



# MIMO på arméfordon

## Vinster i praktiken

SARA LINDER, BJÖRN JOHANSSON OCH GUNNAR ERIKSSON



Sara Linder, Björn Johansson och Gunnar Eriksson

# MIMO på arméfordon

Vinster i praktiken

FOI-R--3696--SE

Titel	MIMO på arméfordon Vinster i praktiken
Title	MIMO for ground vehicles Gains in reality
Rapportnr / Report No.	FOI-R--3696--SE
Månad / Month	Juli / July
Utgivningsår / Year	2013
Antal sidor / Pages	30
ISSN	1650-1942
Kund / Customer	FMV
FoT område	Ledning och MSI
Projektnr / Project No.	E323432
Godkänd av / Approved by	Christian Jönsson
Ansvarig avdelning	Informations- och aerosystem

Detta verk är skyddat enligt lagen (1960:729) om upphovsrätt till litterära och konstnärliga verk. All form av kopiering, översättning eller bearbetning utan medgivande är förbjuden

This work is protected under the Act on Copyright in Literary and Artistic Works (SFS 1960:729). Any form of reproduction, translation or modification without permission is prohibited.

## Sammanfattning

Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) har blivit en populär teknik för att höja data takten i kommunikationssystem eftersom MIMO-tekniken kan öka data takten utan att öka effekten eller bandbredden för systemet. Den forskning som bedrivits inom området har framförallt fokuserat på civil användning även om det finns undantag som studerat MIMO för militär taktisk kommunikation. I den här rapporten analyseras MIMO framförallt för frekvenser runt 300 MHz mellan två enheter med låga anten nhöjder.

För MIMO behöver både sändare och mottagare vara utrustade med flera antennelement och antennerna behöver vara separerade från varandra, om inte olika polarisation används. I den här rapporten har vi speciellt undersökt två plattformar, stridsvagn 122 och stridsfordon 9040. På plattformarna har det bedömts realistiskt med 4x4 eller 2x2 MIMO.

Utifrån en omvärldsbevakning och tidigare mätkampanjer är kapacitetsökningar på 1,5 gånger eller 2-3 gånger rimliga för 2x2 MIMO respektive 4x4 MIMO jämfört med ett traditionellt enantennsystem. Istället för en kapacitetsökning kan MIMO användas för att öka robustheten genom att minska inverkan av fädning. MIMO kan även användas för att minska uteffekten för kommunikationssystemet eller för att öka räckvidden.

Nyckelord: MIMO, Multiple-output Multiple-Input, diversitet

## **Abstract**

Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) has become a popular technique to increase the data rate of communication systems as MIMO technology can increase the data rate without increasing the power or the bandwidth. Research has primarily been focused on civilian use, although there are exceptions. This report analyzes MIMO mainly for frequencies around 300 MHz and for peer-to-peer scenarios.

MIMO requires that both transmitter and receiver are equipped with multiple antennas that are separated in space. In this report, we have specifically examined two platforms in the Swedish armed forces. On the platforms, it was deemed realistic with 2x2 or 4x4 MIMO.

Capacity increases of 1.5 times or 2-3 times the SISO capacity are reasonable for 2x2 MIMO and 4x4 MIMO according to previous research. Instead of a capacity increase MIMO can be used to increase robustness by reducing the effects of fading. Furthermore, MIMO can be used to reduce the output power of the communication system or to increase the range.

Keywords: MIMO, Multiple-output Multiple-Input, diversity

# Innehållsförteckning

<b>1</b>	<b>Inledning</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>MIMO</b>	<b>9</b>
<b>3</b>	<b>Realiserbarhet</b>	<b>11</b>
3.1	Frekvensval . . . . .	11
3.2	Antenntyper för MIMO på fordon . . . . .	13
<b>4</b>	<b>Litteraturstudie</b>	<b>15</b>
<b>5</b>	<b>Exempel på plattformar</b>	<b>19</b>
5.1	Begränsningar för antenners placering . . . . .	19
5.1.1	Vapen och skydd . . . . .	19
5.1.2	Träd, lera , mm . . . . .	19
5.1.3	Signatur . . . . .	19
5.1.4	Elektromagnetiska fält . . . . .	20
5.2	Plattformar . . . . .	20
5.2.1	Stridsvagn 122 . . . . .	21
5.2.2	Stridsfordon 9040 . . . . .	22
5.3	Summering . . . . .	23
<b>6</b>	<b>Resultat</b>	<b>25</b>
<b>7</b>	<b>Slutsatser</b>	<b>27</b>
	<b>Referenser</b>	<b>30</b>

FOI-R--3696--SE



# 1 Inledning

Syftet med den här rapporten är att beskriva vinster med MIMO i realistiska scenarion. Arbetet har utförts inom uppdraget ”FMV FoT ledning 2012 - 2013” och rapporten är en del av leveransen till FMV.

Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) har blivit en populär teknik för att höja datatakten i kommunikationssystem eftersom MIMO-teknik kan öka data-takten utan att öka effekten eller bandbredden för systemet. Idag finns MIMO med i alla standarder för civila system med hög datatakt, tex WiMax, Wi-Fi och LTE, åtminstone som en option. Användningen av MIMO i militära system har inte gått lika fort men ett antal studier och projekt har genomförts. Ett av de största är DARPA:s program Mobile Networked MIMO (MNM) som var ett flerårigt program med en budget på flera miljoner dollar. Syftet var bland annat att utnyttja MIMO för att få tillförlitlig kommunikation i stadsmiljö, öka räckvidden och datatakten för mobila ad hoc nät.

Ett vanligt frekvensområde för militär taktisk kommunikation är frekven-ser runt 300 MHz och i den här rapporten kommer vi framförallt att studera MIMO för detta frekvensband. De civila system som använder MIMO arbetar till största del på frekvenser över 1 GHz och följaktligen har en absolut majoritet av forskningsarbetet i världen skett för dessa högre frekvenser. Det finns dock mätningar genomförda på lägre frekvenser, framförallt tänkta för en mili-tär tillämpning och resultat från några av dessa beskrivs i rapporten.

I den här rapporten kommer framförallt MIMO för fordon att behandlas. För lägre frekvenser är våglängden större och följaktligen blir det svårare att få plats med flera antenner på samma yta om man vill ha samma separation mellan antenner uttryckt i delar av våglängden som för högre frekvenser. I ett militärt nät är det framförallt kommunikation mellan två enheter på marken som är in-tressant, till skillnad från i ett mobiltelefonisystem där kommunikationen sker till en upphöjd mast. Vågutbredningsmiljön ser olika ut för de två fallen då det förmodligen finns fler spridare av signalen runt en antenn på lägre höjd. Kom-munikationsmässigt är det ofta svårare att kommunicera med låga antennhöjder medan för MIMO-teknik är det en fördel att signalen sprids mycket.

Fokus i den här rapporten kommer att vara vilka vinster som ett kommuni-kationssystem kan få genom att använda sig av MIMO-teknik under realistiska förutsättningar. Tidigare har mycket arbete lagts ner på att sondera MIMO-kanalen och få förståelse för hur vågutbredningen sker mellan sändare och mottagare, vilket är nödvändigt för att kunna utnyttja MIMO-tekniken. Även speciella kanalmodeller för MIMO har tagits fram, tex COST 2100 [1] vilken även parametersatts och validerats för 300 MHz [2]. För att simulera prestanda för ett MIMO-system är en MIMO-kanalmodell nödvändig. Här har vi dock i

första hand fokuserat på de mätkampanjer som genomförts på lägre frekvenser (runt 300 MHz) och för enheter med låga antennhöjder (peer-to-peer). Vad gäller resultaten från mätningarna har vi valt att studera vilka kapacitetsökningar MIMO kan ge relativt ett enantennsystem, Single-Input Single-Output (SISO).

## 2 MIMO

I MIMO-system är både sändare och mottagare utrustade med flera antenner. Traditionella system med en antenn brukar benämnas SISO (Single-Input Single-Output). Det förekommer även att system med endast flera antenner på endera sändare eller mottagare kallas för MIMO, vilket inte är helt korrekt i strikt mening.

Det finns i huvudsak tre metoder för att utnyttja MIMO-tekniken. Dessa metoder kan delas upp i följande gruppering:

**Diversitet** ger diversitetsvinster genom signalredundans. Samma signal sänds över flera parallella vägar genom radiokanalen och summeras ihop i mottagaren. Detta resulterar i ett högre och stabilare signal-brusförhållande (signal-to-noise ratio, SNR) som i sin tur kan användas för ökad robusthet eller kapacitet. Diversitet är fördelaktigt i miljöer med flervägsutbredning som ger en fädande kanal.

**Multiplexering** ger multiplexeringvinster genom en parallellisering av dataströmmen varvid data vilka sänds över flera olika rumsligt parallella vägar genom radiokanalen [3, 4]. Multiplexering kräver en radiokanal med rik flervägsutbredning.

**Lobformning** skapar genom koherent summering av signalerna ett högt SNR i en viss riktning. Lobformning används både vid sändare och mottagare och framförallt i scenarier med direktsikt (LOS). I sändningsfallet krävs kunskap om riktningen till mottagaren.

Spatiell multiplexering skiljer sig från de andra teknikerna i hur många antennelement som krävs på sändar- och mottagarsidan. Antalet parallella strömmar begränsas av minsta antalet antennelement på sändar- respektive mottagarsidan och därför behöver både sändare och mottagare vara utrustade med flera antennelement om spatiell multiplexering ska användas. Vid lobformning är istället kunskap om kanalen viktigt i sändaren om den ska kunna forma en lob i rätt riktning. I ett cellulärt system med en central enhet är det lättare att upprätthålla aktuell kanalkunskap än i ett taktiskt militärt nät. För ett taktiskt nät är tekniker där sändaren inte behöver kanalkunskap att föredra och resten av rapporten kommer att fokusera på sådana tekniker för spatiell multiplexering eller diversitet.

När MIMO analyseras är ett vanligt antagande att den totala uteffekten från alla antenner hålls konstant, vilket innebär att om två sändarantennor används så får de dela på den effekt som skulle använts i ett enantennsystem. Om effekten

kan hållas konstant per antenn erhålls ytterligare vinster men de vinsterna är inte inkluderade i vår analys.

I miljöer med mycket flervägsutbredning, till exempel i stadsmiljö, sker förändringar på kanalen snabbt vilket innebär att kommunikationssystemet behöver en fädningsmarginal. Genom att använda flera antenner kan diversitet användas och ge en mycket stabilare kanal som inte förändras lika snabbt vilket innebär att fädningsmarginalen kan minskas. Diversitet ger inte lika höga kapacitetsvinster som spatiell multiplexering kan göra. Vilken teknik som är bäst att använda beror dock på en mängd olika faktorer som hur kanalen ser ut, vilken felhalt systemet kan tolerera och hur mycket diversitet som kan utnyttjas i systemet genom frekvenshopp, kodning och stor bandbredd.

## 3 Realiserbarhet

Det finns många tekniska lösningar för att öka kapacitet, räckvidd och robusthet. Men för plattformar med stor rörlighet i en besvärlig miljö är många av dessa tekniker inte möjliga. Begränsad tillgång på effekt, låga antennhöjder och taktiskt uppträdande mm reducerar antalet möjliga metoder. MIMO är en teknisk lösning som trots dessa begränsningar har potential att ge ökad kapacitet, ökad robusthet eller ökad räckvidd beroende på vilken egenskap som prioriteras. Givetvis finns det en rad praktiska begränsningar som påverkar prestanda för MIMO tekniken. I detta kapitel görs en genomgång av dessa begränsningar.

### 3.1 Frekvensval

Frekvensvalet har stor påverkan på de praktiska begränsningarna för MIMO tekniken. Våglängden hos signalen i kombination med plattformens storlek bestämmer gränserna för vad som är möjligt att uppnå. Radiokanalens egenskaper varierar kraftigt med frekvens och miljö och till detta kommer att frekvenser är en bristvara och försvaret är hänvisat till vissa frekvensband. Uppträdande och tjänster styr också vilka frekvensband som kan användas. I denna rapport begränsas arbetet till att studera markfordon och i tabellen 3.1 visas de frekvensområden som används i marktillämpningar.

MIMO prestanda för en praktisk tillämpning bestäms av en rad faktorer, bland annat är avståndet mellan antennelementen i förhållande till våglängden en viktig faktor. För att få bra prestanda med MIMO bör signalerna i de olika antennerna vara okorrelerade och därför måste antennerna vara separerade från varandra. För en ideal rayleigh-färdande kanal är idealt antennavstånd  $\lambda/2$  men i praktiska fall är separationer ner till  $\lambda/4$  tillfredsställande. Ett alternativ är att använda antenner med olika polarisation och då kan antennerna vara

Frekvensband	Våglängd $\lambda$	Minsta separation ( $\lambda/4$ )
2-12 MHz	150-25 m	6.25 - 37.5 m
30-88 MHz	10-3.4 m	2.5-0.85 m
225-400 MHz	1.3-0.75 m	0.33 - 0.19 m
1.1-2 GHz	0.27-0.15 m	0.07 - 0.04 m

Tabell 3.1: Nödvändig antennseparation för olika frekvenser

samlokaliserade.

Radiokanalens egenskaper är också en viktig faktor som varierar starkt mellan frekvensområde och miljö. För att MIMO ska ge vinster jämfört med SISO ska kanalen ha tydlig flervägsutbredning där de olika utbredningsvägarna är oberoende av varandra. Frekvensvalet kommer därför i praktiken att ha avgörande betydelse för möjliga MIMO prestanda. De faktorer som styr frekvensvalet är räckvidd, tillgänglig bandbredd och vilka frekvensband som finns tillgängliga. För militära marktillämpningar är grovt sett fyra frekvensband tillgängliga för kommunikation.

Det lägsta frekvensbandet, HF, används för långräckviddig kommunikation. För marktillämpningar med fordon är frekvensområdet 2–12 MHz aktuellt. Kravet på  $\lambda/4$  separation ger antennavstånd som oftast är längre än de fysiska dimensionerna på fordonen vilket i praktiken utesluter en MIMO tillämpning på fordon om inte antenner med olika polarisation används. På HF finns det två olika typer av vågutbredning, markvåg och rymdvåg, med helt skilda egenskaper. Markvågen har traditionellt används i marktillämpningar då den har bättre räckvidd än VHF och inte är känslig för vegetationens påverkan. Men den saknar tydlig flervägsutbredning vilket inte ger några MIMO-vinster. Rymdvågen uppvisar däremot tydlig flervägsutbredning men har oftast bara två tydliga utbredningsvägar på grund av polarisationsvridning. Det har genomförts mätningar med kompakta antenner för MIMO på HF [5], vilka har visat på positiva resultat, men även om antennen är kompakt är den otymplig för ett fordon. För fasta grupperingar där andra antennarrangemang kan göras skulle MIMO kunna förbättra prestanda på kortvåg.

VHF-området 30–88 MHz har, med hänsyn till antenner och tillgänglig effekt, en tilltalande räckvidd med förbindelseavstånd upp mot 20 km för 50 W uteffekt i vanliga terrängtyper. Kravet på  $\lambda/4$  i antennseparation blir svårt att realisera i praktiken i den nedre halvan av bandet. För den övre halvan av bandet kan kravet uppnås, men antennavstånden är sådana att antennplaceringarna kommer att inkräkta på andra funktioner. Kanalens egenskaper varierar inom frekvensbandet. I den lägre halvan är det troligt att flervägsutbredningen inte är tillräcklig för att skapa oberoende kanaler. Underlag i form av mätningar kring detta är dock mycket begränsade. Även för den övre halvan av bandet är kunskapen om kanalens flervägsutbredning begränsad för låga antennhöjder, vilket gör det svårt att bedöma eventuella MIMO vinster.

UHF-området 225–400 MHz, har kortare räckvidd än VHF men ger möjlighet till högre bandbredder. Kravet på  $\lambda/4$  mellan antennerna är lätt att uppfylla vilket gör det möjligt att anpassa antennplaceringen till fordonet. Mätningar av flervägsutbredning och MIMO-vinster har genomförts i olika miljöer, men framförallt i stadsmiljö och visar att UHF-bandet har stor potential för MIMO

vinster.

För frekvenser runt 2 GHz är kravet  $\lambda/4$  inget problem. Men räckvidden är förhållandevis kort i mark-mark förbindelser och därför är den militära tillämpningen oftast korthållskommunikation. Detta innebär oftast frisiktsförbindelser och då ger MIMO ingen större vinst. Men då fri sikt inte finns, särskilt i stadsmiljö eller inomhus, är inslaget av flervägsutbredning stort och MIMO kan ge bra vinster.

Utgående från storleken på markfordon, möjliga antennplaceringar på dessa och kanalens flervägsutbredningsegenskaper begränsas det frekvensområde som studeras till runt 300 MHz eller högre.

## 3.2 Antenntyper för MIMO på fordon

Antenner för MIMO skiljer sig inte från de antenner som används traditionellt. Men eftersom utrymmet för fler antenner ofta är begränsat måste antennplaceringar användas som är långt ifrån optimala. Antenntyper som traditionellt sett inte används på fordon kan därför vara aktuella om man önskar att få plats med många antenner. I detta avsnitt ges en beskrivning av några möjliga antenntyper och deras för- och nackdelar. I framtiden kommer, med tanke på att flera frekvensband ska användas och risken för telekonflikter, flera antenner att integreras i samma antennenhet.

Antenner på fordon är alltid en kompromiss mellan motstridiga krav. Förutom kraven på att klara den fysiska miljön så finns krav på frekvensvighet och momentan bandbredd, krav på låg signatur och en enkel och robust konstruktion. Med frekvensvighet avses att man ska kunna välja frekvens fritt inom det aktuella frekvensområdet utan att byta antenn. Den behöver dock inte täcka hela frekvensområdet samtidigt. Hur mycket som ska täckas samtidigt framgår av kraven på momentan bandbredd som kan vara stor för bandspridda system. Här beskrivs några aktuella antenntyper och deras för- och nackdelar.

**Dipolantenner** är effektiva men normalt sett smalbandiga. För att öka bandbredden kan antennen göras kortare och tjockare. Om man av praktiska skäl inte kan ha en tjock antenn kan man införa anpassningskretsar i antennen. Antennen är fortfarande lika smalbandig men sett från radion är antennen bredbandig. En sådan lösning ger en antenn med betydligt lägre verkningsgrad och det genereras värme i antennen, vilket kan ge termiska (IR) signaturproblem.

**Monopolantenner** är en vanlig typ av sprötantenner. De är effektiva och robusta men kräver ett jordplan i samma storleksordning som sprötlängden

för att fungera bra. Detta krav försvårar antenntypningen. Liksom dipolantennen är monopolantennen smalbandig men kan göras bredbandig genom att göra den kortare och tjockare. Genom anpassningskretsar kan man få radion att uppleva en bredbandig antenn men priset är även här lägre verkningsgrad och värmeutveckling.

**Slitsantennen** är ett annat sätt att skapa en dipolantenn. Genom att ta upp en slits med ungefär samma mått som motsvarande dipol i en plåt får man en antenn med egenskaper som liknar dipolen. Även denna antenn är smalbandig men kan göras bredbandig genom att göra den kortare och bredare. Nackdelen är att plåten måste vara i samma storleksordning, eller större, som längden på slitsen och ha bra elektrisk ledningsförmåga. En praktisk realisering av slitsantenn är så kallade "cavity backed" antenner.

**Patchantennen** är en rektangulär metallplatta monterad på ett större jordplan. Sidlängden på plattan är i samma storleksordning som längden på motsvarande dipolantenn. Fördelen är att det är en platt antenn som relativt enkelt kan monteras på fordonens ytor. Dessutom är det lätt att bygga arrayer, speciellt för lobformning. Nackdelen är att den är smalbandig och svår att göra bredbandig.

Sammanfattningsvis är vår bedömning att dipolantenn och/eller monopolantenn är de lämpligaste antenntyperna för MIMO på fordon. Vid nykonstruktion, eller vid stor ombyggnad av fordon, kan andra antenntyper vara aktuella.



## 4 Litteraturstudie

Det har genomförts en mängd MIMO-mätningar i världen, de flesta för en tillämpning i WiFi, WiMax eller mobiltelefoni. Frekvensområdet för de flesta mätningar är därför över 1 GHz, typiskt 1.8 GHz eller 2.4 GHz. Det finns även några mätningar på lägre frekvenser, ofta tänkta för taktisk militär radio, som genomförts inom den lägre delen av UHF-bandet.

En av de större mätkampanjerna på frekvenser runt 300 MHz genomfördes i Linköping med syfte att estimeras kanalparametrar till en kanalmodell för MIMO [6]. Kanalen sonderades med ett 8x8 MIMO system från 3 sändarplatser till ungefär 25 olika mottagarsträckor. Både sändare och mottagare var monterade i bilar och hade antennhöjder runt 2 meter. Den möjliga kapaciteten för ett 7x7 MIMO-system för ett visst SNR beräknades utifrån de uppmätta överföringsfunktionerna för kanalen. Resultaten visade att medianvärdet för kapaciteten vid mätningarna var ungefär 70% av den teoretiska kapaciteten för en ideal Rayleigh-fäddande kanal. En liknande mätkampanj har även genomförts i Malmö och även där visade resultaten att medianvärdet av kapaciteten från mätningarna var ungefär 70% av den teoretiska, för ett scenario med låga antennhöjder [7]. En observation från båda mätkampanjerna var att variationerna längs en mätsträcka var mindre än variationerna mellan olika mätsträckor vilka kunde vara stora. En av slutsatserna från båda mätkampanjerna är att även för frekvenser runt 300 MHz är kanalen rik på flervägsutbredning och det borde finnas goda förutsättningar för att använda MIMO-tekniken.

För att demonstrera fördelarna med MIMO byggdes en testbädd vid FOI [8]. Testbädden demonstrerade ett 2x2 MIMO-system på 285 MHz med hjälp av USRP2 (hårdvara) och GNU radio (mjukvara). Resultaten visade på ökad robusthet med MIMO jämfört med SISO.

Eftersom MIMO ger störst vinst i miljöer med mycket flervägsutbredning och en tänkt tillämpning är WiFi har många mätkampanjer genomförts inomhus. Som exempel kan nämnas att mätningar har genomförts på 2.4 GHz, både inomhus och utomhus, med ett 4x4 MIMO försökssystem med 20 MHz bandbredd [9]. Med försökssystemet testar man helt enkelt olika kombinationer av kodning, modulation och antal spatiella strömmar och ser vilken felhalt man får och räknar fram en nyttodatatakt. Deras resultat visar att kapaciteten inomhus är nästan dubbelt så hög som utomhus vid samma mottagen effekt. Detta beror på att det finns fler spridare inomhus än utomhus. Vid mätningarna utomhus undersöktes tre olika miljöer, en smal gata, en bred gata och en slinga runt en park. Vid mätningarna på en gata var sändare och mottagare placerade på samma gata och det är troligt att det finns en stark direktkomponent mellan sändare och mottagare. En svaghet med mätningen är att i de miljöer som undersökts

utomhus finns det troligen inte så mycket flervägsutbredning. Resultaten visar att det sällan lönar sig att använda mer än två spatiella strömmar även för ett 4x4 MIMO-system i de undersökta utomhusmiljöerna.

Mätningar med syfte att jämföra MIMO-kanalen på olika UHF frekvenser har genomförts av Communications Research Centre (CRC) i Ottawa [10]. Frekvenserna som undersöktes var 2 GHz, 915 MHz och 370 MHz och mätningarna genomfördes med 8 antennelement på sändare respektive mottagare för varje undersökt frekvens. Alla antenner var placerade på fordon cirka 2–2.5 meter över marken. Sändaren var parkerad medan mottagaren kördes runt cirka två kvarter med höghus. Det var aldrig fri sikt mellan sändare och mottagare. Resultaten från mätningarna visar att det är mindre flervägsutbredning på de lägre frekvenserna eftersom våglängden är större och färre objekt i omgivningen agerar som spridare. Detta leder till en reduktion av kapaciteten med upp till 10 % mellan 2 GHz och 370 MHz. Däremot varierar kanalen långsammare på den lägre frekvensen, vilket antyder att den förlusten skulle kunna kompenseras av att overheaden för exempelvis pilottoner kan minskas i ett system på lägre frekvenser.

En intressant mätkampanj [11] har även genomförts utomhus på frekvenserna 430 MHz och 1380 MHz. Syftet var att utvärdera MIMO för militära scenarion och genomfördes vid Fort Dix, New Jersey. Mätningarna genomfördes i skogsmiljö längs både en smal och en bred väg samt genom tät skog. Ett 2x2 MIMO system användes för att testa olika kombinationer av kodning, modulation och spatiella strömmar för att se vilken datatakt de gav. Slutsatsen från mätningarna var att MIMO gav bättre datatakt än SISO i alla undersökta miljöer och att vinsten varierade från 1.3 till 2.0 gånger i högre datatakt. Förutom de uppmätta datatakterna har även kanaldata uppmätts och kapaciteter beräknats utifrån det. Den uträknade kapacitetsvinsten varierade mellan 1.3-1.6 i medel för de olika scenarierna för det lägre frekvensbandet. De påpekar även att en ökning av räckvidd på 1.5 gånger i medel kan nås för alla scenarion.

Även inverkan av olika avstånd mellan antennelementen har uppmätts. På 430 MHz är våglängden  $\lambda=70$  cm. Olika antennavstånd mellan  $\lambda/4$  och  $\lambda$  har undersökts. Resultaten visar att antennerna kan placeras så nära som  $\lambda/4$  från varandra utan större påverkan på MIMO-vinsten, en slutsats som även drogs i [12, 13].

I [12, 13] rapporteras resultat från mätningar i stadsmiljö, med hus om 1-3 våningar, i Baltimore, Maryland. Mätningen skedde på 425 MHz med ett 2x3 MIMO testsystem. Resultaten visar på ökning mellan 1.2-1.7 jämfört med kapaciteten för ett SISO-system. Antennavståndet varierades mellan  $\lambda/4$  och  $5\lambda/4$  och ingen större påverkan på kapaciteten noterades.

En teoretisk analys av inverkan från olika antennavstånd finns i [14]. Analy-

sen genomfördes med hjälp av uppmätta data runt 300 MHz från universitetsområdet i Linköping. Olika antennseparationer analyseras för fallen 2x2 och 4x4 och med en radie mellan  $\lambda/8$  och  $\lambda$ , vilket för en 2x2 antenn motsvarar antennavstånd mellan  $\lambda/4$  och  $2\lambda$ . För 300 MHz är våglängden 1 meter vilket leder till radier mellan 12.5 cm och 1 meter. Analysen tyder på att ett större avstånd mellan antennerna ger högre kapacitet, medan ett kortare avstånd ger lägre kapacitet, vilket beror på att korrelationen ökar för kortare avstånd. Dessutom visas att det är en ”mjuk” övergång. Till exempel är förlusten med att använda en separation  $\lambda/4$  istället för  $\lambda/2$  endast 10 % för 2x2 systemet. För alla antennavstånd ger MIMO klart högre kapacitet än motsvarande SISO. För de kortaste antennavstånden ger 2x2 MIMO cirka 1.5 gånger kapaciteten för SISO och 4x4 MIMO ungefär 2 gånger kapaciteten för SISO.

I DARPA:s fleråriga Mobile Networked MIMO (MNM) program analyserades MIMO för militär taktisk kommunikation i ad hoc nät. Första fasen genomfördes av Lucent Technologies, medan andra och tredje fasen utfördes av Silvus Technologies. Som en del av första fasen har Lucent Bell genomfört mätningar i Lakehurst, New Jersey för att undersöka kanalen på 2.5 GHz [15]. Miljön bestod av en blandning av skog, öppna ytor och några hangarer och det längsta avståndet var 4 km. Mätningarna genomfördes med en smalbandig 16x16 sounder. På sändare respektive mottagare fanns 8 vertikalt och 8 horisontellt polariserade antenner. Från mätdata analyserades sedan kapacitet för ett 8x10 MIMO-system. Mediankapaciteten för MIMO-systemet var ungefär 5 gånger högre än för motsvarande SISO-system och 3 gånger högre än kapaciteten för ett 1x10 system med mottagningsdiversitet.

Silvus Technologies var med i senare faser av MNM och Silvus marknadsför nu en radio för militär användning med MIMO [16]. Tänkt användningsområde är i taktiska mobila ad hoc nät. På sin hemsida skriver de att de fått mer än \$25M i finansiering av forskning och utveckling och de har deltagit i flera av de stora DARPA programmen. Radion kan ge 4x4 MIMO med flera olika tekniker (spatial multiplexing, space-time coding och egen beamforming). Frekvensområdet är 400 MHz - 2.7 GHz och 4 GHz - 6 GHz där frekvensområdet 400-450 MHz är under utveckling. Som exempel på vinster med MIMO nämner de i sitt datablad 4.5x ökad täckning i tät stadsmiljö, 10x lägre uteffekt för samma räckvidd och genomströmning och 3 gånger högre dataakt.

Några slutsatser från litteraturstudien är att även för lägre frekvenser runt 300 MHz är MIMO en intressant teknik för att öka dataakten. Återkommande siffror i flera av studierna är en ungefärlig dataaktshöjning med 1.5 gånger för ett 2x2 MIMO-system och runt 2-3 gånger för ett 4x4 MIMO-system. En annan slutsats är att antennavståndet inte är kritiskt för prestanda. Antennavstånd ner till en kvarts våglängd ger bra resultat.

FOI-R--3696--SE

## 5 Exempel på plattformar

Placeringen av antenner på fordon påverkas av en mängd olika faktorer. Några av faktorerna beskrivs i detta kapitel tillsammans med de två plattformar som vi valt att undersöka närmare.

### 5.1 Begränsningar för antenners placering

#### 5.1.1 Vapen och skydd

Fordonets förmåga att verka, dess egenskydd och personalens säkerhet har givetvis högre prioritet jämfört med kommunikation. På stridsvagnar och stridsfordon måste kanoner och övriga vapen kunna verka horisonten runt. Rökkastare mm får inte blockeras och det passiva skyddet i form av pansar får inte försvagas av nya genomföringar. Detta begränsar avsevärt de platser på ett fordon där antenner kan placeras.

#### 5.1.2 Träd, lera , mm

Den miljö som fordonen ska kunna röra sig i utgör en utmaning för antennerna. Fordon är dimensionerade för att kunna köra genom skog, lera, stadsmiljö, ruiner mm. Det innebär att allt som placeras utanpå ett fordon utsätts för stora krafter. Vissa områden utsätts för extra stora påfrestningar, exempelvis längs fordonet sidor när fordonet pressar sig genom skog. Vissa ytor på fordonen blir därför direkt olämpliga för antennplacering.

#### 5.1.3 Signatur

Stridsvagnar och stridsfordon utnyttjar terrängen för att vara så dolda som möjligt. Antennerna, som oftast är högst placerade på fordonet, kan röja var fordonet är. Den optiska signaturen bör vara liten, vilket kan vara svårt för bredbandiga antenner eftersom dessa är kräver antennelement med betydligt större diameter. Antennen bör även ha låg signatur i IR-området vilket kan ge problem för exempelvis multibandsantennerna där anpassningskretsar finns integrerade i antennen. Dessa kretsar kan bli varma när hög uteffekt används.

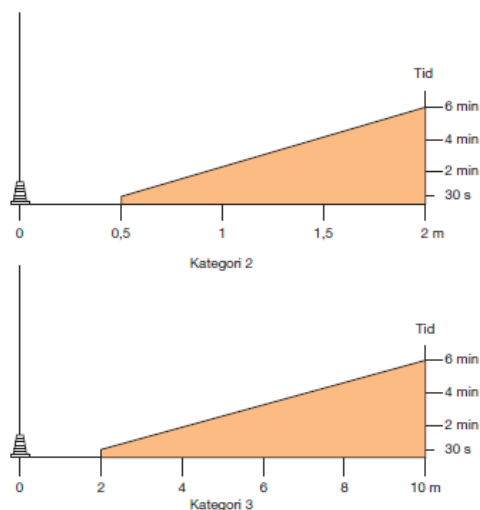


Bild 7:1 Diagram för bedömning av tillåten vistelsetid per 6 minuters period i farligt område

Figur 5.1: Säkerhetsregler för elektromagnetiska fält

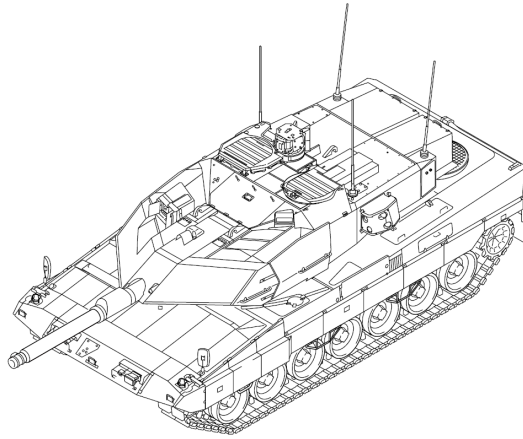
#### 5.1.4 Elektromagnetiska fält

En allvarlig begränsning för antenner på fordon är att de elektromagnetiska fälten kan vara hälsovådliga. Personalen rör sig i närheten av fordonet, står ibland upp i luckor och i fallet stridsfordon ska uppsutten personal kunna strida från vagnen. Försvaret har tagit fram säkerhetsregler för elektromagnetiska fält [17] vilka kan sammanfattas i figur 5.1.

För uteffekter under 7 W gäller inga restriktioner, mellan 7 W och 50 W gäller det övre av diagrammen och för uteffekter över 50 W gäller det undre diagrammet. Detta innebär att personal får arbeta i 6 minuter 10 meter från en antenn som sänder med 50 W.

## 5.2 Plattformer

I detta arbete har vi valt att begränsa oss till två fordon: stridsvagn 122 och stridsfordon 9040. De fordonen utgör kärnan i de mekaniserade förbanden. Effektiva sensorer och ledningssystem kan ge övertag på stridsfältet givet en robust bredbandig kommunikation där MIMO-teknik är en möjlig komponent.



Figur 5.2: Stridsvagn 122

### 5.2.1 Stridsvagn 122

I figur 5.2 visas en bild av stridsvagn 122. Rotation av torn och kanon gör i praktiken antennplaceringar på själva vagnen omöjliga. Undantaget är korta antenner placerade längst fram i linje med backspeglarna eftersom kanonen ger en viss frigång där. På tornet är placering framför luckorna utesluten då det skymmer sikten för vagnchef och skytt. Bakom luckorna finns en yta där dagens fyra antenner är placerade och den ytan är tillräckligt stor för ett MIMO arrangemang. Dagens antenner är placerade i hörnen av den ytan. Ytan i sig består av ett antal luckor för ammunition, slutsteg för radio mm. Antennplaceringar är därför inte möjliga var som helst på ytan.

Skrovintegrerade antenner på tornet har också beaktats. Problemet är att ytorna dels är utformade för att ge så bra skydd som möjligt och dels att rökkastare mm är placerat på sidorna. Eftersom de innehåller explosiva komponenter med elektrisk tändning måste detta tas med i bilden. Men skrovintegrerade antenner på tornets sidor och baktill är i princip möjligt. Tornets framsida däremot lämpar sig inte eftersom ytorna sluttar och för att det är en mycket viktig del i vagnens skydd.

I dagens radiosystem, Ra 180, används effektnivån 5 W för det mesta och 50 W undantagsvis. I det sistnämnda fallet måste luckorna vara stängda. En MIMO-lösning kommer inte att öka den totala uteffekten och påverkan av elektromagnetiska fält på personal bedöms inte bli högre än vad den är idag.

Sammanfattningsvis finns det plats för MIMO antenner baktill på tornet, i

praktiken på de platser där dagens fyra antenner sitter. På fordonet finns även utrymme för fler antenner, även om det medför större ingrepp på plattformen.

### 5.2.2 Stridsfordon 9040

I figur 5.3 visas en bild av stridsfordon 9040. Rotation av tornet gör alla ytor ovanpå vagnen omöjliga för antennplacering då kanonen kan vinklas så att den stryker ytorna. Baktill på vagnen finns i dag några korta spröt, exempelvis magnetkompass, som kan vika sig för kanonen. Men personalen ombord ska kunna genomföra uppsutten strid med uppfällda luckor. Allt som sticker upp kommer att vara i vägen för vapnen. På tornet finns i dag två antenner. Utrymmet för fler antenner är mycket begränsat på grund av sikten, prismor och luckor. Till detta kommer ett IR-system som inte finns med i figuren. Det kan också vara aktuellt med en fjärrstyrd ksp ovanpå tornet.

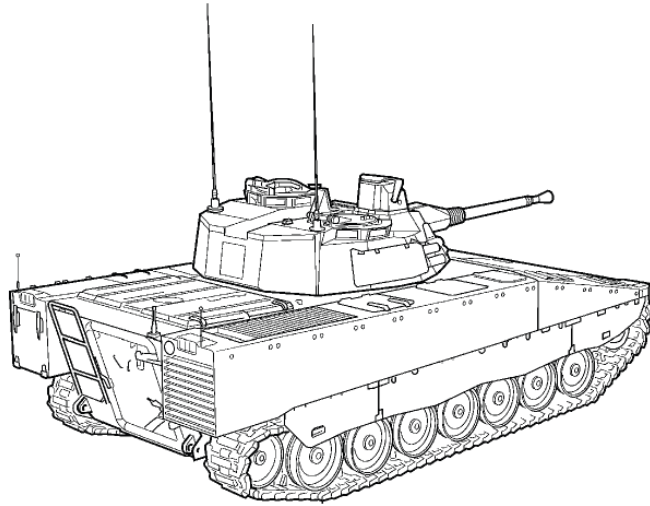
Skrovintegrerade antenner på tornet har beaktas. Möjliga ytor finns på både tornets högra och vänstra sida. Likaså finns ett utrymme till vänster om kanonröret där tidigare en ksp var monterad. Problemet är att redan idag stryker tornet mycket nära soldaterna om de strider uppsuttet. Allt som sticker ut mer än idag kan skada soldaterna. Det finns också rökkastare med elektriska tändsystem att ta hänsyn till. Dock finns en annan variant av tornet för de vagnar som används i utlandsmissioner där man klätt delar av tornet med skyddsplåtar. En sådan modifiering skulle kunna ge möjlighet till skrovintegrerade antenner. Skrovintegrerade antenner längs vagnens sidor är troligtvis inte möjligt. Redan idag är vagnen i bredaste laget för att klara transporter mm. En breddning, även om den är relativt liten medför stora problem.

Givet att MIMO-antennerna kan placeras ovanpå tornet borde den elektromagnetiska nivån ur personskyddssynpunkt bli densamma som idag. Men om antenner monteras på tornets sidor blir bilden en annan då de kan komma mycket nära soldater som genomför uppsutten strid. En möjlig lösning är att förhindra sändning för de antenner som är nära soldaterna.

Stridsfordon 90 finns i andra varianter där inte uppsutten strid sker genom luckorna baktill. På de vagnarna ges större möjligheter till antennplaceringar. För ledningsversionen som inte har kanon är möjligheterna goda till bra antennplaceringar.

Sammanfattningsvis kan antenner placeras ovanpå tornet, i praktiken där dagens två antenner sitter. Antenner längs tornets sidor är möjligt men kräver omfattande ombyggnad.





Figur 5.3: Stridsfordon 9040

### 5.3 Summering

För de plattformar som undersökts finns idag antennplatser som används för Ra 180. De olika radioapparaterna som finns i ett fordon används för att ansluta till olika typer av nät, kompaninät eller plutonnät. En rimlig ansats är att i framtiden kan samma radio användas för alla nät och uppdelningen av trafik sker logiskt i nätet. Då skulle istället de olika antennerna kunna användas till MIMO för ett radiosystem.

På stridsvagn 122 finns idag 4 antenner och på stridsfordon 9040 finns 2 antenner. Vi väljer därför att analysera 4x4 och 2x2 MIMO.

FOI-R--3696--SE

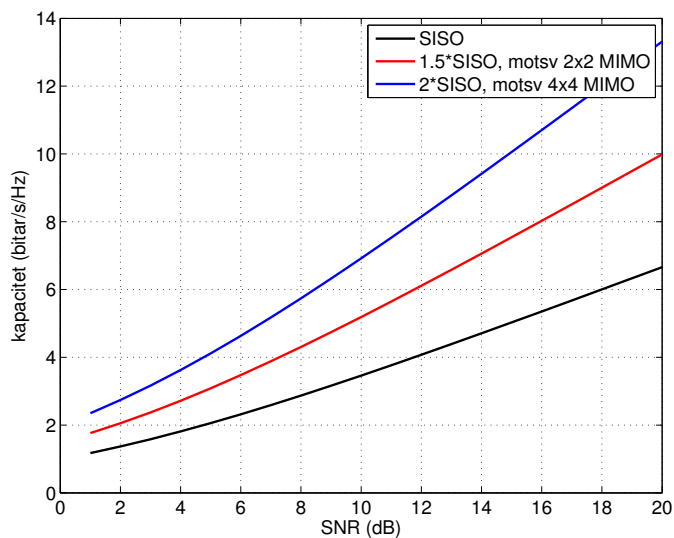
## 6 Resultat

Prestanda för ett MIMO-system beror på en mängd olika faktorer, som frekvensval, vågutbredningsmiljö, kommunikationssystemets design med möjligheter till adaptation, hur kodning, modulation och frekvenshopp används och så vidare. Även för MIMO finns en mängd praktiska aspekter som val av MIMO-teknik och implementation av den med begränsningar och fördelar. I detta kapitel försöker vi ge några exempel på vad som kan åstadkommas med MIMO. Vi har här valt att jämföra SISO och MIMO med samma totaleffekt, vilket innebär att sändareffekten delas mellan antennerna på sändarsidan. Om istället effekten på varje antenn hålls konstant, dvs att i 2x2 MIMO sänder båda antennerna med eneffekt motsvarande ett enantennsystem, kan ytterligare vinster erhållas.

I figur 6.1 visas exempel på kapacitetsvinster med MIMO jämfört med SISO. För ett 2x2 MIMO system kan vinster med MIMO på 1.5 gånger kapaciteten för SISO vara rimliga att anta utifrån forskningsresultaten som beskrevs i kapitel 4. För ett 4x4 MIMO system är vinster runt 2–3 gånger SISO-kapaciteten realistiska. I figuren visas kapaciteten som funktion av signal-till-brusförhållande (SNR). Kapaciteten uttrycks här i bitar/s/Hz, vilket ofta kallas spektraleffektivitet, dock är vinsterna desamma för kapaciteten, uttryckt i bitar/s, för ett system med en viss bandbredd. Kapaciteten växer som funktion av SNR och kurvorna för MIMO har en snabbare ökning jämfört med SISO. Följaktligen växer skillnaden mellan teknikerna med växande SNR. För ett SNR på 12 dB är vinsten 2 bitar/s/Hz för det typiska 2x2 MIMO-systemet och 4 bitar/s/Hz för 4x4 MIMO jämfört med SISO.

Istället för att se vinsten med MIMO som en dataaktshöjning vid ett visst SNR kan man istället se vid vilket SNR olika tekniker får samma dataakt. För en dataakt på 6 bitar/s/Hz behövs ett SNR på 18 dB för SISO, medan det för 2x2 eller 4x4 MIMO räcker med 12 dB respektive 8 dB. Skillnaden i SNR är nästan 10 dB för 4x4 MIMO. Att MIMO kräver lägre SNR kan ses som att sändareffekten kan minskas för att erhålla samma räckvidd och dataakt. Alternativt kan man med ett MIMO system med samma uteffekt och dataakt få längre räckvidd än med SISO.

För att uppskatta vågutbredningen mellan sändare och mottagare antar vi att dämpningen på kanalen är proportionell mot avståndet upphöjt till 4, dvs  $L_b \sim r^4$ . Det innebär grovt att om sändareffekten dubblas kan dämpningen på kanalen vara dubbelt så stor för att få samma mottagen effekt, vilket i sin tur leder till att räckvidden blir approximativt 20% längre. I tabell 6.1 ges några exempel på räckviddsökningar när uteffekten ökar. I tabellen antas en skillnad på 10 dB motsvara ungefär 80 % längre räckvidd, vilket motsvarar det tänkta 4x4 MIMO-systemet jämfört med SISO. Skillnaden i SNR för 2x2 systemet



Figur 6.1: Exempel på kapacitetsvinster med MIMO.

var istället 6 dB vilket skulle motsvara ungefär 40 % längre räckvidd jämfört med SISO.

För lägre datatakt blir skillnaderna mellan MIMO och SISO mindre, men inte obetydliga. För en datatakt på 2 bitar/s/Hz är till exempel skillnaden drygt 2 dB för 2x2 och knappt 5 dB för 4x4. Att på andra sätt erhålla vinster i samma storleksordning genom kodning eller ökning av uteffekten är mycket svårt.

Effektökning [ggr]	[dB]	Räckviddsökning [%]
2	3	20
4	6	40
6	8	60
10	10	80
16	12	100

Tabell 6.1: Räckviddsökning som funktion av effektökning.

## 7 Slutsatser

I vår analys har speciellt två plattformar undersökts; stridsvagn 122 och stridsfordon 9040. Genom att ersätta de antenner som finns idag, 4 stycken på strv122 och 2 på strf9040, är 4x4 eller 2x2 MIMO rimligt att anta. Prestanda för system med 2x4 eller 4x2 MIMO kommer att ligga mellan de två andra alternativen och är också rimliga att använda. Även andra möjliga antennplaceringar har belysts i rapporten om man vill använda fler antenner. Dock så kräver de flesta av dessa placeringar alternativa antennlösningar och en större modifiering av plattformen. Detta gäller speciellt för den variant av stridsfordonet där uppsutten strid ska kunna föras.

För taktisk kommunikation är framförallt frekvensbandet runt 300 MHz intressant. Det medger större bandbredder än lägre frekvensband och samtidigt längre räckvidder än högre frekvensband. För att få bra prestanda med MIMO bör signalerna i de olika antennerna ha låg korrelation och följaktligen behöver antennerna separeras från varandra. Avstånd ner till en kvarts våglängd ger bra prestanda. För frekvenser runt 300 MHz innebär det att avståndet mellan antennerna bör vara större än 25 cm vilket inte borde vara något problem på ett fordon.

Vid mätningar i olika miljöer har MIMO-vinster i storleksordningen 1.5 gånger SISO och 2-3 gånger SISO uppmätts för 2x2 respektive 4x4 MIMO. Den teoretiska maximala ökningen är 2 respektive 4 gånger. MIMO kan följaktligen ge kapacitetsvinster för kommunikationssystemet. I ett militärt radiosystem är inte alltid dataakten det viktigaste, robusthet kan vara en minst lika viktig faktor. MIMO kan bland annat minska effekterna av fädning genom diversitet, vilket innebär att kanalen inte förändras lika snabbt. En mer stabil kanal minskar behovet av fädningsmarginal i systemet vilket leder till ökad effektivitet.

Ytterligare ett sätt att se på vinsten med MIMO är att se för vilket SNR olika tekniker ger samma dataakt. För en dataakt på 6 bitar/s/Hz i vårt exempel ger 4x4 en SNR vinst på 10 dB. Detta innebär MIMO får samma prestanda som SISO med endast en tiondel av uteffekten. För samma uteffekt som SISO kan SNR vinsten användas till en räckviddsökning, 10 dB innebär grovt 80 % längre räckvidd för kommunikationssystemet.

Införandet av MIMO-teknik innebär i praktiken ett nytt radiosystem designat för MIMO. Hårdvaran behöver till exempel ha flera sändar- och mottagar-kedjor som är kopplade till de olika antennerna. Utvecklingen av MIMO för taktisk militär kommunikation börjar ta fart och det finns nu en amerikansk tillverkare som marknadsför en radio för 4x4 MIMO och om några år är det troligt att fler tillverkare erbjuder radiosystem med MIMO.

FOI-R--3696--SE

## Referenser

- [1] Lingfeng Liu, C. Oestges, J. Poutanen, K. Haneda, P. Vainikainen, F. Quirin, F. Tufvesson, and P.D. Doncker. The COST 2100 MIMO channel model. *Wireless Communications, IEEE*, 19(6):92–99, 2012.
- [2] Meifang Zhu, Gunnar Eriksson, and Fredrik Tufvesson. The cost 2100 channel model: Parameterization and validation based on outdoor MIMO measurements at 300 MHz. *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, 12(2):888–897, 2013.
- [3] G. J. Foschini and M. J. Gans. On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas. *Wireless Personal Commun.*, 6(3):311–335, 1998.
- [4] I. E. Telatar. Capacity of multi-antenna Gaussian channels. *Eur. Trans. Telecommun.*, 10(6):585–595, November/December 1999.
- [5] S. D. Gunashekar, E. M. Warrington, S. Salous, S. M. Feeney, N. M. Abbasi, L. Bertel, D. Lemur, and M. Oger. Investigations into the feasibility of multiple input multiple output techniques within the HFband: Preliminary results. *Radio Science*, 44(1):n/a–n/a, 2009.
- [6] Gunnar Eriksson, Sara Linder, Kia Wiklundh, Peter D. Holm, Peter Johansson, Fredrik Tufvesson, and Andreas F. Molisch. Urban peer-to-peer MIMO channel measurements and analysis at 300 MHz. In *Proc. IEEE MILCOM 2008*, San Diego, CA, USA, November 2008.
- [7] Peter Holm, Gunnar Eriksson, and Kia Wiklundh. MIMO channel measurements at 300 MHz for an elevated and a peer-to-peer scenario. Scientific Report FOI-R--3282--SE, FOI, November 2011.
- [8] Patrik Eliardsson and Ulrika Uppman. An SDR implementation of a MIMO communication testbed. In *7th Karlsruhe Workshop on Software Radios*, 2012.
- [9] O.A. Nasr, O.Y. Takeshita, W. Zhu, and B. Daneshrad. Field trial results of a 4x4 MIMO-OFDM real time testbed. In *Communications (ICC), 2010 IEEE International Conference on*, pages 1–5, 2010.
- [10] T.J. Willink. Characteristics of urban vehicular mimo channels at different frequencies. In *Antennas and Propagation, 2009. EuCAP 2009. 3rd European Conference on*, pages 645–649, 2009.
- [11] Hung-Quoc Lai, B. Zannetti, T. Chin, D. Morris, J. Koshy, W. Macre, J. Liberti, and C. Martin. Measurements of Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) performance under army operational conditions. In *MILITARY COMMUNICATIONS CONFERENCE, 2010 - MILCOM 2010*, pages 2119–2124, 2010.

- [12] Jerry R. Hampton, Manuel A. Cruz, Naim M. Merheb, A. Roger Hammons Jr., Douglas E. Paunil, and Feng Ouyang. MIMO channel measurements for urban military applications. In *Proc. IEEE MILCOM 2008*, San Diego, CA, USA, November 2008.
- [13] Jerry R. Hampton, A. Roger Hammons Jr., Manuel A. Cruz, Naim M. Merheb, Douglas E. Paunil, and Feng Ouyang. Multiple-Input Multiple-Output MIMO channel measurements for urban military applications. *John Hopkins APL Technical Digest*, 30(2), 2011.
- [14] K. Wiklundh and G. Eriksson. A study of the capacity for different element spacing on compact mimo platforms. In *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2008. PIMRC 2008. IEEE 19th International Symposium on*, pages 1–5, 2008.
- [15] J. Ling, D. Chizhik, D. Samardzija, and R.A. Valenzuela. Peer-to-peer mimo radio channel measurements in a rural area. *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, 6(9):3229–3237, 2007.
- [16] <http://www.silvustechologies.com/>. Websida.
- [17] SÄkl G 13, gemensam del. Technical Report M-7739-351100, Försvarsmakten, 2013.





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)