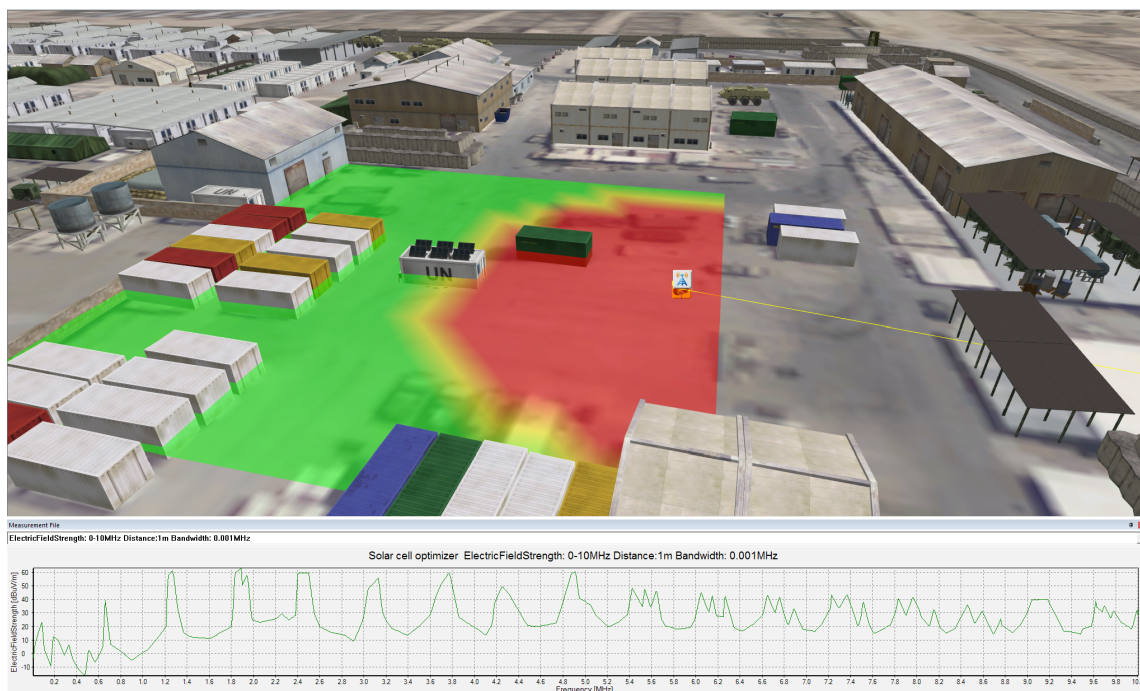


SARA LINDER, KARINA FORS, PETER STENUMGAARD,
JOHAN HEDSTRÖM, PATRIK ELIARDSSON, THOMAS RANSTRÖM,
ERIK AXELL, FREDRIK MÖRNESTEDT



Sara Linder, Karina Fors, Peter Stenumgaard,
Johan Hedström, Patrik Eliardsson, Thomas
Ranström, Erik Axell, Fredrik Mörnestedt

Telekonflikt

Sammanfattning 2018- 2019

Titel	Telekonflikt– Sammanfattning 2018- 2019
Title	Intersystem Interference – Summary 2018-2019
Rapportnr/Report no	FOI-R--4832--SE
Månad/Month	December
Utgivningsår/Year	2019
Antal sidor/Pages	46
ISSN	1650-1942
Kund/Customer	FMV
Forskningsområde	Ledningsteknologi
FoT-område	Inget FoT-område
Projektnr/Project no	E72321
Godkänd av/Approved by	Christian Jönsson
Ansvarig avdelning	Ledningssystem

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

Rapporten sammanfattar verksamheten inom telekonfliktområdet från delar av 2018 och 2019. Begreppet telekonflikter innefattar den negativa påverkan som oavsiktliga störningar kan få på en radiomottagare. Oavsiktliga störningar kan vara såväl andra sändare som elektrisk utrustning i närheten av mottagaren. Militära plattformar består vanligtvis av ett flertal elektriska utrustningar och radiosystem på en liten yta, och risken för telekonflikter är därför stor.

Rapporten sammanfattar:

- Ny funktionalitet i telekonfliktverktyget GENESIS. Scenarion kan nu analyseras på godtycklig plats på jorden då karthanteringen är mer flexibel. Presentationen av beräkningsresultat har utvecklats för att möjliggöra mer detaljerade analyser. Förmåga att hantera mätspektrum uppmätta med olika typer av detektorer har lagts till och störkällor kan även betraktas antingen som bredbandiga eller smalbandiga vilket kan påverka prestandaförsämringen i en radiomottagare.
- Fortsatt utveckling av det portabla störningsmätsystemet RF-Oculus för automatisk övervakning av störningsmiljön där det även finns radiosändningar. En metod för automatisk klassificering av radiosignaler har analyserats.
- Effekter av störningssignaler från solpaneler på flygradio och kortvågssystem.
- Störningskänslighet hos 5G-teknik, specifikt smalbandig störning av OFDM inklusive teknik för att minska prestandapåverkan.
- Omvärldsbevakning av området – intressant material på besökta konferenser, och bevakning av teknikområdena Internet of Things (IoT), Artificiell Intelligens och EMC samt dynamisk spektrumaccess.

Nyckelord: telekonflikt, oavsiktliga störningar, EMC, GENESIS, RF-Oculus

Summary

The report summarizes intersystem interference work from parts of 2018 and 2019. The concept of intersystem interference includes negative impact from unintended interference on a radio receiver. Interference can originate from both other transmitters and electrical equipment near the receiver. Military platforms usually consist of a number of electrical equipment and radio systems on a small area, and the risk of intersystem interference is therefore high.

The report summarizes:

- New functionality in the intersystem interference tool GENESIS. Scenarios can be analyzed in any location, as the map management is more flexible. The presentation of calculation results is improved to enable more detailed analyzes. The ability to handle measurement spectrum measured with different types of detectors has been added and interference sources can be considered either broadband or narrowband, which can affect the performance deterioration of a radio receiver.
- Continued development of the portable interference measurement system RF-Oculus for automatic monitoring of the interference environment where there are also radio transmissions. A method for automatically classifying radio signals has been analyzed.
- Effects of interference from solar panels on air traffic control system and shortwave systems.
- Sensitivity of 5G technology, specifically sensitivity for narrow band interference on OFDM including technology to reduce performance impact.
- Survey of research in the area – interesting material from attended conferences, and summary of the areas Internet of Things, Artificial Intelligence and EMC as well as dynamic spectrum access.

Keywords: intersystem interference, EMC, GENESIS, RF-Oculus

Innehållsförteckning

1	Inledning	7
2	Telekonfliktverket GENESIS	9
2.1	Utveckling från analys på en site till en mer flexibel miljö	10
2.2	Emissionsmätningar och detektorer	11
2.3	Importprogrammet	12
2.4	Resultatpresentation	13
3	Portabla mätsystemet RF-Oculus	17
3.1	Beskrivning av RF-Oculus	17
3.2	AI för klassificering av interferenser	19
3.3	Sammanfattning	21
4	Påverkan från solceller	23
4.1	Kortvågskommunikation	23
4.2	Flygradiokommunikation	25
4.3	Sammanfattning	26
5	OFDM och CW-störningar	27
5.1	Modell av OFDM-systemet	27
5.2	Störning bestående av CW-signaler	28
5.3	Reducering av CW-störning	28
5.3.1	Metod för reducering av interferenser	28
5.3.2	Resultat	29
5.4	Sammanfattning av resultat	30
6	Omvärldsbevakning	31
6.1	Konferenser	31
6.1.1	EMC Europe 2018	31
6.1.2	HF 19 – Nordic Conference of HF Communications	32
6.1.3	EMC Europe 2019	34
6.2	Dynamisk spektrumaccess	36
6.3	Telekonfliktaspekter för Internet of Things	38
6.4	Artificiell intelligens och EMC	40
7	Framtida utmaningar	43
8	Referenser	45

1 Inledning

Telekonflikter är de problem som uppstår på grund av oavsiktliga störningar från andra nyttsignaler eller elektrisk utrustning. Dessa störningar påverkar radiomottagaren negativt och försvårar mottagandet av en kommunikationssignal. Effekterna av telekonflikter kan visa sig på olika sätt beroende på bland annat radiosystemet och störningens art. Typiska konsekvenser kan vara avbrott, minskad räckvidd för radiosystemet eller att vissa meddelanden blir fördröjda eller inte kommer fram. I vissa situationer är det tydligt att det är telekonfliktproblem, exempelvis om sambandet alltid avbryts då en viss utrustning används, medan orsakerna kan vara svårare att inse i andra situationer. I situationer när kommunikationssystemet ska användas vid ett längre avstånd än det brukar, men ändå inom den specificerade räckvidden, och det inte fungerar kan det vara svårt att reda ut att det faktiskt beror på en telekonflikt och inte radiosystemet i sig. Telekonflikter kan således få olika konsekvenser beroende på mottagartyp och störningstyp. Sammanfattningsvis kan konsekvensen typiskt bli något av följande:

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

En medvetenhet om vad telekonflikter är och vad de kan bero på är därför viktigt för att robustheten i egna system inte ska degraderas och att förbands förmåga inte ska påverkas negativt.

Militära plattformar kännetecknas av att det finns många radiosystem på en liten yta och det är därför stor risk att telekonflikter uppstår. Ibland finns dessutom behov av att kunna sända och lyssna samtidigt i ett frekvensband. Användning av elektriska utrustningar, som exempelvis datorer, i närheten av radiosystem har också blivit allt vanligare i försvarstillämpningar. Den ökade användningen av datorer beror på ökade krav på informationshantering på enskilda grupperingsplatser och i plattformar. För framtida materielsystem finns dessutom klara direktiv om att använda civil teknik i så stor utsträckning som möjligt. Detta måste speciellt beaktas ur radiostörningssynpunkt, då civila krav på emissionsbegränsning tillåter betydligt högre nivåer än motsvarande militära krav.

Typiska källor till utrustningsalstrad radiostörning är datorer, mikrovågsugnar, lågenergilampor av LED-typ, elkraftsgeneratorer, medicinteknisk utrustning, frekvensomriktare, ström-/spänningsomvandlare som t ex laddningsutrustning för datorer, motorer till vindrutetorkare och fläktmotorer.

Elektromagnetiska interferenser från andra radiosystem och elektriska utrustningar på plattformen leder till en försämrad förmåga hos sambandssystemen och kan i förlängningen påverka de militära förbandens förmåga.

Det är viktigt att medvetandegöra effekterna av telekonflikter och förebygga att telekonflikter uppstår. Att åtgärda telekonflikter i ett sent skede kan bli mycket kostsamt och i vissa fall helt omöjligt. Därför är elmiljön ett område som särskilt bör beaktas i hela verksamhetsprocessen då radiosystem, elektriska utrustningar och plattformar krävs, designas, utvecklas, upphandlas och modifieras. Telekonfliktsanalyser, inklusive effekten av antennval, bör också genomföras inför arbetet att integrera radiosystem och elektriska utrustningar på plattformar.

Arbetet i detta projekt har den långsiktiga målsättningen att strategiskt bedriva forskning som kan utgöra underlag för olika ställningstaganden inom telekonfliktområdet. Här utvecklas nya analysmetoder för att bedöma störningspåverkan för moderna digitala kommunikationssystem när de exponeras för olika typer av störningssignaler. Även direktstöd i form av expertstöd och remissvar ingår för att stödja FM och FMV med aktuella telekonfliktproblem. Inom projektet följs samtidigt omvärldsutvecklingen med avseende på nya trådlösa tekniker och trender som kan komma att påverka Försvarmaktens system. Ytterligare en del av arbetet är att sprida kunskapen, för att öka medvetenheten om telekonflikter och dess konsekvenser, genom att bland annat medverka på kurser för FM och FMV.

Telekonfliktverktyget GENESIS används såväl för att medvetandegöra telekonflikter och dess konsekvenser som att analysera aktuella telekonfliktproblem och öka kunskapen hos dem som arbetar med att hantera radiostörningsproblem. På så sätt görs både medvetandehöjande och förmågehöjande insatser i projektet. Den långsiktiga forskning som bedrivs implementeras ofta även i GENESIS för att öka verktygets förmåga att hantera olika typer av telekonfliktproblem. GENESIS är den plattform där ny kunskap implementeras för att komma till nytta inom direktstöd och utbildning.

GENESIS kan exempelvis användas för att bedöma

- konsekvenser av placering av olika störande elektriska utrustningar
- robusthet hos olika typer av radiosystem
- effekten av avhjälpande åtgärder genom att GENESIS identifierar den störningskälla som dominerar störningsnivån i en viss mottagare
- hur totalt mottaget störningsspektrum varierar i nivå och frekvens för att se om telekonflikten kan avhjälpas genom att byta frekvens hos kommunikationssystemet
- effekter av olika åtgärder för att reducera risken för telekonflikter, som exempelvis effekten av skärmning, olika emissionskrav på elektriska utrustningar, byte av radiofrekvens
- konsekvenser av samlokaliserade frekvenshoppande radiosystem med varierande grad av utombandsegenskaper och effekter av filterlösningar för frekvenshoppande system.

I denna rapport sammanfattas delar av det arbete som utförts inom telekonfliktsbeställningen från FMV under 2018 och 2019. Arbetet består av flera olika delar, som alla syftar till att hantera de konsekvenser som uppstår vid telekonflikter.

Rapporten sammanfattar

- ny funktionalitet i telekonfliktverktyget GENESIS
- utveckling av portabelt störningsmåtsystem för automatisk övervakning av störningsmiljön
- effekter av störningssignaler från solpaneler
- störningskänsligheten hos 5G-tekniken
- omvärldsbevakning av området – intressant material på besökta konferenser, och bevakning av teknikområdena Internet of Things (IoT), Artificiell Intelligens och EMC samt dynamisk spektrumaccess.

Flera av delarna är även vetenskapligt kvalitetskontrollerade genom extern oberoende granskning i form av konferensbidrag och tidskriftsartiklar [1] [2] [3] [4] [5] [6] [7] [8].

2 Telekonfliktverktyget GENESIS

För att säkerställa att kommunikationssystem kan samexistera behöver en telekonfliktanalys genomföras för de ingående systemen. Den ökade mängden elektriska utrustningar på militära plattformar har lett till att konsekvenserna av störningar från dessa kan bli minst lika stora som från andra sändande system. Därför är det viktigt att alla störningssignaler som kopplas via en mottagares antennsystem hanteras i samband med telekonfliktanalyser, oavsett om störningskällan är en avsedd sändare eller inte.

Telekonfliktsberäkningar kan vara mycket komplexa och tidskrävande att genomföra. Därför är det en fördel om beräkningarna kan bygga på approximationer och förenklingar för att snabba upp beräkningarna. Det är dock mycket viktigt att approximationerna och modelleringen är tillräckligt exakta för att uppnå tillförlitliga resultat. Beräkningarna i GENESIS bygger på väl underbyggda approximationer och parameterreducerade modeller, som har validerats genom simuleringar och mätningar.

Användargränssnittet för GENESIS är utvecklat för att skapa en användarvänlig arbetsmiljö där man ska kunna känna igen sig i den grafiska miljön och enkelt kunna infoga plattformar, kommunikationssystem och störningskällor. Användaren ska inte behöva vara kvalificerad specialist för att kunna göra beräkningar eller för att tolka resultaten. Beräkningarna ska kunna genomföras snabbt och resultaten ska visualiseras på ett intuitivt sätt med en översiktlig presentation för att visa om det är låg, medel eller hög risk för telekonflikt. Det sker också automatiskt en beräkning av ifall telekonflikten orsakat en försämring av räckvidden för kommunikationslänken. En erfaren användare kan även få tillgång till mer detaljerad information om resultatet.

Några av GENESIS fördelar kan kortfattat sammanfattas som:

- GENESIS är ett scenariobaserat verktyg som kan användas för att medvetandegöra orsaker till varför telekonflikter uppstår och vad det får för konsekvenser. Verktöget kan användas både för kunskapsöverföring av telekonfliktsresultat från forskning till användare och för att genomföra analyser av konkreta interferenssituationer
- GENESIS bygger främst på analysmetoder som är utvecklade för moderna digitala telekommunikationssystem och inkluderar effekter av frekvenshoppande system, utombandsegenskaper och felrättande kodning. Beräkningar kan även göras för analoga radiosystem
- GENESIS bygger på parameterreducerade beräkningsmodeller för snabb analys, men med tillräcklig noggrannhet.

Verktöget är modulärt uppbyggt, vilket gör det relativt lätt att lägga till nya plattformar, störningskällor och trådlösa kommunikationssystem. Nya störningskällor med mätspektrum kan användaren själv lägga till.

I GENESIS finns plattformar som container, fältsjukhus, ambulans, Patria, Toyota Landcruiser, polisbil, brandbil och Visby-korvett. Bland radiosystemen finns IGR (Ra 1570), Ra 180, Rakel (Tetra), Ra 811, Ra 813, HF2000, Ra 460, analog flygradio och GPS-mottagare. Det finns olika typer av störningskällor, exempelvis datorer, sjukhusutrustning, solcellsanläggning, frekvensomvandlare, samt några olika civila och militära emissionsstandarder.



Figur 1 Användargränssnittet i GENESIS. GENESIS A - Verktygsfält, B - Mallbibliotek, C - Objektträd, D - Egenskapsfönster, E - Kartvy, F - Graffönster för störspektrum, G – Graffönster för mätfil, H - Output-fönster, I - Resultatfönster, J – Hjälpfönster

Figur 1 visar användargränssnittet för GENESIS med dess olika delar. Användaren kan själv välja vilka av de ingående delarna som visas. I användarhandledningen för GENESIS [9] finns de olika delarna av gränssnittet beskrivna, tillsammans med hur verktyget kan användas och några exempelscenarion.

2.1 Utveckling från analys på en site till en mer flexibel miljö

Tidigare har det grafiska gränssnittet varit uppbyggt kring några olika scenarier eller så kallade siter. Siterna som finns implementerade är en militär camp i Afghanistan (The Northern Light), ett havscenarion med fartyg samt miljön runt Arlanda flygplats och en tom miljö. Med ett ökat nationellt fokus har behovet ökat att kunna analysera telekonflikter i en typisk svensk terräng. För att förenkla telekonfliktsberäkningar i nya geografiska områden eller områden som förändras över tid har det framkommit ett behov av mer flexibel karthantering som inte utgår från några specifika siter.

I den nya versionen finns nu möjligheten att förändra kartfunktionaliteten till att grafiskt kunna plocka in vilken geografisk yta som helst. Med denna uppgradering kan man snabbt agera på begäran om telekonfliktsberäkningar oavsett geografiskt område. Vidare möjliggör denna uppgradering att användaren kan lyfta in befintliga GIS-datapaketer från GEO-SE (Försvarmakten Stödenheten för GIS-data) samt att vi kan hantera en rad öppna datakällor. I GENESIS kan kartdata från olika källor användas vid analyser och även vilka lager som visas och används vid beräkningar kan sättas av användaren.

De tidigare siterna finns bevarade och kan användas vid analyser, såväl campen i Afghanistan och Arlanda finns som snabbval i menyn och användaren kan enkelt välja dessa miljöer för att bygga scenarion. Eftersom detaljerat kartdata är utrymmeskrävande levereras GENESIS med en begränsad mängd kartdata. En enkel karta över världen kompletteras med mer detaljerat data kring campen och Arlanda. Då datorn är ansluten till Internet används även mer kartdata från *Open Street Map*. I Figur 2 visas användargränssnittet för GENESIS, där inställningarna för kartan syns i det övre verktygsfältet och hur campen ser ut i GENESIS.



Figur 2 Användargränssnittet i GENESIS med verktygsfältet för karthanteringen överst och för campen i Afghanistan.

På FOI finns tillgång till mer detaljerat kartdata som användas då GENESIS körs på en dator ansluten till det lokala nätverket. Om användaren har tillgång till kartdata eller 3D-modeller av miljöer kan dessa användas i GENESIS. Mer detaljer om karthanteringen finns i användarhandledningen för GENESIS [9] som följer med vid installation.

Byte av karthanteringen innebär också ett byte av koordinatsystem i GENESIS. Tidigare har lokala koordinater kopplade till de olika siterna använts. I den nya versionen använder sig GENESIS av ett geocentriskt kartesiskt koordinatsystem där origo är placerat i jordens tyngdpunkt. Då en användare kan ha svårt att positionera ett objekt direkt i geocentriska koordinaterna finns även möjlighet att positionera objekt med WGS84-koordinater. Utöver latitud och longitud kan även objektets höjd sättas. Dessutom finns möjlighet att sätta positioner för objekt relativt varandra, exempelvis antennens position relativt radion.

Flexibiliteten i användning av kart- och terrängdata ger möjlighet att analysera en stor mängd miljöer med användning av det underlag som användaren har tillgängligt.

2.2 Emissionsmätningar och detektorer

En viktig del i GENESIS är de spektrum som mätts upp för olika elektriska utrustningar som exempelvis datorer och medicinsk utrustning. Vid emissionsmätningar mäts oftast elektrisk fältstyrka på ett visst mätavstånd från utrustningen. Vissa mätningar genomförs för att verifiera att utrustningen uppfyller ett visst emissionskrav, exempelvis RE102 för militär utrustning som ska uppfylla kraven i MIL-STD-461G. Vid standardmätningar är ofta avstånd, bandbredd och detektor specificerade även om de kan vara olika för olika emissionsstandarder och även olika för olika frekvensband.

I tidigare versioner av GENESIS har RMS-värden från mätningar använts och störningssignalen har antagits vara bredbandigt additivt vitt brus (AWGN, *Additive White Gaussian Noise*). I den nya versionen kan mätvärden uppmätta med andra standarddetektorer, som Peak, Quasi Peak och Average användas. Störningssignalen kan även antas vara antingen AWGN eller en smalbandig signal (bärvåg).

Ett grundläggande problem med detektorerna Peak, Quasi Peak och Average är att det inte finns något generellt samband mellan dessa detektorers mätvärden och motsvarande störningspåverkan på en digital mottagare. För värden uppmätta med en RMS-detektor finns däremot ett samband. En lösning på detta dilemma har hittats via den forskning som FOI tidigare har utfört inom telekonfliktområdet, se exempelvis [10]. I GENESIS konverteras värden uppmätta med andra detektorer till motsvarande RMS-värde.

Om störningssignalen antas vara AWGN används i första hand RMS-detektorn och om det inte finns används mätta värden i ordningen Quasi Peak, Average och Peak. För de andra

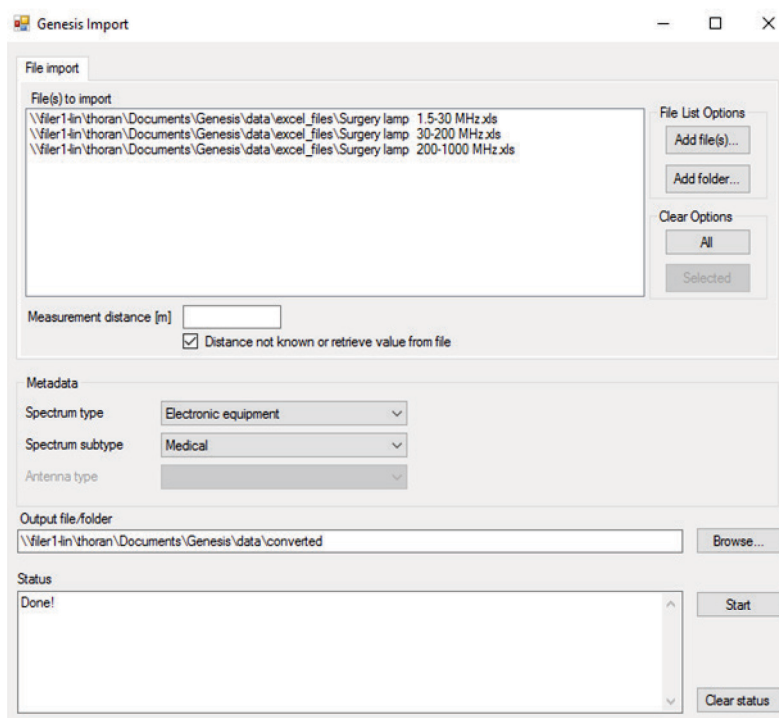
detektorerna korrigeras den uppmätta effekten för att motsvara en mätning med RMS. Detta för att inte överskatta påverkan på mottagaren. För en störningssignal räknar GENESIS alltid ut motsvarande mottagen spektraltäthet [W/Hz] beroende på bandbredd vid mätningen, frekvens och övriga scenarioparametrar.

Man kan även välja att hantera data som om det är en smalbandig signal som uppmätts. Mätningar används då i ordningen RMS, Quasi Peak, Peak och Average. För en smalbandig signal korrigeras inte den uppmätta effekten, men vid beräkningen av spektraltätheten antas att hela störningssignalen är inom radiomottagarens bandbredd.

I GENESIS kan man nu för varje störningskälla i scenariot sätta om den ska modelleras som smal- eller bredbandig. Beroende på antagande kan resultaten från beräkningarna skilja sig åt. Hur mycket beror på såväl radiosystem som mätning, men nu kan de olika fallen beräknas på ett enkelt sätt i GENESIS. I realiteten är de flesta störkällor en blandning av såväl bredbandigt brus och smalbandiga signaler vilket ofta varierar över frekvens.

2.3 Importprogrammet

För att förenkla hanteringen av mätdata har ett importprogram utvecklats och användargränssnittet visas i Figur 3. Programmet läser in mätdata från en eller flera excel-filer för att sedan spara mätdata i xml-format. För excel-filer finns en mall som visar de fält som ska finnas med för att inläsningen med importprogrammet fungera, se Figur 4.



Figur 3 Användargränssnitt för importprogrammet.

1	Product																
2	Report																
3	Date																
4	Time																
5	Instrument																
6	RBW																
7	RF Input																
8	Distance																
9	Frequency unit																
10	Amplitude unit																
11	Distance unit																
12																	
13																	
14																	
15	Frequency	Peak	RMS	Average	Quasi Peak												
16																	
17																	
18																	
19																	
20																	

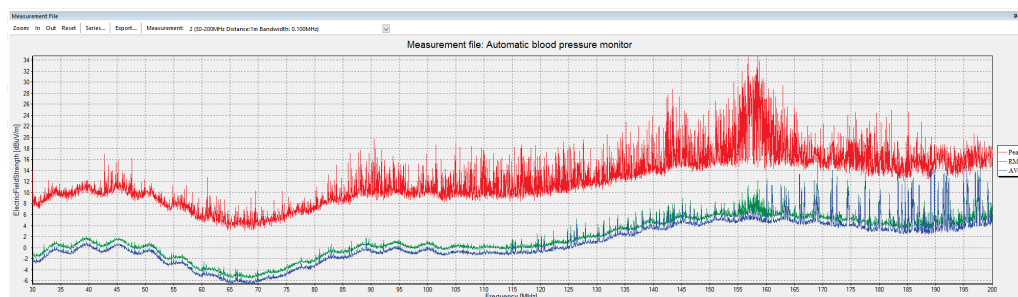
Figur 4 Mall för excel-fil med uppmätt spektrumdata

2.4 Resultatpresentation

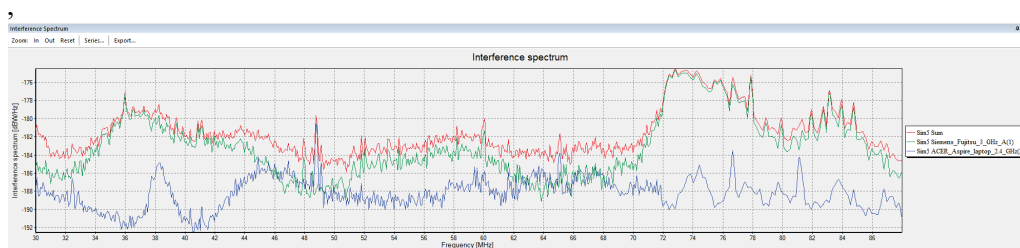
GENESIS kan nu hantera att spektrum kan vara uppmätta av olika detektorer. Data är oftast elektrisk fältstyrka i dBμV/m, uppmätt för ett antal frekvenser. För framförallt medicinsk utrustning har fältstyrkan mätts med flera olika detektorer samtidigt och då visas mätresultaten med olika färger. Ett exempel visas i Figur 5 där mätningen har genomförts samtidigt med detektorerna Peak, RMS och average.

Det är även möjligt att välja vilka data som visas i fönstret och exportera valda data till en kommasseparerad fil (*.csv). Flera av mätfilerna innehåller data uppmätta för flera frekvensområden, vilket också kan väljas. För olika frekvensområden kan olika bandbredd och detektor ha använts vilket framgår när frekvensområde väljs och där visas även mätavståndet. En ny finess är att radiomottagarens frekvensområde kan visas i diagrammet för att lättare se vilka data som är av intresse i scenariot.

Fönstret som visar mottaget störspektrum (Interference spectrum) har uppdaterats för att visa flera spektrum, se Figur 6. Mottaget störspektrum beräknas genom att effekten för alla störkällor i scenariot adderas till ett sammanlagt effektspektrum. Dämpning mellan störkällan och radiomottagaren är inkluderad i beräkningen. Det mottagna spektrumet beräknas för samtliga radiofrekvenser som radiomottagaren i scenariot använder och visar mottagen effekt per Hz [dBW/Hz]. Tidigare har endast totalresultatet kunnat visas medan nu kan även bidrag från de enskilda störkällorna och bakgrundsmiljön presenteras var för sig.



Figur 5 Fönster för visning av uppmätta spektrum.



Figur 6 Exempel på ett diagramfönster efter utförd beräkning på ett scenario.

Ett nytt fönster *Simulation Results* har tillkommit där resultaten och några inställningar för beräkningarna presenteras i textform. Detta fönster är ett komplement till den grafiska presentationen i verktyget.

Till vänster i Figur 7 visas de simuleringar som har genomförts och till höger detaljer för senaste eller i listan till vänster vald simulering. Genom att klicka på en av dessa simuleringar visas dess resultat till höger. Detta gör det enkelt att jämföra resultat för olika simuleringar. Om något speciellt resultat från simuleringen är intressant kan det läggas till som en kolumn i delen till vänster genom att välja *Columns* i fönstrets menyrad. Exempel på detta visas i Figur 7 där kolumnen BEP har lagts till. Dessutom går det genom att dubbelklicka på en av simuleringarna i listan till vänster att komma till scenariot för simuleringen. På så sätt ångras utförda ändringar som genomförts efter vald simulering.

I förra versionen av GENESIS infördes en modell för EMI på plattformar för att kunna modellera de störningar som härrör från plattformarna själva. För detta ändamål infördes ett avstånd runt en plattform inom vilket egenstörningen kan antas vara konstant. Fördelen med detta är bland annat att alla antenner på en plattform antas vara utsatta för samma påverkan från plattformen. Detta avstånd kan nu visualiseras runt en plattform, se Figur 8.

Simulation Results			
Clear Columns...			
Simulation-ID	Interference...	BEP	
Sim0	Low	3.323e-07	
Sim1	High	1.821e-02	

Sim 1	
Interference Risk	High
Dominant Interference Source	EN55022_Office_environment
Bit Error Probability Results	
With Interference	0.018208
Without Interference	0.000000
Signal Noise Ratio	17.943102
Communication Distance Results	
With Interference [m]	5515.480042
Without Interference [m]	9492.187500
Range Reduction [%]	41.894531
Interference Source Rank	
EN55022_Office_environment	1
ACER_Aspire_Japtop_2.4_GHz	2
PatraPlatformWithRA180[24]	3
Simulation Information	
Target Receiver	PatraRA180Radio[13]
Radio System	Ra180
Transmission Loss Model	Basic

Figur 7 Resultatfönster för radio-beräkningar

3 Portabla mätsystemet RF-Oculus

Eftersom den elektromagnetiska miljön har stor påverkan på hur väl ett kommunikationssystem fungerar finns ett stort behov av att kunna övervaka den. Störningsmiljön kan variera mycket och det är ofta inte tillräckligt att genomföra en enstaka mätning på exempelvis en mottagarplats. Det finns därför önskemål om att kunna övervaka EM-miljön kontinuerligt för att till exempel upptäcka tillfälliga störningar eller bevaka trender. Detta särskilt i närheten av kritiska trådlösa tillämpningar. För att övervaka den elektromagnetiska interferensmiljön har ett interferensmätningssystem, RF-Oculus, utvecklats på FOI. En bild på mätsystemet visas i Figur 9. Inriktningen har initialt varit att mäta interferenser på det civila GNSS-bandet L1. Systemet är dock byggt så att det går att modifiera för mätning vid andra frekvensband.

Vid interferensmätningar i GNSS-bandet är alla signaler över en viss tröskelnivå störningar eftersom GNSS-signalen är svagare än det termiska bruset. I de flesta andra frekvensband är dock radiosignalen starkare än bruset. För att endast spara data om interferenser behövs ett sätt att skilja på nyttsignaler och interferenser. Det är dessutom önskvärt att kunna klassificera olika typer av interferenser, bland annat i syfte att härleda orsaken till oönskade störningssignaler. För dessa syften har en algoritm för maskininlärning utvärderats med lovande resultat [1].

3.1 Beskrivning av RF-Oculus

Grundläggande för övervakningssystemet är att det bör vara automatiserat, portabelt och gärna utvecklat till en låg kostnad. En fördel är även om det bygger på modulär teknik med hårdvara som kan programmeras mjukvarumässigt för de olika behov som uppstår. Övervakningssystemet bör kunna klassificera och rapportera elektromagnetiska interferenser kontinuerligt inom ett visst frekvensband.



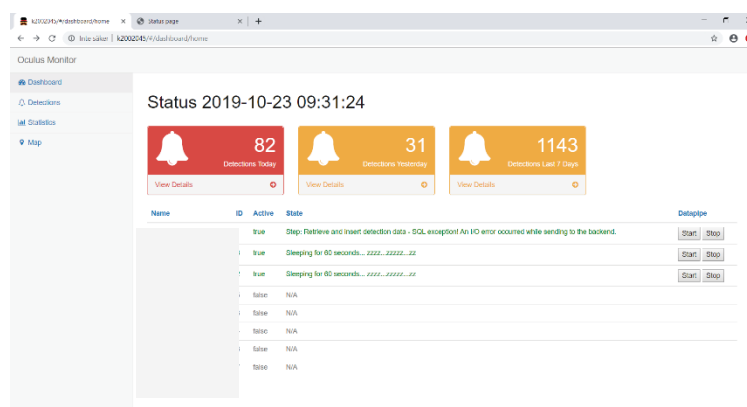
Figur 9 RF-Oculus, 20x30x11 cm.

Detektionssystemet som har tagits fram på FOI är baserat på mjukvarudefinierad radio vilket gör systemet flexibelt och kostnadseffektivt. RF-Oculus började utvecklas 2014 och har fram till idag testats i olika miljöer för detektion av interferenser i det civila GNSS-bandet. En version av systemet har provats för ISM¹-bandet på 433 MHz för detektion av interferenser i bandet [11]. Inom bandet finns en rad tillämpningar, bland annat tjänster för trådlösa nycklar till personbilar, fjärrmanövrerade kranar, inbrottslarm och styrning av strömbrytare i hemmiljö.

Med en mindre anpassning av mjukvara och antenn kan RF-Oculus användas för att mäta elektromagnetiska interferenser för en mängd olika frekvensband mellan 70 MHz och 6 GHz.

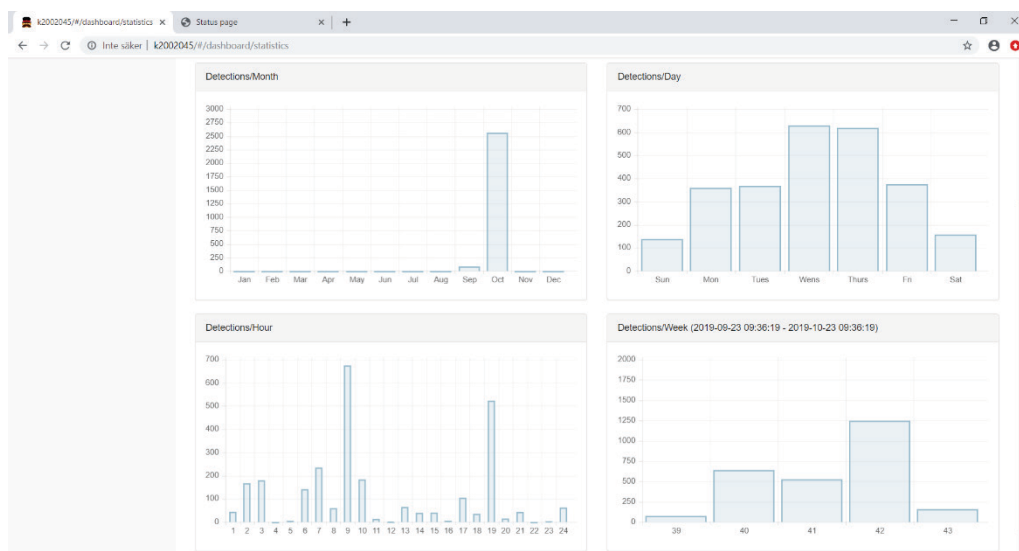
Systemet kan placeras ut och autonomt logga tidpunkter och effektnivåer för störningsincidenter som förekommer. Dessa lagras internt, och efter avslutad mätperiod kan detektionerna analyseras. Dessutom kan en RF-Oculus-nod kopplas upp via en trådlös 3G/4G-förbindelse eller en fast Ethernet-anslutning, för att föra över data eller uppdatera mjukvaran. Flera noder kan även anslutas till en server som lagrar information om detektioner på en central databas. Ett webbgränssnitt är framtaget för att enkelt kunna studera och bedöma insamlade detektioner från databasen, se Figur 10, 11 och 12.

Detektionssystemet kan också användas mobilt i exempelvis fordon eller fartyg för att undersöka ett större geografiskt område och kartlägga dess interferensmiljö. Med kännedom om verksamheten som bedrivs på mätplatsen, är resultaten från RF-Oculus värdefulla för att kunna identifiera och bedöma interferenskällorna.

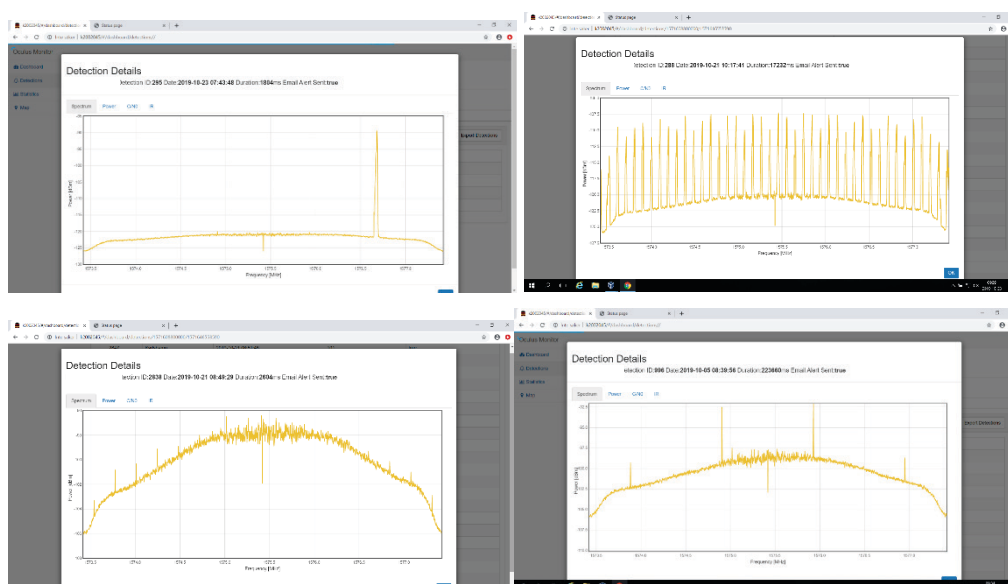


Figur 10 Web-gränssnitt för RF-Oculus med översiktsbild över det totala antalet detektioner och även vilka noder som är aktiva.

¹ ISM: Industrial, Scientific and Medical, och är ett licensierat frekvensband.



Figur 11 Gränssnitt som visar fördelningen av detektioner över månader, veckodagar, tidpunkt och vecka.



Figur 12 Exempel på spektrum för olika detektioner.

3.2 AI för klassificering av interferenser

För att kunna skilja på interferenser och radiosändningar i flygradiobandet har tidigare en metod utvärderats [11]. Metodens strategi var att upptäcka flygradiosändningarna för att utesluta dessa och sedan analysera kvarvarande delar. Metoden baserades på en IR-detektor (IR = Impulsiveness Ratio) som är uppbyggd av två standarddetektorer (en RMS och en AVG-detektor). Den föreslagna metoden hittar flygradiosändningarna med en detektionssannolikhet på över 99 % och en falsklarmssannolikhet mycket nära 0 %. En nackdel med metoden är att den har svårt att skilja på vissa typer av interferenser, så för att kunna klassificera flera olika störningssignaler är nästa steg att komplettera IR med ytterligare mått. Därför undersöks även klassificering med hjälp av artificiell intelligens (AI).

Metoden k -Nearest Neighbors (k -NN) har provats för att testa automatisk klassificering av olika signaler. k -NN är en metod för maskininlärning, vilket är en delmängd av alla AI-metoder som finns. k -NN är en mångsidig och robust metod som ofta används vid jämförelser med andra mer komplexa metoder. Algoritmen tar ett majoritetsbeslut från de

k mest lika instanserna till en observation. Likheter definieras av ett avståndsmått mellan två punkter. Ofta används det Euklidiska avståndet som avståndsmått och så även i vårt fall.

Målet med klassificeringen är att kunna skilja AM-sändningar i flygradiobandet från interferenser och att kunna klassificera olika typer av interferenssignaler. Interferenserna klassificeras som någon av följande typer:

- Bredbandigt brus (AWGN - Additive White Gaussian Noise)
- Bärkvåg (CW - Continuous wave)
- Middleton Class A
- Frekvensmodulerad signal (FM - Frequency Modulation).

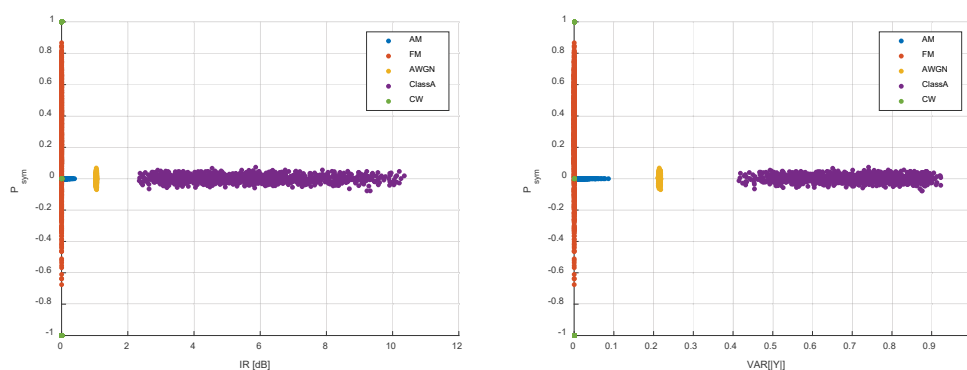
De tre första signaltyperna är vanligt förekommande interferenstyper. FM används i frekvensband som angränsar till flygradiobandet och är därför intressant att inkludera i analysen. Middleton Class A är en generell modell där parametrarna kan väljas så att signalen varierar alltifrån AWGN till en rent impulsaktig signal. För att kunna klassificera signalerna behövs olika mått för att kunna särskilja signalerna från varandra. För klassificeringen används följande statistiska mått (eng. features):

- Symmetri för spektrum (P_{sym}) runt bärvågsfrekvensen för AM-signalen
- Impulsivens Ratio (IR)
- Variansen av absolutvärdet för mottagen signalnivå ($\text{VAR}[|Y|]$)

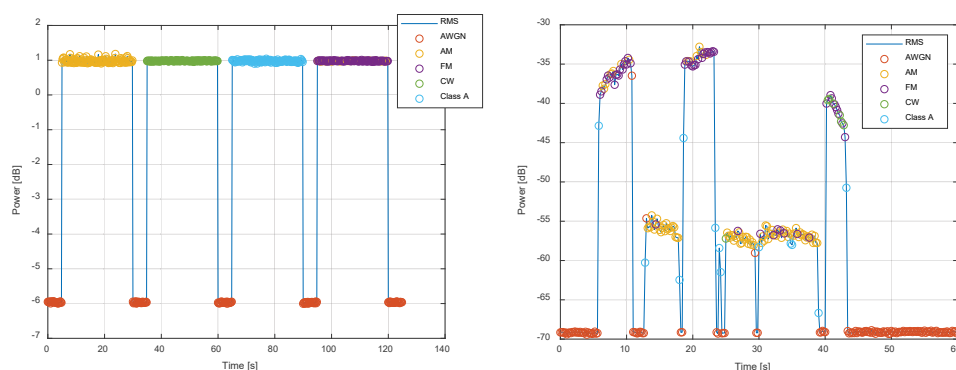
För att träna klassificeringsalgoritmen används träningsdata där signaltyperna är kända. I Figur 13 visas hur de olika måtten särskiljer de olika signaltyperna. I den vänstra bilden med IR syns också varför måttet har svårigheter att skilja på AM, FM och CW då de har liknande värden.

Efter träningen av algoritmen utvärderas den med två olika typer av datamängder. Först med syntetiska signaler skapade i Matlab med olika SNR och sedan med en inspelad AM-sändning i flygradiobandet. Figur 14 visar de två olika signalerna för utvärdering, till vänster de syntetiska signalerna och till höger den inspelade flygradiosändningen. Syntetiska data är uppdelat i fyra 30-sekundersdelar, där varje del börjar med 5 sekunder brus följt av 25 sekunder signal av typerna AM, CW, Class A och slutligen FM.

Med syntetiska data utvärderas algoritmen för SNR på 5 och 10 dB. För godtagbar kvalitet för en AM-signal krävs ett SNR på minst 7-10 dB. I Figur 14 är SNR 5 dB vilket är ett krävande fall för själva kommunikationen i sig, vilket algoritmen vid en snabb anblick ser ut att ha klarat bra. Vid en närmare granskning visar det sig dock att 23 % av FM-signalerna är felaktigt klassificerade som AM, vilket förklaras av att signal-enveloppen får



Figur 13. Måtten P_{sym} och IR för de olika signaltyperna i träningsdata till vänster, respektive P_{sym} och $\text{Var}[|Y|]$ till höger.



Figur 14. Signaler för utvärdering av algoritmen, till vänster syntetiska signaler och till höger en inspelad AM-signal.

en större varians vid lågt SNR. Då SNR är 10 dB minskar sannolikheten för felklassificering till 8 %. När erforderligt SNR för god AM-kommunikation är uppfyllt så presterar algoritmen således bra resultat.

Vid utvärderingen av den uppmätta AM-signalen så klassificerar algoritmen frånvaron av signal som AWGN och den största delen av signalen som AM. Det finns dock delar av AM-signalen som klassificeras som FM. Några felkällor kan vara att några av måtten skiljer sig för mycket från träningsdata, att det inte är något tal under sändning på delar av tiden vilket innebär att signalen liknar FM, samt att bärfrekvensen estimeras fel och symmetrimåttet blir förvanskat. Att enstaka sampel klassificeras fel är inte så allvarligt om merparten klassificeras rätt och detta skulle kunna hanteras genom ytterligare justeringar av algoritmen.

Metoden visar på lovande resultat men behöver finjusteras in ytterligare för att hantera uppmätta signaler. Det är även möjligt att det finns andra algoritmer eller mått som är lämpliga att använda för klassificering, speciellt om fler frekvensband och modulationsformer ska kunna hanteras.

3.3 Sammanfattning

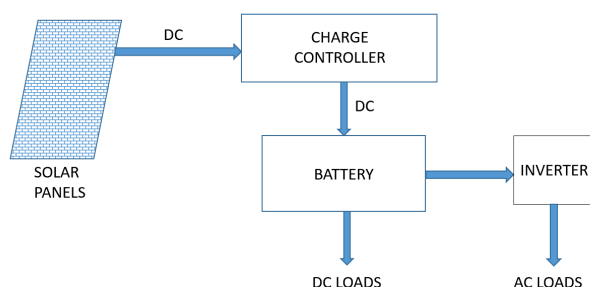
RF-Oculus är ett portabelt störningsmätssystem som hittills främst har använts främst för GNSS-bandet, men även i ISM-bandet vid 433 MHz. Detektionssystemet kan användas i flera möjliga applikationer och frekvensbandet kan relativt enkelt justeras för att mäta andra frekvensband, exempelvis de frekvensband som FM använder.

För att kunna skilja på olika typer av interferenssignaler har en AI-algoritm utvärderats både för syntetiskt data och uppmätta signaler i flygradiobandet. Resultaten är lovande och visar att metoden kan vidareutvecklas ytterligare för att få högre precision i klassificeringsalgoritmerna.

4 Påverkan från solceller

Att använda solpaneler för elförsörjning har blivit allt mer vanligt och har många fördelar, det finns dock farhågor om att interferenser från solceller kan störa känsliga kommunikationssystem i närheten. Elsäkerhetsverket har genomfört mätningar [12] i en solcellspark där det framförallt visade sig att det fanns störningar i kortvågsbandet som bland annat används för militär kommunikation. Även lågfrekventa störningar i frekvensområdet 10 – 150 kHz har uppmätts och publicerats, se mer under kapitlet 6.1.1 EMC Europe 2018.

Inom EU genomfördes 2014 en marknadsundersökning [13] av växelriktare för solcellssystem, där det visade sig att endast en tredjedel av utrustningarna uppfyllde emissionsstandarden EN 55011². Växelriktarna sköter omvandling mellan likström och växelström, men är endast en del av hela solpanelssystemet som visas översiktligt i Figur 15. En annan del i systemet som kan ge upphov till störningar är de optimerare som sitter nära panelerna och som styr systemet för att vara så effektivt som möjligt.



Figur 15. Schematisk översikt över ett solcellssystem.

För närvarande finns det ingen speciell standard för växelriktare för just solcellssystem. Detta har lett till att de har klassificerats olika, exempelvis som hushållsapparater, ISM-utrustning eller IT-utrustning och hänvisningar till deras specifika standarder har gjorts. Detta har lett till att i EU har standarderna EN 55014, EN 55011, EN 55022 eller de generella standarderna EN 61000-6-3 och EN 61000-6-4 använts. Ytterligare en komplikation är att för frekvenser under 30 MHz saknas krav på utstrålad fältstyrka för civila emissionsstandarder. Detta är ett problem för militär kortvågskommunikation i frekvensbandet 1-30 MHz speciellt eftersom det kan förekomma starka interferenser där.

FOI genomför på uppdrag av FMV mätningar på solcellssystem för att undersöka hur den elektromagnetiska miljön påverkas av solceller. Eftersom dessa mätningar är pågående används tidigare framtagna skattningar av emission för att analysera vilken påverkan solceller kan ha på närbelägna radiomottagare. Även mätningar gjorda av Elsäkerhetsverket har använts. Två olika frekvensband har analyserats, dels kortvågsbandet och dels flygradiobandet [5] [4]. Analyserna har genomförts med hjälp av telekonfliktverktyget GENESIS.

4.1 Kortvågskommunikation

Militär kortvågskommunikation har flera fördelaktiga egenskaper, bland annat den långa räckvidden för såväl markvåg som rymdvåg. Kortvågskommunikation kräver ingen särskild infrastruktur och kan därmed vara det enda alternativet om man inte har tillgång till satellitkommunikation. I militära tillämpningar är det därför en viktig förmåga. För att

² EN 55011 är en standard inom EU gällande "Högfrequensutrustningar för industriellt, vetenskapligt och medicinskt bruk (ISM-utrustning) - Radiostörningar - Gränsvärden och mätmetoder"

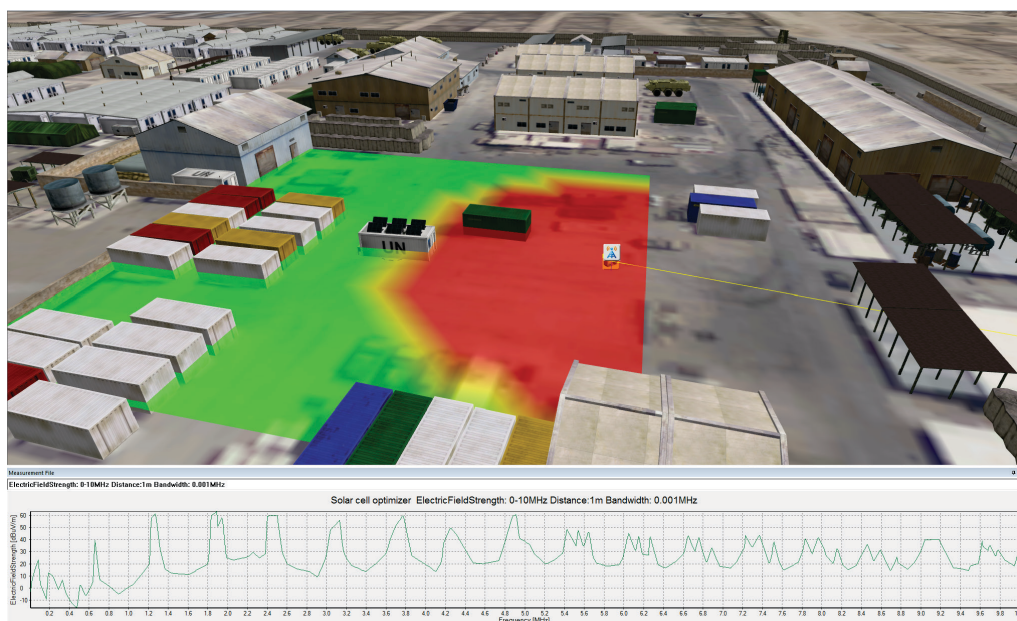
analysera påverkan från ett solcellssystem analyseras en kortvågsmottagare av typen HF 2000 som skickar data enligt standarden MIL-STD-188-110B.

I en praktisk situation finns det många interferensskällor och varje källa kan beskrivas av en motsvarande brusfaktor i radiomottagaren. I mottagaren adderas signalerna från bakgrundsbruset och interferenser till det interna bruset i mottagaren. Vi antar att mottagaren i sig har en brusfaktor på 15 dB. Om det är mycket bakgrundsbrus runt mottagaren kan det anses motsvara ITU-kategorin "City" [14]. För en frekvens på 4 MHz innebär det en brusfaktor på 60 dB, dvs. mycket högre än det interna mottagarbruset.

Vid mätningar [12] av Elsäkerhetsverket uppmättes en fältstyrka på 60 dB μ V/m på en meters avstånd från en optimerare på en solcellspanel. I botten på Figur 16 kan man se att fältstyrkan varierade med frekvens och detta var ett av de högsta värdena och uppmättes på frekvensen 3,77 MHz med en Peak-detektor i 1 kHz bandbredd.

Eftersom peak-värdet anger det högsta värdet under mätningen kan det skalas ner för att motsvara ett RMS-värde för den interfererande signalen om den antas vara en AWGN-signal. Om signalen däremot är en smalbandig signal är peak- och RMS-värdet samma. Om avståndet mellan solcellerna och mottagaren är 10 meter motsvaras interferensen av en brusfaktor på 86 dB om signalen var bredbandigt vitt brus eller 93 dB om det var en smalbandig signal. Jämfört med bakgrundsbruset som motsvarade 60 dB innebär det en väsentlig ökning. Även för ett separationsavstånd på över 50 meter är interferensen starkare än bruset. Förhoppningsvis är dessutom brusmiljön lägre än "City"-kategorin på en mottagarplats för kortvågskommunikation vilket gör skillnaden ännu större mellan brus och interferens.

Interferenser kan också ge upphov till en minskning av räckvidden för radiosystemet. I Tabell 1 visas påverkan på kommunikationsräckvidden från bredbandiga (AWGN-approximation) och smalbandiga (CW-approximation) interferenser. Resultaten är framtagna för kommunikation med markvåg. Även kommunikation med rymdvåg påverkas negativt av interferenser med det är svårt att se som en förlust av räckvidd. Eftersom nivån på störningen varierar mycket med frekvens, visas i tabellen exempel för tre frekvenser mellan 3 och 4 MHz med olika interferensnivå. Från 20 meters avstånd påverkar den lägst uppmätta värdet knappt räckvidden medan det högsta värdet kan leda till att räckvidden minskat till 25 % av ursprunglig räckvidd.



Figur 16. Exempel på riskområde kring en HF 2000 mottagare för en solcellspanel som strålar 60 dB μ V/m. Bild från GENESIS.

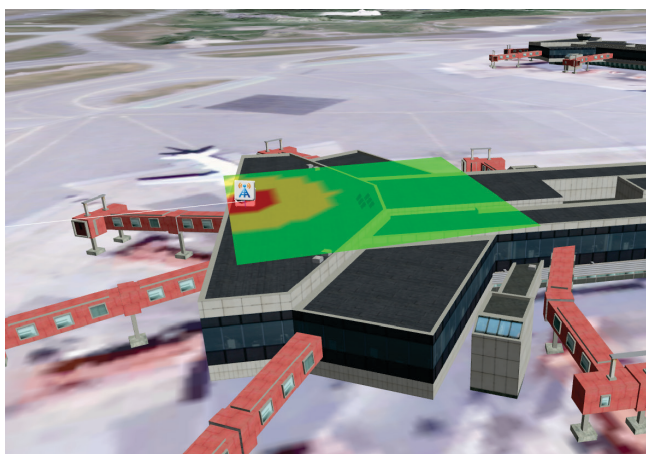
Tabell 1. Kommunikationsräckvidd för ett separationsavstånd på 20 meter.

Frekvens [MHz]	Interferens [dBμV/m]	Kommunikationsräckvidd	
		<i>AWGN-approximation</i>	<i>CW-approximation</i>
3.5	20	100%	99%
3.64	40	89%	70%
3.77	60	37%	25%

4.2 Flygradiokommunikation

Kommunikation mellan flygplan och flygledningen i tornet på en flygplats sker via analog radio med en amplitudmodulerad (AM) signal. Flygradio har i allmänhet lång räckvidd då flygplanen befinner sig på hög höjd och har fri sikt till tornet. Om det finns starka interferenser i närheten av radiomottagaren så förkortas räckvidden för systemet. I en specifik situation kan riskområdet för placering av solcellspaneler illustreras som i Figur 17.

Publicerade mätdata från komponenter till solpaneler har visat nivåer som tangerar emissionsstandarden EN55022 Class B. Om interferenser från solceller precis uppfyller kravet i emissionsstandarden EN 55022³ Class B så motsvarar det en brusfaktor i mottagaren på 44 dB på tre meters avstånd. Som jämförelse har kategorin "City" enligt ITU-R P.372-8 en brusfaktor på 20 dB för den valda frekvensen på 118 MHz. ITU-kategorierna är tänkta att beskriva olika miljöer med bakgrundsbrus, där "City" är den med högst brus. För att interferensen ska vara i nivå med bruset behövs ett avstånd på 50 meter mellan radiomottagaren och solcellerna. Om interferensen istället består av en smalbandig signal så behövs större avstånd. Om radiomottagaren från början befinner sig i en mottagningsmiljö med mindre bakgrundsbrus så behöver interferenserna från solcellerna vara lägre för att inte försämra situationen eller så har man i den situationen större marginal att hantera interferenser



Figur 17. Illustration av riskområde för placering av solceller i närheten av en mottagare. Bild från GENESIS.

³ EN 55022 är en standard inom EU för "Utrustning för informationsbehandling - Radiostörningar - Gränsvärden och mätmetoder"

4.3 Sammanfattning

Slutsatsen är att försiktighet bör iaktas vid placering av solceller i närheten av radiomottagare då emissioner från dem kan försämra mottagningen. Dessutom är det en god idé att kontrollera att solcellssystemet uppfyller de emissionskrav som finns, vilket tyvärr inte alltid verkar vara självklart då flera system inte uppfyllt gällande standard.

5 OFDM och CW-störningar

I det här kapitlet visas prestandapåverkan då en störningssignal bestående av en eller flera CW-signaler stör ett OFDM-system. OFDM-systemet har liknande parametrar som används i 5G New Radio (NR). Arbetet som beskrivs i det här avsnittet är en fortsättning på den del i [15] som avser OFDM och CW-störningar. Fokus i det här arbetet har varit att undersöka metoder som begränsar CW-störningens effekt i syfte att förbättra prestanda i 5G NR OFDM-system.

Både [15] (5G NR) och [8] (LTE) visar prestandapåverkan för OFDM-system utsatt för CW-störningar. För att resultaten skulle vara jämförbara valdes bl.a. modulationsmetoden 64-QAM vilket är en av modulationsmetoderna som används på underbärvågor vilka bär användardata. Detta gäller både för 5G NR och LTE. Antalet underbärvågor skiljer dock mellan systemen då LTE använder 1200 och 5G NR 3300. Dessutom används olika felrättande koder, 5G NR använder LDPC-kod medan LTE använder Turbokod.

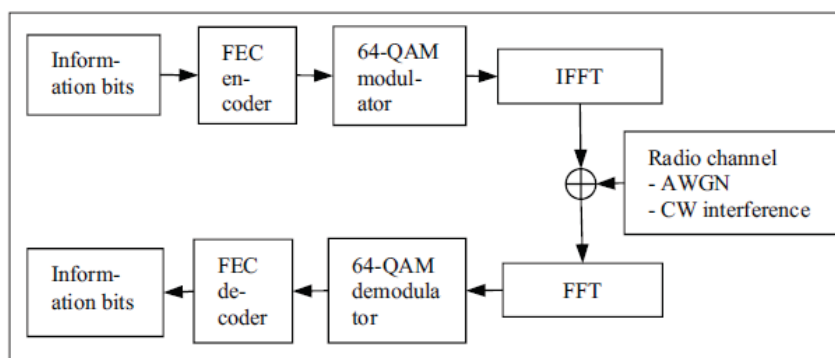
Generella slutsatser från analysresultaten i [8] och [15] är:

- Bitfelssannolikheten (BEP) för en AWGN-störning spridd över alla underbärvågor är högre än för fallet då störningen består av en CW-signal med samma totaleffekt som den spridda AWGN-signalen. Detta gäller under förutsättning att E_b/N_1 (E_b är bitenergin och N_1 störningens spektraltäthet) är lägre än ett tröskelvärde som beror på den felrättande koden. För E_b/N_1 som överstiger detta tröskelvärde är BEP för CW-störningen istället högre än BEP för AWGN.
- En CW-signal som stör på en frekvens mellan frekvenserna för två underbärvågor bredvid varandra kan under vissa förutsättningar orsaka mer prestandaförsämring än en CW-signal med samma frekvens som en av underbärvågorna.

En generell slutsats är att ju fler underbärvågor som utsätts för CW-störning desto mer lika blir BEP för CW-störning och AWGN. Detta stämmer bäst för fallet då CW-signalernas frekvens sammanfaller med underbärvågornas.

5.1 Modell av OFDM-systemet

Detta avsnitt syftar till att ge en översiktlig beskrivning av kommunikationsmodellen för simuleringarna av 5G NR, se Figur 18 där ett blockschema presenteras. Maximalt kan 3300 underbärvågor av 4096 bära information i OFDM-strukturen. Informationen genereras i blocket *Information bits* för att sedan kodas med den felrättande koden LDPC i *FEC encoder*. Därefter moduleras den kodade informationen på varje underbärvåg i blocket *64-QAM modulator* för att slutligen genomgå en invers FFT, *IFFT*. I modellen adderas störningssignalerna, bredbandigt AWGN-brus eller CW, till OFDM-signalen på kanalen i blocket *Radio channel*. Efter kanalen tar mottagaren emot signalen och efter FFT-blocket demoduleras den i *64-QAM demodulator*. Efter demoduleringssteget avkodas informationen i *FEC decoder*. Prestandamåttet bitfelssannolikhet, BEP, beräknas genom att jämföra mottagna informationsbitar med de genererade. Modellen antas ha perfekt synkronisering i tid och frekvens och därför behövs inga pilottoner.



Figur 18 Blockschemat över använd kommunikationsmodell för simuleringar av ett OFDM-system.

5.2 Störning bestående av CW-signaler

Då systemet störs av flera CW-signaler ser den resulterande störningssignalen olika ut beroende på om CW-signalerens frekvenser ligger exakt på en underbäravågs centerfrekvens eller på en frekvens mellan två underbäravågor. En CW-störning kan i värsta fall helt förstöra ortogonaliteten mellan underbäravågorna. När CW-signalen ligger exakt på en underbäravågs centerfrekvens stör CW-signalen intilliggande underbäravågor så att ortogonaliteten i OFDM-strukturen inte påverkas. Hur CW-signalen stör i frekvens anges med α , vilket är frekvensseparationen relativt till frekvensen på störd underbäravåg. CW-signaler med frekvensseparationen $\alpha=0$ leder inte till att störningseffekten sprids över flera underbäravågor utan störningseffekten ligger enbart på störda underbäravågor. Däremot sprider CW med $\alpha \neq 0$ störeffekten vilket kan orsaka höga prestandaförluster, speciellt vid låga signal-till-interferensförhållanden. Detta beskrivs i detalj i [8] där prestandapåverkan i LTE för ett OFDM-system utsatt för CW-störning analyserades.

5.3 Reducering av CW-störning

Även om OFDM-system anses vara robusta mot impulsaktiga interferenser kan sådana störningar orsaka väsentliga prestandaförsämringar. För att reducera sådana försämringar har arbetet inom telekonfliktprojektet fokuserat på frågan om resultaten i avsnittet ”CW-störningar och LDPC-kod” i [15] kan förbättras med interferensreducering.

5.3.1 Metod för reducering av interferenser

En teknik för att begränsa interferensers inverkan på en OFDM-signal är klippning som garanterar att effekten inte överstiger en viss vald tröskelnivå. För bästa resultat är valet av värde för tröskelnivån angörande som, i vissa fall, dessutom måste vara adaptivt.

Klippningsfunktionen har implementerats i simuleringsmodellen som visas i Figur 18. Det behövs tre olika klippningsfunktioner beroende på om störningssignalen består av en eller flera synkroniserade CW-signaler.

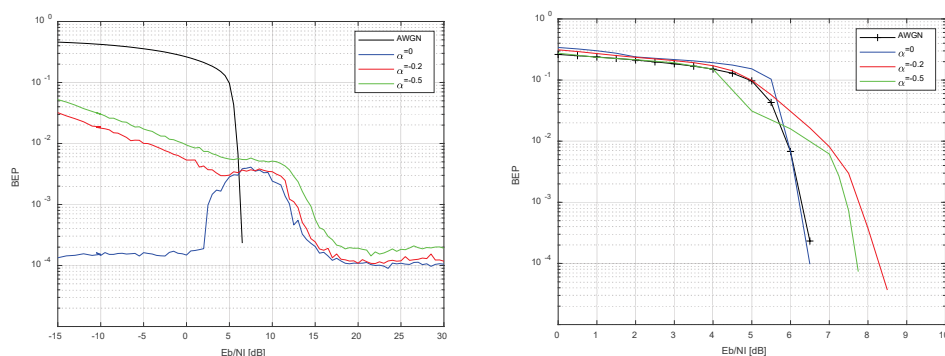
Reduceringen sker på följande sätt:

- Klippning i tidsdomänen av mottagen komplex basbandssignals envelopp innan FFT.
- Klippning i frekvensdomänen av komplex basbandssignals envelopp efter FFT.
- Klippning av den demodulerade signalens log-likelihood kvot (LLR) som är ett kvalitetsmått på mottagarens demodulerade symboler per underbäravåg. LLR begränsas för att undvika mycket höga och låga värden

Vid störning med flera CW-signaler används klippning enligt A och vid störning med en CW-signal används två klippningsfunktioner, B och C.

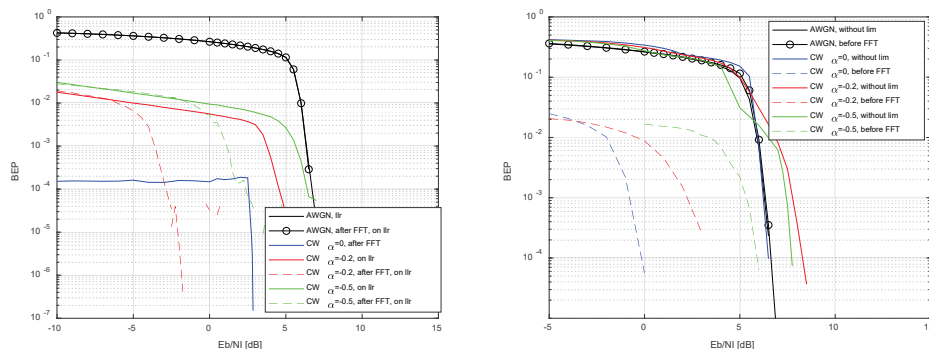
För fallet då störningen består av en CW-signal används klippfunktionen B, dvs. efter FFT-blocket i mottagaren då OFDM-tidsdomänssignalen spridits över alla underbärvägar. Tröskelvärde som används vid klippningen är $\sqrt{7/3}$, vilket är den högsta amplituden för 64-QAM-modulerade symboler för signaleffekten 1 W. Denna klippning kan inte reducera CW-störningen helt och ytterligare klippning kan behövas. Därför begränsas även LLR-informationen ut från demodulatoren, dvs. reducering enligt C ovan. OFDM-symbolerna med den begränsade LLR-informationen avkodas sedan med LDPC-avkodaren. Tröskelvärde för klippning C är ± 6 , vilken visade sig ha en försumbar påverkan på prestandamåttet BEP för fallet då interferensen är en AWGN-störning.

5.3.2 Resultat



Figur 19 BEP som funktion av E_b/N_i för systemet utsatt för AWGN och CW med frekvensseparationen α från störd underbärväg. Till vänster visas BEP för en CW och till höger BEP för ett flertal synkroniserade CW-signaler [15].

I Figur 19 visas BEP för fallet utan reducering av CW-störning [15]. I [2] visas därutöver även prestandavinster erhållna med klippning.



Figur 20 BEP som funktion av E_b/N_i då klippning används på störningen. Till vänster ses BEP för en CW och till höger för flera CW.

I Figur 20 visas resultatet då klippning används. I fallet då störningen består av en CW används klippning enligt C (på LLR-signalen) eller så används klippning med både B (efter FFT) och C. Enbart klippning med C ger en väsentlig förbättring och resulterande BEP är lägre än för AWGN vid alla E_b/N_i . Dessutom ses en stor skillnad vid jämförelse med BEP för fallet utan klippning, se Figur 19. För en CW-signal med $\alpha=0$ och klippning med B och C, uppstår inga bitfel. Vidare, för $\alpha=0.2$ och vid ett BEP på 10^{-4} , skiljer det 10 dB mellan CW och AWGN i E_b/N_i .

När störningssignalen består av flera synkroniserade CW-signaler, se resultatet till höger i Figur 20, utförs klippning enligt A (innan FFT-steget). För jämförelse visas även BEP för fallet utan klippning. Klippning enligt A har valts eftersom klippning enligt B inte reducerade störningsnivåerna tillräckligt mycket. När prestanda i form av BEP för fallen

med och utan klippning jämförs ses att klippningen ger en avsevärd förbättring av BEP. Bäst resultat erhålls då $\alpha = 0$. Ett α på 0 orsakar inte att störeffekten sprids över omgivande underbärvågor och därmed reduceras störningen mer. När resulterande BEP på CW-signalen med $\alpha=-0.5$ jämförs med BEP för CW med $\alpha=-0.2$ ses att klippningen inte är lika effektiv för $\alpha=-0.5$ jämfört med $\alpha=-0.2$. Exempelvis, för ett BEP på 10^{-4} och CW-signaler med $\alpha=0$, är skillnaden i E_b/N_f mellan CW och AWGN cirka 6 dB. BEP för de klippta CW-signalerna är avsevärt lägre än för AWGN.

5.4 Sammanfattning av resultat

Prestandapåverkan av CW-störningar i ett OFDM-system skiljer mycket beroende på om störningen består av en eller flera CW-signaler. Genom att använda metoder för att reducera störningseffekten kan prestanda för OFDM-systemet väsentligt förbättras. I fallet med en CW-signal kan reduceringen medföra att påverkan på systemet helt uteblir. Reduceringen fungerar bäst då störningseffekten inte sprids på omgivande underbärvågor.

6 Omvärldsbevakning

Inom projektet sker även en omvärldsbevakning av intressant utveckling inom telekonfliktområdet. I detta kapitel beskrivs några besökta konferenser med intressant innehåll och utvecklingen inom Dynamisk Spektrumaccess, Telekonfliktaspekter för IoT samt området Artificiell Intelligens och EMC.

6.1 Konferenser

Inom området telekonflikter och EMC finns några vetenskapliga konferenser med intressant innehåll. Resultat från projektet har presenterats på EMC Europe 2018 och 2019 och även på HF 19. Dessa konferenser beskrivs översiktligt tillsammans med ett urval av konferensbidrag med intressant innehåll.

6.1.1 EMC Europe 2018

EMC Europe 2018 genomfördes i Amsterdam, 27-30 augusti. EMC Europe är den ledande europeiska EMC-konferensen och samlade denna gång över 500 besökare. Konferensen hade även tutorials och workshops inom olika teman, vilket erbjöd fortbildningsmöjligheter för deltagarna. Stora teman med flera muntliga sessioner var Automotive, Aerospace, Reverberation chambers, Shielding samt Antennas and Co-Site Interference. Communication systems hade en muntlig session denna gång. Endast 3 svenska bidrag fanns med på konferensen, ett från FOI och två med huvudförfattare från Luleå tekniska universitet. FOI-bidraget var:

- K. Fors, K Wiklund, S. Linder, "Interference Impact on Two of LTE's Control Channels"

I bidraget undersöks hur två kontrollkanaler i LTE (Long Term Evolution) är känsliga för oavsiktlig elektromagnetisk emission med nivåer enligt EN 55022, klass B. Kontrollkanalerna var dels den primära synkroniseringssekvensen i nedlänken, dels kontrollkanalen för det fysiska lagret i upplänken. Resultaten visar att kontrollkanalen på upplänken är mer känslig för störningar och kan påverkas vid samlokaliseringsavstånd upp till 100 meter från basstationen. Synkroniseringssekvensen för nedlänken är mer robust och påverkas först vid betydligt kortare samlokaliseringsavstånd till en enskild mobil.

Övriga två svenska bidrag var:

- Hartman et al, "PEEC Models of Printed Antennas in Condition Monitoring Applications Covered by Dielectrics with Temperature-Dependent Permittivity"
- Ekman et al, "A Simulink implementation of the Delay-Rational Green's-Function-based Method for Multiconductor Transmission Lines".

Frågan om vilka emissionskrav som krävs för att få en god radiomiljö på markfordon belystes i bidraget:

- Alain Alcaras, "EMC Performances of a Land Army Vehicle to Respect Integrated Radios Reception Sensitivity: Typical Performances Needed for "Fitted For Radio (FFR)" Land Vehicle".

Författaren som kom från Thales undersökte vilka EMC-krav man behöver ställa på ett markfordon för att kunna klassificera det som "Fitted for Radio (FFR)". Somliga tillverkare anser sig kunna hävda FFR om ett fordon's ingående system uppfyller standarderna AECTP 501 eller MIL-STD-461. Den övergripande slutsatsen, som även stämmer med Thales praktiska erfarenheter, var att det inte räcker med att någon av dessa standarder är uppfyllda. Ytterligare nödvändiga krav är

- att fordonet är kvalificerat enligt standardiseringsprocessen AECTP 507 och där emissionsgränserna måste fastställas baserat på ingående radiosystems prestanda

- att fordonets utrustning måste uppfylla NRE02 i AECTP 501, med gränsvärden anpassade till aktuella ingående radiosystem
- att fordonet klarar test enligt NCE05 i AECTP 501
- att kabellängder är så korta som möjligt samt att utanpåliggande kablage på fordonet måste vara skärmat.

Författaren hade även jämfört räckviddspåverkan för ett VHF-system (50W, 30-100 MHz, fordonsantenn) som samlokaliseras på en meters avstånd från en utrustning som uppfyller NRE02 (motsvarar RE 102) respektive EN 55022. För NRE02 så blev räckviddminskningen 68% och för EN 55022 blev den hela 99%.

Radiostörningar från LED-lampor (Light-Emitting Diode) har uppmärksamats under ett antal år. Japanska forskare har gjort flera publikationer inom detta ämne och så även vid denna konferens. En anledning till intresset för LED-lampor bland dessa forskare är att efter jordbävningen 2011 med efterföljande tsunami och kärnkraftshaveri i Fukushima så propagerade man av energisparskäl för ökad användning av lågenergilampor av LED-typ. Då uppmärksammades samtidigt en ökning av radiostörningar från dessa lamptyper, vilket har lett till flera forskningspublikationer från japanska forskare om detta. Ett exempel denna gång var bidraget

- Sazy Arie et al, "Statistical Characteristics of Radiation Noise from LED Lamps and Its Effect on Wireless Medical Telemeters".

Författarna hade undersökt störningsrisker mellan LED-lampor och medicinska telemetri-tillämpningar. I Japan används frekvensområdet 420 – 450 MHz för medicinsk telemetri. Vissa typer av LED-lampor har visat sig kunna emittera strålade störningssignaler vid dessa frekvenser, varför författarna analyserat störningsrisker med just telemetri. Slutsatsen var att de LED-lampor som undersökts kan störa dessa telemetrisystem.

Ett bidrag undersökte lågfrekventa ledningsbundna störningar från solpaneler:

- András Mohos et al, "Emission measurement of a solar park in the frequency range of 2 to 150 kHz".

Ledningsbundna störningar hade mätts på en solpanelpark i frekvensområdet 2 – 150 kHz. Mätning gjordes både med strömprobe och genom direkt mätning av spänning på ledningarna. Störningar med spänningsnivåer upp till 120 dB μ V uppmättes vid frekvenserna 16 och 19 kHz (ca) på flera mätpunkter i systemet. Motsvarande övertoner (32 respektive 38 kHz) hade nivåer på 100 - 110 dB μ V. Mätbandbredden var 300 Hz vid samtliga mätningar. De störningssignaler som alstrades av optimerarna verkade flyta mellan optimerarna utan att ta sig ut ledningsbundet på kraftnätet som matades från solpanelanläggningen. Då det saknas fastställda emissionsnivåer i civila standarder för frekvenser <150 kHz så jämförde författarna mätresultaten genom att extrapolera värdet på 79 dB μ V som gäller för EN 55011 vid 150 kHz.

6.1.2 HF 19 – Nordic Conference of HF Communications

En konferensserie inom HF-kommunikation startades 1986 när HF 86 hölls i Sverige. Sedan dess har det internationella intresset växt när det gäller konferensbidrag, utställningar och deltagare. Den trettonde upplagan av konferensen hölls 12-14 augusti 2019 på Fårö i Sverige. Deltagarna kom från fler än tio länder. De presenterade bidragen täckte ett brett område av HF-kommunikation och var indelade i teman enligt följande:

- Propagation and Modelling
- Propagation and Spectrum Management
- Signal Processing and Radio Protocols
- Systems and Techniques
- Antenna Systems and Cognitive Radio Systems
- User Scenarios

- User Scenarios and EMC.

HF avser i allmänhet frekvensområdet 3 – 30 MHz. Då våglängden vid dessa frekvenser är avsevärt större än typiska dimensioner på plattformar så är en grundläggande utmaning att konstruera elektromagnetiskt effektiva antenner. En fördel med frekvensområdet är att stora kommunikationsavstånd kan uppnås eftersom radiovågorna kan reflekteras i jonosfären. HF-kommunikation kan därför täcka långa avstånd utan att vara beroende av särskild kommunikationsinfrastruktur. Dessa egenskaper gör HF-kommunikation särskilt intressant i militära tillämpningar och vid olika civila krissituationer. HF-området genomgår fortfarande en stark utveckling genom exempelvis ökade datatakt, förbättrad signalbehandling och antennlösningar.

En jämförelse mellan HF-system och moderna smartphones gjordes i papperet:

- Arnie Johansen, "HF in the smart-phone age: Operational considerations of HF systems".

Författaren jämförde några egenskaper hos HF-system och smartphones och diskuterade frågan om det går, och om vi bör försöka göra HF-system mer lika smartphones. Slutsatsen var att en rad finesser i smartphones skulle kunna appliceras i design av HF-system och att det skulle göra HF-kommunikation mer attraktiv för användare.

Några bidrag var särskilt intressanta ur EMC-perspektiv. Dessa bidrag behandlade olika aspekter av elektromagnetiska störningar och HF-kommunikation. Ett papper analyserade möjligheterna att använda HF-kommunikation på små UAV:er (Unmanned Aerial Vehicle):

- Filip Enander, "On the realisability of HF communications from a very small flying platform".

Syftet var att undersöka de praktiska möjligheterna att använda HF-kommunikation för att exempelvis sända sensor- och positionsdata från en liten UAV. Slutsatsen var att spektrum och interferensfrågor blir kritiska om det ska fungera. En annan slutsats var att om man gör ett optimalt frekvensval så kan även en liten antenn användas för kommunikation med låg effekt.

Ett bidrag redovisade erfarenheter av elektromagnetisk interferens från fordon och den elektromagnetiska bakgrundsmiljön i närheten av byggnader i samband med en EU-mission i Niger:

- Torbjörn Carlsson, "Deployment of HF Radio for the European Union capacity building mission in The Republic of Niger".

I samband med att man köpte in och driftsatte ett HF-system så uppdagades en rad störningsproblem. HF-systemet skulle användas på fordon, på en bas i Niamey samt ett fältkontor. Fordonen var Toyota Landcruiser och Nissan Patrol. Störningar från Nissan Patrol kom i huvudsak från motorns tändsystem samt fläkten i luftkonditioneringssystemet. Störningar från luftkonditioneringen fanns även på Toyota Landcruiser. Båda fordonstyperna uppvisade höga störningsnivåer vid de lägre frekvenserna i HF-området. Vid basen och fältkontorsmiljön upptäcktes flera störningskällor:

- enheter för avbrottsfri kraft (UPS, Uninterruptible Power Source)
- kraftaggregat till persondatorer
- lågenergilampor
- laddningsutrustning för datorer och mobiltelefoner
- luftkonditioneringssystem.

Kommunikationssystemet använde tilldelade frekvenser i området 4 – 12 MHz. Den övergripande slutsatsen var att oavsiktliga elektromagnetiska störningar utgör ett stort hot mot HF-kommunikation i den typ av mission som det var frågan om. Man-made noise begränsade kommunikationsprestanda avsevärt. Erfarenheten var att antenner måste

placeras så långt bort från byggnader som möjligt för att minska störningsrisken. Fordonen emitterade betydande störningssignaler i HF-bandet. Kompetensen för att lösa sådana störningsproblem hos fordonsleverantören var också låg enligt författarens erfarenheter. Frekvensplanering är alltid viktig och så även i det här fallet. Frekvenser som delats ut av ansvarig myndighet var inte alltid användbara av olika skäl. Erfarenheten var att det därför är viktigt att prova och kontrollera de frekvenser som tilldelats och att försöka få tillstånd att byta om det inte fungerar som tänkt.

Två andra bidrag belyste EMC-problem orsakade av oavsiktliga störningssignaler:

- Lars Weberg, “Wireless power transfer and the interference situation in the LF-HF bands”.
- Peter Stenumgaard, Sara Linder and Henrik Olsson, “Interference impact from solar-panel systems on HF communications”.

Det första bidraget behandlade elektromagnetisk störning från trådlös laddning av fordon (eng. WPT, Wireless Power Transfer). Fokus var frekvensområdet 10 kHz – 30 MHz som täcker både LF-(Low Frequency) och HF-kommunikation

Emissionsgränser för strålad störning från WPT hämtades från flera standardiseringsdokument:

- IEC 61980-1:2015
- IEC TS 61980-2/-3
- CIS/B/678/CD
- ETSI TR 103 409
- ITU-R SM-329
- ETSI EN 300 330.

I analysen jämfördes den mottagna störningsnivån i en radiomottagare med nivån från annat mottagarbrus (man-made noise enligt ITU-nivån Residential för HF-analysen, atmosfäriskt brus för LF). Avståndet för när respektive brusnivå överskreds av störningen från WPT beräknades. Resultaten visar att betydande störningsbidrag från WPT kan förväntas både i LF- och HF-bandet. Slutsatsen var därför att dessa störningar måste analyseras noggrant inför framtida användning av WPT så att inte vitala radiobaserade tjänster samtidigt riskerar att störas ut.

Det andra bidraget sammanfattas i kapitel 4.

6.1.3 EMC Europe 2019

EMC Europe International Symposium on Electromagnetic Compatibility ägde rum 2-6 september i Barcelona, Spanien. EMC Europe är den ledande europeiska EMC-konferensen och samlade denna gång över 700 besökare. Mer än 200 bidrag från 35 länder presenterades. Fem av bidragen kom från Sverige, därav fyra från FOI och ett från QAMCOM Research & Technology AB. Konferensen hade även tutorials och workshops inom olika teman, vilket erbjöd fortbildningsmöjligheter för deltagarna.

Automotive (fordonstillämpningar) har varit stort inom EMC de senaste åren och var så även på denna konferens. Området hade fyra muntliga sessioner och fyra workshopssessioner. Ett särskilt tema “Challenges in Special Applications of Electrically Small, HF Vehicular Antennas” hade fyra workshopssessioner, så fordonstillämpningar hade därmed totalt 12 dedikerade sessioner.

Områdena “Reverberation chambers” samt “Numerical Simulation Techniques for EMC Problems” är också stora områden och hade tre muntliga sessioner var. Kommunikation rymde två muntliga sessioner med olika EMC-aspekter på främst trådlös kommunikation. Då kommunikation även är kopplat till andra oråden såsom antennteknik och avsiktlig elektromagnetisk interferens så var teknikområdet väl representerat på konferensen. Fyra av de fem svenska bidragen var inom kommunikationsområdet:

1. P. Stenumgaard and S. Linder, "Interference Impact from Solar-Panel Systems on Air Traffic Control Communications"
2. K. Wiklundh, "Understanding the IoT technology LoRa and its interference vulnerability"
3. P. Eliardsson and P. Stenumgaard, "Artificial Intelligence for Automatic Classification of Unintentional Electromagnetic Interference in Air Traffic Control Communications"
4. K. Fors, E. Axell, S. Linder and P. Stenumgaard, "On the Impact of CW interference on 5G NR"

Bidrag nr 1 analyserade störningsrisker vid samlokalisering mellan solpaneler och flygradiosystem. Analysen gjordes med hjälp av telekonfliktverktyget GENESIS, se kapitel 4.

Bidrag nr 2 analyserade störtåligheten hos IoT (Internet of Things)– tekniken LoRa. LoRa är utvecklad för kommunikation på längre avstånd med lägre datatakt, så kallade Low Power Wide Area Networks (LPWAN). LoRa är just nu den ledande tekniken inom LPWAN och tillväxten inom LPWAN bedöms som stor framöver.

Bidrag nr 3 visade på möjligheten att använda machine-learning för automatisk klassificering av uppmätta störningssignaler i flygradiobandet.

Bidrag nr 4 analyserade störtåligheten för 5G New Radio (NR) mot olika varianter av CW-störning.

I sessionen "Intentional EMI" presenterades ett bidrag som undersökte störningsskänsligheten hos den mobila tekniken LTE (Long Term Evolution):

- G. Romero et al, "EMI LTE Physical Layer Vulnerability Test to Different Types of Jamming Signals".

Författarna hade undersökt hur LTE påverkas av en störningssignal (chirp) som sveps i frekvens över 20 MHz bandbredd. I nästa steg kommer störning mot en större bandbredd att analyseras.

Det femte svenska bidraget låg inom området "Components, Semiconductors and IC":

- N. Wellander, M. Elfsberg, H. Sundberg and T. Hurtig, "Destructive testing of electronic components based on absorption cross section RC measurements"

Här presenterades en testprocedur för förstörande provning. Metoden baseras på mätning av absorption cross section (ACS) genom användning av uppmätt effekt i en modväxlad kammare.

Två muntliga sessioner låg inom temat "Human Exposure & Health Protection". Ett av dessa bidrag handlade om hälsorisker vid exponering av strålade elektromagnetiska fält från trådlös laddning av fordon (WPT):

- T. Campi, S. Cruciani, F. Maradei, M. Feliziani, "Wireless Charging of Electric Vehicles: Planar Secondary Coil Position vs. Magnetic Field"

Författarna hade gjort en analys av exponering från en WPT-källa med 7,7 kW uteffekt och med frekvens 85 kHz. Slutsatsen var att det finns risker både för människor och för medicinska implantat vid exponering från en sådan källa.

Inom temat "Statistics on EMC" presenterades ett bidrag där man gjort en undersökning av hur utrustning av typen Commercial-Off-the-Shelf (COTS) klarar emissionskrav i MIL-STD-461:

- Janne P. Pulkkinen, "Statistical Analysis of MIL-STD-461 Emission Test Reports of Commercial Off-The-Shelf Products".

I bidraget undersöktes hur COTS klarar kraven CE102 och RE102. Testrapporter från 56 utrustningar från åren 2010 – 2018 analyserades genom att göra en statistisk utvärdering

av de överskridanden som uppmäts. Produkterna kom från olika kategorier såsom LED-belysning, IT-utrustning, kraftenheter/laddningsutrustning, optronik samt radioutrrustning. Testerna var utförda på produkter för den finska försvarsmakten och mot MIL-STD-461 F/G.

Den övergripande slutsatsen var att COTS-produkterna acceptabelt uppfyller CE102 men däremot normalt inte RE102 för kategorin army ground applications. Analysen visade att majoriteten av överskridanden gentemot CE102 skedde vid frekvenser lägre än 150 kHz. Författaren framförde hypotesen att detta beror på att COTS-tillverkare inte prioriterar störningskontroll (via exempelvis filter) inom frekvensområdet 10 kHz – 150 kHz. Majoriteten av överskridanden av RE102 skedde vid frekvenser under 400 MHz. Inga överskridanden av RE102 hade skett vid frekvenser över 2,414 GHz.

6.2 Dynamisk spektrumaccess

Dynamisk spektrumaccess (Dynamic spectrum access, DSA) har diskuterats och undersökts på olika sätt i åtminstone 20 års tid. Bakgrunden är att en mer flexibel och dynamisk frekvenstilldelning skulle kunna öka nyttjandet av de frekvenser som idag allokeras statiskt. Genom att tillåta flera användare att på något mer eller mindre strukturerat sätt utnyttja frekvenser som tillfälligt inte används så skulle kapaciteten i kommunikationssystem kunna ökas och användningen av frekvensspektrum kunna förbättras.

Kognitiv radio och DSA blev ett hett ämne efter att J. Mitola och G.O. Maquire publicerade sin välkända artikel om detta år 1999 [16]. Kognitiv radio ses ofta som en nödvändig möjliggörare för att kunna genomföra DSA i praktiken. I begreppet kognitiv radio innefattas bland annat egenskapen att kunna känna av aktuellt frekvensområde och med kännedom om sitt interna tillstånd och aktuella kommunikationsbehov kunna anpassa frekvensanvändningen så effektivt som möjligt. En kognitiv radio förväntas även lära sig av tidigare erfarenheter och använda dessa för sina beslut.

Olika policies för dynamisk spektrumaccess diskuteras och här förekommer ett antal varianter från att en central spektrummäklare dynamiskt styr frekvenstilldelningen till att man tillåter användare att opportunistiskt använda uppkomna ”spektrumhål” under bivillkoret att man inte orsakar någon annan användare störningsproblem. Olika initiativ har tagits inom området under åren och nedan sammanfattas kort några aktuella aktiviteter.

European licensed shared access (LSA) är ett europeiskt initiativ för att åstadkomma delad spektrumanvändning i frekvensområdet 2300 - 2400 MHz. LSA medger ett begränsat antal användare att få tillgång till ett frekvensband som är allokerat till en permanent användare så länge alla användare garanteras en viss nivå av Quality of Service (QoS). LSA specificeras i ETSI-publikationerna:

1. “System Architecture and High Level Procedures for operation of Licensed Shared Access (LSA) in the 2300 MHz-2400 MHz band, ETSI TS 103 235 v.1.1.1, 2015.
2. Reconfigurable Radio Systems (RRS); Information elements and protocols for the interface between LSA Controller (LC) and LSA Repository (LR) for operation of Licensed Shared Access (LSA) in the 2 300 MHz - 2 400 MHz band, ETSI TS 103 379 V1.1.1 (2017-01)
3. Reconfigurable Radio Systems (RRS); System requirements for operation of Mobile Broadband Systems in the 2 300 MHz - 2 400 MHz band under Licensed Shared Access (LSA), ETSI TS 103 154 [i.1]

Arbete pågår med att undersöka möjligheterna att utöka LSA till flera frekvensband, bland annat 700 - 800 MHz och 3,6 - 3,8 MHz.

I USA pågår initiativet “Citizens Broadband Radio Service” (CBRS) där man öppnat upp det militära bandet 3550 MHz - 3700 MHz för kommersiell användning. Man har delat upp användarfallen i tre grundkategorier benämnda

- Incumbent Access,
- Priority Access,
- General Authorized Access.

Inom varje användarfall gäller olika regler för dynamiskt nyttjande av frekvenser. Wireless innovation forum (WInnForum) bildade 2015 Spectrum Sharing Committee som började utveckla tio olika grundstandarder för att kunna nyttja CBRS. Under 2018 påbörjades tester av utvecklade protokoll och testerna avslutas under 2019. Efter dessa tester har FCC (Federal Communications Commission) möjlighet att ta nästa steg och öppna upp för kommersiell användning av frekvensområdet.

En översikt över LSA och CBRS och hur det relaterar till militära behov finns i

- T. Tuukkanen, S. Yrjölä, M. Matinmikko, P. Ahokangas and M. Mustonen, "Armed forces' views on Shared Spectrum Access," *2017 International Conference on Military Communications and Information Systems (ICMCIS)*, Oulu, 2017, pp. 1-8.

I bidraget beskrivs också olika användarfall med spektrumdelning mellan militära myndigheter, blåljusmyndigheter (public safety) och civila operatörer. Beroende på användarfall kan militären antingen vara primär eller sekundär användare av spektrum. Mellan fallen fredstid, katastroftillstånd eller krigstid växlar det vilken aktör som är primär användare av spektrum. Att kunna växla primär användare av spektrum kräver ytterligare forskning och stöds inte av nuvarande tekniker. Författarna påpekar också att DSA för internt bruk inom Försvarsmakten har stor potential och behöver utredas ytterligare.

Fördelar med DSM (Dynamic Spectrum Management) för militär användning har demonstrerats bland annat i

- P. Gajewski, J. Lopatka, M. Suchanski and J. Jach, "Dynamic Spectrum Management: A perspective for Polish Armed Forces," *2017 International Conference on Military Communications and Information Systems (ICMCIS)*, Oulu, 2017, pp. 1-6.

För DSM finns två olika koncept; CDSA (Coordinated DSA) och OSA (Opportunistic SA) där den första varianten kan vara centraliserad och den andra distribuerad. Fördelar med båda koncepten visades med hjälp av två demonstratorer. Centraliserad CDSA ligger närmast i tiden medan distribuerad OSA kräver samordning och beslut på såväl nationell som internationell nivå före användning.

Inom EDA-projektet MAENA (Multi Band Efficient Networks for Ad Hoc Communications) är dynamisk spektrumhantering i fokus. MAENA syftar till att undersöka frågan om att kombinera dynamisk användning av VHF- och UHF-banden för att optimera prestanda i kommunikationsnät. Projektet löper från 2018 till 2022. Inom ramen för projektet utförs en studie av nya koncept för dynamisk spektrumhantering (DSM, Dynamic Spectrum Management), med syfte att effektivare utnyttja frekvensutrymmet för radiokommunikation. De föreslagna lösningarna kommer att behandla frågan hur radiosystemet på bästa sätt bör använda de två militära frekvensbanden VHF (30-88 MHz) och UHF (225-400 MHz). Deltagande partners kommer från Frankrike (Thales, koordinator), Sverige (FOI och SAAB AB), Belgien (Royal Military Academy), Tyskland (Thales och Rohde & Schwarz), Polen (Military University of Technology), Finland (University of Oulu) och Norge (SINTEF och FFI).

DARPA driver projektet "Spectrum Collaboration Challenge", SC2 som är en tävling mellan olika aktörer att använda mjukvarubaserad radio, tillsammans med växande tekniker såsom artificiell intelligens, i syfte att åstadkomma ett nytt trådlöst paradigm som optimerar spektrumanvändningen⁴. Deltagare kommer både från universitet och

⁴ <https://www.darpa.mil/program/spectrum-collaboration-challenge>

näringsliv. SC2 startade 2017 och avslutas under 2019 i samband med Mobile World Congress, Los Angeles (MWC19).

Inom ramen för NATO-samarbetet NATO-IST-146 RTG-069 har man utvecklat ett testhjälpmedel för effektivare spektrumanvändning. Verktöget har namnet "Radio Environment Map" (REM) och kan användas för att förbättra spektrumplaneringen både i det mer statiska fallet såsom för DSA. REM beskrivs mer utförligt i publikationen

- M. Suchański, P. Kaniewski, J. Romanik and E. Golan, "Radio environment map to support frequency allocation in military communications systems," *2018 Baltic URSI Symposium (URSI)*, Poznan, 2018, pp. 230-233.

Bakgrunden till REM är ett antal identifierade brister som behöver lösas för att få till en effektivare och mer dynamisk frekvenshantering vid gemensamma operationer mellan länder. Dessa brister är enligt författarna:

- avsaknad av ett gemensamt spektrumhanteringssystem
- avsaknad av en gemensam lägesbild över frekvensanvändningen i koalitionsområdet, inklusive att känna till när störfordon är aktiva
- oförmåga att detektera avsteg från aktuell frekvenstilldelning
- avsaknad av snabba åtgärder när någon avviker från den aktuella frekvenstilldelningen.

I REM samlas kontinuerligt mätdata in om aktuell frekvensanvändning och den elektromagnetiska miljön i övrigt. REM presenterar en aktuell bild av den elektromagnetiska miljön i ett visst geografiskt område. REM beskrivs som ett nödvändigt stöd till kognitiv radio för att kunna använda DSA.

Dynamic Spectrum Alliance är ett internationellt nätverk av företag och forskare som arbetar för juridiska förändringar (lagar och regleringar) som krävs för att ökad dynamik i spektrumtilldelning ska vara möjlig. Mer information finns på <http://dynamicspectrumalliance.org/>.

Konceptet kognitiv radio kan utvidgas från länknivå till nätnivå och CRN (Cognitive Radio Network). Målet är att optimera hela kedjan från sändare till mottagare inte bara i termer av spektrumanvändning. Arbete med CRN har bland annat bedrivits i NATO STO IST-140 "Cognitive Radio Networks" och beskrivs i

- T. Bräysy *et al.*, "Network management issues in military Cognitive Radio Networks," *2017 International Conference on Military Communications and Information Systems (ICMCIS)*, Oulu, 2017, pp. 1-6.

Idén är att kognitiva och autonoma tekniker ska bli tillräckligt pålitliga för att användas i taktiska tillämpningar för sätta upp och styra kommunikationsnät. En liknande utveckling sker för civila operatörer av mobiltelefonsystem med konceptet SON (Self-Organizing Networks).

6.3 Telekonfliktaspekter för Internet of Things

Internet of Things (IoT) (sv. "sakernas internet") innebär att elektroniska system, både trådlösa och icke trådlösa, kopplas upp i större skala i samhället. Visionen för IoT innefattar de flesta sektorer i samhället såsom smarta hem, smarta städer, intelligenta transportsystem, smarta elnät, smarta fabriker, smarta jordbruk, miljökontroll, utbildning och underhållning. Dessa samlokaliseringsscenarier kommer att kännetecknas av oförutsägbarhet och dynamik, starkt påverkade av konsumenters vanor. Utvecklingstrender inom IoT och vad de innebär ur telekonflikts- och EMC-synpunkt har gjorts [6][7] och sammanfattas kortfattat nedan.

IoT-området spänner över ett brett spektrum avseende utrustningstätheter och arbetsfaktorer (duty cycles) hos de olika utrustningarna. Scenarierna varierar från låga utrustningstätheter (150/km²) med låga arbetsfaktorer (0,0001) till höga utrustningstätheter

med höga arbetsfaktorer (nära 1). Nuvarande prognoser över maximalt antal samlokaliserade enheter per ytenhet säger i storleksordningen 10000/km² för massivt uppkopplade IoT-enheter för smarta städer. Tillsammans med ytterligare enheter för smarta hem och underhållning så kan tätheten öka till i storleksordningen 250000/km². Sådana utrustningstätheter kommer att innebära nya utmaningar ur telekonflikts- och EMC-synpunkt då så tät samlokalisering av elektroniska enheter kommer att påverka den totala elektromagnetiska störningsmiljön för dessa applikationer. Ett genomtänkt telekonflikt/EMC-arbete kommer därför att vara nödvändigt för att kunna utnyttja den stora potentialen inom IoT-tillämpningar fullt ut.

Utvecklingen mot den fulla visionen för IoT är samtidigt starkt kopplad till utvecklingen inom nästa generations mobilsystem 5G. Inom 5G utvecklas de teknologier som utgör den nödvändiga möjliggöraren för IoT i full skala, det som ibland kallas *massiv* IoT. Prognoser om den framtida utvecklingen av den trådlösa delen av den globala internettrafiken varierar och tenderar att vara optimistiska när man tittar i backspegeln. I skrivande stund bedöms den trådlösa delen av den globala internettrafiken öka till runt 70% år 2022⁵. Denna utveckling beskrivs ibland med begreppet WWW (World Wide Wireless Web).

IoT kännetecknas av ett antal aspekter som innebär utmaningar med avseende på telekonflikter/EMC. Trender som kan ses är bland annat:

- Avsevärt högre tätheter av samlokaliserad trådlös konsumentutrustning. Tätheter på 250000/km² motsvarar i genomsnitt ett samlokaliseringsavstånd på fåtalet meter.
- Dynamiska och oförutsägbara samlokaliseringsscenarier.
- En ökad användning av licensfria frekvensband, vilket kommer att öka risken för störningsproblem i dessa band.
- Användning av högre frekvensband med okända emissions- och immunitetsegenskaper för elektronikprodukter.
- Avsevärt högre frekvenser (flera tiotals GHz) och högre bandbredder än dagens standarder för EMC-provning. Visioner finns om utomhustäckning vid frekvenser upp till ca 30 GHz och inomhustillämpningar upp till 90 GHz.
- En ökad användning av färdigutvecklade trådlösa moduler (hyllvara) som integreras i olika produkter.
- Användning av billigare trådlösa tekniker i olika kritiska tillämpningar.

Idag är IoT-tillämpningar byggda av ett antal olika trådlösa tekniker och i nuläget går det inte att se någon trådlös teknik som ser ut att bli dominerande för IoT-tillämpningar. De närmaste åren bedöms majoriteten av IoT-kommunikation ske i nät med lägre sändareffekter och kortare räckvidder. Exempel på trådlösa teknologier för detta är Bluetooth, WiFi, ZigBee, Z-Wave, MIOTY och NFC. IoT-tillämpningar som är beroende av batteridrift dimensioneras typiskt för en batteridriftstid på flera år. System som arbetar med lägre effekter blir samtidigt extra känsliga för störningssignaler eftersom signal-brusförhållandet är relativt lågt i grunden. Det finns dock redan idag teknologier för IoT-kommunikation med längre räckvidder. Exempel är Sigfox, LoRa och Weightless med nominella kommunikationsavstånd på i storleksordningen 13-15 km.

Inom 3GPP (The 3rd Generation Partnership Project) utvecklas tre standarder anpassade för IoT-tillämpningar:

- Extended Coverage GSM Internet of Things (EC-GSM-IoT)
- LTE for Machine-Type Communications (LTE-M)

⁵ Cisco Visual Networking Index: Forecast and Trends, 2017–2022 White Paper, 2019

- Narrowband Internet of Things (NB-IoT).

Gemensamt för dessa är att man har längre nominella räckvidder på i storleksordningen 11 km för LTE-M, 15 km för EC-GSM-IoT samt 22 km för NB-IoT.

Sammanfattningsvis så är teknikutvecklingen inom IoT stark och kommer att medföra nya utmaningar inom telekonflikt/EMC-området. Gemensamt för IoT-tekniker är att störningskänsligheten behöver utredas noggrant om man överväger att använda dessa i kritiska tillämpningar. De höga utrustningstätheterna vid samlokalisering innebär nya utmaningar för att erhålla god EMC. Utvecklingen mot högre frekvenser och bandbredder kommer att kräva vidareutveckling av analysmetoder, provningsmetodik och provutrustning inom EMC. Dessutom behöver ny kunskap inhämtas om emissions- och immunitetsegenskaper hos produkter vid dessa högre frekvenser.

6.4 Artificiell intelligens och EMC

Artificiell intelligens (AI) bygger på idén om att maskiner och algoritmer ska klara av att göra det som människor gör, men på ett mycket snabbare och effektivare sätt.

Maskininlärning (ML) är ett delområde inom AI och där maskiner lär sig att fatta beslut baserade på givna data genom att leta efter strukturer i dessa data. Detta genom att mer eller mindre pröva sig fram genom trial-and-error för att lära sig hantera en viss tillämpning. Deep Learning (DL) är ett sätt att implementera ML genom att använda neurala nät.

Idén att använda verktyg för att göra det som människor gör är inte ny. Redan Aristoteles (384-322 f. Kr.) sade:

”Tänk om varje verktyg själv kunde utföra sin uppgift, antingen när vi bad om det, eller när det själv förutsåg ett behov, [...] så skulle vi inte längre ha behov för betjänter eller slavmästare.”

De framsteg som ligger bakom dagens forskning och tillämpningar inom maskininlärning kan spåras tillbaka till mitten av 1900-talet. Det var då större universitet och organisationer fick tillgång till datorer. Alan Turing publicerade sitt arbete ”Computing Machinery and Intelligence” 1950, och flera centrala upptäckter kring neurala nätverk gjordes mellan 1950 och 1970 av bland andra Frank Rosenblatt och Marvin Minsky. Under 1970-talet gjordes stora framsteg inom språkigenkänning, t.ex. i form av översättning av text till vektorer. Under 1980-talet började man arbeta med Bayesianska nätverk, beteendeträd, *k*-Nearest-Neighbor (*k*-NN) och faltningsbaserade neurala nätverk (eng: convolutional neural nets). Samma årtionde började maskininlärning från stora datamängder tillämpas. År 2006 föreslogs djupa neurala nätverk (deep belief nets) av Geoff Hinton m fl för att beskriva neurala nätverk som rekursivt tränats i multipla lager. När ett lager tränats låses dess parametrar och dess utfall blir indata för nästa lager. När en ”lagom” mängd lager skapats beräknas sedan modellen som ett vanligt neuralt nätverk. När det idag talas om Deep Learning så är det i regel denna variant som avses.

AI-området har de senaste åren blivit mycket hett och stora möjligheter förutspås inom framtida produkter med AI-tillämpningar. AI-tillämpningar utvecklas och undersöks därför idag inom ett mycket stort antal områden. AI bygger i grunden på att algoritmer tränas och lärs upp på stora datamängder och att man sedan förutsätter att data som sedan uppstår i den aktuella tillämpningen kan hanteras med hjälp av den genomförda inlärningen. Inom ML har man utvecklat algoritmer för t ex röstigenkänning, textöversättning, ansiktigenkänning, självkörande bilar, aktiehandel och allmän dataanalys. Inom spelet Go har man utvecklat mycket kraftfulla algoritmer. Algoritmen AlphaGo har vunnit mot många olika professionella Go-spelare utan handikapp.

Inom ML brukar man dela in inlärningsmetoderna i tre grundtyper:

- övervakad inlärning (supervised learning)

- öövervakad inlärning (unsupervised learning)
- förstärkt inlärning (reinforcement learning).

Öövervakad inlärning innebär att man tränar en algoritm med hjälp av en datamängd och ett i förväg känt ”rätt svar”. Matematiskt så innebär det att man letar efter en funktion som mappar kända indata med kända utdata.

Oövervakad inlärning innebär att komma fram till en funktion som beskriver data som inte kategoriserats och utan att ha något känt svar som facit.

Förstärkt inlärning innebär att en algoritm (kallas agent) lär sig den rätta lösningen genom att prova sig fram och förstärka beteenden som leder till positivt resultat och försvaga beteenden som leder till negativt resultat. Algoritmen får feedback (belöning eller avdrag) beroende på om den närmar sig den rätta lösningen eller inte. Algoritmen letar den väg som ger störst mängd ackumulerade belöningar. Det här kan göras utan att ha tillgång till förberedda data.

De prediktioner som görs med hjälp av ML kan huvudsakligen delas in i två kategorier – klassificering och regression. Klassificering handlar om att välja rätt kategori från en ändlig mängd kategorier. Exempelvis att med bildigenkänning avgöra vilken hastighetsbegränsning en skylt visar. Regression handlar om att bestämma ett kontinuerligt värde som exempelvis att prediktera värdet för en aktie vid en viss tidpunkt i framtiden.

En svårighet med inlärningsmetodikerna inom ML är att man oftast inte vet varför en algoritm fungerar eller inte och man har inte några tydliga kriterier på varför en algoritm ska väljas framför en annan. Det har också uppstått svårigheter att reproducera vissa resultat, vilket lett till en diskussion om forskningsmetodikerna inom området, se exempelvis [17] som är en artikel i tidskriften *Science*. Det finns också flera publicerade exempel där en liten störning i indata kan få en ML-algoritm att plötsligt bete sig annorlunda i samband med exempelvis klassificering av data i olika klasser (t ex bildigenkänning). I regel har det visat sig svårt att i förväg fastställa hur dessa känsligheter i indata ser ut.

Ur EMC-synpunkt finns det viktiga frågor förknippade med ML-algoritmer. Funktionen i en ML-tillämpning bygger på att de träningsdata som används för upplärning av algoritmen är relevanta för de verkliga data som hanteras i den skarpa tillämpningen. Det är därför viktigt att de data som samlats in för träning inte innehåller oavsiktliga störningar som beror på EMC-problem. Likaså är det viktigt att inte oavsiktliga störningssignaler dyker upp i den aktuella tillämpningen så att algoritmen börjar bete sig annorlunda än under träningen. ML-tillämpningar kräver därför i sig ett noggrant EMC-arbete både vid generering av träningsdata och i den aktuella tillämpningen. Detta gäller särskilt i kritiska tillämpningar med höga krav på funktionssäkerhet.

Det finns även möjligheter inom EMC där man kan dra nytta av ML-algoritmer. Ett exempel som beskrivs mer i detalj i kapitel 3.2 är att använda ML för att automatiskt analysera uppmätta störningssignaler genom att klassificera dem i olika typer av vågformer. Kontinuerlig övervakning av en radiomiljö kräver någon slags automatisk signalanalys av tidsskäl. Syftet kan vara att tidigt upptäcka när signalmiljön förändrats genom att nya störningssignaler dykt upp. På så sätt kan systemet ge störningslarm som operatören kan studera närmare. Genom att träna upp en algoritm med olika klasser av störningssignaler så kan den sedan automatiskt ge information om vilken typ av störningssignal som dykt upp i mätdata och därmed ge hjälp till att finna orsaken till störningssignalen. Just inom området som innefattar spektrumövervakning ur olika aspekter finns det några internationella publikationer som handlar om att använda AI. Dessa publikationer finns listade i [1].

7 Framtida utmaningar

Samlokalisering av kommunikationssystem tenderar att gå mot mer komplexa och oförutsägbara scenarier samtidigt som den totala elektromagnetiska störningsmiljön fortsätter att öka i frekvensomfång och nivå. Med den civila 5G-utvecklingen kommer avsevärt högre frekvenser och större bandbredder att användas. Utvecklingen med Internet of Things innebär att samlokalisering med andra trådlösa system kan vara avsevärt tätare. Denna utveckling innebär samtidigt att den störningsmiljö som nästa generations trådlösa system ska samexistera i är okänd idag. Detta ökar behovet av att kunna analysera dessa miljöer både i förväg och under drift för att undvika att kritiska kommunikationstjänster blir degraderade eller utstörda. Det är av stor vikt att Försvarsmaktens kommunikationssystem fungerar även i dessa komplexa störningsmiljöer.

Några tekniker som har visat sig störa kommunikation eller där det finns stor risk för interferensproblem är solcellsanläggningar och system för trådlös laddning av fordon. Inom båda dessa områden kommer utveckling av såväl teknik och emissionsstandarder att ske vilket kommer vara viktigt att följa och analysera konsekvenser av.

Den militära tillgången till spektrum är begränsad vilket innebär att utvecklingen inom DSA och de möjligheter till samexistens som tekniken kan innebära är intressant. Även hur aktuell interferensmiljö ser ut runt en mottagare är intressant. Kontinuerlig mätning av interferenser för att kartlägga den elektromagnetiska miljön kommer att vara viktigt och ge information och förvarning om eventuella kommunikationsproblem. Att automatiskt kunna skilja på interferenser och kommunikationssignaler är en förutsättning för effektiv kartläggning av interferensmiljön.

Då bakgrundsmiljön ständigt förändras i takt med den ökande användningen av elektroniska system behöver mätningar ske regelbundet för att ha så aktuell kunskap som möjligt om vilken miljö vitala radiosystem utsätts för. Idag finns inte några större systematiska mätningar av bakgrundsmiljö publicerade sedan ett antal år tillbaka. Undantaget är inom GNSS-band där FOI med flera sedan några år tillbaka gjort sådana. Av det skälet rekommenderas att mätningar av bakgrundsmiljö genomförs i närtid inom aktuella frekvensband för Försvarsmaktens tillämpningar.

8 Referenser

- [1] P. Eliardsson och P. Stenumgaard, "Artificial Intelligence for Automatic Classification of Unintentional Electromagnetic Interference in Air Traffic Control Communications," i *EMC Europe 2019, International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Barcelona, 2019. FOI-S--6064--SE.
- [2] K. Fors, E. Axell, S. Linder och P. Stenumgaard, "On the Impact of CW interference on 5G NR," i *EMC Europe 2019, International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Barcelona, 2019, FOI-S--6028--SE.
- [3] P. Stenumgaard och S. Linder, "EMC Challenges and Solar-Panel Systems," *Electronic Environment*, nr 2, 2019. FOI-S--6051--SE.
- [4] P. Stenumgaard och S. Linder, "Interference Impact from Solar-Panel Systems on Air Traffic Control Communications," i *EMC Europe 2019, International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Barcelona, 2019. FOI-S--6065--SE .
- [5] P. Stenumgaard, S. Linder och H. Olsson, "Interference Impact from Solar-Panel Systems on HF Communications," i *Nordic HF 2019*, Fårö, 2019. FOI-S--6023--SE.
- [6] K. Wiklundh och P. Stenumgaard, "Massive Internet of Things and EMC," *Electronic Environment*, nr 4, 2018. FOI-S--6037--SE.
- [7] K. Wiklundh och P. Stenumgaard, "EMC Challenges for the Era of Massive Internet of Things," *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine*, vol. 8, pp. 63-72, 2019. FOI-S--6041--SE.
- [8] K. Fors, K. Wiklundh och P. Stenumgaard, "On the mismatch of emission requirements for CW interference against OFDM systems," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, pp. 1555-1561, October 2018, FOI-S--5902--SE.
- [9] J. Hedström, "Användarhandledning GENESIS," FOI Memo 6893, 2019.
- [10] P. Stenumgaard, "Using the root-mean-square detector for weighting of disturbances according to its effect on digital communication services," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, pp. 368-375, November 2000.
- [11] K. Fors, K. Wiklundh, P. Eliardsson och M. Alexandersson, "A detection method for interference measurements in partly occupied radio frequency bands," i *EMC Europe 2017, International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Angers, 2017. FOI-S--5748--SE.
- [12] H. Olsson, "EMC-mätningar Solcellsanläggning Glava Energy Center," *Elsäkerhetsverket doc no. 16EV1277*, 2016.
- [13] "Report on the 6th joint cross-border EMC market surveillance campaign," *EMC administrative co-operation working group*, 2014.
- [14] "Recommendation ITU-R P.372-13 Radio Noise, September 2016".
- [15] B. Asp, E. Axell, K. Fors, A. Komulainen och S. Linder, "Störnings- och upptäcktsegenskaper för 5G-tekniker," 2019, FOI-R--4727--SE.
- [16] Mitola och Maguire, "Cognitive Radio: making software radios more personal," *IEEE Personal Communications*, pp. 13-18, Aug 1999.

- [17] M. Hudson, "Artificial intelligence faces reproducibility crisis," *Science*, pp. 725-726, 16 Feb 2018.

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