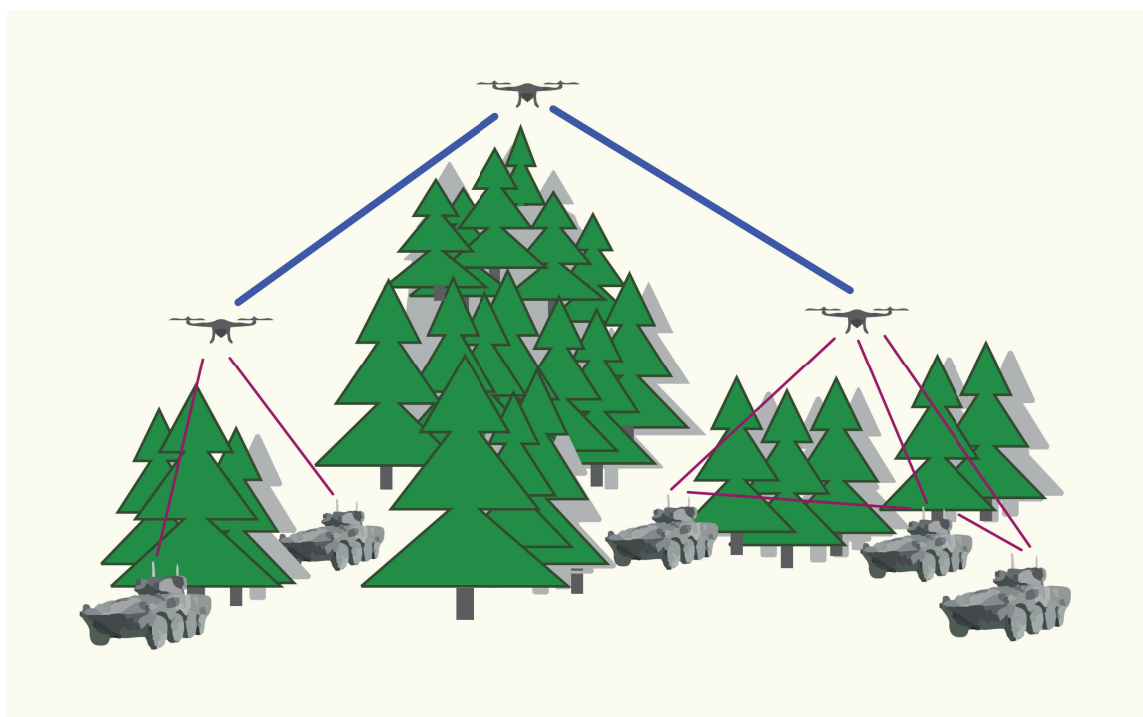


# Autonoma UAV:er för kraftigt ökad kapacitet i mobila taktiska nät

GUNNAR BARK, JIMMI GRÖNKVIST, ANDERS HANSSON,  
KRISTOFFER HÄGGLUND, ARWID KOMULAINEN, JOAKIM RYDELL



Gunnar Bark, Jimmi Grönkvist, Anders Hansson,  
Kristoffer Hägglund, Arwid Komulainen,  
Joakim Rydell

# Autonoma UAV:er för kraftigt ökad kapacitet i mobila taktiska nät

FOI-R--5196--SE

Titel	Autonoma UAV:er för kraftigt ökad kapacitet i mobila taktiska nät
Title	Autonomous UAVs for significantly increased capacity in mobile tactical networks
Rapportnr / Report No.	FOI-R--5196--SE
Månad / Month	September / September
Utgivningsår / Year	2021
Antal sidor / Pages	34
ISSN	1650-1942
Kund / Customer	FM
Forskningsområde	Ledningsteknologi
FoT område	Ledning och MSI
Projektnr / Project No.	E716522
Godkänd av / Approved by	Christian Jönsson
Ansvarig avdelning	Ledningssystem

Bild/Cover: FOI

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

Vi beskriver ett koncept baserat på lågt flygande UAV:er som kan ge en betydande kapacitetshöjning för radiokommunikationen i till exempel en manöverbataljon. Eftersom flygande relänoder kan ha fri sikt till varandra, så behöver inte kapacitetsökningen i radionätet innebära att räckvidden begränsas. Längre avstånd inom nätet kan överbryggas genom att länkarna mellan UAV:erna har fri sikt ovanför besvärlig terräng, samtidigt som avståndet från UAV:n till marken kan hållas relativt kort så att signalen är tillräckligt stark för att ta sig genom mellanliggande vegetation. En studie av litteratur relaterad till konceptet har genomförts avseende kanalmodellering, frekvensval och antenner, olika typer av kommunikationsnät med UAV:er, samt UAV som flygande basstation. Även en bedömning av framtida UAV-prestanda har gjorts, men inga konkreta lösningar i form av färdiga produkter eller systemkoncept har framkommit i litteraturstudien. Vi bedömer att konceptet är värt att vidareutveckla, för att ligga till grund för en realisering av UAV-stödd kommunikation i mobila taktiska radionät.

Nyckelord: Koncept, UAV, mobila taktiska radionät, vegetation, terräng, riktantenner

## **Abstract**

A concept with low-flying UAVs is suggested, that may significantly increase the radio network capacity of a battalion. Since flying relays often have free line-of-sight to each other, the increase in capacity in the radio network does not necessarily lead to a limited range. Longer distances within the network can be bridged so that links between the UAVs have free line-of-sight above difficult terrain, while the distance from the UAV to the ground can be kept relatively short so that the signal passing through vegetation is strong enough for communication. A study of literature related to the concept idea has been carried out and covers results on channel modeling, frequency selection and antennas, different types of communication networks with UAVs, and UAV as a flying base station. We also assess future technical UAV prestanda. No solutions to the concept was found in the literature study. We believe that the concept is worth further developing, to form the basis for a realization of UAV-supported communication in mobile tactical radio networks.

Keywords: Concept, UAV, mobile tactical networks, vegetation, terrain, directional antennas

# Innehållsförteckning

<b>1</b>	<b>Introduktion</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>UAV-stödd kommunikation</b>	<b>9</b>
2.1	Konceptbeskrivning . . . . .	9
2.2	Radioförbindelser . . . . .	10
2.3	Antenner . . . . .	10
2.4	Nätgenskaper . . . . .	11
<b>3</b>	<b>UAV-prestanda</b>	<b>13</b>
3.1	Vikt, uthållighet och vädertålighet . . . . .	13
3.2	Autonom följning av marknoder . . . . .	14
3.3	Batteribyte och laddning . . . . .	14
3.4	Realiserbarhet . . . . .	14
<b>4</b>	<b>Litteraturstudie</b>	<b>17</b>
4.1	Kanalmodellering . . . . .	17
4.2	Frekvensval . . . . .	18
4.3	Antenner . . . . .	19
4.4	FANET . . . . .	20
4.5	Mark- och luftbaserade nät . . . . .	21
4.6	OLSR för flygande nät . . . . .	22
4.7	Ad hoc-nät med riktantenner . . . . .	23
4.8	UAV som flygande basstation . . . . .	24
<b>5</b>	<b>Slutsatser</b>	<b>27</b>
	<b>Referenser</b>	<b>34</b>

FOI-R--5196--SE

# 1 Introduktion

Utvecklingen av obemannade flygande farkoster, UAV:er, karaktäriseras av mer autonoma egenskaper, ökande prestanda och sjunkande pris. Därför kan UAV:er som följer markfordon, helt oberoende av operatörer på marken, snart vara ett realistiskt inslag i till exempel en mekaniserad bataljon. Att utöka det mobila marknätet med autonoma UAV:er kan medge en väsentligt ökad kommunikationskapacitet i ett förband. Eftersom flygande relänoder kan ha fri sikt till varandra, så kan de ha längre länkar med hög kapacitet jämfört med markförband. Längre avstånd inom nätet kan överbryggas om länkarna mellan UAV:erna har fri sikt ovanför besvärlig terräng, samtidigt som avstånden från UAV:n till marken kan hållas relativt korta så att signalen är tillräckligt stark för att ta sig genom mellanliggande vegetation ner till markfordonet.

I denna rapport beskrivs förutsättningarna för att realisera ett koncept för UAV-stödd kommunikation i ett markförband. Syftet med konceptet är att uppnå betydande kapacitetsökningar, med minst en faktor tio, jämfört med dagens taktiska mobila radionät. Efter framtagningen av konceptet genomfördes en litteraturstudie av områden relevant för att kunna realisera konceptet. Dessa områden innefattade: kanalmodellering, frekvensval och antenner, olika typer av kommunikationsnät med UAV:er, samt UAV som flygande basstation. Även en bedömning av framtida UAV-prestanda genomfördes. Kapitel två beskriver ett koncept för UAV-baserad kommunikation samt förutsättningar som radioförbindelser, antenner och nätegenskaper. Kapitel tre beskriver de krav som UAV:er måste uppfylla för att fungera enligt konceptet. Kapitel fyra redovisar resultatet av litteraturstudien. Kapitel fem innehåller slutsatser och möjliga vägar framåt.



FOI-R--5196--SE

## 2 UAV-stödd kommunikation

Sensorsystem är avgörande för tidig förvarning, detektion och situationsförståelse. Användningen av sensorer förväntas öka, både på bemannade och obemannade system. Teknikutvecklingen bidrar också till högre kvalitet på lägesbild och stöd till operatörer även på stridsteknisk nivå, vilket ökar kapacitetsbehoven i kommunikationsnäten [1].

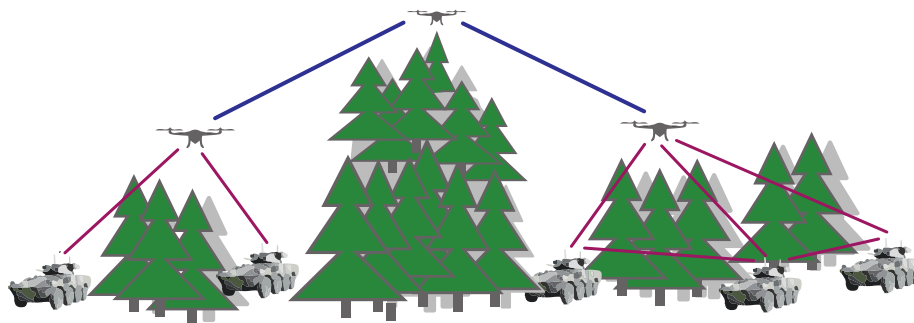
Framtida ledning av militära operationer kräver flexibilitet och anpassningsförmåga. Detta medför högre krav på att de tekniska ledningsstödssystemen kan fungera både autonomt och integrerat [2]. Förmågan att förse distribuerade ledningsplatser med tillräcklig kapacitet kommer även detta öka kapacitetsbehoven i näten.

Taktiska mobila radionät för markförband, som behöver fungera oberoende av fast infrastruktur, har idag en begränsad kapacitet i förhållande till vad framtida applikationer och sensorsystem kommer kräva. Begränsningen i kapacitet beror på flera faktorer såsom krav på tillräcklig räckvidd, terränghinder, mobilitet och störskyddskrav. Kapaciteten i ett radionät kan ökas på flera sätt, till exempel genom att höja antennerna, vidga bandbredden eller utöka antalet antennelement. En högre antennhöjd är inte möjlig för mobila enheter som ska röra sig i besvärlig terräng. I de frekvensband som normalt används, VHF och UHF, är tillgänglig bandbredd en begränsad resurs och riktverkan är svår att åstadkomma utan att antensystemen kräver stort utrymme på fordonen. Användning av högre frekvenser skulle ge utrymme för en större bandbredd och därmed möjlighet till högre kapacitet, men för högre frekvenser begränsas räckvidden i högre grad av mellanliggande terräng och hinder och därmed ökar behovet av fri sikt mellan enheterna för att uppfylla räckviddskraven. Utöver dessa metoder kan en viss förbättring ske genom den allmänna teknikutvecklingen och förbättringar av effektiviteten i metoder och protokoll, men samma fenomen gäller även för fientliga telekrigssystem. Det är därför svårt att uppnå väsentliga förbättringar av tillgänglig prestanda i marknät utan att ytterligare komponenter tillförs, såsom ett stödnät av UAV:er.

### 2.1 Konceptbeskrivning

Konceptet för UAV-stödd kommunikation innebär att lågt flygande autonoma UAV:er följer ett markförband. UAV:erna bildar ett förbundet luftburet nät och varje markfordon har förbindelse med minst en UAV (figur 2.1). I konceptet fördelar sig UAV:erna autonomt över markfordonen på ett lämpligt sätt och kan flyga tillräckligt lågt för att undgå radar och visuell upptäckt. Dessutom antas att de vid behov, till exempel i kuperad terräng, autonomt kan placera sig så att det flygande nätet inte fragmenteras.

Ett luftburet nät kan använda högre frekvenser än markfordonen eftersom länkarna mellan UAV:erna har fri sikt. Därmed kan också kapaciteten ökas och tanken är att öka kapaciteten betydligt, åtminstone en tiopotens högre än de bredbandiga taktiska vågformer som används idag. En bataljon bestående av upp till ungefär två hundra fordon bör kunna stödjas med ett måttligt antal autonoma UAV:er (kanske en UAV per kompani eller en per pluton).



Figur 2.1: Lågt flygande autonoma UAV:er bildar ett kommunikationsnät med hög kapacitet. Länkar mellan UAV:er antas ha fri sikt.

## 2.2 Radioförbindelser

Tre typer av radioförbindelser är tillgängliga för att upprätthålla kommunikationen: länkar mellan markfordon, länkar mellan markfordon och UAV samt länkar mellan UAV:erna i luften, se figur 2.1. På höga frekvenser är det enklare att erhålla höga datafaster och både för länkarna mellan markfordon och UAV:er och för länkarna mellan UAV:er bör högre frekvenser kunna användas än för dagens system. Detta gäller särskilt för länkarna mellan UAV:erna eftersom de har fri sikt till varandra ovanför vegetation och terräng, men även för länkarna mellan UAV:er och markfordon eftersom de är relativt korta och endast skymda i begränsad omfattning.

Flera olika arkitekturer kan behöva utvärderas, till exempel att marknoderna enbart kommunicerar via UAV:erna, eller att de även bildar ett markbundet flerhopsnät (där UAV:erna är medlemmar som andra noder). Båda alternativen är tänkbara och ger olika konsekvenser vad gäller komplexitet, kapacitet och störkänslighet. Förbindelsen mellan markfordon och UAV är troligen mest kritisk för att erbjuda önskad kapacitet och räckvidd. I ett tidigare arbete [3] utvärderades räckvidden för dessa förbindelser vid olika frekvenser och flyghöjder. Vid höga frekvenser är det enklare att erhålla höga datafaster men radiosignaler dämpas mer av vegetation och resultaten från det arbetet indikerar att frekvenser upp till 2 GHz är lämpliga för dessa länkar. För länkarna mellan UAV:er kan högre frekvenser användas eftersom de har fri sikt till varandra ovanför vegetation och terräng.

## 2.3 Antenner

Antennstorlek beror på frekvens och vid ökad frekvens minskar antennstorleken. För antensystem som består av flera antennelement gäller även att avståndet mellan elementen kan minskas då frekvensen ökar. Vid högre frekvenser kan därmed mer avancerade antenner placeras på både markfordon och UAV:er. Riktverkan och undertryckning av störande signaler, till exempel med hjälp av elektriskt styrbara antenner, kan då åstadkommas, vilket kan användas för att göra radionätet mer robust mot aktiv störning

och svårare att upptäcka för signalspanare. Detta kan vara av intresse för konceptet, eftersom minst samma störskyddsförmåga som för dagens bredbandiga vågformer är önskvärd. Detsamma gäller risken att bli upptäckt av signalspanare. Därför kan antenner med riktverkan vara en tänkbar komponent i konceptet, men det är ett forskningsproblem i sig att utnyttja riktverkan effektivt i mobila ad hoc-nät. Den höga dataakten kombinerat med relativt låg länkdynamik bör dock förenkla hanteringen av riktverkan jämfört med mobila marknät.

## 2.4 Nättegenskaper

Hur många marknoder som kan ha kontakt med en och samma UAV bestäms av markfordonens utspridning samt storleken på den yta inom vilken kommunikation med UAV:n är möjlig. Antal fordon per UAV påverkar också kapacitetsbehovet för länken mellan UAV och mark. Om många markfordon delar på kanalresurserna för en UAV så krävs en högre länk-kapacitet än om ett fåtal markfordon gör det. En avvägning kan vara att minst en pluton bör kunna nå samma UAV, men det kan vara önskvärt att det räcker med färre UAV:er än så, exempelvis med några UAV:er per kompani.

Den del av kommunikationsnätet som utgörs av UAV:erna kan utformas som ett mobilt ad hoc-nät, men länkarna är förhållandevis stabila och ändras inte så fort jämfört med ett markfordonsnät. För att hantera användartrafik, mobilitet och nätöverhead krävs eventuellt en högre kapacitet på länken mellan två UAV:er jämfört med länken mellan UAV och marknod, beroende på trafikmönster och utformning av nätarkitektur. Systemet behöver också vara robust nog att bortfall av enstaka UAV:er inte leder till att kommunikationsnätet fragmenteras. För att få ett robust svårupptäckt system antar vi därför att det luftburna nätet utgörs av ett antal UAV:er som flyger relativt lågt ovanför eventuella markhinder, under 100 meters höjd över marken.

Även om huvuduppgiften för UAV-nätet är att vara ett kommunikationsstöd är UAV:erna även lämpliga som sensorplattformar för exempelvis kameror, ljudsensorer och radiosensorer. En väsentlig andel sensortrafik kan därmed antas genereras direkt i UAV:erna. Effektnivån för sändaren i UAV:n och möjligheten att bära sensorer är dock begränsad av UAV:ns lastförmåga och bränsle/batteri-förbrukning, vilket kan påverka konceptets förmågor.

FOI-R--5196--SE

### 3 UAV-prestanda

Relativt höga krav ställs på de UAV:er som ska utgöra flygande noder i kommunikationsnätverket. Dessa behöver bära radiosändare, mottagare och antenner för kommunikation både med marknoder och med andra UAV-noder, samtidigt som de bör ha lång uthållighet för att minimera antalet batteribyten eller laddningstillfällen. De behöver också kunna flyga under varierande väderförhållanden, och så långt som möjligt uppträda autonomt i följning av markfordonen samt vid start och landning.

För att underlätta följning av markfordon samt för att underlätta start och landning, förutsätts att plattformar av multikoptertyp (exempelvis så kallade quadrokoptrar, med fyra rotor) används. Vidare förutsätts att UAV:erna drivs elektriskt. Alternativet, att bära en bränsle driven motor och en generator, är i nuläget endast genomförbart på mycket stora multikoptrar.

Lång uthållighet kan i vissa fall uppnås genom att använda tjuvrade (*tethered*) UAV:er, som kontinuerligt strömförsörjs via en kabel från marken. Detta bedöms dock inte vara en framkomlig väg i sammanhanget, eftersom de flygande plattformarna behöver följa de markgående enheterna under rörelse, och en sådan kabel medför kraftiga begränsningar i fråga om framkomlighet i till exempel skog och under broar.

#### 3.1 Vikt, uthållighet och vädertålighet

Eftersom ganska höga frekvenser kan väljas, kan små och därmed lätta antenner användas. Den nödvändiga radioutrustningen, inklusive antenner, för en UAV förväntas väga cirka 1 kg. Idag finns kommersiellt tillgängliga system som, med den lasten, har en uthållighet på strax under en timme<sup>1</sup>. Utvecklingen av batterier, motorer och lätta material går snabbt, och märkbart bättre uthållighet kan förväntas inom några år.

För många idag tillgängliga plattformar anges en maximal vindtålighet omkring 10–15 m/s. Uthålligheten kan dock antas påverkas negativt av mycket stark vind, framför allt om vinden är byig. UAV:ns maximala hastighet är naturligtvis lägre i motvind än vid vindstilla förhållanden, vilket kan påverka möjligheten att följa rörliga markfordon. Eftersom en multikopter håller sig stilla i vind genom att luta kroppen mot vinden, påverkas fast monterade antenners elevationsvinkel av vindförhållanden. Detta kan medföra problem om antennloben är mycket smal i elevationsled. Möjliga lösningar är att använda bredare antennlobar, eller att styra antennen antingen mekaniskt med en gimbal, eller elektroniskt. De senare alternativen medför dock ökad vikt och därmed kortare flygtid.

Det blir allt vanligare med UAV:er som klarar regn. I många fall är plattformarna byggda så att endast motorerna utsätts för väta, och dessa är ganska okänsliga. Vid låga temperaturer i kombination med fuktig luft kan isbildning uppstå. Under vissa förutsättningar kan detta leda till att propellrarnas lyftförmåga minskar kraftigt, och risken för en kraschlandning är då stor. Låga temperaturer leder också till försämrade kapacitet hos litium-polymer-batterier, som är den absolut vanligaste strömkällan hos

<sup>1</sup> Foxtech Hover 2: 55 minuter, DJI Matrice 300: cirka 40 minuter; detta enligt tillverkarnas specifikationer, sannolikt uppmätt under optimala förutsättningar avseende väder, flyghastighet etc. Storleken hos båda dessa exempelplattformar är ungefär 1x1 meter.

elektriskt drivna UAV:er. Vissa typer av batterier använder en del av energin till att värma upp sig själva, för att minska detta problem.

### 3.2 Autonom följning av marknoder

Då GNSS<sup>2</sup> är tillgängligt, sker följning av markfordon enkelt genom att brytpunkter överförs till UAV:ns styrdator. Enkla funktioner för att undvika kollisioner med omgivande terräng finns också (i denna tillämpning bör det i stort sett alltid fungera att stiga till högre höjd än hindren). Om GNSS störs ut av en motståndare eller är otillgängligt av andra skäl, finns alternativa navigeringstekniker som kan användas för att följa marknoderna. Sådana tekniker utvecklas även på FOI, till exempel baserat på bildbaserad navigering [4] och korräcksviddig ultra-wideband radio (UWB) [5]. Alternativ till GNSS är dock fortfarande under utveckling, och färdiga lösningar är ovanliga. Dessutom krävs extra sensorer och beräkningsenheter ombord på UAV:n, vilket medför en viss ökning av dess komplexitet och vikt.

### 3.3 Batteribyte och laddning

För att upprätthålla nätverket behövs ett antal extra UAV:er, så att en UAV kan lyfta och ta över kommunikationsuppgiften medan en annan landar för batteribyte. Att hantera detta manuellt är personalintensivt givet de begränsade flygtider som erbjuds av dagens UAV:er. Teknik existerar för att precisionslanda vid en anordning, som med hjälp av robotarmar genomför ett batteribyte, men dessa system är på "proof of concept"-nivå och/eller designade för specifika UAV:er.

Ett annat alternativ är att ladda batterier medan de sitter kvar i UAV:n. Även detta kräver precisionslandning, men den mekaniska komplexiteten är mindre, vilket är attraktivt för en lösning som ska fungera i fält. Inte heller här finns några generellt användbara, färdiga lösningar, som kan användas på ett fordon i rörelse. Sådana kan dock förväntas bli tillgängliga inom några år. Trådlös laddning sänker kraven på precision i landningen, men medför å andra sidan att batteriladdningen tar längre tid.

Robusta funktioner för autonom start och landning bedöms kunna åstadkommas om landningsplatsen är tillgänglig rakt uppifrån. Om UAV:n däremot behöver ta sig igenom terräng med hinder, är det troligt att manuell flygning blir nödvändig. Autonom landning på fordon i rörelse har demonstrerats [6], men ställer höga krav på UAV:ns förmåga till kollisionssundvikande och/eller fordonets rörelse i förhållande till omgivande terräng.

### 3.4 Realiserbarhet

Idag tillgängliga UAV:er kan bygga upp ett mobilt taktiskt nät, dock med vissa väsentliga begränsningar:

---

<sup>2</sup>Global Navigation Satellite System, exempelvis GPS.

1. Den korta flygtiden och frånvaron av robusta, autonoma lösningar för batteribyte eller -laddning gör hanteringen personalintensiv.
2. Även start och landning kräver personal, förutom i öppen terräng.
3. De flesta existerande lösningar förutsätter att GNSS finns tillgängligt.
4. Under förflyttning i hög hastighet kan en UAV av multikoptertyp vara otillräckligt snabb, beroende på vindstyrka och vindriktning.
5. Flygning i kallt och fuktigt väder är ofta omöjligt på grund av isbildning.

Vidare teknikutveckling inom autonomi, robotik, batterier och navigeringsteknik kommer med stor sannolikhet att avhjälpa punkterna 1–3 inom de närmaste åren. Punkterna 4–5 kvarstår sannolikt, men utgör å andra sidan bara hinder under specifika förutsättningar.



FOI-R--5196--SE

## 4 Litteraturstudie

En litteraturstudie har genomförts för att undersöka vilka problemställningar som studerats tidigare och är relevanta för konceptet för UAV-stödd kommunikation. Ett antal delområden har identifierats i litteraturstudien och dessa beskrivs nedan.

### 4.1 Kanalmodellering

Ett marknät som stötts av ett luftburet UAV-nät kan utnyttja två typer av länkar. Dessa länkar benämns som:

- Air-to-Ground (A2G) - kommunikation mellan UAV och marknoder,
- Air-to-Air (A2A) - kommunikation mellan UAV:er.

Med A2A-länken menas länken mellan två UAV:er och anses oftast i litteraturen kunna beskrivas med utbredning i fritt rum, eftersom UAV:erna antas befinna sig på en tillräckligt hög höjd för att inga hinder ska blockera siktlinjen mellan dem. A2A-kanalen i en sådan situation modelleras ofta genom en enkel modell för utbredning i fritt rum [7, 8], där förlusten endast ökar kvadratisk med avståndet mellan sändar- och mottagarantenn.

En UAV som befinner sig på en låg höjd där fri sikt inte dominerar ger en vågutbredningsmiljö med andra förutsättningar. En sådan situation omfattar hinder i form av vegetation på marken, vilket gör att frisiktsmodellen inte är lämplig. I [9] diskuteras en empirisk modell för att beskriva signalförlusten när enstaka trädtoppar som blockerar länken. Modellen i [9] är framtagen för en A2G-länk med högre frekvenser (över 8 GHz) än vad som är relevant för vårt koncept, men artikeln klargör att modellen kan utvidgas till andra radiolänkar, exempelvis A2A. Modellen beskriver dämpningen som introduceras av vegetationshinder, till exempel trädtoppar. Utbredningseffekterna av hindret hanteras olika beroende på avståndet från hindret. Tre regioner definieras: (a) långt bort från hindret där länken antas vara i fri sikt, (b) en medelregion där dämpning på grund av diffraktion över hindret dominerar och (c) nära hindret där spridning från olika delar av hindret (stammar, grenar och lövverk) dominerar. Dämpningen i region (b) beskrivs av en kniveggsmodell där kniveggen representerar hindret. Effekterna i region (c) beskrivs med en stokastisk fädningsmodell. Modellen har validerats med empirisk data genom testning med olika typer av träd och lövverk. Resultaten varierar beroende på vilken typ och genomsnittlig höjd av träd som undersöktes, men i genomsnitt erhålls störst dämpning i region (c) som aktiverades inom 1,5 meter från hindret. Resultaten visar dessutom att övergången från frisiktsregionen (a) till region (c) sker snabbt, i ett medelavstånd på 0,3 meter.

Kanalmodellering för kommunikation mellan UAV och marknod skiljer sig väsentligt från A2A-länken och kräver andra antaganden. Terränghinder, modernas rörelse, små- och storskalig fädning, val av frekvens, antennstorlek och antenntyp är några faktorer som påverkar länkens kvalitet. Valet av kanalmodell beror på scenariot och användningen, eftersom alla existerande modeller har för- och nackdelar som måste

vägas mot varandra för den avsedda tillämpningen. Fädningsmodeller, vilka beskriver signalens variation i tid och rum, är en viktig komponent för att beskriva A2G-kanalen. Den småskaliga fädningen beskrivs oftast statistiskt med hjälp av *Rice*- eller *Nakagami-m*-fördelningar [10, 11].

I litteraturen förekommer en stor mängd av modeller som tillämpas i olika scenarier, exempelvis en modell för fri sikt, för situationer där UAV:er antas befinna sig på en höjd eller i en terräng som möjliggör dominerande frisiktslänkar [10, 12]. För situationer där terräng och vegetation har stor påverkan, är modellen för enkel. En annan modell inkluderar höjdberoende kanalparametrar som länkdämpning och skuggning som funktioner av plattformens flyg- eller vinkelhöjd [13].

Ett återkommande modellantagande (ex. [14, 15, 16, 17]) för teoretisk analys är en sannolikhetsbaserad frisiktsmodell, där en länk antas ha antingen fri sikt eller inte. Utan någon ytterligare information om terrängen som exempelvis antal hinder, exakt placering, höjd, eller dylikt, associeras en slumpmässig faktor med länkarna. Påverkande faktorer kan inkluderas eller exkluderas beroende på hur scenariot ser ut, som exempelvis elevationsvinkel [18]. Generella geometriska egenskaper och statistik finns sammanfattat i ett ITU-dokument [19] som innehåller miljöberoende parametrar för att beskriva bland annat densiteten, antal- och typisk höjd för olika hinder.

Sammanfattningsvis har kanalmodellering för A2A- och A2G-länkar studerats tidigare i olika tillämpningar. Framförallt antas UAV:erna ofta befinna sig på en höjd som tillåter dominerande frisiktslänkar medan marklänken kompliceras av vegetation och andra hinder. För A2G-länken är en sannolikhetsbaserad frisiktsmodell som tar hänsyn till påverkande faktorer vanlig bland publikationerna.

## 4.2 Frekvensval

Valet av frekvens har stor betydelse för hur transmissionen påverkas, där framförallt utbredningsegenskaper och signalkaraktäristik kan variera kraftigt. Inom litteraturen har mätningar och analyser utförts på flera frekvensband, där föreslås ofta kommunikation på L-bandet (1-2 GHz) för A2G-länken och C-bandet (4-8 GHz) för A2A-länken [10]. För A2G-länken måste ofta hänsyn tas till vegetation och terräng. Högre frekvensband som  $X$ ,  $K_u$ ,  $K$  och  $K_a$  (10-100 GHz) påverkas mer av dämpning i troposfären från atmosfärens gaser och hydrometeorer, vilka kan försummas för L- och C-bandet. Dock erbjuder de högre frekvenserna mer bandbredd och potentiell kapacitet för framtida tillämpningar, men en allmän uppfattning verkar vara att känsligheten och opålitligheten i dagsläget är för stor [12]. För A2A-kommunikation, där länkarna anses vara inom fri sikt, kan högre frekvensband utnyttjas för att öka kapaciteten. Valet av frekvens är inte lika känsligt i det här fallet, varpå frekvenser i C-bandet kan övervägas.

För A2G-länken är det i FOI-rapporten [3] visat att länken mellan UAV och marknod helst bör vara under 2,5 GHz, och gärna runt 1,5 GHz, vilket är mitt i L-bandet. Ett problem kan vara att L-bandet redan är kraftigt utnyttjat av många radiosystem [20], men reserverade frekvenser för militär användning finns tillgängligt enligt den nationella frekvensplanen [21] vid 1518-1544 MHz och delvis tillgängligt vid 1545-1559 MHz samt vid 2200-2300 MHz. Radiosystemen RL371 och RL373 används i

frekvensområdena 1350-1850 MHz, respektive 1350-2690 MHz [21, 22]. Möjligheten för ett UAV-nät att samutnyttja dessa frekvenser måste undersökas.

## 4.3 Antenner

Antennerna i ett radiosystem utgör en viktig komponent som kan påverka systemets prestanda flera olika sätt. En antenn med riktverkan ger en så kallad antennvinst genom att sändarens signal koncentreras i en önskad riktning. Vid mottagning ger en antenn med större antennvinst en högre mottagen signalnivå i mottagaren. Antennvinstens storlek ges i huvudsak av antennens fysiska storlek i förhållande till våglängden, där en antenn med stor utsträckning (i våglängder) ger en hög riktverkan och därmed en hög antennvinst.

Riktantenner kan vara såväl mekaniskt som elektriskt styrbara. Elektriskt styrbara antenner består av ett flertal antennelement som tillsammans bildar en gruppantenn. Avståndet mellan antennelementen är normalt ungefär en halv våglängd. Genom att variera signalens fasläge i de enskilda antennelementen kan antennens riktningsdiagram styras inom en viss vinkelsektor. Antennsystem med flera antennelement kan, förutom att skapa riktverkan, även utnyttjas för att förbättra systemprestanda på andra sätt. Till exempel kan mottagningsdiversitet erhållas genom att dynamiskt kombinera signalerna från de olika antennelementen på bästa sätt och därmed minska variationerna i mottagen signalnivå i miljöer med kraftig flervägsutbredning.

Flerantenneteknik i form av MIMO (multiple input - multiple output) är en teknik där varje antennelement på sändarsidan är kopplat till en separat sändare, och där varje mottagarelement har en separat mottagare. Tekniken ger hög flexibilitet och kan användas för att åstadkomma riktverkan (lobformning), diversitet (på både sändar- och mottagarsida) samt spatiell multiplexering. Det sistnämnda innebär att flera oberoende dataströmmar kan sändas parallellt på samma frekvens.

I litteraturen finns många exempel där UAV:er med riktantenner används för att förbättra kommunikationen. Val av antenntyp och placering är beroende av många faktorer, där det mest avgörande är plattformens fysiska egenskaper. Plattformens storlek begränsar möjlig antennstorlek och därmed vilken riktverkan som kan erhållas vid en viss frekvens. Frågan om valet av rundstrålande antenner eller riktantenner på själva UAV:n diskuteras i många artiklar, bland annat [23, 24]. De flesta av författarna förespråkar riktantenner baserat på att dessa ger ett ökat skydd mot störning och en förbättrad smygförmåga. Vidare anses riktantenner, samt effektkontroll, kunna förbättra den totala kapaciteten över ytan genom att effekten koncentreras mot den avsedda mottagaren och interferensnivån hos de övriga noderna minskas. Det många översiktliga artiklar förbiser, är kopplingen av antennval till UAV:ns fysiska storlek och valet av frekvens. Fördelen med rundstrålande antenner är att de är mindre och att ingen inriktning behöver ske.

MIMO-tekniken är intressant för både A2A- och A2G-länkar, men är krävande vad gäller signalbehandling och effektförbrukning [14]. För A2A-länkarna i konceptet, vilka antas ha fri sikt och måttlig dynamik, bör lobformning ge störst kapacitetsvinst. Det har dock rapporterats [25] att även spatiell multiplexering kan erhållas under dessa

förhållanden genom ett noggrant val antennseparationen. För A2G-länkarna, där hinder och flervägsutbredning kan förväntas, bör MIMO-teknik kunna ge kapacitetsvinster genom diversitet och spatiell multiplexering.

A2G-länkens markbundna enhet har större utrymme för antenninstallationer än vad den flygande plattformen har, vilket ger möjlighet till andra typer av antenner som kan ge högre prestanda, se exempelvis [26].

## 4.4 FANET

Mycket som publicerats rörande kommunikationsnät och UAV:er handlar om så kallade *flying ad hoc networks* (FANET). Ett FANET är ett nät bestående av (i stort sett) enbart flygande noder, undantaget någon eller några markstationer. En övergripande sammanfattning av publicerade arbeten och problemställningar för FANET ges i [11]. I denna artikel redogör författarna för vad de anser skilja FANET från traditionella markbaserade ad hoc-nät (mobile ad hoc network, MANET) och fordonsbaserade ad hoc-nät (vehicle ad hoc network, VANET). Egenskaper som lyfts fram är bland annat mobilitetsaspekter, krav på energieffektivitet och kanalegenskaper. Distinktionerna som lyfts fram är dock inte helt relevanta sett ur ett militärt perspektiv. Många av de egenskaper som lyfts fram som särskiljande för FANET är egenskaper som är typiska för militära MANET. Kommunikationsaspekter för FANET som tas upp i artikeln är bland annat:

- Rundstrålande antenner kontra antenner med riktverkan. Antenner med riktverkan lyfts fram som en viktig komponent i FANET men även som en faktor som gör design av MAC-protokoll mer komplex.
- MAC-lager för flygande ad hoc-nät. Det nämns att mycket som publicerats vid tiden för skrivandet av artikeln (2013) använder IEEE 802.11 (Wifi) och att det då inte fanns mycket publicerat kring MAC-protokoll för FANET. Ett exempel som lyfts fram är ett protokoll som bygger på en token ring-baserad lösning och radioapparater med full duplex-förmåga [27].
- Routing-protokoll för FANET. I artikeln beskrivs hur de första protokollen som utvärderades var rena MANET-protokoll. Protokoll speciellt avsedda för FANET delas in i klasserna: proaktiva, reaktiva, geografiska och hierarkiska.

FANET har tydliga kopplingar till konceptet som beskrivs i denna rapport men de nätverkslösningar som presenteras är generellt inriktade på nät bestående enbart av flygande noder. Däremot forskas det inom området på frågor som navigering av UAV:er i nät och användning av riktantenner och dessa resultat kan vara användbara i arbetet framåt.

## 4.5 Mark- och luftbaserade nät

En del publikationer angränsar relativt väl mot de scenarier som beskrivs i Kapitel 2: ett UAV-baserat flygande nät som stöttar ett markbaserat nät. Ett tidigt exempel är [28] från 2002 som beskriver ett routingprotokoll för ett hierarkiskt militärt nät bestående av ett nät av markfordon, samt ett UAV-nät för att binda samman olika delar av marknätet. Hierarkin består av tre nivåer som hanteras med klustring: den lägsta nivån består av marknoder som kommunicerar med närliggande noder i form av ett ad hoc-nät. Som klusterhuvud på den första nivån väljs ett markfordon som antas vara mer välutrustad än övriga marknoder. På nästa nivå bildar ett antal (geografiskt) närliggande klusterhuvuden på den första nivån ett kluster och som klusterhuvud på denna nivå används en UAV. Den sista nivån består av nätet av UAV:er, som antas flyga på ca 15 kilometers höjd. Enstaka resultat från nätverkssimuleringar av routingprotokollet presenteras. I [29] undersöks ett scenario där flera UAV:er stöttar ett marknät för att se till att nätet är förbundet trots kuperad terräng. Problemet som studeras är hur UAV:erna ska positioneras samt förflytta sig; en metod inspirerad av fåglars flockningsbeteende föreslås.

UAV-placering och routing genom flerhopsnät som inkluderar flygande noder studeras i [30]. Författarna utgår från ett flerhopsnät bestående av både mark- och UAV-noder med en platt näthierarki. Ett paket kan som exempel färdas ett antal hopp på marken för att sedan routas via en UAV till en annan del av marknätet. Reaktiva protokoll som DSR och AODV utvärderas och antal UAV:er samt placering av dessa optimeras för att förbättra nätprestandan.

Ett annat angränsande område som dock inte helt faller inom ramen för denna studie är hur ett marknät påverkas av att en enstaka UAV tillförs som relänod i ett nät [31, 32]. I [32] tänker sig författarna ett större antal UAV:er men som fungerar som en flygande, distribuerad MIMO-antenn. Många publikationer beskriver också flygande nät i en kontext av att det flygande nätet stöttar ett marknät men väljer sedan att behandla det flygande nätet isolerat och undersöka exempelvis routingfrågor mellan flygande noder.

Relativt många publikationer fokuserar på UAV-nät som stöttar fordonsnät, VANET. En typisk civil tillämpning av UAV-stöttade fordonsnät är så kallad *disaster relief*. I ett sådant scenario agerar UAV:erna både sensorplattform och kommunikationsnod. Det markbaserade nätet är i dessa sammanhang ofta ett fordonsbaserat nät, VANET. Andra vanliga civila scenarier är trafikövervakning och tidig upptäckt av trafikolyckor, se exempelvis [33]. VANET skiljer sig från MANET i det avseendet att noderna oftast antas röra sig längs en väg vilket påverkar nätets topologi och mobilitetsmönster. En bra översikt av området ges i [34] inklusive en taxonomi av protokoll för dessa typer av nät samt författarnas åsikter om fördelar och nackdelar med varje lösning. En aspekt som genomgående saknas, enligt författarna, är minimering av energiförbrukningen hos UAV:erna. Gemensamt för många av dessa protokoll är att de utgår från VANET med topologier som styrs hårt av hur vägnäten ser ut, vilket kan göra att de inte direkt går att applicera på militära taktiska nät.

Sammanfattningsvis har koncept bestående av kombinerade mark- och luftnät studerats tidigare, dock med vissa skillnader. Framförallt antas UAV:erna befinna sig på klart högre flyghöjder, ofta flera tusentals meter.

## 4.6 OLSR för flygande nät

Optimized link state routing (OLSR) är ett vanligt förekommande routingprotokoll, både i civila och militära tillämpningar. OLSR är ett proaktivt protokoll i vilket särskilt utvalda noder kallade MPR-noder utgör grunden i protokollet, i synnerhet för broadcast- och multicasttrafik. Valet av MPR-noder kan ha stor påverkan på prestandan i OLSR och olika metoder är bäst lämpade beroende på scenario. Ett antal paper har publicerats kring en modifierad variant av OLSR som enligt författarna är anpassad för flygande nät, bland annat [35]. UAV:erna förutsätts vara utrustade med både rundstrålade antenner och antenner med styrbar lob. För mottagning används den rundstrålade antennen och vid sändning används båda antennerna. Först skickas ett meddelande med den rundstrålade antennen för att få mottagarens position, detta paket routas med MPR:er. När mottagaren svarat med sin position använder sändarnoden istället den styrbara antennen för att kommunicera direkt med mottagarnoden om noden befinner sig inom ett maximalt avstånd, annars används den rundstrålade antennen. För OLSR beräknas två set av MPR-noder, ett för rundstrålade sändning och ett för riktad sändning. Tanken är att välja färre MPR-noder för direktiv sändning, men algoritmen för att välja dessa är lite dåligt beskriven. Men på ett ungefär väljs bara den MPR som befinner sig på störst avstånd. På MAC-lagret används ett protokoll baserat på RTS och CTS.

I den första versionen av OLSR finns inga länkmetriker definierade, routern försöker endast minimera antalet nätverkshopp mellan sändande och mottagande nod [36]. I heterogena nät där olika länkar har olika prestanda, exempelvis i form av olika data-takt, finns risk att routern väljer att routa trafik över en lång länk (få hopp) med låg data-takt istället för att utnyttja ett antal kortare länkar med högre data-takt. I version 2 av OLSR infördes bland annat möjligheten att använda länkmetriker för att avhjälpa dessa tillkortakommanden. Ett antal länkmetriker finns beskrivna i standarden men det är fritt att använda valfri metrik så länge den rapporteras enligt det standardiserade formatet. En metrik kallad *Directional Airtime* (DAT) som beräknas utifrån data-takt och paketförluster har föreslagits för militära heterogena nät [37, 38].

I OLSR kan en router ha flera så kallade interface, i det koncept som presenteras i denna rapport skulle då UAV:erna kunna ha ett interface för A2A-länken och ett för A2G. OLSR kan routa trafik mellan interfacen och på så vis kan exempelvis ett marknät och ett luftnät bindas samman. Till detta kan läggas koncept kring routing på olika lager i OSI-stacken, typiskt routing på lager två och tre. Med dessa tekniker kan heterogena nät byggas upp där länkar kan ha vitt skilda egenskaper [39].

En teknik som visats effektiv för taktiska marknät är synkroniserad kooperativ broadcast (SKB) [40, 41]. Genom att utnyttja metoder för *Neighborhood Discovery* (NHD) för kooperativ broadcast från [42] skulle en möjlig lösning vara att köra OLSR med multipla interface: SKB på lager 2 i marknätet på en frekvens, OLSRv2 med DAT (eller liknande metrik) på lager 3 i alla noder och en lager 2-lösning anpassad för flygande noder i UAV:erna som utnyttjar högre frekvens samt riktantenner.

OLSR är ett välstuderat protokoll och flera varianter för att anpassa OLSR till nät som inkluderar flygande plattformar har publicerats. Vissa av de idéer som publicerats inom detta område kan utgöra en grund om vi väljer att utgå från ett koncept där mark-

och luftnoder ingår i ett gemensamt routat nät.

## 4.7 Ad hoc-nät med riktantenner

Det finns omfattande forskning publicerat kring ad hoc-nät med riktantenner för rena marknät. Detta område förefaller ha varit som mest aktivt tidigt 2000-tal. Stort fokus är på system som använder någon form av CSMA/CA<sup>1</sup> som modifierats för att hanteras riktantenner.

I [43] presenteras en systemdesign där författarna försökt integrera användandet av direktiva antenner i hela kommunikationsstacken. Systemet består på MAC-sidan av ett protokoll baserat på CSMA/CA som modifierats för att använda riktantenner. Bland annat används en *directional NAV*<sup>2</sup> och RTS och CTS meddelanden som sänds i riktning mot tänkt mottagare. Det verkar underförstått att mobiliteten är så pass låg (alternativt positionsdata sprids tillräckligt ofta) att noderna vet när de ska skicka ett RTS-meddelande i vilken riktning det ska sändas. Vidare finns funktioner för effektkontroll, neighborhood discovery med riktantenner samt ett routingprotokoll som använder länkinformation som MAC-lagret rapporterar. Algoritmerna utvärderas dels med simuleringar i kommunikationsnätsimulatorn OPNET och dels under ett fältförsök med 20 bilar samt en helikopter, alla med riktantenner. Från fältförsöket presenteras inga resultat utan enbart ett antal lärdomar: antennernas riktningsegenskaper visade sig mer komplexa än vid simulering, i termer av sid- och backlober, och att rikta antennen mot mottagarens position var inte alltid optimalt. Författarna föreslår en vidare utveckling av MAC-protokollet i [44] i vilket RTS-meddelanden sänds över flera hopp för att motverka vissa av de problem som upplevts med det tidigare protokollet. Dock bortser författarna helt från mobilitet i detta papper.

Ett annat MAC-protokoll baserat på CSMA/CA som inte kräver att noder känner till varandras positioner presenteras i [45]. Protokollet bygger på att noder har ett antal antennelement med olika riktning. Datatransmission påbörjas genom att källan sänder RTS-meddelanden sekventiellt på alla antennelement. Mottagande nod lyssnar i alla riktningar och svarar med CTS, skickat i samma riktning som den tog emot RTS-meddelandet från. Genom att skicka RTS i alla riktningar motverkas problem med så kallad *deafness*, det vill säga att mottagarnoden har antennerna riktade i en annan riktning. Information från de direktiva RTS- och CTS-sändningarna används även i NAV:en för att öka spatiell återanvändning.

I [46] undersöks potentiella kapacitetsvinster för ett ad-hoc nät. Undersökningen visar att ett system med gruppantenner på marknoden kan öka kapaciteten jämfört med en rundstrålande antenn avsevärt. Rapporten behandlar inte direkt en UAV-länk men resultaten kan generaliseras mot en upphöjd mottagar/sändarnod. Ett gruppantennsystem består av flera antennelement med möjligheten att anpassa känsligheten i olika riktningar, som en slags adaptiv lobformning. Parametrar (ex. antal antennelement,

<sup>1</sup>Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance (CSMA/CA) är ett MAC-protokoll som bygger på att noder lyssnar om kanalen är ledig och sedan reserverar den innan sändning. Välanvänt protokoll som bland annat utgör grunden i tidiga utgåvor av IEEE 802.11.

<sup>2</sup>Network Allocation Vector (NAV) är en slags databas som används i 802.11 för att hålla reda på hur länge kanalen är reserverad av konkurrerande noder.



konstellation, separation, känslighet) för ett sådant system kan varieras och för bästa resultat måste optimeras efter rådande förhållanden. Konceptet i rapporten presenterar ett STDMA-protokoll i kombination med gruppantennor bestående av isotropiska antennelement tillsammans med algoritmer för lobstyrning för att utföra adaptiv lobformning. Systemet jämförs med ett traditionellt system med en ensam, rundstrålande antenn, och fann att kapaciteten kunde förbättras upp till 1200% i vissa fall. Kapaciteten ökade mer när fler antennelement inkorporerades, och när fler länkar introducerades i nätet. Förbättringen kunde konstateras i både platt och svår terräng, med större vinster i platt terräng.

I [47] presenteras ett TDMA-baserat protokoll för ad hoc-nät med riktantennor, framtaget av Harris/NRL på uppdrag av US Department of defense. En omnidirektiv kontrollkanal används för att bland annat koordinera antennriktning mellan sändare och mottagare. Schemaläggning görs med en graf-färgningsmetod anpassad för direktiva länkar och OLSR används som routingprotokoll. Relativt lite resultat presenteras, därtill beskrivs planerade fältförsök. Ett senare papper från Harris beskriver en metod för att göra vågformen oberoende av exakt positionering och tid från extern referens (GPS) [48]. I pappret diskuteras även metoder för att slippa använda omnidirektiv kontrollkanal. Det nämns i pappret att vågformer baserade på protokollet som presenterats i [47] är under införande.

De publikationer som studerats visar både på stora möjligheter samt svårigheter med att införa riktantennor i ad hoc-nät. Gemensamt för många av idéerna är en kombinerad användning av rundstrålande och riktade sändningar. En av grundsvårigheterna är att effektivt hitta och upprätthålla direktiva länkar, i synnerhet vid högre hastigheter hos plattformarna. Då CSMA-baserade accessprotokoll används bidrar riktantennor till nya former av så kallad dövhet, det vill säga att mottagarnoden har antennerna riktade i en annan riktning. Slutligen har författarna i de fall praktiska experiment genomförts erfarit att skillnader mellan teoretisk och faktisk antennprestanda ökar komplexiteten, alternativt minskar nyttan.

## 4.8 UAV som flygande basstation

Inom den cellulära mobilsystemindustrin har det länge funnits intresse för olika former av flygande basstationer för att snabbt kunna erbjuda stor täckning. Redan i början av 2000-talet torgförde mobiloperatörer tankar om att placera 3G-basstationer i så kallade HAPS (High Altitude Platform Stations) i form av ballonger i stratosfären, för att kunna täcka stora områden med relativt få användare. Liknande tankar lever fortfarande i den s.k. HAPS Alliance [49, 50] bestående av företag från flyg- och telekommunikationsindustrin, som tänker sig basstationer i mycket högt flygande autonoma flygplan. I ett annat projekt kallat Spacemobile [51, 52] siktar bland annat Vodafone och AT&T på att år 2023 kunna erbjuda täckning i södra USA och utvecklingsländer runt ekvatorn med 4G/5G-basstationer burna av ca 50 LEO-satelliter.

Med de senaste årens snabba tekniska utveckling av UAV:er, har den cellulära industrin intresserat sig för användningsfall där man med UAV:er kan ge tillfällig mobilkommunikation i områden utan täckning. Det kan exempelvis vara för räddningsin-

satser i glest bebyggda områden eller polisinsatser i hus med avskärmande väggar och fönster. Genom att låta en UAV bära en liten basstation, och sedan flyga den över räddningsplatsen eller huset, kan brandmännens och polisernas mobiler få uppkoppling under deras insats. En hel del forskning har gjorts på sådana flygande basstationer, och en del prototyper ha även testats [53, 54]. Den uppenbara utmaningen som uppstår är hur den flygande basstationen ska kunna kommunicera vidare med det så kallade kärnnätet i mobilsystemet, då den saknar fast transportnätslänk. Vanliga stationära basstationer är kopplade till kärnnätet med fasta länkar via radiolänk, koppar- eller fiber-kabel (fiber är vanligast). Utan uppkoppling till kärnnätet kan inte den flygande basstationen ansluta mobila terminaler i de cellulära systemen.

Det finns åtminstone tre lösningar på det:

1. Koppla upp transportlänken från basstationen till kärnnätet via satellitkommunikation. Detta inför en viss fördröjning på transportlänken, som dock är fullt acceptabel för LEO satelliter, se till exempel [55]. Det är dock en relativt krävande lösning för UAV:ns begränsade resurser m.a.p. vikt och strömförsörjning att bära sändtagare och antenn för satellitkommunikation, men det finns ändå kommersiellt tillgängliga produkter, till exempel [56].
2. Om användarna som kopplas upp till UAV:n bara behöver kontakt med varandra och inte kräver internetuppkoppling, kan UAV:n bära med sig ett enkelt kärnnät, utöver basstationen. Eftersom det kärnnätet inte kopplas vidare blir UAV:n och dess uppkopplade terminaler ett isolerat system, utan kontakt med omvärlden. Ericsson har gjort 4G-prototyper och tester på det, se [57] men så vitt vi vet finns inga planer på att kommersialisera denna lösning.
3. Med 5G/New Radio (NR) har man standardiserat en funktion som kallas "Integrated Access Backhaul" (IAB). Det betyder att man kan använda samma NR-vågform, som används för accesslänken mellan UAV-basstationen och de mobila terminalerna, som transportlänk ("backhaul") mellan två basstationer. På så vis kan alltså 5G-basstationen på UAV:n sätta upp en NR-baserad transportlänk till en stationär basstation, som har fast uppkoppling till kärnnätet. 5G-standarden tillåter även flera sådana IAB-hopp mellan flera mobila basstationer på vägen till den basstation som kopplar vidare till kärnnätet, se [58] för en djupare beskrivning.

Av dessa tre lösningar är alternativ 3. attraktivast. Fördelen jämfört med lösning 1. är att UAV:n inte behöver satellitkommunikationsutrustning utan bara en 5G/NR-station. Fördelen jämfört med lösning 2. är att användarna kan kommunicera utanför sin lilla grupp. 3GPP har även standardiserat funktioner för att kunna ersätta UAV:er, som måste landa för att laddas, med andra UAV-burna basstationer under pågående räddningsaktion. Lösning 3. förutsätter dock att det finns en 5G-basstation, med fast länk till kärnnätet, inom radoräckhåll för minst en av UAV:erna.

Det ska också noteras att störtålgigheten alltid blir en svaghet om man använder civila system till militär radiokommunikation. Radiogränssnitten för mobilsystemen är inte utvecklade för att klara avsiktlig störning, även om den egenskapen har förbättrats i 5G, med ännu bättre stöd för riktad sändning och mottagning [59]. Det finns dock inget

stöd för frekvenshopp eller annan bandspridningsteknik i 5G-standarden. För användningsfall där man kan räkna med att slippa fientlig radiostörning kan dock UAV-burna 5G-basstationer vara ett alternativ. NATOs CI Agency för fram att 5G-teknologi kan komma att användas för mobila ledningsplatser och marin, kustnära kommunikation [60]. För båda dessa fall tänker man att man har kontroll över området, så att fientlig radiostörning inte kommer förekomma.

Ett alternativ till att låta UAV:erna bära 5G-basstationer är att utrusta dem med WiFi-routrar istället [61]. Då skulle länken mellan fordon och UAV alltså utgöras av en WiFi-vågform och de fordon som kopplas till samma UAV, bildar ett singel-hopp WiFi-nät, baserat på IEEE 802.11. Det löser naturligtvis inte problemet ovan med hur basstationen/WiFi-routern på UAVn ska koppla sig till internet. Det krävs fortfarande en trådlös metod att koppla sig till en nod med internetkontakt. IEEE har emellertid standardiserat en sk mesh-mod i IEEE 802.11s, som tillåter att varje WiFi-nod kopplar sig till alla andra noder som den har inom sin radoräckvidd [62]. På så vis skulle de flygande WiFi-noderna kunna reläa trafik via varandra, till en nod som har internetkontakt. IEEE 802.11s är dock inte utvecklat för den mobilitet av noderna, som skulle förekomma i detta scenario, vilket skulle ge flertalet intermittenta länkavbrott. WiFi får också problem med räckvidden om avstånden blir större än ett fåtal hundratals meter eller om fri sikt inte råder [61].

WiFi har samma svaghet som 5G för taktisk radio, dvs att radiogränssnittet saknar störskydd. Ytterligare en nackdel med WiFi är att WiFi sänder på ISM-banden, som är licensfria frekvenser. Det betyder att det förekommer en hel del interferens från andra WiFi-system, om man befinner sig i bebyggt område, vilket kommer begränsa både räckvidd och kapacitet. Sammantaget ser vi inga fördelar, förutom möjligen lägre kostnad, med att använda WiFi som teknologi för detta scenario.

Sammanfattningsvis skulle civila system såsom främst 5G, men även Wifi, kunna vara intressanta och billiga alternativ som UAV-kommunikationsnoder i ostörd miljö, med närhet till civila system. Men i taktisk miljö, som kräver robusthet på fientlig störning, och som ofta kan vara långt ifrån civil IT-infraskstruktur, rekommenderar vi inte dessa civila tekniker för UAV-noder.

## 5 Slutsatser

I rapporten presenteras ett koncept vars syfte är att ge en betydande kapacitetshöjning i taktiska nät, till exempel en manöverbataljon. Konceptet bygger på ett lågt flygande nät av UAV:er som dels stöttar kommunikationen i det markbundna nätet, dels bidrar med intrafik i form av sensordata. En litteraturstudie har genomförts för att undersöka om liknande koncept har studerats tidigare, vilka utmaningar som är specifika för den här typen av kommunikationsnät samt om det har publicerats förslag på realiseringar av konceptet.

Tillgänglig kapacitet är starkt kopplad till kanalegenskaperna för länkarna i nätverket. För det koncept som presenteras i rapporten ingår länkar mellan UAV:er samt mellan UAV och markfordon. Även länkar mellan markfordon kan ingå, beroende på hur nätverksarkitekturen utformas. För den förstnämnda typen av länk förutsätts frekvenser över 4 GHz och enkla frisiktsmodeller. Det som komplicerar vågutbredningsmodellerna är påverkan av UAV:ns rörelser och utformning, till exempel genom att antenner skuggas. Länken mellan markfordon och UAV kräver lägre frekvenser, 1-2 GHz, för att klara av vågutbredning nära eller genom vegetation. Modeller för denna typ av vågutbredning är svårare att ta fram och beror i högre grad på scenario och terräng.

En viktig aspekt som är starkt relaterad till kanalegenskaperna är vilken typ av antennlösning som används, både på markfordon och UAV. Förmåga till att använda riktverkande antenner, exempelvis genom MIMO, kan ge stora vinster avseende kapacitet, räckvidd och smygförmåga. Riktverkande antenner leder dock till stora utmaningar för nätverksprotokollen och det är inte uppenbart om och hur riktantennerna bör användas för att realisera konceptet. Den forskning som finns beskriven avseende nät med UAV:er har framförallt varit inriktad på UAV-nät utan koppling till ett markbundet nät. Viss forskning finns på militära marknät med stöttning av UAV:er, men i dessa fall antas UAV:erna flyga på hög höjd.

Sammantaget har litteraturstudien identifierat intressanta delområden som behöver studeras vidare för att kunna realisera konceptet, så som kanalmodellering för dessa typer av nät samt vilken typ av nätverksarkitekturer som är lämplig. Några direkta lösningar för att realisera konceptet har inte framkommit, ej heller några aspekter som talar emot konceptet.

FOI-R--5196--SE

## Referenser

- [1] Försvarsmakten, "Tillväxt för ett starkare försvar – Slutredovisning av Försvarsmaktens perspektivstudie 2016-2018," tekn. rapp. FM2015-13192:15, febr. 2018.
- [2] M. Granåsen, N. Hallberg, A. Josefsson och J. Ivvari, "Ledningskoncept 2045 – Resultat av 2020 års konceptutveckling," FOI, tekn. rapp. FOI-R--5128--SE, juni 2021.
- [3] G. Eriksson, A. Hansson, P. Holm och J. Grönkvist, "Vågutbredningsanalys för UAV-stöd i taktiska mobila radionät," FOI, tekn. rapp. FOI-R--4734--SE, jan. 2019.
- [4] J. Rydell, E. Bilock och M. Tulldahl, "Computationally efficient vision-based UAV positioning," *Proceedings of the 2019 International Technical Meeting of The Institute of Navigation*, 2019, s. 856–861.
- [5] A. Källström och A. Andersson Jagesten, "Autonomous landing of an unmanned aerial vehicle on an unmanned ground vehicle in a gnss-denied scenario," examensarbete, Linköpings Universitet, Reglerteknik, 2020.
- [6] L. Persson, "Cooperative control for landing a fixed-wing unmanned aerial vehicle on a ground vehicle," examensarbete, Kungliga Tekniska Högskolan, 01 2016.
- [7] N. Goddemeier, K. Daniel och C. Wietfeld, "Role-based connectivity management with realistic air-to-ground channels for cooperative UAVs," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 30, nr. 5, s. 951–963, 2012.
- [8] N. Ahmed, S. S. Kanhere och S. Jha, "On the importance of link characterization for aerial wireless sensor networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 54, nr. 5, s. 52–57, 2016.
- [9] E. Lemos Cid, A. V. Alejos och M. Garcia Sanchez, "Signaling through scattered vegetation: Empirical loss modeling for low elevation angle satellite paths obstructed by isolated thin trees," *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 11, nr. 3, s. 22–28, 2016.
- [10] Y. Zeng, Q. Wu och R. Zhang, "Accessing from the sky: A tutorial on UAV communications for 5G and beyond," *Proceedings of the IEEE*, vol. 107, nr. 12, s. 2327–2375, 2019.
- [11] I. Bekmezci, O. K. Sahingoz och S. Temel, "Flying ad-hoc networks (FANETs): A survey," *Ad Hoc Networks*, vol. 11, nr. 3, s. 1254–1270, 2013.

- [12] W. Khawaja, I. Guvenc, D. W. Matolak, U.-C. Fiebig och N. Schneckenburger, "A survey of air-to-ground propagation channel modeling for unmanned aerial vehicles," *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 21, nr. 3, s. 2361–2391, 2019.
- [13] A. Al-Hourani och K. Gomez, "Modeling cellular-to-UAV path-loss for suburban environments," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 7, nr. 1, s. 82–85, 2018.
- [14] Y. Zeng, R. Zhang och T. J. Lim, "Wireless communications with unmanned aerial vehicles: opportunities and challenges," *IEEE Communications Magazine*, vol. 54, nr. 5, s. 36–42, 2016.
- [15] Z. Meng, Y. Chen, M. Ding och D. López-Pérez, "A new look at UAV channel modeling: A long tail of LoS probability," *2019 IEEE 30th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, 2019, s. 1–6.
- [16] H. Kang, J. Joung och J. Kang, "A study on probabilistic line-of-sight air-to-ground channel models," *2019 34th International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications (ITC-CSCC)*, 2019, s. 1–2.
- [17] X. Shi, G. Mao, Z. Yang och J. Chen, "Localization algorithm design and performance analysis in probabilistic LOS/NLOS environment," *2016 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2016, s. 1–6.
- [18] A. Al-Hourani, S. Kandeepan och A. Jamalipour, "Modeling air-to-ground path loss for low altitude platforms in urban environments," *2014 IEEE Global Communications Conference*, 2014, s. 2898–2904.
- [19] ITU-R, "Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial broadband radio access systems operating in a frequency range from 3 to 60 GHz," Series, Radiowave propagation, International Telecommunication Union, Recommendation P.1410-5, Aug 2013.
- [20] D. W. Matolak och R. Sun, "Air-ground channel characterization for unmanned aircraft systems- part I: Methods, measurements, and models for over-water settings," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 66, nr. 1, s. 26–44, 2017.
- [21] PTS, "Post- och telestyrelsens allmänna råd (PTSFS 2019:1) om den svenska frekvensplanen," Post- och telestyrelsen, PTSFS 2019:1 ISSN 1400-187X, juni 2019.
- [22] M. Säwensjö, "Militär nytta med ett nytt radiolänksystem i MKN," Kurs: HSU-T 16-18 / 1MT019, Försvarshögskolan - Ledningsregementet, C-uppsats, Kandidatexamen Försvarshögskolan, Mars 2016.

- [23] A. Coyle, "Using directional antenna in UAVs to enhance tactical communications," *2018 Military Communications and Information Systems Conference (MilCIS)*, 2018, s. 1–6.
- [24] Q. Balzano, J. Rzasa, S. Milner och C. Davis, "High capacity tactical networks with reconfigurable, steerable, narrow-beam agile point-to-point RF links," *MILCOM 2007 - IEEE Military Communications Conference*, 2007, s. 1–7.
- [25] F. Bohagen, P. Orten och G. E. Oien, "Design of optimal high-rank line-of-sight mimo channels," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 6, nr. 4, s. 1420–1425, 2007.
- [26] A. Costa, R. Goncalves, P. Pinho och N. B. Carvalho, "Design of UAV and ground station antennas for communications link budget improvement," *2017 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation UNSC/URSI National Radio Science Meeting*, 2017, s. 2627–2628.
- [27] Y. Cai, F. R. Yu, J. Li, Y. Zhou och L. Lamont, "MAC performance improvement in UAV ad-hoc networks with full-duplex radios and multi-packet reception capability," *2012 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2012, s. 523–527.
- [28] D. Gu, G. Pei, H. Ly, M. Gerla och X. Hong, "Hierarchical routing for multi-layer ad-hoc wireless networks with UAVs," *Proceedings of IEEE MILCOM 2000*, vol. 1, 2000, s. 310–314 vol.1.
- [29] P. Basu, J. Redi och V. Shurbanov, "Coordinated flocking of UAVs for improved connectivity of mobile ground nodes," *Proceedings of IEEE MILCOM 2004*, 2004, s. 1628–1634.
- [30] K. Chandrashekar, M. Dekhordi och J. Baras, "Providing full connectivity in large ad-hoc networks by dynamic placement of aerial platforms," *Proceedings of IEEE MILCOM 2004*, 2004, s. 1429–1436.
- [31] O. Esrafilian, R. Gangula och D. Gesbert, "Autonomous UAV-aided mesh wireless networks," *IEEE INFOCOM 2020 - IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*, 2020, s. 634–640.
- [32] R. Palat, A. Annamalau och J. Reed, "Cooperative relaying for ad-hoc ground networks using swarm UAVs," *Proceedings of IEEE MILCOM 2005*, 2005, s. 1588–1594.
- [33] Y. Zhou, N. Cheng, N. Lu och X. S. Shen, "Multi-UAV-aided networks: Aerial-ground cooperative vehicular networking architecture," *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 10, nr. 4, s. 36–44, 2015.



- [34] R. A. Nazib och S. Moh, "Routing protocols for unmanned aerial vehicle-aided vehicular ad hoc networks: A survey," *IEEE Access*, vol. 8, s. 77 535–77 560, 2020.
- [35] A. I. Alshbatat och L. Dong, "Cross layer design for mobile ad-hoc unmanned aerial vehicle communication networks," *2010 International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC)*, April 2010, s. 331–336.
- [36] T. Clausen och P. Jacquet, "Optimized link state routing protocol (OLSR)," Internet Requests for Comments, Internet Engineering Task Force, RFC 3626, Oct 2003.
- [37] C. Barz, C. Fuchs, J. Kirchhoff, J. Niewiejska och H. Rogge, "Extending OLSRv2 for tactical applications," *2016 International Conference on Military Communications and Information Systems (ICMCIS)*, 2016, s. 1–8.
- [38] H. Rogge och E. Baccelli, "Directional airtime metric based on packet sequence numbers for optimized link state routing version 2 (OLSRv2)," Internet Requests for Comments, Internet Engineering Task Force, RFC 7779 (Experimental), Apr 2016.
- [39] A. Hansson, J. Nilsson och U. Sterner, "Evaluation of a Multi-Layer OLSR Design for Heterogeneous Networks," FOI, tekn. rapp. FOI-R--4879--SE, nov. 2019.
- [40] J. Grönkvist, A. Komulainen, U. Sterner och U. Uppman, "Dynamic scheduling for cooperative broadcasting in tactical ad hoc networks," *Military Communications Conference (MILCOM)*, nov. 2016, s. 1034–1040.
- [41] J. Nilsson och S. Linder, "Samverkan mellan mobila taktiska nät – Slutrapport," FOI, tekn. rapp. FOI-R--5066--SE, dec. 2019.
- [42] S. Bergström, J. Nilsson, U. Sterner och U. Uppman, "Routing designs for tactical heterogeneous cooperative broadcast networks," *2021 International Conference on Military Communications and Information Systems (ICMCIS)*, 2021.
- [43] R. Ramanathan, J. Redi, C. Santivanez, D. Wiggins och S. Polit, "Ad hoc networking with directional antennas: a complete system solution," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 23, nr. 3, s. 496–506, 2005.
- [44] R. R. Choudhury, Xue Yang, R. Ramanathan och N. H. Vaidya, "On designing MAC protocols for wireless networks using directional antennas," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 5, nr. 5, s. 477–491, 2006.

- [45] T. Korakis, G. Jakllari och L. Tassioulas, "CDR-MAC: A protocol for full exploitation of directional antennas in ad hoc wireless networks," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 7, nr. 2, s. 145–155, 2008.
- [46] K. Dyberg och L. Farman, "Antenna arrays in spatial reuse TDMA ad hoc networks," FOI, tekn. rapp. FOI-R--0444--SE, mars 2002.
- [47] J. B. Cain, T. Billhartz, L. Foore, E. Althouse och J. Schlorff, "A link scheduling and ad hoc networking approach using directional antennas," *Proceedings of IEEE MILCOM 2003*, vol. 1, 2003, s. 643–648.
- [48] K. Olds, "Directional TDMA networking without external time and position references," *Proceedings of IEEE MILCOM 2013*, 2013, s. 157–162.
- [49] HAPS Alliance Launching connectivity into the stratosphere. [Online]. URL: <https://hapsalliance.org/> (hämtad 2021-05-04).
- [50] J. Fingas, "Alphabet's Loon, telecoms unite to boost high-altitude internet," *Engadget, AOL Inc.*, febr. 2020. [Online]. URL: <https://www.engadget.com/2020/02/22/alphabet-loon-haps-alliance>.
- [51] AST SpaceMobile. [Online]. URL: <https://ast-science.com/spacemobile/> (hämtad 2021-05-04).
- [52] D. Jackson, "Life-saving technology: AST SpaceMobile CEO outlines capabilities of direct-to-smartphone LEO satellite service," *Urgent Communications, Littleton*, april 2021. [Online]. URL: <https://urgentcomm.com/2021/04/09/life-saving-technology-ast-spacemobile-ceo-outlines-capabilities-of-direct-to-smartphone-leo-satellite-service/>.
- [53] M. Mozaffari, W. Saad, M. Bennis, Y. Nam och M. Debbah, "A tutorial on UAVs for wireless networks: Applications, challenges, and open problems," *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 21, nr. 3, s. 2334–2360, 2019.
- [54] A. Fotouhi, H. Qiang, M. Ding, M. Hassan, L. G. Giordano, A. Garcia-Rodriguez och J. Yuan, "Survey on UAV cellular communications: Practical aspects, standardization advancements, regulation, and security challenges," *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 21, nr. 4, s. 3417–3442, 2019.
- [55] Y. Zhu, W. Bai, M. Sheng, J. Li, D. Zhou och Z. Han, "Joint UAV access and GEO satellite backhaul in loRT networks: Performance analysis and optimization," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 8, nr. 9, s. 7126–7139, 2021.
- [56] AST SpaceMobile. [Online]. URL: <https://aerospace.honeywell.com/en/pages/uav-satcom> (hämtad 2021-05-04).

- [57] Ericsson mobile network-on-a-drone PoC could transform emergency response. [Online]. URL: <https://www.ericsson.com/en/news/2020/12/ericsson-drone-mounted-network-could-support-emergency-response> (hämtad 2021-05-04).
- [58] J. Li, K. K. Nagalapur, E. Stare, S. Dwivedi, S. A. Ashraf, P.-E. Eriksson, U. Engström, W. Lee och T. Lohmar. (2021) 5G New radio for public safety mission critical communications. [Online]. URL: <https://arxiv.org/abs/2103.02434>
- [59] E. Dahlman, S. Parkvall och J. Sköld, *5G NR: The Next Generation Wireless Access Technology*, 2:a uppl. Academic Press, 2020.
- [60] L. Bastos, G. Capela, A. Koprulu och G. Elzinga, "5G for deployable and maritime communications," *International Conference on Military Communications and Information Systems (ICMCIS)*, 2021.
- [61] S. Hayat, E. Yanmaz och R. Muzaffar, "Survey on unmanned aerial vehicle networks for civil applications: A communications viewpoint," *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 18, nr. 4, s. 2624–2661, 2016.
- [62] G. R. Hiertz, D. Denteneer, S. Max, R. Taori, J. Cardona, L. Berlemann och B. Walke, "IEEE 802.11s: The WLAN mesh standard," *IEEE Wireless Communications*, vol. 17, nr. 1, s. 104–111, 2010.

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](http://www.foi.se)