



Radiosystem med multifunktion

EMA BECIROVIC, LEIF FESTIN,
KRISTOFFER HÄGGLUND OCH JAN NILSSON

Ema Becirovic, Leif Festin, Kristoffer
Hägglund och Jan Nilsson

Radiosystem med multifunktion

Titel	Radiosystem med multifunktion
Title	Multifunctional radio systems
Rapportnummer	FOI-R--5566--SE
Månad	December
Utgivningsår	2023
Antal sidor	29
ISSN	1650-1942
Uppdragsgivare	FOI
Forskningsområde	Telekrig
FoT-område	Inget FoT-område
Projektnummer	A50001
Godkänd av	Christian Jönsson
Ansvarig avdelning	Telekrig

Detta verk är skyddat enligt lagen (1960:729) om upphovsrätt till litterära och konstnärliga verk, vilket bl.a. innebär att citering är tillåten i enlighet med vad som anges i 22 § i nämnd lag. För att använda verket på ett sätt som inte medges direkt av svensk lag krävs särskild överenskommelse.

This work is protected by the Swedish Act on Copyright in Literary and Artistic Works (1960:729). Citation is permitted in accordance with article 22 in said act. Any form of use that goes beyond what is permitted by Swedish copyright law, requires the written permission of FOI.

Sammanfattning

En generellt radiosystem som är baserat på mjukvaruradio kan principiellt användas för flera funktioner, så som kommunikation, radar, störning samt andra telekrigsfunktioner. Att introducera multifunktion på flera radioenheter innebär för telekrig en distribuerad förmåga vilket kan användas som komplement till de klassiska, specialiserade, enheterna som idag används för telekrig.

Den här rapporten definierar innebörden av radiosystem med multifunktion och presenterar en överblick av publicerade arbeten inom ämnet. Studien av forskningsfronten visar att tillämpningar inom autonoma fordon driver forskningen av samtidig kommunikation och avkänning vilket leder till att den största mängden publikationer rör dessa områden. På senare år har det däremot publicerats fler artiklar där kommunikation och telekrigsfunktioner samverkar vilket visar att området är intressant för forskningsvärlden och troligtvis kommer fortsätta vara det framöver.

För militära tillämpningar kan multifunktion realiseras både i enskilda noder och i system av samverkande noder, ett system med distribuerad telekrigsfunktionalitet. I fallet enskilda noder ser vi i första hand möjligheten att integrera spaningsfunktioner där varje nod självständigt ska kunna upptäcka en signal, avgöra om den utgör ett hot och helst också avgöra varifrån hotet kommer. Ett system med distribuerad telekrigsfunktionalitet ska dessutom kunna beräkna positioner, identifiera, följa, skapa och dela lägesbild. Systemet ska även kunna identifiera vilken kommunikation som ska störas, samt koordinera störinsats från olika noder.

Nyckelord

multifunktion, radiosystem, full duplex

Abstract

A general radio system that is based on software-defined radio can in principle be used for multiple functions, such as communication, radar, jamming and other electronic warfare functions. Introducing multiple functions on more radio units would lead to a distributed electronic warfare capability which can be used as a complement to the traditional, specialized, electronic warfare units used today.

This report defines the meaning of multifunctional radio systems and presents an overview of published works in the field. A study of the research front shows that applications in autonomous driving is the driving force in the research on joint communication and sensing which leads to that the bulk of the research concerns these topics. However, in later years, more papers have been published on joint communication and electronic warfare functions which shows that the topic is interesting for the research community and will continue to be so.

In military applications, multifunction can be realized in a singular node as well as in a system of nodes, a system of distributed electronic warfare functionality. On a single-node level, the first priority should be to integrate electronic support, so that each single node independently should be able to detect and decide whether a signal is a threat, and from which direction it arrives. A system of distributed electronic warfare functionality should also be able to calculate positions, identify, track, create and share a situational picture. The system should also be able to identify what communication should be jammed and also coordinate electronic attack from several different nodes.

Keywords

multifunction, radiosystems, full-duplex

Innehåll

1	Introduktion	7
1.1	Syfte	7
1.2	Begränsningar	7
1.3	Läsanvisningar	7
2	Multifunktion	9
2.1	Vad är multifunktion?	9
3	Omvärldsbevakning	13
3.1	Kommunikation och störning	13
3.2	Kommunikation och vilseledning	14
3.2.1	Förtäckt kommunikation	14
3.3	Kommunikation och signalspaning	15
3.4	Störning och signalspaning	15
3.5	Kommunikation och avkänning	16
3.5.1	Översiktsartiklar	17
3.5.2	Fundamentala gränser	18
3.5.3	Flerantennsystem	18
3.5.4	OFDM	19
3.6	Full duplex	20
3.7	Fysiska system	21
4	Slutsatser	23
	Litteraturförteckning	25

1 Introduktion

Moderna radiosystem baseras i allmänhet på mjukvaruradio, vilket är relativt enkelt att använda för olika typer av sändning och mottagning genom modifiering av mjukvara. Det innebär att en generell radiomottagare i princip kan användas för kommunikation, telekrig och radar samt kombinationer av dessa. Inom civil forskning och utveckling, till exempel av sjätte generationens (6G) mobilsystem, är exempelvis gemensam kommunikation och avkänning (det vill säga radarliknande tillämpningar, se avsnitt 2.1 för en mer specifik definition), på engelska *joint communication and sensing* (JCAS), ett område där det pågår intensivt arbete.

För militär tillämpning är kombinationen av radiokommunikation och telekrig (både störning och signalspaning) av stort intresse. Även moderna militära radiosystem är till stor del baserad på mjukvara vilket gör att sådan kombinerad funktion rent tekniskt bör kunna implementeras. Under det senaste året har flera översiktliga publikationer där kommunikation och telekrigsfunktioner integreras i samma system publicerats. Fördelen är att öka den gemensamma nyttan av båda systemen.

1.1 Syfte

Syftet med rapporten är undersöka vad som finns gjort i den öppna litteraturen inom området radiosystem multifunktion. Arbetet har också som syfte att klassificera de möjliga olika fallen av multifunktion och den pågående forskningen. Målet är att orientera andra forskare på FOI som i framtida arbeten kommer arbeta med multifunktion.

1.2 Begränsningar

Begränsningar med arbetet är att litteraturstudien endast berör arbeten som är publicerade i öppna källor. Eftersom ämnet är brett är det svårt att uttömmande beskriva området i detalj, därför beskrivs bara ett urval av intressanta arbeten. För mer detaljer hänvisar vi till de citerade referenserna.

1.3 Läsanvisningar

Kapitel 2 introducerar multifunktion, motiverar användningen av det samt klassificerar multifunktion i olika kategorier som sedan används i den resterande rapporten. Kapitel 3 presenterar en kartläggning av arbeten från den öppna litteraturen i de olika fallen av radiosystem med multifunktion som tagits fram i kapitel 2 samt presenterar några realiserade, fysiska system som använder multifunktion. Slutligen sammanfattas rapporten i kapitel 4 med slutsatser och förslag på framtida arbete.

2 Multifunktion

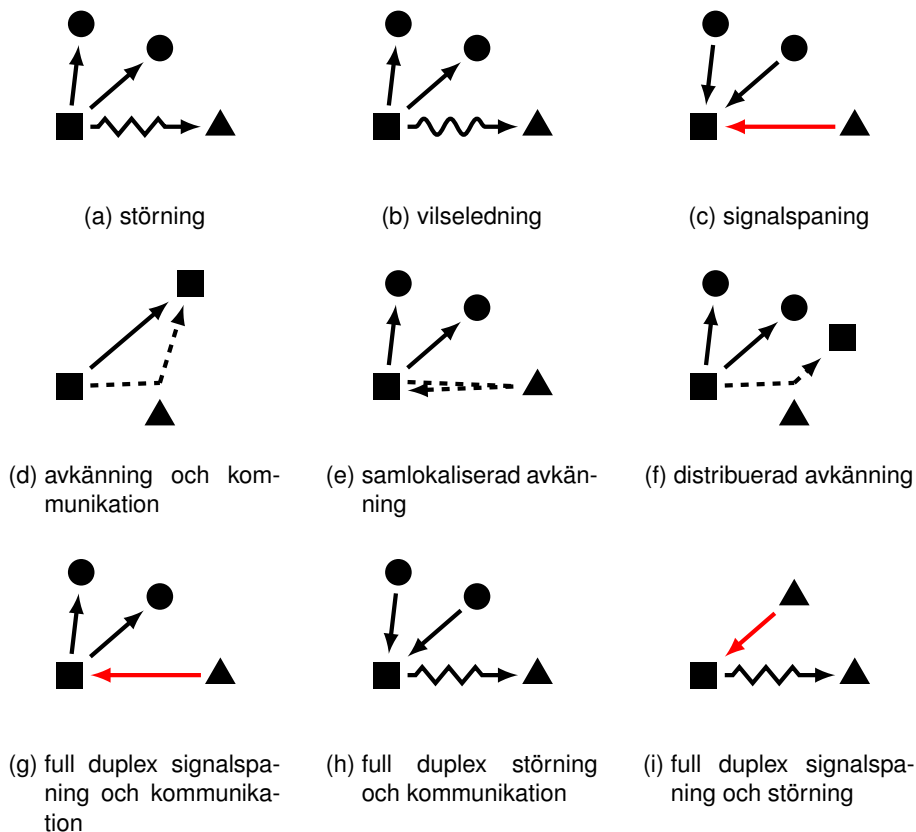
Generellt är ett dedicerat system bättre på sin uppgift än ett system utvecklat med sikte på att utföra många olika uppgifter – ett multiverktyg. Men ett multiverktyg kan ändå ha sin givna plats då en viss förmåga kan få större spridning. Multifunktionsradio handlar mycket om att få ut mer av befintlig utrustning och att sprida förmåga. För en modern digital kommunikationsradio är det till exempel inte rimligt att den använder 100 % av tillgänglig tid för att sända eller ta emot nyttsignaler. Kan man bygga någon form av enklare spaning och störning i befintlig kommunikationsutrustning så har vi ett distribuerat komplement till de mer specialiserade högpresterande enheter som klassiskt används för telekrig. Några exempel på när man kan ha taktisk nytta av multifunktion är att möjligheten till tidig upptäckt och egenskydd ökar. Till exempel så kan en enklare distribuerad spaningsförmåga vara gynnsam för upptäckt av drönarkommunikation. Ett exempel på nytta av att störa och kommunicera samtidigt är kolonnkörning under hot av radioutlösta vägbomber. Ett annat exempel är en stridssituation där man vill störa fiendlig kommunikation samtidigt som man upprätthåller egen kommunikation. Detta var några exempel på där den spridning av telekrigsförmåga som kan uppnås med multifunktionsradio kan öka Försvarens förmåga och öka soldatens överlevnadschanser.

Intresset för system där kommunikation och telekrig är integrerat har det senaste året påvisats i den öppna litteraturen. I [1] motiveras att kommunikation och störning bör integreras i samma system för att öka den gemensamma nyttan av båda systemen. Framför allt diskuteras fördelar och möjligheter med ett samverkande system. Författarna tar idén vidare i [2] där avkänning explicit (se avsnitt 2.1 för en specifik definition) adderas till systemet. I [2] beskrivs ett högre koncept där systemet ha ett helhetsperspektiv där alla delar utnyttjas på ett semantiskt (kognitivt) sätt för att hjälpa med olika uppgifter. Vidare beskrivs möjliga tekniker för realisering av ett komplett integrerat kommunikations- och telekrigssystem.

2.1 Vad är multifunktion?

Radiosystem med multifunktion betyder i den här rapporten en enskild radio, där radion i sig har förmåga att sända eller ta emot en eller flera vågformer som sedan används för flera funktioner. Funktionerna är i den här rapporten en av kommunikation, störning, spaning eller *avkänning*. Dessa funktioner är inte entydigt definierade så ett visst överlapp kan förekomma mellan dem, speciellt mellan spaning och avkänning. Avkänning är en radarliknande funktion som inkluderar skattning av alla parametrar, utom kommunikationsinformationen från sändaren, som en mottagare kan inferera från en mottagen signal, inklusive hastighet och avstånd av olika mål, som i radar, men också till exempel bäringen till sändaren.

Alla noder i ett nätverk där en multifunktionsradio ingår behöver i sig inte vara multifunktionsradior. Olika fall av multifunktion visas i figur 1 där ■ är en nod där huvudsaken av signalbehandlingen för multifunktionen sker, ● är en nod som endast kommunicerar och ▲ är en motsändarnod som ska störas ut eller spanas av. Kommunikationsnoderna, ● är generiska, de skulle kunna vara multifunktionsradior eller "vanliga" radioapparater. Notera att fallen i figur 1 inte är uttömmande. I fallen som beskrivs i figur 1g, 1h och 1i sker funktionerna



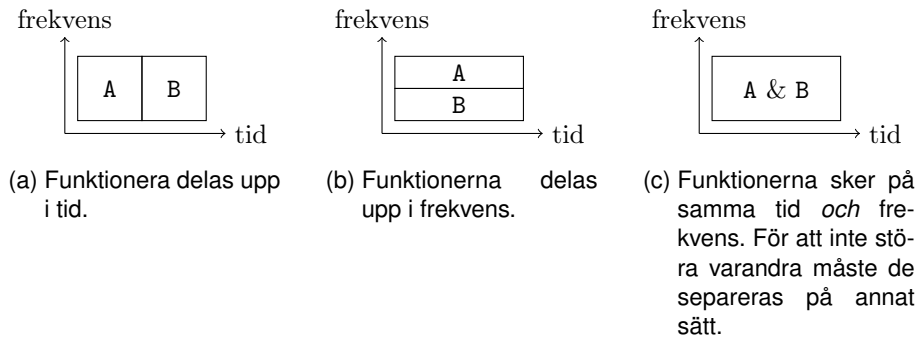
Figur 1: Olika typer av multifunktion. ■ är en nod där huvudsaken av signalbehandlingen för multifunktionen sker, ● är en nod som endast kommunicerar och ▲ är en motsändarnod som ska störas ut eller spanas av.

samtidigt på samma resurser, så kallad full duplex. Full duplex kan ses som ett sätt att effektivisera multifunktion då två funktioner kan utföras samtidigt på samma frekvens med en sänd-mottagare. Med full duplex sker sändning och mottagning samtidigt och på samma frekvens.

De gemensamma resurserna som funktionerna använder kan delas upp på ett antal olika sätt, se figur 2. Funktionerna kan antingen ske på samma frekvens men vid olika tid, figur 2a, samma tid men vid olika frekvens, figur 2b, eller vid samma tid och frekvens, figur 2c. Riktningen, det vill säga om en enhet skickar eller tar emot, på varje funktion bestäms av vilken funktionen är. (In-band) full-duplex multifunktion sker per definition enligt figur 2c där den ena funktionen sker i upplänk och den andra i nedlänk till enheten.

När de olika funktionerna sker vid samma tid och frekvens (figur 2c) bör funktionerna separeras på något annat vis för att undvika att de interfererar med varandra. Till exempel kan separationen ske spatiellt genom lobformning eller över kod likt CDMA (eng. Code Division Multiple Access). Fallen i figur 1 är ritade som om de sker vid samma tid och frekvens.

När funktionerna sker vid samma tid och frekvens handlar problemställningarna vanligtvis om att "samsas" om uteffekten och på vilket sätt som funktionerna kan separeras. Det ställs ofta upp som optimeringsproblem där där målfunktionen för en av funktionerna maximeras under ett bivillkor att den andra



Figur 2: Två *funktioner*, A och B, kan separeras i tid och frekvens på olika sätt.

funktionen fungerar tillfredsställande, alltså

$$\underset{\boldsymbol{\theta}}{\text{minimize}} \quad F(\boldsymbol{\theta}) \quad (2.1a)$$

$$\text{subject to} \quad Q(\boldsymbol{\theta}) > q \quad (2.1b)$$

$$g_i(\boldsymbol{\theta}) > 0, \quad i = 1, \dots, M \quad (2.1c)$$

där $\boldsymbol{\theta}$ är optimeringsvariablerna, $F(\boldsymbol{\theta})$ är målfunktionen för den ena av multifunktionerna, $Q(\boldsymbol{\theta})$ är prestandamåttet på den andra av multifunktionerna så att (2.1b) innebär att den andra funktionen håller en minsta prestandanivå q och $g_i(\boldsymbol{\theta})$ är andra bivillkor. Till exempel så skulle optimeringsproblemet kunna vara att maximera störeffekten vid en motståndarnod med bivillkoret att information med en viss takt ska kunna avkodas vid den legitima noden.

3 Omvärldsbevakning

I det här kapitlet presenteras en översikt av arbeten inom ämnet radiosystem med multifunktion. Mer specifikt presenteras de olika fallen från figur 1 i lite närmare detalj. Avsnitt 3.1 beskriver kombinerad kommunikation och störning (figur 1a), avsnitt 3.2 beskriver kombinerad kommunikation och vilseledning (figur 1b), avsnitt 3.3 beskriver kombinerad kommunikation och signalspaning (figur 1c) och avsnitt 3.4 presenterar kombinerad störning och signalspaning (ej utritad i figur 1). De typerna av multifunktion som inte är så hårt knutna till klassiskt telekrig: kombinerad kommunikation och avkänning (figur 1d-1f) och full-duplex (figur 1g-1i) beskrivs i avsnitt 3.5 respektive avsnitt 3.6. Till slut, i avsnitt 3.7, presenteras några exempel där radiosystem med multifunktion har realiserats.

3.1 Kommunikation och störning

Kombinerad kommunikation och störning innebär att en sändare samtidigt kommunicerar med en eller flera noder samtidigt som den stör ett mål. För att inte skada den legitima kommunikationen kan störningen till exempel separeras i tid, frekvens, kod, spatiellt, vågform och polarisering. Ett sätt att angripa detta problem är att ställa upp det som ett optimeringsproblem, där målfunktionen är att maximera legitim takt med bivillkoret att en viss störningseffekt (interferensen hos motståndaren) uppnås, eller, målfunktionen är att maximera störningseffekten med ett bivillkor att vi har en viss legitim kommunikationstakt. En viss del av störnsignalen kommer läcka till den legitima kommunikationsnoden och bör alltså tas i beaktning när dessa två problem löses.

En viktig aspekt som måste beaktas är att om kommunikation och störning skickas i samma vågform, får inte noden som är utsatt för störningen kunna avkoda den legitima kommunikationen. Därför brukar en metrik som heter hemlighetstakt (eng. secrecy rate) eller hemlighetskapaletet (eng. secrecy capacity) användas. Hemlighetskapaleteten är definierad som [3], [4]

$$C_S = \max \{C_L - C_M, 0\}, \quad (3.1)$$

där C_L är kapaleteten vid den legitima noden och C_M är kapaleteten vid den illvilliga noden.

I översiktsartikeln [4] presenteras olika angreppssätt för att uppnå säkerhet på det fysiska lagret, varav vissa av dessa innebär att en del av signalen används för att skicka brus, det vill säga samtidig kommunikation och störning. När kanalen till tjuvlyssnaren är känd bör bruset lobformas till den.

Ett system där störning, radaravkänning och kommunikation samverkar presenteras i [5]. Scenariot är ett fleranvändar-massiv-MIMO-scenario (multipel-input-multipel-output) där basstationens uppgift är att målfölja och tjäna flera legitima användare samtidigt. För att uppnå detta lobformas informationen till de legitima användarna. På signalen adderas artificiellt brus för att undvika att målet ska kunna utvinna någon information från signalen. Alltså är syftet med störningen inte att förhindra motparten från att kommunicera, utan snarare att undvika att den egna kommunikationen blir avkodad. Ett antal optimeringsproblem ställs upp för att lösa uppgiften där skillnaden beror på vilka

antaganden som finns om kanalkännedom och målets position. Optimeringsproblemet löses i två steg. Steg 1 designar det optimala lobformningsmönstret för att kunna känna av målet. Steg 2 tar hänsyn till lobformningsmönstret och minimerar avlyssnarens signal-till-interferens-och-brus-förhållande (SINR, eng. signal-to-interference-and-noise-ratio) med avseende på lobformningsvektorer-na till användarna och det adderade brusets statistik. Prestandan evalueras med bland annat hemlighetstakten.

Samtidig kommunikation och störning studeras i [6] tillsammans med en samverkande intelligent reflekterande yta (IRS, eng. intelligent reflective surface). En IRS är en panel med många reflektiva element där fasvridningen av den reflekterade signalen vid varje element är ställbar. Målet är att IRS:en ska förstöra länken mellan de illvilliga noderna (SINR ska vara under en viss gräns) samtidigt som takten för den legitima länken maximeras. Resultaten visar att det ger en fördel att använda IRS:er. I [6] antas perfekt kanalkännedom för alla kanaler vilket är svårt att uppnå i praktiken [7].

I [8] introduceras ett system där avkänning stödjer samtidig kommunikation och störning. I avkänningsfasen, detekteras misstänkta noder. Från den utvunna informationen designas lobformningsvektorer genom att minimera utsänd effekt med bivillkoret att de legitima länkarna inte understiger en viss takt medan de illegitima länkarna inte överstiger en viss takt. Resultaten visar att man kan använda mindre effekt, men ändå uppnå bivillkoren, genom att ha en explicit avkänningsfas.

3.2 Kommunikation och vilseledning

Vilseledning är när en sändare med sin signalering vill få motståndaren att få en felaktig uppfattning av vad som skickas. Att kombinera vilseledning med kommunikation skulle till exempel kunna innebära att en legitim sändare försöker skapa ett skenmål så att motståndarnas signalspaningsmetoder inte kan pejla in var sändaren befinner sig samtidigt som den ändå bibehåller en tillfredsställande informationstakt till den legitima mottagaren.

3.2.1 Förtäckt kommunikation

Ett ramverk som delvis kan klassificeras som vilseledning är förtäckt kommunikation (eng. covert communication). I förtäckt kommunikation ingår vanligtvis (minst) tre parter. Två legitima agenter, ofta kallade Alice och Bob, och en illegitim agent, Willie. Willies uppgift är att *detektera* om Alice och Bob kommunicerar, därför försöker Alice och Bob kommunicera på ett sätt som försvårar eller omöjliggör för Willie att detektera kommunikationen [9].

I [10] samarbetar ett antal störare med Alice och Bob. De hjälper att störa ut Willie samtidigt som de hjälper Alice att kommunicera med Bob. Problemet som studeras är vilka störare som väljs för samarbetet. I det här ramverket utför vardera nod en funktion, men hela systemet utför flera funktioner (störning och kommunikation) på ett samverkande sätt.

I [11] undersöks hur man på ett robust sätt kan allokera radar och kommunikationsresurser. I systemet samverkar också störare, och det finns en illegitim agent (Willie) som vill övervaka situationen. Alltså passar denna systemmodell in som förtäckt kommunikation. Sändarnoderna (Alice) i systemet har samtidig kommunikations- och radarförmåga, mer specifikt använder de OFDM (eng. orthogonal frequency division multiplexing)-symboler för både kommunikation med en mottagare (Bob) och för att känna av omgivningen, se andra

arbeten i avsnitt 3.5.4. Allokeringen av vilken nod som får använda resurserna sker genom en sorts auktionsprocess.

3.3 Kommunikation och signalspaning

I kombinerad kommunikation och signalspaning försöker en mottagare samtidigt avkoda legitim kommunikation som är ämnad åt den och spana på ett eller flera mål. När dessa funktioner kombineras så att de sker vid samma tid och frekvens kan målet för multifunktionsradion vara att avkoda informationen från samtliga legitima sändare samtidigt som den detekterar motståndarsändare och skattar till exempel:

1. antalet motståndarsändare,
2. parametrar i kanalerna till motståndarsändarna, till exempel bäring,
3. egenskaper från motståndarnas utsända signaler, till exempel modulationstyp,

eller en kombination av dessa.

I den öppna litteraturen är det här området av multifunktion inte välstuderat. Däremot finns det ett visst överlapp med samtidig kommunikation och avkänning eftersom vissa arbeten klassificerar avkänning som något bredare än radar som också inkluderar till exempel bäringsmätningar vilket är en klassisk signalspaningsfunktion [12]. Skillnaden mellan avkänning och signalspaning är att i avkänning utnyttjas en *känd* signal – man vet exempelvis när signalen sänds, varifrån den sänds och kanske exakt hur den ser ut, och i signalspaning utnyttjas en *okänd* signal – man vet inget mer än kanske statistik för signalen, det vill säga, man vet signaltyp men inte var och när signalen sänds.

3.4 Störning och signalspaning

I kombinerad störning och signalspaning används störningen som ett sätt att tvinga motståndaren att använda kommunikationsresurser som är lättare att spana på. Detta kan innebära att motståndaren tvingas utnyttja en mindre del av spektrumet för att kommunicera på [13] eller nedgradera till en mer sårbar kommunikationsstandard [14].

I [13] beskrivs en metod där störning och signalspaning samarbetar. Systemmodellen utgår från många oberoende kanaler där en (opportunistisk) motståndare använder den bästa kanalen för att kommunicera. Störarens uppgift är att störa ut kanaler så att det ska vara lättare att spana på motståndarens kommunikation. Multifunktion sker i det här fallet inte på samma tid och frekvens. Resultaten visar att signalspaningsförmågan ökar med den föreslagna metoden.

En systemmodell där en legitim kommunikationslänk antingen blir störd eller spanad på (men ej exakt samtidigt) har studerats i [15]–[18]. Dessa problem ställs ofta upp med hjälp av spelteori [15], [16], [18] eller förstärkningslärande (eng. reinforcement learning) [17]. Tanken med att utforma problemet som ett spelteoriproblem är att de olika agenterna kommer agera i olika riktningar och där det optimala beslutet (störa eller spana för den illegitima agenten och kommunicera eller vara tyst för den legitima agenten) kommer bero på vilket beslut motståndaren fattar.

3.5 Kommunikation och avkänning

Samtidig avkänning (radar) och kommunikation är fallet som är mest omskrivet i den öppna litteraturen, speciellt när funktionerna sker vid samma tid och frekvens. Kombinationen kommunikation och radar har länge funnits, se till exempel [19] som 1963 presenterade hur radarpulser kan användas för att förmedla information. En motivering som driver forskningen framåt är självkörande bilar eftersom bilarna både behöver kommunicera inbördes samtidigt som de behöver känna av sin omgivning [20], [21]. En annan applikation som har motiverat den ökande forskningen inom avkänning är övervakning av individers hälsotillstånd (e-hälsa) för att detektera till exempel andningsfrekvens eller fall [22], [23]. Inom området används olika relaterade terminologier där användningen skiljer sig baserat på vilket angreppssätt och vilket mål som tekniken har [24]. Dessa är:

- joint communication and sensing (JCAS/JC&S),
- integrated communications and sensing (ICAS/IC&S),
- dual function radar communications (DFRC),
- joint radar communications (JRC),
- joint communications radar (JCR),
- radar communication (RadCom) och
- radio-frequency (RF) convergence.

Till exempel är det allmänt vedertaget att JCAS innebär att kommunikationshårdvara används för ändamålet medan RadCom innebär att det är radarhårdvara som används.

Samtidig kommunikation och avkänning kan också kategoriseras utifrån topologin av sändare och mottagare, eller utifrån vilken plattform som stödjer multifunktion. Topologin kan kategoriseras i tre olika fall:

1. Sändaren skickar ut en signal som av mottagaren både ska avkodas och användas för att känna av ett mål, figur 1d.
2. När sändaren och radarmottagaren är samlokaliserade skickar sändaren ut en signal som innehåller en informationsdel som är till för kommunikation med andra mottagare och en radardel som är till för avkänning av ett mål av den samlokaliserade radarmottagaren. Efter att signalen har studsat på radarmålet och anlänt till radarmottagaren kan målet positioneras, se figur 1e. Denna topologi kan liknas vid det som i radarsammanhang kallas monostatisk radar.
3. Sändaren och radarmottagaren kan även vara distribuerade, det vill säga inte på samma plattform, se figur 1f. I det fallet krävs samarbete mellan sändaren och radarmottagaren. Det här fallet liknar det första fallet förutom att mottagarna endast fokuserar på en av funktionerna. Det är också likt det andra fallet förutom att radarmottagaren är samlokaliserad med sändaren, vilket kan underlätta för radarfunktionaliteten. Denna topologi kan liknas vid det som i radarsammanhang kallas bistatisk radar.

Samtidig avkänning och kommunikation är ett specialfall av passiv radar. Vid passiv radar används inte en radarsändare utan andra signalkällor som redan existerar i det elektromagnetiska spektrumet för att belysa radarmålet [25], [26]. I fallet med multifunktion finns en viss kontroll av den belysande signalen då den samtidigt används för kommunikation i det egna systemet.

Att utföra både avkänning och kommunikation i samma vågform ger tydliga fördelar, men en avvägning måste göras mellan de två funktionerna [21].

3.5.1 Översiktsartiklar

I översiktsartikeln [27] diskuteras samexistens av radar och kommunikation. Fyra olika sätt att förmedla information i radarvågformen diskuteras. 1) Olika vågformer baserat på information. 2) Amplitudmodulerad kommunikation i sidloberna. 3) Kommunikation med ASK (amplitude shift keying) i sidloberna. 4) Fasmodulering för att förmedla information. Metoderna är ganska enkla eftersom antennen endast har en RF-kedja och inte kan göra digital lobformning, vilket är möjligt i MIMO-system [28].

En annan översiktsartikel är [29], där en samlokaliserad DFRC-sändare och -mottagare undersöks. Teknikerna från [27] med kommunikation på olika sätt i sidloberna och liknande presenteras. Däremot presenteras här också upplänkskommunikation. I det fallet måste mottagaren både ta emot radarreflektioner från målet och informationsbärande signaler från en kommunikationsanvändare, se figur 1d. Området verkar inte vara så väl utforskat då många problem kvarstår.

I [28] presenteras en översikt där fokus läggs på MIMO för JCAS. Dessutom kombineras detta med sakernas internet (IoT, eng. internet-of-things). Artikeln presenterar arbeten som delas upp i undergrenar, samexistens av kommunikation och avkänning samt integrerad kommunikation och avkänning. Till sist nämns några potentiella kandidater för framtiden, cell-fri (distribuerad) massiv MIMO, MIMO med svärmar av obemannade farkoster och intelligenta reflekterande ytor. Nyckelidén i de flesta av de nämnda arbetena verkar vara att utnyttja att MIMO spatiellt kan separera användarna eller (mer specifikt) funktionerna (kommunikation och avkänning), speciellt för samexistensfallet.

I [30] presenteras en översikt där fyra olika RadCom-system jämförs och där fokuset för samexistensen är på radarsystemet. De kvantifierar och jämför prestandan av de olika systemen baserat på olika radar- och kommunikationsparametrar, till exempel, radarupplösning, datatakt och bitfelstakt. De olika systemen har olika fördelar och nackdelar, men i stort är systemen med flerbåvågssystem bättre då de har högre datatakt och möjliggör effektivare multiplexing.

Översiktsartikeln [31] diskuterar tre olika arkitekturer för gemensam radar och kommunikation. Arkitekturerna är: 1) Samexistens med spektralt överlapp, det vill säga att radarfunktioner och kommunikationsfunktioner utnyttjar samma frekvensband, där systemen inte samarbetar men försöker minimera interferensen till det andra systemet. 2) Samexistens via kognition där systemen designas för att inte interferera med varandra, på liknande sätt som för kognitiv radio [32]. På så sätt får man fler frihetsgrader att jobba med. 3) Funktionell samexistens. Här använder systemen även samma sändare, det vill säga en multifunktionsradio. Både fördelar och nackdelar med de olika arkitekturerna diskuteras.

I [24] diskuteras ICAS för IoT. Framförallt presenteras användarfall för ICAS inom IoT och vilka utmaningar som hör till dessa fall. Användarfallen spänns

upp av allt från avkänning och kommunikation mellan fordon på vägarna till att känna av olika rörelser från en människa. I [24] diskuteras även arkitekturer för att realisera ICAS för IoT.

3.5.2 Fundamentala gränser

Fundamentala gränser för flerfunktionssystem är svårt att beräkna på ett rigoröst sätt. De olika funktionerna har ofta olika motstridiga målsättningar. Ett exempel på en fundamental gräns för kommunikation är kapaciteten, som ger en övre gräns på datatakten som kan uppnås över en viss kanal [33, Kap. 5]. Ett exempel på en fundamental gräns för avkänning är Cramér-Rao gränsen (CRB, eng. Carmér-Row bound) som ger en undre gräns på variansen av skattningsfelet, det vill säga noggrannheten, av en väntevärdesriktig estimator [34, Kap. 3]. I det här avsnittet presenteras ett antal arbeten där fundamentala gränser har specificerats.

Ett arbete som utgår från en mer informationsteoretisk syn på JCAS-problemet är [35]. De definierar motsvarigheter till täckningssannolikhet och kapacitet för radar. De utgår från flerbärvågssystem som OFDM och tilldelar en delmängd av resurserna till radar och en annan för kommunikation. Sedan ställer de upp en stokastisk nätverksmodell där till exempel positionerna är en poissonpunktsprocess.

En översiktsartikel som behandlar fundamentala prestandagränser för avkänning, till exempel CRB, och kommunikation, till exempel kapacitet är [36]. För integrerad avkänning och kommunikation saknas många fundamentala resultat. Dessa öppna problem diskuteras även i artikeln.

I [37] presenteras ett system där en sändare sänder ut en radarmågform och en kommunikationssignal. Signalerna är separerade i tid och/eller frekvens. Det finns två mottagare: en radarmottagare och en kommunikationsmottagare. Problemet som studeras är ett hypotestest där det antingen finns ett mål som radarmottagaren kan upptäcka eller inte. Författarna tar fram ett slutet uttryck för falsklarm av detektion av målet. De visar att en avvägning måste ske mellan detektionsförmåga och informationstakt.

3.5.3 Flerantennsystem

I flerantennsystem kan en väl vald lobformning medföra att funktioner spatiellt kan samexistera. Därför behöver inte olika funktioner delas upp på olika tid- och frekvensresurser. De flesta arbeten inom samtidig kommunikation och avkänning i flerantennsystem handlar om att designa lobformningsvektorer.

Ett MIMO-radarsystem undersöks i [38]. MIMO-radarns uppgift är att målfölja och tjäna en (eller flera) legitima användare samtidigt. Tre olika optimeringsproblem med avseende på styrvektorerna (lobformningsvektorerna) presenteras. De tre problemen skiljer sig beroende på om de betraktar hemlighetstakt, radar-SINR eller utsänd effekt som målfunktion eller bivillkor. Då optimeringsproblemen inte är konvexa approximeras de med hjälp av Taylorutveckling och en algoritm för att lösa dem presenteras.

I [39] undersöks hur kvoten (i tid) av radarmålsökning och kommunikation för en multifunktionsradio ska fördelas när systemet utsätts för en störare. Problemet studeras genom spelteori. Om multifunktionsradion är i radar-mod kan den (potentiellt) detektera störaren och ta ut den ur spelet. Därför måste den göra en avvägning om vilken av funktionerna som kommer gynna kommunikationsprestandan mest.

I [40] kollar författarna på ett system med flera avlyssnare/mål, en radar och flera legitima användare. En IRS används för att kunna förbättra prestandan. Lobformningsvektorer och fasskift vid IRS:en optimeras för att maximera hemlighetstakten. De momentana kanalerna antas vara kända.

I [41] diskuteras millimetervågbandet för gemensam radar och kommunikation. På millimetervågbandet måste svårigheterna att kommunicera på det här bandet, till exempel väldigt besvärlig fädning, stora gruppantenner och stora bandbredder, vilket leder till hög samplingsfrekvens, kompenseras för. I artikeln diskuteras olika vågformer och jämförelser mellan kommunikationscentriska vågformer (det vill säga en vågform som klassiskt använts för kommunikation som har modifierats till att också användas för radarändamål), radarcentriska vågformer (det vill säga en vågform som klassiskt använts för radar som har modifierats till att också användas för kommunikationsändamål) eller gemensamt utvecklade vågformer görs.

I [42] undersöktes ett cell-fritt massiv MIMO-system där det finns ett antal kommunikationsanvändare och ett mål. Antagandet är att systemet vet var målet borde vara och ett hypotestest ställs upp för att detektera om målet är där eller inte. Accesspunkterna som är närmast målet används som mottagare för att detektera målet och resterande enheter sänder kommunikationssignaler till kommunikationsanvändarna. Kommunikationssignalen används av de mottagande accesspunkterna för att detektera målet.

I [43] studerar ett massiv MIMO-system med ett radarmål. De undersöker hur lobformningen till radarmålet påverkar kommunikationsprestandan. Resultaten visar att med en vanlig lob, så är radarprestandan (detektion av målet) bättre, men nedlänkskommunikationen försämras något. Om lobformningsvektorn istället projiceras på nollrummet av kommunikationskanalerna så tar inte radarprestandan särskilt mycket skada men kommunikationsprestandan blir något bättre.

3.5.4 OFDM

OFDM är en metod som används i trådlös kommunikation för att dela upp användares dataströmmar på olika tid- och frekvensresurser [33, Kap. 4].

Både avstånd och den relativa hastigheten mellan sändare och mottagare kommer att påverka de individuella OFDM-symbolerna. [20] beskriver hur en sändare, som även är utrustad med en mottagare, skickar en OFDM-signal och tar emot den reflekterade signalen för att sedan ur den skatta relativ hastighet och avstånd till ett eller flera mål med hjälp av OFDM-symbolerna.

Om OFDM-radar implementeras i stora fordonsnätverk bör kollisioner i tid- och frekvensresurser undvikas, men de kan inte uteslutas helt och hållet. För att studera det här problemet ställer [44] upp en teoretisk modell av interferensen mellan angränsande noder och hur OFDM-radar påverkas när flera av noderna använder sig av OFDM-radar. De beräknar övre och undre gränser på nätverkets avbrottstakt, som definieras som sannolikheten att den reflekterade signalen från ett referensradarmål är för svag för att detekteras, vilken kan användas för att bestämma parametrar så som bärvågsavståndet.

En annan vågform som är relaterad till OFDM är OTFS (eng. orthogonal time frequency space modulation) [45]. Istället för att kommunikationssymbolerna delas upp i tid och frekvens (som i OFDM) delas de i OTFS istället upp i fördröjning (eng. delay) och Doppler. [46] jämför OFDM och OTFS för samtidig kommunikation och radar. De visar att OTFS är jämförbart med state-of-the-art-metoder för radar medan det samtidigt kan utnyttjas att digitalt överföra

information. OTFS uppnår en högre dataakt jämfört med OFDM då OFDM kräver extra resurser för det cykliska prefixet.

I [47] ersätts pilotresurserna (underbärvågorna) i OFDM med kontinuerlig vågradarpulser. Kanalskattningen hos kommunikationsmottagaren sker utifrån dessa pulser istället för klassiska pilotsymboler. De visar att ingen försämring av kanalskattningen sker med den här metoden. Avkänningen sker hos sändaren som kan kancellera interferensen från kommunikationssignalen.

I [48] modifieras "förkodningen" i MIMO OFDM för radarändamål genom en rotation mellan olika underbärvågor på olika antenner. Eftersom kanalen är spatiellt korrelerad mellan olika antenner så kommer den effektiva kanalen (alltså inklusive den här underbärvågsförkodningen) hos mottagaren bli en summa av dessa. Effekten blir fädningshål i frekvenssvaret hos den effektiva kanalen. För att motverka detta så använder man en speciell kanalkod. Radardelen kommer från att man efter avkodning av data, dividerar med symbolerna och från kanalsvaret tar fram RDM (eng. range-Doppler map).

3.6 Full duplex

Med full duplex avses i denna rapport samtidig sändning och mottagning på samma frekvens. Mer specifikt kan namnet in-band full duplex användas. Klassisk full duplex kan realiseras via tidsdelning eller frekvensdelning, det vill säga samma tidslucka och frekvens används inte för sändning och mottagning. In-band full duplex jämfört med klassisk full duplex innebär teoretiskt under ideala förhållanden en möjlig kapacitetsdubbling för en given länk. Vid full duplex överlagras den mottagna nyttosignalen och den utsända signalen, vilket skapar självinterferens i mottagaren. Självinterferensen som uppstår är oftast betydligt starkare än den mottagna nyttosignalen. Denna självinterferens måste därför undertryckas kraftigt. Svårigheten att realisera full duplex är proportionell mot dämpningen (eller avstånd) som behöver övervinnas. Till exempel är full duplex för ett korthållssystem (till exempel Wi-Fi) med en räckvidd på 100 meter enklare att realisera än för ett VHF-system med räckvidd 20 kilometer. Taktiska radiosystem använder ofta frekvenshopp som störskydd. Frekvenshopp reducerar vinsterna med full duplex. Hur mycket vinsten reduceras beror på hopptakten [49]. Anledningen är att kanalestimeringen kräver overhead, och den relativa overheaden som behövs för kanalestimeringen ökar då kanalen, det vill säga frekvensen, ständigt ändras.

I avhandlingen [50] undersöks multifunktion för full-duplex-radiosystem. Olika multifunktionsscenarion beskrivs för samtidig kommunikation, avkänning, signalspaning och störning. Bland annat visar resultaten på att samtidig detektering och störning kan öka den effektiva räckvidden något för en smart störare, jämfört med alternativet att tidsdela detektering och störning. Full-duplex-teknik möjliggör samtidig störning, analys av störningens effektivitet och avkänning av den störda signalens karakteristik. På så sätt är det möjligt att störa mer effektivt.

För fallet med full-duplex-radio utvecklar [51] idén om att skydda omgivningen kring en taktisk radio genom att sända kraftfull störning, samtidigt som den framgångsrikt kan ta emot sändningar på överlappande frekvenser. Störningen skapar en skyddande kupol av störningar (störbubbla/radiosköld) runt en taktisk radio/enhet. Här är tanken att störningssignalerna skyddar plutonen, kompaniet, bataljonen etc. från motståndares signalspaning. Med kännedom om störningssignalerna kan de legitima radionoderna subtrahera/undertrycka störningssignalerna i mottagaren på ett sådant sätt att de mottagna legitima

paketen kan avkodas. Emellertid skyddas de sända legitima signalerna av störningssignalerna så att de är svåra att hitta för en motståndares detektor. För att skydda en större enhet, såsom en bataljon, kan ett stort antal störande radionoder användas. För att ytterligare komplicera saken för motståndarens detektor kan var och en av radionoderna skicka en störningssignal intermittent och av olika typer. I ett sådant fall kan många olika störningssignaler behöva subtraheras/undertryckas för att kunna detektera det sända legitima paketet. En motståndare kan sannolikt fortfarande identifiera ungefär var enheten är placerad (speciellt de störande noderna), så syftet med en störbubbla är specifikt att dölja detaljer i kommunikationen och var specifika noder finns.

Den sjätte generationens (6G) mobilsystem tänker integrera kommunikations- och avkänningsfunktioner för att förbättra spektrumeffektiviteten och stödja nya tillämpningar. En trolig väg som kommer tas i 6G-system är att kunna använda en enda vågform både för aktiv radar och kommunikation. En sådan lösning möjliggör effektiv och flexibel användning av spektrum, samt lägre kostnader genom återanvändning och integration av hårdvara och lägre energiförbrukning än i två separata system. Det finns dock utmaningar med lösningen såsom självinterferenser, vilket kräver effektiv hantering och undertryckning av interferenser och därför kommer full-duplex teknik att behövas enligt [52].

Full duplex kan ses som ett sätt att effektivisera multifunktion då två funktioner kan utföras samtidigt på samma frekvens med en sänd-mottagare. Alternativet är att använda två sänd-mottagare, men det medför extra hårdvara. I framtida multifunktions RF-system är dock målet att samutnyttja hårdvara så långt som det är möjligt.

3.7 Fysiska system

Konstruktion av verkliga radiosystem med multifunktion innebär flera tekniska och designmässiga utmaningar på grund av de olika krav och behov som olika funktioner kan ha. Det slutgiltiga systemet kräver en noggrann balans mellan olika tekniska aspekter för att kunna uppfylla varje funktions krav utan att kompromissa med övergripande prestanda och övrig systemfunktionalitet. Forskning och utveckling pågår inom flera olika områden för att försöka lösa den problematik som medförs vid design och utveckling av multifunktionssystem, som exempelvis ökad komplexitet, svårighet med optimering och självinterferens, fungerande interoperabilitet eller effektiv frekvens- och spektrumanvändning. Ett fåtal fysiska system marknadsförs idag som radio med multifunktionalitet.

Norska Kongsberg har under 2022 påbörjat utvecklingen på ett nytt radiosystem, THOR [53]. THOR är en taktisk mjukvaruradio som erbjuder monitoring av frekvensspektra kombinerat med kommunikation, signalspaning eller störning. Radion tillåter dessutom smal- och bredbandig tvåkanalskommunikation på VHF/UHF-bandet för tal och data som kan användas oberoende av varandra. Frekvensområdet är från 30 till 1525 MHz. Den huvudsakliga vågformen är den egenutvecklade Kongsberg EPM (Electro Protective Measures), men har också stöd för flertalet Nato-vågformer (STANAG 5630 NBWF, 4732 SATURN, 4204 single channel FM, 5651 NHDR, 5649 NHCDR, 4681 SATCOM). Kontraktet mellan den norska armén och Kongsberg är värt 320 miljoner NOK i ett första stadium, och är en del av moderniseringen av den norska arméns taktiska radiosystem.

Franska THALES har utvecklat ett system inom programmet BARAGE (fr. brouilleurs anti-IED réactifs actifs goniométriques, sv. goniometriska aktiva re-

aktiva anti-IED störsändare) vars syfte är att störa ut radioutlösta vägbomber (IED, eng. improvised explosive device) utan att förstöra för kommunikationen [54], [55]. Systemet kallas för ECLIPSE och marknadsförs som en mjukvarudefinierad störsändare som opererar på frekvensbandet 20-2500 MHz. ECLIPSE har sålts till den franska armén med syfte att inkorporeras i nutida och framtida militära plattformar [56].

Multifunktionalitet är även på gång att inkorporeras i utvecklingen av WiFi-standarder. Arbetsgruppen IEEE 802.11bf undersöker möjligheten för ett tillägg på 802.11 med syftet att införa avkänning på banden 2.4 GHz, 5 GHz, 6 GHz samt 60 GHz. Ett första utkast [57] har tagit fram de huvudsakliga idéerna och utmaningarna som samtidig kommunikation och avkänning inom WiFi står inför. Poängen med avkänning på WiFi är bland annat att mäta upp kanalförhållanden och samla information om användare, miljö och möjligheten till att aktivera specifika applikationer som är anpassade för det uppmätta scenariot, exempelvis användarigenkänning eller signalförhållanden i smarta hus. Ett antal utmaningar återstår innan tekniken är mogen nog för att introduceras officiellt. Bland annat får själva avkänningen inte störa kommunikationen, och mängden overhead som införs av avkänningsalgoritmerna får inte påverka prestandan, vilket inte är tillräckligt utvärderat i nuläget [57]. Arbetsgruppen räknar med att tillägget (802.11bf) ratificeras i september 2024.

Multifunktionalitet förväntas även spela en roll inom den sjätte generationens mobiltelefoni, dels i form av full duplex [52], men även som en kombination av samtidig kommunikation och avkänning, det vill säga JSAC.

4 Slutsatser

Multifunktion är ett område som har stor potential och vi ser många användningsområden i militära tillämpningar. Multifunktionsförmåga möjliggör en omfattande spridning av enklare telekrigförmåga för spaning och störning som kan bidra till ökad förmåga för tidig upptäckt av fientlig radiokommunikation och egenskydd via distribuerade störsändare. Ett spaningsexempel är upptäckt av drönarkommunikation och ett störexempel är kommunikation under pågående störsändning vid kolonnkörning under hot av radioutlösta vägbomber.

Den här rapporten har presenterat ett förtydligande om vad multifunktion innebär och visat på ett urval av arbeten i den öppna litteraturen där flera funktioner samverkar i samma radio. Även om många av teknikerna inte är helt mogna ännu har ett antal fysiska system också presenterats. Eftersom moderna militära radiosystem är byggda med mjukvaruradio, finns det en verklig möjlighet att få in den typen av funktioner som har presenterats i den här rapporten i dessa radiosystem. Att få in telekrigförmågor i kommunikationsradio ger ett distribuerat komplement till de specialiserade system som klassiskt har används för telekrig. I den öppna litteraturen drivs forskningen främst av tillämpningar inom autonoma fordon. Därför finns det mycket arbete gjort på just samtidig kommunikation och avkänning men på senare år har även flera arbeten på klassiska telekrigsfunktioner gjorts, speciellt [1], [2], [50]. Därför är det rimligt att tro att det här området kommer fortsätta att utvecklas.

I militära sammanhang kan vi se tillämpningar både för enskilda noder och för samverkande noder. I fallet enskilda noder tänker vi oss i första hand att integrera spaningsfunktioner. Varje nod ska självständigt kunna upptäcka en signal, avgöra om den utgör ett hot och helst också avgöra varifrån hotet kommer. Önskvärt är att spaningsfunktionen är autonom och uppmärksammar operatören med något slags varning vid behov.

I en tillämpning med samverkande noder ser vi ett distribuerat telekrigssystem där funktioner för spaning, störning, skydd och kommunikation kommer att vara tätt integrerade. Ett idealt sådant system ska kunna upptäcka en signal och avgöra om den utgör ett hot, beräkna positioner, identifiera, följa, skapa och dela lägesbild. Det ideala systemet ska även kunna identifiera vilken kommunikation som ska störas, samt koordinera störsats från olika noder. Typiskt gäller korta reaktionstider och det blir svårt att ha en operatör med i loopen. Kommunikationsprotokoll och autonomitet kommer att vara viktiga inslag.

Framtida arbete

Vi ser två spår i ett framtida arbete, ett med fokus på den enskilda noden och ett med fokus på hur ett distribuerat system av noder ska fungera.

För den enskilda noden krävs utveckling av anpassade algoritmer för upptäckt, klassificering och riktningsbestämning. Därtill krävs också modifiering av den vågform som nyttjas för kommunikation.

Att utveckla systemkonceptet är att utveckla ett koncept för distribuerat telekrig, där viktiga komponenter är kommunikationsprotokoll för distribuering av telekrigsdata, autonomitet och samverkan.

Litteraturförteckning

- [1] J. Gu, G. Ding, H. Wang och Y. Xu, "Integrated communications and jamming: Toward dual-functional wireless networks under antagonistic environment," *IEEE Communications Magazine*, vol. 61, nr. 5, s. 181–187, 2023.
- [2] J. Gu, G. Ding, Y. Yin, H. Wang, Y. Xu och Y. Song, "Cognitive J2SAC: Joint jamming, sensing, and communication under antagonistic environment," *China Communications*, vol. 20, nr. 9, s. 78–95, 2023.
- [3] J. Barros och M. R. D. Rodrigues, "Secrecy capacity of wireless channels," *2006 IEEE International Symposium on Information Theory*, 2006, s. 356–360.
- [4] A. Mukherjee, S. A. A. Fakoorian, J. Huang och A. L. Swindlehurst, "Principles of physical layer security in multiuser wireless networks: A survey," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 16, nr. 3, s. 1550–1573, 2014.
- [5] N. Su, F. Liu och C. Masouros, "Secure radar-communication systems with malicious targets: Integrating radar, communications and jamming functionalities," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 20, nr. 1, s. 83–95, 2021.
- [6] L. Peng, Y. Xu, H. Wang, J. Gu och G. Ding, "Throughput maximization in IRS-aided simultaneous communication and jamming system," *2022 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC Workshops)*, 2022, s. 263–268.
- [7] E. Björnson, O. Özdogan och E. G. Larsson, "Reconfigurable intelligent surfaces: Three myths and two critical questions," *IEEE Communications Magazine*, vol. 58, nr. 12, s. 90–96, 2020.
- [8] J. Gu, G. Ding, H. Wang och Y. Xu, "Robust beamforming for sensing assisted integrated communication and jamming systems," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, s. 1–6, 2023.
- [9] X. Chen, J. An, Z. Xiong, C. Xing, N. Zhao, F. R. Yu och A. Nallanathan, "Covert communications: A comprehensive survey," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 25, nr. 2, s. 1173–1198, 2023.
- [10] R. He, J. Chen, G. Li, H. Wang, Y. Xu, W. Yang, Y. Jiao och W. He, "Channel-aware jammer selection and power control in covert communication," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, s. 1–15, 2023.
- [11] I. Lotfi, H. Du, D. Niyato, S. Sun och D. I. Kim, "On the robustness of channel allocation in joint radar and communication systems: An auction approach," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, s. 1–18, 2023.
- [12] J. A. Zhang, M. L. Rahman, K. Wu, X. Huang, Y. J. Guo, S. Chen och J. Yuan, "Enabling joint communication and radar sensing in mobile networks—a survey," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 24, nr. 1, s. 306–345, 2022.

- [13] Y. Han, L. Duan och R. Zhang, "Jamming-assisted eavesdropping over parallel fading channels," *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, vol. 14, nr. 9, s. 2486–2499, 2019.
- [14] B. Karakoc, N. Fürste, D. Rupprecht och K. Kohls, "Never let me down again: Bidding-down attacks and mitigations in 5g and 4g," *Proceedings of the 16th ACM Conference on Security and Privacy in Wireless and Mobile Networks*, ser. WiSec '23. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2023, s. 97–108. [Online]. URL: <https://doi.org/10.1145/3558482.3581774>
- [15] A. Garnaev och W. Trappe, "The eavesdropping and jamming dilemma in multi-channel communications," *2013 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2013, s. 2160–2164.
- [16] A. Garnaev, M. Baykal-Gursoy och H. V. Poor, "A game theoretic analysis of secret and reliable communication with active and passive adversarial modes," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 15, nr. 3, s. 2155–2163, 2016.
- [17] Y. Li, L. Xiao, H. Dai och H. V. Poor, "Game theoretic study of protecting MIMO transmissions against smart attacks," *2017 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2017, s. 1–6.
- [18] A. Garnaev och W. Trappe, "An eavesdropping and jamming dilemma when the adversary might be subjective," *2019 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, 2019, s. 1–6.
- [19] R. M. Mealey, "A method for calculating error probabilities in a radar communication system," *IEEE Transactions on Space Electronics and Telemetry*, vol. 9, nr. 2, s. 37–42, 1963.
- [20] C. Sturm och W. Wiesbeck, "Waveform design and signal processing aspects for fusion of wireless communications and radar sensing," *Proceedings of the IEEE*, vol. 99, nr. 7, s. 1236–1259, 2011.
- [21] D. Ma, N. Shlezinger, T. Huang, Y. Liu och Y. C. Eldar, "Joint radar-communication strategies for autonomous vehicles: Combining two key automotive technologies," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 37, nr. 4, s. 85–97, 2020.
- [22] C. Wu, Z. Yang, Z. Zhou, X. Liu, Y. Liu och J. Cao, "Non-invasive detection of moving and stationary human with WiFi," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 33, nr. 11, s. 2329–2342, 2015.
- [23] H. Jiang, C. Cai, X. Ma, Y. Yang och J. Liu, "Smart home based on WiFi sensing: A survey," *IEEE Access*, vol. 6, s. 13 317–13 325, 2018.
- [24] Y. Cui, F. Liu, X. Jing och J. Mu, "Integrating sensing and communications for ubiquitous IoT: Applications, trends, and challenges," *IEEE Network*, vol. 35, nr. 5, s. 158–167, 2021.
- [25] L. M. H. Ulander, B. Andersson, S. Björklund, P. Follo, P.-O. Frörlind, A. Gustavsson, G. Haapalahti och A. Nelander, "Förstudie: Parasiterande och passiv radar," Totalförsvarets forskningsinstitut, 2006, FOI-R--2015--SE.

- [26] J. E. Palmer, H. A. Harms, S. J. Searle och L. Davis, "DVB-T passive radar signal processing," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 61, nr. 8, s. 2116–2126, 2013.
- [27] A. Hassanien, M. G. Amin, Y. D. Zhang och F. Ahmad, "Signaling strategies for dual-function radar communications: an overview," *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, vol. 31, nr. 10, s. 36–45, 2016.
- [28] X. Fang, W. Feng, Y. Chen, N. Ge och Y. Zhang, "Joint communication and sensing toward 6G: Models and potential of using MIMO," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 10, nr. 5, s. 4093–4116, 2023.
- [29] A. Hassanien, M. G. Amin, E. Aboutanios och B. Himed, "Dual-function radar communication systems: A solution to the spectrum congestion problem," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 36, nr. 5, s. 115–126, 2019.
- [30] L. Giroto de Oliveira, B. Nuss, M. B. Alabd, A. Diewald, M. Pauli och T. Zwick, "Joint radar-communication systems: Modulation schemes and system design," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 70, nr. 3, s. 1521–1551, 2022.
- [31] L. Zheng, M. Lops, Y. C. Eldar och X. Wang, "Radar and communication coexistence: An overview: A review of recent methods," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 36, nr. 5, s. 85–99, 2019.
- [32] B. J. E. Johansson, J. Nilsson, Å. Waern, N. Wadströmer, E. Axell, B. Asp, B. Johansson och A. Nelander, "Kognitiva system. teknisk prognos 2015," Totalförsvarets forskningsinstitut, 2015, FOI-R--4107--SE.
- [33] D. Tse och P. Viswanath, *Fundamentals of Wireless Communication*. Cambridge university press, 2005.
- [34] S. M. Kay, *Fundamentals of Statistical Signal Processing: Estimation Theory*. Prentice Hall, 1997.
- [35] N. R. Olson, J. G. Andrews och R. W. Heath, Jr, "Coverage and capacity of joint communication and sensing in wireless networks," 2022, arXiv:2210.02289.
- [36] A. Liu, Z. Huang, M. Li, Y. Wan, W. Li, T. X. Han, C. Liu, R. Du, D. K. P. Tan, J. Lu, Y. Shen, F. Colone och K. Chetty, "A survey on fundamental limits of integrated sensing and communication," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 24, nr. 2, s. 994–1034, 2022.
- [37] B. K. Chalise, M. G. Amin och B. Himed, "Performance tradeoff in a unified passive radar and communications system," *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 24, nr. 9, s. 1275–1279, 2017.
- [38] A. Deligiannis, A. Daniyan, S. Lambotharan och J. A. Chambers, "Secrecy rate optimizations for MIMO communication radar," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 54, nr. 5, s. 2481–2492, 2018.
- [39] A. Garnae, W. Trappe och A. Petropulu, "To communicate or to scan: Prospect theory extension of a stochastic game," *2018 IEEE Global Conference on Signal and Information Processing (GlobalSIP)*, 2018, s. 1301–1305.

- [40] K. V. Mishra, A. Chattopadhyay, S. S. Acharjee och A. P. Petropulu, "OptM3Sec: Optimizing multicast IRS-aided multiantenna DFRC secrecy channel with multiple eavesdroppers," *ICASSP 2022 - 2022 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, 2022, s. 9037–9041.
- [41] K. V. Mishra, M. Bhavani Shankar, V. Koivunen, B. Ottersten och S. A. Vorobyov, "Toward millimeter-wave joint radar communications: A signal processing perspective," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 36, nr. 5, s. 100–114, 2019.
- [42] Z. Behdad, Ö. T. Demir, K. W. Sung, E. Björnson och C. Cavdar, "Power allocation for joint communication and sensing in cell-free massive MIMO," *GLOBECOM 2022 - 2022 IEEE Global Communications Conference*, 2022, s. 4081–4086.
- [43] S. Buzzi, C. D'Andrea och M. Lops, "Using massive MIMO arrays for joint communication and sensing," *2019 53rd Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers*, 2019, s. 5–9.
- [44] K. M. Braun, "OFDM radar algorithms in mobile communication networks," doktorsavhandl., 2014.
- [45] R. Hadani, S. Rakib, M. Tsatsanis, A. Monk, A. J. Goldsmith, A. F. Molisch och R. Calderbank, "Orthogonal time frequency space modulation," *2017 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, 2017, s. 1–6.
- [46] L. Gaudio, M. Kobayashi, G. Caire och G. Colavolpe, "On the effectiveness of OTFS for joint radar parameter estimation and communication," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 19, nr. 9, s. 5951–5965, 2020.
- [47] E. Memisoglu, M. M. Sahin och H. Arslan, "Orthogonal coexistence of overlapped radar and communication waveforms," *2022 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, 2022, s. 2190–2195.
- [48] O. Lang, C. Hofbauer, R. Feger och M. Huemer, "Range-division multiplexing for MIMO OFDM joint radar and communications," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 72, nr. 1, s. 52–65, 2023.
- [49] G. Eriksson och E. Axell, "Physical limits for in-band full duplex in frequency-hopping tactical radio systems," *2023 International Conference on Military Communications and Information Systems (ICMCIS)*, 2023, s. 1–7.
- [50] K. Pärilin, "Multifunction radios and interference suppression for enhanced reliability and security of wireless systems," doktorsavhandl., Tampere University, 2023.
- [51] T. Riihonen, D. Korpi, O. Rantula, H. Rantanen, T. Saarelainen och M. Valkama, "Inband full-duplex radio transceivers: A paradigm shift in tactical communications and electronic warfare?" *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, nr. 10, s. 30–36, 2017.
- [52] A. Bourdoux, A. N. Barreto, B. van Liempd, C. de Lima, D. Dardari, D. Belot, E.-S. Lohan, G. Seco-Granados, H. Sardeddeen, H. Wymeersch, J. Suutala, J. Saloranta, M. Guillaud, M. Isomursu, M. Valkama, M. R. K.

- Aziz, R. Berkvens, T. Sanguanpuak, T. Svensson och Y. Miao, "6G white paper on localization and sensing," 2020, arXiv:2006.01779.
- [53] THOR tactical SDR. [Online]. URL: <https://www.kongsberg.com/kda/what-we-do/defence-and-security/defence-communications/k-tacs-on-the-move/thor-tactical-sdr/>
- [54] Eclipse counter-IED system to enter into service within the french forces. [Online]. URL: <https://www.thalesgroup.com/en/worldwide/defence/news/eclipse-counter-ied-system-enter-service-within-french-forces>
- [55] P. Donaldson. Defeating the IED. [Online]. URL: <https://www.asianmilitaryreview.com/2017/09/defeating-the-ied/>
- [56] Smart electronic protection system for vehicles. [Online]. URL: <https://www.thalesgroup.com/en/eclipse-0>
- [57] T. Ropitault, S. Blandino, A. Sahoo och N. T. Golmie, "IEEE 802.11bf: Enabling the widespread adoption of Wi-Fi sensing," 2023-05-31 04:05:00 2023. [Online]. URL: https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=935175

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