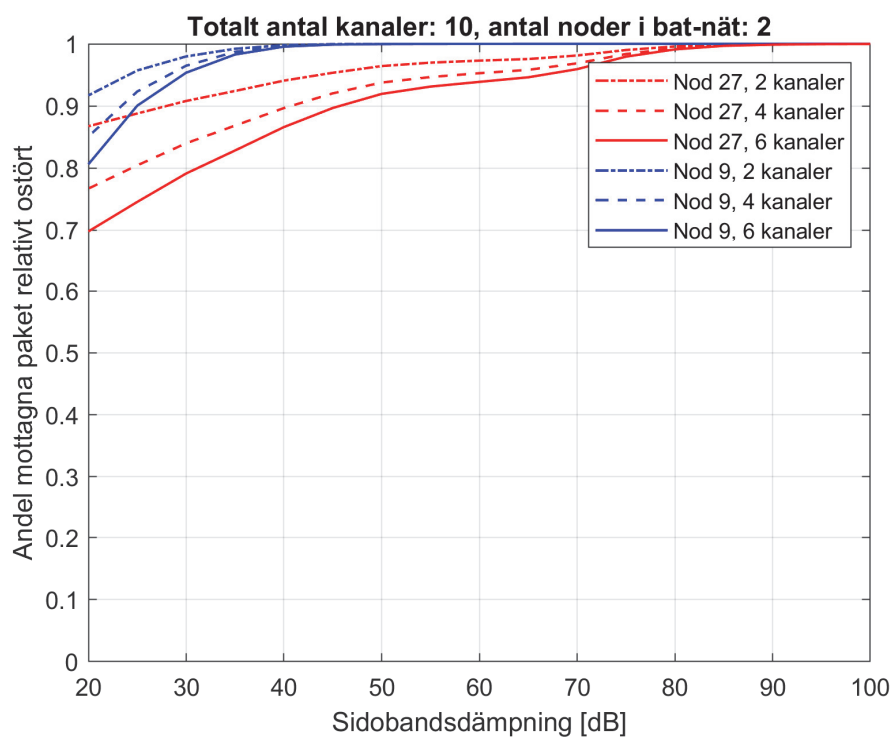


Figur 15. Modell för sändarspektrum med utombandsegenskaper.

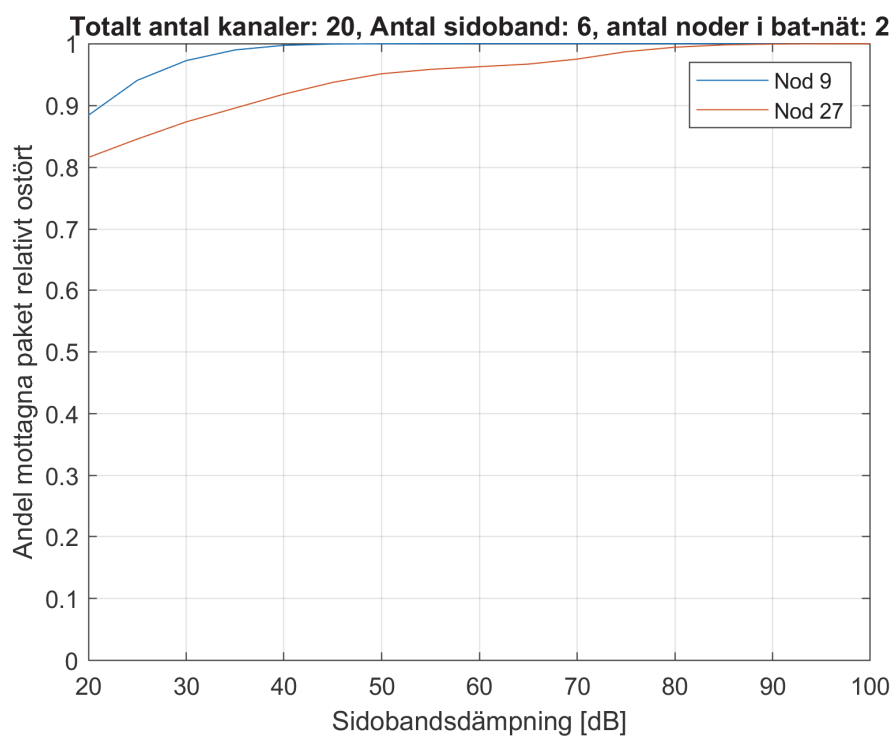
2.3.4 Resultat

Resultaten presenteras som kvoten mellan hur många paket som kommer fram vid en viss nivå av utombandsstörning relativt ett helt ostört fall. I ett fall visas resultatet som andelen mottagna relativt totalt antal sända paket. Tidigare resultat [12] har visat att utombandsemissioner även kan ge en viss ökning av fördröjningen i SKB-nät, dock är ökningen mycket liten. Fördröjning undersöks därför inte.

I Figur 16 till visas resultat för ett scenario i vilket de två näten har totalt 10 kanaler att hoppa på. Antalet sidoband på vardera sidan om sändarens kanal är 6, 4 respektive 2 i de tre kurvorna. Resultaten presenteras för de båda noderna och som synes är inte effekterna symmetriska, överlag tappar nod 27 fler paket. När sidobandsdämpningen överstiger 80 dB (vilket motsvarar kravet i CE106/RE103 ± 5 % ut från centerfrekvensen) är effekterna försumbara. Vid lägre sidobandsdämpning är paketförlusten från ett par procent upp till ca 30 procent i det värsta fallet (20 dB dämpning).



Figur 16. 10 kanaler totalt, 6 sidoband.



Figur 17. 20 kanaler totalt, 6 sidoband.

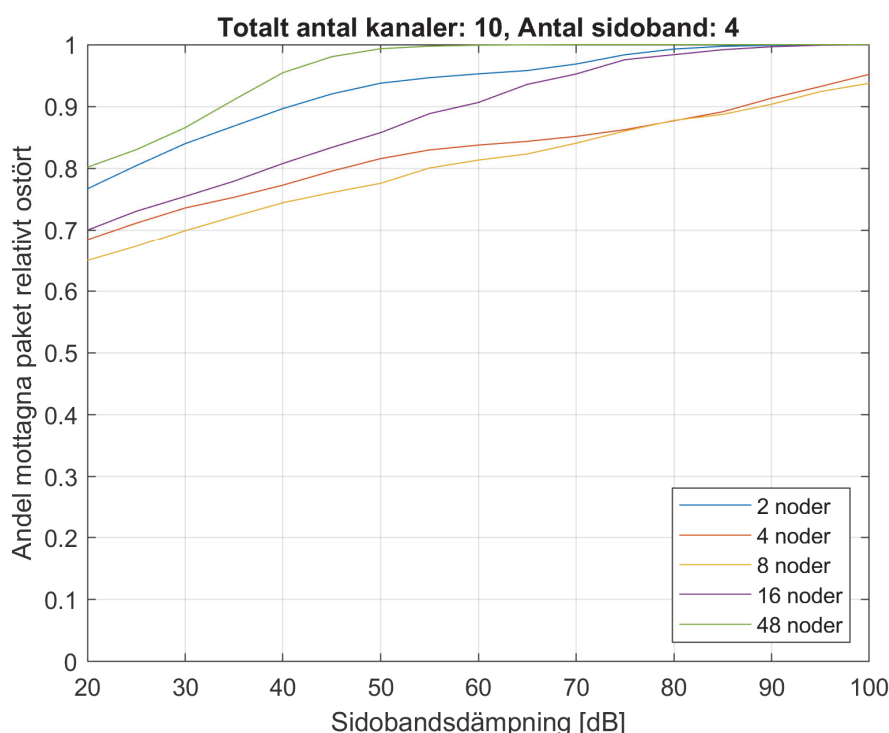
Ökar det totala antalet användbara kanaler att hoppa på till det dubbla minskar naturligt effekten av utombandsemissionerna, se Figur 17 (jämfört med heldragna kurvor i Figur 16).

Hittills har enbart två noder förutsatts ha samlokaliserade radiosystem då dessa noder antagits vara någon form av ledningsfordon. I och med att det bara är två noder erhåller sändningar mellan noderna ingen nätverksdiversitet från SKB-protokollet, då det inte blir några omsändningar. En åtgärd för att öka robustheten för den utsatta länken är att öka antalet fordon som deltar i bägge näten för att erhålla vinster från omsändningar. Detta kan dock leda till andra problem eftersom det kräver att fler fordon bestyckas med ytterligare radiosystem och tillhörande antenner med de integrationsproblem och kompromisser det innebär.

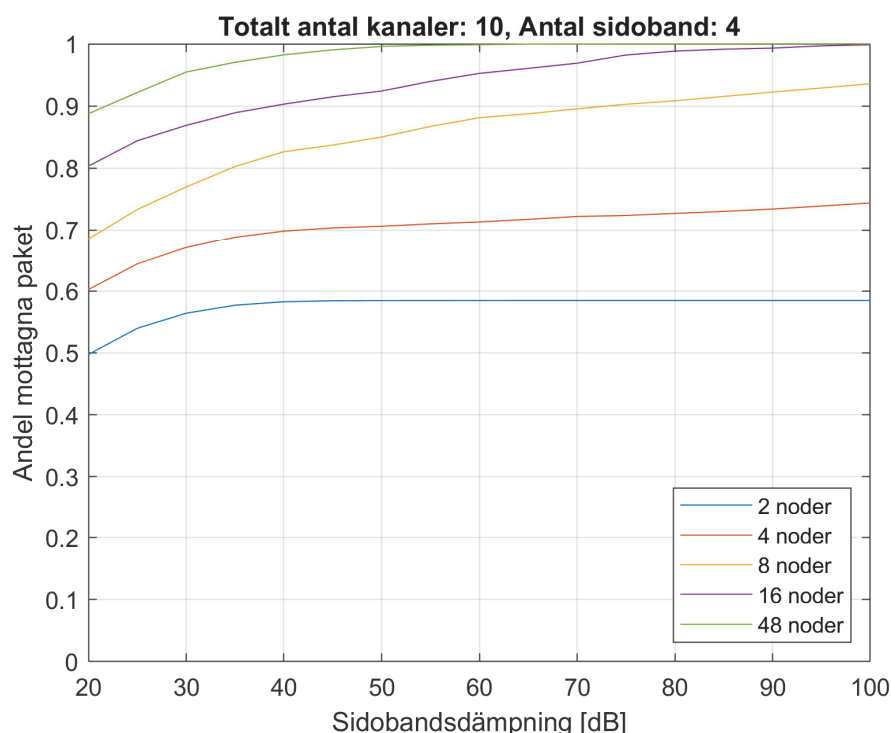
En faktor som gör resultaten lite svåranalyserade är det faktum att de ytterligare fordon som bestyckas med samlokaliserade radiosystem har länkar till nod 9 och 27 som fådar oberoende av länken mellan nod 9 och 27. Prestandan i det ostörda fallet är därför bättre med fler aktiva noder även i det ostörda fallet, på grund av omsändningar och ökad nätverksdiversitet.

I Figur 18 visas andelen paket som tas emot av nod 27, relativt det ostörda fallet, för olika antal reläande noder. När antalet noder ökar från 2 till 4 och vidare till 8 förefaller andelen paket som kommer fram minska. Då antalet noder ökar ännu mer börjar dock den relativa mängden paket som kommer fram att öka. För att förstå resultaten visas även antalet paket som kommer fram delat på det totala antalet sända paket i Figur 19.

Från dessa resultat framgår det att det totala antalet paket som kommer fram ökar med ökande antal noder. Då bara två noder är involverade når aldrig mer än ca 60% av paketen fram vilket beror på länkdämpningens variation (se Figur 14). Vid 16 eller fler noder kommer alla paket fram i det ostörda fallet.



Figur 18. Antal mottagna paket relativt ostörda fallet för olika antal reläande noder.



Figur 19. Antal mottagna paket relativt antalet sända paket för olika antal reläande noder.

Anledningen till ovanstående beteende kommer av hur SKB-protokollet är konfigurerat och fungerar samt att noderna rör sig i grupp. För att få problem från utombandsstörning i fallet med bara två noder krävs i princip att nod 9 försöker ta emot ett paket från nod 27 (eller vice versa) på nätet som bara de kommunicerar på samtidigt som nod 9 sänder ett paket i nätet som alla noder är med i. Risken för detta är $1/(\text{antalet noder})$ eftersom tidluckorna i det nätet antas vara jämnt fördelade mellan alla noder.

I fallet med fler än två noder ökar, i det ostörda fallet, andelen levererade paket på grund av omsändningar. I huvudsak är det en omsändning som sker. För att denna omsändning ska störas krävs att nod 9 tog emot ett paket från någon nod i dess närhet på nätet alla noder är med i, tidluckan innan. Den kommer då, enligt SKB-protokollet, alltid att sända vidare det paketet. Det är med andra ord mycket större risk att den utsatta noden försöker sända och ta emot i den andra tidluckan (omsändningen) än i den första. Detta förklarar varför fler paket tappas relativt det ostörda fallet när antalet reläande noder ökar. Däremot tas fler paket emot i absoluta tal, vilket ses i Figur 19. Med ett tillräckligt stort antal noder som reläer blir dock vinsten från nätverksdiversiteten så pass stor att denna väger över. Dessa resultat beror till del på de antaganden som gjorts kring hur resurserna fördelas i de två näten och ska inte ses som exakta siffror utan snarare som ett möjligt utfall.

2.3.5 Slutsatser

I ett relevant militärt scenario visar nätverkssimuleringar att utombandsemissioner kan ge problem på nätnivå då ortogonala nät används för att hantera flera bredbandiga nät på en plattform. Utombandsemissionerna orsakar problem om det ena nätet enbart består av ett fåtal noder som är spridda över en stor yta. Ett konkret exempel är ledningsfordon bestyckade med två Ra570, där den ena används för brigadledning och den andra för bataljon/kompaniledning. Genom att tillföra fler fordon med dubbla radiosystem ökar nätverksdiversiteten, vilket minskar påverkan från utombandsemissioner på nätnivå. Det kan dock krävas ett relativt stort antal extra fordon med dubbla vågformer för att erhålla full potential från den kooperativa flödningen. Detta kan dock leda till ökade integrationsproblem på dessa plattformar samt en ökad kostnad.

Vilken typ av nätverksprotokoll som används påverkar i hög grad hur pass känsligt nätet är för utombandsemissioner. Den jämförelse som gjordes i [12] visade exempelvis att MPR-flödning påverkades i klart större grad än SKB, huvudsakligen i form av minskad kapacitet.

En annan faktor som påverkar resultaten i hög grad är isolationen mellan antennerna. I denna studie har vi i linje med tidigare studier ansatt en isolation på 30 dB. Om en plattform i praktiken har sämre antennisolation leder detta till ökad påverkan från utombandsemissioner.

Slutligen har utombandsemissionerna modellerats som Gaussiskt brus. Som beskrivits tidigare kan interferens ha större påverkan på samlokaliserade mottagare om karaktären på störningen är mer impulsaktig.

2.4 Tjänstehantering

Tjänstehantering är inte direkt en uppgift som projekt KORINT ska studera. För att få ett helhetsgrepp på problematiken kring robust trådlös telekommunikation måste dock även andra faktorer än de teknikrelaterade beaktas, exempelvis hur olika tjänster hanteras. Detta beskrevs i termer av statiska åtgärder i [2]. Nedan upprepas endast de åtgärder som på något sätt är av dynamisk karaktär. Åtgärder gällande tjänstehantering kan vara några av följande:

- dynamisk kapacitetstilldelning, baserad på behov
- dynamisk prioritering av sambandstrafiken
- design av informations- och ledningssystem så att de kan fungera vid kraftigt varierande överföringsprestanda, t.ex. genom att dynamiskt växla mellan satellitkommunikation (satkom) och kortvåg (HF).

I det senare fallet medför den stora skillnaden i t.ex. datatakt och fördröjning mellan de olika systemen att en tätare integration mellan systemen är svår att realisera. Det har medfört att det saknas bra metoder att hantera en dynamisk interaktion mellan HF och satkom. Inom EDA¹ pågår för närvarande diskussioner om att under 2021 starta ett projekt, med titeln *Long Range Communications (LRC)* för att försöka hitta metoder att förbättra detta. I detta fall är det främst bredbandig HF som avses och i projektet ingår bland annat att studera (dynamiska) interferenshanteringsmetoder på HF med användandet av olika typer av HF-nät (mesh eller centraliserade system). På satellitsidan avses studier genomföras rörande automatisk interferensundertryckning och dynamisk (policybaserad) kanalplanering. På den övergripande delen ska metoder för sömlös transmission (dynamisk routing, prioritet, etc.) över en länk som består av bredbandig HF och satkom studeras. Sverige deltar för närvarande inte i projektet men förhoppningen är att resultaten ändå ska bli tillgängliga. Sådana resultat är mycket användbara för att bygga ett robust framtida kommunikationsnät för långgräckviddig kommunikation som kan hantera dynamiska scenarier och interferenser.

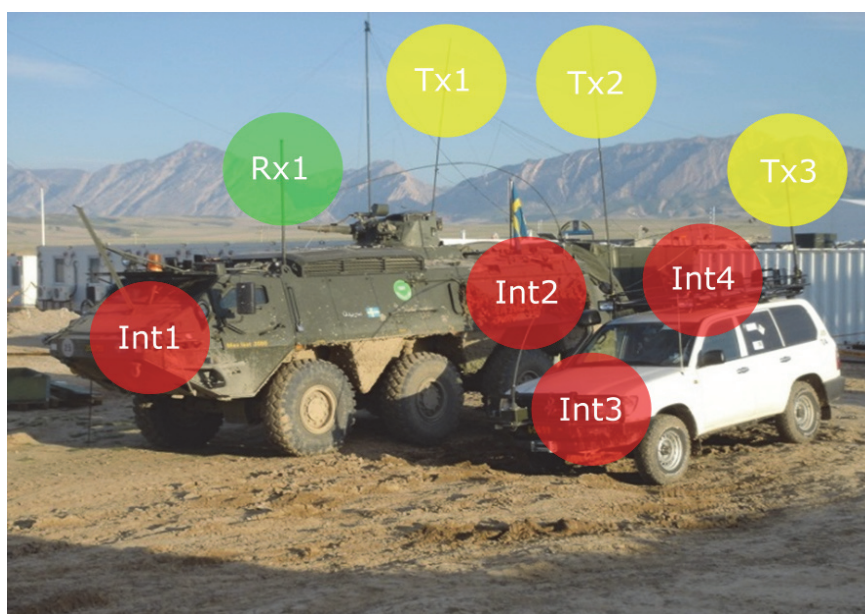
¹ EDA=European Defence Agency.

3 Adaptiva sändar- och mottagartekniker

Moderna militära plattformar består av många elektroniska system och komponenter. Det brus som tas emot av i mottagare är en samverkan av interferens från elektroniska komponenter på plattformen och i omgivningen. Denna typ av brus har ofta en betydligt mer impulsiv karaktär jämfört med det termiska bakgrundsbruset [15]. Sändare och mottagare placerade på militära fordon är särskilt utsatta för impulsaktigt brus.

I Figur 20 är flera sändare (gulmarkerade Tx1-3) och en mottagare (grönmarkerad Rx1) lokaliserade ombord militära fordon. Dessa komponenter påverkas av ett antal olika interferensskällor (rödmarkerade Int1–4) som uppkommer till följd av bland annat interferens från olika elektroniska komponenter och system som dynamiskt slås av och på, plötslig elektromagnetisk interferens från en bilmotor som startar eller övrig, statisk interferens. En sådan elektromagnetisk miljö ställer krav på vad militäranpassade kommunikationssystem bör klara av, och det finns mycket att vinna på att anpassa system efter brusets karaktäristik.

I verkligheten förändras interferensmiljön över tid och rum. Metoder för att hantera varierande interferensmiljöer är också användbara för fordon som förflyttar sig mellan till exempel lantlig- och stadsmiljö.



Figur 20. Möjliga elektriska och mekaniska interferensskällor. Foto: P-O Eriksson FMV.

3.1 Adaptiv demodulation och avkodning

Moderna mottagares prestanda riskerar att påverkas drastiskt av impulsaktiga interferenser. För att förbättra mottagarens prestanda kan mottagaren istället anpassas efter brusets aktuella karaktär. Det är därför nödvändigt att bedöma vilken sorts elektromagnetisk störningsmiljö som omger systemet. Tidigare forskning har visat hur mycket som kan vinnas när hänsyn tas till interferensmiljön [16]. Prestandaförbättringen kan resultera i fördubbling av räckvidd och betydlig skillnad i avkodningskvalité i svåra situationer. Det finns ett antal brusmodeller som är konstruerade för att beskriva impulsaktiga scenarier. De viktigaste och mest etablerade är Middletons Class A modell [17] samt den Symmetrisk α -Stabila modellen, vanligtvis refererad till som α -Stabil eller endast förkortat S α S [18]. Båda modellerna förklaras mer genomgående i Appendix B: Brusmodeller

Detta avsnitt handlar om att anpassa mottagare genom klassificering och estimering av impulsrikt brus för att förbättra prestandan i interferensmiljöer av varierande impulsaktighet. Arbetet har fokuserat på två olika delar där de två olika impulsmodellerna (Class A och SαS) används som bakgrundsprocesser för att generera brus, där både *estimering* och *klassificering* undersöks i miljöer tillhörande Class A-processer och endast *estimering* för fall i SαS-miljöer. Skillnaden mellan estimering och klassificering är att estimeringsanpassade tekniker beaktar brusmodellernas distinkta parametrar i okända miljöer och tanken med klassificering är att skilja mellan redan uppfattade miljöer. Inledande avsnitt i resultatsektionen handlar om Class A-fallet där två olika adaptiva metoder utvecklade för att utföra demodulering undersöks. Efterföljande avsnitt fokuserar på estimeringstekniker anpassade för SαS-modellen som används för att utföra demodulering.

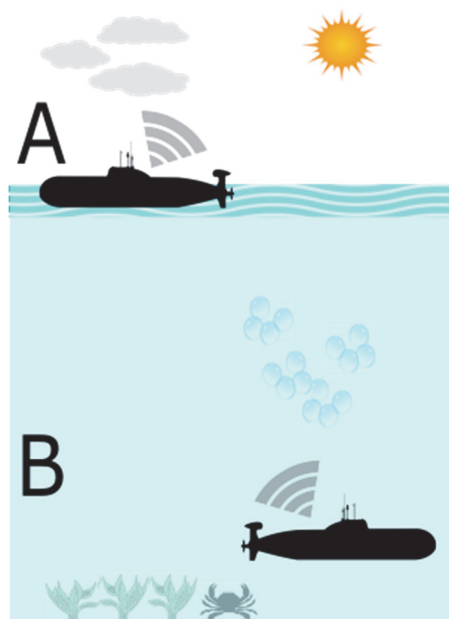
3.1.1 Parameterestimering

Miljöbeskrivningar av både Class A- och SαS-modellen är beroende av valet av modellparametrar. Med rätt val av parametrar kan i princip vilken miljö som helst beskrivas. Den fråga som måste besvaras är hur dessa parametrar kan väljas baserat på miljön som kommunikationssystemet befinner sig i vid ett givet tillfälle. Det har visats att parametrarna är direkt beroende av hur pass impulsaktig miljön är, så det uppenbara alternativet är att mäta upp miljön och hitta passande parametrar. Detta är möjligt genom estimering av miljöns parametrar. Med en viss estimeringsteknik kan rätt parametrar hittas för en given situation, men det tillför ytterligare komplexitet i mottagaren. En viss teknik är kanske bättre lämpad för en viss typ av situation och vissa kompromisser måste kanske göras om någon teknik inte är tillräcklig. För de olika brusmodellerna har totalt fem estimeringstekniker analyserats:

- Class A
 - Expectation–Maximization (EM) Algoritm [19].
- Symmetrisk α -Stabil
 - Empirical Characteristic Function (ECF) [20],
 - Fractional Lower-Order Moments (FLOM) [21],
 - Extreme-Order Statistics (EOS) [22],
 - Kvantilmetoden (Quant) [23].

Class A-modellen beskrivs i huvudsak av två parametrar, A och I . Mer information om parametrarnas betydelse samt modellen i helhet finns i Appendix B: Brusmodeller. Den metod som studerats för estimeringsproblem med Class A-modellen kan inte tillämpas direkt på en okänd störningsmiljö. Metoden kräver nämligen att en parameter av A eller I (alternativt parameterprodukten $K = AI$) är känd i förväg.

I arbetet har även Class A-modellen undersökts för tillämpning vid *klassificeringsproblem* där miljön kan antas tillhöra ett av två fall av väldokumenterade miljöer, det vill säga miljöer där det finns en bra uppfattning av hur interferensen ser ut. Exempelvis för en ubåt vid havsytan där interferensen till stor del består av atmosfäriskt brus som tenderar att vara impulsivt i sin karaktär. Under vattenytan är det atmosfäriska bruset kraftigt dämpat och därmed dominerar mottagarens termiska brus. Atmosfäriskt brus är väldokumenterat och ett system som adaptivt kan avgöra vilken brusmodell som bör tillämpas, baserat på om ubåten är över eller under ytan, sparar också både tid och prestanda (Figur 21). Ett system som kan avgöra i vilken situation en impulsiv modell bör appliceras vinner prestanda i den miljön och sparar även in beräkningskraft genom att applicera normalfördelningen i situationer som inte kräver något mer komplicerat [24].



Figur 21. Varierande brusmiljö. Ubåt vid ytläge respektive u-läge.

De fyra estimeringstekniker baserade på S α S-modellen som undersökts i arbetet kräver ingen information om miljön i förväg. Det betyder att metoderna är kapabla att hitta rätt parametervärden oavsett störningsmiljö. Metoderna presterar olika bra beroende på hur miljön ser ut, hur många sampel som finns tillgängliga för att utföra estimeringen samt hur komplexa beräkningarna blir, så det är av intresse att studera ett antal olika metoder. Den symmetrisk α -Stabila modellen tillämpas av den anledningen i detta arbete vid *estimeringsproblem*. Framförallt är estimering av intresse i just dynamiska situationer där miljön förändras gradvis eller plötsligt. Förflyttning från en lantlig omgivning där brusmiljön antas vara relativt enkel, mot ett tätbebyggt samhälle med gradvis ökande mängd elektroniska system och därmed potentiella storkällor resulterar i en annan typ av interferensmiljö. Estimeringstekniker som kan appliceras utan tidigare kännedom i den typen av dynamiska situationer är därför av stort intresse.

3.1.2 Adaptiv demodulation för Class A-anpassade tekniker

En stor del av arbetet med adaptiva mottagare i projekt KORINT fokuserar på att tillämpa Class A-modellen för klassificerings- och estimeringsproblem för att undersöka hur ett system anpassat efter den ena adaptiva tekniken presterar jämfört med den andra. Centralt finns begreppet *modulation* som syftar på hur signalen manipuleras för att bära information. Med *demodulation* menas hur signalen hanteras på mottagarsidan baserat på den miljö den adaptiva mottagaren upplever. Det är alltså demodulationen som anpassas efter brusets karaktär. Anpassningen görs genom att beräkna sannolikheterna för de mottagna symbolerna baserat på bruskaraktäriseringen, och använda denna information som ingångsvärde för felrättande avkodning.

I Class A-fallet undersöks två demodulationstekniker baserade på antingen estimering eller klassificering. Dessa metoder jämförs med tre icke-adaptiva, klassiska metoder för att utföra demodulering.

I simuleringarna skickas en modulerad signal i en brusig miljö. Bruset växlar slumpmässigt mellan att vara normalfördelat och impulsaktigt. Den mottagna signalen består av summan av den modulerade signalen och bruset.

I simuleringarna antas att en känd signal skickas återkommande (t.ex. för synkronisering och kanalestimering) vilket innebär att den kan subtraheras från den mottagna signalen för att komma åt de brussampel som används för att utföra klassificering och estimering av brusfördelningen.

De demoduleringstekniker som utvärderas är

1. adaptiv via klassificering
2. adaptiv via estimering
3. standard normalfördelning (märkt 'Gauss' i resultatfigurer)
4. fix Class A med kända parametrar
5. normalfördelat med limiter
6. genie.

Fall 1. Tanken med klassificeringen är att skilja mellan två olika interferenssituationer. Den aktuella miljön tillhör ett av två kända fall där det ena motsvarar en impulsiv Class A-process och den andra är ett scenario med normalfördelat brus. Genom att beräkna kvoten mellan sannolikheterna för de två fallen och jämföra med ett förutbestämt tröskelvärde bedöms bruset vara antingen normalfördelat eller impulsivt. Demoduleringen fortsätter sedan baserat på den valda modellen [24].

Fall 2. Estimeringen baseras på att miljön alltid kan modelleras som en Class A-fördelning, med olika värden på brusparametrarna. Till skillnad från för klassificeringen så vet inte mottagaren vilka parametervärden som beskriver bruset. Istället försöker estimeringsmetoden uppskatta parametrarna vid varje tidsinstans genom en metod som kallas *Expectation-Maximization* (EM) [19], vanligen kallad EM-algoritmen. Eftersom bruset växlar mellan en Gaussisk och en Class A-fördelning så kommer estimeringen ibland försöka anpassa parametrar efter fel brusmodell. Estimeringstekniken kräver dessutom att parameterprodukten $K (=AI)$ är känd. Rent parametermässigt innebär detta att variansen mellan den normalfördelade komponenten och den impulsaktiga komponenten som utgör Class A-fördelningen är känd.

De tre icke-adaptiva metoderna fungerar som referensvärden. *Standard normalfördelning* utför demodulering med antagandet att bruset alltid är normalfördelat. Detta är det klassiska tillvägagångssättet och om de adaptiva metoderna ska vara användbara måste de prestera bättre än standardmetoden. *Fix Class A* har full kännedom om parametervärdena i den impulsaktiga miljön och utför demodulering med antagandet att bruset alltid är Class A-fördelat med konstant parameterval. Detta kommer resultera i bra prestanda i impulsmiljöer men sämre resultat förväntas i rent normalfördelade miljöer eftersom den fixa metoden antar konstanta brusparametrar och därmed inte anpassar sig till normalfördelat brus.

Demoduleringstekniken *Gaussisk med limiter* är en vanlig metod för att reducera impulsbrus [25]. Metoden utvärderas för att få en jämförelse med vad som kan åstadkommas med simpel interferensbegränsning. En limiter klipper signalamplituden vid ett lämpligt tröskelvärde för att reducera kraftigare interferensspikar, och fortsätter sedan med antagandet att bruset är normalfördelat. Nackdelen är att själva limitern och därmed metodens prestanda är beroende på vilket tröskelvärde som sätts vilket måste utvärderas i förväg. Är värdet för lågt kan tröskeln klippa viktig signalinformation och är det för högt är risken att det inte får någon effekt alls.

En sjätte demodulator kallad *Genie* visas också i resultaten. Genie-demodulatorn motsvarar det teoretiskt bästa resultat som kan uppnås med full kännedom om interferensmiljön och fungerar som ett riktvärde för optimal prestanda. De adaptiva metoderna strävar efter att prestera som den optimala demodulationstekniken.

Ett stort antal simuleringar är genomförda med olika scenarier som skiljer i impulsivitet och initiala antaganden. Varje enskild simulering motsvarar en *tidsram*. En tidsram omfattar alla sampel tillhörande den genererade signalen med det pålagda bruset. Interferensen i varje tidsram är antingen normalfördelat eller Class A fördelat med en viss sannolikhet för att kontrollera graden av brusets impulsivitet. Omgivningen består därmed aldrig av en sammanslagning av olika brusklasser, den är alltid tillhörande det ena fallet eller det andra. Class A processen beskrivs av parametrarna $A = 0,1$ och $I = 0,1$ vilket indikerar relativt kraftig impulsaktighet. Modulationsschemat är 4-QAM och felrättande

kodning genomförs med en LDPC-kod med kodtakt $\frac{1}{2}$. Limiterns tröskelvärde är satt till 1,0 relativt signaleffekten.

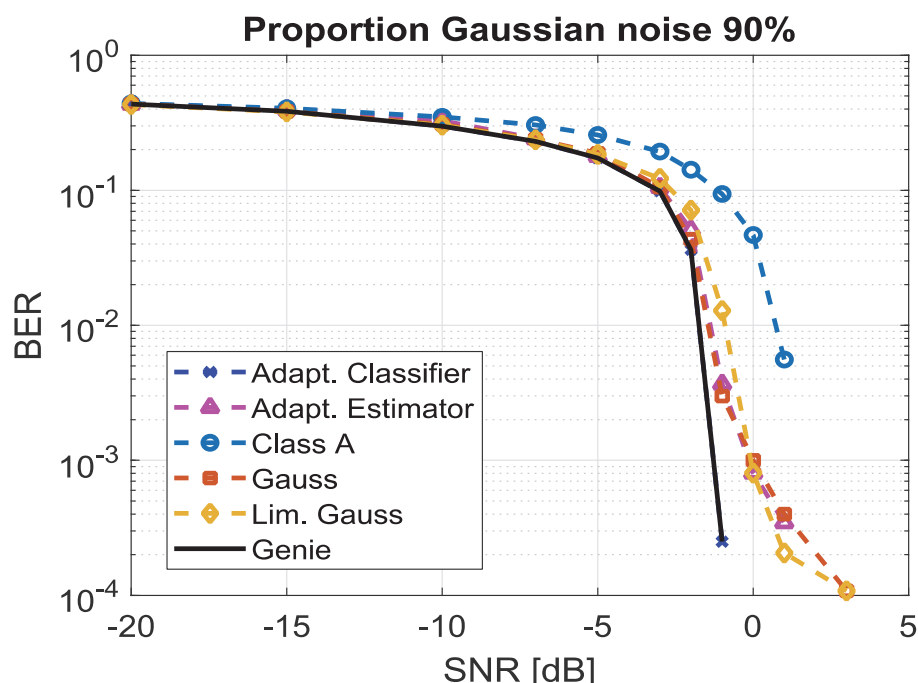
3.1.3 Resultat för Class A-anpassade tekniker

Prestandan för de olika teknikerna i varierande fördelning av miljöerna kan observeras i Figur 22 till och med Figur 25. Sannolikheten för impulsaktigt brus ökas gradvis mellan respektive figur från initialt 10 % i Figur 22 till 50 % i Figur 23, 80 % i Figur 24 och till sist 100 % i Figur 25. Klassificeringen avgör vilken miljö som är aktuell baserat på antingen normalfördelningen eller en impulsiv Class A-process med parametrar $A = 0,1$, $\Gamma = 0,1$. Estimeringstekniken antar alltid underliggande Class A-process och tillförs kännedom om parameterprodukten, $K (=A\Gamma)$, i samtliga simuleringar.

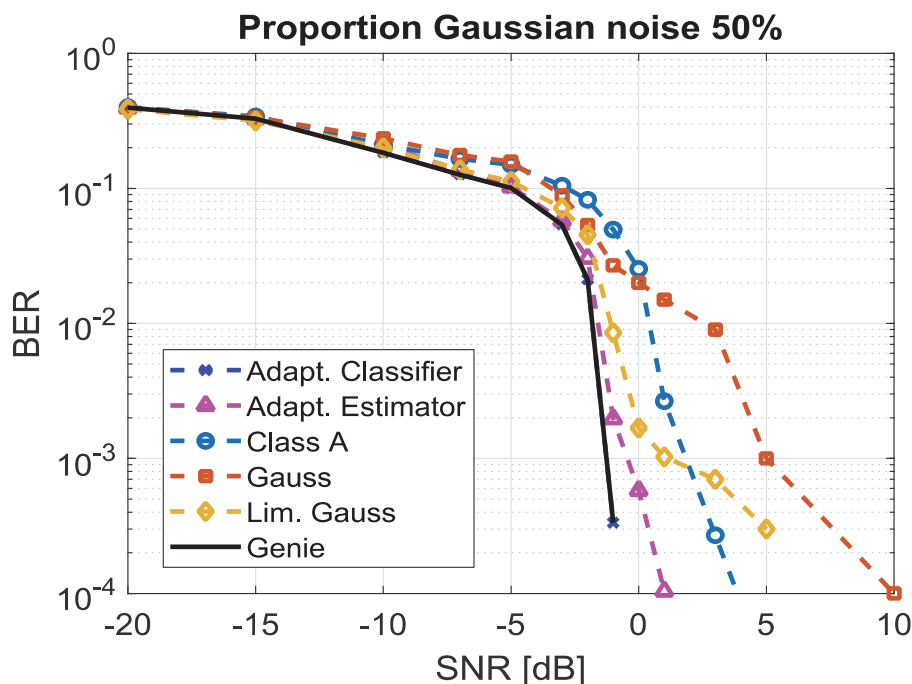
Figur 22 visar bitfelshalten för samtliga tekniker i med brus beskriven med 10 % sannolikhet att vara impulsaktigt och 90 % sannolikhet att vara normalfördelat. Detta medför att tekniken baserad på estimering kommer anta fel bakomliggande brusmodell i de flesta tidsramar eftersom estimatoren alltid förutsätter Class A-fördelat brus. Trots detta ligger prestandan i nivå med den klassiska standard normalfördelningsmetoden.

Att prestandan är lika bra som normalfördelningsmetoden trots att estimering utförs baserat på fel modell beror på att Class A-fördelningen kan approximeras en ren normalfördelning relativt väl och därmed utförs demodulering med liknande prestanda som normalfördelningsmetoden som i teorin ska vara nästintill optimal i dessa förhållanden.

Den adaptiva klassificeringsmetoden levererar utmärkta resultat och är i princip omöjlig att skilja från genie-demoduleringen som representerar teoretiskt optimal prestanda. Att klassificeringsmetoden presterar bra visar att den klarar av att urskilja de fall där normalfördelning styr omgivningen samt de fall där den domineras av impulsbrus. Prestandavinsten vid låga BER uppskattas till drygt 5 dB SNR jämfört med sämst presterande metod (fix Class A) och 3 dB SNR mot standardmetoden ("Gauss").



Figur 22. Bitfelshalt för olika demoduleringsmetoder. Tidsramfördelning 90 % normalfördelat, 10 % impulsaktigt Class A-fördelat brus.

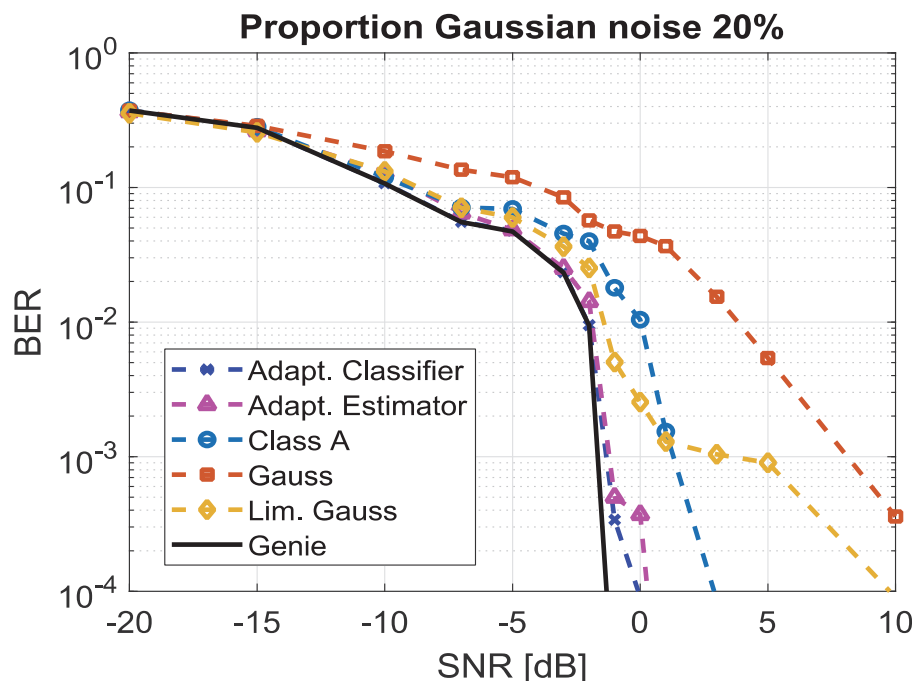


Figur 23. Bitfelshalt för olika demoduleringsmetoder. Tidsramfördelning 50 % normalfördelat, 50 % impulsaktigt Class A-fördelat brus.

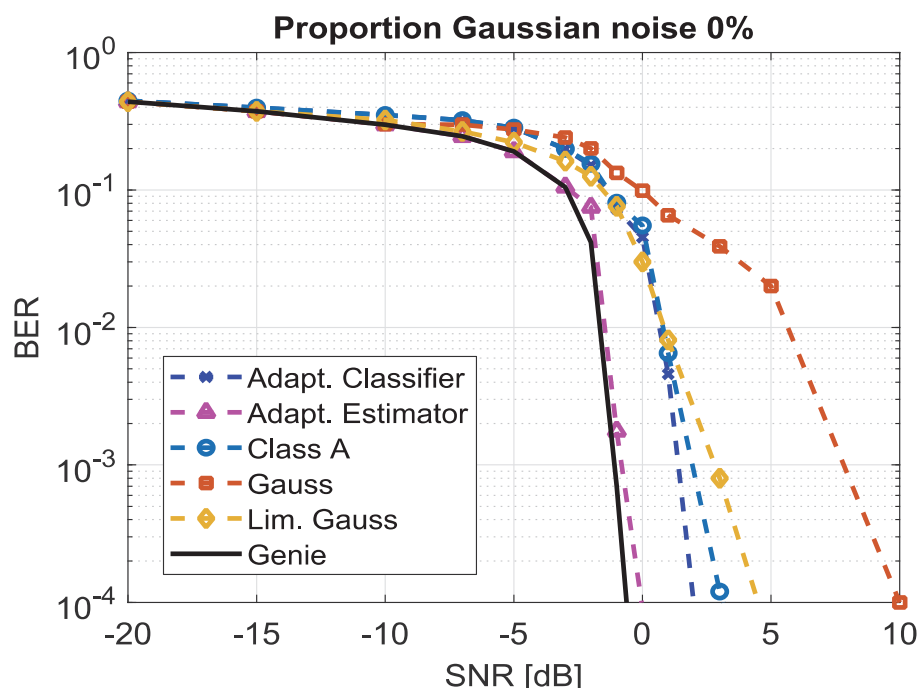
Sämst resultat i Figur 22 ges av den fixa Class A-demodulatore. Det är inte särskilt förvånande eftersom den alltid antar impulsbrus och kommer därför utgå från fel modell i beräkningarna. En fix metod saknar flexibiliteten hos estimatorn och selektiviteten hos klassificeringen, det vill säga de adaptiva bitarna, och visar därmed varför det är viktigt att inkorporera den typen av teknik.

I Figur 23 är sannolikheten för normalfördelat brus lika stor som sannolikheten för impulsaktigt brus. Scenariot har därför fått en betydande impulsaktig karaktär och det visar sig i resultaten där de adaptiva metoderna överträffar samtliga icke-adaptiva metoder. Estimeringen gynnas av mer impulsiva förhållanden och visar detta genom att överträffa standardmetoden med 10 dB vid låg bitfelshalt. Estimatorn är dock överträffad på nytt av klassificeringsmetoden som likt föregående fall levererar nästan optimal prestanda.

I Figur 24 minskas halten av normalfördelat brus ytterligare och sannolikheten för impulsbrus är nu 80 %. Som effekt får standardmetoden besvär och tappar signifikant i prestanda jämfört med adaptiva metoder. Kombinationen med en limiter lindrar problemen avsevärt, framförallt i intervallet $-5 \text{ dB} < \text{SNR} < 5 \text{ dB}$. De adaptiva teknikerna presterar dock ännu bättre och uppvisar igen en prestandavinst på cirka 10 dB. Båda metoderna presterar i princip på samma nivå och visar en liten skillnad vid låga BER vilket antyder att det finns lite rum för förbättring i demoduleringen. Estimatorn gynnas av den mer impulsiva miljön och kan nu erhålla bättre parameterskattningar och når samma prestandanivå som klassificeringsmetoden i tidigare fall.



Figur 24. Bitfelshalt för olika demoduleringsmetoder. Tidsramfördelning 20 % normalfördelat, 80 % impulsaktigt Class A-fördelat brus.



Figur 25. Bitfelshalt för olika demoduleringsmetoder. Tidsramfördelning 100 % impulsaktigt Class A-fördelat brus med slumpade parametrar. Eftersom parametrarna slumpas kan resulterande scenarier skilja i impulsivitet jämfört med tidigare fall.

Figur 25 visar ett sista scenario där interferensmiljön nu är rent impulsiv. En annan faktor skiljer detta fall mot tidigare situationer; den impulsaktiga processen är inte längre konstant i den mening att parametrarna som bestämmer Class A-processen inte längre är fixa. Syftet är att utföra en form av känslighetsanalys för klassificeringsmetoden som bygger på helt kända miljöer. Med små variationer i den impulsaktiga miljön är det intressant att se hur klassificeringen presterar ur en realistisk synvinkel eftersom full kännedom om en given miljö inte alltid är garanterat. Klassificeringsmetoden kommer nu utföra själva klassificeringen och den efterföljande demoduleringen efter ett inkorrekt antagande om parametrarna.

Det faktum att andra parameterförutsättningar råder visar sig i resultaten där klassificeringen inte levererar optimal prestanda vilket antyder att metoden i själva verket är känslig mot parameterförändringar. Detta påverkar också den fixa Class A-demodulatorn som presterar snarlikt med klassificeringen. Standardmetoden presterar dåligt eftersom sannolikheten för normalfördelat brus är noll. Effekten av att applicera en limiter till standardmetoden syns tydligt, då den reducerar interferensspikar och förbättrar prestanda med cirka 5 dB i SNR. Metoderna baserade på normalfördelningen presterar inte mycket sämre än tidigare fall då bakgrundsmiljön faktiskt hade ett element av normalfördelningen. Ett förväntat resultat när miljön övergår till 100 % impulsiv vore att prestandan borde försämrats ytterligare, men så är inte fallet. Anledningen har med de ändrade förutsättningarna att göra. Class A-parametrarna slumpas nu fram från intervallen $0,01 \leq A \leq 1$ och $0,01 \leq \Gamma \leq 5$ istället för att vara fixa och det är möjligt att nya, slumpade parametrar motsvarar en betydligt mindre impulsiv miljö eftersom ursprungsfallet tillhör den högre graden av impulsivitet. Från resonemanget rörande resultaten i Figur 22 kring estimering av parametrar för en Class A-fördelning och normalfördelningen är det tydligt att Class A-processen kan efterlikna en normalfördelning relativt väl om parametrarna slumpas inom den övre delen av intervallet.

Estimatoren påverkas inte nämnvärt av att brusparametrarna är slumpade, och presterar nästintill optimalt. Estimeringstekniken är designad för dynamiska miljöer och överträffar samtliga metoder på grund av dess flexibilitet i parameterestimeringen.

3.1.4 Adaptiv demodulation för SaS-anpassade tekniker

Arbetet rörande den symmetrisk α -Stabila modellen fokuserar på *estimering* som underlag för demoduleringen. För SaS-modellen finns ett antal väldefinierade och välutvecklade estimeringstekniker. Fyra etablerade tekniker för parameterestimering i α -Stabila förhållanden är

- Empirical Characteristic Function (ECF) [20]
- Finite Lower-Order Moments (FLOM) [21]
- Extreme Order-Statistics (EOS) [22]
- Kvantilmetoden (Quant) [23].

Det är fyra fundamentalt olika metoder utvecklade med olika egenskaper och attribut. Dessa estimeringstekniker har en stor fördel gentemot EM-algoritmen som användes för Class A-processerna, nämligen att de inte kräver någon information om miljön i förväg. Samtliga metoder kan appliceras i vilken brusmiljö som helst och leverera parameterestimat till SaS-fördelningen. Kännedom om brusmiljön är något som inte alltid är en självklarhet vid dynamiska förhållanden vilket gör möjligheten att applicera estimeringsmetoder direkt på en okänd miljö lockande.

Nackdelen med SaS-fördelningar är att de beräkningar som utförs i demoduleringssteget rörande fördelningens täthetsfunktion tenderar att bli mycket komplexa och kräver substantiellt mycket högre bearbetningsförmåga än vad normalfördelningen behöver [18]. En komplexitetsanalys i avsnitt 3.1.6 visar skillnader i exekveringstid för de båda fallen.

Estimeringsmetoderna är testade på samma sätt som estimeringen i Class A-fallet. Återigen är även standardmetoden som antar normalfördelat brus inkluderad i resultaten som en icke-adaptiv demoduleringsteknik för jämförelse tillsammans med limitern. Likaså återfinns även Genie-demodulatorn, med full kännedom om aktuell brusmiljö och specifika parametrar. Simuleringarna följer samma struktur som föregående simulering. Eftersom ingen klassificering genomförs, slumpas parametrarna tillhörande den impulsaktiga SaS-processen inför varje tidsram för att återspegla plötsliga, dynamiska miljöförändringar. SaS-fördelningen kan variera kraftigt i impulsaktighet beroende på vilka parametervärden som slumpas fram.

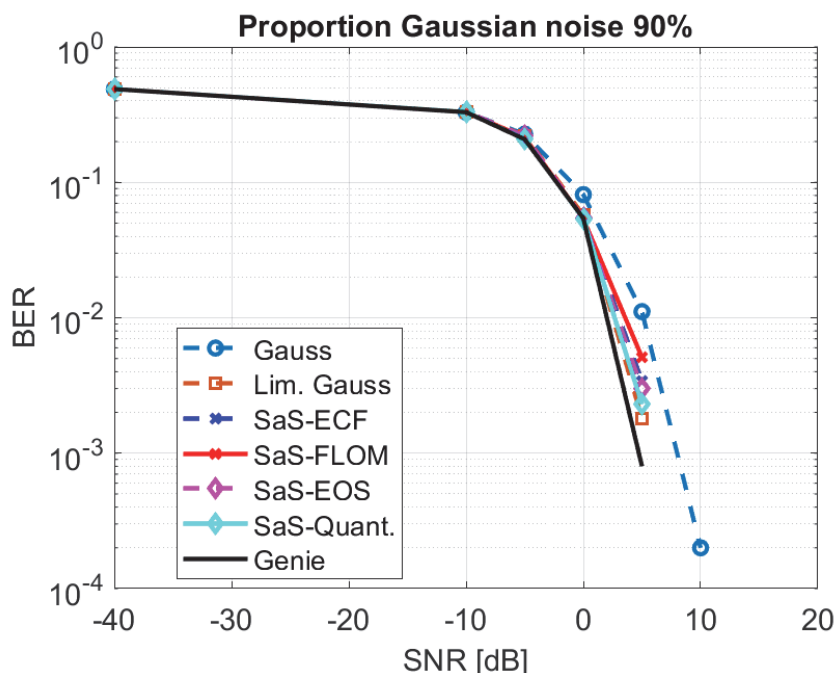
Fyra olika halter av impulsaktigt brus undersöks, först 10 %, sedan 50 % följt av 80 % impulsaktighet och till sist en 100 % ren impulsaktig miljö.

3.1.5 Resultat för S&S-anpassade tekniker

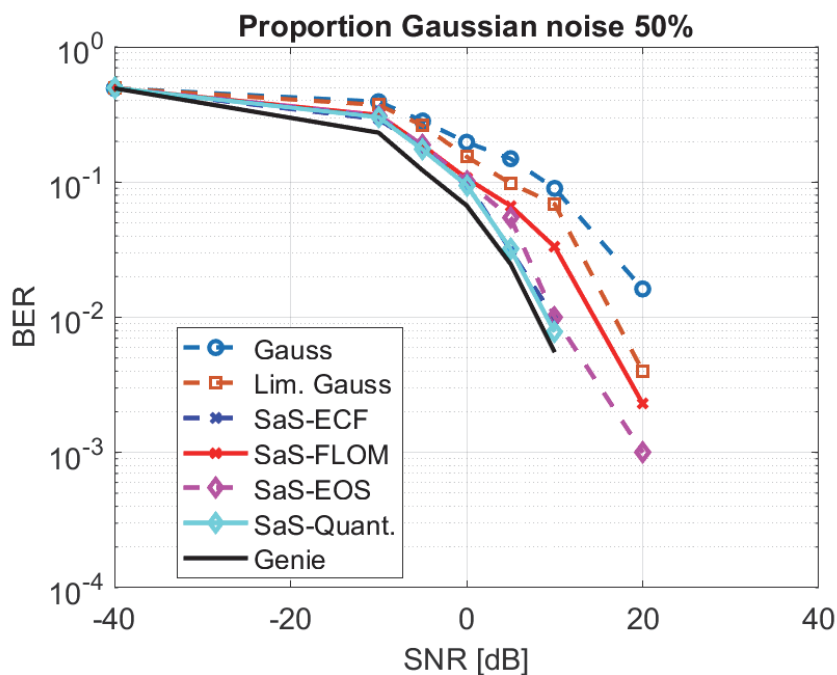
Estimeringsteknikerna appliceras utan kännedom om den aktuella miljön. Demodulering och avkodning sker utifrån den α -Stabila modellen och genomförs med parametervärden erhållna från estimeringsteknikerna.

I det första fallet, illustrerat i Figur 26, är sannolikheten för impulsbrus 10% och sannolikheten för normalfördelat brus 90 %. På grund av generaliteten hos S&S-familjen där normalfördelningen är inkluderad lyckas estimeringsteknikerna ändå erhålla bra parameterestimater även i nästan helt normalfördelad miljö. Det syns i resultaten där samtliga metoder presterar bättre än standardmetoden i en miljö som till 90 % består av normalfördelat brus. Prestandavinsten för de adaptiva metoderna är endast några få decibel jämfört med standardmetoden och Genie-kurvan visar att det finns ytterligare utrymme för förbättringar på någon dB.

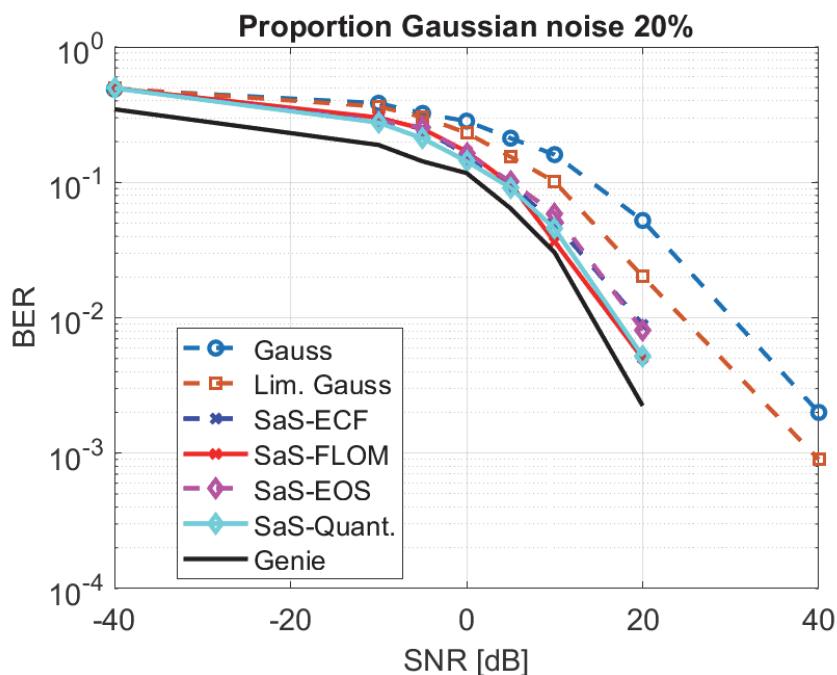
Figur 27 visar ökad impulsaktighetshalt. Brusmiljön är nu 50 % impulsaktiv och skillnaderna mellan metoderna är större. Estimeringsmetoderna ECF och Quant levererar prestanda i takt med Genie-kurvan. Standardmetoden klarar inte riktigt av den ökande impulsmiljön och tappar väsentligt. Tillförande av en limiter lindrar något, men båda icke-adaptiva metoderna tappar i prestanda jämfört med estimeringsteknikerna.



Figur 26. Bitfelshalt för olika demoduleringsmetoder. Tidsramfördelning 90 % normalfördelat, 10 % impulsaktivt S&S-brus.

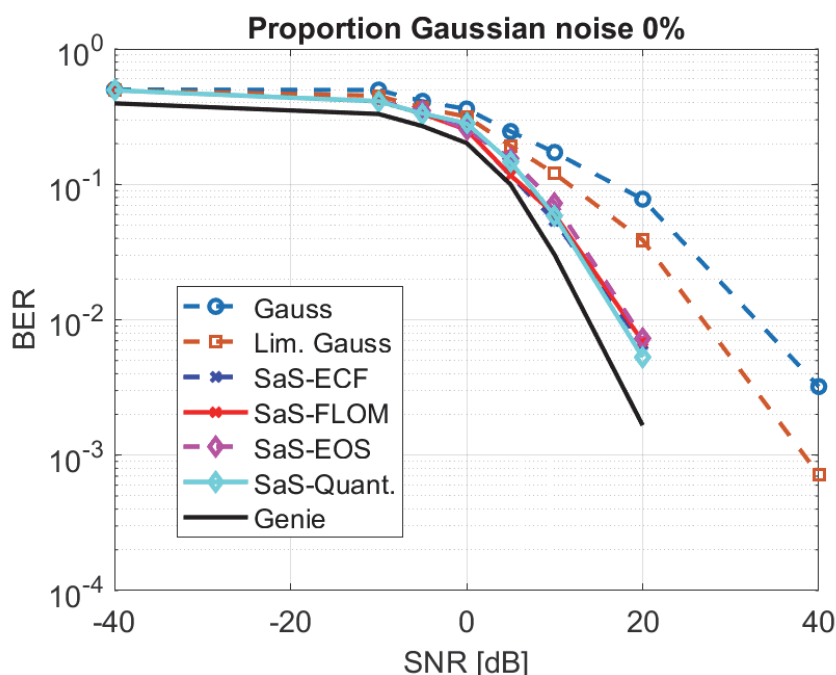


Figur 27. Bitfelshalt för olika demoduleringsmetoder. Tidsramfördelning 50 % normalfördelat, 50 % impulsaktigt SaS-brus.



Figur 28. Bitfelshalt för olika demoduleringsmetoder. Tidsramfördelning 20 % normalfördelat, 80 % impulsaktigt α -Stabilt fördelat brus.

I Figur 28 är halten av impulsaktigt brus 80 %. Vid denna nivå är skillnaden mellan adaptiva metoder och de traditionella icke-adaptiva metoderna tydlig. Estimeringsmetoderna i sig uppvisar en försumbar skillnad mellan varandra, men prestandavinsten mot standardmetoden når nu upp mot 10-15 dB, en substantiell skillnad. Limitern ger en förbättring på några få decibel.



Figur 29. Bitfelshalt för olika demoduleringsmetoder med 100 % impulsaktigt SαS brus.

Till sist visar Figur 29 en ren impulsaktig miljö. Prestandavinsten jämfört med standardmetoden går upp mot 20 dB vid höga SNR och visar på svagheten med klassiska mottagare i starkt impulsaktiga brusmiljöer. Att ta hänsyn till interferensmiljön i ett sådant scenario genom att använda en anpassad mottagare baserad på SαS-estimering kan öka prestanda upp till 20 dB. En limiter får ner förlusten till cirka 10 decibel men skillnaden är ändå påtaglig.

3.1.6 Implementationsproblem och komplexitetsanalys

Det finns ett antal faktorer som måste tas i beaktande om arbetet ska gå vidare till faktiska implementationer i mottagare. Är implementering realistiskt med den teknik och prestanda som finns tillgänglig i mottagare idag? I Class A fallet kräver den utvärderade estimerings-tekniken viss kännedom om bruset. Det är inte en självklarhet att den kunskapen finns i förväg och om miljön förändras snabbt kan parametern också förändras från en tidsinstans till en annan. Alla simuleringar är baserade på syntetiska data genererade enligt de två utvärderade brusmodellerna. Utvärderingar baserade på verkliga data från mätningar bör utföras. Resultaten visar att prestandavinsten är olika beroende på hur impulsaktig miljön är, med störst vinst uppnådd i situationer med väldigt hög impulsivitetsnivå. Vilka nivåer av impulsivitet olika system upplever i verkligheten bör studeras vidare.

Det faktum att brusmodellerna och de impulsaktiga processerna är fundamentalt annorlunda är något som måste tas hänsyn till vid utvärdering. Komplexiteten är ofta en avgörande faktor för vad som kan implementeras i riktiga, fysiska mottagare. Måste dedikerad processorkraft användas för att utföra de nödvändiga beräkningarna och hur mycket mer måste användas är exempel på frågor som måste ställas innan implementering.

En enkel komplexitetsanalys som fokuserar på exekveringstid har genomförts för att tillföra viss förståelse om vart teknologin befinner sig idag. Analysen bygger på ett stort antal simuleringar utförda vid olika störningsnivåer (SNR = -10, 0, 10) där den bakomliggande processen slumpas fram med lika sannolikhet mellan normalfördelning, Class A eller Symmetrisk α -Stabil med slumpade modellparametrar för de två impulsmodellerna. Exekveringstiden är dessutom beroende av hur pass effektivt själva simuleringarna är implementerade. Det kan finnas behov av ytterligare studier i effektivisering av kod, med mera. Den absoluta tidsåtgången för en verklig implementation beror på prestanda för en signalprocessor och hur teknikerna

implementeras. Det väsentliga i denna analys är relationen mellan tidsåtgången för beräkningar med de olika metoderna.

Tabell 1 visar exekveringstiden för simuleringarna med de olika brusmodellerna som utgångspunkt för beräkningarna. Tidsmättet inkluderar generering av brus och signal samt själva demoduleringen och avkodning. I analysen genomförs demodulation med komplett kännedom av parametervärden använda för brusgenerering och därmed inkluderas inte någon klassificerings- eller estimeringsmetod.

Resultatet visar, som förväntat, att standardmetoden har kortast exekveringstid. Efter drygt 3 s har standardmetoden processerat och avkodat alla data. Class A-modellen är mer komplex och det visas också i analysen, där det tar knappt 23 s att slutföra beräkningarna. Class A-baserade metoder tar omkring sju-åtta gånger längre tid än standardmetoden, vilket kan kräva snabbare bearbetning i ett verkligt system.

Till sist analyseras SaS-modellen. I sin standardiserade form (noggrann approximering av den karaktäristiska funktionen) tar beräkningarna oerhört lång tid, nästan tio minuter (600 s). Komplexiteten för beräkningar med SaS-fördelningar ställer till stora bekymmer när det kommer till praktisk implementering. SaS-modellen kan i det generella fallet inte beskrivas i sluten form, vilket är det största hindret ur ett komplexitetsmässigt perspektiv. Det har dock visats att det går att uttrycka en sluten formel för *tre* olika fall för värden på den karaktäristiska exponenten, α [18]. Dessa är $\alpha = 0,5$, $\alpha = 1,5$ och $\alpha = 1,99$.

Vid dessa värden kan exakta uttryck för sannolikhetsfördelningen beräknas vilket gör det teoretiskt möjligt att utveckla metoden till att inkludera även generella α . Eftersom de tre fallen motsvarar scenarier med stor spridning i impulsivitet, uppstår en möjlighet att interpolera mellan punkterna för att erhålla ett α skilt från de fasta punkterna. Med interpolering menas att det är möjligt att generera nya datapunkter baserat på en diskret mängd existerande punkter, beräkning av funktionsvärden som ligger mellan redan kända värden.

På så sätt är det möjligt att minska exekveringstiden från nästan tio minuter till ett trettiootal sekunder. Dock krävs det ändå drygt tio gånger längre tid för beräkningarna jämfört med standardmetoden, men det är inte längre omöjligt att realisera system anpassade efter SaS-modellen.

Det finns även andra optimeringsmöjligheter i implementeringen av interpolationsmetoden. Det existerar olika former av interpolation och i arbetet används linjär interpolation där en rät linje anpassas mellan varje par av punkter. Det är inte säkert att linjär interpolation är det bästa valet. Dessutom kan interpolationen kanske göras i annat skede i simuleringsssekvensen.

Tabell 1. Komplexitetsanalys: exekveringstid för simuleringssstegen (brus- och signalgenerering, demodulation, avkodning) av metoder baserade på olika brusmodeller.

	Gauss	Class A	SaS	SaS- Interpolering
SNR = -10 dB	1,24 s	7,85 s	204 s	11,9 s
SNR = 0 dB	1,02 s	7,55 s	200 s	12,5 s
SNR = 10 dB	0,951 s	7,36 s	194 s	11,4 s
Total tid	3,21 s	22,7 s	598 s	35,8 s

3.1.7 Sammanfattning och slutsats

Kapitlet har fokuserat på hur det är möjligt att anpassa mottagare efter brusets karaktär. Tre olika brusmodeller undersöktes; normalfördelningen, Class A-modellen samt den symmetriskt α -Stabila modellen. Dessutom har en komplexitetsanalys genomförts som undersökt exekveringstid.

Sammanfattat kan prestandavinsten för de två adaptiva Class-A metoderna samt de fyra S α S-adaptiva estimeringsmetoderna i samtliga interferensscenarier ses i Tabell 2. Resultaten är olika beroende på om en Class A-metod eller en α -Stabil metod undersöktes. 20 dB prestandavinst för en S α S-modell i en viss situation är inte nödvändigtvis bättre än 10 dB prestandavinst för en Class A-metod i samma halt av impulsaktigt brus eftersom processerna är fundamentalt olika i termer av impulsaktivitet.

Generellt visar arbetet med adaptiva tekniker att prestandavinsten kan vara 10-20 dB i impulsaktiga miljöer vilket kan ha en enorm effekt på räckvidd eller datatakt. Exempelvis kan räckvidden öka med uppemot 200-300 %. Det kan konstateras att samtliga metoder visar på prestandavinst oavsett vilken bakgrundsfordelning som appliceras. Klassificeringen av miljön är nästintill optimal i samtliga försök och för α -Stabila metoder är en stor fördel att de inte kräver någon information om miljön innan tillämpning. Resultaten visar på en ökad tillämplighet för brus-anpassade mottagare och användning av impulsmodeller.

Tabell 2. Prestandavinst för adaptiva metoder vid högt SNR jämfört med sämst presterande icke-adaptiv metod. **Slumpartade parametrar i impulsiv bakgrund i Class A-fallet. Samtliga fall slumpade i S α S-fallen.

Bakgrund	10% Impulsiv	50% Impulsiv	80% Impulsiv	100% Impulsiv**
Klassificering (CA)	5 dB	11 dB	11 dB	8 dB
Estimering (CA)	3 dB	9 dB	10 dB	10 dB
Estimering (SαS-ECF)	4 dB	9 dB	12 dB	19 dB
Estimering (SαS-FLOM)	2 dB	4 dB	12 dB	19 dB
Estimering (SαS-EOS)	2 dB	6 dB	10 dB	19 dB
Estimering (SαS-Quant)	4 dB	9 dB	12 dB	20 dB

Komplexitetsanalysen har poängterat implementationsproblemen med användning av impulsaktiga metoder och andra möjligheter med interpolering har undersökts för att minska exekveringstiden. Baserat på den enkla komplexitetsanalys som har genomförts krävs det cirka sju-åtta gånger snabbare exekvering för Class A-baserade metoder och tio gånger snabbare bearbetning för S α S-baserade metoder för att uppnå samma exekveringstid som standardmetoden.

Alla resultat pekar på ett växande behov av tillämpning av impulsmodeller och en lovande framtid för mottagare som dynamiskt kan anpassa sig efter brusets karaktär.

3.2 Antennsystem

Detta kapitel beskriver övergripande hur olika flerantennlösningar eventuellt kan användas för att hantera interferenser i ett dynamiskt scenario. Inom projektet har inga specifika antennbaserade lösningar för att ta hand om interferenser i ett dynamiskt scenario studerats.

Flerantennsystem ger möjlighet till ökat skydd mot störning och interferens, genom exempelvis lobformning och undertryckning. Undertryckning av störning kan göras genom algoritmer speciellt anpassade för det. Lobformning i syfte att maximera mottagen effekt i riktning mot den egna sändaren ger, förutom ökad signalstyrka hos nyttsignalen, också minskad mottagen effekt från andra riktningar som störning och interferens kommer från. Tekniker för lobformning och undertryckning kan även kombineras i syfte att maximera mottagen effekt i riktning från den egna sändaren och samtidigt minimera mottagen effekt i riktning från en eventuell störkälla.

För radiosystem i allmänhet är flerantennsteknik något som kan ge många olika fördelar, och en tänkbar möjlighet är att undvika interferenser mellan radiosystem genom att använda lobformning och nollstyrning. På de relativt låga frekvenser som ofta gäller för militär radio, och med de små plattformar som vi studerar, är det dock svårt att få plats med många antenner. Enligt en FOI-rapport [26] är antenner på stridsfordon 90 och stridsvagn 122 huvudsakligen hänvisade till de 2-4 antennplatser som finns idag, och dessa ska då räcka till alla radiosystem. Kooperativ MIMO kan också ge fördelar [27], men ger upphov till ett antal frågor och utmaningar på nätnivå.

På högre frekvenser krävs fysiskt mindre antennelement, vilket gör det praktiskt lättare att få plats med MIMO-system på mindre plattformar. Vissa militära system stödjer kommunikation på de s.k. ISM-banden, t.ex. vid 2,4 GHz där även kommersiella WiFi-system kommunicerar. Moderna WiFi-system, exempelvis 802.11ac, såväl som femte generationens mobiltelefonisystem (5G) har stöd för MIMO med ett stort antal antenner, massiv MIMO. Samma tekniker kan användas även för militära radiosystem som kommunicerar på näraliggande frekvensband.

MIMO kan bli intressant för militär radiokommunikation om utvecklingen går mot att använda högre frekvenser än idag. Även skrovintegrerade antenner kan öppna för att använda MIMO, genom att ge plats för fler antenner och en flexiblere placering av antennerna än idag.

Adaptiva antenner kan användas för att öka prestandan i kommunikationssystem avsevärt i situationer med kraftig flervägsutbredning eller i svåra störningsmiljöer. Detta beskrivs översiktligt i kapitel 10 i [28]. Även om denna artikel är helt inriktad på taktiska datalänkar för flygplan är mycket av diskussionen relevant även i andra tillämpningar.

För satellitkommunikation (satkom), speciellt *Satcom on the move* (SOTM), pågår en kraftig utveckling inom antennområdet med fokus på flera antenner. Detta kunde ses t.ex. under MILCOM 2016 där flera sessioner handlade om just detta. För satkomtillämpningar är det inte ovanligt med paneler av antenner som placeras på olika sidor av en plattform för att elektriskt styra antenndiagrammet i riktning mot satelliten. Ett exempel är på en arméplattform, där fyra antennpaneler kan placeras ut på plattformens sidor för att garantera ständig kontakt med en satellit även under gång. Sådana system används av t.ex. US Army (enligt paneldiskussion på MILCOM 2016).

Gruppantenner för störundertryckning finns för GPS-mottagare på militära plattformar, och det finns flera kommersiella system på marknaden. Detta införs på flera plattformar i FM, och är ett effektivt sätt att öka störskyddsförmågan för satellitnavigeringssystem, vilket finns beskrivet i ett antal FOI-rapporter, se till exempel [29] och [30]. Ett störskyddssystem styr antenndiagrammet genom nollstyrning, d.v.s. så att minimal effekt från störaren når mottagaren.

Flerantennsystem har intressanta egenskaper som i någon mån kan nyttjas för att hantera interferenser i ett dynamiskt scenario. Det är dock tveksamt om alla typer av MIMO-system lämpar sig för denna uppgift. Eftersom det är svårt att åstadkomma många antennelement på de (relativt låga) frekvenser som normalt används för samband på arméfordon och fartyg är massiv MIMO inte ett troligt användarscenario. Främst är det de MIMO-system med algoritmer för lobformning och nollstyrning som kan vara intressanta. System som nyttjar spatial multiplexing nyttjas främst för att åstadkomma högre kapacitet (bitar/Herz/sekund) och bedöms inte vara lämpliga för interferensundertryckning.

Ett adaptivt antennsystem utvecklat för att undertrycka inverkan från avsiktliga störare har däremot potential att vara intressantare i ett dynamiskt scenario, dock med vissa begränsningar. Ett sådant system kan teoretiskt maximalt hantera $n-1$ störare där n är antalet antennelement. Det innebär att för varje enskild interferensälla som systemet måste hantera så minskar antalet avsiktliga störare som systemet kan hantera med ett.

Ett VHF- eller UHF-system för ett arméfordon kan typiskt vara bestyckat med fyra kanske sex antenner, vilket då skulle innebära en (teoretisk) förmåga att hantera tre till fem aktiva störare, i praktiken troligen färre. I en dynamisk situation med ett flertal fordon nära varandra där ett stort antal interferenser kan förekomma skulle det betyda att de lokala interferenserna delvis eller till och med helt förbrukar antennsystemets förmåga att hantera avsiktliga störare. Prestandan på systemet blir därmed helt avhängig de algoritmer som används för att låsa på störsignalen och rent generellt är det svårt att avgöra hur bra ett sådant system skulle fungera i ett dynamiskt (även statiskt) scenario med starka egengenererade interferenser. En adaptiv antenn är därför användbar i begränsad utsträckning i detta sammanhang och är troligen inte en optimal lösning för att hantera egengenererade interferenser.

3.3 Predistorsion

Effektförstärkare är nödvändiga komponenter i ett kommunikationssystem och är i sig olinjära. Det finns ett ungefärligt omvänt förhållande mellan en effektförstärkares effektivitet och dess linearitet. Följaktligen är icke-linjära effektförstärkare önskvärda ur effektivitetssynpunkt. Priset för högre effektivitet är att olinjäriteterna orsakar utombandsemission. Generellt ökar dessutom utombandsemissionen när effektförstärkaren ansluts till en verklig antenn jämfört med en perfekt konstlast (som tex används för att mäta effektförstärkarens prestanda).

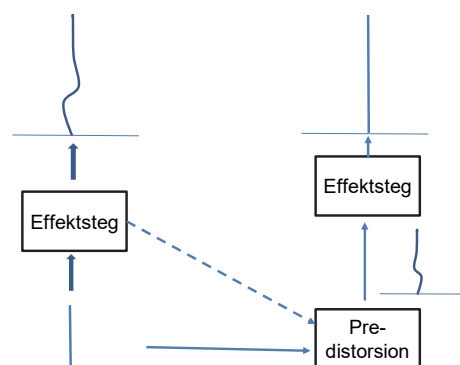
Tekniker såsom CDMA och OFDM är särskilt sårbara för PA-olinjäriteter på grund av deras höga topp-till-medeleffektförhållande, vilket ger stora fluktuationer i signalenvelopen. Eftersom dessa fluktuationer är informationsbärande kommer olinjäriteterna att distordera signalen och detta kan leda till exempelvis bitfel.

Att bygga mycket linjära PA är dock både komplicerat och dyrt, vilket innebär att de flesta "linjära" PA är långt ifrån perfekt linjära. PA-linjärisering är därför ofta nödvändig för att uppfylla de i standarderna givna effektmaskerna

Predistorsion är en dynamisk teknik för att försöka motverka den distorsion av signalen som uppstår i en effektförstärkare genom olinjäriteter. Metoden går ut på att uppskatta distorsionen hos effektförstärkaren och tillföra dess motsats till signalen som matas in i effektförstärkaren, se Figur 30. Pre-distorsionsdelen är en icke-linjär modul som genererar intermodulationsprodukter som är i motfas till de intermodulationsprodukter som genereras av effektförstärkare.

Tekniken kan därmed, i teorin, exempelvis vara ett sätt att minska breddningen av utsänd signal och minska utombandsemissionen från en sändare. Predistorsion ger möjlighet till billigare, enklare och lättare effektförstärkare med högre verkningsgrad än traditionell teknik och är en dynamisk metod. En dynamisk reglering är nödvändig eftersom olinjäriteterna i en effektförstärkare varierar med bland annat tid, temperatur och drivning (hur mycket effekt som matas in i effektförstärkaren) samt med antennens egenskaper. Metoden kan därför i flera fall även hantera varierande antennegenskaper.

Predistorsion används exempelvis i satelliter och finns både i analoga och digitala varianter. Metoden har dock inte studerats explicit i projektet och det är därmed svårt att värdera dess värde som en del av ett militärt sambandssystem. Det kan därför bli aktuellt att återkomma till fördjupade studier av predistorsion i kommande projekt.



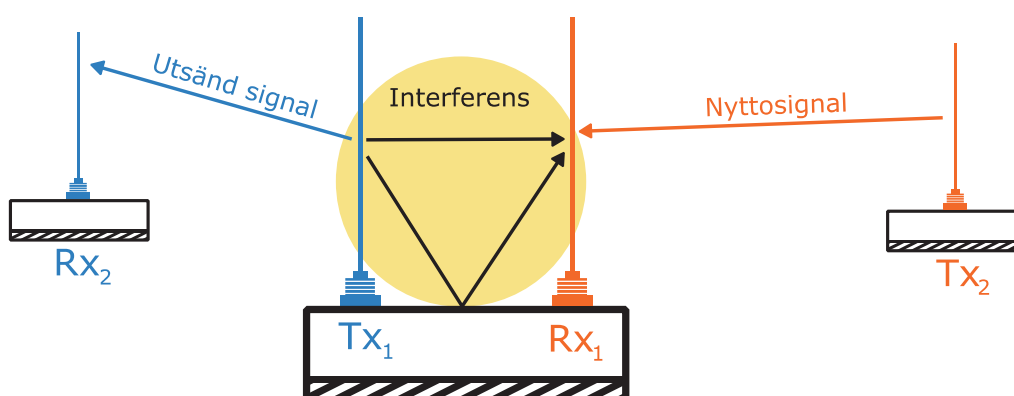
Figur 30. Principen för predistorsion. Pre-distorsionsdelen är en icke-linjär modul som genererar intermodulationsprodukter som är i motfas till de intermodulationsprodukter som genereras av effektförstärkaren.

4 Undertryckning av utombandsemission

På grund av den problematik med utombandsemission som beskrivs i avsnitt 1.4, har möjligheterna att med digital undertryckning för att motverka utombandsinterferens mellan radiosystem på samma plattform undersökts. Den bakomliggande undertryckningstekniken baseras huvudsakligen på teknik föreslagen för full duplex, där hantering av självinterferensen är en av de största utmaningarna. Inom full duplex sker sändning och mottagning samtidigt och på samma frekvens. Detta innebär att i jämförelse med halv duplex som delar upp sändning och mottagning i antingen tid eller frekvens, så har full duplex möjlighet att åstadkomma en potentiell dubbling av kapaciteten om systemet är tilldelat samma mängd tid- och frekvensresurser.

Utöver detta har det för militär tillämpning även identifierats några möjliga telekrigsapplikationer av full duplex. Förmågan att utföra signalspaning eller störning samtidigt som en kommunikationslänk upprätthålls på samma frekvens, anses vara en markant taktisk fördel [31]. Dock innebär samtidig sändning och mottagning på samma frekvens att en mycket kraftig självinterferens uppstår mellan sändare och mottagare på samma radio, vilket måste hanteras för att mottagningen ska fungera. Ur detta interferensperspektiv är full duplex-tekniken av stort intresse då liknande interferenssituationer kan uppstå på plattformar med samlokaliserade radiosystem. Ett exempel på detta visas i Figur 31 där ett radiosystem Rx_1 tar emot en signal (nyttosignalen) från en avlägsen sändare Tx_2 , samtidigt som ett annat radiosystem Tx_1 på samma plattform sänder (utsänd signal) till Rx_2 . På grund av utombandsinterferens (interferens i figuren) är det inte nödvändigt att de skilda radiosystemen använder samma frekvens för att interferensproblemen ska vara påtagliga. Utgående från den spektrummask som omnämns i avsnitt 8.3, som medför en 80 dB dämpning av utombandsemission, en antennisolation på 30 dB och en sändareffekt på 47 dBm (50 W) kan störningseffekten i mottagaren Rx_1 från sändaren Tx_1 vara så hög som -63 dBm. Jämfört med ett typiskt värde på mottagarkänslighet (-110 dBm), innebär detta en potentiell försämring av signalkvaliteten på hela 47 dB. Detta är en markant försämring och i många fall skulle det innebära att räckvidden drastiskt försämras.

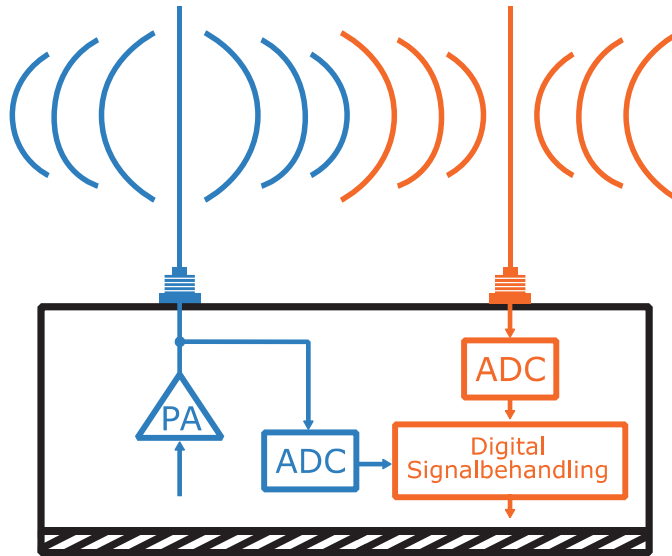
Att ta bort, eller undertrycka utombandsemissionen skulle således möjliggöra mottagning även när ett samlokaliserat radiosystem sänder på en närliggande frekvens. Detta skulle bidra till robustare radiosystem och förenkla integrationen av olika radiosystem på samma plattform.



Figur 31. Interferenssituation mellan två radiosystem på samma plattform. Där Tx_1 sänder till en avlägsen radio Rx_2 samtidigt som Rx_1 försöker ta emot en signal från en sändare Tx_2 .

4.1 Systembeskrivning

Den föreslagna undertryckningen bygger i huvudsak på full duplex-sändtagaren introducerad i [32]. En förenklad överblick av undertryckningssystemet med två sammankopplade radiosystem på samma plattform presenteras i Figur 32. I figuren visas hur en kopia av den utsända signalen tas vid effektförstärkarens utgång hos den sändande radion (blå) och vidarebefordras till det mottagande radiosystemet (orange) på samma plattform. Det mottagande radiosystemet omvandlar kopian till en digital signal med en ADC (eng. *analogue to digital converter*) och subtraherar den sedan från dess mottagna signal med hjälp av digital signalbehandling.



Figur 32. Illustration av två sammankopplade radiosystem för undertryckning av utombandsinterferens.

En tydligare och mer detaljerad beskrivning av systemet ges i blockdiagrammet i Figur 33. Signal $x[n]$ motsvarar där den utsända signalen efter effektförstärkaren, $d[n]$ är den mottagna nyttosignalen och $w[n]$ är mottagarbruset. Den mottagna signalen kan med denna notation beskrivas enligt

$$y[n] = (h * x)[n] + d[n] + w[n],$$

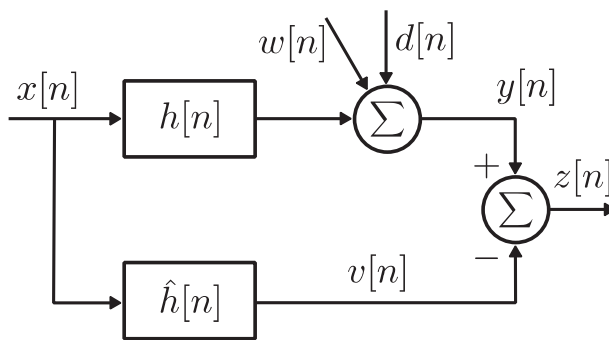
där $h[n]$ representerar impulssvaret för vågutbredningskanalen mellan de två radiosystemen och '*' betecknar faltning. Den digitala undertryckningen utförs genom att välja parametrar för det adaptiva filtret $\hat{h}[n]$ så att undertryckningssignalen $v[n] = (\hat{h} * x)[n]$ blir så lik $(h * x)[n]$ som möjligt. Det kan således ses som att $\hat{h}[n]$ är en estimering av $h[n]$. Utsignalen, $z[n]$, från undertryckningen kan skrivas

$$z[n] = y[n] - v[n] = (h[n] - \hat{h}[n]) * x[n] + d[n] + w[n],$$

där felet

$$e[n] = z[n] - d[n] = (h[n] - \hat{h}[n]) * x[n] + w[n],$$

beskriver skillnaden mellan den önskade utsignalen $d[n]$ och den resulterande utsignalen $z[n]$.



Figur 33. Blockdiagram över undertryckning av utombandsinterferens.

För att välja $\hat{h}[n]$ så att effekten av $e[n]$ minimeras, används en blockbaserad minsta-kvadratmetod. Blockbaserad syftar i denna kontext på att estimering och undertryckning sker på ett antal sampel åt gången, där längre block generellt resulterar i bättre estimering. Ofta inom signalbehandling skulle en väl utformad, känd pilotsekvens användas för att estimera ett okänt system som exempelvis kanalen mellan två radiosystem. Sedan skulle det adaptiva filtret ställas in enligt estimering, för att effektivt utjämna kanalens inverkan under datatransmission. Vad som är unikt för just undertryckning av utombandsinterferens på samma plattform är dock att den kanal som önskas estimeras ligger utanför signalens tilldelade frekvensband. Detta medför att en pilotsekvens behöver vara anpassad utifrån utombandsemissionens karaktäristik för en specifik sändare för att ge god skattning i mottagarens frekvensband. Detta kan innebära vissa svårigheter i att designa en pilotsekvens för denna typ av skattning, eller att återanvända en redan implementerad pilotsekvens (som troligen inte är utformad för denna typ av uppgift). Detta problem kan dock undvikas genom att utnyttja att den utsända signalen $x[n]$, alltid är känd i mottagaren även om det är en datatransmission. Detta möjliggör att estimering och undertryckning kan utföras på exakt samma signal, datasignalen, som inte behöver ha några generellt goda utombandsegenskaper. För att undvika att skicka signalen två gånger kan två digitala kopior skapas av det mottagna signalblocket. På första kopian utförs estimeringen för att erhålla $\hat{h}[n]$, och på den andra kopian utförs undertryckningen med de valda parametrarna för $\hat{h}[n]$.

4.2 Prestanda och resultat för undertryckning av utombandsinterferens

Hur bra systemet utför undertryckning av utombandsinterferens kan mätas med hjälp av effekten av felet $e[n]$, betecknad P_e . Jämförs P_e med till exempel effekten av nyttsignalen P_d enligt

$$\text{SINR}_U = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_d}{P_e} \right),$$

erhålls signal till interferens plus brusförhållandet (SINR, från eng. *Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio*) som är ett mått på signalkvalité, där index U syftar på att det är SINR efter digital undertryckning. För att bättre förstå innebörden av SINR_U , kan det jämföras med signal-till-brusförhållandet (SNR) utan interferens

$$\text{SNR} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_d}{P_w} \right),$$

där P_w motsvarar mottagarkänsligheten. Eftersom $e[n]$ innehåller $w[n]$, kommer $P_e \geq P_w$ vilket resulterar i att

$$\text{SNR} - \text{SINR}_U \geq 0.$$

Detta betyder att signalkvalitén efter undertryckning som bäst kan vara lika med signalkvalitén utan interferens. Eftersom $\text{SINR} \leq \text{SNR}$ innebär det således en försämring av signalkvalitén jämfört med fallet utan interferens. Denna försämring kan uttryckas enligt

$$\text{SNR} - \text{SINR} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_e}{P_w} \right),$$

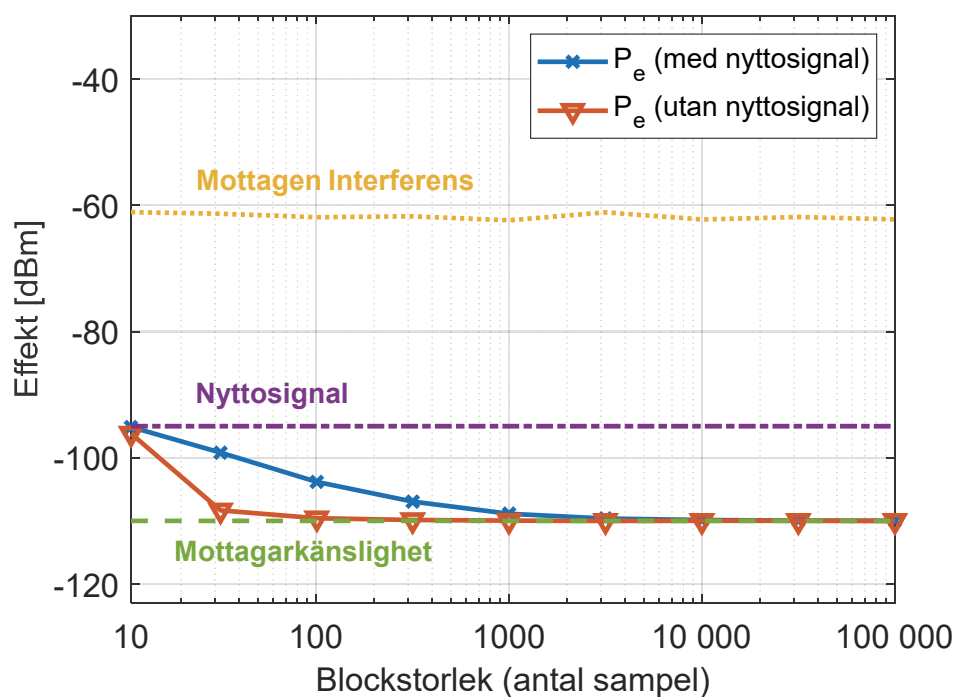
vilket motsvarar skillnaden mellan mottagarkänsligheten och effekten av felet $e[n]$.

Att utföra estimering och undertryckning på samma mottagna data innebär att nyttsignalen kan komma att vara närvarande. Under estimering av $\hat{h}[n]$, kommer nyttsignalen, likt en störning, ha negativ inverkan på estimeringen och resultatet blir sämre än om en pilotsekvens använts och radiotystnad under estimering gällt. För att åskådliggöra denna prestandaförlust, har P_e tagits fram både då estimering skett med och utan nyttsignalen närvarande.

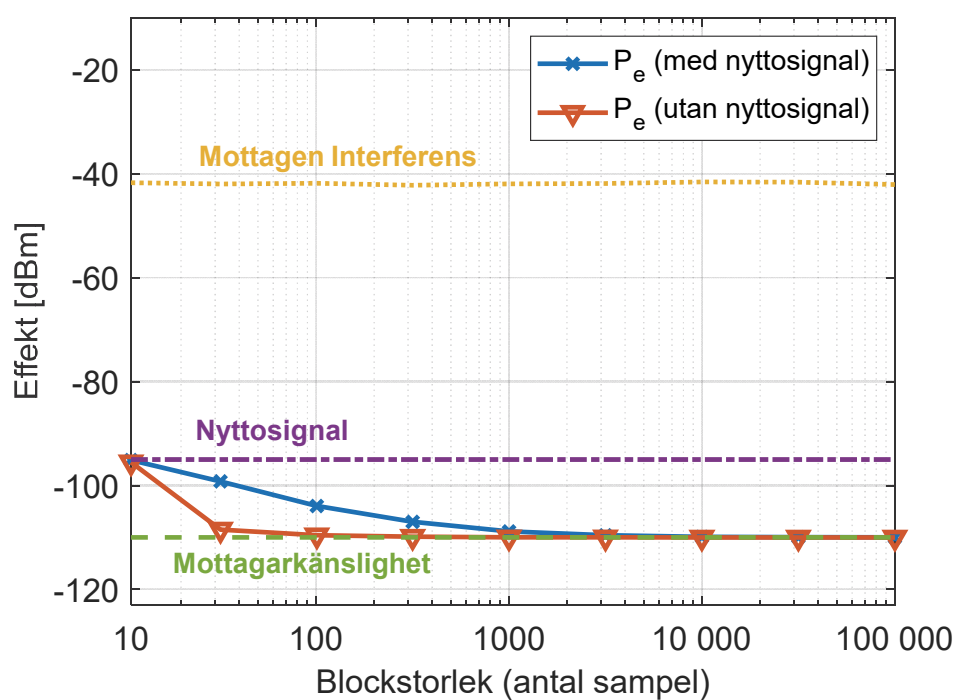
Figur 34 visar resultatet av undertryckningen som funktion av blockstorleken. Den utsända effekten antas vara 47 dBm, minsta antennisolationen 30 dB och dämpning av utombands-emission 80 dB i enlighet med spektrummasken från avsnitt 8.3. Den mottagna medeleffekten av interferensen blir därför -63 dBm.

Från Figur 34 kan SINR_U utläsas som skillnaden mellan nyttsignalen och P_e , vilket för fallet utan nyttsignalen närvarande under estimering är nästan 15 dB redan vid en blockstorlek på 100 sampel. För fallet med nyttsignalen närvarande krävs ca 3000 sampel innan $\text{SINR}_U = \text{SNR} = 15$ dB. Det ska dock påpekas att redan vid 100 sampel uppnås ett SINR_U på cirka 10 dB och att systemet då åstadkommit en undertryckning på nära 45 dB. För att få en uppfattning av vad ett visst antal sampel motsvarar i tid, kan ett system med en samplingsfrekvens på 2 MHz antas. För ett sådant system skulle 100 sampel motsvara ungefär 0,05 ms, medan 3000 sampel skulle motsvara 1,5 ms. Det är viktigt att beakta att blocklängden för fallet med nyttsignalen inte bör överstiga den normala tiden för kanal-användningen. På liknande sätt bör blocklängden för fallet utan nyttsignalen inte ta upp en signifikant del av kanal-användningen, eftersom majoriteten av tiden bör användas för dataöverföring.

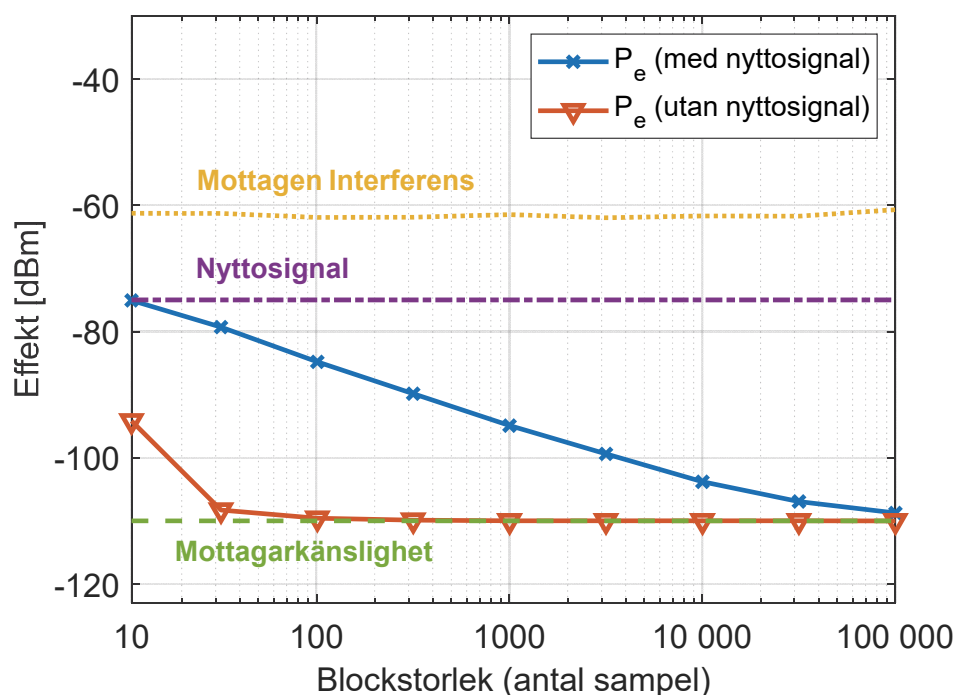
Genom att öka effekten hos sändaren ökar analogt mottagen interferens. Dock påverkas inte prestandan för undertryckningen, vilket visas i Figur 35. Detta beror på att estimeringen av $\hat{h}[n]$ sker med hjälp av interferenssignalen. Om denna har högre effekt uppnås en bättre estimering av $\hat{h}[n]$, men samtidigt krävs också bättre undertryckning för att få bort den starkare interferensen. Summan av dessa två faktorer blir att undertryckningen till synes blir oberoende av interferensens effekt.



Figur 34. Resultat av undertryckning som funktion av blockstorlek för en sändare med 42 dBm uteffekt.



Figur 35. Resultat av undertryckning som funktion av blockstorlek för en sändare med 67 dBm uteffekt.



Figur 36. Resultat av undertryckning då den mottagna nyttsignalen har relativt hög effekt (-75 dBm).

Till skillnad från effekten på mottagen interferens har nyttsignalens effekt viss inverkan på undertryckningen. Detta kan ses i Figur 36, där den mottagna effekten av nyttsignalen ligger på -75 dBm, vilket motsvarar ett SNR på 35 dB. I fallet utan nyttsignalen uppnås som tidigare $\text{SINR}_U = \text{SNR}$, med en blockstorlek på endast 100 sampel. I fallet med nyttsignalen närvarande uppnås dock inte samma prestanda förrän blockstorleken når 100 000 sampel (0,05 s, när samplingsfrekvensen är 2 MHz). Detta beror på att nyttsignalen stör estimeringen av $\hat{h}[n]$. Det ska dock påpekas att eftersom nyttsignalen i denna simulering har högre effekt uppnås samma SINR_U vid 100 sampel (10 dB) som innan (Figur 34). Detta innebär att signalkvaliteten för fallet då kanalestimering görs med nyttsignalen närvarande helt och hållet styrs av blockstorleken. För det simulerade systemet och fallet med nyttsignalen närvarande, kommer ett SINR_U på 10 dB uppnås vid en blockstorlek på 100 sampel, oavsett effekten av den mottagna interferensen och nyttsignalens effekt.

Med hjälp av den föreslagna tekniken kan undertryckning av utombandsinterferens utföras för samlokaliserade radiosystem. Detta gör det möjligt att erhålla nyttsignalen även i situationer där den annars skulle ha gått förlorad. Estimering och undertryckning har visats kunna utföras med nyttsignalen närvarande, vilket innebär att ingen ytterligare synkronisering mellan radiosystemen eller extra resursallokering är nödvändig för att implementera undertryckningen.

4.3 Inverkan av analog till digital omvandling på undertryckning

Den beskrivna undertryckningen av utombandsinterferens utförs digitalt. Fördelen med detta är att den till stor del kan implementeras i mjukvara och kräver därför färre komponenter och modifieringar av existerande radiosystem. Uteslutande digital undertryckning förutsätter dock att den analoga till digitala (A/D) omvandlingen av signalen sker utan påtaglig distorsion. För en A/D-omvandlare beskriver, något förenklat, det dynamiska omfånget (DR, eng. dynamic range) förhållandet mellan den minsta och största signalen som kan omvandlas utan sådan distorsion. För att åstadkomma total

undertryckning, innebär detta att ett DR som motsvarar effektskillnaden mellan interferensen (den största signalen), och mottagarkänsligheten (den minsta signalen) är nödvändigt. Typiskt anges inte DR för en specifik A/D-omvandlare. Istället uppges antal bitar eller antal effektiva bitar, vilket ger ett approximativt DR enligt

$$\text{DR} \approx 6,02 \cdot (\text{antal bitar} - 2) \text{ dB}.$$

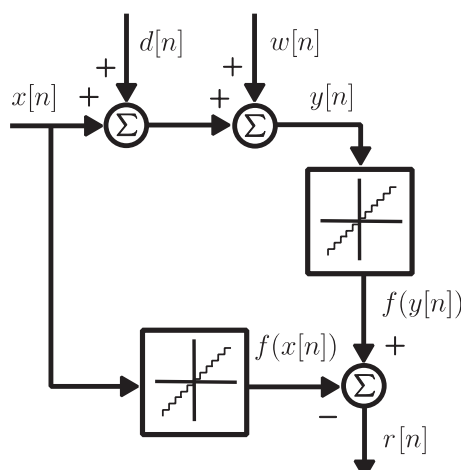
För full duplex där effektskillnad mellan självinterferens och mottagarkänsligheten är markant, kan det krävas ett DR över 100 dB [33], vilket kan kräva både avancerade och kostsamma lösningar för att åstadkomma [34]. För att kringgå detta, används analog undertryckning inom full duplex för att få ner effekten av självinterferensen till en nivå under DR innan den digitala omvandlingen sker. För att implementera analog undertryckning krävs dock större modifieringar av radion och även särskild hårdvara, vilket inte alltid är möjligt.

Eftersom den utsända signalens effekt utanför den tilldelade kanalen ofta begränsas av någon spektrummask, kan signalen antas vara mycket svagare där (80 dB för en viss frekvensseparation enligt CE106 och RE103). Detta innebär att kravet på DR, när det gäller undertryckning av utombandsinterferens, inte kommer vara lika högt och analog undertryckning kanske kan undvikas. Det finns dock en risk att variationer i utombands-emissionens effekt medför att DR tillfälligt överstigs. Sådana variationer kan till exempel bero på att mer av den utsända signalen reflekteras tillbaka beroende på att vågutbredningsmiljön runt plattformen förändras (exempelvis om plattformen placeras bredvid ett plåtskjul). På liknande sätt kan även en tillfällig ökning av sändareffekten bidra till att DR överstigs. Under sådana förutsättningar är det viktigt att förstå hur prestandan för systemet påverkas. Detta för att fastställa tänkbara åtgärder eller utvärdera om denna typ av digital undertryckning är möjlig.

4.4 Systembeskrivning av undertryckning med analog till digital omvandling

För att fokusera på den analoga till digitala omvandlingens påverkan på undertryckningen antas att kanalen mellan interfererande sändare och mottagare inte har någon inverkan på den utsända signalen. Detta medför att den utsända signalen och den mottagna interferensen är identiska signaler, vilket möjliggör att undertryckningen kan beskrivas enligt blockdiagrammet i Figur 37. I figuren betecknar, som tidigare, $x[n]$ den mottagna interferensen, $d[n]$ nyttosignalen och $w[n]$ det brus som uppstår i mottagaren. Utifrån denna notation är det möjligt att beskriva den mottagna signalen enligt

$$y[n] = x[n] + d[n] + w[n].$$



Figur 37. Blockdiagram av undertryckning med hänsyn taget till analog till digital omvandling.

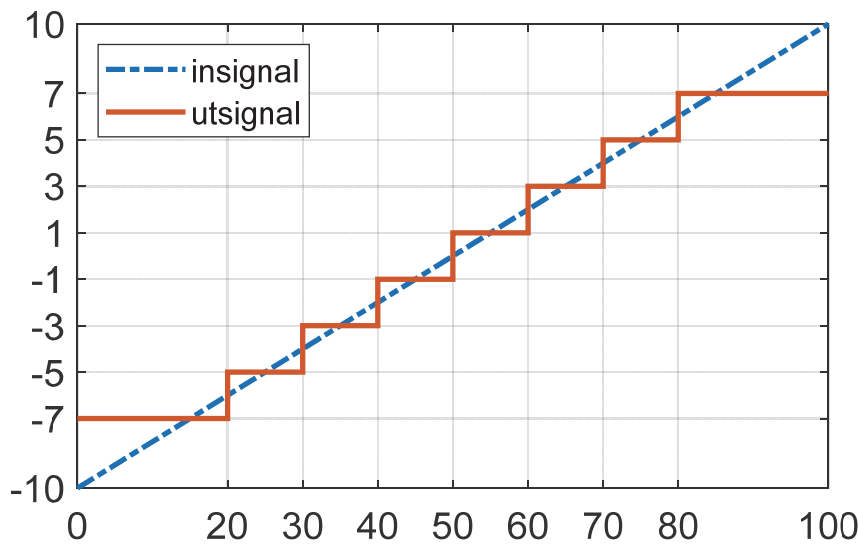
De två större blocken i Figur 37 representerar analog till digital omvandling. De beskrivs av den olinjära funktionen $f(\cdot)$ och modelleras som saturering och likformig kvantisering. Detta medför att den resulterande signalen efter undertryckning kan skrivas som

$$r[n] = f(y[n]) - f(x[n]) = f(x[n] + d[n] + w[n]) - f(x[n]).$$

Funktionen $f(\cdot)$ styrs av kvantiseringssteget Δ och antal kvantiseringsnivåer N . Där förhållandet mellan dem beskrivs av

$$N - 1 = \frac{2A}{\Delta},$$

där A betecknar satureringsnivån. Ett exempel på funktionens inverkan, då $N = 8$ och $\Delta = 2$ kan ses i Figur 38. I figuren visas tydligt hur utsignalens amplitud begränsas till $\pm A = \pm 7$, och hur signalen antar exakt ett av åtta olika värden. Skillnaden mellan de diskreta nivåerna är fixt till Δ vilket är anledningen till att kvantiseringen kallas just likformig. I och med kvantisering och saturering uppstår en viss informationsförlust i form av kvantiseringsfel och satureringsfel. Kvantiseringsfelet beror på att insignalens värden mellan kvantiseringsnivåerna avrundas till närmaste kvantiseringsnivå. Storleken på felet beror på avståndet mellan två nivåer, där avståndet motsvarar Δ . Ju längre ifrån varandra två nivåer är, desto större blir kvantiseringsfelet. För signaler med låg amplitud, typisk signaler med låg effekt, betyder detta att Δ bör väljas så liten som möjligt för att inte signalen ska överröstas av kvantiseringsfelet. Satureringsfelet beror på att värden utanför satureringsnivån trungeras till högsta respektive lägsta kvantiseringsnivå. För insignaler med hög amplitud, typiskt signaler med hög effekt, blir detta fel mycket påtagligt. Saturering kan dock undvikas genom att öka Δ . En ökning av Δ kommer nämligen innebära en ökning av satureringsnivån A , och på så sätt undviks att de högre amplituderna trungeras. Detta innebär alltså motstridiga krav för svaga och starka signaler.



Figur 38. Exempel på saturering och likformig kvantisering, med olika kvantiseringssteg $\Delta=2$, och antal kvantiseringsnivåer $N=8$.

För att avgöra systemets prestanda definieras först felet

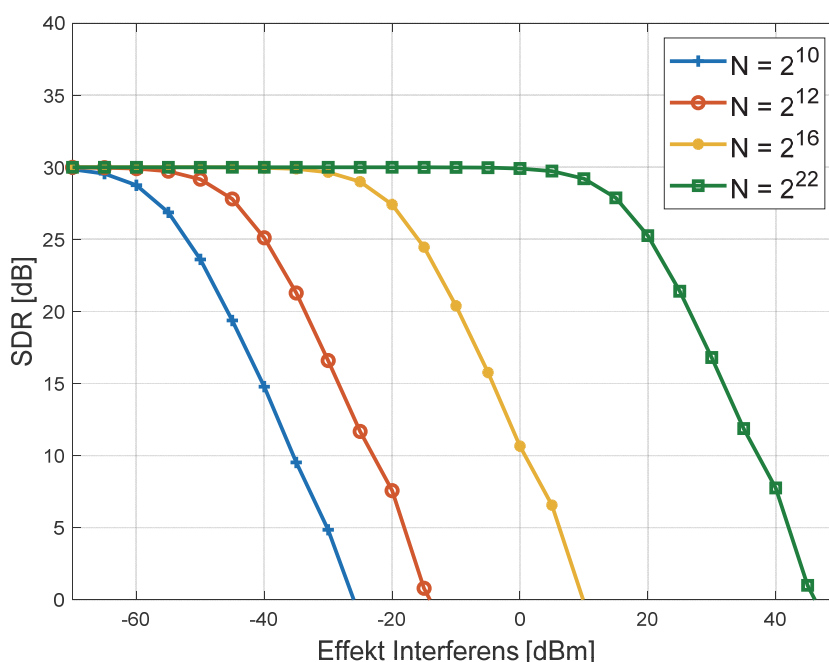
$$e[n] = r[n] - d[n],$$

vilket är skillnaden mellan signalen efter undertryckning och nyttsignalen. Jämförs effekten av nyttsignalen (P_d) med effekten av detta fel (P_e) erhålls signal till distorsionsförhållandet (SDR från eng. *signal-to-distortion ratio*)

$$\text{SDR} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_d}{P_e} \right).$$

Eftersom $r[n]$ också innehåller brusignalen $w[n]$ är alltid $\text{SDR} \leq \text{SNR}$, med definitionen av SNR enligt kapitel 4.2. Eftersom SDR är lägre än SNR, innebär detta en försämring av signalkvaliteten jämfört med fallet utan interferens.

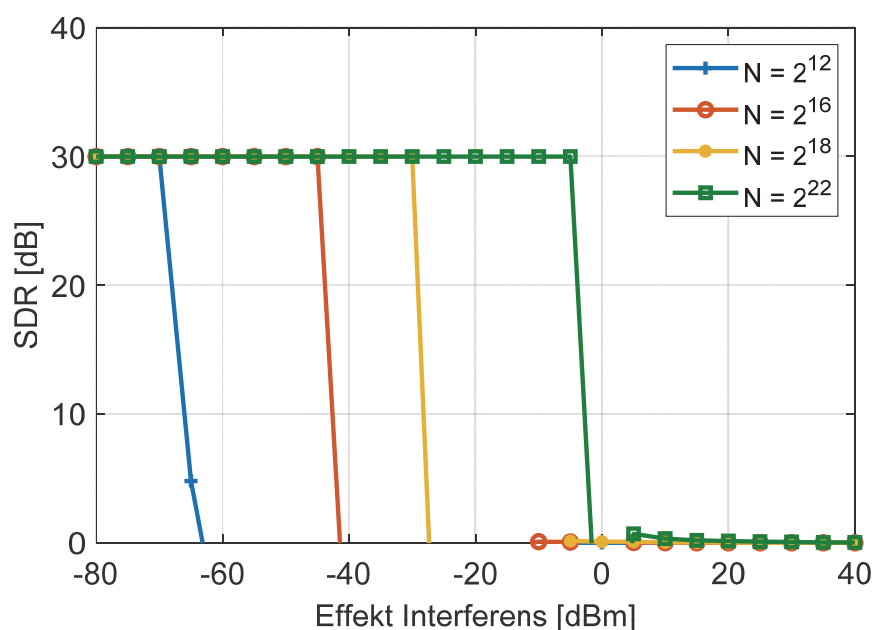
Inverkan på undertryckningen simulerades med varierande interferenseffekt (P_x), för ett bestämt antal kvantiseringsnivåer N . För att inte saturering skulle ske anpassades först Δ efter amplituden av $x[n]$, så att kvantiseringssteget Δ ökades med ökad effekt P_x . Ökande kvantiseringssteg leder dock till att kvantiseringsfelet växer och att signalkvaliteten (SDR) gradvis minskar, vilket visas i resultatet i Figur 39.



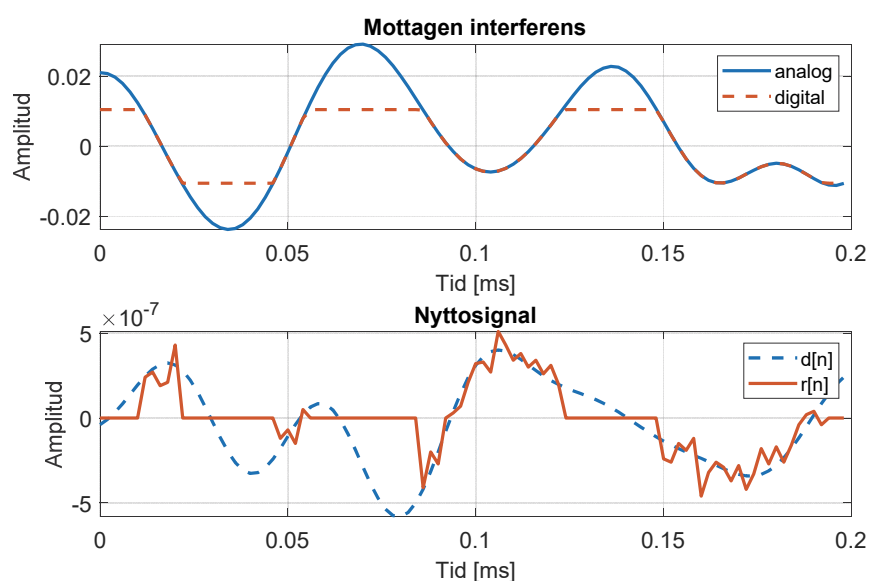
Figur 39. Prestanda av undertryckning när saturering undviks och självinterferensen effekt varierar. Resultatet visas för olika antal kvantiseringsnivåer N då nyttosignalens effekt varit fixt -80 dBm (30 dB över mottagarkänsligheten).

Det är uppenbart att en A/D-omvandlare med fler nivåer (jämför 2^{10} och 2^{22}) har möjlighet att ha ett relativt litet Δ , även vid relativt hög interferens. Detta illustreras i Figur 39 genom att undertryckningen då $N = 2^{22}$ bibehöll högt SDR även när P_x ökades. Det är anmärkningsvärt att den största lutningen är ungefär lika med 1, vilket betyder att minskningen i SDR är som mest lika med minskningen i DR. Med andra ord, om situationen kräver DR på 50 dB, men A/D-omvandlaren endast har DR = 47 dB, kommer försämring av nyttosignalens signalkvalité som uppstår på grund av otillräckligt DR vara högst 3 dB (50 – 47).

Om istället Δ anpassas efter nyttosignalen och saturering tillåts, uppnår undertryckningen prestandan enligt Figur 40 när interferenseffekten varierar. Från Figur 40 är det tydligt att övergången från hög till låg prestanda är abrupt. Detta är inte ett önskvärt beteende då det kan innebära plötsliga kommunikationsavbrott så snart det dynamiska omfånget är otillräckligt. När saturering sker är $f(x[n]) \approx f(y[n])$, vilket innebär att utsignalen från den analoga till digitala omvandlaren inte innehåller något ”spår” av $d[n]$ ($f(y[n])$ är till synes oberoende av $d[n]$). I det simulerade systemet får detta som följd att utsignalen $r[n]$ blir konstant 0 då saturering sker, vilket visas Figur 41. Effekten av saturering blir således att nyttosignalen förloras helt, vilket får relativt allvarliga konsekvenser även om satureringen inte nödvändigtvis är avsevärd.



Figur 40. Prestanda av undertryckning när Δ är fixt och saturering tillåts. Resultatet visas för olika val av antalet kvantiseringssnivåer N då nyttsignalens effekt varit fixt -80 dBm (30 dB över mottagarkänsligheten).



Figur 41. Exempel av hur signalen efter undertryckning ($r[n]$) påverkas av saturering av interferensen.

Utifrån dessa resultat är det tydligt att ett otillräckligt dynamisk omfång resulterar i en påtaglig försämring av nyttsignalens signalkvalité. För att helt undvika denna situation är det möjligt att adaptivt anpassa uteffekten, implementera analog dämpning, eller att välja en analog till digital omvandlare med fler bitar (kvantiseringssnivåer). Dessa åtgärder kräver dock viss modifikation av existerande radiosystem och möjligen även särskild hårdvara. Om inte dessa åtgärder kan vidtas, borde systemet försöka kompensera genom att anpassa kvantiseringsssteget Δ för att undvika saturering. Även om detta resulterar i en marginell förlust i signalkvalité, bör denna inte överstiga tillkortakommandet av det dynamiska omfånget, vilket innebär att försämringen av signalkvaliteten inte bör överstiga variationerna i mottagen interferenseffekt.

5 Systematisk kompromisshantering

Integration av system för att uppnå önskad kommunikationsförmåga är komplext och innebär kompromisser mellan olika lösningar och åtgärder. I detta kapitel beskrivs förutsättningar och möjligheter att göra själva kompromisshanteringen på ett systematiskt sätt så att hänsyn samtidigt tas till helhetsperspektivet för en plattform och för olika samgrupperingsalternativ. Detta kopplar direkt till projektets huvudfråga:

Hur ska funktionssäkerheten hos kommunikationssystemen på militära plattformar garanteras när nödvändiga kompromisser i systemintegrationen måste göras för att plattformens huvuduppgifter (skydd, verkan och rörlighet) inte ska försämrast?

Systemintegration av komplexa plattformar innebär i regel att behöva hantera ett antal krav och bivillkor som delvis kan vara oförenliga. Kraven kan vara vitt skilda såsom taktiska, tekniska och ekonomiska. Dessutom ska plattformen fungera i samgruppering både med likadana plattformar och med andra plattformar. Ett sådant problem kräver i regel att kompromisser görs i systemintegrationen. Idealt görs en kompromisshantering med beaktande av ett helhetsperspektiv av plattformens prestanda och möjliga samgrupperingsalternativ. Om detta inte är praktiskt möjligt av något skäl så återstår att göra lokala kompromisser på delsystemnivå. Kompromisshantering som involverar kommunikationslösningar innebär i regel att ta hänsyn till ett antal bivillkor som i somliga fall kan vara oförenliga.

Exempel på sådana bivillkor kan vara:

- ekonomiska begränsningar
- begränsningar i antal möjliga leverantörer
- stor mängd elektronisk utrustning på begränsad yta
- fysiska begränsningar för optimal antenntplacering
- frekvensbrist eller brister i befintlig frekvensallokering
- signurmässiga begränsningar för antenntlösningar
- krav från sensorsystem för att inte degradera prestanda
- radiostörningar från egen plattform
- behov av samtidig sändning och mottagning på samma frekvensband
- arbetsmiljöskäl, t.ex. gränsvärden för exponering av EM-fält, antenntplaceringar.

Om övergripande kompromisshantering inte lyckas tillräckligt väl, eller inte görs överhuvudtaget, kan olika typer av egengenererade störningssignaler komma att begränsa plattformens förmåga.

Det finns flera skäl till att störningssignaler uppstår på plattformar. Införande av nya system utan att emissionsegenskaperna är noggrant uppmätta kan innebära att nya störningssignaler uppstår i systemet. En annan källa till störningar är elektronik som tillfälligt bärs ombord såsom laddningsutrustning för elektronik, portabla datorer etc. En annan källa till störningar kan vara försök att åtgärda störningar men som skapar nya störningsproblem istället. Ett ytterligare problem är att befintliga standarder som reglerar utombandsegenskaper hos sändande system i regel är otillräckliga för situationer som kännetecknas av liten frekvensseparation (p.g.a. få frekvenser) i kombination med tät samlokalisering/ samgruppering där dessutom en del av störningskällorna kan vara impulsaktiga. Denna problematik belyses ytterligare i Appendix A: Standarder för utombandsemission och spuriöser.

Som exempel kan försök att åtgärda störningsproblem inom ett visst frekvensområde i vissa fall leda till att störningarna istället flyttas till andra frekvenser. Jordning och skärmning som inte utförs enligt särskilda elmiljöregler kan förvärra ett störningsproblem. Trådlösa system påverkas alltid i större eller mindre utsträckning av störningssignaler, vilket innebär att en ökad mängd störningar försämrar funktionssäkerheten hos dessa system. Störningssignaler får olika konsekvenser beroende på vilka delsystem som

drabbas. Att väga sådana konsekvenser mot varandra blir en del av kompromisshanteringen.

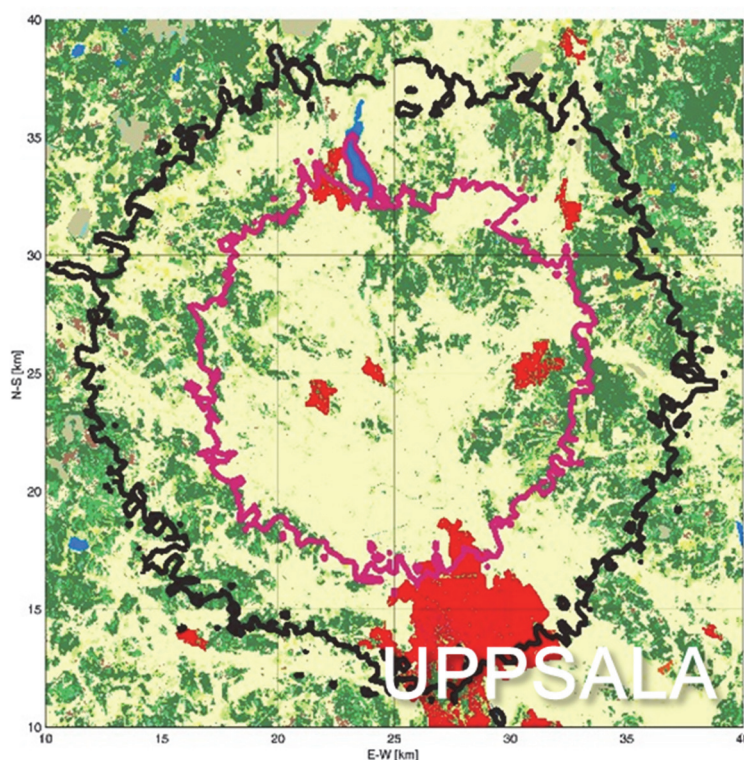
Exempel på konsekvenser vid störning kan vara:

- avbrott i kommunikationslänken
- minskad räckvidd mellan egna system
- uteblivna anrop
- tidsfördröjning av data
- minskat antal användare i kommunikationsnät
- ökad känslighet mot elektronisk attack
- kortare upptäcktsavstånd för egna signalspaningsmottagare.

Ett avbrott i en kommunikationslänk är lätt att upptäcka så att åtgärder kan börja vidtas. Andra typer av påverkan kan vara mer diffus och smygande genom att förbindelsen fortfarande fungerar men med försämrad prestanda i något avseende. En minskad räckvidd mellan egna system upptäcks inte med säkerhet förrän det fysiska avståndet överskrider den reducerade räckvidden. I ett läge då räckvidden visar sig vara avsevärt kortare än vad specifikationen säger kan en tänkbar orsak vara en ökad mängd störningssignaler vid någon mottagare.

I Figur 42 visas konsekvensen av att en VHF-radio (50 W, fordonsantenn) placerad i kartans mitt och samgrupperad 20 meter ifrån en enhet som har fyra stycken oavsiktliga störningskällor i form av persondatorer. Av kostnadsskäl har datorerna köpts in som ren civil hyllvara, utan några striktare begränsningar på oavsiktlig emission. I figuren har uppmätta emissionsspektrum använts för analysen. Konsekvensen blir att samlokaliserade radiosystem exponeras för dessa emissionsnivåer från datorerna. VHF-radion kommunicerar med en mobil enhet som rör sig i terrängen. Utan datorerna påslagna så kan den mobila enheten röra sig ut till den svarta markeringen (ca 13-14 km) innan sambandet bryts. Med datorerna påslagna så kan den bara röra sig ut till det rosafärgade området. Störningen leder till att räckvidden minskar till ca 60-70% av den ursprungliga. Så länge den mobila enheten håller sig inom ett avstånd på 7-8 km kommer således inte konsekvensen av kompromissen att märkas. Då kommer inte heller prestandapåverkan att märkas av operatören som är ovetande om att en signifikant försämring av robustheten inträffat.

Utmaningarna vid systemintegration av kommunikationssystem har undersökts i tidigare projekt ROAM och RICOM och en sammanställning finns i [35].



Figur 42. VHF-radio i kartans mitt, med störande elektronik, kommunicerar med en mobil enhet som rör sig i terrängen. Den svarta respektive rosa markeringen visar kommunikationsräckvidden utan respektive med den störande elektroniken påslagen.

5.1 Formella metoder för kompromisshantering

I litteraturen finns formella metoder utvecklade för att göra kompromisshantering på ett systematiskt sätt, se t.ex. [36] [37] [38] [39] [40]. I dessa sammanhang görs ibland en indelning i de två begreppen *uncertainty* och *imprecision* [40]:

- *Uncertainty* (osäkerhet)
 - hanterar naturliga statistiska variationer av systemparametrar orsakade av t.ex. produktionsprocesser och materialegenskaper
 - omfattar osäkerheter i exempelvis olika komponentegenskaper, frekvensdrift, spektrumegenskaper och effektvariation
 - analyseras typiskt med statistiska modeller.
- *Imprecision* (ungefär precisionsbrist)
 - innefattar osäkerhet orsakade av val mellan olika möjliga alternativ, där designern inte vet i förväg (a priori) vilket slutligt val som designprocessen kommer att resultera i
 - analyseras typiskt genom att jämföra en begränsad mängd olika möjliga designalternativ där kompromisser behöver göras
 - har som mål att maximera designens totala egenskaper, förmåga etc. i enlighet med preferenser om vilka egenskaper som är viktigast att maximera
 - ger kompromisser som exempelvis kan resultera i effektbegränsning, frekvensbegränsning, antenntyp, antenntegenskaper, filtertyper, plattformsbuss och icke-optimala samlokaliseringssavstånd mellan olika system.

Kompromisshantering hamnar då under begreppet *imprecision*. Gemensamt för formella metoder för kompromisshantering är att vissa grundförutsättningar måste vara uppfyllda som exempelvis:

- Kompromissen baseras på att varje systemkrav förses med en gradering av dess viktighet (prioritet) relativt andra krav.
- Olika designalternativs kravuppfyllnadsförmåga graderas.

Schematiskt kan graderingen se ut enligt Tabell 3, där två olika designalternativ avseende kompromisser jämförs [40]. Det finns n st systemkrav där varje kravs viktighet graderats. För varje designalternativ graderas sedan kravuppfyllnadsförmågan för varje systemkrav.

Tabell 3. Schematisk beskrivning av gradering av systemkravs viktighet och kravuppfyllnadsförmåga [2] för två olika designalternativ baserade på kompromisser.

Systemkrav	Prioritet ("Viktighet") [0,5]	Kravuppfyllnadsförmåga [1,10]	
		Designalternativ 1	Designalternativ 2
1	4	10	4
2	4	4	10
3	5	4	8
...	...	...	...
n	4	10	9

Det finns olika metoder utvecklade för hur två designalternativ ska jämföras baserat på värden enligt Tabell 3. Olika typer av sammanvägningsmetoder kan användas beroende på vilken typ av kompromisshantering som önskas. Begrepp som "offensiv" respektive "konservativ" kompromisshantering förekommer [40]. De olika sammanvägningsmetoderna skiljer sig åt bland annat beträffande hur balansen mellan viktighet och kravuppfyllnadsförmåga ska vägas ihop. Ska exempelvis en designparameter som är kopplad till ett krav med låg viktighet men med maximal kravuppfyllnadsförmåga prioriteras i sammanvägningen gentemot en designparameter kopplad till ett krav med hög viktighet men med lägre kravuppfyllnadsförmåga? Beroende på hur sådana val görs så resulterar det i olika metoder för att jämföra olika designalternativ som utgör kompromisser. Olika formella metoder för att kombinera kravuppfyllnad med kravens viktighet finns publicerade i litteraturen. Exempel är [41]

- Method of Imprecision (MoI)
- Utility theory
- Fuzzy sets
- Fuzzy design
- Optimization
- Matrix methods
- Probability methods
- Necessity methods.

Av de formella metoder som listas ovan så är MoI särskilt anpassad för ingenjörsmässiga tillämpningar där kompromisshantering behöver göras [36]. En viktig observation är att ovanstående metoder i praktiken endast bedöms vara tillämpliga på den klass av problem som i denna rapport benämns statiska. Utöver dessa metoder har FOI tidigare utvecklat en värderingsmetod vid namn COAT². COAT är en metod som dels kan användas för att genomföra gradering av systemkravs viktighet och kravuppfyllnadsförmåga, dels för att värdera olika designalternativ och jämföra dem med varandra. COAT är utvecklad med fokus på värdering av kommunikationssystem och beskrivs kortfattat i ett särskilt delkapitel nedan. En mer detaljerad beskrivning av COAT finns i Appendix C.

² COAT=COmmunications AssessmentT, en metod för värdering av komplexa tekniska kommunikationssystem i ett sammanhang.

Gemensamt för olika formella metoder är att följande grundförutsättningar behöver vara uppfyllda för att de ska kunna användas:

- en person som sammanhållande design- och integrationsansvarig för hela plattformen
- en systematisk och strukturerad designprocess som innefattar alla delsystem och möjliga samgrupperingsalternativ
- samtliga systemkrav måste specificeras tidigt i processen
- kravuppfyllnaden för samtliga designparametrar måste kunna kvantifieras, liksom kravets prioritet gentemot övriga krav.

I praktiken kan det finnas begränsningar i systemutvecklingsarbetet som gör att de grundläggande förutsättningarna inte är uppfyllda och att formella metoder därmed inte går att använda. En sådan begränsning kan vara avsaknad av en sammanhållen design- och integrationsprocess för hela plattformen och avsaknad av beaktande av möjliga samgrupperingsalternativ.

En sammanhållen process innebär bland annat att helhetskonsekvenserna av designval och kompromisser analyseras innan införandet. En annan begränsning för att göra en övergripande kompromisshantering kan vara i de fall då kommunikationssystem anskaffas betydligt senare än när övriga delar av plattformen specificeras och utvecklas. I ett sådant fall kan även antennplaceringar beslutas i ett senare skede och då är det inte säkert att det i praktiken finns så många tillgängliga alternativ för att göra en avvägd kompromisshantering. Sen anskaffning av system innebär att övriga system redan är specificerade och utplacerade, vilket innebär att de inte kan ändras vid en övergripande kompromisshantering. En annan svårighet kan vara att kvantifiera den nytta kontra kostnad som en störningsavhjälpande åtgärd kommer att leda till.

En komplicerande faktor är samtidigt att plattformar kan vara utvecklade vid helt olika tidpunkter där det kan skilja flera tiotals år emellan. Detta innebär en oförutsägbarhet avseende samgruppering i dynamiska scenarier, samtidigt som äldre redan färdigutvecklade plattformar inte är möjliga att involvera i kompromisshanteringen. Dessutom kan nya radiosystem behöva samexistera med betydligt äldre radiosystem (flera tiotals år äldre) och det kan då vara svårt att få ett sådant skall-krav på samexistens uppfyllt hos presumtiva leverantörer.

Om en övergripande design- och integrationsprocess saknas så kan kompromisser endast göras inom olika lokala delsystemfunktioner av plattformen (t.ex. antennplaceringar). Konsekvenser av att begränsa kompromisshanteringen till enskilda delsystemlösningar kan vara att:

- plattformens helhetsprestanda inte kan analyseras eller specificeras fullt ut
- uppkomna problem och begränsningar hanteras ad hoc-mässigt
- uppkomna problem måste hanteras på delsystemnivå
- vid modifiering av delsystem finns ingen tidigare helhetsanalys att utgå ifrån, vilket innebär att helhetskonsekvenser av sena modifieringar kan bli svåra att bedöma.

För kommunikationssystem innebär detta att kompromisser får hanteras lokalt genom olika typer av åtgärder såsom effektbegränsning, räckviddsbegränsning i egna system, frekvensbegränsning, begränsning i dataakt, icke-optimala antennplaceringar, icke-optimala antennegenskaper och förbättrad filtrering av signaler.

Även om metoden MoI är anpassad för ingenjörsmässiga tillämpningar så är bedömningen att den framstår som idealiserad och troligen opraktisk för de integrationsutmaningar som projekt KORINT handlar om. Att försöka tillämpa MoI på ett komplext integrationsproblem av trådlösa system på plattform och i gruppering skulle därför sannolikt inte vara effektivt då ett sådant metodsteg skulle bli för stort och komplicerat i relation till dagens arbetssätt. Dessutom är ingen av ovanstående metoder tänkta för att hantera de dynamiska scenarier som KORINT adresserar, och som är vanligt förekommande för militära plattformar. Rekommendationen är istället att införa rutiner där varje beslutad kompromiss som görs på delsystemnivå värderas i sitt sammanhang så långt det är möjligt och samtidigt dokumenteras noga. På så sätt finns en spårbarhet för senare tillfällen när nya modifieringar ska göras, samtidigt som ett mer ad hoc-betonat sätt att lösa uppkomna problem kan minska. Ett sådant arbetssätt kan tillämpas för analys av både statiska och dynamiska scenarier. För att göra detta så är förslaget att använda någon beprövad värderingsmetod, som exempelvis COAT som kortfattat beskrivs i nästa delkapitel.

5.2 Värderingsmetoden COAT

I detta kapitel ges en översiktlig beskrivning av värderingsmetoden COAT. En mer detaljerad beskrivning av finns i Appendix C. COAT är en metod för värdering av komplexa tekniska kommunikationssystem i ett sammanhang. Den värderar helheten – inte bara tekniken - och skapar en struktur och en spårbarhet i arbetet. COAT ska ses som ett ramverk som är enkelt och flexibelt, därför kan metoden användas för både stora och små värderingar och för olika miljöer. En av de stora fördelarna med COAT är att den skapar en dialog mellan taktiker och tekniker. Metoden, som redovisas i sin helhet i [7], är modulärt uppbyggt och består av fyra processer:

- kunddialog
- planering och modellering
- bearbetning
- sammanställning.

Därutöver finns en övergripande process som styr dokumentationen. COAT-metoden är utvecklad för att stödja en behovsbaserad värdering av tekniska kommunikationssystem i ett definierat sammanhang. Det är utifrån den inriktningen som ingående delmetoder är valda och testade.

COAT kan leverera en mångfacetterad bild av de tekniska systemens möjligheter och begränsningar i olika scenarion. Metoden är därför mycket lämpad i sammanhang där ett eller flera specifika tekniska system ska värderas för olika miljöer eller där kombinationer av tekniska system ska värderas. Förutom de rent tekniska aspekterna hos systemen så kan exempelvis taktik, utbildning, service/underhåll och ekonomiska villkor inkluderas. Metoden i sig gör dock ingen skillnad på militära och civila sammanhang eller system.

Exempel på värderingar där COAT-metoden är lämplig är

- sambandslösningar för nationella och internationella uppdrag
- underlag inför kravställning på ny materiel
- upphandling av tekniska system
- underlag till Forsvarsmaktens förmågeutveckling, den evolutionära processen.

5.3 Slutsatser och rekommendationer

Systemintegration av komplexa plattformar innebär i regel att behöva hantera kompromisser av olika slag. Idealt görs en kompromisshantering med beaktande av ett helhetsperspektiv av plattformens prestanda. Slutsatserna av att ha undersökt problemet med systematisk kompromisshantering kan sammanfattas enligt följande:

- Formella metoder för kompromisshantering finns utvecklade i litteraturen.
- Metoderna är inte i första hand tänkta att användas för de dynamiska scenarier som KORINT adresserar.
- Dessa metoder förutsätter en sammanhållande design- och integrationsansvarig för hela plattformen.
- De förutsätter en systematisk och strukturerad designprocess som innefattar samtliga delar och delsystem.
- Tekniska, taktiska och ekonomiska nyckelkrav måste specificeras tidigt i designprocessen.
- Kravuppfyllnadsförmågan för samtliga designparametrar måste kunna kvantifieras, liksom kravets prioritet gentemot övriga krav.
- Olika designalternativ måste definieras tidigt så att de kan utvärderas mot varandra.
- Utan ovanstående förutsättningar kan kompromisser endast göras ad hoc-mässigt på delsystemnivå i takt med att olika begränsningar och problem dyker upp under utvecklingsprocessen.
- FOI har utvecklat en metod (COAT) med fokus på värdering av kommunikations-system. COAT kan dels användas för att genomföra gradering av systemkravs viktighet och kravuppfyllnadsförmåga, dels för att värdera olika designalternativ och jämföra dem med varandra.

Sammanfattningsvis kan sägas att en systematisk och effektiv kompromisshantering kräver ett övergripande perspektiv samt att möjliga alternativ specificeras i tidiga skeden av utvecklingsprocessen. Några rekommendationer för att hantera behovet av kompromisser är:

- Inför rutiner där varje beslutad kompromiss som görs på delsystemnivå värderas i sitt sammanhang så långt det är möjligt och som samtidigt dokumenteras nog. På så sätt finns en spårbarhet för senare tillfällen när nya modifieringar ska göras, samtidigt som ett mer ad hoc-betonat sätt att lösa uppkomna problem kan minska.
- För att arbeta strukturerat med dokumenterad värdering av kompromisser så är en möjlighet att använda COAT-metoden. Den metoden är även möjlig att använda för dynamiska scenarier.
- Tillse att det finns en samfunktionsansvarig för integration av alla trådlösa system och andra emitterande system på plattformar och som bevakar att ett helhetsperspektiv beaktas så långt det är möjligt när kompromisser behöver göras.
- Specificera kommunikationssystem, antennplaceringar och möjliga samgrupperingsalternativ tidigt i systemutvecklingen.
- Genomför en övergripande störningsanalys vid koncept- och utvecklingsfas och vid senare modifieringar.
- Gör regelbunden störningsmätning på plattformar för att tidigt upptäcka avvikelser från normalbilden.
- Gör verifieringsmätningar av störningsmiljön efter införande av nya system.
- Kontrollera EMC för all tillfällig elektronisk extrautrustning (t.ex. laddningsutrustning och portabla datorer) som tas ombord på en plattform. Minimera mängden COTS³-utrustning nära trådlösa system och sensorer.

³ COTS=Commercial of-the-shelf.

6 Slutsatser, kommentarer och rekommendationer

Den övergripande frågeställningen för projektet KORINT är:

Hur ska funktionssäkerheten hos kommunikationssystemen på militära plattformar garanteras när nödvändiga kompromisser i systemintegrationen måste göras för att plattformens huvuduppgifter (skydd, verkan och rörlighet) inte ska försämrats?

Denna rapport har belyst nedanstående delfrågeställningar kopplade till den övergripande frågeställningen:

1. Hur kan funktionssäkerheten hos kommunikationssystem på militära plattformar ökas i dynamiska situationer genom
 - flexibel frekvenstilldelning, effektjustering, nätplanering och tjänstehantering
 - att använda mottagartekniker som automatiskt anpassar sig till omgivningen
 - utnyttjande av full duplex-tekniker för exempelvis hantering av utombandsemissioner?
2. Är det praktiskt möjligt att använda systematisk kompromisshantering för att hantera integrationsproblem relaterade till statiska och dynamiska scenarier?

Rapportens sammanfattande slutsatser som svarar på dessa delfrågeställningar ges i avsnitt 6.1-6.4, och svar på projektets övergripande fråga ges i avsnitt 6.5. Frågeställningen är så komplex att ett fullständigt uttömmande svar därför inte är möjligt att presentera.

6.1 Dynamisk resursallokering

Dynamisk tilldelning av frekvensspektrum är en möjlig komponent, och dynamisk effektreglering en annan, för att uppnå effektivare frekvensutnyttjande och förbättrad samexistens för framtida militära kommunikationssystem. Det finns dock många kvarstående svårigheter för att på bästa sätt nyttja tillgängliga frekvenser.

Både möjligheter och svårigheter med dynamisk spektrumhantering är speciellt framträdande i dynamiska situationer. I dynamiska scenarier varierar kanalkvalitet och störningsmiljö på olika frekvenser över tiden. För att nyttja radioresurserna på bästa sätt och minska problem med samexistens i dynamiska scenarier, är det därför nödvändigt att allokera radioresurserna dynamiskt efter de varierande förhållandena, exempelvis genom dynamiskt frekvensval och anpassad sändareffekt på de använda frekvenserna.

Frekvensanvändningen måste ta hänsyn till faktorer såsom tjänstebehov, interferenser, dynamik orsakad av plattformsförändringar och grupperingssituationer, störskydd och samexistens mellan flera system på en plattform.

Hur frekvenser allokeras har påverkan på prestanda inte bara på enskilda länkar, utan också i nätverk. Syftet med ortogonal frekvensallokering är att undvika interferens mellan noder eller nät, men på grund av utombandsemission är kanalerna i praktiken inte längre ortogonala. Utombandsemissioner kan ge problem på nätnivå då ortogonala nät används för att hantera flera bredbandiga nät på en plattform. Utombandsemissionerna kan i synnerhet orsaka problem om det ena nätet enbart består av ett fåtal noder som är spridda över en stor yta. Ett exempel är ett ledningsfordon bestyckat med två Ra570, där den ena används för brigadledning och den andra för bataljon- eller kompaniledning. Genom att tillföra fler fordon med dubbla radiosystem ökar nätverksdiversiteten, vilket minskar påverkan från utombandsemissioner på nätnivå. Detta kan dock leda till ökade integrationsproblem på dessa plattformar samt en ökad kostnad. Tack vare nätverksdiversiteten som oftast finns i ad hoc-nät är dessa trots allt ofta mindre känsliga för utombandsinterferenser än enskilda länkar. Vilken typ av nätverksprotokoll som används

påverkar dock i hög grad hur pass känsligt nätet är för utombandsemissioner. Exempelvis påverkas MPR-flödning i större grad än SKB av minskad kapacitet.

6.2 Adaptiva sändar- och mottagartekniker

Studier av adaptiva mottagartekniker visar att prestandavinsten kan vara 10-20 dB i dynamiska impulsiva störningsmiljöer, jämfört med en statisk standardmottagare. Detta kan ha en mycket stor effekt på kommunikationssystemens prestanda och funktionssäkerhet. Samtliga studerade metoder visar på prestandavinster oavsett vilken bakgrundsmiljö som appliceras. Resultaten visar tydligt på nyttan med användande av brusanpassade mottagare och impulsbrusmodeller, speciellt i dynamiska scenarier.

Analys av de brusanpassade mottagarteknikerna visar att beräkningskomplexitet kan vara ett bekymmer för en verklig implementation. Inledande studier visar att förenklingar av algoritmerna kan göras för att minska exekveringstiden, men vidare analyser krävs.

Flerantennsystem kan ge möjlighet till ökat skydd mot störning och interferens, genom exempelvis diversitet, lobformning och undertryckning. På högre frekvenser krävs fysiskt mindre antennelement, vilket gör det praktiskt lättare att få plats med flerantennsystem på mindre plattformar. Samma tekniker som används i exempelvis moderna WiFi-system och femte generationens mobiltelefonisystem (5G) kan användas även för militära radiosystem som kommunicerar på näraliggande frekvensband.

Ett adaptivt antennsystem utvecklat för att undertrycka inverkan från avsiktliga störare kan vara intressant i ett dynamiskt scenario. Prestanda för systemet är dock avhängig de algoritmer som används för undertryckning, och generellt är det svårt att avgöra hur bra ett sådant system skulle fungera i ett scenario med starka egengenererade interferenser.

6.3 Undertryckning av utombandsemission

Det har i projektet visats vara möjligt att använda digital undertryckning, baserat på full duplex-teknik, för att motverka utombandsinterferens mellan samlokaliserade radiosystem. Målet med undertryckningen är att möjliggöra mottagning även i situationer då andra system på plattformen sänder i närliggande frekvensband. Detta medför att en plattform med ett sådant system har möjlighet att bibehålla prestanda och funktionssäkerhet även i svåra interferenssituationer. Vidare har en analys av en föreslagen undertryckningsteknik visat att undertryckning är möjlig även utan en dedikerad pilotsekvens för estimering. Detta betyder att vare sig särskild synkronisering mellan radiosystemen på plattformen eller ytterligare resursallokering är nödvändig för undertryckningen.

Den stora fördelen med digital undertryckning är att den kan implementeras utan större modifieringar av nuvarande hårdvara. Studier av inverkan från kvantisering och saturering på undertryckning visar dock att utombandsemission med effekt (relativt mottagarkänsligheten) som är större än A/D-omvandlarens dynamiska omfång kan medföra stora prestandaförluster. Förlusten blir mest påtaglig då saturering sker. Det har samtidigt påvisats att prestandaförlusten kan begränsas till skillnaden mellan interferenseffekten (relativt mottagarkänsligheten) och det dynamiska omfånget, genom justering av kvantiseringsteget. Digital undertryckning av utombandsinterferens är en lösning som kan bidra till minskade interferensproblem mellan samlokaliserade radiosystem.

6.4 Systematisk kompromisshantering

Formella metoder för kompromisshantering finns utvecklade i litteraturen. Metoderna är inte i första hand tänkta att användas för de dynamiska scenarier som KORINT adresserar. De formella metoder som finns utvecklade förutsätter bland annat en integrerad designprocess med en övergripande designansvarig och där olika systemkrav specificeras i tidiga faser. I praktiken är samtliga nödvändiga förutsättningar för användning av formella

metoder för kompromisshantering ofta inte uppfylla. Några rekommendationer för att ändå förbättra kompromisshanteringen har tagits fram och de viktigaste sammanfattas nedan.

- Inför rutiner där varje beslutad kompromiss som görs på delsystemnivå värderas i sitt sammanhang så långt det är möjligt och som samtidigt dokumenteras nogga. På så sätt finns en spårbarhet för senare tillfällen när nya modifieringar ska göras, samtidigt som ett mer ad hoc-betonat sätt att lösa uppkomna problem kan minska.
- För att arbeta strukturerat med dokumenterad värdering av kompromisser så är en möjlighet att använda värderingsmetoden COAT. Den metoden är även möjlig att använda för dynamiska scenarier.
- Tillse att det finns en samfunktionsansvarig för integration av alla trådlösa system och andra emitterande system på plattformar och som bevakar att ett helhetsperspektiv beaktas så långt det är möjligt när kompromisser behöver göras.

6.5 Projektets frågor och framtida arbete

KORINT har som uppgift att besvara följande huvudfrågeställning:

Hur ska funktionssäkerheten hos kommunikationssystemen på militära plattformar garanteras när nödvändiga kompromisser i systemintegrationen måste göras för att plattformens huvuduppgifter (skydd, verkan och rörlighet) inte ska försämrats?

I Appendix D: KORINT-publikationer, finns en lista på de publikationer som har producerats inom projektet i syfte att besvara olika aspekter av huvudfrågeställningen. Projekt KORINT samt tidigare projekt vid FOI har visat att de fyra viktigaste faktorerna som påverkar funktionssäkerheten på militära plattformar är:

- Begränsad frekvenstillgång – påverkar skydd mot aktiv störning och förmågan att med dagens radiosystem effektivt hantera samlokaliserings- och interferensproblem.
- Otillräckliga standarder beträffande utombandsegenskaper – dagens standarder, t.ex. från NATO, är otillräckliga och behöver bli mer anpassade till den kravbild som föreligger för att sambandssystemen ska leverera den efterfrågade funktionssäkerheten.
- Otillräcklig styrning av hela processen vid framtagning av nya (och modifiering av äldre) system – under tidigare projekt lanserades tankar kring integrationsansvariga, den tanken gäller än idag med tillägg att någon form av metodstöd för en dokumenterad och spårbar kompromisshantering måste ingå.
- För mycket utrustning som emitterar elektromagnetisk strålning på små plattformar – endast de för uppgiften viktiga systemen bör tillåtas och dessa måste specificeras utifrån den uppgift plattformen ska lösa. Det senare kan betyda att kraven kan bli både högre eller lägre relativt de standarder som gäller för utrustningen.

Några garantier för kommunikationssystemens funktionssäkerhet kan inte ges då militära plattformar är oerhört komplexa system-av-system där en kombination av arvet, civila komponenter, frekvensbrist och många aktörer med varierande kunskap och erfarenhet skapar svårigheter att skapa, driva och underhålla dessa system.

Tekniskt sett finns det flera intressanta lösningar där exempelvis adaptiv demodulation och avkodning i miljöer med impulsbrus, dynamisk spektrumhantering och effekttreglering samt full duplex för undertryckning av utombandsemission har stor potential att förbättra funktionssäkerheten. Vidare studier, med fokus på realiserbarhet och implementation rekommenderas för att ytterligare kvantifiera nyttan av dessa lösningar.

På det metodmässiga planet bedömer vi att delar av en mer systematisk process som bidrar till en bättre helhet beträffande integrationen är möjlig att införa, trots svårigheten att införa en systematisk kompromisshantering. Någon av de studerade metoderna för kompromisshantering bör kunna utgöra basen för detta arbete. Ett alternativ är att använda den FOI-utvecklade metoden COAT som erbjuder en dokumenterad process för värdering av olika kompromissalternativ.

Projektet KORINT avslutas 2019-12-31. Första januari 2020 startar ett nytt treårigt FoT-projekt vid FOI där frekvensproblematiken är central och med detta som utgångspunkt fortsätter arbetet med systemintegration och samlokalisering av radiosystem. Projekttiteln är "Effektivare frekvensutnyttjande för förbättrad samexistens". Projektet ska utveckla metoder och tekniska lösningar för att uppnå effektivare frekvensutnyttjande och förbättrad samexistens för kommunikationssystem. Arbetet ska baseras på resultat och erfarenheter från det tidigare projektet KORINT. Resultaten kan även användas inom ramen för FM strategiska spektrumarbete samt av FMV vid anskaffning och modifiering av kommunikationssystem. Det nya projektet ska försöka besvara följande frågeställningar:

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

7 Referenser

- [1] B. Asp, K. Wiklundh, S. Örn Tengstrand, E. Axell, P. Eliardsson och B. Johansson, "RICOM Slutrapport," FOI-R-4317--SE, 2016.
- [2] B. Asp, E. Axell, S. Bergström, P. Eliardsson, K. Häggglund, A. Komulainen, T. Lindgren och P. Stenumgaard, "Metoder för hantering av statiska interferensmiljöer," FOI R--4780--SE, 2019.
- [3] "IEEE Standard Computer Dictionary: A Compilation of IEEE Standard Computer Glossaries," IEEE Std 610, 1991.
- [4] B. Asp, K. Wiklundh, P. Stenumgaard, P. Eliardsson, B. Johansson och E. Axell, "ROAM Slutrapport," FOI-R--3790--SE, 2013.
- [5] P. Eliardsson, K. Wiklundh, E. Axell och P. Stenumgaard, "Robust channel selection and power control for HF communications," FOI-R--4120--SE, 2015.
- [6] B. Asp, P. Eliardsson, B. Johansson, P. Stenumgaard och K. Wiklundh, "Interferensnivåmätningar på HMS Carlskrona," FOI-RH--1208--SE, 2012.
- [7] P. Eliardsson, K. Wiklundh, E. Axell, B. Johansson och P. Stenumgaard, "Analysis of the local HF interference environment at a military platform," i *Nordic HF*, Fårö, 2013.
- [8] F. Bock och B. Ebstain, "Assignment of Transmitter Powers by Linear Programming," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 6, nr 2, pp. 36-44, July 1964.
- [9] K. Fors och S. Linder, "Konsekvenser av interferensmiljön vid samgruppering av frekvenshoppande radiosystem," FOI-R--4318--SE, 2016.
- [10] K. Fors, S. Linder, J. Nilsson och U. Sterner, "Effects of interference between co-located frequency-hopping ad hoc networks," i *MILCOM*, Baltimore, MD, 2017.
- [11] U. Sterner, S. Linder, J. Nilsson och K. Fors, "Inter-Network Interference in Synchronized Cooperative Broadcast Systems," i *MILCOM*, Los Angeles, CA, 2018.
- [12] K. Fors, S. Linder, J. Nilsson och U. Sterner, "Interferenser mellan frekvenshoppande mobila kommunikationsnät -En jämförelse för två olika typer av ad hoc-nät," FOI-R-4671--SE, 2018.
- [13] U. Uppman, J. Nilsson, S. Linder, A. Komulainen, A. Hansson och J. Grönkvist, "Tillförlitlig informationsöverföring i mobila radionät - Slutrapport," FOI-R--4475--SE, 2017.
- [14] U. Sterner, "Group Mobility Model," FOI MEMO 5431, 2015.
- [15] P. Stenumgaard, J. Chilo, P. Ferrer-Coll och P. Ängskog, "Challenges and conditions for wireless machine-to-machine communications in industrial environments," *IEEE Communications Magazine*, vol. 51, nr 6, pp. 187-192, 2013.
- [16] P. Eliardsson, E. Axell, K. Wiklundh och P. Stenumgaard, "Channel Selection that Considers the Impulse Characteristics of the Local Interference," i *International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Europe)*, Gothenburg, 2014.

- [17] D. Middleton, "Non-Gaussian noise models in signal processing for telecommunications: new methods and results for class A and class B noise models," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 45, nr 4, pp. 1129-1149, 1999.
- [18] C. Nikias och M. Shao, *Signal Processing with Alpha-Stable Distributions and Applications*, New York: Wiley-Interscience, 1995.
- [19] S. Zabin och H. Poor, "Efficient Estimation of Class A Noise Parameters via the EM Algorithm," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 37, nr 1, pp. 60-72, 1991.
- [20] M. Bibalan och H. Amindavar, "On Parameter Estimation of Symmetric alpha-Stable Distribution," i *IEEE Int. Conf. on Acoustics, Speech, and Signal Process. ICASSP*, Lujiazui, China, 2016.
- [21] C. Nikias och X. Ma, "Parameter Estimation and Blind Channel Identification in Impulsive Signal Environments," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 43, nr 12, pp. 2884-2897, 1994.
- [22] G. Tsihrantzis och C. Nikias, "Fast Estimation of the Parameters of Alpha-Stable Impulsive Interference," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 44, nr 6, pp. 1492-1503, 1996.
- [23] J. McCulloch, "Simple Consistent Estimators of Stable Distribution Parameters," *Communications in Stat., Sim., and Comp.*, vol. 15, nr 4, pp. 1109-1136, 1986.
- [24] E. Axell, S. Tengstrand och K. Wiklundh, "Online Classification of class A impulse interference," i *IEEE MILCOM*, Baltimore, 2017.
- [25] K. Wiklundh, K. Fors och P. Holm, "A log-likelihood ratio for improved receiver performance for VLF/LF communication in atmospheric noise," i *IEEE MILCOM*, Tampa, FL, 2015.
- [26] S. Linder, B. Johansson och G. Eriksson, "MIMO på arméfordon - vinster i praktiken," FOI-R--3696--SE, 2013.
- [27] T. Hult, S. Linder, U. Sterner och G. Eriksson, "Kooperativ MIMO," FOI-R--3636--SE, 2012.
- [28] K. Wiklundh, P. Holm, S. Linder, P. Johansson, T. Lindgren, P. Eliardsson, P. Stenumgaard, G. Eriksson och M. Forsman, "Utvärdering av tekniklösningar för en taktisk datalänk för flygande plattformar," FOI-R--3726--SE, 2013.
- [29] L. Pettersson, "WBBF - Ett simuleringsverktyg för bredbandig adaptiv lobformning," FOI-R--0605--SE, 2002.
- [30] L. Pettersson, "Adaptive jammer cancellation for GNSS: Performance simulations for three hexagonal arrays," FOI-R--3147--SE, 2010.
- [31] T. Riihonen, D. Korpi, O. Rantula, H. Rantanen, T. Saarelainen och M. Valkama, "Inband Full-Duplex Radio Transceivers: A Paradigm Shift in Tactical Communications and Electronic Warfare?," *IEE Communication Magazine*, pp. 30-36, October 2017.
- [32] X. Quan, W. Pan, Z. Li, Y. Liu och Y. Tang, "Hybrid SI cancellation for single-antenna full-duplex radios," *Electronic Letters*, vol. 53, nr 24, pp. 1615-1617, 2017.
- [33] A. Sabharwal, P. Schniter, D. Guo, D. W. Bliss, S. Rangarajan och R. Wichman, "In-Band Full-Duplex Wireless: Challenges and Opportunities," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 32, nr 9, pp. 1637-1652, 2014.

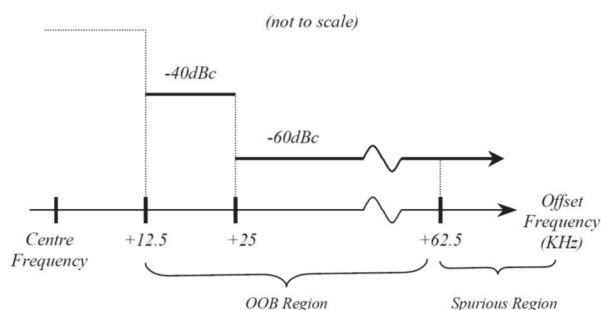
- [34] C. Slattery och M. McCarthy, "Oversampling ADC and PGA Combine to Provide 127-dB Dynamic Range," *Analogue Dialogue*, December 2011.
- [35] B. Asp, K. Fors, S. Linder, T. Lindgren och K. Wiklundh, "Övergripande studie – Åtgärder i olika stadier för att säkerställa radioprestanda, FOI-R--4570--SE," FOI, 2018.
- [36] K. N. Otto och E. K. Antonsson, "Trade-Off Strategies in Engineering Design", *Research in Engineering Design*, 1991.
- [37] K. Wood, "A Method for Representing and Manipulating Uncertainties in Preliminary Engineering Design," *PhD thesis, California Institute of Technology, Pasadena, CA*, 1989.
- [38] K. Wood och E. Antonsson, "Computations with imprecise parameters in engineering design: Background and theory," *ASME Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design*, pp. 616-625, 1989.
- [39] K. Wood och E. Antonsson, "Modeling imprecision and uncertainty in preliminary engineering design," *Mechanism and Machine Theory*, pp. 305-324, 1990.
- [40] E. K. Antonsson och K. N. Otto, "Imprecision in Engineering Design," *Journal of Vibration and Acoustics*, March 1999.
- [41] B. Asp, C. Carling, A. Hunstad, B. Johansson, P. Johansson, J. Nilsson och Å. Waern, "COAT Användarguide," FOI-R--2409--SE, december 2007.
- [42] D. Middleton, "Statistical-Physical Models of Electromagnetic Interference," vol. 19, nr 3, pp. 106-127, 1977.

8 Appendix A: Standarder för utombandsemission och spuriouser

I KORINT-rapporten om *Metoder för hantering av statistiska interferensmiljöer* [2] togs standardiseringsläget beträffande utombandsemission från sändare i sambandssystem upp till diskussion. Även i en dynamisk situation är det viktigt att hantera detta. Givetvis är spektrummasker etc. som ges av befintliga standarder statistiska men de får återverkan på sambandssystemens prestanda i en dynamisk situation. Detta gäller främst när vi betraktar frekvenshopp och plattformar som rör sig nära och relativt varandra. Utombandsegenskaper är särskilt viktiga att beakta när frekvenstillgången är begränsad. Nedan beskrivs några standarder som nyttjas idag.

8.1 Smalbandiga system

Nato STANAG 4204 ger gränser för utombandsemission och spuriouser på en singelkanal (25 kHz) i ett VHF-system (Figur 43).



Figur 43 Gränser för utombandsemission och spuriouser enligt Nato STANAG 4204.

Standarden innehåller enbart nivåer relativt sändarens topeffekt och det finns inget i standarden som hanterar impulsaktiga utombandsemissioner, något som kan vara intressant i frekvenshoppssammanhang.

Nato STANAG AcomP 4205 ger gränser för utombandsemission och spuriouser på en singelkanal (25 kHz) i ett UHF-system. Enligt denna STANAG ska 90 % (94 % vid frekvensmodulation, FM) av den totala medeleffekten vara inom 25 kHz. Effekten på spuriouser får ej överstiga -40 dBc relativt topeffekten inom +/- 100 kHz från centerfrekvensen och max -60 dBc för alla andra frekvenser. Även denna standard saknar information om inverkan av impulsaktiga utombandsemissioner.

8.2 Bredbandiga system

För bredbandiga system, med bandbredd 1 MHz och däröver på UHF, är standardiseringsläget mer oklart. Inom Nato C3B CaP⁴ 1 LOS COMMS CaT⁵ pågår arbete med att standardisera en bredbandig vågform av denna typ. En kravspecifikation är under framtagning och för närvarande är uppgifterna knapphändiga beträffande utombandsemission och spuriouser, i senaste utkastet anges 60 dBc i grannkanaldämpning. Så här långt finns heller inget om inverkan av impulsaktiga utombandsemissioner i standarderna.

8.3 Övriga standarder

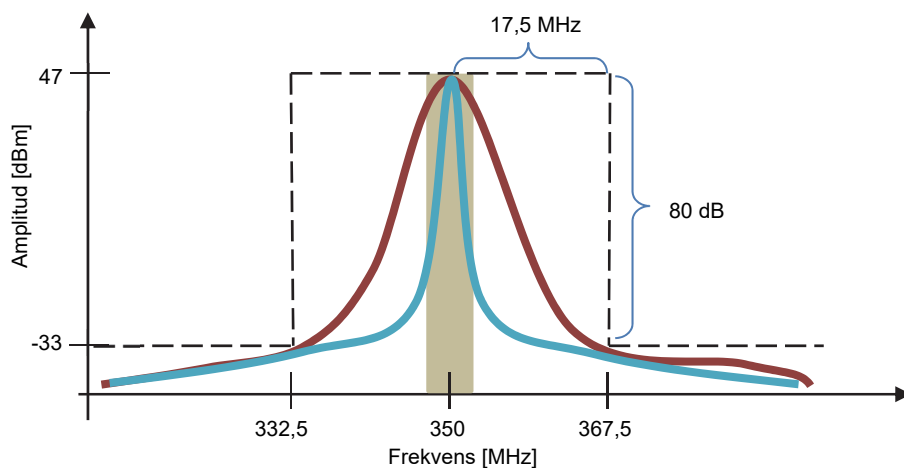
De övriga standarder som finns tillgängliga är EMC-standarder, det vill säga standarder med krav för att uppnå elektromagnetisk kompatibilitet mellan olika system och plattformar.

Standarden MIL-STD-461 CE106/RE103 ställer kravet att emissionen på avstånd 5 % från centerfrekvensen ska vara dämpad 80 dB jämfört med nyttosignalen. I Figur 44 visas vad MIL-STD-461 CE106/RE103 skulle innebära för centerfrekvensen 350 MHz; först 17.5 MHz från centerfrekvensen går det att förvänta sig att utombandsemissionen är 80 dB lägre än nyttosignalen. Detta betyder att inom

⁴ CaP=Capability Panel.

⁵ CaT=Capability Team.

35 MHz kring centerfrekvensen krävs inte vilka nivåer utombandsemissionen tillåts ha. Den begränsade spektrumtillgången gör att det i praktiken inte är rimligt att separera olika radiosystem eller olika nät enligt vad som specificeras med CE106 eller RE103. Dämpningen på 80 dB är inte heller tillräcklig om flera radiosystem ska samexistera på en och samma plattform eftersom antennisolationen är för liten så att den totala dämpningen av utombandsemissionen inte blir tillräcklig. Vid samlokalisering av frekvenshoppande system på plattform eller vid samgruppering måste närmaste grannkanal kunna nyttjas utan att orsaka oacceptabla störningsproblem. Detta för att utnyttja de tilldelade frekvenserna så bra som möjligt ur robusthetssynpunkt. CE106/RE103 möjliggör inte det idag.



Figur 44. Illustration av innebörden av kraven CE106 och RE103 i MIL-STD-461 för centerfrekvensen 350 MHz och uteffekten 50 Watt. De röda och blåa kurvorna är exempel på olika signaler som båda uppfyller kravet.

9 Appendix B: Brusmodeller

Brus är bakomliggande störningar som produceras genom en kombination av signaler från alla möjliga frekvenser. En mottagare tar emot den bruspåverkade signalen och försöker sedan urskilja informationen från bruset. Bruset antas ofta kunna beskrivas med en normalfördelning, även känd som *Gaussisk* fördelning. Teoretiskt är det möjligt att beskriva slumpartat brus med hjälp av matematiska funktioner baserade på sannolikhetsfördelningar. Den Gaussiska fördelningen är välanvänd och väldokumenterad. Dessutom är den tämligen analytiskt enkel att implementera vilket bidrar till dess popularitet.

Projektet har utöver normalfördelningen undersökt två olika brusmodeller med förmågan att beskriva impulsivt brus. De tre brusmodellerna är:

- Gaussisk modell, även kallad normalfördelning
- Middleton's Class A-modell
- Symmetrisk α -Stabil modell.

Impulsivt brus är ett brett koncept och för att förtydliga det något brukar det urskiljas mellan intelligent och icke-intelligent brus [42]:

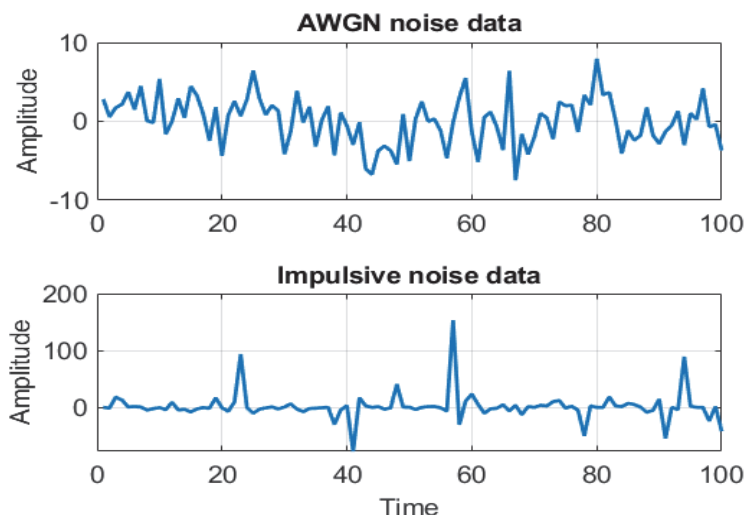
1. Intelligent brus: Konstgjord interferens med syfte att förmedla ett meddelande eller information av något slag.
2. Icke-intelligent brus: Naturliga störkällor eller interferens som är artificiell i sitt ursprung men inte tänkt för kommunikation, till exempel tändning av bilmotor eller strålning från elledning.

Många typer av interferens finns beskrivna och det är möjligt att associera en viss typ av brus med en viss brusmodell, vilket kan vara till hjälp för adaptiva system. Tabell 4 sammanställer vanliga typer av interferens och visar vilken eller vilka brusmodeller som typiskt kan beskriva den typen av interferens.

En typisk plattform upplever flera av interferenskällorna nämnda i tabellen. System i plattformen är därför i behov av att utgå från brusmodeller som kan beskriva den interferens som uppkommer. Den Gaussiska modellen som tidigare dominerat vid systemanalyser räcker inte längre till för att beskriva icke-intelligent interferens. Figur 45 visar två brussignaler syntetiskt genererade enligt normalfördelningen och en godtycklig α -Stabil process. Bruset har samma medeleffekt i båda serierna. Den α -Stabila serien visar på ett beteende typiskt för impulsiva data, nämligen förekomsten av så kallade impulsspikar, plötsliga sampel med avsevärt högre amplitud. Skillnaden mellan det lägsta och högsta sampelvärdet i serien blir därmed substantiellt högre än i den i sammanhanget enhetliga normalfördelningsserien där bruset istället är enkelt att hantera.

Tabell 4. Typisk klassificering av olika interferenskällor.

Typ	Intelligent	Passande brusmodell	Icke-Intelligent	Passande brusmodell
Artificiell	Kommunikation	Gauss, Class A, SαS	Tändning av bilmotor	SαS
			Annan elektromagnetisk strålning	Gauss, Class A, SαS
	Störsändare (med syfte att störa)	Gauss, Class A, SαS	Klutter (EM), eko, och annan typ av genljöd	Class A, SαS
Naturlig			Atmosfärisk	Class A, SαS
			Kosmisk strålning och solstrålning	Class A, SαS



Figur 45. Brusdata genererad enligt två olika modeller vid samma medeleffekt, Gauss (överst) och godtycklig impulsiv modell (nederst).

9.1 Normalfördelningen

Den Gaussiska fördelningen, eller på svenska mer känd som normalfördelningen, beskrivs av en matematisk funktion och karakteriseras av två distinkta parametrar, σ och μ , som avgör hur fördelningen beter sig. Sannolikhetsfördelningen ges av

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}.$$

De två parametrarna är:

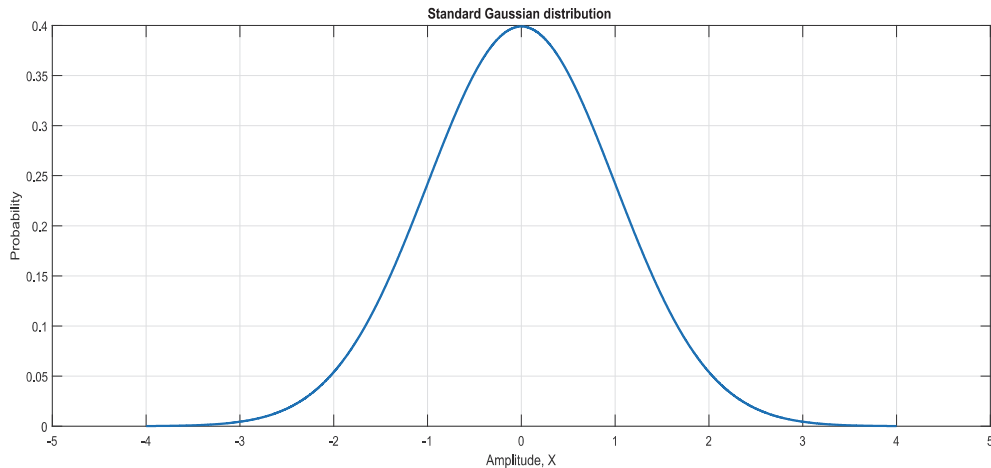
- Väntevärde, μ : Motsvarar median- och medelvärde av fördelningen.
- Varians, σ^2 : Ett mått på hur spridda sampel är från fördelningens medelvärde.

I ekvationen motsvarar x brussamplets amplitud. Väntevärde och varians kan anta olika värden för att beskriva ett visst beteende och en viss fördelning. Det betydligt vanligaste fallet är att välja $\mu = 0$ och $\sigma^2 = 1$. Funktionen kan då förenklas

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}x^2}.$$

Det är detta val av parametrar som resulterar i det fall som är känt som den standardiserade normalfördelningen.

Figur 46 illustrerar normalfördelningen. Fördelningens svansar visar att sannolikheten för sampel med amplitud större än två är väldigt låg och över tre är den nästan obefintlig. Ändarna på fördelningen konvergerar snabbt mot noll. Detta är en indikation på att sampel med större amplitud, vilket är vanligt för impulsivt brus, inte är förväntade av fördelningen.



Figur 46. Normalfördelningens täthetsfunktion.

9.2 Middletons Class A-modell

En modell för att försöka beskriva impulsivt brus är Middletons Class A. Egentligen är Class A-modellen en av tre liknande modeller (Class A, Class B och Class C) där syftet är att beskriva olika typer av impulsivt brus. Class A-modellen har blivit den mest etablerade, trots komplexiteten i modellen eftersom den har visat sig kunna beskriva många interferensscenarier.

Class A-modellen karaktäriseras av två parametrar utöver variansen, σ^2 :

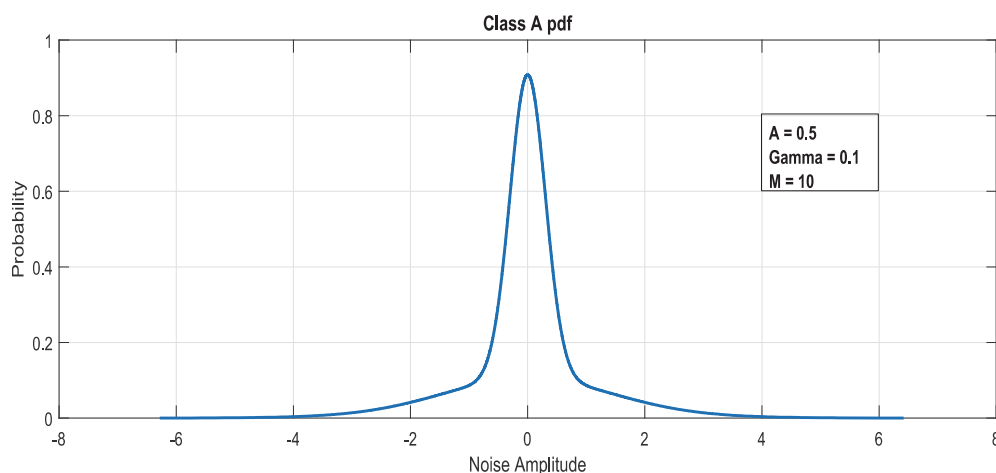
- Impulsivt index, A : Denna parameter är definierad som produkten av det genomsnittliga antalet störande händelser och den genomsnittliga varaktigheten av en sådan störningshändelse. A kan därför tolkas som ett mått på impulsiviteten, desto lägre värde på A , ju mer domineras brusegenskaperna av extrema event och bruset blir i sin karaktär mer impulsivt. Med ökande A blir bruset mer strukturerat och närmar sig normalfördelningen. Generellt brukar A anta värden inom intervallet $A \in [10^{-2}, 1]$.
- Gaussisk faktor, Γ : Class A fördelningen består av en Gaussisk komponent och en impulsiv komponent. Den Gaussiska faktorn motsvarar kvoten av dessa beståndsdelar. För små Γ domineras bruset av den impulsiva delen och för stora Γ dominerar den Gaussiska delen.

De två Class A-parametrarna är mer komplexa i sin natur och svårare att direkt tolka än normalfördelningen. Tillsammans anses de beskriva brusets karaktär och det gäller att överväga båda parametrarna vid analys. Sannolikhetsfördelningen för Class A modellen är betydligt mer komplex än normalfördelningen och parametrarna har central betydelse i modellen

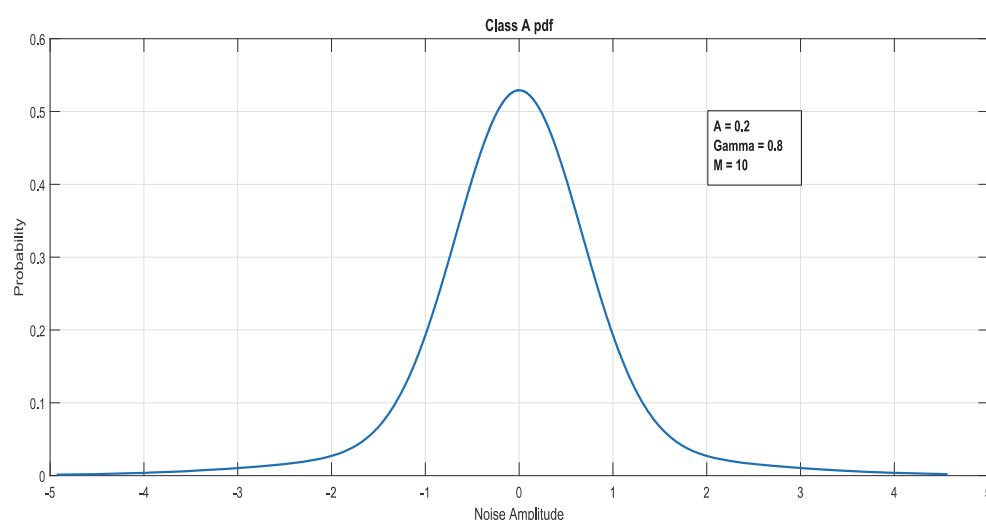
$$f(x) = e^{-A} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{A^m}{m! \sqrt{2\pi\sigma_m^2}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma_m^2}}.$$

Modellen består av en oändlig summa. Turlig nog är det möjligt att approximera summan efter ett tiotal termer och bibehålla tillräcklig noggrannhet för praktisk tillämpning. Termen σ_m^2 härleds från de två parametrarna A och Γ och definieras tillsammans med summationsindexet m och den genomsnittliga bruseffekten, σ^2 enligt

$$\sigma_m^2 = \sigma^2 \frac{\frac{m}{A} + \Gamma}{1 + \Gamma}.$$



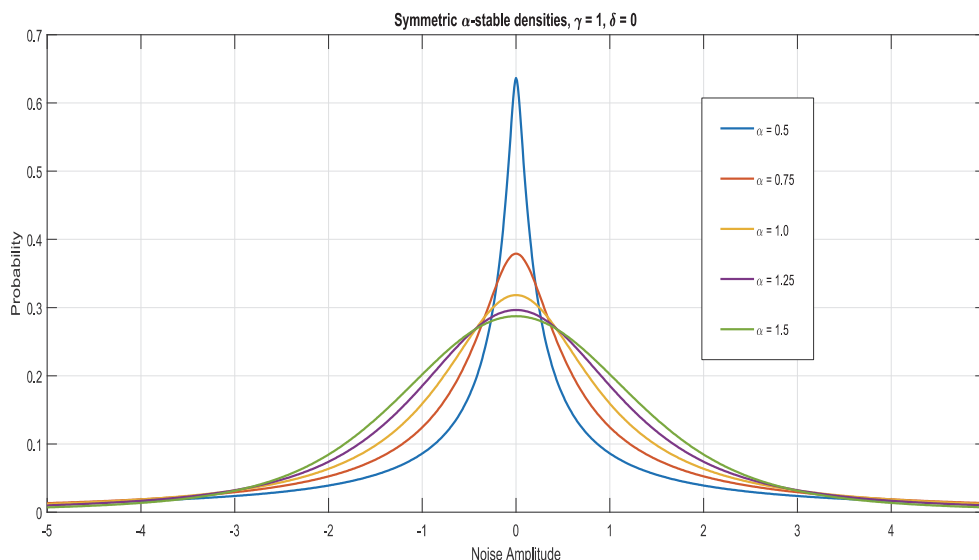
Figur 47. Class A sannolikhetsfördelning med $A = 0,5$, $\Gamma = 0,1$.



Figur 48. Class A sannolikhetsfördelning med $A = 0,2$, $\Gamma = 0,8$.

Sannolikhetsfördelningen för två olika parametervärden visas i Figur 47 och Figur 48. Först illustreras parametervärdet $A = 0,5$ och $\Gamma = 0,1$ och Figur 48 visar $A = 0,2$ och $\Gamma = 0,8$. Den senare liknar mer normalfördelningen i sin natur på grund av det högre värdet av Γ som indikerar att andelen Gaussiskt brus är jämförbart med den impulsiva i styrka. I Figur 48 syns detta på fördelningens form vilken liknar den Gaussiska klockformen i Figur 46 där variansen av sampel är mer jämnt fördelad kring fördelningens medelvärde. Det mer impulsiva fallet avviker från medelvärdet och har istället högre svansar, vilket innebär att sampel med högre amplitud är troligare och att modellen har stöd för det [17].

9.3 Symmetrisk α -Stabil modell



Figur 49. Symmetrisk α -Stabil sannolikhetsfördelning för olika värden på α .

Den symmetrisk α -Stabila (S α S) fördelningen är en subklass av en större samling fördelningar. Hänvisning till α -Stabila fördelningar framöver syftar på den *symmetrisk* α -Stabila modellen. Parametern α är den karaktäristiska variabeln för alla α -Stabila fördelningar och den är begränsad till intervallet $\alpha \in [0, 2]$. För $\alpha = 2$ reduceras fördelningen till ett specialfall, nämligen normalfördelningen.

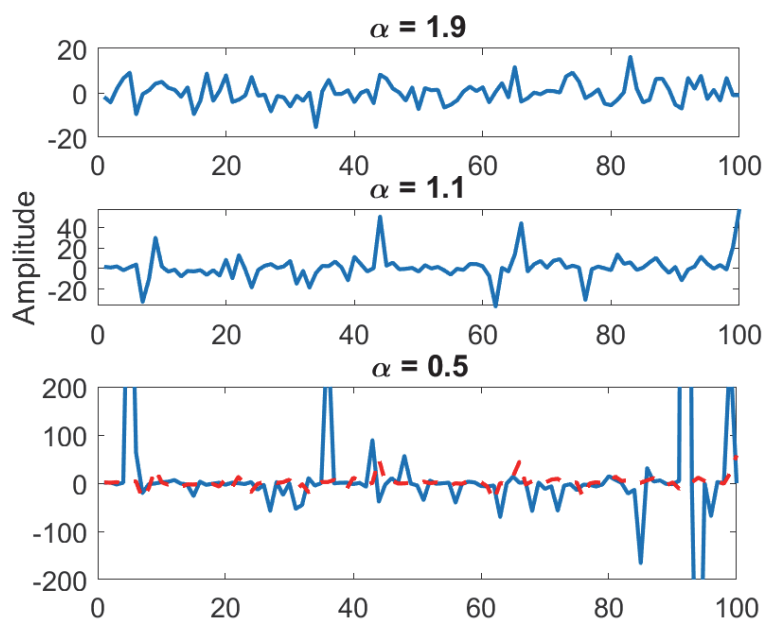
En stor fördel med just S α S-fördelningar är att de exakt kan beskriva normalfördelningen. En Class A-fördelning går mot en normalfördelning för stora värden på A , men det är aldrig en precis beskrivning.

De fyra parametrarna som beskriver en α -Stabil fördelning är:

- Karaktäristisk exponent, α : Även känd som stabilitetsparametern. α bestämmer svansarnas storlek, vilket är analogt med fördelningens form och fungerar även som ett mått på fördelningens impulsivitet. Ju lägre α , desto mer trolig är förekomsten av impulsiva sampel. Med ökande α blir fördelningen mer lik normalfördelningen.
- Skevhetsparameter, β : För generella α -Stabila fördelningar är β ett mått på hur fördelningen är speglad kring den vertikala axeln. Symmetriska α -Stabila fördelningar har alltid $\beta = 0$, därav namnet *symmetrisk*.
- Lokaliseringsparameter, δ : Detta är ett mått på medelvärde eller median, beroende på hur stort α är. I praktiken har det ingen större inverkan och i normala fall antas i princip alltid $\delta = 0$.
- Dispersion, γ : Dispersionen är synonymt med variansen hos fördelningen. Större varians innebär mer spridda värden.

I Figur 49 visas hur värdet på α påverkar fördelningens form. För låga α bildas det en kraftig spik kring medelvärdet med större svansar, vilket indikerar större trolighet för impulsiva fall. Med ökande α blir formen mer enhetlig och klockformad, fördelningen närmar sig normalfördelningen för $\alpha = 2$.

För att undersöka hur α -Stabila fördelningar ökar i impulsivitet har tre olika serier genererats för minskande värden på α och Figur 50 visar hur impulsiviteten påverkas. Den övre serien är genererad med $\alpha = 1,9$, vilket motsvarar ett fall snarlikt normalfördelningen ($\alpha = 2$). Jämförs den serien med vad som visades i Figur 45 i det Gaussiska fallet observeras likheten i termer av spridning och varians. När α minskas, blir fördelningen enligt definitionen mer impulsiv. I fallet $\alpha = 1,1$ börjar den impulsiva karaktäristiken ta över, med enstaka förekommande interferensspikar med större amplitud. Redan i detta fall kommer den Gaussiska fördelningen att avvika kraftigt från brusets faktiska fördelning och därmed misslyckas i modellering av bruset. Minskas α ytterligare är den resulterande serien mycket impulsiv. I fallet $\alpha = 0,5$ motsvarar den rödstreckade linjen det tidigare fallet, $\alpha = 1,1$, där den genererade serien lagts på det mer impulsiva fallet för att utgöra en referens i graden av impulsivitet. Nu är spikar av betydligt större amplitud förekommande. Ett sampel kan förstärkas med en faktor på flera hundra vilket får förödande konsekvenser för en mottagares prestanda, då den är anpassad för normalfördelat brus.



Figur 50. Olika instanser av α -Stabilt brus med ökande grad av impulsivitet. Observera att amplitudsskalan ökar.

Ett stort problem med α -Stabila fördelningar är att det inte existerar en sluten form av sannolikhetsfördelningen. Istället används fördelningens *karaktäristiska funktion*. Med hjälp av den karaktäristiska funktionen går det att approximera en sannolikhetsfördelning, dock är det en mycket matematiskt kostsam och invecklad process som kräver mycket datorkraft [18].

10 Appendix C: COAT-metoden

COAT-metoden är utvecklad för att stödja en behovsbaserad värdering av tekniska kommunikationssystem i ett definierat sammanhang. Det är utifrån den inriktningen som ingående delmetoder är valda och testade.

COAT kan leverera en mångfacetterad bild av de tekniska systemens möjligheter och begränsningar i olika scenarion. Metoden är därför mycket lämpad i sammanhang där ett eller flera specifika tekniska system ska värderas för olika miljöer eller där kombinationer av tekniska system ska värderas. Förutom de rent tekniska aspekterna hos systemen så kan exempelvis taktik, utbildning, service/underhåll och ekonomiska villkor inkluderas. Metoden i sig gör dock ingen skillnad på militära och civila sammanhang eller system.

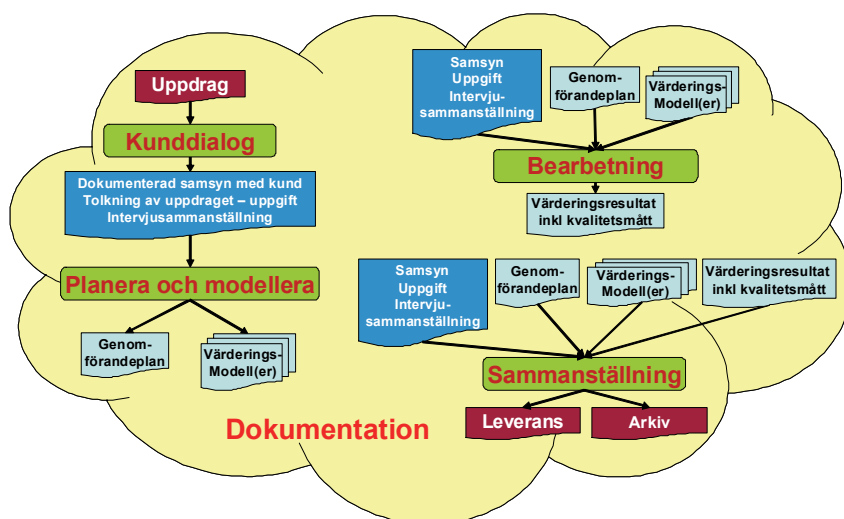
10.1 COAT-metoden i korthet

COAT är en metod för värdering av komplexa tekniska kommunikationssystem i ett sammanhang. Den värderar helheten – inte bara tekniken - och skapar en struktur och en spårbarhet i arbetet. COAT ska ses som ett ramverk som är enkelt och flexibelt, därför kan metoden användas för både stora och små värderingar och för olika miljöer. En av de stora fördelarna med COAT är att den skapar en dialog mellan taktiker och tekniker.

Metoden, som redovisas i sin helhet i [41] är modulärt uppbyggd och består av fyra processer, se Figur 51:

- Kunddialog
- Planering och modellering
- Bearbetning
- Sammanställning

I varje process dokumenteras arbetet och det finns en övergripande process som styr dokumentationen.



Figur 51. COAT-metodens fyra processer (gröna rutor).

Den första processen är kunddialogen, som också måste anses som den viktigaste eftersom den syftar till att fastställa uppgiften. Uppdragsgivaren och personer med nyckelkompetens intervjuas för att klargöra och förankra uppdraget. Dessa intervjuer ligger sedan till grund för genomförandet av värderingen.

Ur kunddialogen härleds också de övergripande behov som den militära situationen ställer på ingående förband och system. Dessa kundbehov utgör utgångspunkten i själva bearbetningsarbetet.

Efter kunddialogen följer processen planering och modellering. Denna process förbereder genomförandet av värderingen. Underlag i form av tekniska specifikationer, scenarion, vinjetter samt övrig relevant information tas fram och bearbetas. Dessutom skrivs en genomförandeplan med en arbetsgång.

Arbetsinsatsen i denna process är normalt inte så omfattande men tar ofta lång tid (kalendertid) eftersom insamlingen av information många gånger sker från ett stort antal källor.

Processen bearbetning hanterar genomförandet av värderingen. I denna process ligger den största arbetsbördan. Däremot behöver det inte vara den del som tar längst kalendertid eftersom arbetet i allmänhet är en rättfram process och all grundinformation redan finns på plats. Värderingen sker genom att i flera steg bryta ner kundbehoven till underliggande behov. Under detta arbete är det helt avgörande att anteckna alla gjorda antaganden, förutsättningar och vikter mellan de olika delbehoven. Nedbrytningen representeras naturligt i en trädstruktur, som går från de övergripande kundbehoven, ner till mätbara faktorer. Eftersom dessa faktorer ofta kan vara kvalitativa eller så osäkra att mätvärden inte kan anges med hög precision, handlar det många gånger om att göra grova uppskattningar eller rena bedömningar. Det viktiga är att grunden för dessa redovisas tydligt. När mätvärden erhållits förs dessa sedan uppåt i behovsträdet igen och värderas på varje plan utifrån de antaganden, förutsättningar och vikter de givits.

Då bearbetningsprocessen är genomförd vidtar arbetet med att sammanställa resultatet. Detta görs genom att sammanfatta resultaten som vuxit fram i behovsträdet. Med detta som utgångspunkt är det förhållandevis enkelt att undersöka hur känsligt resultatet är för mindre variationer i olika faktorer. Det ger dessutom en stabil grund för att resonera om konsekvenser av att byta ut någon av de övergripande förutsättningarna. Detta är nödvändigt för att kunna uttala sig om hur generellt resultatet är. Ett exempel kan vara att förändra scenariot, till exempel genom att flytta miljön från djungel till ökenterräng.

10.2 COAT användningsområden

Exempel på värderingar där COAT-metoden är lämplig är:

- sambandslösningar för nationella och internationella uppdrag
- underlag inför kravställning på ny materiel
- upphandling av tekniska system
- underlag till Försvarmaktens förmågeutveckling, den evolutionära processen.

10.2.1 Sambandslösningar för nationella och internationella uppdrag

COAT är, genom sin flexibilitet och förmåga att beskriva konsekvenser på taktisk nivå som funktion av olika miljöfaktorer, ekonomi, taktiskt uppträdande, utbildning med mera (utöver den rent tekniska delen), väl lämpad för både stora och små värderingsuppdrag.

Exempelvis kan metoden användas för att utvärdera de införandeförsök av Ra570/SLB som genomförts under 2019. Metoden kan skapa underlag för förbättringar/ändringar av system och taktik och genom metodens förmåga att värdera helheten kan erfarenheterna exempelvis komma att påverka och förbättra militär utbildning och därmed även förbandens totala förmåga.

10.2.2 Underlag inför kravställning på ny materiel

COAT leder till en struktur på arbetet där olika förutsättningar och antaganden snabbt kan ändras. Detta leder till resultat som står på robust grund. Därför är metoden mycket lämplig att använda både inför kravställning av olika specifika system inför nyanskaffning, såväl som i samband med Försvarmaktens övergripande förmågeutveckling.

Konkreta exempel är:

- FM-studier och utveckling av enskilda system
- medverkan i anskaffningsprojekt för att minimera risker
- framtagning av TTEM samt kravställning eller kravändring
- stödverktyg, exempelvis för frekvensval.

10.2.3 Upphandling av tekniska system

Eftersom COAT ger en överblick över tekniska systems förmåga i ett taktiskt sammanhang torde den vara väl lämpad att använda vid granskning av offerter. Värderingen kan då genomföras för att utröna om leverantörens erbjudande motsvarar de krav och förväntningar som ställts i specifikationen. Värderingen kan då omfatta såväl de tekniska specifikationerna som behov av utbildning och underhåll.

Följande konkreta exempel ger en fingervisning om COAT-metodens potential:

- Framtagning av utslagsgivande krav i en kravspecifikation: COAT kan värdera hur olika tekniska systemlösningar påverkar taktiken och användaren och på så sätt tydliggöra vilka krav som är viktigast.
- Ofta är det inget system som uppfyller alla krav. COAT kan värdera effekten av detta mot grundläggande behov.

10.2.4 Underlag till Försvarmaktens förmågeutveckling, den evolutionära processen

Med förmågeutvecklingen inom Försvarmakten avser vi såväl studier om framtida organisation och tillhörande taktik som mer närliggande militära övningar, test och försök. COAT kan användas för att värdera olika tekniska standarder eller olika versioner av samma standard som underlag till val av olika tekniska systemlösningar. Metoden lämpar sig också för att värdera val av taktik med avseende på den valda tekniska lösningen och vice versa. Genom tillämpning av COAT kan en växelverkan mellan teknik- och taktikutveckling bli tydligare och starkare samtidigt som evolutionsprocessen får ett ytterligare stöd.

Konkreta exempel:

- Introduktion av nya tjänster i befintliga system, tjänster som systemen inte dimensionerats för.
- Tillförande av ett nytt/extra system i en miljö av andra system. Vad händer med ledningsförmågan? Förbättras den? Skapar systemet en redundans? När används det ena eller det andra systemet och hur upptäcks ett behov av att växla system? Kan soldaterna dra nytta av systemet direkt eller behövs speciell utbildning?
- Användning av system i miljöer eller sammanhang de ej dimensionerats för.
- Värdering av bortfall av väsentliga system i olika situationer alternativt vilka vinster som uppnås med införandet av redundanta system. Värderingen kan exempelvis svara på hur ledningsförmågan påverkas.
- Träningssimulatorer av olika slag. Det är viktigt att en träningssimulator medger träning av de behov som finns och inte enbart av den teknik som är möjlig.
- Värdering av civil teknik som del av sambandskoncept. Exempelvis värdering av ett 5G-näts förmågor och sårbarheter i olika scenarier.

Övriga användningsområden där COAT bör kunna skapa ett direkt värde:

- Stöd till verksamheter vid skolor (MSS, SSS, LSS, FHS)
- Stöd till verksamheter vid LedR och LedS
- Utbildningsverksamhet
- Stödverktyg i en mängd olika verksamheter
 - Vid övergripande studier och utvecklingsprojekt
 - Vid medverkan i standardiseringsorgan
 - Teknisk Prognos
 - Omvärldsanalyser och remissvar
 - Arbetsgrupper som till exempel behandlar frekvensfrågor

10.3 COAT-metodens styrka

Syftet med att använda COAT vid värderingsuppdrag är att COAT bidrar till att:

- Bredda analysen genom att inkludera även icke-tekniska aspekter
- Öka kvaliteten i analys- och värderingsarbetet genom ett strukturerat upplägg
- Stödja nyttjandet av analyser i det operationella arbetet.
- Minska risker redan i planeringsarbetet inför militära operationer och vid anskaffningar
- Ge en överskådlig bild av behovet inför kravställning av ny materiel
- Skapar dialog mellan exempelvis taktiker och tekniker

Arbetsättet som COAT bygger på ger en överblick över de ingående komponenterna. Både under tiden som värderingen genomförs och efteråt är det enkelt att finna grunden till olika beslut under värderingens

gång. Antaganden som görs under processen blir dokumenterade och kan följa med under hela värderingen. Detta upplägg gör värderingen transparent och spårbar. Allt detta möjliggör en rationell diskussion av resultatet, vilket bidrar till att höja dess kvalitet.

Strukturen i COAT är mycket flexibel. Det gör att metoden kan anpassas till storleken på uppdrag, allt från mycket små värderingar på en dag till värderingar som tar flera månader. Metoden i sig är dessutom modulär vilket gör det möjligt att i vissa fall bara använda delar av metoden, där så är relevant. Detta har vi bland annat nyttjat i våra deltester av metoden.

11 Appendix D: KORINT-publikationer

11.1 Vetenskapliga publikationer

- E. Axell, P. Eliardsson, S. Ö. Tengstrand, K. Wiklundh, Power Control in Interference Channels with Class A Impulse Noise, IEEE Wireless Commun. Lett., vol. 6, no. 1, pp. 102-105, Feb. 2017.
- E. Axell, S. Ö. Tengstrand and K. Wiklundh, Online classification of Class A impulse interference, in Proc. IEEE Military Communications Conference (MILCOM), Baltimore, MD, 2017.
- P. Eliardsson, E. Axell, A. Komulainen, K. Wiklundh, S. Ö. Tengstrand, A Practical Method for BEP Estimation of Convolutional Coding in Impulse Noise Environments, in Proc. IEEE Military Communications Conference (MILCOM), Norfolk, VA, 2019.
- S. Bergström, T. Lindgren, Effects from Mutual Coupling on Communication Link Reliability, in Proc. IEEE Military Communications Conference (MILCOM), Norfolk, VA, 2019.
- K. Hägglund, E. Axell, Adaptive Demodulation in Class A Impulse Noise Channels, in Proc. IEEE GLOBECOM, Waikoloa, Hawaii, 2019.
- T. Ranström, E. Axell, Full Duplex Based Digital Out-of-Band Interference Cancellation for Collocated Radios, in Proc. IEEE WCNC, Seoul, South Korea, 2020, inskickad.
- K. Hägglund, E. Axell, Adaptive Demodulation in Symmetric Alpha Stable Impulse Noise Channels, in Proc. IEEE VTC Spring 2020, inskickad.

11.2 Rapporter och memon

- Systemintegration av trådlösa kommunikationssystem – Omvärldsanalys, Sara Örn Tengstrand, Erik Axell, Tore Lindgren, Kia Wiklundh, FOI-R--4455--SE, 2017.
- Mätningar på stridsvagn 122, Patrik Eliardsson, Erik Axell, Kia Wiklundh, 2017. H/S
- Erfarenheter från KORINT workshop 2017, Börje Asp, FOI Memo 6234.
- Mätresultat Ra460, Patrik Eliardsson, 2018. H/S
- The impact of antennas on radiolink performance in frequency hopping scenarios, Sofia Bergström, Examensarbete, FOI-S--6069--SE, 2018.
- Symmetric alpha-Stable adapted demodulation and parameter estimation, Kristoffer Hägglund, Examensarbete, FOI-S--6070--SE, 2018.
- Full Duplex in a Military Scenario Feasibility of Practical Implementation, Thomas Ranström, Examensarbete, 2018.
- Erfarenheter från KORINT workshop 2018, Börje Asp, FOI Memo 6530.
- Metoder för hantering av statiska interferensmiljöer, Börje Asp, Erik Axell, Sofia Bergström, Patrik Eliardsson, Kristoffer Hägglund, Arwid Komulainen, Tore Lindgren, Peter Stenumgaard, FOI-R--4780--SE, 2019.
- Erfarenheter från KORINT workshop 2019, Börje Asp, FOI Memo 6904.

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



FOI
Totalförsvarets forskningsinstitut
164 90 Stockholm

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

www.foi.se