

Metoder för hantering av statiska interferensmiljöer

BÖRJE ASP, ERIK AXELL, SÖFIA BERGSTRÖM,
PATRIK ELIARDSSON, KRISTOFFER HÄGGLUND,
ARWID KOMULAINEN, TORE LINDGREN, PETER STENUMGAARD



Börje Asp, Erik Axell, Sofia Bergström, Patrik
Eliardsson, Kristoffer Hägglund, Arwid Komulainen,
Tore Lindgren, Peter Stenumgaard

Metoder för hantering av statiska interferensmiljöer

Titel	Metoder för hantering av statiska interferensmiljöer
Title	Methods for handling static interference environments
Rapportnr/Report no	FOI-R--4780--SE
Månad/Month	April
Utgivningsår/Year	2019
Antal sidor/Pages	40
ISSN	1650-1942
Kund/Customer	Försvarmakten
Forskningsområde	Ledningsteknologi
FoT-område	Ledning och MSI
Projektnr/Project no	E72783
Godkänd av/Approved by	Christian Jönsson
Ansvarig avdelning	Ledningssystem

Bild: Anna Norén/Försvarmakten

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 radiokommunikationssystem är en förutsättning för att förband ska kunna lösa sina uppgifter. För att möta det ökade informationsbehovet ökar antalet radiosystem på moderna plattformar. Även med ett väl genomfört elmiljöarbete uppstår samexistensproblem, både för radiosystemen sinsemellan och med andra system som har betydelse för plattformens skydd, verkan och rörlighet.

Två viktiga begränsningar som påverkar vilka åtgärder som är möjliga är minskande militärt frekvensutrymme och brist på bra antennplaceringar, vilket leder till att kompromisser måste göras. I takt med att allt fler radiosystem tillförs och fler tjänster ska samsas inom samma frekvensutrymme blir ett lyckat integrationsarbete allt mer kritiskt för att upprätthålla funktionssäkerheten. Ett tydligt exempel på detta är inverkan av utombandsegenskaper hos samlokaliserade frekvenshoppande nät.

Mätmetoder för att verifiera funktionssäkerheten hos integrerade radiosystem är en viktig del i integrationsarbetet. Grunden till detta är ett väl utfört EMC-arbete, men det behövs även ytterligare mätmetoder för att kontrollera att samlokaliserade radiosystem inte påverkar varandra negativt eller påverkas av andra emitterar. Viktigt är att dessa mätningar upprepas och följs upp i samband med att ny materiel tillförs en plattform.

Metoder för att behandla antennen som en systemkomponent presenteras i rapporten. Dessa metoder nyttjas för att bedöma hur antenners placering inverkar på funktionssäkerheten. Vidare beskrivs en statistisk metod för utvärdering av antennprestanda vid olika typer av frekvenshopp.

På en militär plattform finns störkällor som ger upphov till impulsaktigt brus. För att uppskatta effekten av denna typ av brus på en digital radiomottagare behövs metoder som tar hänsyn till brusets karaktär. I rapporten presenteras metoder för att skatta mottagarprestanda i impulsaktigt brus, med och utan felrättande kodning, samt en metod för att identifiera dominerande störkällor.

Systemintegration och samexistens är komplext och det finns ingen universallösning som löser alla problem. Rapporten visar att det finns många olika förbättringsåtgärder för att lösa olika delar av problemet, exempelvis metoder för sändare och mottagare, design och placering av antenner, samt kravställning och verifiering. Ingen av åtgärderna löser alla samexistensproblem, men alla åtgärder kan vara en del i helhetslösningen.

Nyckelord: Samexistens, systemintegration, frekvenshopp, EMC, mätmetoder, störkällor, frekvens.

Summary

Reliable wireless communication systems are crucial in order for the armed forces to fulfil their mission. The number of radio communications systems on board modern military platforms increases, to meet a growing need for sharing information. Despite assuring electromagnetic compliance (EMC) for subsystems on the platform, there are risks for co-location problems. These problems can manifest both between different radio communications systems, and between a communications system and another system vital for the mobility, effect/firepower and protection of the platform.

Two important factors that limit the possible measures and compromises are the decreasing availability of military spectrum and a small number of possible antenna locations. The increasing number of integrated radio systems and the fact that more and more systems need to share the same spectrum slices, means that the importance of system integration increases. One particular example, detailed in the report, is the effects of out-of-band emissions on co-located, frequency-hopping radio networks.

Measurement methodologies for verifying the reliability of integrated radio systems is an important part in the integration of systems on a platform. This includes, but is not limited to, measurements to verify that EMC standards are fulfilled. Further measurements, to verify that co-located radio systems do not negatively impact each other, are also needed. Further, it is crucial that these measurements are repeated and followed up when new systems are integrated to a platform during its life cycle.

Methods for treating the antenna as a system component are presented. These methods can be used to determine how the placement of antennas on a platform affects the reliability of the integrated radio systems. More specifically, a statistical method for estimating antenna performance for frequency hopping systems is presented.

There are systems on a military platform that generate noise with impulsive character. Determining the effect of impulsive noise sources on digital radio receivers requires methods that considers the character of the noise. The report presents methods for estimating radio receiver performance, with and without error correction coding, in impulsive noise; methods for identifying the dominant noise sources; and a tool for finding acceptable solutions in scenarios with multiple impulse noise sources.

System integration and co-existence are complex problems and there is no universal solution that solves all of the problems. This report points out some possible improvements that solve different parts of the studied problems, for example methods for the transmitter and the receiver, design and placement of antennas, and finally requirements and verification. None of the methods solve all co-existence problems, but all methods could be parts of the complete solution.

Keywords: Co-located systems, system integration, frequency hopping, EMC, measurement methodology, noise sources, frequency.

Innehåll

1.	Inledning	7
2.	Bakgrund.....	8
2.1	Statiska och dynamiska interferensscenarier	8
2.2	Systemintegration - problembeskrivning.....	9
2.3	Funktionssäkerhet.....	10
2.4	Allmänt om statiska tekniker och metoder	10
2.5	Tjänstehantering	11
3.	Utombandsemission	13
3.1	Samlokaliserade frekvenshoppande nät.....	13
3.2	Mäta utombandsemission	14
4.	Verifiering av radioprestanda.....	17
4.1	EMC och radioprestanda	17
4.2	Mätningar för ökad funktionssäkerhet.....	18
4.3	Verifieringsmätningar för operativa plattformar	19
5.	Frekvenshantering	20
5.1	Frekvensbrist	20
5.2	Systemintegration och frekvensbrist.....	21
5.3	Interferensbaserat frekvensval	24
5.3.1	Lokal störningsmiljö	24
5.3.2	Förbättrat frekvensval på HF	25
6.	Hantering av impulsaktiga störkällor	27
6.1	Approximation av BEP i system utan felrättande kodning.....	27
6.2	Approximation av BEP i system med felrättande kodning.....	28
6.3	Identifiering av dominant störkälla.....	29
6.4	Beräkning av nödvändig dämpning av störkällor	29
6.4.1	Exempel på tillämpning	30
7.	Antennintegration.....	32
7.1	Generella egenskaper.....	32
7.2	Utvärderingsmetodik	33
7.3	Integration av monopolantennor.....	33
7.4	Integration av dipolantennor	34
7.5	Flera antenner på en plattform.....	35
7.6	Omgivningens påverkan på en dipol	35
8.	Slutsatser	37
9.	Referenser	39

1. Inledning

Fungerande telekommunikationssystem är viktiga för att militära förband ska ha förmåga att lösa sina uppgifter. Antalet kommunikationssystem på moderna plattformar har ökat, för att möta det ökade informationsbehovet. Även med ett väl genomfört elmiljöarbete uppstår ofta samexistensproblem. 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 tillgång till militärt spektrum. 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.

Denna studie 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 ska baseras på resultat och erfarenheter från 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 mer omfattande 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 kallat det dynamiska fallet. Denna rapport redovisar metoder för att hantera det statiska fallet. I en avslutande rapport från KORINT kommer metoder för det dynamiska fallet och metoder för kompromisshantering att redovisas och detta behandlas därför inte i denna rapport.

I denna rapport belyses nedanstående frågeställningar:

1. Hur påverkas radioprestandan av minskad frekvenstillgång?
2. Hur påverkar utombandsemission samlokaliserade radiosystem?
3. Hur kan interferenskällor utvärderas och åtgärder för dessa prioriteras?
4. Hur påverkas radioprestandan av antennernas placering?
5. Hur verifieras prestandan hos radiosystemen efter att de har integrerats på plattformen?

2. Bakgrund

Detta kapitel beskriver statiska och dynamiska interferensscenarier, systemintegration, funktionssäkerhet, statiska tekniker och metoder samt tjänstehantering.

2.1 Statiska och dynamiska interferensscenarier

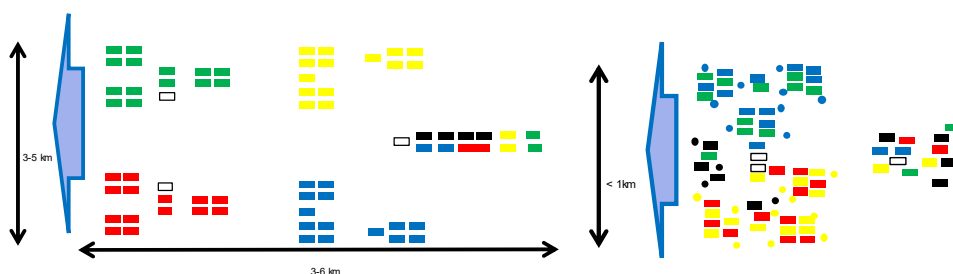
Verksamheten inom KORINT är uppdelad i två delar beträffande interferensscenarier och åtgärder: en del definierat som det statiska fallet och en del kallat det dynamiska fallet.

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, exempelvis genom:

- telekonfliktanalyser
- val av systemkomponenter med låg icke avsiktlig emission
- låg grannkanalsinterferens från sändare
- filteranvändning
- metoder för att minska effekterna av begränsad frekvenstillgång (de flesta metoderna har dynamiskt karaktär)
- antennintegration med hänsyn tagen till plattformen och dess delsystem
- ett i övrigt väl utfört integrationsarbete.

Dessa metoder tar hand om det som går att förutsäga och vars utfall ofta är möjligt att prediktera. I övrigt utmärks dessa åtgärder av att det finns ett stort behov av kompromisser och att utfallet av åtgärderna måste värderas utifrån ett helhetsperspektiv. Dessutom kan statiska åtgärder inte i någon större utsträckning anpassa sig till ändrade förhållanden när de väl är införda.

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). De dynamiska metoderna ska därför ta hand om mer oförutsägbara situationer som varierar över tid. För att hantera störningar i dynamiska scenarier krävs adaptiva åtgärder vilket innebär system som kan anpassa sig efter rådande förhållanden. Även dessa åtgärder utmärks av att det finns ett stort behov av kompromisser samt behov av prioriteringsfunktioner och slutligen att utfallet av åtgärderna även måste värderas utifrån ett helhetsperspektiv. Vi är väl medvetna om att det finns metoder och situationer som hamnar i gränslandet mellan det statiska och dynamiska fallet. Detta gör dock inget i vårt fall då uppdelningen främst används för att skilja på vad som orsakas av faktorer inom en plattform respektive faktorer orsakade av plattformens omgivning.



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.

2.2 Systemintegration - problembeskrivning

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

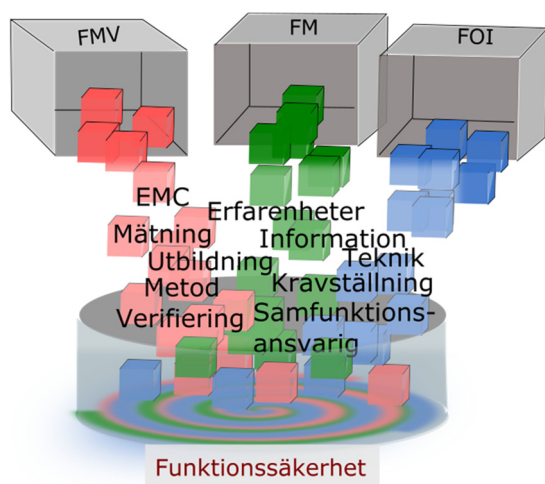
Problem med interferenser kan få som konsekvens att radiosystemen inte kan användas som det var tänkt eller kan nyttjas med den förmåga som de i grunden besitter. Det kan innebära kraftigt begränsad räckvidd och minskad motståndskraft mot telekrigsinsatser eller att vissa frekvenser inte får användas. 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. Brister i systemintegrationen är ett komplext och växande problem, särskilt för plattformar där flera kommunikationssystem samlokaliseras med andra emitterande källor, en situation som för övrigt är mycket vanlig idag.

Om brister i systemintegrationen leder till bristfällig kommunikationsprestanda behövs åtgärder för att eliminera eller reducera problemen. Generellt gäller att en optimal lösning näst intill aldrig 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. Lägg där till behovet av interoperabilitet både internationellt och nationellt, så blir problemet ännu mer komplext. Konsekvensen är att det finns ett stort behov av ett systematiskt integrationsarbete där kompromisser är absolut nödvändiga. 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.

Tröskeffekter 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 att 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.

Projektet KORINT studerar tekniska metoder och teknik för att möjliggöra en effektivare systemintegration av kommunikationssystem på militära plattformar. Det är dock viktigt att betona att det är mycket mer än teknik som behövs för att åstadkomma en systematisk systemintegration. Dessutom, detta projekt är en liten del i detta arbete där det är viktigt med samverkan mellan alla berörda parter: Försvarsmakten med bland annat Högkvarteret, skolor och förband samt FOI och FMV med dess kontakter mot industrin (Figur 2).



Figur 2. Systemintegration är mycket mer än bara teknik.

2.3 Funktionssäkerhet

För att öka sannolikheten att radiosystemen kan användas som det var tänkt och få den förmåga som de i grunden besitter när de är integrerade på en plattform, behöver begreppet *Funktionssäkerhet* för radiosystem införas. Redan i kravställningen för 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. [2]

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 t.ex. verkan och ledning (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 möjligt 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.

2.4 Allmänt om statiska tekniker och metoder

Det finns generellt tre olika tillvägagångssätt att angripa ett interferensproblem efter att det identifieras. 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. Tabell 1 innehåller exempel på vanliga åtgärder för att minska interferens mellan radiosystem på en plattform. Samtliga åtgärder syftar till förbättrad samexistens genom minskad interferens mellan system, men har olika för- respektive nackdelar. Varje åtgärd innebär en kostnad som kan vara en faktor som gör att åtgärden prioriteras bort. Generellt gäller att kostnaden ökar desto senare en åtgärd genomförs inom ett systems livscykel. Tabell 1 visar exempel på försvårande omständigheter där det kan bli nödvändigt att kompromissa beträffande om det är värt att utföra åtgärden eller ej. Vid kompromisser behövs även en översyn göras av samtliga system på plattformen, så att inga oönskade konsekvenser inträffar för något system hos plattformen.

Filter är ett exempel på en beprövad metod för att hantera påverkan från oönskade signaler, både i sändare och mottagare. Många radiosystemtillverkare tillhandahåller filterlösningar för att hantera samlokaliseringsproblem. Filterlösningar är ofta dyra, därför erbjuder tillverkarna detta som optioner och det kan därför vara frestande att välja bort dessa. En nackdel med filterlösningar är att de ofta inte blir flexibla lösningar eftersom det är svårt att ändra filtret till andra frekvenser eller frekvensband. Filterbankar med många elektromagnetiska komponenter ger högre flexibilitet, men tar också mer plats. Filter för sändare, och för mottagare nära starka sändare, behöver hantera höga effekter. De blir därför ofta större och klumpigare än mottagarfilter som inte har krav på att tåla höga effekter. För frekvenshoppande system blir utmaningarna än större. Det finns mottagarfilter som kan klara höga frekvenshoppstakter, men för sändare med höga uteffekter är det svårt att hantera hög hopptakt.

Tabell 1 Åtgärder för att minska interferens mellan radiosystem och andra elektroniska system.

Syfte	Åtgärd	Vinst	Försvårande omständigheter	Störkällor	Tx	Rx
Begränsa emitterad effekt från en störkälla eller annan sändare	EMC-standarder	Minskar emissionsnivåer från elektrisk utrustning	Bör omhändertas redan vid upphandling	X	X	
	Striktare krav för utombands-emission	Minskar utombandsemission	Bör omhändertas redan vid upphandling		X	
	Filter på sändare	Minskar utombandsemission	Mindre flexibilitet		X	
	Predistorsion (slutsteg)	Minskar utombandsemission			X	
	Antennval	Påverkar förstärkning av önskad signal och störning	Kräver flera olika antenntyper		X	
Begränsa överförd effekt mellan emitterande källa och radiomottagare	Zonindelning, skärmning	Ökar dämpning av störeffekten	Bör tas omhand vid planering av plattform	X	X	
	Flytta störkälla eller sändarantenn	Ökar dämpning av störeffekten	Begränsningar i plattformens storlek	X	X	
	Flytta mottagarantenn	Ökar dämpning av störeffekten	Enbart vissa placeringar är möjliga			X
	EMC-arbete kring kablage	Minskar ledningsbundna störningssignaler		X	X	X
Begränsa oönskad effekt in i mottagaren	Filter på mottagare	Minska störningar från grannkanaler	Mindre flexibilitet			X
	Antennval	Påverkar förstärkning av önskad signal och störning	Kräver flera olika antenntyper			X
	EMC-standarder					X
	Mottagar-selektivitet	Minska störningar från grannkanaler				X
	Mottagar-känslighet	Avkodning av svagare önskad signal möjlig				X

2.5 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. Det betyder exempelvis kompromisser beträffande vilka tjänster som ska stötts av sambandssystemet och att dessa tjänsters prioritet, omfattning, tidsfördröjningar och krav på störskydd måste vägas in i helheten. Resultatet av dessa kompromisser kan sedan bli viktiga indata till den mer teknikrelaterade kompromisshanteringen,

alternativt blir resultatet från de teknikrelaterade kompromisserna indata till tjänstehantering. En genomgång av tjänstebegreppet finns i [3].

I ett läge med minskande frekvenstillgång och med ett tuffare nationellt säkerhetsläge är det dessutom viktigt att, åtminstone för de mest kritiska systemen, öka störskyddet. Detta sker dock till priset av att den överförbara informationsmängden per tidsenhet måste minska med antagandet att bandbredden är konstant. Det reella behovet av att föra över vissa typer av information måste därför ses över mer noga än vad som sker idag. Till exempel tilldelas idag ofta alla nät på VHF samma kapacitet, alldeles oavsett typ och karaktär på den trafik som utväxlas. Situationen förstärks ytterligare av att det hela tiden tillkommer nya tjänster som har behov av ännu mer spektrum, en del av dessa är drivna av internationella åtaganden.

De åtgärder som måste till kan vara några av följande:

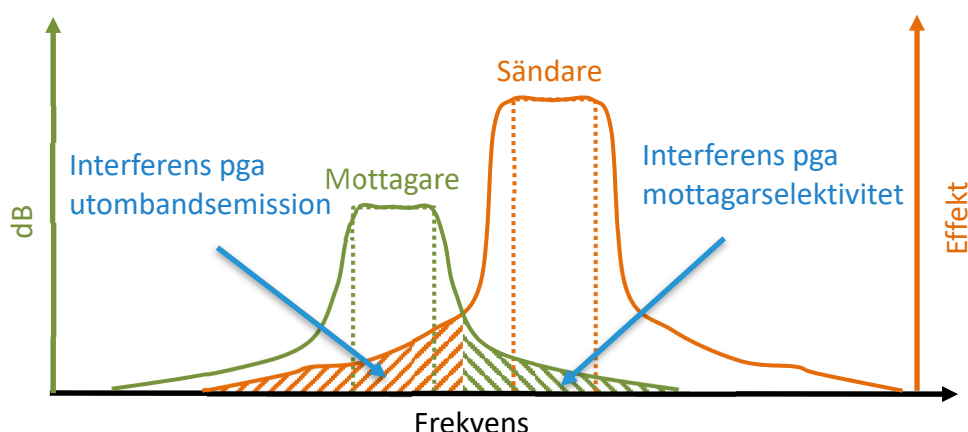
- Prioritering av vilka system och tjänster som är nödvändiga i krig och fred.
- Designa informations- och ledningssystem så att de ställer lägre krav på överföringskapacitet. Ofta innebär detta en väg bort från COTS-lösningar för denna typ av system.
- Designa informations- och ledningssystem så att de kan fungera vid kraftigt varierande överföringsprestanda, t.ex. växla mellan Satkom och HF.
- Kapacitetstilldelning, helst dynamisk, baserad på behov.
- Prioritering, helst dynamisk, av sambandstrafiken.
- Där så är möjligt, överväg om informationsmängden kan minska genom att enbart skicka skillnadsinformation.
- Inför feltolerant komprimering där så är möjligt (och inte används redan idag).
- Satsa på mer avancerade antennlösningar, vilket ökar möjligheten till spatiell återanvändning av frekvenser.
- Nyttja routingprotokoll för flerhoppsnät med låg overhead och fördröjning.
- Nyttja civila kommunikationssystem i högre grad än idag, dock med beaktande av informationssäkerhetsrisker och risken för avsiktlig störning.
- Nyttja kortvåg (HF) i högre grad än idag, även inom armén.

3. Utombandsemission

En radiosändare är inte ideal i den meningen att den sänder all sin effekt inom den tilldelade kanalen. Generellt spiller en sändare ut energi i intilliggande kanaler, så kallad utombandsemission. Den utsända effekten som spiller över i intilliggande kanaler avtar med frekvensen, därmed påverkas de närmaste kanalerna mest av denna utombandsemission. På liknande sätt är inte en mottagare ideal. En mottagare har generellt en viss känslighet även i intilliggande kanaler, vilket gör att icke önskvärda sändningar i de närmaste kanalerna uppfattas som en störning av mottagaren. I Figur 3 illustreras hur en samlokaliserad 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 och mottagarens (begränsade) selektivitet.

Det ovan nämnda 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 parallellt och samtidigt. Är radiosystemet dessutom ett modernt taktiskt ad hoc radiosystem 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.

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



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

3.1 Samlokaliserade frekvenshoppande nät

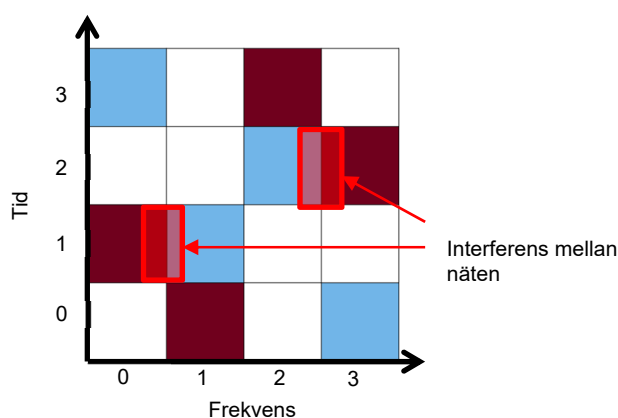
I det frekvenshoppande fallet blir det avgörande hur många hoppfrekvenser som används samt hur frekvenshoppsmönstret är konfigurerat för hur sannolikt det är att två närliggande kanaler används samtidigt. Varje frekvenshoppande system kan sägas tillhöra ett *frekvenshoppande nät*, som definieras av en uppsättning kanaler som nätet kan hoppa mellan. En frekvenshoppsnöckel styr i vilken ordning kanalerna används. Flera frekvenshoppande nät kan verka samtidigt inom samma frekvensband, antingen genom unika kanaltilldelningar per nät eller genom olika hoppmönster (nycklar) per nät. Det senare är vanligtvis att föredra eftersom varje nät då får ett större totalt antal kanaler att hoppa över och därigenom bättre störskydd. Utmaningen är att generera frekvenshoppsmönster som dels garanterar att två frekvenshoppande nät inte använder samma kanal samtidigt (direktrock), dels minimerar risken att samlokaliserade nät använder närliggande kanaler. Ju fler frekvenshoppande nät som ska samsas inom samma frekvensband, desto större är riskerna för interferensproblem.

För ett icke-ortogonalt frekvenshoppande system finns en viss sannolikhet att direkta kollisioner sker mellan två eller flera nät om en mottagare i det ena nätet befinner sig nära en sändare i det andra nätet, exempelvis vid samgruppering på en plattform.

Ortogonalt frekvenshopp är en teknik som används för att säkerställa att inga direkta frekvenskrockar sker mellan flera frekvenshoppande nät, det vill säga frekvenshoppsmönstren är inbördes ortogonala. Ortogonalt frekvenshopp löser dock inte problemen med interferenser på grund av mottagarselektivitet och utombandsemission. Dessa problem kommer att uppstå ändå i de fall då näten använder närliggande kanaler.

I dagens militära system är icke-ortogonalt frekvenshoppande system vanligare än de ortogonala, många nya system använder däremot ortogonalt frekvenshopp.

I Figur 4 illustreras förenklat två ortogonalt frekvenshoppande nät som är samlokaliserade på en plattform. Vardera nät representeras av en färg, mottagning ska ske på ena nätet medan sändning sker på det andra nätet. Vid tidpunkt 0 är näten tillräckligt separerade, men i tidpunkt 2 och 3 används närliggande frekvenser varpå interferenser mellan de två näten uppstår på plattformen.



Figur 4. Interferenser som kan uppstå på grund av utombandsemission och mottagarselektivitet mellan två ortogonalt frekvenshoppande nät.

3.2 Mäta utombandsemission

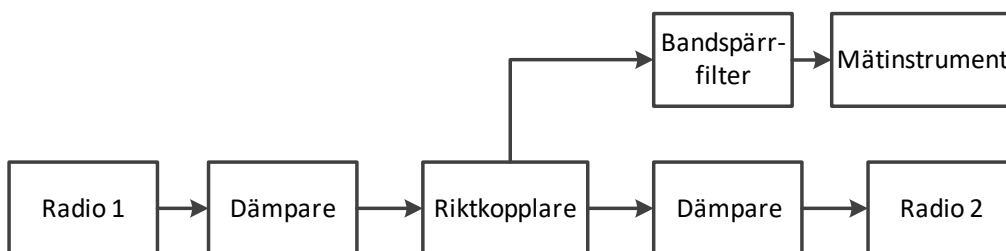
Inom projektet har det utvecklats en mätmetod anpassad för att mäta utombandsemission och emissionernas karakteristik för frekvenshoppande radiosystem. Metoden har testats på ett radiosystem [4] och kommer att testas ytterligare under 2019.

MIL-STD-461 CE106 är det krav som idag tillämpas gällande utombandsemission och ska mätas på antennutgången hos en radio [5]. CE106 specificerar att den tillåtna effekten för frekvenser på ett avstånd motsvarande $\pm 5\%$ av centerfrekvensen ska vara 80 dB lägre än centerfrekvensens effekt. Kravet är mycket grovt och innebär att många grannkanaler inte kan användas om frekvensplaneringen görs utifrån kravet. Därför är det viktigt att utombandsemissionen mäts upp för ett radiosystem. De uppmätta nivåerna är sedan ett viktigt underlag vid till exempel telekonfliktanalyser på en plattform och vid frekvensplanering av exempelvis flera parallella ortogonala frekvenshopsnät. I många fall kan det vara möjligt att allokera kanaler närmare varandra än vad kravet CE106 medger. Utombandsemissionen är avgörande för hur många oanvända kanaler det måste vara mellan två använda kanaler för att inte orsaka egenstörningar.

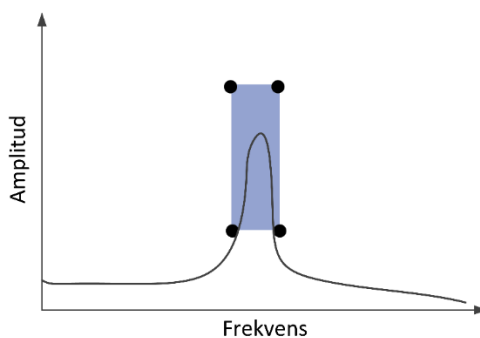
CE106 förutsätter dock att det är ett fixfrekvenssystem. Principen för denna typ av mätning för ett frekvenshoppande system är densamma, men en annan typ av mätmottagare måste användas. En spektrumanalysator kan användas som mätmottagare för att mäta utombandsemissionen hos ett fixfrekvenssystem, men inte för ett frekvenshoppande system då spektrumanalysatorn sveper sitt "mätfönster" i frekvensledd mycket långsammare än radion frekvenshoppar.

För att mäta utombandsemission hos ett frekvenshoppande system används därför istället en realtids signalanalysator (RSA). En RSA arbetar med en hög samplingstakt vilket gör att den momentant kan mäta över tiotals megahertz och starta en mätning på signaler med kort varaktighet, vilket är ett krav för att kunna mäta emissionsnivåer från ett enskilt hopp. Mätupställningen för fix- och frekvenshoppade system är densamma (Figur 5). RSA ansluts till radions slutsteg via en riktkopplare, dels för att begränsa signalen från radion in i RSA och dels för att kunna urskilja vilken av de två radioapparaterna som för tillfället sänder. Mellan riktkopplaren och mätinstrumentet kan det vara nödvändigt med ett bandspärrfilter för att kunna mäta på lägre effekter (utombandsemission) ut från den sändande radion. Bandspärrfiltret används för att dämpa den största effekten i huvudkanalen, så mätinstrumentets dynamik kan anpassas till effektnivåerna i grannkanalerna och på så vis fås en större dynamik i mätningen. Två radioapparater används för att de ska bilda ett nät med en granne och på så vis sända mer trafik än enbart synkroniseringsinformation. Om radion sänder med hög effekt är det nödvändigt med en viss dämpning av signalen för att dels skydda den mottagande radion men även mätinstrument mot för höga effekter.

Mätinstrumentets trigger-funktioner används för att enbart mäta på en frekvens och ett hopp åt gången. En spektrummask definieras för att starta mätningen, då effekt finns inom det definierade området (Figur 6). Spektrummasken återanvänds för samtliga hopp-frekvenser då spektrummasken är definierad relativt mätinstrumentets centerfrekvens. En radio kan använda olika typer av tidluckor för olika typer av information och dessa kan ha olika längd. För att enbart mäta på en typ av tidslucka kan en tidstrigger utöver spektrummasken användas för att starta en mätning. Tidstriggern aktiveras (t_0) då effekt finns inom spektrummasken. Själva triggerpunkten, T , sker då $t_1 < T < t_2$, där t_1 respektive t_2 är löptiden relativt t_0 . Detta illustreras av Figur 7.



Figur 5. Mätupställning vid mätning av utombandsemissionsnivåer.



Figur 6. Illustration av en spektrummask för att starta mätningen på endast en hopp-frekvens.



Figur 7. Illustration av en tidstrigger för att starta mätningen för en tidslucka med specifik tid.

När mätinstrumentet väl är inställt att mäta på en specifik hopp-frekvens och tidlucka, mäts frekvensspektra upp. Vissa mätinstrument har också möjligheten att spara basbandssignalen för vilket instrumentet beräknar frekvensspektra. Med basbandssignalen går det sedan att göra djupare analyser av spektrat i grannkanalerna.

4. Verifiering av radioprestanda

För att verifiera radioprestandan krävs mätmetoder med fokus på funktionssäkerhet och tjänstekvalitet för de prioriterade kommunikationssystemen och de viktigaste driftfallen. Metoderna ska kunna användas när system tillförs eller modifieras på plattformar och där risken för påverkan på kommunikationssystemen bedöms som stor. I de fall påverkan har noterats ska metoderna kunna användas för att avgöra hur stor inverkan på funktionssäkerheten och tjänstekvaliteten blir. Metoderna ska inte ersätta nuvarande elmiljökrav. Ett gott elmiljöarbete är en förutsättning för att metoderna ska fungera i praktiken.

4.1 EMC och radioprestanda

Vid anskaffning samt modifiering av plattformar genomförs mätningar för att verifiera att plattformen och systemen ombord uppfyller militära standarder för elektromagnetisk kompatibilitet (EMC). Dessa krav reglerar hur mycket plattformen får stråla (emissionskrav), samt tålighet mot elektromagnetiska signaler (immunitetskrav). EMC-standarder för militära system som används är huvudsakligen MIL-STD-461 "Requirements for the control of electromagnetic interference characteristics of subsystems and equipment" [5] och DEF-STAN 59-411 "Electromagnetic compatibility" [6]. AECTP-500 [7] är en inom NATO framtagen EMC-standard som innehåller motsvarande krav.

De krav inom MIL-STD-461 som främst relaterar till förmågan hos plattformens kommunikationssystem är RE102 (emissionskrav) och RE103/CE106 (spuriöser). Ett viktigt test definierat i DEF-STAN 59-411, kallat "DRE04 – DRE04 Electric (E) Field Radiated Emissions Installed Antenna (1.6 MHz to 450 MHz)", som mäter plattformens emissioner i plattformens installerade antenner. DRE04 skall dessutom genomföras med en mätbandbredd som motsvarar det radiosystem som är anslutet till antennen. Mätdata från DRE04 ger därmed en bild av hur plattformens emissioner uppfattas av de installerade radiosystemen, till skillnad från RE102 som snarare ger en bild av plattformens emissioner.

En begränsning med samtliga av dessa mätstandarder är att de enbart mäter nivåer på emissioner; huruvida emissionerna är av AWGN-typ, impulsaktiga eller CW-signaler fångas inte upp av dessa tester. Standarderna är i huvudsak framtagna för analoga radiosystem; för en digital radiomottagare har störningens karaktär stor inverkan på dess prestanda. Impulsaktiga störningar kan, för vissa typer av mottagare, leda till avsevärt kortare räckvidd än AWGN med motsvarande medelnivå. Om mätningarna görs så att det går att estimerar karaktären på plattformens emissioner så finns möjligheter att anpassa radiomottagarna och systemintegrationen till den aktuella situationen.

En annan begränsning med exempelvis RE102 är att emissionskraven enbart gäller *oavsiktliga* interferenser och inte andra avsiktliga sändare. En plattform bestyckad med avsiktliga sändare, radiosystem, ska ha dessa i standby-läge då testerna utförs. Dessa emissionsmätningar är alltså inte ämnade att verifiera att olika radiosystem på samma plattform inte påverkar varandra negativt. Radiosystems emissionsnivåer regleras med till exempel CE106 eller RE103 i MIL-STD-461.

Vid mätning av spuriöser enligt MIL-STD-461 används antingen CE106, som är effekten som uppmätts vid radions antennutgång eller RE103, som är den utstrålade effekten från radions antenn. Vilken av mätmetoderna som används beror på om antennen går att koppla ifrån radion eller ej. De båda kraven specificerar att den tillåtna effekten för frekvenser på ett avstånd motsvarande $\pm 5\%$ av centerfrekvensen ska vara 80 dB lägre än centerfrekvensens effekt. Denna problematik har analyserats tidigare, i bl.a. [8].

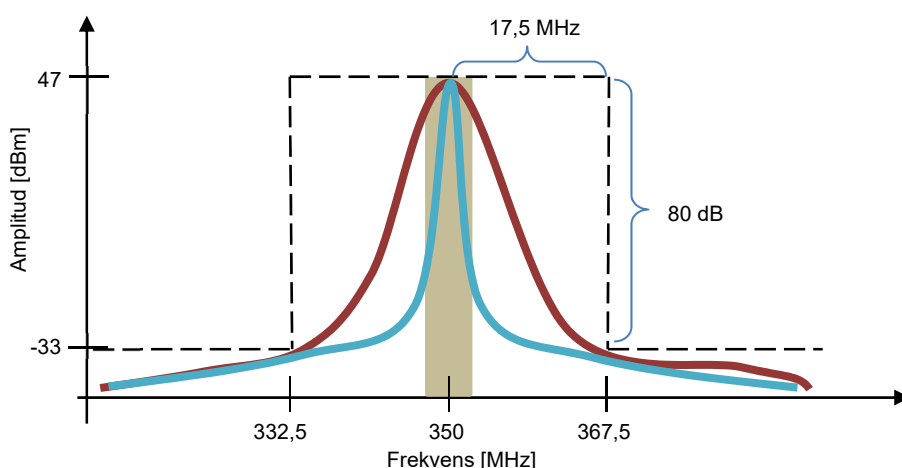
I Figur 8 visas vad CE106 och RE103 skulle innebära för centerfrekvensen 350 MHz; först 17.5 MHz från centerfrekvensen går det att förvänta sig att utombandsemissionen är 80 dB längre än den utsända effekten. Detta ger att inom 35 MHz kring centerfrekvensen krävs inte vilka nivåer utombands-emissionen tillåts ha. Om vi antar att kanalen är 1 MHz innebär det att de 17 närmaste frekvenserna kan vara utsatta för kraftig egenstörning, på vardera sidan om kanalen. Om vi vidare antar att sändaren har en uteffekt på 50 Watt (47 dBm), ger kravet att 17 kanaler bort tillåts -33 dBm i effekt. Under antagande om en bra antennisolation på 50 dB (t.ex för två plattformar grupperade i närheten av varandra) blir effekten in till en samlokaliserad mottagare -83 dBm, på en grannkanal minst 17.5 MHz bort från sändarens centerfrekvens. För en samlokaliserad mottagare på en och samma plattform och som ofta

uppvisar en betydligt sämre antennisolation, typiskt av storleksordningen 20 dB, blir effekten in i mottagaren istället -53 dBm. I många fall är signalstyrkan hos nyttosignalen mindre än -83 dBm, speciellt om kommunikationen sker över långa avstånd nära räckviddsgränsen, vilket gör mottagning av den önskade signalen omöjlig. I fallet med -53 dBm blir detta ännu mer uttalat. Detta exempel visar på vikten av bra undertryckning av utombandsemissionen hos sändare.

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 kunna samexistera på en och samma plattform eftersom antennisolationen blir för liten då antennerna placeras på plattformen. Antennernas placering och den begränsade spektrumtillgången gör att tuffare krav på utombandsemission måste ställas i framtiden.

De standarder som finns är EMC-standarder, det vill säga standarder med krav för att uppnå elektromagnetisk kompatibilitet mellan olika system och plattformar. Vad som saknas är standarder eller vedertagna mätmetoder 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 räckvidd, datahastighet, tillgänglighet etc. efter att det integrerats på plattformen.

På en plattform finns flertalet emitterar och andra system som konkurrerar om radiosystemens antennplaceringar på plattformen, alla emitterar på plattformen påverkar dessutom varandra sinsemellan i olika utsträckning detta är aspekter som t.ex. inte beaktas av nuvarande EMC-standarder.



Figur 8. 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.

4.2 Mätningar för ökad funktionssäkerhet

Det är många fler faktorer än de som krävs med EMC som påverkar radioprestandan för samlokaliserade radiosystem på en och samma plattform. Några av de faktorer som påverkar mottagaren har i Tabell 2 delats in i tre olika grupper: radiosystem, integration och metod.

Tabell 2. Uppdelning av några av de faktorer som påverkar en samlokaliserad radiomottagare.

Radiosystem	Integration	Metod
Motttagarselektivitet	Isolationen mellan antennerna	Frekvensavstånd mellan hoppfrekvenserna i de olika näten
Utombandsemissions effekt		Sannolikheten för samtidig sändning och mottagning
Felrättande kodning och redundans		Antal hoppfrekvenser

De faktorer som grupperas under *Radiosystem* går endast att påverka vid upphandling av nya system. Det är därför viktigt att relevanta krav ställs vid nyanskaffning. De två andra grupperna går att påverka till viss del efter anskaffning. Isolationen mellan antennerna påverkas av typen av antenn och var antennerna installeras på en plattform. De faktorer som är grupperade under *Metod* går att påverka i hur plattformarna uppträder och hur Försvarmaktens tilldelade frekvensband nyttjas av systemen. En utmaning är att Försvarmaktens tilldelade spektrum kontinuerligt minskar, vilket gör att kravställningen på nya radiosystem blir än viktigare. Detta förstärks av att det tillkommer nya system och tjänster, en del av dessa drivna av internationella åtaganden, och som har behov av ännu mer spektrum. De kommande radiosystemen måste kravställas så att de använder spektrumet mer effektivt för att de ska gå att samlokalisera flertalet system på en och samma plattform. Hur antennen och dess integration på plattformen påverkar radioprestanda behandlas i kapitel 0.

4.3 Verifieringsmätningar för operativa plattformar

En verifieringsmätning på plattform kan genomföras vid leverans av en plattform för att säkerställa att leverantören uppnått de ställda kraven. Resultaten från den genomförda verifieringsmätningen kan därefter användas som en referensnivå vid framtida verifieringsmätningar på plattformen. Efter större eller betydande modifieringar av plattformen ska nya verifieringsmätningar genomföras. Dessa resultat ska sedan jämföras med de erhållna resultaten från verifieringsmätningarna som utfördes vid leveransen av plattformen för att säkerställa att inte genomförda modifieringar av plattformen reducerat radiosystemens funktionssäkerhet. Om det visar sig att genomförda modifieringar på plattformen gav upphov till en försämrad radiosystemprestanda måste ett beslut fattas och dokumenteras väl om modifieringens nytta och om funktionen är värd en sämre radiosystemprestanda än den ursprungliga.

Resultaten från verifieringsmätningen kan också användas vid kravställningen inför modifieringar. Ett krav kan då vara att resultaten från nya verifieringsmätningar efter modifikationen inte får var sämre än de resultat som erhöles innan modifieringen. Detta för att säkerställa att modifieringen inte har någon negativ påverkan på funktionssäkerheten hos radiosystemet på plattformen.

Mätningarna enligt ovan bör genomföras med en mätmetod som ger god information om hur radiosystemet påverkas prestandamässigt, följer standarder då det är lämpligt och som i möjligaste mån speglar verkliga driftförhållanden utan att ta lång tid att genomföra. Det senare är av stor vikt vid mätning på operativa plattformar.

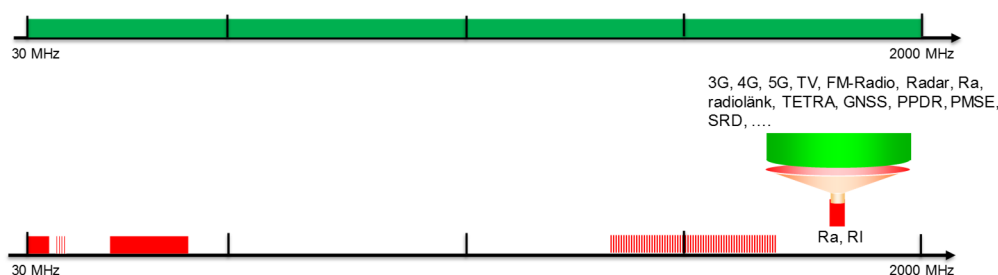
Det omgivande bakgrundsbruset och andra sändare är alltid besvärligt vid mätningar av emissionsnivåer, speciellt för frekvenser på HF- och VHF-bandet. För markplattformar finns det skärmrum som stänger ute det omgivande bakgrundsbruset men för marina plattformar är inte alltid så fallet, då det inte finns tillräckligt stora skärmrum. Att genomföra emissionsmätningar på fartyg i hamnområden ger med stor sannolikhet icke-relevanta resultat då det finns en stor risk att eventuella interferenser härstammar från elektronik i hamnen. Det är därför mer lämpligt att genomföra denna typ av mätning till sjöss, långt ifrån bebyggelse. Fördelaktigt är också om det parallellt är möjligt att övervaka fjärinterferenser, då främst i HF-bandet vid denna typ av mätning.

5. Frekvenshantering

Tillgång till enskilda frekvenser och frekvensområden är en mycket väsentlig förutsättning för att sambandssystemen ska leverera önskad förmåga till ledningssystem etc. I detta kapitel behandlas konsekvenser av frekvensbrist och vilka åtgärder som kan och bör vidtas för att hantera detta.

5.1 Frekvensbrist

Den bandbredd som kan nyttjas av ett radiosystem skapar förutsättningar för dataakt, antalet användare och redundans eller störtålighet. Försvarmaktens tillgång till frekvenser har dock under lång tid minskat samtidigt som behovet av både dataakt och störskydd har ökat (Figur 9). Frekvensområdet 30-2000 MHz i figuren är ett av de viktigaste frekvensområdena för militära sambandssystem samtidigt som det innehåller en mängd andra system så som TV, FM-radio, mobiltelefonisystem och GNSS.



Figur 9. Exempel på civil och militär frekvenstilldelning (radio och radiolänk) i frekvensområdet 30-2000 MHz. Rött anger frekvensområden med i första hand militär tilldelning medan rödstreckade områden delvis är tilldelade för militärt bruk. OBS; schematisk bild, allt inte med!

Frekvensbristen gör att risken för att störa egna användare ökar och möjligheterna till ett gott störskydd minskar. För att ett frekvenshoppande radiosystem ska kunna skapa en viss förmåga till störskydd mot avsiktliga störsändare krävs att det frekvenshoppande radiosystemet hoppar snabbt och på ett stort antal frekvenser och med så stor spridning som möjligt mellan lägsta och högsta frekvensen. Problemet är påtagligt på bland annat Försvarmaktens UHF-band (240-400 MHz) där det i sämsta fall endast finns 20-30 MHz att tilldela för Försvarmaktens mobila bredbandiga tjänster, vilket gör att risken för konflikter (interferens) mellan systemen är stor och möjligheten till störskydd liten.

Den faktiska frekvenstillgången påverkar möjligheten till störskydd mot avsiktlig störning och att radiosystemen ska kunna samexistera, och avgör därigenom den faktiska räckvidden och systemtillgängligheten. Det är därför viktigt att försäkra sig om tillgången till frekvenser redan vid upphandling av radiosystem.

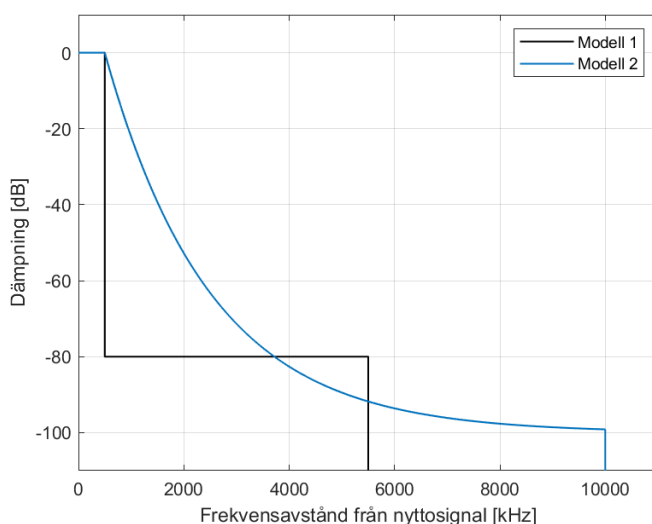
Försvarmaktens frekvenstillgång har ändrats med tiden och tyvärr även minskat. Därför är det önskvärt att radiosystemen är flexibla i sin frekvensanvändning. Undantaget taktiska länkar, kortvågskommunikation (HF) och satellitkommunikation så har mer och mer av den militära sambands-trafiken i Sverige koncentrerats till 30-88 MHz och 240-400 MHz. Användningen av det övre bandet måste dessutom i hög grad samordnas med NATO (harmonisering gentemot NATO UHF-plan) vilket gör att flexibiliteten i utnyttjandet av frekvensbandet är begränsad.

5.2 Systemintegration och frekvensbrist

Hur påverkas då kommunikationen av att tillgängligt frekvensområde krymper? Figur 11-Figur 14 visar ett exempel på vad som kan hända då tillgängligt frekvensområde minskar för två frekvenshoppande nät (både ortogonala och icke-ortogonala) och med olika krav på utombandsemission. Två olika spektrummasker har använts, där den ena är en förenklad modell (Modell 1) ofta använd i prestandaberäkningar och den andra är tänkt att påminna mer om verkliga scenarier (Modell 2) (Figur 10). I Figur 11 och Figur 12 används tio hoppfrekvenser jämnt utspridda inom ett frekvensområde. När tillgängligt frekvensområde minskar, minskar också avståndet mellan frekvenserna i frekvenshoppet vilket ökar risken för interferens från sidband samt även risken för direktkrock, vid icke-ortogonala hopp.

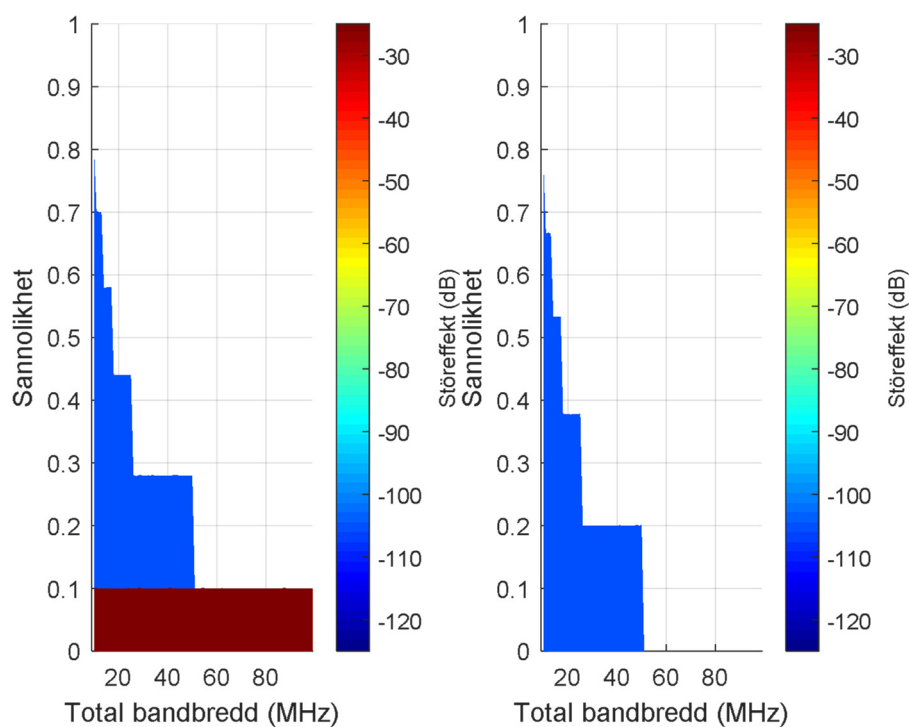
I fallet med den förenklade spektrummasken, är sannolikheten för störningar från sidband i stort sett densamma både för både ortogonalt och icke-ortogonalt frekvenshopp. En betydande skillnad är dock att för icke-ortogonalt frekvenshopp finns det även en risk att båda näten använder samma frekvens, med kraftig interferens till följd. Detta ses i Figur 11, som det mörkröda bandet konstant kring 10 %. Färgskalan i figuren visar nivån på störeffekten normaliserad till utsänd effekt och den ömsesidiga kopplingen mellan antennerna antas vara -25 dB. Parametrarna i dessa modeller är estimerade och bara till för att illustrera problemet.

Både Figur 11 och Figur 12 uppvisar en trappstegsformad kurva som beror på att sidbanden når fler grannkanaler när det tillgängliga frekvensområdet minskar. Figur 12 visar samma uppställning som i Figur 11, men med den exponentiellt avtagande spektrummasken. Där Figur 11 hade konstant störeffekt har nu Figur 12 istället en glidande skala skapat av de olika dämpningarna på grannkanalerna. Det störda frekvensområdet är dessutom större till följd av att masken sträcker sig längre ut från centerfrekvensen. Dessa två figurer visar på prestandaförsämring då tillgängligt frekvensområde krymper. I Figur 11 och Figur 12 är hoppfrekvenserna jämnt utspridda på tillgängligt frekvensområde, alltså med så stor separation som möjligt. I praktiken är så oftast inte fallet. I Figur 13 och Figur 14 har istället hoppfrekvenserna genererats slumpmässigt inom tillgängligt frekvensområde¹. Det innebär att avståndet mellan några av de använda frekvenserna i vissa fall kan vara större men totalt sett blir medelseparationen mindre, med högre störeffekt till följd.

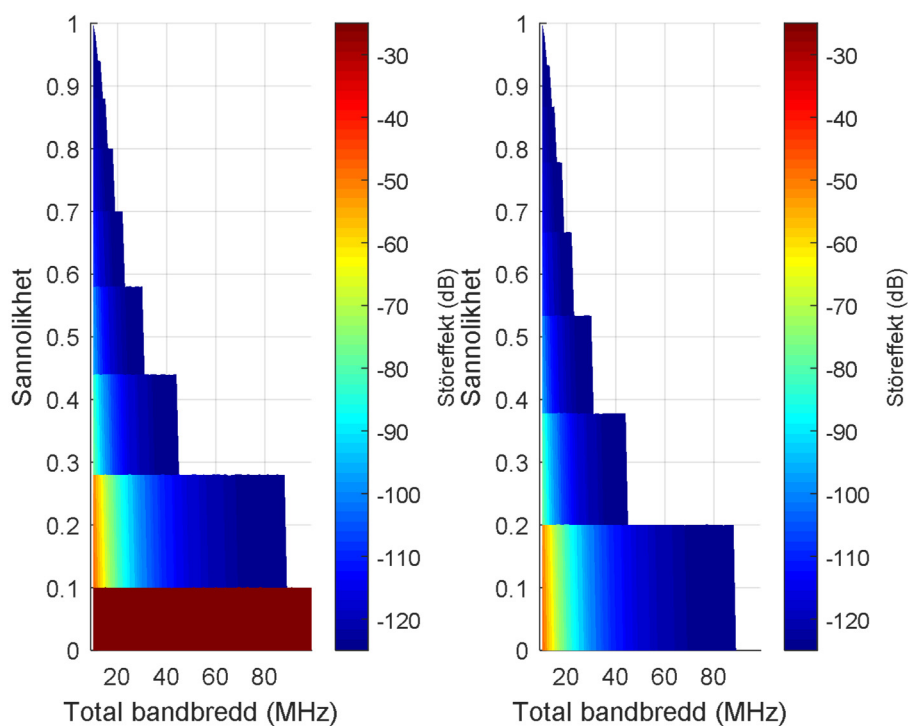


Figur 10. Spektrummasker som använts vid simuleringarna. Båda är symmetriska kring nyttsignalen. Modell 1 är samma som används i [9] tillämpad på 1 MHz breda kanaler.

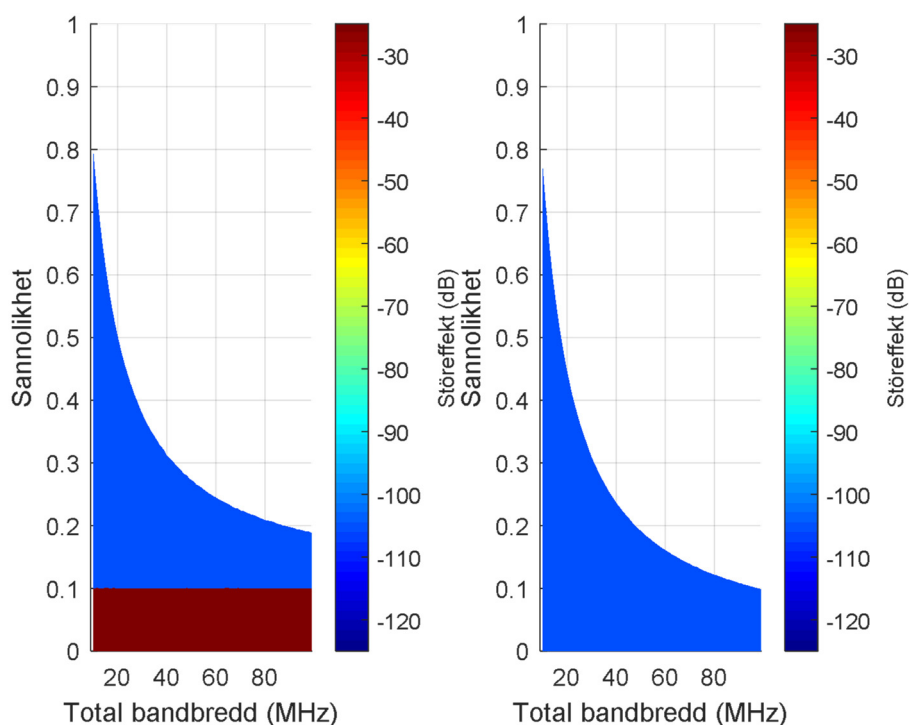
¹ Frekvensområdet har delats in i diskreta kanaler med 1 MHz bandbredd. Av dessa har 10 stycken unika kanaler genererats slumpmässigt från en likformig fördelning.



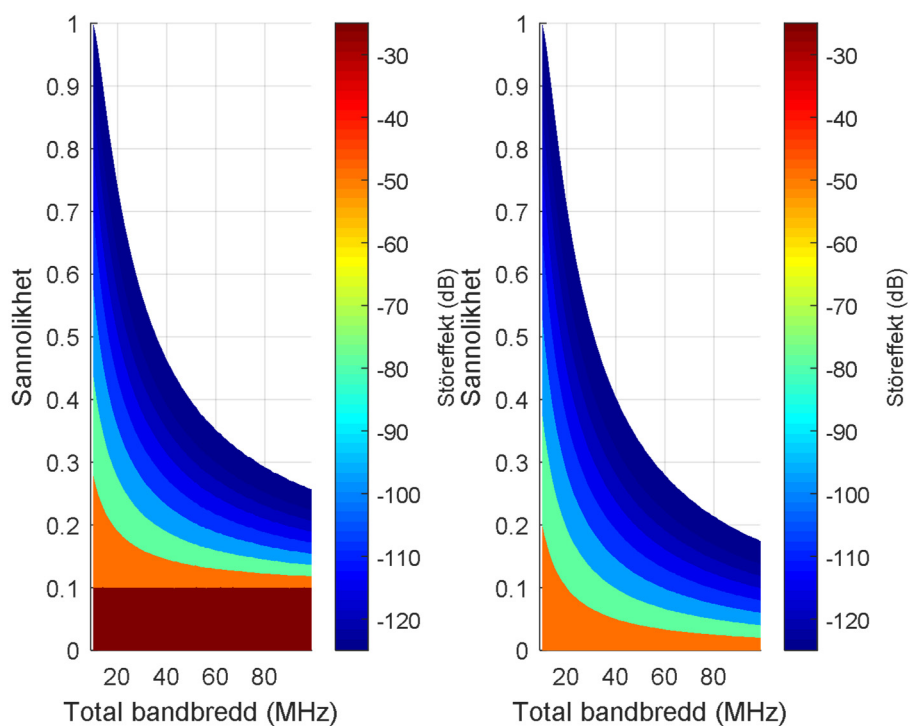
Figur 11. Figuren visar hur risken för grannkanalpåverkan förändras med krympande frekvensområde från 100 MHz till 10 MHz för icke-ortogonalt frekvenshopp (till vänster) och ortogonalt frekvenshopp (till höger). Den förenklade spektrummasken är använd, liksom jämnt utspridda frekvenser.



Figur 12. Figuren visar hur risken för grannkanalpåverkan förändras med krympande frekvensområde från 100 MHz till 10 MHz för icke-ortogonalt frekvenshopp (till vänster) och ortogonalt frekvenshopp (till höger). Den exponentiella spektrummasken är använd, liksom jämnt utspridda frekvenser.



Figur 13. Figuren visar hur risken för grannkanalpåverkan förändras med krympande frekvensområde från 100 MHz till 10 MHz för icke-ortogonalt frekvenshopp (till vänster) och ortogonalt frekvenshopp (till höger). Den förenklade spektrummasken är använd och frekvenserna är stokastiskt placerade.



Figur 14. Figuren visar hur risken för grannkanalpåverkan förändras med krympande frekvensområde från 100 MHz till 10 MHz för icke-ortogonalt frekvenshopp (till vänster) och ortogonalt frekvenshopp (till höger). Den exponentiella spektrummasken är använd och frekvenserna är stokastiskt placerade.

Resultaten visar att det är viktigt att ha tillräcklig separation mellan hoppfrekvenserna för att undvika interferens. En större bandbredd att hoppa över är alltid fördelaktigt men för att undvika interferensproblem krävs även att kanalerna är väl separerade inom bandet. Om flera av kanalerna ligger nära i frekvens kommer höga interferensnivåer att upplevas även om den totala bandbredden är stor. Jämför Figur 11 och Figur 12, där frekvensseparationen har maximerats, med Figur 13 och Figur 14, där frekvensseparationen ofta är betydligt lägre beroende på vilka kanaler som har använts, ses att sannolikheten för störning är högre i det senare fallet.

En konsekvens av detta är att de militära systemen måste bli mer spektrumeffektiva och integrationen av sambandssystem på en plattform måste ske mycket noga så att frekvensutnyttjandet effektiviseras så långt det går. Givetvis gäller detta under en plattforms hela livscykel och en felaktigt utförd modifiering kan lätt leda till, en i vissa fall kraftig, försämring.

I rapporten "Övergripande studie - Åtgärder i olika stadier för att säkerställa radioprestanda" [10], finns en rad andra frekvensrelaterade åtgärder beskrivna som på lång och kort sikt bör (måste?) vidtas för att öka, och i vissa fall kunna vidmakthålla, de militära sambandssystemens funktionssäkerhet och störskydd. Nedan listas några av dessa, plus några ytterligare:

- Försvarmaktens organisation för frekvenshantering bör förstärkas.
- Militära behov måste värderas, ställas mot varandra och prioriteras bättre (se även kapitel 2.5).
- Det reella informationsbehovet måste ses över (se även kapitel 2.5).
- Metoder för effektivare meddelandehantering bör utvecklas.
- Generellt bör all radiomateriel som anskaffas
 - kravställas att kunna arbeta inom ett mycket stort frekvensområde (helst större än vad som frekvenstilldelningsmässigt är möjligt idag)
 - kunna omprogrammeras för nya kanalplaner etc. med mycket kort varsel (fältanpassat).
- Möjligheten till "nya" störskyddsmetoder måste studeras.
- Frekvensanvändningen behöver planeras utifrån olika perspektiv och bör ske i flera olika skeden i materielprocessen.
- Möjligheten att använda ett visst frekvensband är viktigt att säkerställa så tidigt som möjligt i materielprocessen och Försvarmaktens Frekvensarbetsgrupp (FAG) måste involveras tidigt.
- Blandning av frekvenshoppssystem (FH) och fixfrekvenssystem (FF) i ett och samma band bör ske med viss försiktighet då de för FF nödvändiga skyddsbanden gentemot FH-systemen annars kan konsumera en stor del av tillgängligt frekvensutrymme. Oberoende frekvensallokering mellan FF/FH är med andra ord inte OK. Frekvensplaneringen skiljer dessutom rent allmänt mellan FF och FH och vem som skall skyddas i första hand, FF eller FH, bör klargöras tidigt.

5.3 Interferensbaserat frekvensval

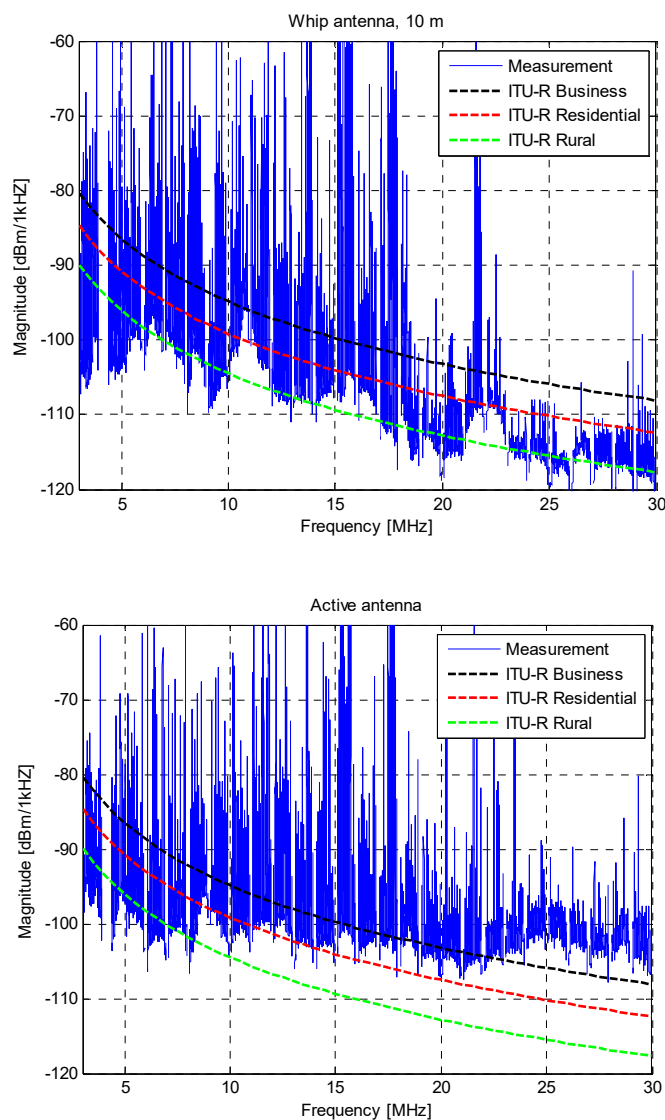
Vågutbredningsförhållanden och interferensmiljön hos mottagaren kan starkt påverka ett radiosystems möjligheter till kommunikation. I dag sker automatiskt frekvensval i HF2000-systemet. HF2000 genererar automatiskt en frekvenspool baserat på typsträckor och vågutbredningsprognoser för ett område. I projektet ROAM 2011-2013 studerades att också ta hänsyn till den faktiska interferensmiljön på plattformar för att förbättra valet av frekvenser [11].

De principer för att ta hänsyn till lokal störningsmiljö i valet av frekvens som diskuteras i detta avsnitt är exemplifierade på kortvågsbandet, men gäller även för kommunikation på andra frekvensband som till exempel VHF och UHF. Vinsterna som kan göras med ett förbättrat frekvensval är exempelvis högre datahastigheter, kortare fördröjningar och en ökad robusthet för transmissionen.

5.3.1 Lokal störningsmiljö

Den lokala störningsmiljön är i många fall mycket besvärlig på militära marina plattformar [12], [13]. I Figur 15 visas exempel på hur den lokala störningsmiljön kan se ut på kortvågsbandet hos en marin plattform. Figuren visar uppmätta störningsnivåer på kortvågsbandet på två olika antenner. I samma figur visas även nivåerna för ITUs kategorier för olika typer av störningsmiljöer: *Business*, *Residential*

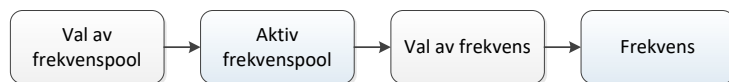
och *Rural* [14]. Figurerna illustrerar att störningsnivåerna kraftigt överstiger ITU-R *Business* för ett stort antal frekvenser. Störningsnivåerna kan för vissa frekvenser överstiga ITU-R *Business* med över 30 dB. De allra högsta nivåerna på kortvågsbandet kommer normalt från andra avlägsna sändare men den lokala störningsmiljön från plattformen kan typiskt 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 15. Exempel på uppmätta störningsnivåer över kortvågsbandet på en militär marin plattform, för en stavantenn (överst) och en aktiv antenn (nederst).

5.3.2 Förbättrat frekvensval på HF

HF2000 är ett kortvågssystem inom det svenska totalförsvaret som automatiskt väljer frekvens för att etablera en så bra radioförbindelse som möjligt. Valet av frekvens sker i flera steg. Först skapas en frekvenspool bestående av lämpliga frekvenser. Alla noder i nätet skannar synkront frekvenserna i frekvenspoolen och då någon av noderna har meddelanden att sända väljs en frekvens från den givna frekvenspoolen för sändning (Figur 16).



Figur 16. Frekvensval i HF2000.

Frekvenspoolen genereras med jämna tidsintervall, till exempel varje timme eftersom vågutbredningsförhållandena skiljer sig vid olika tidpunkter på dygnet. De faktorer som påverkar valet av frekvenser i frekvenspoolen i HF2000 är prognoser för vågutbredningsvägar för olika fiktiva länkar baserat på ITU-R P.533 samt regelverk som anger obligatoriska och förbjudna frekvenser. HF2000 skattar även bakgrundsbruset hos mottagarna enligt olika nivåer (*Rural*, *Business* etc.) i ITU-R P.372-8 för att beräkna ett kvalitetsmått för alla frekvenser. Detta är en mycket grov uppskattning och kanske till och med lite för optimistisk i vissa fall. Figur 15 visar bland annat att den uppmätta störningsmiljön ligger närmast *Business*-nivån, men störningsnivåerna kan variera kraftigt från den tabellerade nivån i verkligheten. Dessutom varierar kommunikationslänkens kvalitet inte bara med brusets effekt utan också med dess karakteristik. Genom att istället mäta det faktiska lokala bakgrundsbruset hos mottagarna kan en bättre skattning göras av brusets nivå och karakteristik och därmed erhålls ett bättre frekvensval. H2000 gör detta indirekt genom att minnas hur kvalitén var för varje frekvens, men detta sker först efter att det varit kommunikation på den frekvensen. Ett förbättrat val av vilka frekvenser som används kan ge ökad dataakt och överföringskvalitet [11], [15].

6. Hantering av impulsaktiga störkällor

I verkliga fall där flera störkällor existerar i anslutning till ett kommunikationssystem är det önskvärt att på ett effektivt sätt beräkna den totala störningens påverkan på kommunikationsprestanda. Ofta beräknas påverkan på en mottagare baserat på att störning består av termiskt brus som antas vara normalfördelad (Gaussisk). Detta kan dock ge stora fel i uppskattningen av mottagarpåverkan om störkällorna egentligen är av annan karaktär. Därför behövs metoder för att uppskatta mottagarpåverkan i fall där flera störkällor av olika karaktär finns i närheten av mottagaren.

Syftet med denna aktivitet har därför varit att utveckla en systematisk metod för att uppnå tillräckligt bra integration av trådlösa kommunikationssystem. Den utvecklade metoden löser inte alla problem med systemintegration, men kan vara en viktig del av en helhetslösning. Den föreslagna metoden består av två delar:

- 1) Uppskatta systemprestanda genom att beräkna approximativ bitfelssannolikhet (BEP, *bit error probability*) för en mottagare som påverkas samtidigt av flera impulsiva störssignaler.
- 2) Beräkna nödvändiga krav på dämpning av varje enskild interferens för att uppnå önskad bitfelshalt.

Metoden kan användas för att utvärdera systemprestanda för en radiomottagare som är samlokaliserad med andra radiosystem och elektronisk utrustning, och därmed påverkas av elektromagnetisk interferens. Dessutom kan metoden användas för att utvärdera och välja lämpliga tekniska åtgärder för att uppnå tillräcklig systemprestanda. I de fall det inte går att utföra åtgärder som leder till att alla krav på systemprestanda uppfylls är det nödvändigt att göra kompromisser. Metoden kan också bistå med att analysera konsekvenserna av sådana kompromisser.

För att uppskatta bitfelshalt och beräkna nödvändig dämpning krävs kunskap om radiosystemet och interferenskällornas egenskaper. Information om radiosystemets vågform krävs för att uppskatta hur störningen påverkar systemets bitfelshalt. Kunskap om de krav tjänsten ställer på bitfelshalt krävs för att beräkna nödvändig dämpning av interferenser och därmed kunna välja lämpliga åtgärder.

Kunskap om interferenskällornas nivå och impulskaraktär fås exempelvis genom mätning på radiomottagarens antenningång. Desto mer kunskap som finns om radiosystemet och alla interferensers egenskaper, desto noggrannare kan de nödvändiga åtgärderna beräknas och väljas.

I samband med utvecklingsarbetet av verktyget GENESIS vid FOI har även olika typer av parameterreducerade beräkningsmodeller utvecklats för att kunna göra tidseffektiva beräkningar med tillräcklig noggrannhet för störningspåverkan. En del av de framtagna modellerna är idag implementerade i GENESIS, medan andra används separat. GENESIS är för övrigt ett verktyg som bör ingå i verktygslådan för hantering av statistiska interferensscenarier.

6.1 Approximation av BEP i system utan felrättande kodning

I många fall när störkällor identifieras och karakteriseras så mäts enbart störkällans medeleffekt, och möjligen frekvensegenskaper, för att bedöma påverkan på ett radiosystem. Ofta har interferenser från olika typer av elektronisk utrustning eller från andra transmitterande system kraftig impulskaraktär. Om det bara finns en störkälla är det möjligt att ungefärligen beräkna vilken påverkan den har på systemets bitfelshalt genom att kompensera för dess impulskaraktär med hjälp av en *impulsiveness correction factor* (ICF) [16] eller genom uppmätning av amplitudfördelningen (APD, *amplitude probability distribution*). ICF kan beräknas baserat på mätningar av medeleffekt och maximal amplitud för varje interferens. Denna ungefärliga bitfelssannolikhet gäller utan inverkan av felrättande kodning. Approximationen är alltså giltig för mottagen information innan felrättning tillämpas, eller för system som inte alls använder felrättande kodning.

Även om de flesta moderna digitala radiosystem idag använder felrättande kodning så är det okodade fallet intressant att studera. Felrättande koder dimensioneras typiskt för att hantera olika variationer på kanalen, som exempelvis fädning, störning från andra kända användare i systemet eller avsiktlig störning. Om andra oavsiktliga störningar uppstår på grund av plattformens övriga egenskaper, eller den nära omgivningen, så kommer dessa störningar att stjäla felrättningsförmåga som är avsedd för att

hantera andra störningar på radiokanalen. Analysen av det okodade fallet ger därför en uppfattning om hur mycket felrättningsförmåga som behöver tas i anspråk för att hantera en viss typ av störning.

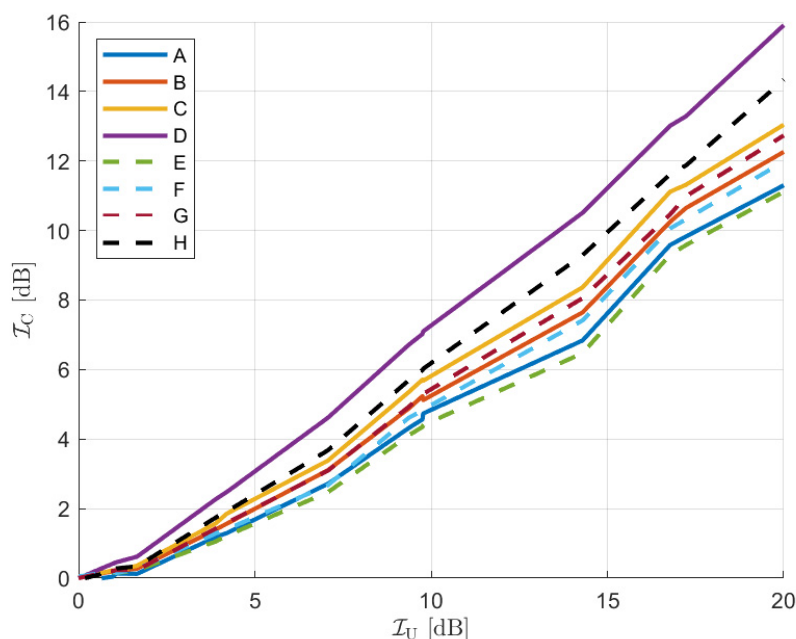
När det finns flera impulsaktiga störkällor som samtidigt skapar interferens i en mottagare kan den totala påverkan däremot bli svår att analysera. Därför har metoder utvecklats för att beräkna den totala påverkan som flera störkällor har på en mottagare [17]. Detta görs genom att utnyttja kunskap om exempelvis störkällornas individuella ICF [16]. En enkel metod, som fungerar väl för impulsstörningar, är att approximera den totala bitfelshalten med summan av de individuella bitfelshalterna som orsakas av enskilda störkällor. Detta kan förstås genom följande resonemang. Lite förenklat så uppstår bitfel för en impulsstörning när impulserna inträffar. För impulsaktig störning sker impulser ganska sällan, och med flera oberoende störningskällor inträffar impulser därför nästan aldrig samtidigt. Det totala antalet bitfel som uppstår av flera störningskällor är därför ungefär lika med summan av antalet bitfel som orsakas av varje individuell störningskälla.

6.2 Approximation av BEP i system med felrättande kodning

Den approximation av bitfelssannolikhet som diskuterades i avsnitt 6.1 gäller utan inverkan av felrättande kodning. I de flesta kommunikationssystem används någon form av felrättande kodning. För att beräkna bitfelssannolikheten efter att felrättning har utförts krävs en ytterligare korrigering som beror på vilken kod som används. Den metod som beskrivs nedan kan användas för att bedöma systemprestanda och nödvändiga åtgärder av störkällor på liknande sätt som metoden i avsnitt 6.1, men där kraven istället ställs på felsannolikheten efter felrättning.

Studier har funnit att den korrigering som krävs, för faltningskoder och avkodning med mjuk information, har ett ungefärligt linjärt samband med ICF. Figur 17 visar detta förhållande mellan ICF och korrigeringsfaktorn I_c för ett antal olika faltningskoder (benämnda A till H). För denna typ av avkodning, och med påverkan av impulsiv störning, kan alltså bitfelssannolikheten beräknas ungefärligt på ett liknande sätt som för okodad information genom att utnyttja en uppmätt ICF och det linjära sambandet för koden.

För samma typ av koder, men med avkodning av hård information (bitar) gäller det linjära sambandet enbart för störning med relativt svag impulskaraktär. För kraftigt impulsaktig störning (ungefär ICF > 10 dB) är sambandet inte känt. Detta beror på att bitfelssannolikheten varierar mycket för kraftigt impulsaktig störning mellan olika typer av koder med hård avkodning. Eftersom approximationen fungerar ganska dåligt i dessa fall, kan de behöva analyseras mer exakt från fall till fall med mer beräkningskrävande metoder. För svagt impulsaktig störning tillför dock inte en linjär approximation av felsannolikheten någon extra noggrannhet jämfört med att beräkna bitfelssannolikheten genom det vanligen använda antagandet att störningen är normalfördelad (Gaussisk). Hur sambandet ser ut för andra typer av koder har inte studerats och är därför okänt.



Figur 17. Relation mellan uppmätt ICF, I_U , och korrigeringsfaktor för felrättande kodning, I_C . Relationen är ungefär linjär för alla olika koder A till H.

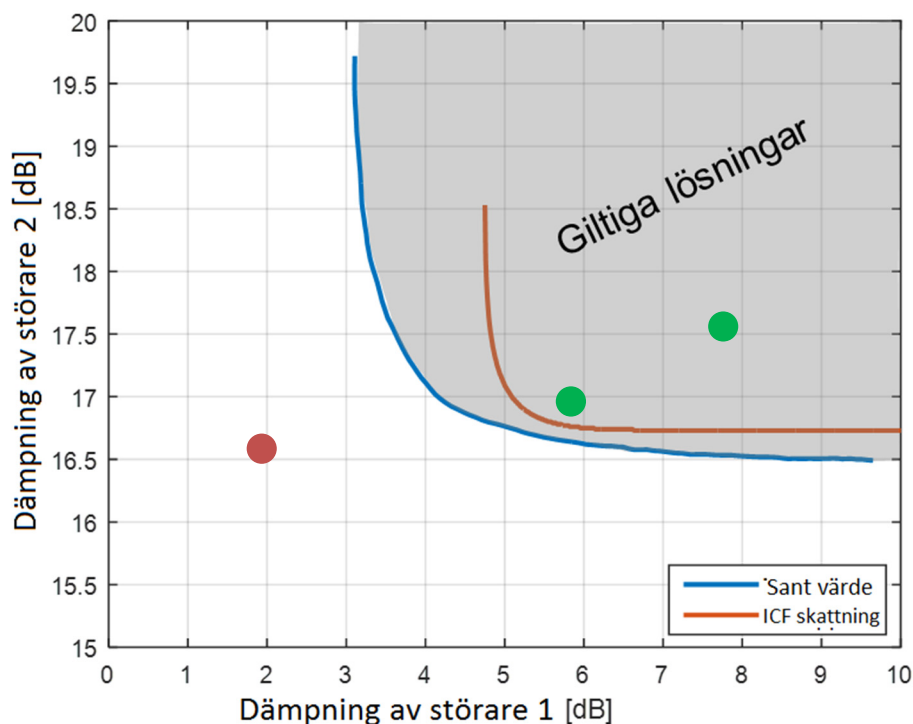
6.3 Identifiering av dominant störkälla

För att kunna prioritera nödvändiga åtgärder i verkliga fall där flera störkällor existerar i anslutning till ett kommunikationssystem är det önskvärt att identifiera den störkälla som orsakar störst påverkan på mottagaren. Dessa typer av beräkningar eller mätningar är ofta komplexa och tidskrävande.

I [18] och [19] föreslogs en metod för att identifiera den störkälla som har störst negativ påverkan på kommunikationsförmågan. Den föreslagna metoden är enkel att applicera i praktiken. Den dominanta störkällan identifieras genom att beräkna ICF och dessutom korrigera för den mottagna effekten för varje störning. För att beräkna korrigeringsfaktorn för en given störkälla behövs endast mätningar av medeleffekt och maximal amplitud för källan. Storleken på källornas effektkorrigerade ICF är analogt med hur stor påverkan källan i fråga orsakar på mottagaren i det aktuella BEP-området. Den statistiska fördelningen och specifika fördelningsparametrar behöver inte skattas. Metoden medför ett kraftfullt verktyg för att analysera störningssituationer, där störkällorna mäts genom en mätprocess där källor systematiskt slås på och av. Med den dominanta störningskällan identifierad kan insatser för att motverka effekten av källan påbörjas.

6.4 Beräkning av nödvändig dämpning av störkällor

Baserat på metoderna att uppskatta den totala bitfelshalten, som beskrevs i avsnitt 6.1 och 6.2 utan respektive med felrättande kod, kan den dämpning av interferenser som är nödvändig för att nå önskad bitfelshalt beräknas [20]. Det kan finnas många olika kombinationer av dämpning av interferenskällor som gör att kravet på bitfelshalt uppnås. Exempelvis, med två interferenskällor kan en lösning vara att helt eliminera en av interferenskällorna, medan en annan lösning kan vara att dämpa båda källorna lika mycket.



Figur 18. Kurvorna visar minsta nödvändig dämpning av två interferensskällor för att nå ett givet krav på bitfelshalt. Alla lösningar i det gråa området uppfyller kravet på dämpning för att få önskad prestanda ("sant värde"), och den röda kurvan visar den föreslagna approximationen av samma område. Prickarna är exempel på åtgärder, där gröna är tillräckliga och röda är otillräckliga åtgärder.

Med den föreslagna metoden beräknas alla kombinationer av dämpningar som uppnår kravet på bitfelshalt. Detta illustreras av kurvorna i Figur 18. De gröna punkterna i figuren illustrerar exempel på åtgärder som skulle lösa integrationsproblemet. Det kan även finnas åtgärder som inte hamnar inom det giltiga området, illustrerat av den röda punkten. Med kunskap om vilka kombinationer av dämpning som (minst) krävs, kan lämpliga tekniska åtgärder väljas för att uppnå dessa dämpningar.

Den föreslagna metoden för att uppskatta den totala bitfelssannolikheten är speciellt utvecklad för impulsaktig störning. Metoden fungerar bäst för ett fåtal impulsaktiga störningar. Detta behöver dock inte vara någon begränsning i praktiken, eftersom problemet är mindre komplext om störningarna inte är impulsaktiga. Om impulserna är många närmar sig störningen dessutom den vanliga normalfördelningen. Bitfelssannolikheten kan då beräknas exakt.

6.4.1 Exempel på tillämpning

För att tydliggöra metoden att beräkna nödvändiga dämpningar av interferensskällor och sedan välja tekniska åtgärder för att förbättra systemintegrationen, presenterar vi ett tillämpningsexempel.

Anta att det på en plattform sitter en radiomottagare. Det finns också två olika typer av elektronisk utrustning som skapar elektromagnetisk interferens i det frekvensband där mottagaren arbetar. Denna situation visas i Figur 19. Mottagaren antas ta emot en BPSK-modulerad nyttsignal med -80 dBm effekt, och påverkas av termiskt brus i mottagaren med -110 dBm effekt. Störningskällornas medeleffekt på mottagarens antenningång har mätts till -96 dBm respektive -90 dBm. Dessutom har störningskällornas impulsaktighet bestämts genom mätningar, och deras ICF har beräknats till 12 dB respektive 18 dB.



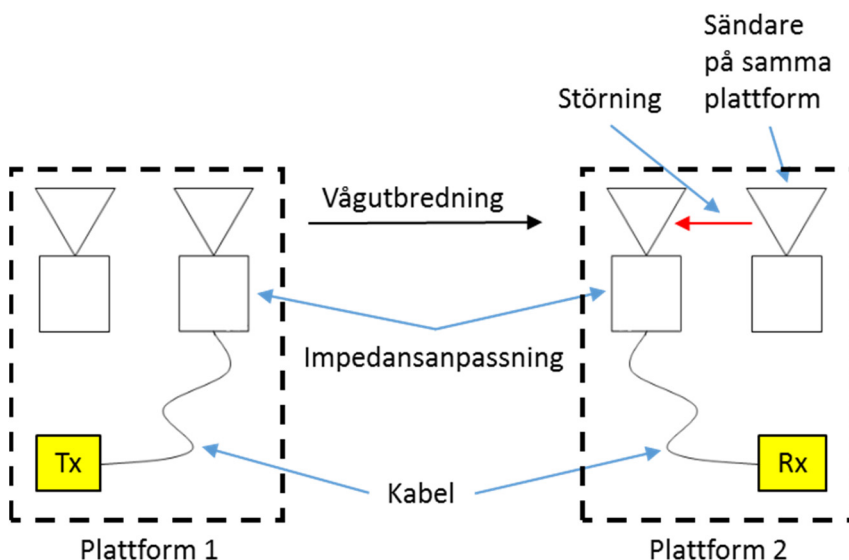
Figur 19. Exempel med en radiomottagare samt ytterligare två interferenskällor. Bild: Genesis.

Med dessa antaganden har radiosystemet en bitfelshalt utan felrättande kodning som uppskattas med den föreslagna metoden 6.1 till ca 10^{-2} . Anta att radiosystemet kräver en bitfelshalt på ca 10^{-5} för att fungera.

Då måste någon åtgärd genomföras för att minska störningskällornas påverkan på mottagaren. Med den föreslagna metoden beräknas alla kombinationer av dämpningar av de två störningskällorna som skulle ge en bitfelshalt på 10^{-5} (Figur 18). En ytterligare ökad dämpning av någon av störkällorna kommer naturligtvis att medföra en något minskad bitfelshalt, och därmed också att uppfylla kravet att bitfelshalten ska vara lägre än 10^{-5} . Detta illustreras av det gråmarkerade området i Figur 18. Bland tillgängliga tekniska åtgärder som är möjliga att utföra, kan de väljas som åstadkommer dämpningar inom det gråmarkerade området. En utförligare beskrivning av exemplet finns också i [21].

7. Antennintegration

Antennen i en kommunikationslänk bör ses som en systemkomponent där den del som utgör den egentliga antennen är en av flera delkomponenter. Detta illustreras i Figur 20. Integrationen av en antenn på en plattform kommer att medföra dels en förstärkning av signalen och dels att brusnivån i radion påverkas. Därför bör kraven som ställs på antennen vara på formen av att ett lägsta förhållande mellan systemförstärkning och brusnivå ska garanteras med en viss sannolikhet.



Figur 20. Antennuppställning som efterliknar kommunikationen mellan två plattformar.

Forskningen inom KORINT och närliggande projekt på FOI syftar till att förstå hur antenner för radiokommunikation påverkas av att integreras på en plattform och till att utveckla en strategi för att uppnå en god kompromiss mellan olika antenners prestanda i en samlokaliseringssituation på en mindre plattform.

Bakgrunden är att den information som behövs för att avgöra antennens prestanda ofta inte finns i de specifikationer som tillverkarna tillhandahåller [22]. Det pågår i begränsad omfattning internationell forskning relaterat till integration av flera antenner på en plattform. Av intresse är samlokaliseringen av olika satellitbaserade kommunikationssystem på en militär plattform analyseras [23] och designen av en VHF/UHF-antenn för montering på skrovet på en obemannad flygande farkost [24]. Dessa artiklar är av intresse då de berör dels antenner på militära plattformar [23] och för att samma frekvensområde som är av intresse för försvarsmakten berörs [24]. Dock är fokus i båda dessa artiklar på en färdig design av plattform med antenner och en analys av den prestanda som uppnås i dessa specifika fall.

7.1 Generella egenskaper

Hur väl en antenn har integrerats på en plattform kan beskrivas med förhållandet mellan systemförstärkningen och den totala bruseffekten i mottagaren. Systemförstärkningen är den totala förstärkning som har byggts in i antensystemet och påverkas av antennens strålningsdiagram, förluster i antennen och tillhörande impedansanpassning och kabelförluster mellan antennen och mottagaren. Den totala bruseffekten är summan av bruset internt i mottagaren, bruset från externa källor och bruset på grund av ömsesidig koppling mellan olika antensystem på samma plattform eller mellan plattformar.

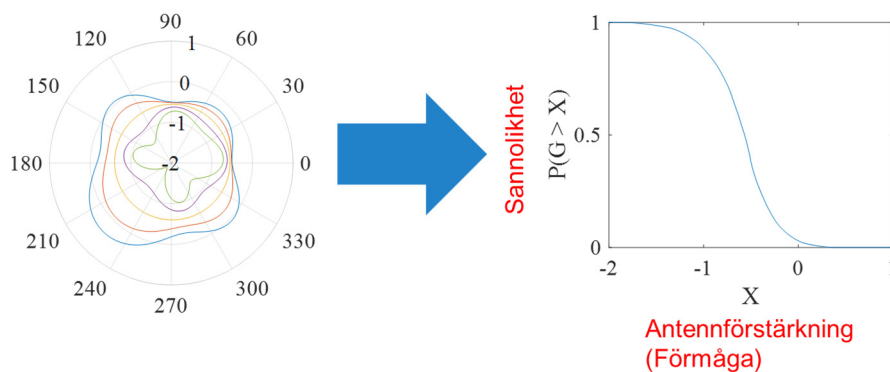
Integrationen av antennen (och val av antenntyp) påverkar prestandan genom:

- *Refleksionsförluster:* Vid bristande impedansanpassning kommer en del av den infallande energin att reflekteras tillbaks ut från antennen (eller tillbaks till sändaren vid sändning). Detta är direkt relaterat till stående-våg-förhållandet (VSWR) som oftast anges i specifikationer.

- *Antenneffektivitet:* En del av den inkommande energin kommer att förloras genom värmeförluster i antennen på grund av begränsad ledningsförmåga i antennen och eventuellt jordplan, i impedansanpassningen, m.m. Det är ibland nödvändigt att medvetet tillföra förluster för att uppnå kravet på bandbredd i termer av VSWR.
- *Direktivitet:* För antenner av typen monopol eller dipol påverkas direktiviteten endast i obetydlig omfattning av antenntillverkaren, det är istället vid integrationen som vinster och förluster kan göras.
- *Mottagarbrus:* Mottagarbruset påverkas av mottagarens design och av hur väl antennen är integrerad på plattformen samt av typ av kablage mellan mottagare och antenn. För kraftiga reflektioner kan brusnivåerna bli mycket höga.
- *Ömsesidig koppling:* Den ömsesidiga kopplingen mellan två antenner medför att brus/interferens från en antenn som sänder på en viss frekvens kommer att ta sig in i en annan antenn som tar emot på en annan frekvens och därigenom öka brusnivån i den mottagaren. Blir kopplingen stark kan det även innebära att mottagaren blockeras och till och med att mottagaringången kan fysiskt förstöras.

7.2 Utvärderingsmetodik

Den utvärderingsmetodik som har använts bygger på att se antennen, när den är integrerad på en plattform, som en systemkomponent som skall fungera tillfredsställande med en tillräckligt hög sannolikhet. Detta synsätt illustreras i Figur 21 där antennens direktivitet visas dels som direktiviteten som funktion av riktning och dels som en sannolikhetsfunktion där sannolikheten för att uppnå en viss lägsta direktivitet beräknas. Det senare synsättet är i princip detsamma som används inom funktionssäkerhet och kan därför användas för att analysera tillförlitligheten hos hela eller delar av ett system. Utvärderingsmetodiken finns beskriven i [25] och [26].



Figur 21. Direktiviteten som funktion av riktning (till vänster) och sannolikheten för att uppnå en viss lägsta direktivitet (till höger).

7.3 Integration av monopolantennor

Integrationen av monopol-antennor på ett litet jordplan har studerats i bl.a. [25], [10] och [27]. Eftersom monopolerna är beroende av ett ledande jordplan kommer storleken på jordplanet och antennens placering på detta ha stor betydelse för antennteststandan.

Om en monopol placeras mycket nära kanten på ett jordplan kan effekten bli försämrad direktivitet i horisontalplanet. Antennens impedans kommer också att påverkas, vilket kommer att innebära ökade reflektionsförluster. Det senare kan vara ett problem för framförallt smalbandiga antenner i HF-bandet.

För monopoler rekommenderas att antennen inte placeras nära kanten för att minska problemen med låg direktivitet, ca 0.1 våglängder eller så långt från kanten som möjligt är rimligt. I synnerhet hörnen på jordplanet bör undvikas.

7.4 Integration av dipolantenner

I [26] görs en jämförelse mellan två varianter på isotropa antenner och en simulerad antenn för en enkel antennuppställning. Två identiska dipoler är placerade nära varandra vilket är tänkt att efterlikna två antenner på samma plattform. Denna antennkonstellation kommunicerar med en liknande uppställning längre bort (Figur 20), där kommunikationen mellan plattformarna kan störas av den egna plattformens sändning. I modellen används frekvenshopp vilket innebär att länkarna byter frekvens i en förutbestämd frekvensserie.

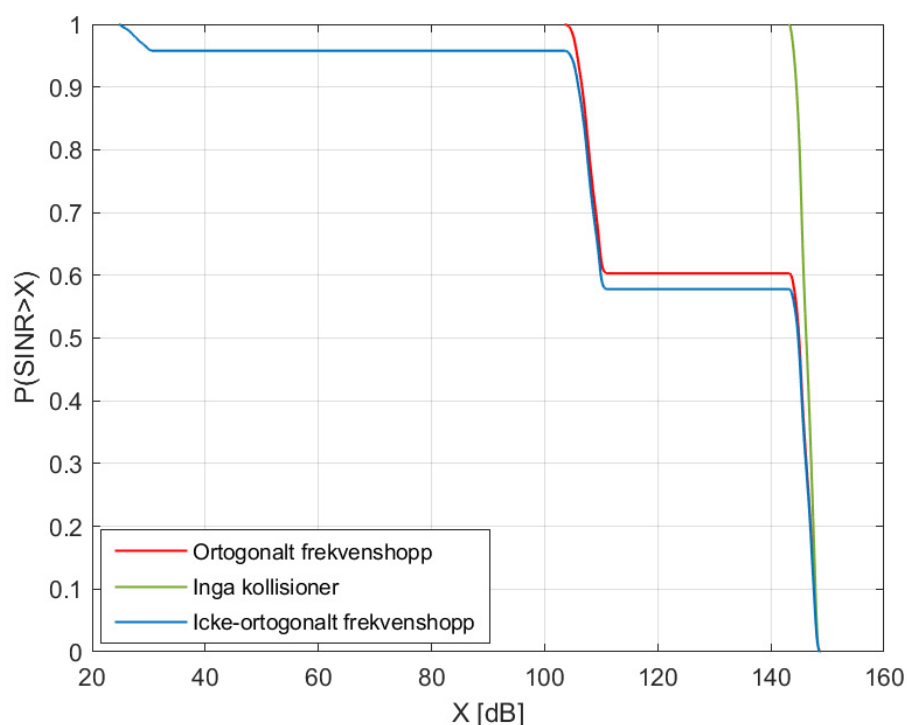
Tre olika modeller finns representerade:

- Inga kollisioner: Sändaren på plattform 2 är avstängd eller använder alltid en väl separerad frekvens.
- Ortogonalt frekvenshopp: De två sändarna använder frekvenshopp inom samma frekvensområde men tillåter inte att samma frekvens används samtidigt.
- Icke-ortogonalt frekvenshopp: De två sändarna använder frekvenshopp inom samma frekvensområde.

Spektrummask 1 från Figur 10 har använts även i dessa simuleringar vilket betyder att tre olika typer av interferens kan förekomma i modellerna. Dels då kanalerna använder så väl separerade frekvenser att de kan antas inte störa varandra, dels då de båda kanalernas hoppfrekvenser hamnar så nära att utombands-emissionerna läcker över mellan kanalerna. Den sista typen av interferens sker då hoppsekvenserna sammanfaller och de båda sändarna använder samma frekvens, vilket orsakar stark interferens. Det sista fallet sker bara vid icke-ortogonalt frekvenshopp.

Trappstegsformen i Figur 22 illustrerar dessa interferenstyper. Figuren visar sannolikheten att få ett signal-till-interferens-och-brus-förhållande (SINR) som är större än värdet på x-axeln. Till exempel är sannolikheten att få ett SINR-värde som är större än 120 dB för ortogonalt och icke-ortogonalt frekvenshopp 60.5 % respektive 57.8 % men så mycket som 100 % för fallet utan kollisioner. SINR-värdet utan interferens och med en isotrop antenn är 144.0 dB. Anledningen till att SINR-värdena är så höga beror på att länkdämpningen är utlämnad ur beräkningarna och figuren kan därför ses som ett mått på hur stor marginal som blir kvar för utbredningsförluster. Figuren visar att försämringen av prestandan vid både kollision med sidband och direkträff är betydande och bör i möjligaste mån undvikas.

Intressant i Figur 22 är också spridningen för fallet *inga kollisioner*, illustrerad av lutningen i figuren. Denna spridning är i detta förenklade fall på cirka 4 dB och beror på riktningsberoendet i strålningsdiagrammet och att de olika frekvenserna påverkar antennegenskaperna olika. Denna kurva kan jämföras med en isotrop antennmodell vilken skulle ha en lodrät kurva kring 144 dB. Förutom att inte fånga spridningen, så är den isotropa modellen relativt bra.



Figur 22. Sannolikheten att signal över interferens och brus (SINR) skall överstiga ett givet värde X för olika testade fall. SINR motsvarar i detta fall den marginal som finns för t.ex. vågutbredningsförluster.

7.5 Flera antenner på en plattform

Vid samlokalisering av antenner för olika ändamål på små plattformar, som till exempel olika frekvensband, finns en risk att prestandan hos ett eller flera system försämras avsevärt. Det faktum att plattformen är liten kan i sig ha en mycket stor inverkan på prestandan, eftersom plattformen utgör antennens jordplan. Detta diskuteras i [25] där prestandan hos antenner i frekvensområdet HF till UHF placerade på ett kvadratisk jordplan i fri rymd analyseras. Resultaten visar som väntat att antennens placering på jordplanet kan påverka prestandan kraftigt både avseende impedans och direktivitet.

Vid samlokalisering av olika antenntyper kommer störst påverkan på prestandan att vara interferens från antenner av samma typ, se föregående avsnitt. I fallet då två dipoler och en monopol ska integreras på samma plattform är det med andra ord viktigast att avståndet mellan dipolerna maximeras. Då dipoler inte är beroende av jordplan finns inget hinder för att placera dessa i jordplanets hörn eller om möjligt något utanför.

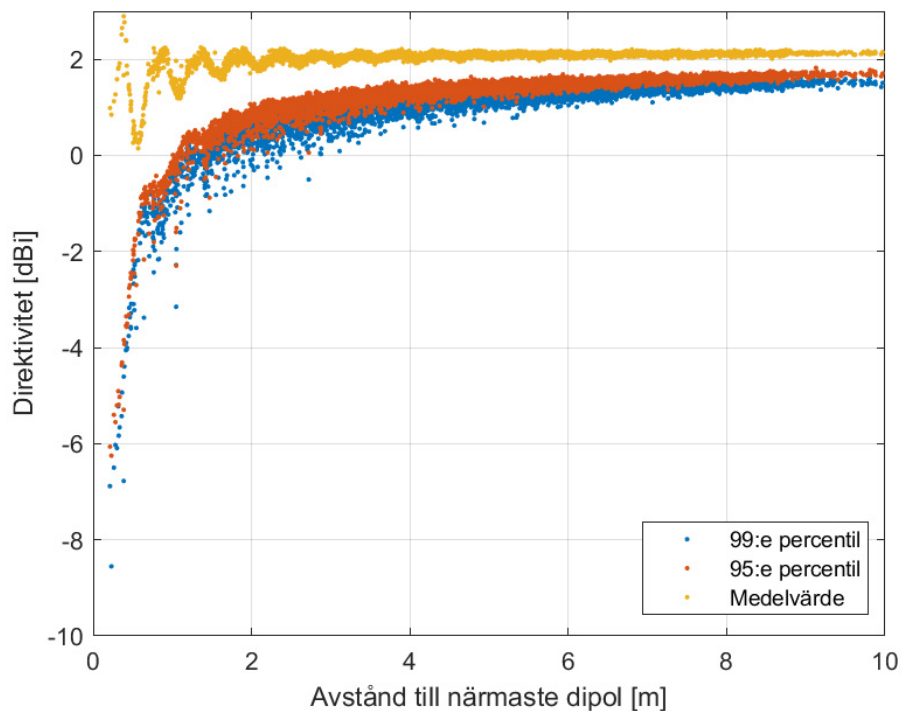
7.6 Omgivningens påverkan på en dipol

Hur strålningsdiagrammet för en dipol påverkas av omgivningen är undersökt med några simuleringar. I detta fall har en aktiv dipol placerats omgiven av identiska men avstängda dipoler. En antenn påverkas främst av metallföremål av samma längd och som är placerade parallellt med sändaren så därför stör denna uppställning dipolen maximalt.

Under simuleringarna har antalet antenner, områdets storlek och sändarens placering (om den är placerad i mitten på området eller längs en långsida) undersökts. Vad som verkar vara viktigast för strålningsdiagrammet är dock avståndet till den närmaste dipolen vilket indirekt påverkas av antalet, områdets storlek och sändarens relativa placering. I Figur 23 visas medelvärde, 95:e och 99:e percentilen (de sämsta 1 och 5 %) av strålningsdiagrammet plottad som funktion av avståndet till den närmaste dipolen för 5000 dipoluppställningar med fem dipoler stokastiskt placerade i varje realisering.

på UHF (240-350 MHz). Detta visar att det är viktigt att inte placera dipoler för nära varandra. Ett avstånd på minst en meter till den närmaste dipolen är att rekommendera.

Även om dessa simuleringar är gjorda med dipoler kommer resultaten troligtvis vara likartade oberoende av vilken typ av föremål som placeras ut så länge föremålet är någorlunda litet (mindre än en våglängd). Det innebär att om ett antal föremål monteras på taket på ett fordon kommer prestandan till största del att begränsas av avståndet till det närmaste föremålet.



Figur 23. Percentiler av direktiviteten som funktion av avståndet till närmaste dipol vid frekvenshopp mellan 240 och 350 MHz.

8. Slutsatser

I denna rapport har metoder för hantering av statiska interferensproblem beskrivits. Statiska interferenser är likartade över tid och härrör i huvudsak till hur olika system har integrerats på plattformen. Nedan följer en diskussion av de frågor som har belysts i rapporten, se kapitel 1.

1. Hur påverkas radioprestandan av minskad frekvenstillgång?

Försvarsmaktens tillgång till frekvenser har under lång tid minskat samtidigt som behovet av både dataakt och störskydd ökat. Den faktiska frekvenstillgången påverkar möjligheten till störskydd mot avsiktlig störning och radiosystemens förmåga att kunna samexistera, och avgör därigenom den faktiska räckvidden och systemtillgängligheten. Problemen med interferenser från grannkanaler ökar med krympande frekvensområde och fler samlokaliserade radiosystem, till mycket höga nivåer som påverkar radiosystemens räckvidd väsentligt. Vi närmar oss den gräns då interferensproblemen blir så stora att radiosystemens prestanda sjunker så mycket att de inte kan leverera önskad militär förmåga.

Konsekvenser av minskad tillgång till frekvenser blir exempelvis att:

- de militära systemen måste bli mer spektrumeffektiva,
- striktare emissionskrav på grannkanaler måste ställas i framtiden,
- utombandsemissionen från radiosystem bör mätas upp,
- det reella behovet av information som skickas idag i de trådlösa näten måste ses över,
- kompromisser beträffande vilka tjänster som skall kunna stöttas av radiosystemet och att dessa tjänsters prioritet, omfattning, tidsfördröjningar samt att vikten av störskydd för respektive tjänst behöver göras.

2. Hur påverkar utombandsemission samlokaliserade radiosystem?

En radiomottagare påverkas negativt, till exempel med högre bitfelhalt och missade meddelanden, av utombandsemission från en samlokaliserad sändare. Konsekvenserna blir mer påtagliga när de samlokaliserade radiosystemens kanaler närmar sig i frekvens. Effekterna kan dock döljas av systemen för användare på grund av att routingprotokoll, felrättande kodning etc. hanterar de uppkomna felen. Funktioner som normalt sett är till för att hantera varierande utbredningsförhållanden i kanalen och fungera som störskydd.

De emissionskrav på grannkanaler som används idag är inte lämpade för att säkerställa samexistens mellan flera samgrupperade, frekvenshoppande system som utnyttjar ett gemensamt frekvensband. Kraven är helt enkelt för generöst definierade, till exempel för en sändare på 300 MHz är det först 17.5 MHz från centerfrekvensen som utombandsemissionerna ska vara undertryckta med 80 dB relativt radions uteffekt.

Inom projektet har det visats att befintliga standarder för att mäta utombandsemission kan anpassas till att fungera för frekvenshoppande system samt hur emissionernas karakteristik kan mätas upp. Metoden har testats på ett radiosystem och kommer att testas ytterligare under 2019.

3. Hur kan interferenskällor utvärderas och åtgärder för dessa prioriteras?

Att beräkna störkällors påverkan på kommunikationsprestanda kan vara komplext och beräkningskrävande. Metoder har därför utvecklats inom ramen för projekten RICOM och KORINT för att göra ungefärliga uppskattningar av systemprestanda i syfte att dels bedöma kommunikationsförmågan och dels kunna prioritera och åtgärda problemen på bästa sätt. Metoderna baseras på interferensernas bruskaraktistik och effekt. Kännedom om radiosystemen är också nödvändig för att genomföra utvärderingarna.

4. Hur påverkas radioprestandan av antennernas placering?

Genom att använda statistiska metoder för utvärderingen kan antennens prestanda vid olika typer av frekvenshopp analyseras. Utvärderingsmetoden möjliggör även en analys av antennprestandan i termer av funktionssäkerhet vilket är en stor fördel vid exempelvis kravställning av systemprestanda. Resultaten bekräftar åter den välkända grundregeln om att monopoler bör placeras så långt från kanten

på jordplanet som möjligt. För dipoler är det viktigast att maximera avståndet till andra dipoler för att minska kopplingen och därigenom begränsa interferensproblematiken.

5. Hur verifieras prestandan hos radiosystemen efter att de har integrerats på plattformen?

För att säkerställa en viss radioprestanda hos en plattform bör begreppet *funktionssäkerhet* för radiosystem införas, redan i kravställningen för vad en plattform ska ha för förmåga att samverka trådlöst med andra enheter. Funktionssäkerheten hos radiosystemen ska sedan upprätthållas under hela plattformens livscykel eller medvetet anpassas efter nya behov.

Nuvarande EMC-standarder är inte tillräckliga för att verifiera radioprestandan, de skapar dock goda grundförutsättningar för radiosystemen hos en plattform och är nödvändiga. Standarderna är i huvudsak framtagna för analoga radiosystem; för en digital radiomottagare har bruskaraktären stor inverkan på dess prestanda vilket inte standarderna tar hänsyn till. Vad som saknas är standarder eller vedertagna mätmetoder för att säkerställa en viss nivå av prestanda hos ett radiosystem som är integrerat i en plattform.

I dag anskaffas radiosystem och plattformar separat och vid olika tidpunkter, vilket är naturligt. Radions prestanda kan därför skilja sig åt mellan vilka plattformar den integrerats på, eftersom olika plattformstyper och plattformsindivider kan ha olika interferensproblem. Radioprestanda kan också komma att förändras över tid då plattformens konfiguration modifieras. Antennens placering på plattformen påverkar dessutom i stor grad också radioprestandan.

Verifieringsmätningar bör genomföras med en mätmetod som ger god information om hur radiosystemet påverkas prestandamässigt. Mätmetoden bör i möjligaste mån följa standarder och spegla verkliga driftförhållandena utan att ta lång tid att genomföra. Det senare är av stor vikt vid mätning på operativa plattformar. En sådan metod, med fokus på funktionssäkerhet bör utvecklas, speciellt för Marina plattformar.

9. Referenser

- [1] B. Asp, K. Wiklundh, S. Örn Tengstrand, E. Axell, P. Eliardsson och B. Johansson, "RICOM Slutrapport," FOI-R-4317--SE, 2016.
- [2] "IEEE Standard Computer Dictionary: A Compilation of IEEE Standard Computer Glossaries," IEEE Std 610, 1991.
- [3] P. Stenumgaard, G. Wenngren, H. Tullberg, J. Nilsson, J. Grönkvist, P. Cronström, J. Lindström, J. Hallberg, N. Hallberg, P. Grahn och R. Andersson, "Tjänstebegreppets användning inom olika tillämpningsområden," FOI-R--1211--SE, 2004.
- [4] P. Eliardsson, "Mätresultat Ra460," FOI-RH--2059--SE, 2019.
- [5] MIL-STD-461G, *Department of Defense Interface Standard- Requirements for the Control of Electromagnetic Interference Characteristics of Subsystems and Equipment*, United States Department of Defense, 2015.
- [6] Ministry of Defence, "Defence Standard 59-411 Electromagnetic Compatibility," 2008.
- [7] AECTP 500 edition 4, *Electromagnetic Environmental Effects Test and Verifications*, North Atlantic Treaty Organization (NATO), 2011.
- [8] S. Linder, K. Fors och K. Wiklundh, "Performance of coded frequency hopping systems with adjacent channel interference," i *International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC EUROPE*, Anger, 2017.
- [9] K. Fors och S. Linder, "Konsekvenser av interferensmiljön vid samgruppering av frekvenshoppande radiosystem," FOI-R--4318--SE, FOI, 2016.
- [10] 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, 2018.
- [11] B. Asp, K. Wiklundh, P. Stenumgaard, P. Eliardsson, B. Johansson och E. Axell, "ROAM Slutrapport," FOI-R--3790--SE, 2013.
- [12] B. Asp, P. Eliardsson, B. Johansson, P. Stenumgaard och K. Wiklundh, "Interferensnivåmätningar på HMS Carlskrona," FOI-RH--1208--SE, 2012.
- [13] 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.
- [14] ITU Report ITU-R P.372-12, *Radio Noise*, Geneva: International Telecommunications Union, 2015.
- [15] P. Eliardsson, K. Wiklundh, E. Axell och P. Stenumgaard, "Robust channel selection and power control for HF communications," FOI-R--4120--SE, 2015.
- [16] P. F. Stenumgaard, "A simple impulsiveness correction factor for control of electromagnetic interference in dynamic wireless applications," *Communications letters*, pp. 147-149, 2006.

- [17] S. Ö. Tengstrand, E. Axell och P. Eliardsson, "Approximations of BEP for multiple impulse noise sources," i *EMC Europe*, Wroclaw, 2016.
- [18] S. Ö. Tengstrand, E. Axell, K. Fors, S. Linder och K. Wiklundh, "Efficient evaluation of communication system performance in complex interference situations," i *EMC Europe*, Angers, 2017.
- [19] K. Fors, S. Linder, K. Wiklundh, S. Ö. Tengstrand, B. Lindahl, M. Alexandersson, P. Eliardsson, J. Hedström och P. Stenumgaard, "Telekonflikt - Sammanfattning 2017," FOI-R--4532--SE, 2017.
- [20] S. Ö. Tengstrand, P. Eliardsson och E. Axell, "Mitigation of multiple impulse noise sources through selective attenuation," i *MILCOM*, Baltimore, MD, 2016.
- [21] S. Ö. Tengstrand, P. Eliardsson, E. Axell, B. Johansson och K. Wiklundh, "Methods for Valuation of Measures that Increase Robustness in the Integration of Wireless Communication Systems," FOI-R--4302--SE, 2016.
- [22] S. Ö. Tengstrand, E. Axell, T. Lindgren och K. Wiklundh, "Systemintegration av trådlösa kommunikationssystem - Omvärldsanalys," FOI-R--4455--SE, 2017.
- [23] J. Hoppe, D. Duvak och G. Palafox, "Antenna Optimization Study on Stryker Vehicle Using FDTD Technique," i *Proceedings for the Army Science Conference (24th)*, Orlando, Florida, USA, 2004.
- [24] B. T. Strojny och R. G. Rojas, "Integration of conformal GPS and VHF/UHF communication antennas for small UAV applications," i *2009 3rd European Conference on Antennas and Propagation*, Berlin, Tyskland, 2009.
- [25] T. Lindgren, "Simulation of the performance of communication antenna systems integrated on platforms," FOI-R--4221--SE, FOI, 2016.
- [26] S. Bergström, "The Impact of Antennas on Radiolink Performance in Frequency Hopping Scenarios," Examensarbete, Uppsala Universitet, 2018.
- [27] T. Lindgren, "System Performance and Reliability of a Monopole Antenna Integrated on a Small Ground Plane," *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, Submitted.

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