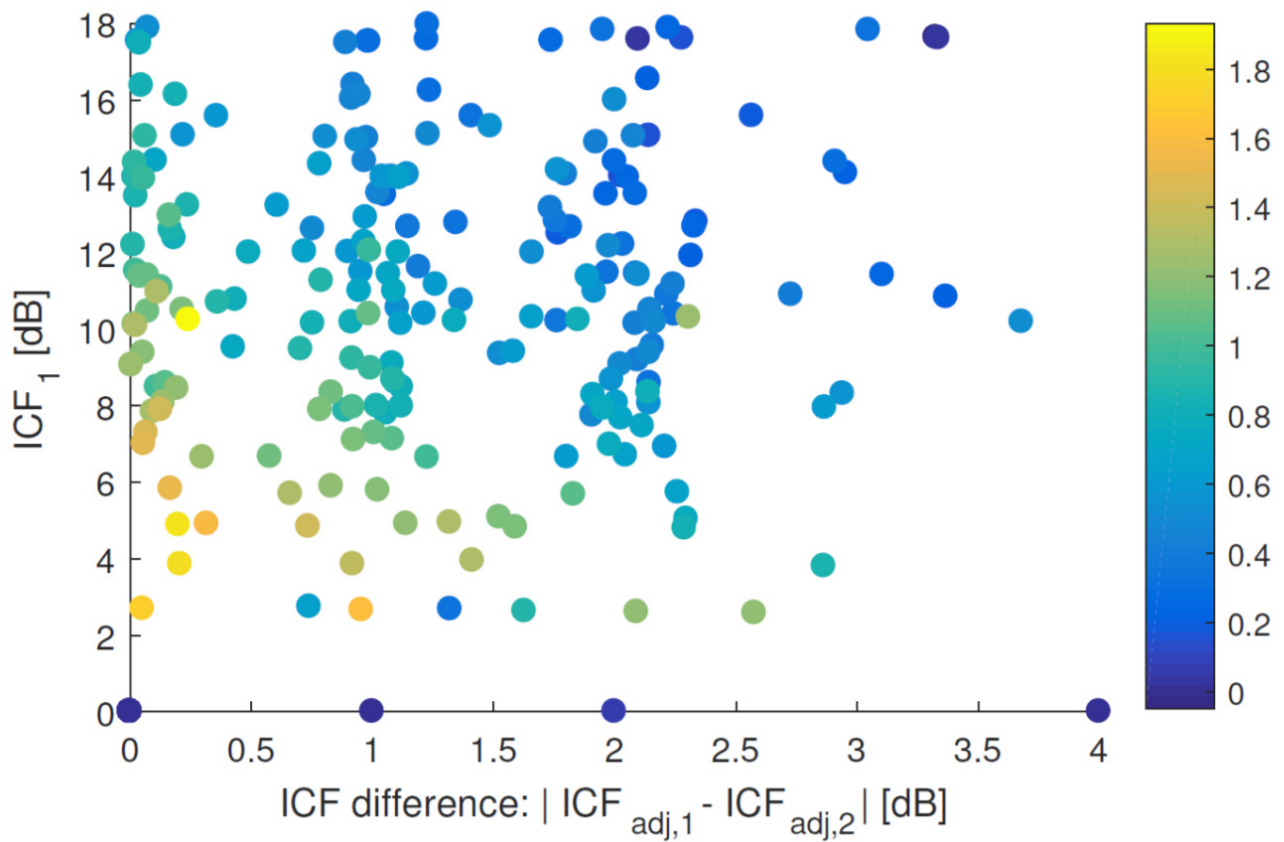


K. FORS, S. LINDER, K. WIKLUNDH, S. ÖRN TENGSTRAND, B. LINDAHL,
M. ALEXANDERSSON, P. ELIARDSSON, J. HEDSTRÖM, P. STENUMGAARD



K. Fors, S. Linder, K. Wiklundh, S. Örn
Tengstrand, B. Lindahl, M. Alexandersson,
P. Eliardsson, J. Hedström, P. Stenumgaard

Telekonflikt – Sammanfattning 2017

Titel	Telekonflikt – Sammanfattning 2017
Title	Intersystem interference - 2017
Rapportnr/Report no	FOI-R—4532--SE
Månad/Month	December
Utgivningsår/Year	2017
Sidor/Pages	37 p
Kund/Customer	FMV
Forskningsområde	4. Informationssäkerhet och kommunikation
FoT-område	
Projektnr/Project no	E720643
Godkänd av/Approved by	Christian Jönsson
Ansvarig avdelning	Ledningssystem
Exportkontroll	Innehållet är granskat och omfattar ingen information som är underställd exportkontrollagstiftningen.

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

Telekonflikter är ett begrepp för de problem som uppstår då andra nyttosignaler och oavsiktliga elektromagnetiska störningar negativt påverkar mottagningen hos ett kommunikationssystem. Militära plattformar består vanligtvis av ett flertal elektriska utrustningar och radiosystem på en liten yta, och risken för telekonflikter är därför stor. Telekonflikter leder till en försämrad förmåga hos sambandssystemen och kan i förlängningen påverka de militära förbandens förmåga.

I följande rapport sammanfattas delar av det arbete som utförts under året inom FOIs telekonfliktsprojekt. Arbetet består av flera olika delar, men syftar alla till att hantera de bekymmer som uppstår vid telekonflikter. Rapporten sammanfattar arbete och resultat kring: 1. Ny funktionalitet i telekonfliktsverktyget GENESIS, 2. Metod för att identifiera dominant störningskälla, 3. Utveckling av portabelt störningsmätssystem, 4. Metod för att mäta störningsmiljön i frekvensband där sporadiska radiosändningar sker, samt slutligen 5. Effekten från smalbandig störning mot OFDM-system.

Rapporten presenterar bland annat en ny metod, med en så kallad *total ICF* (*Impulsiveness Correction Factor*), för att kunna göra beräkningar på en interferensmiljö som består av flera störningskällor, som kan vara allt från impulsaktiga till AWGN-lika (AWGN – additive white Gaussian noise). Metoden kan också användas för att avgöra vilken störningskälla som är mest skadlig för ett kommunikationssystem.

Rapporten beskriver också FOIs utvecklade detektionssystem, RF-Oculus, som kan användas för att detektera störningar, främst på så kallade tysta frekvensband som GPS-bandet. Här visas också hur systemet kan kompletteras med en metod för att mäta störningsmiljön i frekvensband som sporadiskt används för radiosändningar.

Slutligen visas på vilket sätt OFDM-system (OFDM – Orthogonal Frequency Division Multiplex) påverkas av smalbandiga och bredbandiga störningar. OFDM är vanligt förekommande bland annat i mobiltelefonistandarder och i standarder för trådlösa nät. Resultaten visar att ett OFDM-system är väsentligt mera känsligt mot en smalbandig störning än för bredbandigt AWGN då de har samma medeleffekt. Detta är viktigt att beakta vid systemdesign och när nya gränsvärden för tillåten emission ska utvecklas.

Nyckelord: telekonflikter, EMC, GENESIS, detektionssystem, RF-Oculus.

Summary

Intersystem interference is the problem that arise when other radio signals and unintentional electromagnetic interference adversely affect the reception of a communication system. Military platforms usually consist of electrical equipment and radio systems on a small surface, and the risk of intersystem interference is therefore high. Intersystem interference leads to a deterioration of the communication system performance and may affect the overall abilities of the military forces.

The following report summarizes parts of the work performed during the year within FOI's intersystem interference project. The work consists of several different parts, but they all aim to handle the problems due to intersystem interference. The report summarizes work and results regarding: 1. New functionalities in the intersystem interference tool GENESIS, 2. A method for identifying the dominant interference source, 3. Development of a portable interference detection system, 4. A method for measuring the interference environment in frequency bands where sporadic radio transmission are occurring, and finally 5. Impact of narrowband interference on OFDM system.

The report, among other things, presents a new method, with a so-called *total ICF*, to be able to calculate the impact of an interference environment consisting of multiple interference sources, which can be all from impulsive to AWGN-like (AWGN – additive white Gaussian noise). The method can also be used to determine which interference source is the most harmful one to a communication system.

The report also describes FOI's developed detection system, RF-Oculus, which can be used to detect interference, mainly in so-called quiet frequency bands like the GPS band (GPS- Global Positioning System). It is also shown how the system can be supplemented with a method of measuring the interference environment in frequency bands that are sporadically used for radio transmissions.

Finally, it is shown in what way OFDM systems (OFDM – Orthogonal Frequency Division Multiplex) are affected by narrowband and broadband interference. OFDM is a technique commonly used in mobile communication standards and standards for local area networks. The result shows that an OFDM system is significantly more sensitive to a narrowband disturbance than to broadband AWGN. This is an important fact to consider when designing communication systems and when new emission requirements are to be determined.

Keywords: intersystem interference, EMC, GENESIS, detection system, RF-Oculus.

Innehållsförteckning

1	Inledning	7
2	Ny funktionalitet i telekonfliktsverktyget GENESIS	9
2.1	Inläsningsrutin för uppmätta störningsspektrum av störningskällor	11
2.2	EMI-profiler.....	11
2.3	Utveckling från analys på en site till en mer flexibel miljö.....	13
3	Utveckling av en total ICF och metod för att identifiera värsta störningskällan	15
3.1	Bakgrund.....	15
3.2	Total ICF	15
3.3	Resultat.....	17
3.3.1	Störningsscenarier med två störningssignaler.....	18
3.4	Tillämpning av den föreslagna metoden.....	21
3.4.1	Identifiering av värsta störningskälla.....	22
3.4.2	Beräkning av BEP för en komplex störningsmiljö bestående av flera störningskällor.....	22
3.5	Sammanfattning.....	22
4	Portabelt mätsystem för att mäta störningsmiljö	23
4.1	Portabelt mätsystem	23
4.2	Sammanfattning.....	26
5	Detektionsmetod för att kunna utesluta sporadiska radiosändningar	27
5.1	Bakgrund.....	27
5.2	Försökstillämpning.....	27
5.3	Princip.....	27
5.4	Utvärdering av metoden.....	30
5.5	Sammanfattning.....	32
6	Effekten av smalbandig störning mot OFDM-system	33
6.1	Bakgrund.....	33
6.2	Analys av smalbandig störning mot OFDM	33
6.3	Sammanfattning.....	36
7	Referenser	37

1 Inledning

Telekonflikter är de problem som uppstår då andra nyttosignaler och oavsiktliga elektromagnetiska störningar negativt påverkar mottagning hos ett kommunikationssystem. Militära plattformar kännetecknas av att det finns många radiosystem på en liten yta och det är därför stor risk att telekonflikter uppstår. Dessutom har elektriska utrustningar som exempelvis datorer blivit allt vanligare i försvarstillämpningar i närheten av radiosystem. Den ökade användningen av datorer beror på ökade krav på informationshantering ute på enskilda grupperingsplatser. 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.

Typiska konsekvenser orsakade av telekonflikter är:

- Avbrott på förbindelsen
- Minskad radioräckvidd
- Missade anrop/meddelanden
- Ökad tidsfördröjning hos sända datameddelanden
- Positionsfel (GPS-mottagare)
- Ökad känslighet mot elektronisk attack (aktiv störning)
- Minskat upptäcktsavstånd hos varnarsystem och sensorer

Det är viktigt att medvetandegöra effekterna av telekonflikter och förebygga att telekonflikter uppstår. Att åtgärda telekonflikter i ett sent skede är 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 och upphandlas. Telekonfliktsanalyser inklusive effekten av antenner 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 och att utveckla telekonfliktsverktyget GENESIS. Underlagen och GENESIS ska kunna användas för att på ett tydligt sätt medvetandegöra telekonflikters konsekvenser och för att i specifika situationer lösa faktiska telekonfliktsproblem. Målsättningen är att resultaten ökar kunskapen kring telekonflikter både inom Försvarmaken (genom utbildning och kurser) och bland personal inom FMV.

GENESIS kan exempelvis användas för att bedöma effekten av:

- placering av olika störande elektriska utrustningar,
- robusthet hos olika typer av radiosystem,

- effekter av olika åtgärder för att reducera risken för telekonflikter, som exempelvis effekten av skärmning, olika emissionskrav på elektriska utrustningar, byte av radiofrekvens, och
- samlokaliserade frekvenshoppande radiosystem med varierande grad av utombandsegenskaper och effekter av filterlösningar för frekvenshoppande system.

I följande rapport sammanfattas delar av det arbete som utförts inom telekonfliktsbeställningen från FMV. Arbetet består av flera olika delar, men syftar alla i att hantera de bekymmer som uppstår vid telekonflikter.

Rapporten sammanfattar:

- Ny funktionalitet i telekonfliktsverktyget GENESIS,
- en metod för att identifiera dominant störningskälla,
- utveckling av portabelt störningsmätsystem,
- en metod för att mäta störningsmiljön i frekvensband där sporadiska radiosändningar sker, samt
- effekten av smalbandig störning mot OFDM-system.

Flera av delarna är även redovisade i form av konferensbidrag och som tidskriftsartikel [1,10,11,12].

2 Ny funktionalitet i telekonfliktsverktyget GENESIS

I telekonfliktanalyser är syftet att bestämma hur en specifik radiomottagare kommer att påverkas av omgivande störningskällor och sändande utrustningar. Risken för telekonflikter är speciellt stor då det gäller små plattformar med många sändande system och elektriska utrustningar. Detta är snarare regel än undantag när det gäller militära plattformar. För att säkerställa att kommunikationssystem kan samexistera behöver man göra en telekonfliktanalys för de ingående systemen. I analysen behöver hänsyn tas till andra sändande radiosystem, men även störningar från elektriska utrustningar behöver beaktas. 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 antensystem hanteras i samband med telekonfliktanalyser, oavsett om källan är antennburen eller inte.

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

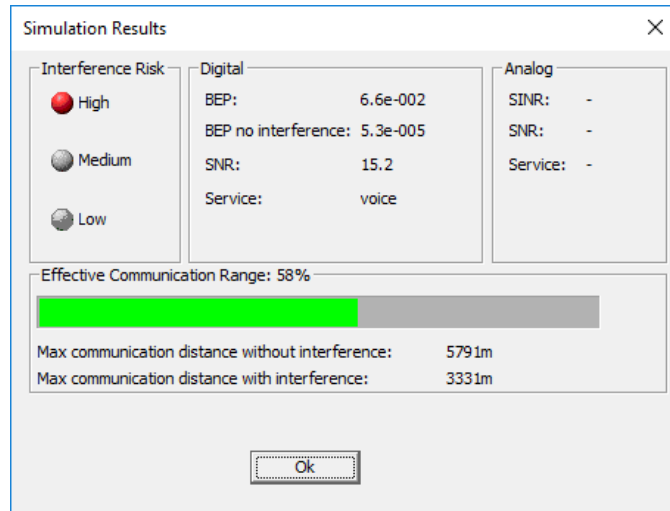
Användargränssnittet för GENESIS är utvecklat för att skapa en användarvänlig arbetsmiljö där man ska kunna känna igen sig i den grafiska miljön och enkelt kunna infoga plattformar, kommunikationssystem och störningskällor. Beräkningarna ska kunna genomföras snabbt och resultaten ska visualiseras på ett intuitivt sätt med en översiktlig presentation för att visa om det är låg, medel eller hög risk för telekonflikt (se Figur 1). En erfaren användare kan även få tillgång till mer detaljerad information om resultatet, se exempel i Figur 2.

Några av GENESIS fördelar kan kortfattat sammanfattas som:

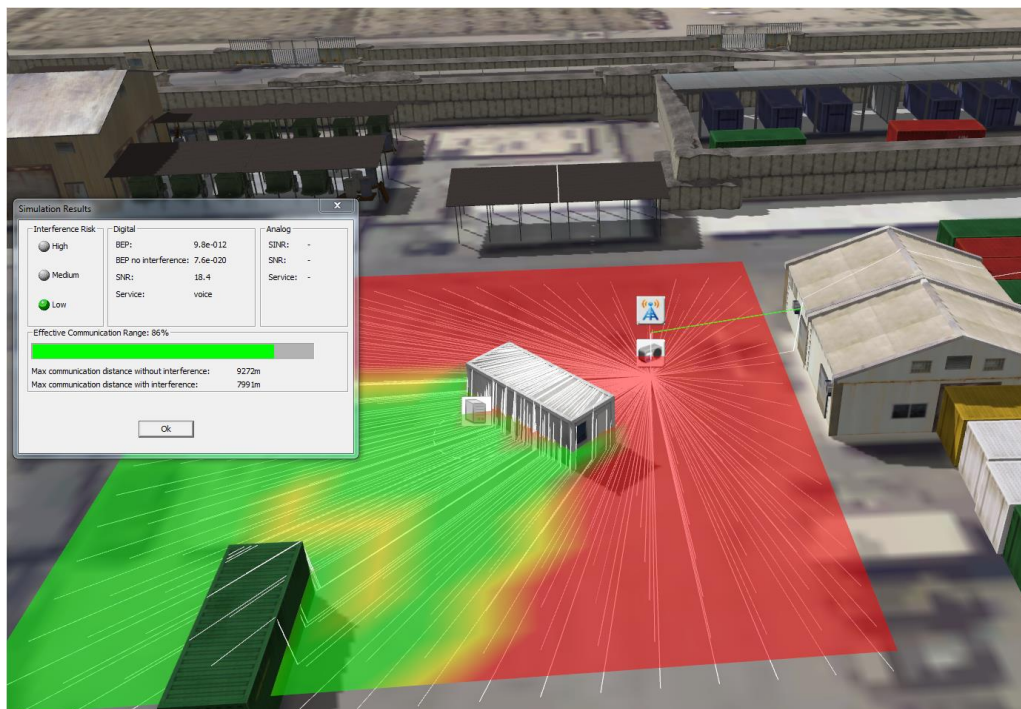
- GENESIS är en scenariobaserad demonstrator som kan användas för att medvetandegöra orsaker till varför telekonflikter uppstår och vad det får för konsekvenser. Verktöget kan användas både för kunskapsöverföring av telekonfliktresultat från forskning till användare och för att genomföra analyser av 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.

Verktöget är modulärt uppbyggt, vilket gör att det är relativt lätt att lägga till nya plattformar, störningskällor och trådlösa kommunikationssystem. Fram till och med 2017 har GENESIS varit uppbyggt kring några olika scenarier: en militär camp i Afghanistan (The Northern Light), ett havscenario med fartyg och miljön runt Arlanda flygplats.

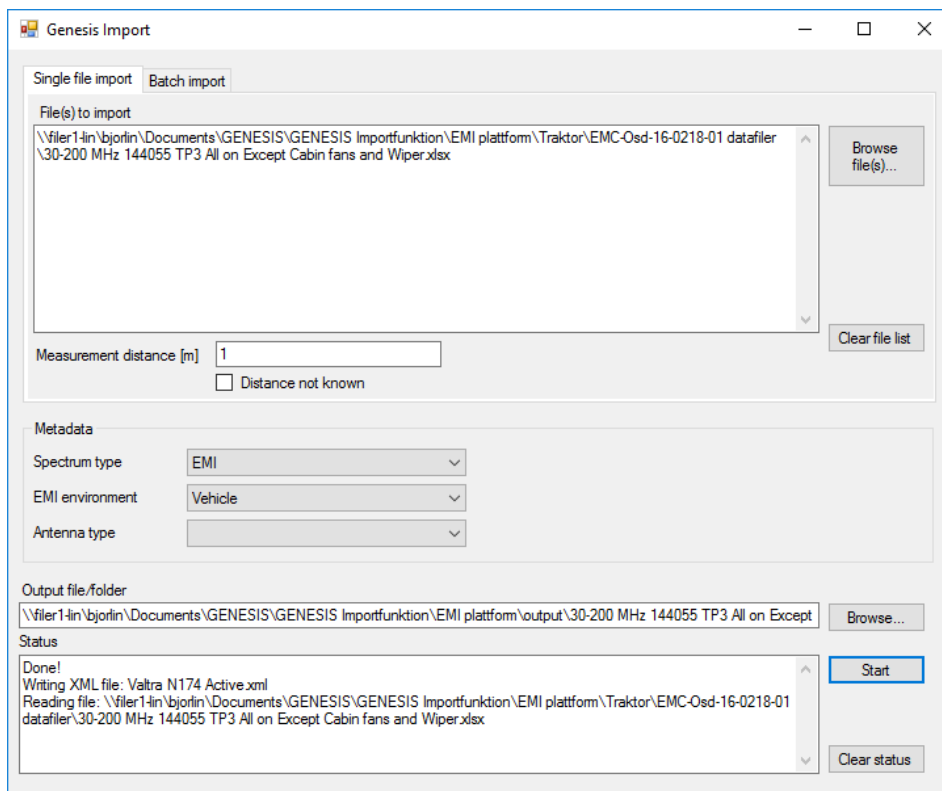
I GENESIS finns plattformar som container, fältsjukhus, ambulans, Patria, Toyota Landcruiser, polisbil, brandbil och Visby-korvett. Bland radiosystemen finns IGR (Ra1570), Ra 180, Rakel, Ra 811, HF-system, Ra 460 och GPS-mottagare. Störningskällor finns av olika typer av datorer och sjukhusutrustning, solcellsanläggning, frekvensomvandlare, samt några olika civila och militära emissionsstandarder.



Figur 1 Förenklad visualisering med röd (High: Stor risk), gul (Medium: Medelhög risk), grön (Low: Låg risk) lampa som anger störningsrisk.



Figur 2 Exempel från GENESIS med en störningskälla som uppfyller den civila standarden EB 55022 för kontorsmiljö. Bilden visar hur höjdprofilen omhändertas.



Figur 3 Skärmdump av importprogrammet som kan läsa in uppmätta spektrum utförda med spektrumanalysator från Rohde & Schwarz.

2.1 Inläsningsrutin för uppmätta störningsspektrum av störningskällor

För att analysera påverkan från en specifik störningskälla har det funnits behov av att enkelt kunna infoga information om denna i GENESIS. GENESIS har därför kompletterats med ett separat verktyg, *GENESIS Import*, med inläsningsrutin som läser in en mätfil av störningskällans uppmätta effektspektrum. Figur 3 visar gränssnittet för inläsningsrutinen. Då störningskällans mätfil har lästs in kan objektet analyseras på vanligt sätt i GENESIS.

2.2 EMI-profiler

En plattform ska byggas så att dess elmiljö är tillfredsställande och inte negativt påverkar exempelvis radiosystem som är placerade på plattformen. I EMMA-handboken [14] finns beskrivet hur detta bör hanteras genom en rad olika aktiviteter. Om man inte ser till att elmiljön hanteras kan störningar från denna begränsa radiosystemets funktionalitet. För att visa på betydelsen av ett gott elmiljöarbete och konsekvenserna av en förhöjd störningsnivå, har GENESIS kompletterats med s.k. EMI-profiler på plattformar. Det är vanligt att uppmätta nivåer från EMI-mätningar på plattformar jämförs mot olika emissionskrav, som t.ex. det militära emissionskravet RE 102 för arméplattformar, i MIL STD 461-G. Därför specificeras fem olika EMI-profiler, som utgörs av nivåer i relation till RE102. Nivåerna är, liksom emissionskraven i RE102, angivna i elektrisk fältstyrka och varierar med frekvens. Eftersom alla plattformar i GENESIS hittills antas ha samma uppsättning EMI-profiler är inte plattformsstörningarna beroende av plattformen. För att

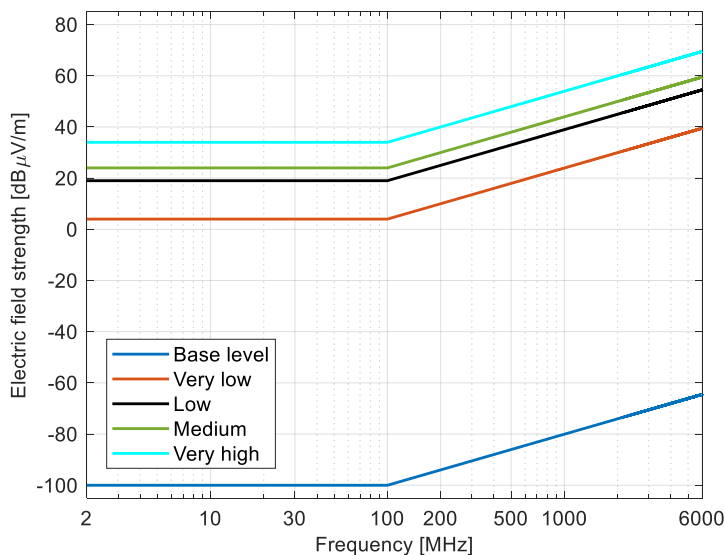
analysera elmiljöns påverkan på radiosystem på en specifik plattform måste hänsyn tas till de faktiska störningsnivåerna på plattformen. EMI-profilerna visas i Figur 4.

De EMI-profiler som kan väljas per plattform i GENESIS är följande:

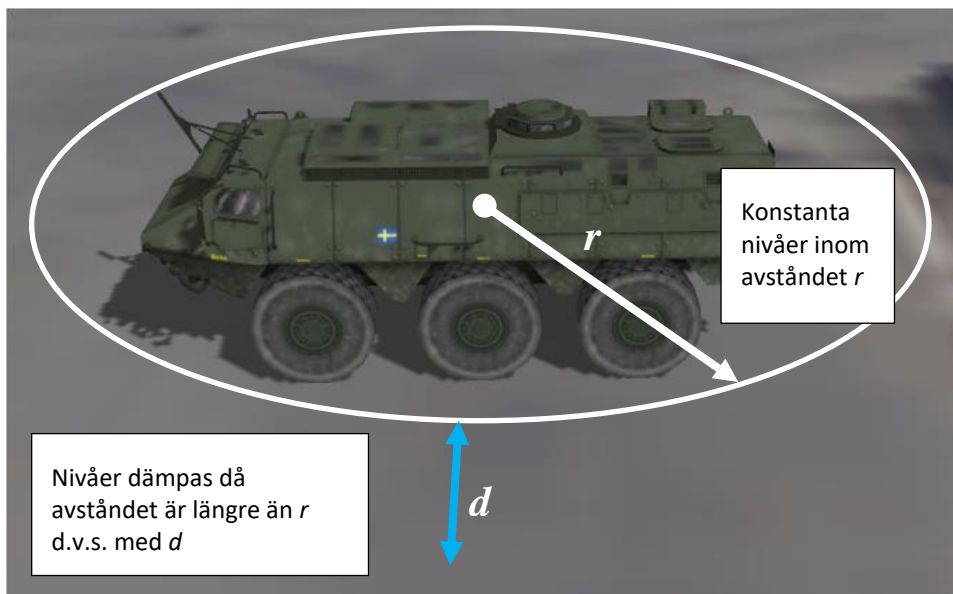
- EMI Base level: nivåer enligt RE102 - 124 dB. Profilen är förvald på alla plattformar och kan väljas till annan EMI-profil om så önskas. Profilen motsvarar fallet då i princip ingen störning finns på plattformen. Nivån är så låg att inga radiosystems prestanda påverkas negativt.
- EMI Very low: nivåer enligt RE102 - 20 dB.
- EMI Low: nivåer enligt RE102 - 5 dB.
- EMI Medium: nivåer enligt RE102.
- EMI Very high: nivåer enligt RE102 + 10 dB.

Eftersom EMI-profilerna är definierade utifrån RE102 används de bandbredder som gäller för standarden då nivåerna i elektrisk fältstyrka ska räknas om till störningsnivåer.

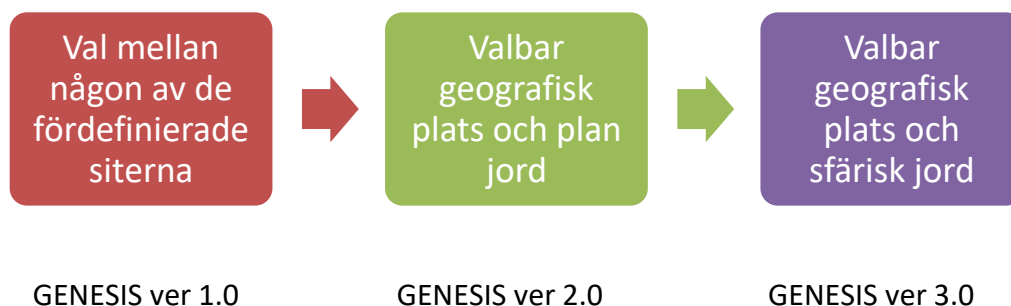
Ett inledande arbete påbörjades under 2017 med att utveckla en metod för hur EMI-störningar på plattformar ska hanteras i GENESIS. Enkelt beskrivet antas följande två situationer kunna gälla. Inom och runtom plattformen, inom r meter från plattformens mittpunkt, antas störningsnivåerna vara konstanta vilket betyder att skärmning och avstånd inte påverkar nivåerna. För positioner som ligger längre bort från plattformen, på avstånd $r+d$ meter från plattformens mittpunkt, påverkas störningsnivåerna av avståndet d . För det sistnämnda fallet betyder det att störningsnivåerna dämpas med avståndet d på grund av utbredningsdämpningen. I Figur 5 visas en schematisk beskrivning av hur de två situationerna med plattformsstörning kan modelleras.



Figur 4 Visar nivåer för de 5 EMI-profilerna.



Figur 5 Schematisk beskrivning av hur plattformsstörningar modelleras.



Figur 6 Utvecklingsplan för GENESIS från beräkning på fåtal utvalda siter till valfri plats inklusive sfärisk jord.

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

Fram till 2017 har det grafiska gränssnittet varit uppbyggt kring några olika scenarier eller så kallade siter. Siter som finns implementerade är en militär camp i Afghanistan (The Northern Light), ett havscenario med fartyg samt miljön runt Arlanda flygplats. 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 behöver vi uppdatera kartfunktionaliteten i GENESIS. I nuvarande version krävs ett relativt stort arbete för att importera ett nytt terrängområde vilket i praktiken begränsar nyttan med verktyget.

GENESIS gränssnitt bygger på en utveckling i flera olika projekt. Med övriga projekts inriktning har vi nu möjligheten att förändra kartfunktionaliteten till att grafiskt kunna plocka in vilken geografisk yta som helst. Med denna uppgradering kan vi snabbt agera på

begäran om telekonfliktsberäkningar oavsett geografiskt område. Vidare möjliggör denna uppgradering att vi kan lyfta in befintliga GIS-datapaketer från GEO-SE (Försvarmakten Stödenheten för GIS-data) samt att vi kan hantera en rad öppna datakällor. Förutom den uppenbara visuella aspekten kommer denna uppgradering även att påverka beräkningskärnan då länkdämpningsmodellen nyttjar såväl höjddata som markklassning.

I denna utveckling (ver 2.0) tar vi först halva steget – Hantering av valfri geografisk yta, men enbart plan jord - och det fulla steget till sfärisk jord och valfri geografisk yta kommer att tas till nästa version.

3 Utveckling av en total ICF och metod för att identifiera värsta störningskällan

3.1 Bakgrund

Elektromagnetiska störningar kan orsaka allvarliga prestandaförsämringar för trådlösa kommunikationssystem. För att förutsäga eller hantera prestandaförsämringen behövs metoder för att estimerar påverkan av störningen. Det är dock svårt att beräkna prestandaförsämringen då ett kommunikationssystem utsätts för impulsiva störningar. Därför används vanligtvis standardapproximationer som den så kallade Gaussapproximationen (GA), där man enbart tar hänsyn till interferenssignalens medeleffekt. GA kan tyvärr ge mycket stora fel om störningssignalen är impulsaktig eller pulsmodulerad till sin karaktär. För att minska felet i prestandaskattningen, särskilt då kommunikationssystemet störs av impulsaktiga signaler, har en korrigeringsfaktor föreslagits, ICF (Impulsiveness Correction Factor).

I [1] föreslår vi en **total ICF** för att hantera en komplex interferensmiljö som består av flera störningskällor, som kan vara allt från impulsaktiga till AWGN-lik, se Figur 7. Metoden kan användas för att utvärdera kommunikationssystemprestanda i komplexa interferenssituationer. I detta kapitel sammanfattas arbetet. Metoden baseras enbart på information som kan mätas med standarddetektorer och med relativt enkla medel. Prestanda kan sedan approximeras utan tidskrävande simuleringar eller komplexa beräkningar. Metoden har validerats genom simuleringar och visat sig fungera mycket bra. Den föreslagna metoden kan användas både i telekonfliktverktyg för att förutse eller utvärdera prestandaförlusten, eller som ett snabbt sätt att avgöra vilken störningskälla som är mest skadlig för kommunikationssystemet.

3.2 Total ICF

I följande avsnitt kommer vi att definiera en rad begrepp som behövs för att utveckla konceptet med en total ICF. Konceptet baseras på det tidigare begreppet Impulsiveness Correction Factor, ICF [2,3,4]. Den totala ICF:en kan sedan användas för att approximativt bestämma bitfelssannolikheten, BEP, för ett kommunikationssystem.

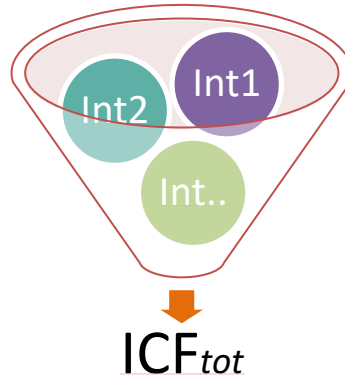
Vi betraktar en elektromagnetisk miljö i vilken en radiomottagare befinner sig och tar emot med ett signal-till-interferens-förhållande, SIR, η

$$\eta = \frac{P}{\sum_{k=1}^K I_k} = \frac{P}{I_{\text{tot}}}. \quad (1)$$

I relationen utgör P den mottagna signaleffekten från nyttsignalen, I_k är effekten från

interferensskällan k och $I_{\text{tot}} = \sum_{k=1}^K I_k$ är den totala interferenseffekten. Bitfelssannolikheten

för den totala interferensmiljön med ett givet SIR, η , kan skrivas som $P_b(\eta)$. Vidare definierar vi individuella SIR för respektive störningskälla k enligt $\eta_k = P/I_k$, och för respektive störningskälla kan en individuell BEP definieras enligt $P_{b,k}(\eta_k)$. Det betyder att $P_{b,k}(\eta_k)$ är det BEP som störningskälla k orsakar.



Figur 7 Illustration av begreppet total ICF.

När störningen är impulsiv fungerar inte den traditionella GA särskilt väl då BEP ska uppskattas. I vissa fall kan BEP underskattas med flera storleksordningar, och därför har en korrektionsfaktor, ICF, tidigare utvecklats [2]. Som namnet antyder är ICF ett sätt att justera SIR innan den används i GA, vilket ger en enkel och tillräckligt bra uppskattning av BEP. Med hjälp av ICF blir det justerade SIR

$$\eta' = \frac{P}{ICF \cdot I_{tot}} \quad (2)$$

Det justerade SIR kan sedan användas för att bestämma ungefärlig BEP, enligt

$$P_b(\eta) \approx P_{b,AWGN}(\eta'), \quad (3)$$

där $P_{b,AWGN}$ är BEP för AWGN (GA).

ICF definieras som den största skillnaden i SIR mellan BEP-kurvorna för den aktuella störningssignalen och AWGN med samma medeleffekt, för den BEP-region som är av intresse [5], se Figur 8. BEP-regionen för ICF väljs vanligen som den region kommunikationssystem är avsedd att fungera väl i. En typisk region för ett digitalt kommunikationssystem är BEP-intervall 10^{-3} - 10^{-6} . Speciellt krävande tillämpningar kan ha ett ännu lägre krav på BEP. Det innebär att BEP-beräkningen med hjälp av ICF blir mest noggrann vid det BEP-värde där ICF bestämdes.

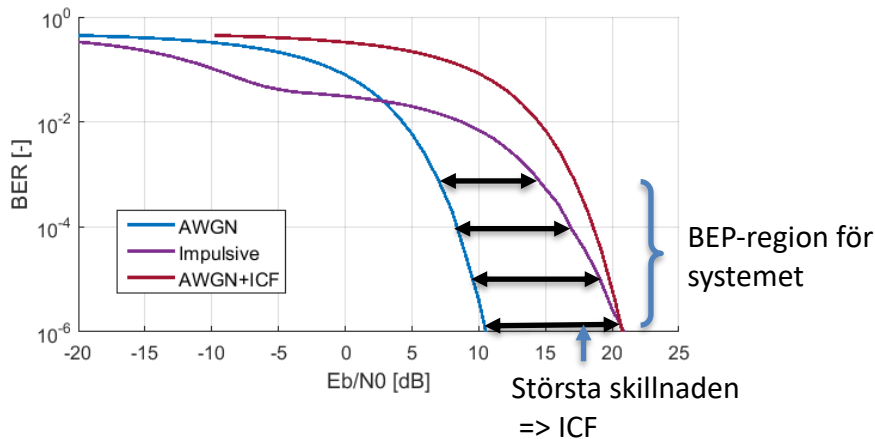
ICF i kombination med GA ger avsevärt enklare beräkningar än om beräkningen ska ta hänsyn till vågformens statistiska karaktär. Med ICF införs en grov justering för interferensens vågform så att GA fortfarande kan användas och felen i BEP minskas med flera storleksordningar. Exempel på vågformer då GA kan ge mycket stora fel är pulsmodulerade och impulsiva interferenssignaler. I praktiken kan ICF för en störningskälla bestämmas med hjälp av mätningar med standarddetektorerna Peak och RMS [5].

Med ICF (i linjär skala) kan den korrigerade BEP sedan erhållas med hjälp av (3).

Metoder för att använda ICF har vidareutvecklats i [3] och [6]. Baserat på dessa arbeten föreslår vi en generalisering av ICF, så att även skillnader i interferenseffekt och impulsivitet hos de olika störningskällorna kan hanteras.

Vi definierar en effektjusterad ICF, $ICF_{adj,k}$, för störningskälla k som

$$ICF_{adj,k} = ICF_k + 10 \log(I_k / I_{tot}). \quad (4)$$



Figur 8 Illustration av konceptet ICF.

Baserat på metoderna i [6] och [3], föreslår vi en total ICF i dB. Den totala ICF:en uttrycks fortsättningsvis som ICF_{\max} , eftersom den erhålls genom att identifiera den maximala ICF_{adj} och att ta maximalt värde av den och 0, enligt

$$ICF_{\max} = \max\left(0, \max_k(ICF_{\text{adj},k})\right) \quad (5)$$

Motiveringen till detta är att störningen som har störst effektjusterad ICF, (ICF_{adj}), bör kunna ses som den dominerande källan till bitfel, och således bör vara den som mest påverkar en ICF för hela störningsmiljön. Hypotesen kommer sedan att undersökas och visa sig fungera mycket väl.

Tanken är att en total ICF ska kunna användas för att enkelt ta fram ett approximativt värde på BEP för den totala elektromagnetiska miljön med hjälp av

$$P_b(\eta) \approx P_{b,\text{AWGN}}(\eta'). \quad (6): \text{ICF max-metoden}$$

Beräkningen av BEP kommer också att jämföras med BEP estimerad som summan av BEP för de ingående interferenssignalerna, där BEP för varje interferenssignal är skattad med respektive ICF och GA. Metoden kan uttryckas som [9]:

$$P_b(\eta) \approx \sum_{k=1}^K \hat{P}_{b,k}(\eta_k), \quad (7): \text{ICF summa-metoden}$$

där $\hat{P}_{b,k}(\eta_k)$ är approximationen av den individuella BEP som är beräknad med den individuella ICF och GA.

3.3 Resultat

Den föreslagna metoden för att ta fram en total ICF har utvärderats genom att göra Monte Carlo-simuleringar av ett kommunikationssystemets BEP för olika störningsfall. Den totala interferensen i varje scenario består av en summa av flera impulsiva interferenssignaler. Interferenssignalerna varierar från rent Gaussiska till mycket impulsiva och modelleras som Middleton Class A [7,8].

Nedan presenteras resultat för störningsscenarioer som består av två störningssignaler, men även flera fall med fler störningssignaler har undersökts i [1]. Det visar sig att metoden fungerar bra även då störningsmiljön består av fler än två störningssignaler.

Tabell 1 Sammanfattning av störscenarierna S_1 till S_7 .

Scenario	Komponent 1		Komponent 2	
	A	Γ	A	Γ
S_1	1	1	1	1
S_2	1	1	0.3	1
S_3	1	0.1	0.1	0.1
S_4	0.1	0.1	0.1	0.1
S_5	0.1	0.1	0.05	0.1
S_6	0.1	0.1	0.01	0.1
S_7	10	10	0.1	0.1

3.3.1 Störningsscenarier med två störningssignaler

I Tabell 1 presenteras sju störningsscenarier som består av två störningskomponenter. Dessa scenarier betecknas S_1 till S_7 . Störningssignalerna beskrivs för Middleton Class A med parametrarna A och Γ , vilka anger hur impulsaktig en signal är.

Scenario S_7 motsvarar fallet med en nästan Gaussisk (komponent 1) och en tydligt impulsiv komponent (komponent 2). I simuleringarna varierar vi även komponenternas relativa effekt, vilken definieras som $\Delta P = 10 \log(I_2/I_1)$.

Enligt definitionen av ICF kan den simulerade BEP för en viss störningssignal användas för att identifiera ICF för samma störning. Detta görs nu för de olika störningskomponenterna i scenarierna S_1 till S_7 . Med hjälp av dessa ICF:er och störningseffekten för komponenterna kan vi även beräkna den effektjusterade ICF:en, ICF_{adj} , (4). Från komponenternas effektjusterade ICF:er bestäms ICF_{max} (5) och utifrån den, skattas BEP för den totala interferensmiljön (6). Denna metod kallas **ICF max**-metoden i figurerna. BEP som beräknats genom att använda *ICF max*-metoden jämförs sedan med BEP beräknad med (7), kallad **ICF summa**-metoden [6]. Som referens jämför vi också med den s.k. sanna BEP för störningsfallet (*True BEP*, i figurerna), som är simulerad utan approximationer, samt det BEP som fås med hjälp av sann ICF (*Approx, using true ICF*, i figurerna, dvs ICF som identifierats från sann BEP). Slutligen jämförs resultaten även med BEP från AWGN-approximationen (GA) (*AWGN approx*, i figurerna). GA kan ses som en grov uppskattning då den inte alls tar hänsyn till störningssignalens vågform. Förutom att jämföra de olika BEP, jämför vi också ICF_{max} med den sanna ICF.

Sammanfattningsvis analyseras:

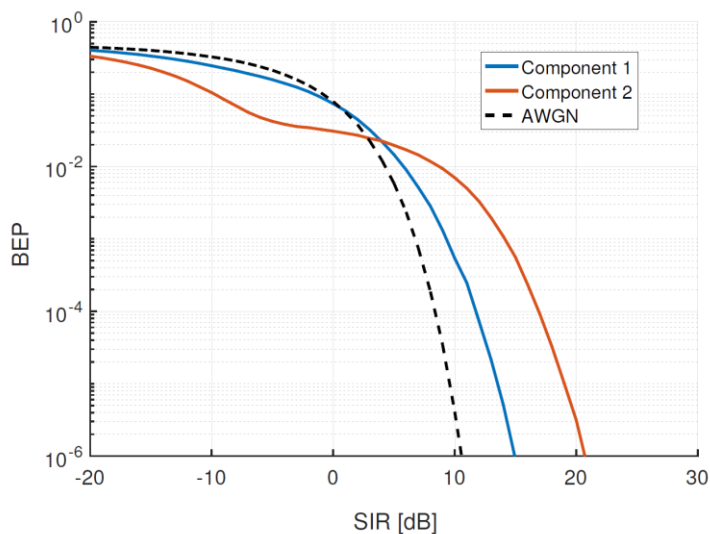
- BEP med *ICF max*-metoden
- BEP med *ICF summa*-metoden [6],

Som även jämförs med:

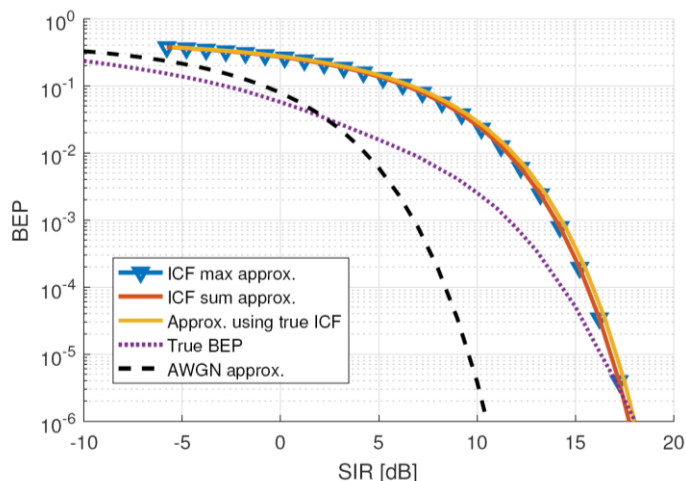
- Sann BEP, (simulerad BEP utan approximationer)
- Approximerad BEP med sann ICF (ICF identifierad från sann BEP)
- BEP från GA.

Enligt [9] fungerar *ICF summa*-metoden för att uppskatta BEP (7) mycket bra för modulationsmetoderna PSK¹ och QAM², för ett antal olika modulationsordningar. Eftersom den föreslagna metoden i detta arbete bygger på liknande underliggande antaganden, begränsas detta arbete till att enbart analysera BPSK³-modulering.

Vi kommer att studera scenarierna med två interferenskomponenter lite mer i detalj. Figur 9 visar simulerad BEP för de två komponenterna i scenario 3, var och en för sig. Komponent 1 är svagt impulsiv, vilket kan ses genom att jämföra med AWGN-kurvan. Komponent 2 är tydligt impulsiv med en tydlig platå i BEP-kurvan. I Figur 10 har BEP för den totala interferensmiljön beräknats med de olika metoderna. Vi kan se att den föreslagna *ICF max*-metoden ger ett resultat mycket nära resultatet framtaget med sann ICF.



Figur 9 BEP för de två komponenterna i scenario 3, var och en för sig.



Figur 10 BEP för den totala interferensmiljön bestående av både komponent 1 och 2 i scenario 3, mha ICF max-metoden (ny metod), ICF summa-metoden (föreslagen i [6]), BEP med sann ICF, sann BEP (simulerad) och BEP med AWGN-approximation.

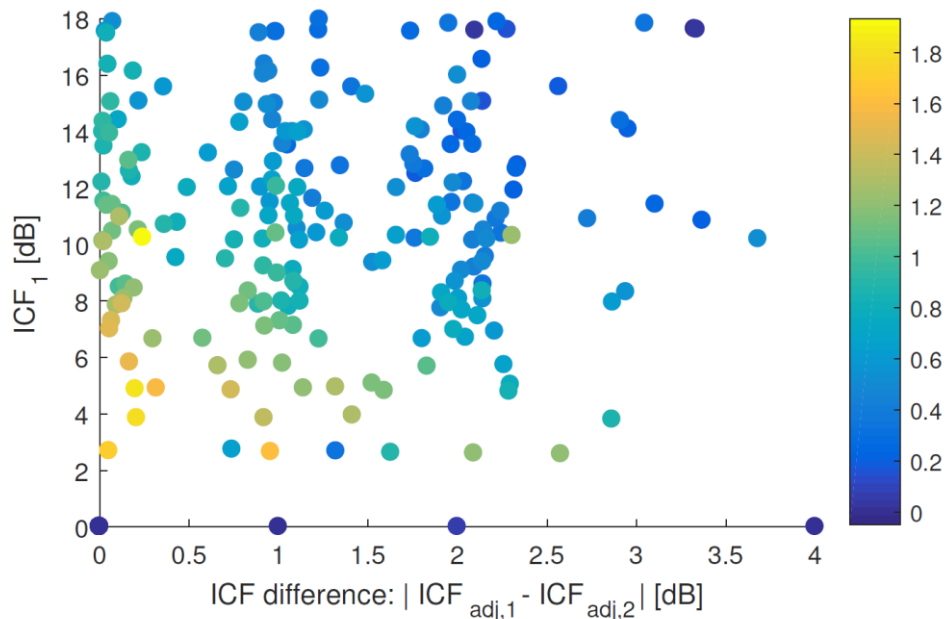
¹ PSK: Phase Shift Keying

² QAM: Quadrature Amplitude Modulation

³ BPSK: Binary Phase Shift Keying

Tabell 2 Effektjusterad ICF för komponenterna, sann ICF för den totala interferensmiljön tillsammans med estimeringsfel för ICF_{max} för de olika interferensscenarierna.

	$ICF_{adj,1}$ [dB]	$ICF_{adj,2}$ [dB]	Sann ICF [dB]	Estimeringsfel för ICF_{max} mot sann ICF [dB]
S ₁	-0.4	-0.3	1.7	1.7
	0.1	-0.9	1.7	1.6
	0.6	-1.5	1.8	1.2
	1.1	-2.9	2.0	0.9
S ₂	-0.3	2.0	2.8	0.8
	0.1	1.4	2.7	1.3
	0.6	0.8	2.6	1.8
	1.2	-0.4	2.3	1.1
S ₃	1.4	7.2	7.5	0.3
	1.9	6.6	7.0	0.4
	2.4	6.1	6.6	0.5
	2.9	4.8	5.6	0.8
S ₄	7.1	7.1	8.3	1.1
	7.6	6.6	8.4	0.8
	8.1	6.0	8.5	0.4
	8.8	4.8	9.0	0.2
S ₅	7.2	9.2	9.7	0.5
	7.5	8.5	9.5	1.0
	8.1	8.1	9.0	0.9
	8.8	6.8	9.1	0.3
S ₆	7.1	14.6	14.6	-0.1
	7.7	13.9	14.1	0.2
	8.1	13.4	13.6	0.2
	8.8	12.2	12.2	0.0
En AWGN-komponent				
S ₇	-3.0	7.3	7.5	0.2
	-1.5	4.7	5.3	0.6
	-1.0	3.1	4.1	1.0
	-0.6	1.7	2.9	1.2
	-0.4	-0.2	1.9	1.9



Figur 11 Estimeringsfel då ICF_{max} skattas för två störningskällor med varierande ICF:er.

Tabell 2 visar den effektjusterade ICF, $ICF_{adj, k}$, för de två komponenterna tillsammans med sann ICF samt det estimeringsfel vi får för ICF_{max} (5). Estimeringsfelet definieras som skillnaden mellan sann ICF (identifierad från BEP-kurvor) och beräknad ICF_{max} med (5), båda i dB. De fall där estimeringsfelet blir mer än 1 dB eller 1,5 dB visas med gul respektive röd färg. Det är tydligt att felen är mycket små för impulsiva störningar (dvs för stora ICF:er). Dessutom blir ICF_{max} -metoden mer exakt ju mer olika källorna är i impulsaktighet. Scenario 7 är ett specialfall med en Gaussisk komponent tillsammans med en impulsiv komponent. Eftersom parametern $ICF_{adj, k}$ även tar hänsyn till den relativa skillnaden i störningseffekt mellan komponenterna kan $ICF_{adj, k}$ bli negativ. Vi kan se att estimeringsfelet håller sig under 2 dB för alla störningsscenarier. Detta gäller även för fallet med mindre impulsiv störning, där den föreslagna approximationen inte förväntas vara lika exakt.

För att studera noggrannheten hos den föreslagna ICF_{max} -metoden har ytterligare ett antal scenarier studerats. I Figur 11 har både komponenternas impulsivitet och den relativa effekten mellan de två störningskomponenter varierats. Figuren visar estimeringsfelet för ICF_{max} (5) för olika värden på ICF_1 och för olika skillnader i ICF för de två komponenterna. Skillnaderna i ICF definieras som skillnaden för den effektjusterade ICF, enligt $|ICF_{adj, 1} - ICF_{adj, 2}|$. ICF_1 är den ICF som tillhör den mest impulsiva komponenten; i dessa scenarier är det alltid komponent 1.

Precis som vi såg i Tabell 2 får vi det största estimeringsfelet då komponenterna har ungefärligen lika värden på sina effektjusterade ICF:er och då komponenterna inte är särskilt impulsiva. Fortfarande är det största estimeringsfelet mindre än 2 dB, och för mer impulsiva störningsfall är estimeringsfelet betydligt lägre än det.

3.4 Tillämpning av den föreslagna metoden

Den föreslagna ICF_{max} -metoden har flera möjliga tillämpningsområden; några av dem beskrivs i detta avsnitt.

3.4.1 Identifiering av värsta störningskälla

I ett verkligt fall med flera störningskällor är det önskvärt att ha ett effektivt sätt att hitta den störningskälla som påverkar en radiomottagare mest. Denna typ av beräkningar eller mätningar är ofta komplexa och tidskrävande. Dessutom behövs information om störningskällans vågform, eftersom vågformen ofta är avgörande för den faktiska påverkan på en mottagare. Möjligheten att bestämma en total ICF för den totala störningsmiljön som det maximala värdet för en av de olika störningskällorna kan nyttjas för att identifiera den värsta störningskällan.

Den föreslagna metoden använder enbart störningseffekten mätt med RMS- och AVG-detektor. Metoden kräver inte mätningar för att skatta störningskällans statistiska fördelning. Metoden utgör ett kraftfullt sätt att analysera störningssituationer, där störningskällorna mäts genom en mätprocess där källor systematiskt slås på och av.

Sammanfattningsvis kan *ICF max*-metoden användas för att identifiera den störningskälla som orsakar störst påverkan på en radiomottagare. Relationen visar att genom att identifiera den effektkorrigerade ICF som är störst, dvs $\max_k(ICF_{adj,k})$, vet vi vilken störningskälla som orsakar störst påverkan i den BEP-region som är aktuell.

3.4.2 Beräkning av BEP för en komplex störningsmiljö bestående av flera störningskällor

Med den föreslagna metoden kan påverkan från en komplex störningsmiljö bestående av många störningskällor bestämmas. Detta görs genom att skatta en ICF för den totala störningsmiljön med *ICF max*-metoden. För att göra det behövs information om de enskilda störningskällornas ICF och medeleffekt, genom dess RMS-värde. De enskilda störningskällornas ICF kan bestämmas genom att olika enheter slås av och på, samtidigt som källans ICF och medeleffekt mäts med hjälp av standarddetektorer på det aktuella frekvensområdet och med samma mätbandbredd som kommunikationssystemet [5].

3.5 Sammanfattning

I detta arbete föreslås en metod för att ta fram en total ICF för en komplex interferensmiljö. Den föreslagna metoden gör det möjligt att utvärdera effekten på ett digitalt kommunikationssystem från olika typer av störningskällor. ICF:en tar hänsyn till vågformen för störningssignalen, vilket är viktigt särskilt för impulsiva signaler. Den föreslagna metoden för att uppskatta ICF:en för den totala miljön utvärderas genom simuleringar och metoden visar sig fungera mycket bra. Skattningen av den totala ICF:en ligger maximalt några få dB från det sanna värdet för alla studerade interferenskombinationer. En stor fördel med den föreslagna metoden är att den bygger på mätningar med enbart standarddetektorer. Störningseffekten mäts med hjälp av en RMS-detektor och ICF:en kan bestämmas med Peak-detektor för varje störningskälla. En annan fördel är att metoden kan hantera både Gaussiska och impulsiva interferenssignaler och ger ett sätt att jämföra deras inverkan. Metoden kan dessutom användas för att identifiera den störningskälla som påverkar mottagaren mest i en komplex interferensmiljö.

4 Portabelt mätsystem för att mäta störningsmiljö

Den elektromagnetiska miljön har stor påverkan på hur väl ett kommunikationssystem fungerar. Dagens avancerade och digitala radiosystem, som kommunikationssystem eller GNSS (Global Navigation Satellite Systems), har ett mycket digitalt beteende. Detta beror på systemens avancerade signalbehandling och felrättning som gör att systemet går från att fungera felfritt till att inte alls fungera och skiftet mellan dessa två stadier kan ske abrupt och till synes utan förvarning.

För att övervaka den elektromagnetiska interferensmiljön har ett interferensmätningssystem, RF-Oculus, utvecklats. Inriktningen har främst varit att mäta interferenser på det civila GNSS-bandet L1.

4.1 Portabelt mätsystem

Grundläggande för övervakningssystemet är att det bör vara automatiserat, portabelt och gärna utvecklat till en låg kostnad. Övervakningssystemet bör kunna genomföra kontinuerlig övervakning, klassificera och rapportera elektromagnetiska interferenser inom ett visst frekvensband.

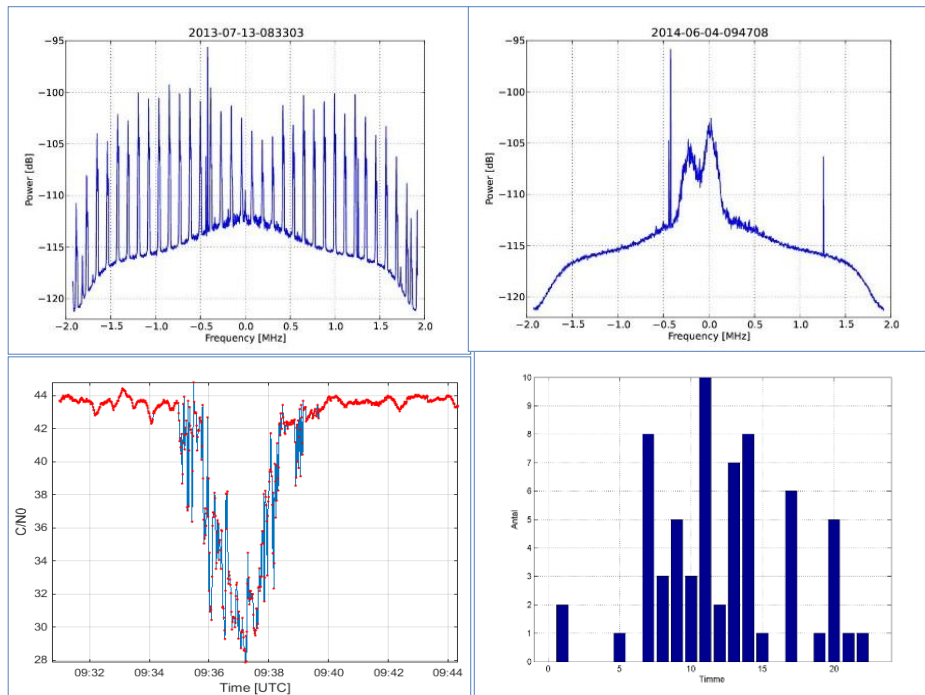
Detektionssystemet som har tagits fram på FOI är baseras på mjukvarudefinierad radio vilket gör systemet flexibelt och kostnadseffektivt. RF-Oculus började utvecklas 2014 och har fram till idag testats i olika miljöer för detektion av interferenser i det civila GPS-bandet på 1575.42 MHz, se Figur 12. Systemet detekterar en interferens innan påverkan på en samlokaliserad GNSS-mottagare kan påvisas.

En version av systemet har provats för ISM⁴-bandet på 433 MHz för detektion av interferenser i bandet [9]. Inom bandet finns bland annat tjänster för trådlösa nycklar till personbilar och styrning av lampor i hemmiljö.



Figur 12 RF Oculus, 20x30x11 cm.

⁴ ISM: Industrial, Scientific and Medical, och är ett olicensierat frekvensband.



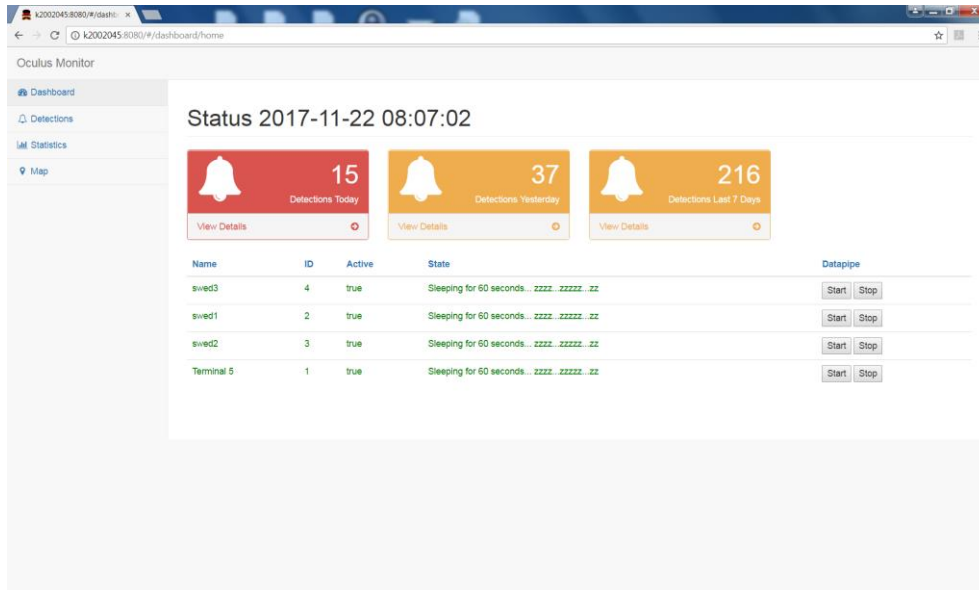
Figur 13 Exempel på resultat ut från RF Oculus.

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

Systemet kan placeras ut och autonomt logga incidenter som förekommer, tidpunkter och effektnivåer. Dessa lagras internt, och efter avslutad mätperiod kan detektionerna analyseras.

Uppkoppling mot en RF-Oculus nod kan ske via en trådlös 3G/4G-förbindelse eller en fast Ethernet-anslutning, och mail kan regelbundet skickas med information om detektioner. Insamlad data kan även hämtas via internetuppkopplingen för mer utförlig analys. Uppdatering av mjukvara och algoritmer kan ske på distans via nätverksuppkoppling. Systemet har visat sig vara driftsäkert och en nod har varit i drift i över 600 dagar utan problem.

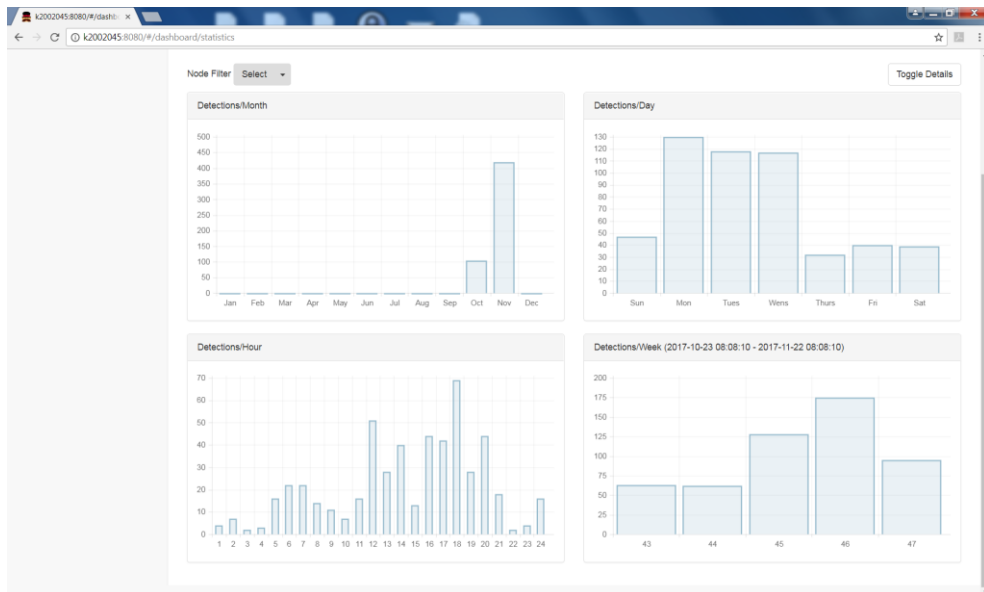
Systemet är nu också utbyggt för att kunna hantera multipla noder geografiskt utspridda i exempelvis ett land eller på en camp. En server hämtar in detektionsdata från flera noder och lagrar information om detektioner på en central databas. Ett webbgränssnitt är framtaget för att enkelt kunna titta på insamlade detektioner från databasen och för att kunna välja exempelvis nod, datum vid presentation, se Figur 14 till Figur 16. Därutöver är en funktion för att exportera insamlad data utanför applikationen också implementerad.



Figur 14 Skärmbild av webgränssnitt, sammanställningsbild



Figur 15 Skärmbild av webgränssnitt, exempel på spektrum för en detektion



Figur 16 Skärmbild av webgränssnitt, exempel på statistik för detektioner

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.

Resultaten från mobila kartläggningar kan redovisas på ett kartunderlag exempelvis via Google Maps för att identifiera områden med förhöjda nivåer av bakgrundsinterferenser tillsammans med positionsinformation.

4.2 Sammanfattning

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

5 Detektionsmetod för att kunna utesluta sporadiska radiosändningar

5.1 Bakgrund

Det portabla detektionssystemet RF-Oculus, som beskrevs i föregående avsnitt, är utvecklat för att mäta störningar i frekvensband där radiosändningar normalt inte förekommer eller där sändningar sker med mycket låg signalstyrka. Dessa frekvensband är så kallade tysta frekvensband. GNSS är exempel på system som använder ett tyst band och nyttosignalen har mycket lägre effekt än den omgivande brusnivån. Mätningar i GNSS-bandet kommer därför uteslutande att bestå av den faktiska interferensmiljön.

Det finns behov av att kunna karakterisera interferensmiljön i radiofrekvensband, där radiosändningar med högre signalstyrka än interferensmiljön sker. Genom att övervaka interferensmiljön, detektera tillfälliga eller långvariga störningsincidenter och klassificera dessa störningssignaler, kan en god kännedom om den miljö radiokommunikationen ska genomföras i erhållas. Med kännedom om den omgivande elektromagnetiska störningsmiljön kan potentiella störningskällor identifieras och rätt åtgärder sättas in för att hantera situationen. Metoden behöver ha låg beräkningskomplexitet eftersom övervakningen ska kunna ske i realtid.

I följande avsnitt beskrivs en metod för att mäta störningsmiljön i frekvensband som sporadiskt används för radiosändningar. Metoden har även rapporterats i [10].

5.2 Försökstillämpning

För att undersöka metodens användbarhet användes mätresultat från RF-Oculus i flygfrekvensbandet vid 133,7 MHz, där meddelanden sänds för att koordinera flygtrafiken. Flygradiosignalen består av en amplitudmodulerad (AM) signal och den förekommer sporadiskt på bandet. Hur ofta dessa sändningar sker beror på flygtrafikens intensitet. Flygradiosignalen har bandbredden 25 kHz och vi kan både spela in och lyssna på signalen för att avgöra om det är en äkta sändning.

5.3 Princip

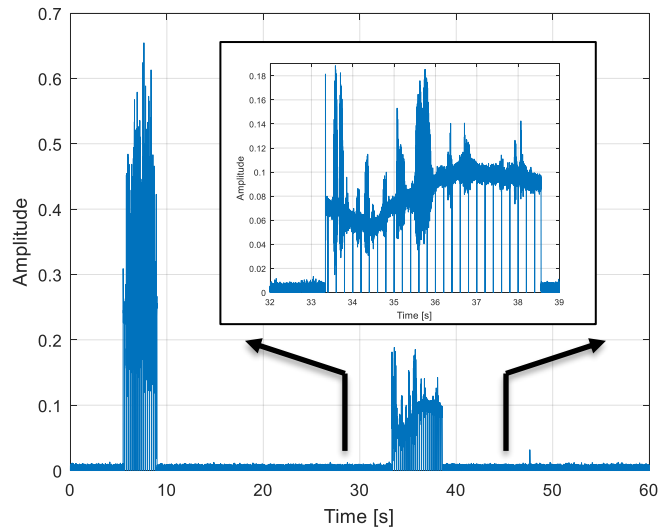
Principen för att kunna analysera interferensmiljön är att detektera de signaler som förekommer på det aktuella frekvensbandet och sedan utesluta de tidsperioder då radiosignalen är närvarande. Då tidsperioder med radiosignaler har uteslutits från den uppmätta signalen kan återstående perioder anses bestå av signaler som kommer från omgivande interferensmiljö. Med radiosignal menar vi radiosignaler som bär information och som har en märkbar signalstyrka. I detta fall är radiosignalen en flygradiosignal som är amplitudmodulerad.

Problemställningen är idealt att bestämma om den mottagna signalen består av en AM-signal blandad med AWGN, eller om den endast består av AWGN när ingen radiosändning sker. Den mottagna signalen $r(t)$ kan därför tecknas som,

$$r(t) = \begin{cases} s(t) + n(t), & \text{när en radiosignal är närvarande} \\ n(t), & \text{när enbart brus är närvarande} \end{cases} \quad (8)$$

där $s(t)$ är den överförda AM-signalen och $n(t)$ är bruset. Problemställningen är densamma som vid så kallad Spectrum Sensing, som används för dynamisk frekvensanvändning.

I Figur 17 visas ett exempel på den uppmätta signalen. Figuren visar en tidssekvens på 60 s där den sporadiska AM-signalen pågår mellan 5-9 s och mellan 33-38 s. Under



Figur 17 Tidssekvens med 60 s inspelad data på 133,7 MHz. Uppförstoringen visar AM-signalen mer detaljerat.

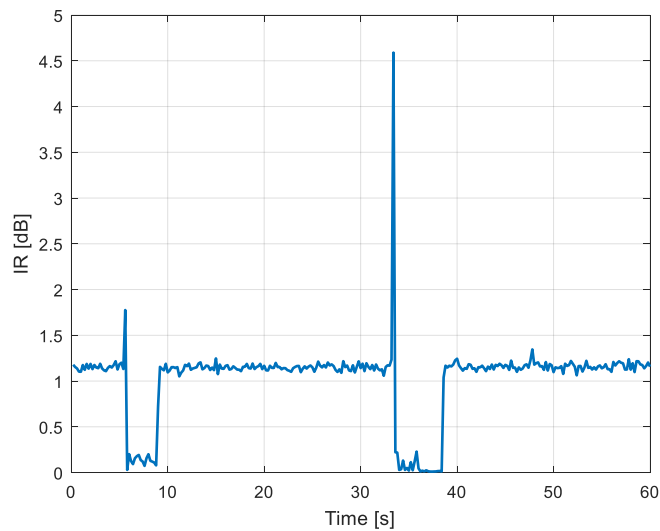
resterande delar finns endast brus och det är den delen vi vill analysera. För tidsintervallet 33-38 s har signalen uppförstorats. I uppförstoringen syns att AM-signalen växlar mellan de högre nivåerna och noll på ett strukturerat sätt. Det är också tydligt att signalamplituden är lägre i den sista överföringen än i den första överföringen. Detta är ett exempel på hur SNR (signalbrusförhållandet) kan skilja mellan olika radiosändningar.

För att identifiera när i tiden AM-signalen finns närvarande används måttet IR (impulsiveness ratio). IR brukar användas för att karakterisera en signals impulsaktighet. IR^{dB} uttryckt i dB definieras som

$$IR^{dB} = 20 \log_{10} \left(\frac{V_{rms}}{V_{average}} \right), \quad (9)$$

där V_{rms} och $V_{average}$ betecknar amplituden mätt med RMS-detektor respektive AVG-detektor, i linjär skala. IR är ett välkänt mått för interferenssignaler och baseras på enkla och standardiserade detektorer. IR har i tidigare arbete visat sig kunna skilja mellan AWGN, modulerade signaler och CW signaler [11].

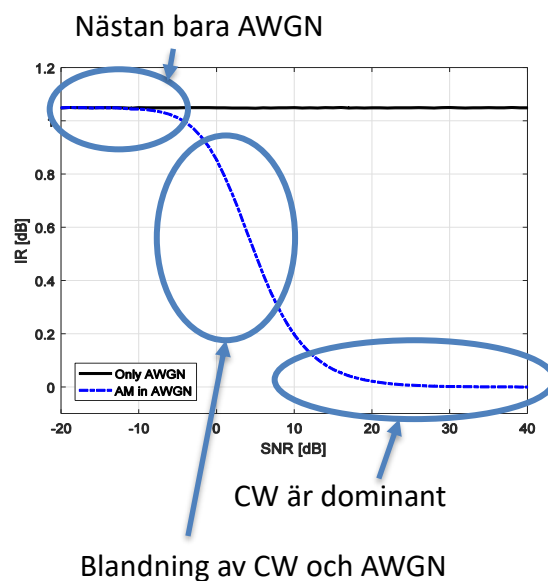
I detta arbete är vi intresserade av att identifiera en AM-signal. Vi definierar nollhypotesen H_0 för fallet när en AM-signal är närvarande. Om signalen består av enbart en CW-signal, vilket vi kan se AM-signalen som, blir $IR = 0$ dB. Den alternativa hypotesen H_1 motsvarar fallet när ingen AM-signal är närvarande och den mottagna signalen består då endast av brus. För en brussignal bestående av AWGN blir $IR = 1,049$ dB. Figur 18 visar IR-nivåer för den tidssekvens som visas i Figur 17. IR har ett relativt konstant värde runt 1,15 dB när ingen AM-signal är närvarande. När AM-signalen dyker upp reduceras IR till ett relativt konstant värde på cirka 0 dB. Transienterna i IR-kurvan uppträder vid tidstillfällena med stor amplitudskillnad, vilka naturligt uppstår i flygradiosignalen då sändning startar respektive avslutas.



Figur 18 IR för 60 s av den inspelade tidssekvensen. IR ligger nära 0 dB när AM-signal är närvarande och nära 1 dB när den inte är närvarande och bruset kan anses vara nära AWGN.

Idén är att pröva de uppmätta nivåerna på IR mot de aktuella hypoteserna. IR-nivåerna jämförs med ett tröskelvärde för att avgöra om det aktuella IR-värdet tillhör nollhypotesen eller den alternativa hypotesen. Genom att välja en lämplig nivå av tröskeln kan sannolikheten för detektion P_D och sannolikheten för falskt alarm P_{FA} varieras efter önskemål.

Figur 19 visar hur IR varierar med SNR. Ju mer brus, desto svårare blir det att upptäcka AM-signalen. I figuren visas IR för de två typsituationerna som beskrivs i (8). När AM-signalen är närvarande varierar IR beroende på det rådande SNR och om bara AWGN finns närvarande är IR konstant. Dessa IR-värden kan även härledas teoretiskt, se [10].

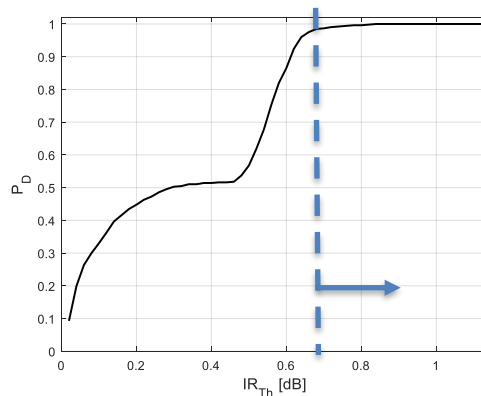


Figur 19 IR visas för AWGN (rak linje) och en AM-signal i brus (varierande med SNR).

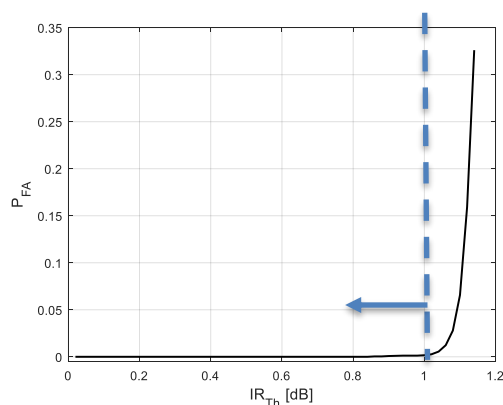
5.4 Utvärdering av metoden

Eftersom ideala detektionsförhållanden förmodligen inte gäller i en riktig detektionssituation är det viktigt att den föreslagna metoden utvärderas på uppmätt data. För detta ändamål har 18 min av en uppmätt tidssekvens på frekvensen 133,7 MHz använts. Tidssekvensen har lyssnats igenom och sampel har manuellt taggats med om en AM-signal finns närvarande eller inte. Denna taggning utgör en form av sanning då den så kallade IR-detektorn ska utvärderas. På samma tidssekvens har IR-nivåer beräknats. IR beräknades på mätdata insamlat under ett 0,2 s långtidsfönster, vilket gav den använda samplingsstorleken 2000. Genom att den s.k. sanningen, om det de facto finns flygradiosändning närvarande, kan korrekt detektion bestämmas. Korrekt detektion används sedan för att bestämma sannolikheten för korrekt detektion (P_D) och sannolikheten för falskt alarm (P_{FA}), och jämförs med IR-detektorns utfall.

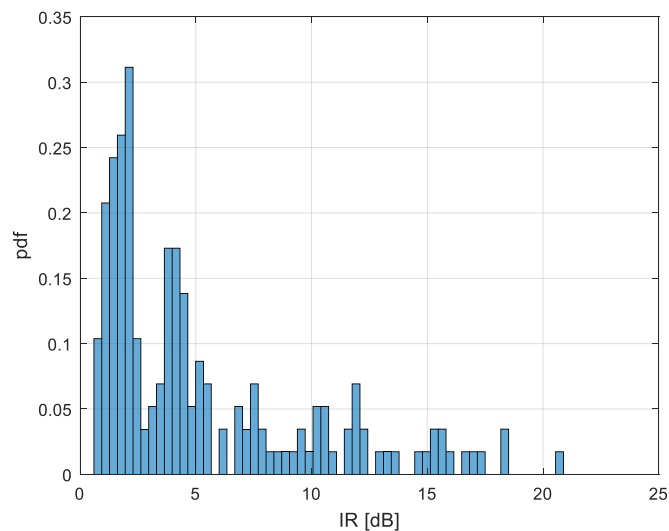
Figur 20 och Figur 21 visar P_D och P_{FA} som funktion av vilket tröskelvärde IR_{Th} som används för att skilja mellan hypoteserna. I Figur 20 kan vi se att IR-tröskeln bör vara minst 0,7 dB för en detektionssannolikhet av åtminstone 99 %. För högre tröskelvärden ökar sannolikheten för korrekt detektion. Samtidigt ser vi i Figur 21 att en IR-tröskel nära 1,15 dB skulle orsaka en hög sannolikhet för falskdetektering, vilket inte är önskvärt. Valet av IR-tröskel bör därför bli en kompromiss. En god kompromiss kan vara att välja ett tröskelvärde som ligger inom intervallet 0,7 dB till 1,0 dB, och i detta fall väljs



Figur 20 Sannolikheten för korrekt detektion (P_D) som funktion av tröskelvärdet (IR_{Th}) på IR.



Figur 21 Sannolikheten för falsklarm (P_{FA}) som funktion av tröskelvärdet (IR_{Th}) på IR.



Figur 22 Täthetsfunktionen för de detekterade IR-nivåerna som uppfyller kravet för väsentlig störning.

tröskelvärde $IR_{Th} = 0,85$ dB. Det bör noteras att måtten P_D och P_{FA} som visas i Figur 20 och Figur 21 är baserade på hela tidssekvensen på 18 minuter där SNR varierar. Detta är orsaken till platån i P_D i Figur 20. Om SNR hade varit högt under hela tidsperioden hade IR_{Th} kunnat sättas till ett lägre värde (eftersom IR för AM-signal blandad med AWGN blir 0 dB för höga SNR). Detta indikerar att om detektorn adaptivt tar hänsyn till rådande SNR skulle tröskelvärdet kunna optimeras ytterligare.

Med hjälp av IR-detektorn kan detektionssystemet identifiera och utesluta delar i en uppmätt signal bestående av AM-signaler. De återstående delarna av signalen kan anses vara brus som kan analyseras. Utvärderingen av den föreslagna metoden visade att den kan detektera radiosändningar i brus med en detektionssannolikhet väl över 99 % och med en falsklarmssannolikhet som ligger mycket nära 0 %. För det aktuella scenariot använder IR-detektorn tröskelnivån $IR_{Th} = 0,85$ dB för klassificering.

Metoden kan utvidgas med att identifiera störningsincidenter. En indikation på att det förekommer en störningsincident är att störningens RMS-värde I_{RMS} överskrider detektionssystemets brusgolv med β dB. Värdet på β bör anpassas till aktuell radiomottagare och systemets toleransnivå mot störning. Här används $\beta = 3$ dBm. I Figur 22 visas täthetsfunktionen för IR-nivåerna på den del av signalen som med hjälp av IR-detektorn klassats som frekvensbandets störningsmiljö (då radiosignalen är borttagen). Figuren visar att den kvarvarande störningsmiljön bland annat består av impulsivt brus, där IR kan vara så hög som nära 21 dB.

Metodens steg kan sammanfattas som:

Steg 1: $IR_{Th} > 0,85$ dB: Beträktas som brus

Steg 2: $I_{RMS} > I_{brusgolv} + \beta$ dBm: Klassificeras som avsevärd störningsincident

Sammanfattningsvis kräver metoden en RMS och en AVG-detektor, vilka båda är standarddetektorer. Detektorsystemet kan även utrustas med andra funktioner, såsom interferensklassificering. Även för detta kan IR-detektorn användas. Eftersom IR_{Th} beror av SNR kan prestandan förbättras ytterligare genom att anpassa IR_{Th} mot skattat SNR. Dessutom kan parametern $I_{brusgolv}$ förbättras så att det inte bara omfattar brusgolvet för mätsystemet utan också tar hänsyn till omgivningsbrusets effektnivå för den uppmätta miljön.

5.5 Sammanfattning

I detta arbete har en metod utvecklats för att analysera radiointerferensmiljön. Metoden är avsedd att användas i det tidigare utvecklade detektionssystem RF-Oculus. Metoden som föreslås anpassar funktionaliteten till att kunna genomföra interferensdetektion i frekvensband där radiosändningar sporadiskt uppträder. I detta arbete utvärderas metoden på frekvensbandet vid 133,7 MHz, som används för flygradiosändningar. Metodens strategi är att upptäcka flygradiosändningarna för att utesluta dessa och sedan analysera kvarvarande delar. Metoden baseras på en IR-detektor, 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 %.

6 Effekten av smalbandig störning mot OFDM-system

6.1 Bakgrund

Orthogonal Frequency Division Multiplex (OFDM) används i flera moderna trådlösa system. Exempel på detta är mobiltelefonistandarden 4G (Long Term Evolution (LTE)) och nästa generations mobiltelefonistandard, 5G, standarden för trådlösa lokala nätverk (WLAN) IEEE 802.11, Digital Audio Broadcasting (DAB) och Digital Video Broadcasting (DVB). En av anledningarna till den växande användningen av OFDM är behovet av hög datahastighet i kombination med en varierande kanal. För att uppnå höga kommunikationsdatahastigheter är vanligtvis intersymbolinterferens (ISI) ett oundvikligt problem på grund av den interferens som kan uppstå mellan symboler. Genom att använda OFDM undviks detta problem. I OFDM delas den använda bandbredden upp i många smalbandiga kanaler, så kallade underbåvågor, vilket gör att en dataström med hög datahastighet kan sändas över flera parallella underbåvågor med lägre datahastighet. Den lägre datahastigheten tillsammans med en infogad skyddstid (eng. guard time) mellan varje OFDM-symbol minskar risken för ISI.

Underbåvågorna är fördelade över frekvensbandet så att de överlappar varandra något, men på ett kontrollerat sätt. Underbåvågornas placering i frekvens gör att kanalerna blir ortogonala och inte stör varandra. En annan fördel med OFDM-tekniken är att den enkelt kan implementeras med hjälp av en FFT (Fast Fourier Transform)-operation. En allmänt känd nackdel med OFDM-tekniken är det i mottagaren kan uppstå ett högt s.k. peak-to-average-power-ratio (PAPR)-värde. Det betyder att signalen kan variera kraftigt i amplitud, vilket innebär att det kan uppstå olinjära effekter i mottagaren och därmed skapa störningar i systemet.

En annan nackdel är OFDMs sårbarhet mot smalbandig störning, exempelvis kontinuerliga signaler (eng. continuous wave, CW). I [12] visas ett exempel på hur smalbandig störning påverkar OFDM. Undersökningen baseras på en teoretisk analys och simuleringar av ett kommunikationssystem som utsätts för störande CW-signaler. Arbetet visar att kommunikationsprestanda är starkt beroende av var den smalbandiga störningen är placerad i frekvens mellan två underbåvågor. I [12] visas att effekten av en CW-interferens som stör en underbåvåg måste vara ca 18 dB lägre än motsvarande störning med additivt vitt Gaussiskt brus (Additive White Gaussian Noise, AWGN) för att inte överstiga en bitfelsannolikhet (BEP) på 10^{-5} . Således är ett OFDM-system väsentligt mera känsligt mot en CW-störning än för bredbandig AWGN. Detta är viktigt att beakta vid systemdesign och när nya gränsvärden ska utvecklas för tillåten emission. Eftersom interferenstypen (CW eller AWGN) och frekvensberoendet inte beaktas i dagens emissionskrav behövs ytterligare arbete för att utveckla en strategi för hur man hanterar denna felmatchning i sårbarhetsanalyser. I detta kapitel sammanfattas översiktligt resultaten från [12].

6.2 Analys av smalbandig störning mot OFDM

Som beskrevs i föregående avsnitt spelar det stor roll var i frekvens en smalbandig störning placeras. Orsaken till det är OFDM-signalens sammansättning med underbåvågor. Underbåvågorna är placerade så att de är ortogonala mot varandra. I analysen studeras speciellt effekten av att CW-signalen placeras antingen på eller någonstans mellan två underbåvågor. För detta ändamål definieras parametern α , som är den frekvenskillnaden mellan CW-signalen och den underbåvåg som ligger närmast. Om $\alpha = 0$ är CW-signalen placerad direkt på en av underbåvågorna och är därför ortogonal

mot övriga underbärvågor, men om $\alpha \neq 0$, är CW-signalen placerad mellan två underbärvågor och är därmed inte ortogonal till övriga underbärvågor.

I [12] framgår att om $\alpha = 0$, hamnar hela störningseffekten från CW-signalen endast på en underbärvåg. Om CW-signalen istället är placerad någonstans mellan två underbärvågor ($\alpha \neq 0$), förstörs ortogonaliteten och interferensen kommer att spridas ut på flera underbärvågor då signalen genomgår FFT-operationen i mottagaren. Detta skapar sedan störningar på flera symboler än om $\alpha = 0$.

Det finns emellertid en situation då systemet kan ha problem när en CW-signal är placerad exakt på en underbärvåg. Det är då en CW-signal hamnar på en av systemets referenssignaler, [13]. Informationen som erhålls från referenssignalerna används för kanalestimering och om denna störs kan alla de underbärvågor som referenssignalen stöder störas.

Nedan visas några exempel på hur prestandamåttet för digitala radiosystem BEP påverkas av:

- En CW-signal, placerad antingen på en underbärvåg eller mellan två underbärvågor.
- CW-signaler på alla underbärvågor (hela systembandbredden), och då CW-signalerna har osynkroniserad fas
- AWGN över hela systembandbredden.

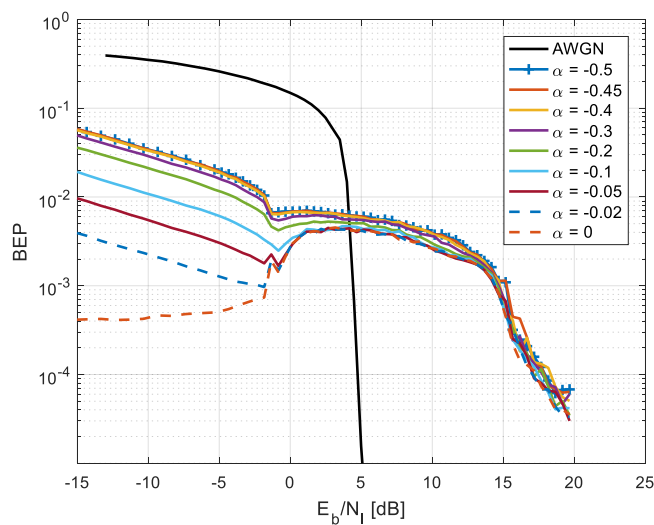
Simuleringarna som har använts för att utvärdera smalbandig störning mot OFDM är genomförda för ett OFDM-system som har parametrar som liknar LTE, se Tabell 3.

Effekterna av var CW-signalen placeras i frekvens kommer att analyseras i termer av BEP för olika typer av interferenssignaler. Resultaten jämförs med fallet då systemet störs av AWGN. Det är i synnerhet skillnaden i E_b/N_1 som studeras för ett BEP-krav på 10^{-5} . Skillnaden i E_b/N_1 visar om systemet är mer känsligt för en viss typ av interferenssignal. Det bör noteras att dagens emissionskrav inte tar hänsyn till interferenssignalens karaktär och i många mätningar är det enbart effektens RMS- eller Peak-värdet som mäts.

I Figur 23 presenteras BEP för olika E_b/N_1 för ett kodat OFDM-system med parametrar enligt Tabell 3. I simuleringen antas att CW-signalen är placerad antingen på en underbärvåg eller mellan två underbärvågor, varieras här med parametern α . För E_b/N_1 mindre än -1 dB är det en väsentlig skillnad i påverkan beroende på var i frekvensen CW-signalen ligger. Den största försämringen i BEP uppträder när CW-signalen är belägen exakt mellan två underbärvågor, dvs när $\alpha = -0,5$. När $E_b/N_1 > -1$ dB försvinner skillnaden. För $E_b/N_1 > -1$ dB och upp till $E_b/N_1 = 5$ dB blir dessutom BEP tillfälligt sämre. Detta beror på de svårigheter som Turbo-avkodaren får på grund av att störningseffekten varierar under avkodningsprocessen.

Tabell 3 LTE-parametrar, använda i simuleringarna.

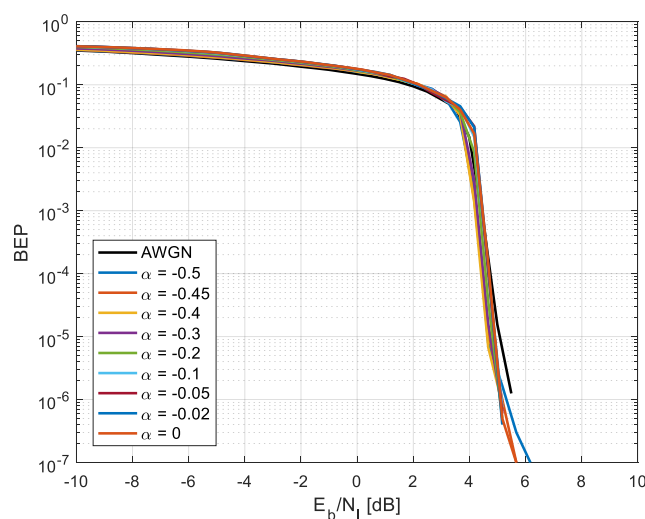
Parameter	Värde
Bandbredd	20 MHz
FFT-storlek	2048
Antal underbärvågor	1200
Felrättande kod	Turbokod
Kodtakt	1/3
Modulationstyp	64QAM



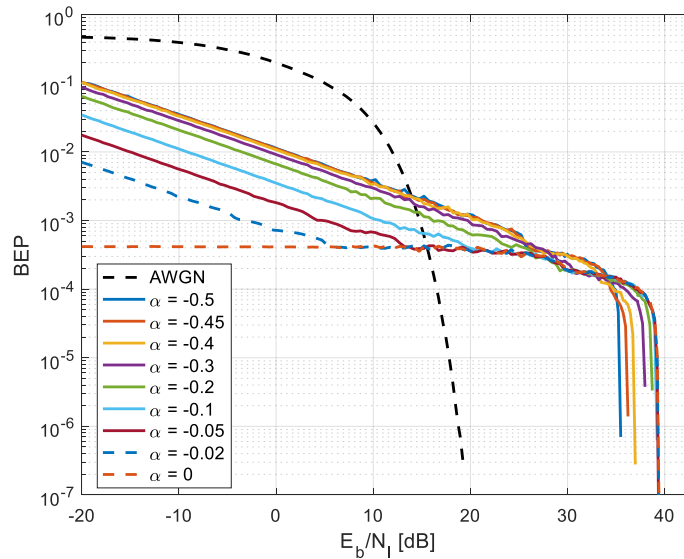
Figur 23 BEP som funktion av E_b/N_1 då systemet är utsatt för en CW-signal α från en underbärvåg.

När OFDM-systemet utsätts för en CW-signal som är placerad på en underbärvåg uppträder interferensen som en impulsaktig interferens då signalen kommer in i avkodaren. Detta visar sig genom att BEP-kurvan har ett plåtå-liknande utseende. Figuren visar också att AWGN orsakar större påverkan än CW-signalen för $E_b/N_1 < 5$ dB. För större E_b/N_1 orsakar CW-interferensen istället betydligt värre påverkan än vad AWGN gör. För $\text{BEP} = 10^{-5}$, vilket är ett BEP-krav som vanligtvis används för dataöverföring, är skillnaden i E_b/N_1 mellan AWGN och CW cirka 18 dB. Det bör noteras att den faktiska skillnaden i E_b/N_1 beror på den använda kodens parametrar.

För situationen när störningen består av flera osynkroniserade CW-signaler, i detta fall lika många som antalet underbärvågor, är BEP snarlik den vi får om systemet störs av AWGN. Detta presenteras i Figur 24, vilken visar den resulterande BEP då OFDM-systemet störs av flera osynkroniserade CW-signaler. CW-signalerna har då slumpmässig fas. Med många osynkroniserade CW-signaler beror BEP inte längre på α utan BEP liknar det BEP som erhålls då systemet störs av en bredbandig AWGN-signal som ligger över hela systembandbredden.



Figur 24 BEP som funktion av E_b/N_1 då systemet är utsatt för flera CW-signaler α från en underbärvåg.



Figur 25 BEP som funktion av E_b/N_1 för ett okodat system (64-QAM, hårda beslut), då detta system är utsatt för en CW-signal α från en underbärvåg.

I Figur 25 visas BEP för ett okodat system som utsätts för störning från en CW-signal. I detta fall antas att demodulatorn tar hårda beslut. Här är det uppenbart att interferensen efter FFT beter sig som en impulsaktig interferens och det är tydligt att BEP skiljer sig väsentligen från fallet med AWGN. BEP-kurvorna får det karakteristiska beteendet av impulsaktig störning med en tydlig plattå ungefärligen vid $1/(2N)=1/2400$ (N är antalet underbärvågor som bär information) för låga E_b/N_1 och en betydligt större påverkan än för AWGN för höga E_b/N_1 . För en BEP på 10^{-5} är skillnaden i E_b/N_1 mellan AWGN och CW cirka 18 dB.

Sammanfattningsvis visas för både kodade och okodade system i [12] följande:

- Påverkan från en CW-signal (en smalbandig störning) orsakar väsentligt värre påverkan på ett OFDM-system än många CW-signaler eller AWGN med samma störningseffekt, för $BEP < 10^{-3}$. För $BEP = 10^{-5}$ är skillnaden i E_b/N_1 mellan AWGN och en CW ungefär 18 dB.
- Påverkan från en störande CW-signal är kraftigt kopplat till om den placeras exakt på en bärvåg eller mellan bärvågor, α .

6.3 Sammanfattning

De presenterade resultaten i [12] visar att placeringen för en CW-störning kan ha en avgörande betydelse på hur ett OFDM-system påverkas. Arbetet visar även att en CW-störning orsakar väsentligt större påverkan än flera CW-signaler eller AWGN som stör över hela systembandbredden i regionen där $BEP < 10^{-3}$. Det betyder att ett OFDM-system är betydligt mer känsligt för en CW-störning än för bredbandig AWGN-störning eller störning från flera CW-signaler. Exempelvis måste en CW-störning ha omkring 18 dB lägre störningseffekt än bredbandig AWGN-störning eller störning från flera CW-signaler, vid kravet att BEP ska vara 10^{-5} . Eftersom OFDM-baserade system används i en mängd olika trådlösa system bör denna sårbarhet övervägas i emissionsmätningar och i utvecklingen av kommande emissionskrav.

7 Referenser

- [1] S. Örn Tengstrand, E. Axell, K. Fors, S. Linder, K. Wiklundh, "Efficient evaluation of communication system performance in complex interference situations," i Proc. International Symposium on EMC (EMC Europe), 2017.
- [2] P. F. Stenumgaard, "A Simple Impulsiveness Correction Factor for Control of Electromagnetic Interference in Dynamic Wireless Applications," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 10, no. 3, pp. 147–149, Mar. 2006.
- [3] K. M. Fors, K. C. Wiklundh, and P. F. Stenumgaard, "Improved impulsiveness correction factor for controlling electromagnetic interference in dynamic spectrum access applications," *IET Communications*, 2010.
- [4] K. Fors, K. Wiklundh, and P. F. Stenumgaard, "On the Impulsiveness Correction Factor for Estimation of Performance Degradation of Wireless Systems in Middleton's Class A Interference," i Proc. International Symposium on EMC (EMC Europe), 2012.
- [5] K. Fors, K. C. Wiklundh, and P. F. Stenumgaard, "A Simple Measurement Method to Derive the Impulsiveness Correction Factor for Communication Performance Estimation," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, 2013.
- [6] S. Örn Tengstrand, E. Axell, and P. Eliardsson, "Approximations of BEP for Multiple Impulse Noise Sources," i Proc. International Symposium on EMC (EMC Europe), 2016.
- [7] D. Middleton, "Non-Gaussian noise models in signal processing for telecommunications: new methods and results for class A and class B noise models," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 45, no. 4, pp. 1129–1149, May 1999.
- [8] ———, "Statistical-physical models of electromagnetic interference," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 19, no. 3, pp. 106–127, Aug. 1977.
- [9] P. Eliardsson, B. Gabrielsson, M. Alexandersson, K. Fors, P. Stenumgaard, "Electromagnetic Environment Mapping for the Assessment of Critical Wireless Services in ISM Bands," i Proc. International Symposium on EMC (EMC Europe) 2015.
- [10] K. Fors and K. Wiklundh, "A detection method for interference measurements in partly occupied radio frequency bands," i Proc. International Symposium on EMC (EMC Europe), 2017.
- [11] B. Gabrielsson, K. Fors, P. Eliardsson, M. Alexandersson and P. Stenumgaard, "A portable system for autonomous detection and classification of electromagnetic interference in the GPS band," i Proc. International Symposium on EMC (EMC Europe), 2014.
- [12] K. Fors, K. Wiklundh and P. Stenumgaard, "On the mismatch of emission requirements for CW interference against OFDM systems," accepterad för publicering i *IEEE Trans. of Electromagn. Compat.*, 2018.
- [13] ETSI TS 136 211, LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation (3GPP TS 36.211 version 10.0.0 Release 10).
- [14] "Elektromagnetisk miljö användarhandbok – EMMA," Försvarets Materielverk M7773-000750.

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