



Telekommunikationer för operationer i urban miljö – Slutrapport

LARS AHLIN, FREDRIK KULLANDER, SARA LINDER,
HUGO TULLBERG, ÅSA WAERN, OCH KIA WIKLUNDH

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
Informationssystem
Box 1165
581 11 Linköping

Tel: 013-37 80 00
Fax: 013-37 81 00

www.foi.se

FOI-R--2643--SE
ISSN 1650-1942

Användarrapport
December 2008

Informationssystem

Lars Ahlin, Fredrik Kullander, Sara Linder,
Hugo Tullberg, Åsa Waern, och Kia Wiklundh

Telekommunikationer för operationer i urban miljö

– Slutrapport

Titel	Telekommunikationer för operationer i urban miljö – Slutrapport
Title	Telecommunications for Operations in an Urban Environment – Final Report
Rapportnr / Report No.	FOI-R--2643--SE
Rapporttyp	Användarrapport
Report Type	User Report
Månad / Month	December / December
Utgivningsår / Year	2008
Antal sidor / Pages	56
ISSN	1650-1942
Kund / Customer	FM
Forskningsområde	7. Ledning med MSI
Programme area	7. C ⁴ I
Delområde	71. Ledning med MSI
Subcategory	71. Command, Control, Communications, Computers, Intelligence
Projektnr / Project No.	E7107
Godkänd av / Approved by	Martin Rantzer
FOI, Totalförsvarets Forskningsinstitut	FOI, Swedish Defence Research Agency
Avdelningen för Informationssystem	Division of Information Systems
Box 1165	P.O. Box 1165
581 11 LINKÖPING	SE-581 11 LINKÖPING

Sammanfattning

Syftet med denna rapport är att sammanfatta och avrapportera verksamheten inom projektet ”telekommunikationer för operationer i urban miljö (TURBAN)”. Inom projektet har målet varit att visa på möjliga kommunikationslösningar för taktisk kommunikation i stadsmiljö. MIMO-tekniker har studerats speciellt eftersom tekniken ger möjlighet till hög kapacitet i traditionellt sett besvärliga kommunikationsmiljöer. MIMO-kanalmätningar har genomförts och analyserats för att kartlägga MIMO-kanalen i stadsmiljö och kunna påvisa möjliga kapacitetsvinster. Några utvalda systemaspekter hos kommunikationssystem har också undersökts, exempelvis hur separationen mellan antennelement påverkar kapaciteten i ett MIMO-system, hur adaptiv modulation och kodning bör designas för ett OFDM-system och vilka för och nackdelar som finns vid cross-layer design. En metod för att kunna analysera störningsmiljön vid radioplattformar har tagits fram. Dessutom har en översikt av kanalmodeller för stadsmiljö genomförts. En demonstrator har byggts i form av en mjukvaruradio med kommersiell hård- och mjukvara. Projektet har även medverkat i ett gemensamt demonstrationsprojekt för flera FOI-projekt, där projektet bidragit med att visa kommunikation med MIMO-teknik i stadsmiljö. Rapporten sammanfattar verksamheten som bedrivits under de tre år som projektet pågått och ger även förslag på fortsatt verksamhet.

Nyckelord: Taktisk kommunikation, radio, MIMO, kanalmodell

Abstract

The purpose with this report is to summarize the activities within the project Telecommunications for Operations in Urban Environments. The goal for the project has been to show feasible solutions for tactical communications in an urban environment. MIMO technology has been studied since it facilitates high capacity in difficult environments. MIMO-measurements have been performed and analyzed to evaluate the possible capacity gains. Selected system aspects for a communication system have been studied, such as: how the element spacing in an MIMO array affects the capacity, how adaptive coding and modulation should be designed for an OFDM system and the pros and cons with cross-layer design. A method to analyse the interference situation at a radio platform has been developed. Furthermore, an overview of channel models for urban environment has been done. Also, a software radio demonstrator was built with commercial hardware and software. Finally, the project participated in a joint demonstration with several other projects from FOI. This report summarizes the activities within the project and gives proposals for future work.

Keywords: Tactical communication, radio, MIMO, channel model

Innehållsförteckning

1	Inledning	7
1.1	Bakgrund	7
1.2	Syfte och mål	8
2	Projektets inriktning	9
2.1	Behov av kommunikation i stadsmiljö	9
2.2	Kommunikation i stadsmiljö	9
3	MIMO-mätningar och analyser	13
3.1	Syftet med mätningarna	13
3.2	Mätsystem	13
3.3	Genomförda mätkampanjer	15
3.4	Analys av mätningarna	18
3.5	Antennseparation i MIMO-system	21
3.6	Civila tillämpningar MIMO	23
3.7	Slutsatser	23
4	Interferenshantering	25
5	Studie av kommunikationsbehov för operationer i urban miljö	27
6	Cross-layer design	29
7	OFDM-signalering	31
8	Mjukvaruradiobaserad MIMO-demonstrator	33
9	Sensorer i urban miljö	35
9.1	Scenario	35
9.2	Sensorteknik	35
9.3	Trådlös sensorkommunikation	36
10	Kanalmodeller för urban miljö	37
10.1	Empiriska modeller	37
10.2	Deterministiska modeller	38
10.3	Semideterministiska modeller	38
10.4	Stokastiska modeller	39
11	Gemensamt demoprojekt	41
12	Samarbeten	43
12.1	COST	43
12.2	WINTSEC	44
12.3	Avtalsbundna samarbeten med UoH	44

13	Förslag till teknisk lösning	47
13.1	Frekvensområde	47
13.2	Adaptivitet	47
13.3	OFDM	48
13.4	MIMO-system	48
14	Sammanfattning	49
14.1	Förslag fortsatta arbeten	49
14.2	Projektets publikationer	50
14.3	Övrig resultatöverföring	54
	Referenser	54

1 Inledning

I denna rapport sammanfattas arbetet som har bedrivits inom projektet *Telekommunikationer för strid/operationer i urban miljö (TURBAN)*. Projektet har genomförts 2006-2008 på uppdrag av Försvarsmakten inom FoT-området Ledning med MSI. Till projektet har en referensgrupp varit knuten med representanter från HKV, MSS, FMV, Lunds universitet och Ericsson.

1.1 Bakgrund

Förmågan att kunna genomföra militära operationer i stadsmiljö har under senare år blivit allt viktigare. Vid sådana operationer kan man inte förutsätta att det finns en utbyggd och fungerande kommunikationsinfrastruktur. Kommunikationen sker i dessa fall med lågt placerade enheter och byggnader utgör då ett hinder för kommunikationen. Enheter som är något kvarter ifrån varandra har sällan fri sikt mellan antennerna. Att upprätthålla kommunikation med dessa förutsättningar är en stor utmaning. Samtidigt kan det vara än viktigare med fungerande kommunikation i sådana situationer.

Vid militära operationer är det ofta ett krav att inte vara beroende av någon sårbar fast infrastruktur. Dessutom vill man snabbt kunna flytta enheter till nya områden utan en mängd förplanering och installation av fasta system vilket leder till att ad hoc-nät ofta är en bra lösning för taktiska kommunikationssystem. Olika enheter ska kunna kommunicera direkt med varandra utan att gå via en basstation. I civila system finns ofta en upphöjd basstation eller accesspunkt. För rörlig taktisk militär kommunikation är ofta alla enheter likvärdiga kommunikationsmässigt och ingen upphöjd central enhet finns. Naturligtvis finns undantag med t.ex. en upphöjd UAV eller med en utplacerad nod på ett tak, men i huvudsak kommer mycket av kommunikationen att ske mellan enheter på marknivå i ett så kallat peer-to-peer nätverk.

Kraven på militära kommunikationssystem har ökat de senaste åren i och med att de ska kunna leverera allt fler och mer krävande tjänster. Traditionellt sett har mycket av kommunikationen varit tal och ett fåtal specialiserade datatjänster, till exempel dart-meddelanden. I framtiden kommer antalet olika tjänster som används att vara mycket större. Exempelvis kan man vilja skapa en gemensam lägesbild, distribuera databaser, skicka epost, överföra bilder och video med mera. Därför är det viktigt att undersöka tekniker som kan ge hög kapacitet i ett radiosystem. Inom det civila området har utvecklingen också gått mot system som kan leverera mer kapacitet till sina användare, med till exempel videoöverföring till mobiltelefoner och trådlösa nätverk för hemmabruk

med hög dataakt. Många av de tekniker som används eller utvecklas för civila tillämpningar är även användbara i militära system.

En teknik som är mycket intressant för att öka kapaciteten på radiokanalen är MIMO (multiple-input multiple-output), där både sändare och mottagare är utrustade med flera antenner. Dessutom är det i en föränderlig miljö viktigt med ett adaptivt system som kan adaptera både mot kanalen och användarens/tjänsternas krav. Adaption mot kanalen är speciellt viktigt i stadsmiljö där förändringar i vågutbredningen kan vara stora och plötsliga exempelvis då man viker av runt ett hörn.

Några aspekter av adaptiva kommunikationssystem har studerats i tidigare FoT-projekt som ARN - *Adaptiv radionod* och dess efterföljare TAKO - *Taktiska kommunikationssystem för den nya krigföringen*. Detta projekt bygger vidare på resultat och resonemang från dessa projekt och även i hög grad på resultat från projektet KOMET - *Kommunikationskanalens egenskaper i tätort* där man bland annat genomfört en MIMO-mätkampanj.

1.2 Syfte och mål

Slutmålet är att redovisa olika möjliga kommunikationslösningar för operationer i urban miljö, samt att kunna demonstrera effekter av delar av en sådan lösning. Ett specifikt mål har varit att visa MIMO-teknikens användbarhet i militära scenarion för att höja kapaciteten i kommunikationssystemet. För att belysa detta behövs mätkampanjer för MIMO-system på 300 MHz i stadsmiljö för att analysera de möjliga vinster som kan erhållas med ett MIMO-system i en sådan miljö. De praktiska aspekterna av att realisera ett MIMO-system på aktuellt frekvensområde bör även behandlas. Även behoven av kommunikation och de krav som ställs på kommunikationssystemet vid militära operationer i urban miljö bör belysas.

2 Projektets inriktning

2.1 Behov av kommunikation i stadsmiljö

Militära operationer i stadsmiljö har blivit allt vanligare, det är därför viktigt att kunna upprätthålla kommunikation i stadsmiljö. Förutsättningarna för kommunikation i stadsmiljö kan variera mycket beroende på operationens natur, om det är en fredsfrämjande operation eller en stridande uppgift. Även tillgången till fungerande infrastruktur kan variera mycket, ibland finns kanske fungerande mobiltelefonisystem eller system för polis och räddningstjänst som man kan utnyttja. Vid samarbete med myndigheter i landet kan det vara viktigt. Ibland måste kanske hela kommunikationssystemet byggas helt från grunden. För viss kommunikation används alltid egna kommunikationssystem. Behovet av kommunikation har studerats närmare i projektet, se kapitel 5.

Det finns en mängd olika typer av sensorer som kan användas i stadsmiljö för övervakning av stadsmiljön. På grund av att sensorerna ofta har ett begränsat täckningsområde i stadsmiljön eftersom de ofta blir skymda kan en stor mängd sensorer behövas. Det är en stor fördel att kunna koppla ihop sensorerna trådlöst i ett så kallat sensornätverk. För att minska kommunikationsbehovet mellan olika sensorer så kan mycket av databehandling och lagring ske nära sensorn för att bara behöva skicka den nödvändigaste informationen. Vid behov kan sedan mer information hämtas. Exempelvis kan en bildalstrande sensor skicka målspar i första hand och sedan kan en operatör begära att få se videoinspelningen vid behov. I de fall som man behöver få tillgång till all information som en sensor sparar kan det handla om mycket stora datamängder som ska överföras.

2.2 Kommunikation i stadsmiljö

Militära operationer i urban miljö innebär ofta svårigheter att upprätthålla robust och tillförlitlig kommunikation. Stadsmiljön med höga hus och fordon innebär att det sällan är fri sikt mellan sändare och mottagare. Den mottagna signalen har istället reflekterats och spridits av föremål i miljön eller diffrakterats runt stora objekt. Reflektion fås från föremål som är stora i förhållande till våglängden hos signalen och spridning erhålls då föremålen är små. I en komplex miljö kommer flera kopior av den utsända signalen fram till mottagaren från olika riktningar med olika amplitud, fas och fördröjning, så kallad flervägsutbredning. I mottagaren sammanlagras dessa olika mottagna signaler antingen konstruktivt eller destruktivt beroende på det relativa fasläget hos de mottagna

signalerna. När sedan antingen sändaren, mottagaren eller något i miljön förflyttar sig så förändras de relativa faserna hos de mottagna signalerna och den resulterande signalen förändras med tiden. Den mottagna signalen kommer att variera över tiden (fädnings) och detta fenomen kan ge ett kommunikationssystem stora problem. Vid designen av ett radiosystem kan ett antal olika tekniker användas för att hantera problemen med flervägsutbredning och fädnings.

Hur vågutbredningsmiljön ser ut beror mycket på vilket frekvensområde som kommunikationssystemet arbetar på. Ofta kan system på olika frekvensområden komplettera varandra och användas för olika uppgifter. Ibland är det lång räckvidd som efterfrågas, ibland hög kapacitet. Dessutom kan miljöerna som systemet används i skilja sig mycket åt även inom en stad, i vissa situationer har man fri sikt och ibland är det mycket flervägsutbredning. För att lösa alla uppgifter i alla situationer behövs förmodligen ett flertal kommunikationssystem vissa specifika för en viss uppgift exempelvis hämtning av en stor mängd data från en sensor.

För taktisk militär radiokommunikation är frekvenser i övre VHF- eller lägre UHF-bandet intressanta. Runt dessa frekvenser är vågutbredningen fördelaktig eftersom den ganska stora våglängden gör att radiovågorna i viss utsträckning kan diffraktera runt hinder, vilket är viktigt i miljöer utan fri sikt mellan sändare och mottagare. Räckvidden är också längre än för system vid högre frekvenser, t.ex. i GHz-området. Samtidigt är frekvensen tillräckligt hög för att flerantennsystem ska kunna placeras ut på enheter, i alla fall på fordon.

I det följande beskrivs två olika tekniker för att kunna överföra mycket data: optisk kommunikation och MIMO-teknik. Teknikerna kan i mångt och mycket ses som komplement till varandra, att användas i olika miljöer och för olika uppgifter.

2.2.1 Optisk kommunikation

Fri optisk kommunikation (FSO) utgörs traditionellt sett av länkar som kräver fri siktlinje. Relativt smala lober gör även att en hög peknoggrannhet förutsätts. Därför kan nyttan i ett taktiskt urbant scenario tyckas begränsad även fast den civila användningen idag till stor del utgörs av höghastighetslänkar i urban miljö. Sändtagarna är dock i detta fall fast monterade på hög höjd vilket gör att siktlinjen sällan eller aldrig bryts. FSO-länkar används i stadsmiljö där det är problem att dra optiska fibrer och förbinder datanäten i intilliggande byggnader med varandra. De ger en säker höghastighetsöverföring i nästan alla väder. Hög datatakt är det primära motivet till att överväga optisk kommunikation. Egenskaper som störokänslighet och avlyssningssäkerhet kan också ha betydelse i

urbana taktiska scenarion.

Problemet med inriktning kan förutsättas lösbart på olika typer av mobila plattformar med styrsystem som låser laserlänken mellan plattformarna och kompenserar för deras relativa rörelser. För tvåvägskommunikation med lika prestanda i båda riktningarna krävs likvärdiga styrsystem i båda ändarna. Sådan teknik finns idag endast för FSO-länkar mellan satelliter men om en sådan, exempelvis taktisk, tillämpning skulle komma fram kan tekniken utvecklas till att möta de ändrade krav som då skulle ställas.

En ny teknik som lämpar sig för användning i rörliga system kallas retrokommunikation. Den går ut på att från ena änden i FSO-länken sända med en liten retroreflektor. I taktiska urbana scenarion kan frisiktskravet fortfarande anses vara en begränsande faktor av vikt. Tekniken blir därför främst intressant i fall där länken inte behöver vara tillgänglig jämt som t ex vid avtankning av data från sensorer eller i operationer där taktiken kan innefatta etablerandet av fri sikt. Genom utnyttjande av reläande enheter kan dock även frisiktskravet undanröjas. Retroreflektorenheter utplacerade på husväggar eller till och med på taktiska UAV:er kan reläa länken mellan platser via gathörn eller via luften över byggnaderna. FOI har varit med och utvecklat optiska modulatorer för att påföra digital kod på det laserljus som återspeglas från retroreflektorn till laserenheten i den andra änden. Metoden har bland annat fördelen av att inriktningskravet på retroreflektorsidan är relativt lågt. Det går till och med att konstruera enheter som kan ta emot och sända över hela hemisfären utan särskild inriktning. Retroenheter lämpar sig då det inte finns utrymme, då lastkapaciteten är liten, då energitillgången är begränsad eller då plattformen är instabil. Tekniken kan i dessa avseenden vara bättre än mikrovågslänkar med motsvarande kommunikationsprestanda. Ett särskilt område som studerats med koppling till retrokommunikation är sensordatakommunikation från små plattformar som till exempel en taktisk UAV som bär med sig bildalstrande sensorer.

I ytterligare en variant av FSO under utveckling går det att etablera en kommunikationslänk trots bruten siktlinje. Länken utnyttjar spridning från atmosfären eller från byggnader i omgivningen. Mottagaren med en förhållandevis bred mottagarlob riktas uppåt eller i en förutbestämd riktning mot vilken sändaren lyser. För att undvika bakgrundsstrålningen från solen används en sändare med våglängd i det ultraviolette så kallade solblinda fönstret. Det solblinda fönstret karakteriseras av att solstrålningen har blockerats av högre atmosfärsskikt med totalt mörker till följd. Det är då möjligt att med relativt låg effekt signalera via spridning. Nya komponenter för både sändning och mottagning studeras och utvecklas men det är ännu oklart om prestanda kan bli tillräckligt bra för att möta tillämpningskrav.

2.2.2 MIMO-teknik

När flera antenner är kopplade till både sändar- och mottagarsystem brukar man tala om ett MIMO-system (Multiple-input multiple-output). Benämningar som smarta antenner, antennarray eller flerantennsystem förekommer också, men kan i dessa fall även avse multipla antenner bara på den ena sidan av länken. Med hjälp av signalbehandling i sändare och mottagare kan dessa antenner utnyttjas på en mängd olika sätt. Till exempel kan de användas för lobformning då mottagarens antennlob riktas mot sändaren för att få en stark mottagen signal vid fri sikt mellan sändare och mottagare. MIMO kan även användas för förbättrad robusthet i form av diversitet då effekterna av fädningsdip samtidigt i de olika antennelementen. Det finns en mängd olika sätt att utnyttja ett flerantennsystem för olika syften och i olika miljöer. På senare år har man börja använda MIMO-system för att höja kapaciteten i kommunikationssystem dramatiskt med olika former av signalbehandling, exempelvis space-time coding (kodning både i tidsledd och över olika antennelement), space-frequency coding (kodning både över olika frekvenser och olika antennelement) eller spatiell multiplexering. Spatiell multiplexering innebär att separata dataströmmar skickas de olika sändarantennerna och är den teknik som kan ge störst kapacitetsvinst.

Det har tidigare visats att för fäddande kanaler kan kapaciteten ökas avsevärt med hjälp av MIMO jämfört med ett system med bara en sändar- och en mottagarantenn. MIMO-tekniken används i standarden IEEE 802.16 (även känt som WiMAX) och kommer ingå i standarden IEEE 802.11n (Wi-Fi). Redan nu finns trådlösa routrar med MIMO-teknik till försäljning som följer en förhandsversion av IEEE 802.11n. Även inom utvecklingen av 3G-standarderna, t.ex. HSDPA är MIMO-tekniken med. I LTE, den långsiktiga utvecklingen av mobiltelefonisystem, finns MIMO-teknik med. Militärt är MIMO-tekniken intressant då den kan ge stora vinster, kanske framförallt i miljöer som traditionellt setts som svåra med mycket flervägsutbredning, exempelvis stadsmiljöer.

Som tidigare nämnts är frekvenser i övre VHF- eller lägre UHF-bandet intressanta för taktisk militär radiokommunikation. Det finns flera skäl till detta, räckvidden är längre än för system på högre frekvenser och samtidigt är det möjligt att placera flera antenner på ett fordon med lämpligt avstånd mellan antennerna.

Troligen kan MIMO-tekniken ge stora fördelar åt ett militärt kommunikationssystem. Teoretiskt har stora vinster kunnat visas men i praktiken beror vinsterna på radiokanalens egenskaper. Det är därför viktigt att kartlägga MIMO-kanalens egenskaper i militära scenarion.

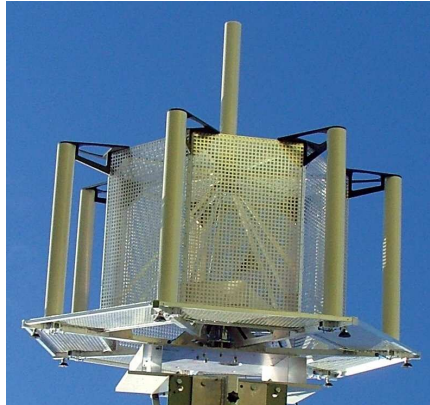
3 MIMO-mätningar och analyser

3.1 Syftet med mätningarna

För att kunna kvantifiera de vinster som ett kommunikationssystem kan uppnå med hjälp av MIMO-teknik behövs kunskap om radiokanalens egenskaper i verklig miljö. Något som är mycket viktigt för ett MIMO-system är kanalens spatiella egenskaper, det vill säga hur riktningarna för de olika utbredningsvägarna mellan sändare och mottagare är fördelade i rummet. Detta skiljer sig ofta från traditionella mätningar som mycket fokuserar på kanalens tidsspridning. Många MIMO-mätningar som rapporterats är för ett scenario med en upphöjd basstation medan bara ett fåtal är för peer-to-peer scenarion. De flesta mätningar är även genomförda på frekvenser över 1 GHz, eftersom det är dessa frekvenser som trådlösa nätverk och mobiltelefonisystem med höga datatakter kommer att använda. De mätningar som vi genomfört är på frekvenser kring 300 MHz, med en relativt stor mätbandbredd och i ett scenario med låg antennhöjd för både sändare och mottagare.

3.2 Mätsystem

Mätningarna av MIMO-kanalen har genomförts med RUSK-LUND MIMO channel sounder, som mäter kanalen mellan alla kombinationer av sändar- och mottagarantennerna sekventiellt under en kort tidsperiod. För en utförligare beskrivning av mätmetoden se [1, 2]. De mätkampanjer vi genomfört har skett på en mittfrekvens av 285 MHz och med en bandbredd på 20 MHz. Uteffekten är 43 dBm och den utsända signalen är en spridningssekvens med längden $12.8 \mu\text{s}$, vilken repeteras periodiskt. Detta innebär att spektrumet för den 20 MHz breda signalen består av 257 frekvenslinjer med 78.125 kHz mellanrum. Både sändare och mottagare har identiska 8-elements antennarrayer. Antennerna består av 7 likformigt cirkulärt fördelade vertikalt polariserade dipoler. Radien är cirka 0.6 meter. Ett centerelement är upphöjt jämfört med de övriga elementen. Dessutom är de 7 elementen placerade framför en cylindrisk reflektor, vilket ger de 7 elementen ett strålningsdiagram med riktverkan, se figur 3.1. I figur 3.2 visas antennerna monterade på sändar- och mottagarbil.



Figur 3.1: Antennarray med 8 element.



Figur 3.2: Antennarrayerna monterade på sändarbil (till vänster) och mottagarbil (till höger).

3.3 Genomförda mätkampanjer

3.3.1 Universitetsområdet i Linköping

Mätningarna ägde rum på universitetsområdet i Linköping i slutet av mars 2005, dvs inom ett tidigare FoT-projekt, KOMET (Kommunikationens egenskaper i tätort), men eftersom data från mätningarna fortsatt att analyseras inom detta projekt ges en kort beskrivning av mätkampanjen.

Mätningarna genomfördes i utkanten av campusområdet vid Linköpings universitet, se figur 3.3. Sändare och mottagare var placerade i varsin personbil, med antennerna monterade på taken. Vid mätningarna var antennhöjden ungefär 1,8 m ovan mark för sändaren och 2,1 m för mottagaren. Sändarbilen var placerad på FOIs baksida medan mottagarbilen kördes längs fyra mätsträckor. Avståndet mellan sändare och mottagare varierade från 200 m till 450 m. Mätningarna utfördes på fyra delsträckor, fortsättningsvis benämnda R1, R2, R3 och R4. De tre första ligger utmed universitetets södra infart och den fjärde ligger på en parkering som ansluter till samma infart.

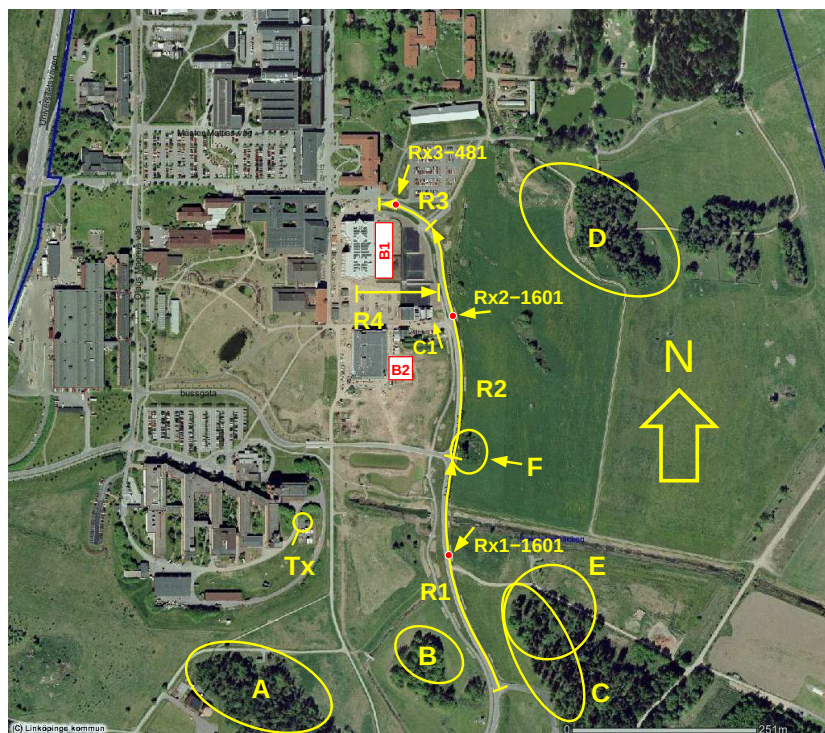
Sändarpositionen är belägen nära en stor byggnad som sträcker sig norr och väster om sändarplatsen. Mellan huset och sändaren finns även en del buskar. Precis i närheten, öster om sändaren, finns även en mindre barackliknande byggnad på hjul uppställd. Marken mellan sändaren och mottagarsträckorna är relativt plan, men genom att sändar- och mottagarantenn är lågt placerade gör växtligheten (i det mer eller mindre ordnade parkområdet) att helt fri sikt mellan sändaren och mottagaren är sparsamt förekommande.

3.3.2 Linköping centrum

En mätkampanj genomfördes i Linköping centrum i september 2006. I figur 3.4 visas en bild över mätområdet. Den här delen av Linköping består av en blandning av byggnader, vägar och parker. Byggnaderna är vanligen tre- till sexvåningshus med några få höga byggnader, exempelvis Linköpings Domkyrka med sitt 107 meter höga torn.

Sändaren var placerad på tre olika sändarplatser och mottagaren kördes efter 25 olika mätsträckor. Sändarplats ett var belägen på borggården utanför Linköpings slott. Sändarplats två var placerad i parken öster om Läns museet. Sändarplats tre var belägen i ett öppet område på andra sidan Stångån.

Vid mätningarna var direktsikt (LOS - line-of-sight) sällsynt för alla sändarplatserna, men det finns några undantag. Exempelvis för sändarplats 1 är det LOS, eller nära LOS, i slutet av mätsträcka 6 och i början av sträcka 7.



Figur 3.3: Flygfoto över universitetsområdet där mätningen utfördes. Sändarpositionen, mätsträckorna och vissa byggnader och skogsdungar är markerade i bilden.



Figur 3.4: Flygfoto över Linköping centrum, sändarpositionerna är markerade med kryss och mätsträckorna med pilar.

3.3.3 Malmö centrum

I samarbete med Lunds universitet genomfördes även en mätning i centrala Malmö under 2006 för att studera ett scenario med upphöjda noder, tex placerade på hustak. Huvuddelen av dessa mätningar genomfördes med sändarbilen placerad på taket i ett parkeringshus, ungeräfr 18-20 meter över gatunivå. Mottagaren kördes längs ett ganska stort antal mätsträckor på olika avstånd och i olika riktningar från sändaren. En begränsad mätning genomfördes även i Malmö med sändarbilen placerad i gatumiljö.

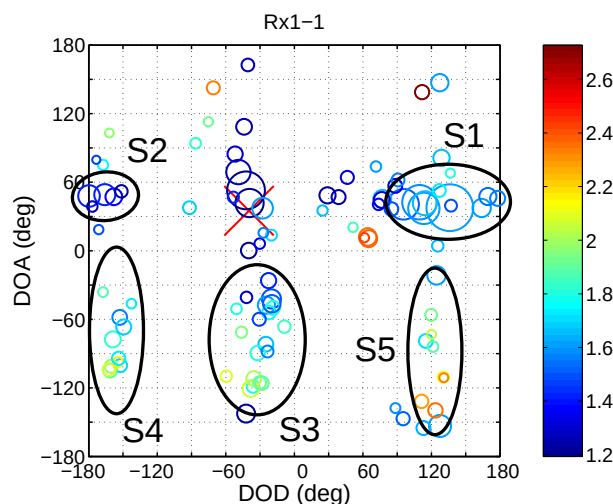
3.4 Analyser av mätningarna

I en utbredningsmiljö som medger flera utbredningsvägar mellan sändaren och mottagaren kommer i allmänhet fördelningen av ankomstriktningarna vid mottagaren att vara beroende av hur sändaren riktar den utsända signalen. För att på ett korrekt sätt karakterisera radiokanalen för ett MIMO-system måste kanalens spatiella egenskaper därför beaktas. Ett sätt att göra detta är att beskriva kanalen med hjälp av så kallad dubbel riktningsinformation [3], vilket är en beskrivning av den simultana fördelningen av utgående och inkommande riktningar vid sändaren respektive mottagaren.

För att kunna beskriva en kanal med hjälp av en kanalmodell med dubbel riktningsinformation behöver kanalparametrarna i signalmodellen bestämmas med stor noggrannhet från inhämtat mätdata. För detta krävs i allmänhet så kallade högupplösande metoder. Med högupplösande menas här att det är möjligt att särskilja signalkomponenter som skiljer sig mindre åt än den konventionella fourierupplösningen. En sådan högupplösande algoritm som funnit tillämpning inom detta område är SAGE (Space-Alternating Generalized Expectation Maximization) [4].

Att bestämma signalparametrarna för de dominerande utbredningskomponenterna utgör ett mångdimensionellt optimeringsproblem med ett mycket stort antal frihetsgrader. Med SAGE löses det mångdimensionella problemet genom ett iterativt förfarande med en endimensionellt optimering i varje steg. För ett extrahera kanalparametrar från mätningar med RUSK-systemet har en variant SAGE-algoritmen implementerats som arbetar på data i frekvensdomänen.

Från en analys av den uppmätta MIMO-kanalens överföringsmatris kan viktiga egenskaper som till exempel kanalkapacitet, utgående riktning från sändaren (DOD: Direction of Departure), ankomstriktning vid mottagaren (DOA: Direction of Arrival), tidsspridning, k-faktor, länkdämpning med mera erhållas.



Figur 3.5: Simultan fördelning av DOA-DOD. Ytan hos cirklarna är proportionell mot komponenternas normerade amplitud. Färgkodningen anger fördröjningen i μs . LOS är markerad med ett rött kryss. Elipserna S1-S5 markerar de kluster av utbredningskomponenter vilkas utbredningsmekanismer har identifierats i den fysiska miljön.

3.4.1 Resultat från universitetsmätningarna

Ett exempel på resultat visas i figur 3.5, vilken visar en DOA-DOD plot för de identifierade utbredningskomponenterna i den första mätpositionen på sträcka R1. Varje komponent illustreras med en cirkelsymbol vars centrum motsvarar estimerad DOD och DOA. Fördröjningarna är färgkodade och amplituderna, som normerats till den starkaste komponenten, representeras av storleken på symbolerna. Direktsikt (LOS) markeras av ett rött kryss i figuren. Från de parametrar som estimerats från kanalmätningarna fås en bra bild av hur vågutbredningen skett i den aktuella positionen, till exempel kan man identifiera i vilka byggnader eller trädgångar som reflektion har skett.

Genom de låga antennhöjderna, för både sändaren och mottagaren, är reflektioner från träd, diffraktion över terränghinder och diffraktion över och runt byggnader viktiga komponenter i utbredningen. Radiokanalen uppvisar överlag, i detta scenario, en relativt stor spridning i fördröjning, men framförallt i riktningsdimensionerna. Kanalkapaciteten längs mätsträckorna har beräknats vid såväl ett fixt SNR, som för en fix sändarut effekt. I detta utbredningsscenario var den möjliga kapaciteten för det studerade 7 gånger 7 MIMO-systemet ungefär 3 till 7 gånger högre än för ett SISO-system. Med tanke på den ganska öppna utbredningsmiljön, framförallt i närheten av mottagaren, för stora delar

av det mätta scenariot, är det intressant att notera att de uppmätta kanalkapaciteterna är relativt höga. Detta indikerar att det kan finnas stora möjligheter att öka kapaciteten hos radiosystem i detta frekvensområde genom att utnyttja MIMO-teknik. En utförligare beskrivning av mätningarna och mer resultat från mätningarna finns i [5].

3.4.2 Resultat Linköping centrum

Från mätningarna i Linköping var det svårare att genomföra en SAGE-analys och extrahera utgångs- och ingångsvinklar eftersom det inte var tillräckligt att estimerar vinklar i horisontalplanet. Att istället genomföra en estimering av vinklarna i 3 dimensioner är oerhört beräkningskrävande. En modifiering av SAGE-algoritmen gjordes för att försöka komma förbi problemet men tyvärr blev estimeringsfelen i resultatet för stora.

Från mätscenariot togs en modell av transmissionsförlusten fram och fördelningarna för den storskaliga fädningen, K-faktorn, tidsspridningen och kapaciteten studerades. För de olika parametrarna undersöktes även korrelationsavståndet. Analyserna visar att flera av kanalparametrarna är korrelerade och även har en stark korrelation med kapaciteten. Korrelationer mellan olika parametrar är viktiga att ta hänsyn till i en kanalmodell för att få en realistisk beskrivning av kanalen, det är inte alltid tillräckligt att sätta rimliga värden på parametrarna var för sig.

En annan viktig observation som gjorts när fördelningen för de olika parametrarna har undersökts är att variationerna under en mätsträcka i allmänhet är mindre än variationerna för hela scenariot. Det innebär till exempel för den storskaliga fädningen att medianvärdet för standardavvikelsen per mätsträcka var 2.4 dB, medan medelvärdet för de olika mätsträckorna kunde variera ± 12 dB.

Från mätningarna har även kapaciteten estimerats för några olika fasta signal-till-brus förhållanden (SNR). För ett 7 gånger 7 MIMO-system kan kapaciteten maximalt bli 7 gånger högre än för ett system med ett antennelement på sändare respektive mottagare. För våra mätningar varierar den möjliga kapaciteten beroende på den miljö som sändare och mottagare befinner sig i. Medianvärdet för möjlig kapacitet i den miljö som vi mätt är ändå så högt som 70 % av den maximala kapaciteten. Den möjliga kapaciteten som vi estimerat från mätningarna kan ses som ett mått på vad som är möjligt att åstadkomma i den miljön med ett 7 gånger 7 MIMO-system. Kapaciteten i ett visst kommunikationssystem beror i sin tur naturligtvis även på en rad andra faktorer som vald antennlösning, luftgränssnitt och signalbehandling i mottagaren. Resultaten här visar ändå på att det finns stora kapacitetsvinster att göra med MIMO-system i stadsmiljö för

frekvenser runt 300 MHz. En utförligare beskrivning och ytterligare resultat återfinns i [6].

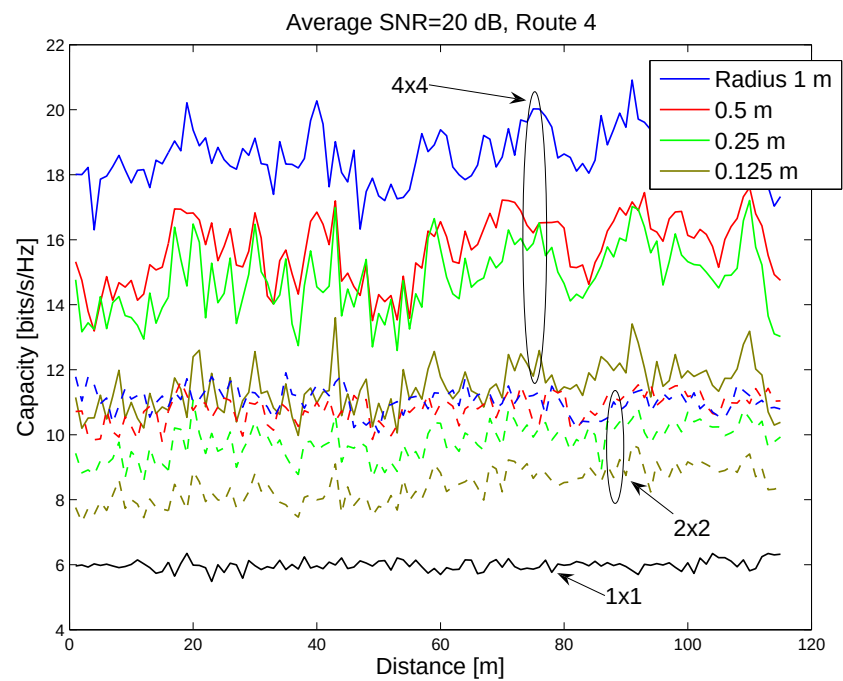
3.5 Antennseparation i MIMO-system

MIMO-tekniken med flera antennelement med den antennseparation som normalt krävs kan också innebära problem med avseende på antennstorlek. En tumregel för antennseparation är halva våglängden mellan antennelementen. För frekvensområdet 300 MHz innebär det 0.5 m mellan antennelementen, vilket kan vara svårt att åstadkomma för ett handhållet radiosystem.

I detta arbete har vi studerat hur kapaciteten påverkas av att vi minskar antennseparationen till avstånd under den vanligt använda tumregeln, halva våglängden. Vi har beräknat kapaciteten från kanalmätningarna utförda på universitetsområdet i Linköping. Området har en hel del höga byggnader, men kan inte riktigt räknas som stadsmiljö. Kapaciteten studerades för en cirkulär 4-elements antenn och en 2-elements antenn, med olika stor radie. Kapaciteten beräknades för ett konstant SNR på 20 dB. Det visade sig att den beräknade kapaciteten försämras gradvis. Om vi minskar radien till 0.125 m för 4-elements antennen fås en minskning av kapaciteten med ca 20-25 % jämfört med vad som skulle ha uppnåtts med en radie på 0.25 m. Kapacitetsökningen för ett 4 gånger 4 MIMO-system är ändå ca 2 gånger jämfört med ett SISO-system. Studerar vi istället en cirkulär 2 elementsantenn med radien 0.125 m får vi endast en kapacitetsförsämring på ca 10 % jämfört med en radie på 0.25 m. Jämför vi detta system med ett SISO-system har vi en skillnad på ca 1.5 gånger mellan MIMO- och SISO-systemet.

I figur 3.6 visas ett exempel på hur den beräknade kapaciteten, uttryckt i bitar/s/Hz, varierar utefter rutt 4. Om vi studerar 4-element antensystemet kan vi se att kapaciteten är högst för radien 1 m och att kapaciteten minskar med minskad radie. Radien 0.5 m och 0.25 m skiljer inte särskilt mycket. Kapaciteten varierar utefter körsträckan eftersom kanalen varierar. Kapaciteten varierar även för 2-elementsantennen, dock något mindre än för 4 element. I figuren visas även kapaciteten för ett SISO-system. Vi kan se att även fast vi har en radie på 0.12 m finns en betydande kapacitetsvinst jämfört med SISO-systemet.

Även för antennarrayer där antennseparationen är mindre än halva våglängder erhålls en vinst med MIMO-systemet. Vinsten beror inte bara på antennseparationen utan även på miljön. Resultaten finns i [7].



Figur 3.6: Beräknad kapacitet utefter rutt 4 för ett 4-elements och ett 2-elements antenssystem med radien 1, 0.5, 0.25 och 0.125 m. Som jämförelse finns även kapaciteten för ett SISO-system.

3.6 Civila tillämpningar MIMO

En sammanställning av potentiella möjligheter för civila tillämpningar av de resultat som framkommit inom MIMO-arbetet redovisas i [8]. Med stor sannolikhet kan de resultat som framkommit för frekvenser runt 300 MHz även tillämpas för frekvenser upp till 400-450 MHz vilket möjliggör tillämpning för exempelvis TETRA-standard. En möjlighet skulle kunna vara att utveckla en MIMO-tillsats för TETRA. Tillsatsen skulle kunna användas antingen för ökad robusthet mot störningar eller ökad kapacitet hos systemet. Ett projekt för att utveckla en add-on enhet skulle kunna bestå av två faser. I den första fasen byggs ett 4 gånger 4-system med antennavstånd som är cirka 50 % av våglängden. Antennelementens inbördes kopplingar mäts upp och möjlighet till patent undersöks. Kapacitetsökningen beräknas och resultaten för antennlösningen publiceras. I nästa fas byggs ett försökssystem som inkluderar nödvändig signalbehandling. Mätningar genomförs på systemet och erhållen kapacitet publiceras. Även för CDMA 450 skulle MIMO-teknik kunna användas för att öka prestanda.

3.7 Slutsatser

Resultaten från de mätningar som genomförts för MIMO-system vid 300 MHz visar att det finns potential för sådana system i stadsmiljö. Vad gäller kapacitetsökningen för ett MIMO-system är medianvärdet från den mätkampanj som genomfördes i Linköping 70% av det teoretiska maxvärdet. Detta visar på de möjligheter som kanalen erbjuder, sedan beror det på designen av MIMO-kommunikationssystemet hur mycket som kan användas. En aspekt av designen av kommunikationssystemet som undersökts är antennseparationen i en MIMO-antenn. Resultaten visar att det är möjligt att erhålla kapacitetsvinster även för antenner där separationen är mindre än vad som vanligtvis används. Prestandaförsämringen med små antenner beror på miljön men även för små antennavstånd behålls en vinst jämfört med ett system med en antenn.

De mätningar som genomförts kan även ha en användning i civila system, tex TETRA. En förstudie av möjligheterna har genomförts.

FOI-R--2643--SE

4 Interferenshantering

Elektromagnetiska störningar, både oavsiktliga och avsiktliga, finns i varje situation där vi har radiosamband. Graden av påverkan från dessa på radiosystemet kan många gånger vara svår att förutsäga. För att bestämma påverkan approximeras ofta störningssignalen som om den vore normalfördelad. En sådan approximation brukar benämnas som gaussapproximationen. Om störningen istället har en annan fördelning, till exempel är impulsaktig eller pulsmodule-rad, kan denna approximation leda till grova underskattningar av hur radiomottagaren påverkas av störningen. I detta arbete har amplitude probability distribution (APD) mätfunktionen undersökts för att karaktärisera störningssignaler. Vi har visat att APD:n av en störningssignal kan relateras till bitfelssannolikheten, som är prestandamåttet hos en digital radiomottagare.

APD:n visar hur störningssignalens envelopp är fördelad. I arbetet har vi visat hur APD:n för en generell störningskälla kan användas för att bestämma bitfelssannolikheten för koherenta radiosystem. Bland annat har relationen mellan APD:n och den maximala bitfelssannolikheten utvecklats för en rad olika koherenta modulationsmetoder för okodade system. I tabell 4.1 visas relationen för modulationsmetoder som phase shift keying (PSK), pulse amplitude modulation (PAM), quadrature amplitude modulation (QAM) samt frequency shift keying (FSK). Vi har även tagit fram en metod att hantera kodade radiosystem som baseras på systemets kodningsvinst.

De framtagna resultaten kan användas både för utveckling av telekonfliktsverktyg och vid telekonfliktsanalyser av systemplattformar. Problemställningen och resultaten har även använts som stöd för utveckling av emissionskrav för elektroniska utrustningar mot digital radiosystem. Arbetet har haft inflytande i standardiseringsarbetet inom CISPR (The International Special Committee on Radio Interference), som är ett internationellt standardiseringsorgan för bland annat emissionskrav, och mätmetoden har standardiserats. En APD-funktion finns idag implementerad i nyare mätmottagare.

Mod.	β	Pr[bitfel] $\approx$	Relation $P_{b,\max}$ och APD
2-PSK	1	Pr[symbolfel]	$P_{b,\max} \approx \text{APD}(\sqrt{E_b})$
4-PSK	1	$1/2 \cdot \text{Pr[symbolfel]}$	$P_{b,\max} \approx 1/2 \cdot \text{APD}(\sqrt{E_b})$
8-PSK	0.66	$1/3 \cdot \text{Pr[symbolfel]}$	$P_{b,\max} \approx 1/3 \cdot \text{APD}(\sqrt{0.66E_b})$
16-PSK	0.39	$1/4 \cdot \text{Pr[symbolfel]}$	$P_{b,\max} \approx 1/4 \cdot \text{APD}(\sqrt{0.39E_b})$
4-PAM	0.63	$1/2 \cdot \text{Pr[symbolfel]}$	$P_{b,\max} \approx 1/2 \cdot \text{APD}(\sqrt{0.63E_b})$
8-PAM	0.37	$1/3 \cdot \text{Pr[symbolfel]}$	$P_{b,\max} \approx 1/3 \cdot \text{APD}(\sqrt{0.37E_b})$
16-QAM	0.63	$1/4 \cdot \text{Pr[symbolfel]}$	$P_{b,\max} \approx 1/4 \cdot \text{APD}(\sqrt{0.63E_b})$
64-QAM	0.38	$1/6 \cdot \text{Pr[symbolfel]}$	$P_{b,\max} \approx 1/6 \cdot \text{APD}(\sqrt{0.38E_b})$
2-FSK	0.71	Pr[symbolfel]	$P_{b,\max} \approx \text{APD}(\sqrt{0.71E_b})$
4-FSK	1	$1/3 \cdot \text{Pr[symbolfel]}$	$P_{b,\max} \approx \text{APD}(\sqrt{E_b})$

Tabell 4.1: Relationen mellan maximal bitfelssannolikhet, $P_{b,\max}$, och APD för olika modulationsmetoder, där β beror på modulationsmetoden.

5 Studie av kommunikationsbehov för operationer i urban miljö

En studie har genomförts för att utreda framtida krav på tjänster vid kommunikation i urban miljö samt undersöka vilka avancerade tekniker som är väsentligast för att uppnå dessa krav. Syftet var bland annat att skapa en länk mellan användarbehov och möjliga tekniska lösningar. Angreppssättet var att först skapa en övergripande bild av de tjänster ett kommunikationssystem måste kunna tillhandahålla för att hjälpa användarna i olika typiska situationer vid operationer i urban miljö. De identifierade användarbehoven har därefter kopplats till användarkrav och till tekniska problemställningar. Sammantaget skall studien vara en hjälp för att fokusera forskning och utveckling på de tekniska system och delar som innebär kraftigt ökad förmåga för operationer i urban miljö jämfört med dagens system.

I studien används tre korta scenarier för att få fram vilka behov av kommunikationstjänster som föreligger. Scenarierna representerar olika förlopp vid insatser i urban miljö.

De scenarier som använts har varit:

1. Humanitära insatser - försörjning av flyktingläger
2. Fredsframtvängande insats - separering av grupper
3. Stridande uppgift - oskadliggörande av fiende.

Till varje kommunikationstjänst identifieras de troliga framtida krav som användaren kommer att ställa på tjänsten. Detta leder till att vi får en beskrivning av användarkrav som sedan kan kopplas och värderas mot ett tekniskt system. Självklart varierar kraven beroende på vilka operationer som skall genomföras och i vilken miljö operationerna äger rum. Möjligheterna att uppfylla ställda krav beror naturligtvis på vilka kommunikationssystem som är tillgängliga. För att få en belysning av olika systemlösningar ansattes tre olika kommunikationsinfrastrukturer; en dedicerad länk, ett cellbaserat mobiltelefonisystem (anpassat till militära krav) och ett ad hoc-nät.

Intervjuer med företrädare för olika roller i Försvarsmakten har genomförts. De olika scenarierna ställer olika krav på kommunikationen och framför allt på kvaliteten på de tjänster som behövs. Ju mer pressad en situation är ju högre blir kraven på robusthet men även på användarvänligheten. Tjänstebehovet för de olika situationerna kan indelas i talkommunikation och datakommunikation. Exempel på taltjänster är; uppringt samtal via växel, direkt man-till-man samtal, gruppsamtal eller broadcastsamtal. För datakommunikation kan man

identifiera tjänster som databashantering, positionshantering, SMS, sensordatatransmission, bildöverföring och realtidsvideo.

En viktig fråga är vilka användarkrav som behöver ställas för de olika tjänsterna för att på bästa möjliga sätt kunna genomföra operationerna? Typiska användarkrav är kvalitet, kapacitet, täckning/räckvidd, störskydd, smygförmåga, fördröjning. Användarkraven är naturligtvis starkt beroende av i vilken tillämpning som tjänsten används. I teorin borde inte användarkraven vara beroende av vilka kommunikationslösningar som finns till förfogande men i praktiken finns det sannolikt en stark koppling mellan krav och teknik. Många av kraven sammanfaller för flera olika tjänster, till exempel kraven på kryptering och prioritering. I arbetet har användarkraven belysts från de tre olika systemförslagen, dedicerad länk (länk 16/Common Data Link), ett cellulärt mobiltelefonisystem enligt LTE-standarden och ett ad hoc-nät. De tre typsystemen motsvarar olika tillämpningar och användningsområden samt olika sätt att lösa infrastrukturen.

Värderingen i studien har huvudsakligen varit inriktad på systemens förmåga att överföra data utifrån den teknik som används för radiogränssnittet. Användarna prioriterar bland annat behovet av talkommunikation tillsammans med tjänster för positionering, geografiska data och igenkänning. Detta leder till krav på högre dataakter (dock ej extrema) samt krav på att talfunktionen finns kvar. Dessutom återkommer kravet på robusthet (bland annat trafikskydd och textskydd) i de militära tillämpningarna. Här behövs också ofta längre räckvidder för radionoder eftersom infrastrukturen är glesare. Detta kan till del lösas genom att lägre frekvensområden används. Militära system har traditionellt sett arbetat på andra frekvenser än de civila. I och med utvecklingen av de civila systemen och behovet av att överföra större datamängder så har intresset för de högre frekvenserna även för militärt bruk ökat. Det är av stort intresse att studera hur de civila tekniklösningarna kan kopplas till militära förutsättningar och hur de kan fungera på de traditionella militära frekvenserna.

De tekniska innovationer som ligger närmast i utvecklingen för att öka datahastigheten är bland annat adaptiva radiofunktioner som anpassas till kanalen och smarta antenner (MIMO). På lite längre sikt kan spektrumeffektiv radio vara av stort intresse. Vid sidan av cellulära system växer alternativa lösningar baserade på ad hoc nät fram men främst för mycket korta avstånd. En utmaning är att få tillräcklig kapacitet tillsammans med rimlig fördröjning i dessa nät.

6 Cross-layer design

Cross-layer design (lageröverskridande design) har rönt starkt intresse inom kommunikationsforskningen de senaste åren. Cross-layer design innebär att man samtidigt optimerar funktioner i flera ”lager” i ett kommunikationssystem med avseende på en kritisk dimensionerande resurs, till exempel nätkapacitet eller batterilivslängd. Cross-layer design kan leda till stora prestandavinster men även medföra en begränsning i modulariteten.

Moderna kommunikationssystem är komplexa och för att hantera komplexiteten är de oftast organiserade i lagerindelade protokollstackar. Lagerindeld design, i idealfallet med noggrant beskrivna funktioner och gränssnitt, strukturerar uppbyggnaden av system, och ger överblickbar uppbyggnad och modularitet. Nackdelar med strikt lagerindelning är ineffektivt resursutnyttjande och risk för ökad overhead om funktioner dupliceras i flera lager.

En aktivitet genomfördes inom FoT-projekten *Telekommunikationer för strid i urban miljö* (TURBAN) och *Tjänstekvalitet i ad hoc-nät* (TAN) med syfte att inventera pågående forskning om cross-layer design för kommunikationssystem. Resultatet återfinns i rapporten ”Cross-layer design i kommunikationssystem - en översikt” [9]. I rapporten görs en genomgång av lagerindeld design och lageröverskridande design motiveras. Olika sätt att ”definiera” och karaktärisera cross-layer design diskuteras och några exempel ges. Möjliga arkitekturer för cross-layer design presenteras och områden och forskningsfrågor av intresse för FOI/FM/FMV diskuteras. Slutsatser och detaljerade diskussioner av tekniska aspekter i några tillämpningar presenteras.

En stark drivkraft för cross-layer design är att komma till rätta med ineffektivt resursutnyttjande. En tillämpning är batteridrivna sensornät där cross-layer design kan reducera energiåtgången och därigenom öka livslängden. I mobila radionät kan cross-layer design göra systemet ”effektivare” genom att öka den andel av kommunikationskapaciteten som kan användas för användartjänster.

I litteraturen ”definieras” cross-layer design ofta som en avvikelse från en välstrukturerad referensmodell därför att en implementation enligt gängse referensmodell är alltför ineffektiv med avseende på en kritisk, dimensionerande resurs. Huruvida någonting överhuvudtaget är cross-layer design beror alltså på vilken referensmodell man utgår ifrån. Vidare optimerar man med avseende på en kritisk resurs till priset av reducerad modularitet varför vinsten som görs genom cross-layer design bör vara signifikant. Om cross-layer design är motiverat beror alltså på tillämningen och systemets tänkta livslängd.

Vi anser att cross-layer design kan övervägas när

- det finns en identifierad systemkritisk dimensionerande resurs.

- det går att avgränsa det system som optimeras eftersom modulariteten förloras.
- man är beredd att genomföra en förutsättningslös optimering av systemet.
- man kan analysera hur den föreslagna cross-layer-lösningen påverkar andra delar av systemet, vidareutveckling och samexistens med andra funktioner.

Det kan förefalla som det finns en inbyggd motsättning mellan effektivt resursutnyttjande och struktur/modularitet. Vi menar att det är viktigt att ta fasta på det förhållningssätt som termen cross-layer design, eller lageröverskridande design, i sig indikerar - det gäller att göra vinster genom samordning över lagergränser, inte att helt ta bort lagren.

Vi föreslår en definition enligt följande: *Cross-layer design är när man avviker från en specifik referensmodell, genom extra informationsflöde eller på annat sätt, i syfte att optimera prestanda med hänsyn till en specificerad kritisk resurs för ett väl avgränsat system.*

Vi konstaterar att de gängse referensmodellerna inte tar hänsyn till radions rundstrålade egenskaper varför det kanske är fundamentalt fel att försöka tillämpa referensmodeller från den trådbundna världen på radio(nät)? Det som behövs är i så fall en helt ny radioreferensmodell som tar hänsyn till utbredningsegenskaper och behov av flexibilitet i radionära signalbehandling men ändå ger tillräcklig struktur för modularitet.

Den forskning som beskrivs i den vetenskapliga litteraturen kan grovt delas in i tre tillämpningsområden; sensornät, mobila (taktiska) kommunikationsnät och mobiltelefonisystem. Även om det finns ett stort antal cross-layer-förslag i litteraturen är det inte klart vilka som är viktigast och mest relevanta. För att kunna identifiera de viktigaste förslagen måste effekten av cross-layer-förslagen utvärderas genom en grundlig analys av prestandaförbättringar vägt mot ökade "kostnader" i form av ökad komplexitet, minskad modularitet, etc. I rapporten identifierar vi dels "civila" områden som är relevanta för försvarssektorn att bevaka och vidareutveckla, och dels identifierar vi forskningsområden som är militärspecifika där FOI har en unik roll att fylla i det att utvecklingen inte drivs av civila aktörer.

7 OFDM-signalering

Ett av målen för projektet är att föreslå lämpliga kommunikationstekniker för operationer i stadsmiljö. En aktivitet i projektet har undersökt system baserade på Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) som en potentiell kandidat för att åstadkomma hög dataakt. Några exempel på kommunikationssystem som använder OFDM för hög dataakt är Digital Audio Broadcasting (DAB), marksänd digital-TV (DVB-T) och IEEE 802.11 WLAN.

Om man kombinerar OFDM med adaptiv kodning och modulation får man ett kommunikationssystem som kan anpassa sig till varierande kanalförhållanden och användarbehov över ett stort spann av SNR-värden (signal-till-brusförhållande, signal-to-noise ratio). Genom att välja lämplig sändningstakt, en kombination av kodning och modulation, kan man få antingen kommunikation med hög dataakt eller robust kommunikation.

För att man skall kunna dra nytta av den adaptiva förmågan måste information om kanalförhållanden (och användarbehov) återkopplas från mottagare till sändare. I ett system där fram- och backlänk delar på kommunikationsresurser leder en ökning av återkopplingsinformationen till en reduktion av nyttokapaciteten och systemprestanda kan minska.

I den denna aktivitet har vi undersökt hur antalet och valet av tillgängliga sändningstakter i det adaptiva kod- och modulationssystemet påverkar kommunikationsprestanda och kravet på återkoppling. Baserat på analys och simuleringar föreslår vi designregler för kodning och modulationsparametrar i OFDM-system. Resultatet av arbetet har publicerats i dels en FOI-rapport [7] och dels presenterats på Milcom 2008 [10].

I det här arbetet har vi betraktat en seriellt sammanlänkad kod (seriell ”turbo-kod”) med sju möjliga dataakter i kombination med sex olika signalkonstellationer. Av de 42 möjliga kombinationerna ger några kombinationer samma kanaldataakt men kräver olika SNR för att nå en viss felsannolikhet. I de fallen väljs de kombinationer som kräver lägst SNR för en given dataakt. Andra kombinationer ligger tätt både med avseende på dataakt och SNR och då väljs inte alla kombinationer. Av de ursprungliga 42 kombinationerna behåller vi ungefär hälften.

Ett stort antal kombinationer ger oss möjlighet att välja kombinationer noggrant baserat på kanalens momentana utseende. Vi kommer därigenom närmare den teoretiska prestandagränsen och kan bättre uppfylla användarkraven på dataakt och felsannolikhet men det kräver mer återkoppling. Eftersom kanalen är en delad resurs mellan fram- och backlänk medför ökad återkoppling i backlänken mindre utrymme för information i framlänken. Vi vill finna en avvägning som ger goda prestanda med avseende på felsannolikhet och dataakt och sam-

tidigt minimerar behovet av återkoppling.

Vi undersökte grupper om 4, 8, 16 och 23 takter och simulerade deras prestanda över en fädande radiokanal. Vi undersökte dessutom tre olika utformningar av taktgrupper med 8 takter; övervägande låga takter, jämnt spridda takter och övervägande höga takter. Detaljerade beskrivningar av system och resultat återfinns i [7, 10].

Vi sammanfattar undersökningen av hur antalet och valet av transmissions-takter påverkar prestanda och verkningsgrad i ett antal designregler:

- Den lägsta tillgängliga transmissionstakten avgör det lägsta SNR vid vilket vi överhuvudtaget kan överföra information (får nollskild datatakt).
- Den högsta tillgängliga transmissionstakten avgör maximal överförings-takt vid höga SNR.
- Utöver lägsta och högsta takt avgör upplösningen (skillnaden mellan transmissions-takter) hur nära de teoretiska prestandagränserna som ett system kan operera.
- Ungefärligen lika avstånd mellan transmissions-takter ger bäst prestanda i det ”aktiva” SNR-området¹.
- Det finns en punkt då det inte längre är motiverat att öka antalet tillgängliga transmissions-takter på grund av den ökade mängden återkopplings-information som krävs.

I korthet, ett litet antal tillgängliga transmissions-takter, 4 – 8, valda så att motsvarande minsta nödvändiga SNR är jämt fördelat över det aktiva området, ger signifikanta prestandaförbättringar jämfört med ett system med endast en transmissions-takt. Ytterligare antal transmissions-takter ger endast marginella prestandavinster eller rent av prestandaminskningar på grund av ökad mängd återkopplings-information.

I framtida arbete kommer vi att undersöka olika kodstrukturer för att minimera komplexiteten i sändare och mottagare samt undersöka hur pilottoner påverkar prestanda.

¹Det aktiva SNR-området är området mellan det SNR som krävs för sändning med den lägsta transmissions-takten och det SNR som krävs för sändning med den högsta transmissions-takten.

8 Mjukvaruradiobaserad MIMO-demonstrator

Ett av projektets mål har varit att i en praktisk demonstration visa nyttan med MIMO-teknik för försvarsmakten, i form av antingen ökad kapacitet eller minskad störkänslighet i ett mobilt kommunikationssystem. Det är också önskvärt att radion är en mjukvaruradio med strukturerad mjukvara för att visa nyttan med mjukvarudefinierad radio. För att nå målet genomfördes under 2007 ett examensarbete med syfte att bygga upp en MIMO-demonstrator [11]. För att visa fördelarna implementerades ett SIMO-system med spatiell diversitet i mottagaren. Implementationen visar att bitfelshalten reduceras till en tredjedel jämfört med en SISO-mottagare.

En mjukvaruradio (Software Defined Radio, SDR) är en radio vars egenskaper (vågformen) till största delen är definierad¹ i mjukvara och vars beteende på det fysiska lagret kan ändras substantiellt genom mjukvara. I en mjukvaruradio strävar man efter att öka flexibiliteten genom att göra hårdvaruproblem till mjukvaruproblem – det räcker med att byta ut mjukvaran för att åstadkomma ändringar i funktionalitet eller uppgraderingar. Varje mjukvaruradio kräver någon RF-hårdvara för att hantera den radionära signalbehandlingen och konvertering mellan analoga och digitala domäner.

För att minimera investeringskostnaderna i utvecklingen av MIMO-demonstratorn har vi valt att använda GNU Radio tillsammans med Universal Software Radio Peripheral (USRP).

GNU Radio är ett fritt tillgängligt mjukvarupaket med komponenter/verktyg för att bygga en mjukvaruradio. I GNU Radio-paketet finns ett antal färdiga signalbehandlingsblock skrivna i C++. Vågformen skapas sedan genom att blocken knyts samman till en flödesgraf med ett Python-script. GNU Radio är inte uppbyggd enligt Software Communication Architecture (SCA).

Universal Software Radio Peripheral (USRP) är en RF-hårdvara tillverkad för att köras tillsammans med GNU Radio-programvara, men den kan även användas tillsammans med LabView, Matlab/Simulink, OSSIE, eller en annan mjukvara. För att hantera avvägningarna mellan generalitet, prestanda och pris består USRP av ett moderkort för datakommunikation och AD/DA-omvandling som kombineras med dotterkort beroende på frekvensområde och uppgift (sändning, mottagning eller båda).

Fysiskt består demonstratorn av två datorer med tillhörande USRP-modul, en som används som sändare och en som mottagare. Demonstrationer av systemet har genomförts på kunddagars och teknksamordningsdagar. Utöver de-

¹Definierad, inte nödvändigtvis implementerad

monstrationer har även vissa mätningar av systemets radioparametrar genomförts och resultatet av dessa mätningar presenterades på en konferens för RF-mätteknik [12].

Det finns en avsikt att vidareutveckla demonstratormiljön att ingå i en sammansatt demonstration av länk- och nättekniker [13]. Demonstratorn ger möjlighet att utveckla och prova egna signalbehandlingsalgoritmer i verklig miljö och den kan nyttiggöras i flera andra projekt, exempelvis för signalmiljömätningar, dynamisk spektrumaccess och positionering.

9 Sensorer i urban miljö

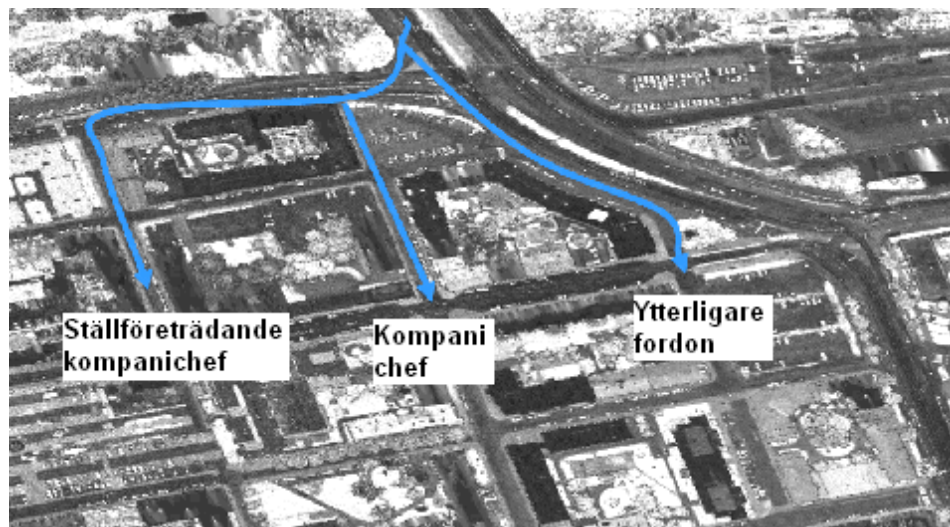
Militära insatser i urban miljö innebär många svårhanterliga situationer på grund av miljön. Avstånden mellan olika grupperingar kan vara mycket korta. Skådeplatsen är 3-dimensionell där en fiende kan befinna sig under jord, i gatuplan, inomhus eller på hustak. På grund av de korta avstånden, den besvärliga terrängen och problemet med lägesbilden kan situationen snabbt förändras. Projektet har studerat ett fall där ett kombinerat sensor- och kommunikationssystem skulle kunna bidra till lägesuppfattningen under reträtt och framför allt registrera förändringar i reträttvägen för de fall då den är densamma som anfalls- eller patrulleringsvägen [14].

9.1 Scenario

Vi tänker oss ett litet scenario där vi har tillgång till en del av ett kompani och terrängen är sådan att man väljer att göra en uppsutten framryckning på tre parallella gator se figur 9.1. Information om anfallsvägens utseende sprids mellan fordonen, där fordonet på vägen i mitten fungerar som en sambandscentral. Det innebär att all information sänds till sambandscentralen som sedan sprider den vidare till övriga berörda fordon. Vid en eventuell reträtt så finns omvärldsinformation även om man själv inte använder den framryckningsvägen.

9.2 Sensorteknik

Fordonen har utrustats med system som karterar framryckningsvägen, det vill säga vi samlar in information om utseendet längs vägarna. Syftet med karteringen är att upptäcka förändringar längs vägen vid en eventuell reträtt. För att kunna knyta sensorinformationen till punkter på en karta behöver all data geolokaliseras. Detta görs med hjälp av sensorer som registrerar position och orientering av de bildalstrande sensorerna. Syftet med studien var att beräkna om det är möjligt att trådlöst överföra den datamängd som skapas vid karteringen. Vi använder en IR-kamera (värmekamera) med våglängdsområdet 8-12 μ m för mörkerkapacitetens skull. Objekten som skall detekteras har en storlek av minst 1 dm². Trafiklasten per meter framryckning med en hastighet av 10 m/s blir då 17,4 Mbit/s. Vi använder datakomprimering och antar att vi kan komprimera datamängden med 75 %, vilket skulle ge ett kapacitetsbehov av ungefär 4,5 Mbit/s.



Figur 9.1: Framryckning i bebyggelse sker i allmänhet på flera tåter längs parallella gator. I vårt scenario delar fordonen upp sig på tre parallella gator där Kompanichefen tar den mittersta vägen med andra fordon på var sida om sig.

9.3 Trådlös sensorkommunikation

För att ett sensorsystem skall kunna förmedla informationen ansluter vi det till en trådlös kommunikationslänk. Av befintliga standarder för mobil kommunikation har vi valt att använda IEEE 802.16e, även kallad Mobile WiMAX. Vi väljer ett WiMAX-system med frekvensen 2,5 GHz, en bandbredd på 10 MHz och med felrättande kod typ 64-QAM med 3/4 CTC kodtakt vilket ger en rå överföringshastighet på 28,51 Mbit/s i nerlänk och 21,17 Mbit/s i upplänk. I ett reellt fall kan vi inte på långa vägar nå upp till en sådan datatakt utan vi får kanske räkna med maximalt halva kapaciteten. Eftersom vi trots den begränsningen ligger över våra kapacitetskrav skulle systemet kunna fungera.

En enkel länkbudgetberäkning med realistiska värden för kommunikationssystemet ger att den högsta tillåtna länkdämpningen blir ungefär 100 dB. Med hjälp av vågutbredningsmodellen COST 231 - Walfisch-Ikegami beräknades de länkdämpningarna i scenariot och resulterade i länkdämpningar mellan 90 och 100 dB. Slutsatsen är sålunda att räckvidden för systemet skulle kunna vara tillräcklig, även om marginalen inte är så stor.

10 Kanalmodeller för urban miljö

För att värdera och planera kommunikationsmöjligheterna för ett radiosystem i stadsmiljö behöver vi kunna uppskatta radiotäckningen i miljön. Utvecklingen av civila mobiltelefonsystem har drivit på utvecklingen av ett antal kanalmodeller som kan användas för att uppskatta radiotäckning över ytan. Vi har sammanfattat några av de, för mobiltelefoniberäkningar, mest använda kanalmodellerna. Syftet var att samla kanalmodellerna och att ge en bild av i vilket sammanhang de är avsedda att användas. Rapporten redovisar några empiriska, semideterministiska, deterministiska och stokastiska modeller [15].

10.1 Empiriska modeller

Empiriska modeller, bygger på statistik från ett antal mätningar. De är enkla att använda och har en relativt god noggrannhet, under förutsättning att empiriskt underlag finns från samma typ av utbredningsmiljö som den vi vill studera.

10.1.1 Okumura-Hata modellen

Okumura-Hata modellen är en empirisk modell för makroceller. Det innebär att modellen inte kan användas för cellradier under 1 km. Modellen är utvecklad från vågutbredningsmätningar på frekvensområdena 150, 450 och 900 MHz i Tokyo 1968. Modellen beräknar transmissionsförlusten för olika miljöer och har ett giltighetsområde på 150 MHz - 1500 MHz.

10.1.2 COST 231 - Hata modellen

COST 231 Hata modellen är en anpassning av Okumura-Hata modellen till europeiska städer. Frekvensområdet har flyttats uppåt till 1500 - 2000 MHz. Modellen är avsedd att användas för situationer där basstationen är placerad över takhöjd på intilliggande byggnader. Noggrannheten beror till stor del på miljön, d.v.s. utseendet på staden. En fördel är dock att det är möjligt att lägga till ett antal korrektionsfaktorer och på så sätt göra modellen giltig för mer eller mindre godtyckligt område.

10.2 Deterministiska modeller

Deterministiska modeller bygger på elektromagnetisk vågutbredningsteori. Terrängen och byggnader beskrivs med hjälp av kart- och byggnadsdatabaser. De flesta deterministiska modeller bygger på så kallad ray tracing-teknik. Styrkan med dessa modeller är att vi inte behöver känna till vågutbredningsförhållandena för någon liknande typ av miljö för att genomföra våra beräkningar. Svagheten är att det krävs en noggrann beskrivning av geometrin för att ge rimliga resultat.

10.2.1 GTD

Geometrical Theory of Diffraction (GTD) är en deterministisk modell som ofta används i bebyggda områden. Modellen klarar av att hantera flervägsutbredning i tre dimensioner samt bakåtspridning.

10.3 Semideterministiska modeller

Semiempiriska eller semideterministiska modeller är en blandning av empiriska och deterministiska modeller. Modellerna innehåller vissa beräkningar med deterministiska modeller, men resultaten justeras med korrektionsfaktorer framtagna ur mätdata för liknande miljöer.

10.3.1 Walfisch - Bertoni modellen

Denna semiempiriska makrocellmodell är framtagen för homogena stads- och förortsmiljöer. Beräkningsmodellen är härledd från en ideal modell av en stadsmiljö där byggnader är placerade i fina rutmönster med enhetlig höjd och bredd separerade av raka parallella gator. Modellen är avsedd för scenarion utan fri sikt mellan basstation och mottagarantenn. Modellen förutsätter att sändarantennen är placerad ovanför takhöjd.

10.3.2 COST 231 - Walfisch-Ikegami modellen

Denna semideterministiska makromodell baserar sig på Walfisch-Bertoni och Ikegami modellerna. Till skillnad från Walfisch-Bertoni modellen så har denna modell inga restriktioner beträffande sändarantennens placering i förhållande

till omgivande hustak. Modellen skiljer mellan fri sikt scenario (LOS) och icke fri sikt scenario (NLOS) mellan basstationen och mottagaren.

10.4 Stokastiska modeller

Stokastiska kanalmodeller är en typ av modell som använder flera statistiska mått som tagits fram för att beskriva radiokanalens egenskaper. De framtagna måtten används sedan till att ge kanalmodellen samma karaktäristiska egenskaper som den verkliga kanalen antas ha. Nedanstående modeller bygger både på stokastiska och empiriska delar.

10.4.1 COST 259

Modellen är en kanalmodell för mobil radiokommunikation som kan ta hänsyn till riktninginformation hos de infallande signalkomponenterna. Därigenom kan modellen användas för simulering av system med adaptiva (även kallade smarta") antenner. Modellen är specificerad för 13 olika typer av miljöer för makro-, mikro- och pikocellscenarion. Ett av designkriterierna för modellen var att simultant beskriva de flesta av de relevanta kanalparametrarna och att modellera de inbördes beroendena mellan dessa parametrar på ett korrekt sätt. Det giltiga frekvensområdet för modellen är 800 - 2000 MHz för utomhusmiljöer och 800 - 5000 MHz för inomhusmiljöer.

10.4.2 COST 273 MIMO

Kanalmodellen är en utveckling av samma geometribaserade modellkoncept som COST 259-modellen är grundad på. Målsättning vid framtagningen av den nya modellen var att den skall kunna generera realiseringar av radiokanalen som kan användas för att utveckla och validera radiosystem som använder MIMO-teknik. Vad som tillkommit modellmässigt är framförallt att multipla interaktioner med spridningsobjekt modelleras, samt att relationen mellan signalbidragens utgående riktningar på sändarsidan och de motsvarande inkommande riktningarna vid mottagaren modelleras på ett relevant sätt. Någon fullständig implementering av COST273-modellen finns för närvarande inte publikt tillgänglig, men ett utkast till en implementering har gjorts tillgänglig för deltagare i COST 2100 för utvärdering.

FOI-R--2643--SE

11 Gemensamt demoprojekt

Projektet medverkat i ett gemensamt demoprojekt med syfte att dels genomföra en samlad demonstration av resultat från flera forskningsprojekt och dels värdera dessa med avseende på nyttan för FM ledningssystem.

Demonstrationen genomfördes vid FM UtvC i Enköping för en utvald skara representanter från FM och FMV. Även representanter från polis och räddningstjänst var inbjudna. Projektresultaten kommer att värderas med avseende på FM behov av ny ledningsteknik och ny ledningsmetodik i den framtida insatsorganisationen. Nyttan för FM ligger i en, jämfört med tidigare, vidare spridning av forskningsresultat inom den egna organisationen, bland annat för att underlätta den rullande materiellplaneringen. Detta gäller också för utveckling av ledningsdoktrin.

Demonstrationen bands samman av ett gemensamt scenario som är en del av Bogalands-scenariot. I scenariot är det två fraktioner av befolkningen som står mot varandra och uppgiften är att övervaka staden. Man misstänker bland annat att narkotikasmuggling förekommer och att oroligheterna kan komma att eskalera.

Detta projekt bidrar tillsammans med projektet *Tjänstekvalitet i ad hocnät* med att visa på kommunikationens möjligheter och begränsningar. I scenariot visas tre olika kommunikationssystem, ett enkelt kommunikationssystem, ett flerhoppsnät och ett flerhoppsnät med MIMO. Demonstrationen visade hur förbundenheten ökar i nätet med flerhopp och därigenom att kommunikationerna förbättras. MIMO ökar kapaciteten på länkarna och bidrar till ytterligare ökad prestanda. Kvaliteten på kommunikationen visas i form av en videosekvens som överförs mellan enheter i nätet. En längre beskrivning finns i [16].

De projekt som bidrog till den gemensamma demonstrationen var "Situations- och hotanalys för BG2011", "Koncept, metodik och verktyg för effektbaserad ledning", "Tjänstekvalitet i ad hocnät (TAN)", "Telekommunikationer för strid i urban miljö (Turban)", "Sensorsystem för urban miljö (SUM)", "Sensorsystem för markläge (SEMARK)" och "Utläggbara system för marin övervakning".

Demonstrationerna ägde rum i Enköping under vecka 47 och totalt deltog 30-40 personer från försvarsmakten, FMV och FOI. Erfarenheterna och åsikterna från demonstrationerna sammanfattas i en rapport [16] för det gemensamma demo-projektet.

FOI-R--2643--SE

12 Samarbeten

12.1 COST

COST är ett nätverk för europeiskt samarbete inom vetenskaplig och teknisk forskning som varit aktivt sedan 1971. Det är organiserat i olika tekniska och vetenskapliga områden och målet är att säkerställa Europas starka position inom teknisk och vetenskaplig forskning för fredliga syften.

COST är indelat i i grupper (Actions). Grupperna kan ses som nätverk med samordnade nationella forskningsprojekt inom områden som är intressanta för deltagarna från COST och icke-COST länder. Grupperna definieras av ett "Memorandum of Understanding (MoU)" som undertecknas av de länder som vill vara med i gruppen.

Projektet har deltagit i COST2100 som är gruppen för "Pervasive Mobile & Ambient Wireless Communications" och tillhör området ICT (Information and Communication Technologies). COST 2100 handlar om tekniker under utveckling inom mobil och trådlös kommunikation.

COST2100 är i sin tur indelat i tre arbetsgrupper, transmissionstekniker och signalbehandling, radiokanalen och radionätsaspekter. Dessa arbetsgrupper är i sin tur indelade i undergrupper som fokuserar på speciella frågor. Vanligtvis hålls tre möten per år där olika nya forskningsresultat kan presenteras och diskuteras. Projektet har framförallt varit aktivt inom arbetsgruppen radiokanalen. Exempel på frågor som behandlas är kanalmodellering för snabbare simuleringar eller högre noggrannhet, avancerade tekniker för MIMO-kanalsondering och mätning och avancerad analys av den dubbelriktade kanalen för att utvinna viktiga parametrar.

En kanalmodell har utvecklats inom tidigare COST samarbete (COST 273). Kanalmodellen håller på att färdigställas inom pågående samarbete genom mätkampanjer för att extrahera parametrar och validering av modellen. En kanalmodell för MIMO-system är viktig för att kunna genomföra simuleringar av prestanda för MIMO-system. Det är viktigt att kanalmodellen är realistisk så att simuleringar visar hur ett system kommer att fungera i den verkliga miljön. Det är därför viktigt med mätkampanjer för att kunna sätta värden på ingående parametrar och för att ha material att jämföra modellen med.

FOI har genom sina mätningar på frekvensområdet området 300 MHz bidragit till att modellen är användbar även för dessa frekvenser.

12.2 WINTSEC

Projektet har även medfinansierat projektet Wireless Interoperability for Security in Europe (WINTSEC) inom ramen för EU PASR 2006. WINTSEC studerar interoperabilitetsfrågor, bedriver forskning och genomför demonstrationer av SDR och nya funktionaliteter med fokus på civil samhällssäkerhet (blåljusmyndigheter) och kommersiella aktörer.

Inom TURBAN studeras kommunikationsbehov vid internationella militära insatser. Genom WINTSEC har Turban även fått insikt i kommunikationsbehov för civil samhällssäkerhet vilket är användbart vid samhällsuppbyggande insatser. De militära och civila aspekterna kompletterar därför varandra. Framtida militära kommunikationssystem kommer att vara baserade på mjukvaru-definerad radio (software defined radio, SDR). Vidare finns det en önskan att anskaffa kommersiell hyllvara. Genom deltagande i WINTSEC deltar FOI aktivt i utvecklingen av europeisk SDR vilket direkt och indirekt kan komma försvarsmakten till nytta.

12.3 Avtalsbundna samarbeten med UoH

12.3.1 Samverkan med Lunds Universitet

Samverkan har skett med Lunds Universitet och kommunikationsgruppen vid institutionen för elektro- och informationsteknik, framförallt med professor Andreas Molisch och universitetslektor Fredrik Tufvesson. Samarbetet har skett genom att FOI har nyttjanderätt till mätsystemet LUND-RUSK vilket tidigare köpts från företaget Medav. FOI har även en doktorand som är inskriven vid Lunds universitet och som bedrivit sin forskning inom projektets ram. FOI och Lunds universitet har även samarbetat vid flera mätkampanjer och vid analyser av dem vilka resulterat i artiklar och konferensbidrag.

12.3.2 Samverkan med Radiocentrum vid HiG

Samverkan sker med Radiocentrum vid Högskolan i Gävle (HiG) via en adjungerad professur. Samverkan sker med ett forskningsprojekt på HiG som är inriktat på radiokommunikation i elektromagnetiskt störda miljöer. Både inomhus- och utomhusmiljöer innefattas. Den militära nyttan av detta civila forskningsprojekt exploateras och via samverkan får projektet tillgång till ett industri nätverk innefattande Åkerströms, Syntronic AB, Agilent Technologies, SSAB, STORA ENSO samt Green Cargo.

12.3.3 Samverkan med Chalmers

Projektet har finansierat en doktorand inskriven vid Chalmers. Arbetet resulterade i en doktorsavhandling [17] våren 2007. Samarbetet har skett med institutionen Signaler och system och professor Arne Svensson.

FOI-R--2643--SE

13 Förslag till teknisk lösning

Ett av målen med projektet har varit att ge förslag på en teknisk lösning för taktisk kommunikation i stadsmiljö.

13.1 Frekvensområde

För taktisk kommunikation är räckvidd en viktig egenskap, därför är det attraktivt att använda låga frekvenser. Samtidigt blir den bandbredd som ett kommunikationssystem kan använda mindre för låga frekvenser. En lämplig kompromiss kan vara frekvenser i övre VHF- eller lägre UHF-bandet. Runt dessa frekvenser är vågutbredningen fördelaktig eftersom den ganska stora våglängden gör att radiovågorna i viss utsträckning kan diffraktera runt hinder. Något som kan vara viktigt i miljöer utan fri sikt mellan sändare och mottagare, en situation som är vanlig i stadsmiljö. Samtidigt är frekvensen tillräckligt hög för att flerantennsystem ska kunna placeras ut på enheter, i alla fall på fordon. I det här projektet har frekvenser kring 300 MHz studerats, vilket ligger inom det militära UHF-området och kan vara ett lämpligt val.

13.2 Adaptivitet

I stadsmiljön förändras förutsättningarna för ett kommunikationssystem snabbt, exempelvis då en gatukorsning passeras. Därför är det viktigt med ett adaptivt system som kan adaptera mot kanalen men även mot användarens krav.

Adaption kan ske på en mängd olika nivåer. För att kunna utnyttja variationerna i mottagen signalnivå kan adaptiv modulation och kodning användas. Valet av kombination av modulation och kodning kan då användas för att få så hög datatakt som möjligt i vald situation. Valet av kodning kan också användas för olika nivåer av robusthet.

Ett flerantennsystem kan användas för olika syften, robusthet, kapacitet eller räckvidd. Samtidigt är olika tekniker som diversitet, lobformning eller spatiell multiplexering användbara i olika miljöer och för olika syften. Spatiell multiplexering kräver att det finns flervägsutbredning för att kunna ge kapacitetsvinster. Lobformning fungerar istället bäst vid LOS och kan då ge långa räckvidder eller hög kapacitet. Det är därför viktigt att kunna använda den flerantennsteknik som ger bäst prestanda i varje situation.

13.3 OFDM

För att få hög datatakt vill man ha ett bredbandigt system. OFDM (Orthogonal frequency-division multiplexing) är en flexibel modulationsteknik som är väl lämpad för bredbandiga system. Genom att använda flera ortogonala underbärsvågor kan en stor bandbredd användas. Underbärsvågorna kan adapteras gemensamt eller i mindre grupper. Adaptiv modulation och kodning på underbärsvågorna kan användas för robusthet eller kapacitet beroende på kanalen och användarens krav.

13.4 MIMO-system

De MIMO-mätningar som genomförts vid 300 MHz visar att det finns stor potential för ett MIMO-system på dessa frekvenser. Stadsmiljön, men även många andra miljöer, med flervägsutbredning ger möjlighet till betydande kapacitetsökningar.

För frekvenser runt 300 MHz är våglängden ungefär 1 meter. Traditionellt sett designar man antensystem med en separation mellan elementen på en halv våglängd för att få oberoende signaler i de olika elementen. Detta är dock ingen absolut gräns utan det är möjligt att erhålla MIMO-vinster med betydligt mindre avstånd. För placering av antenner är det ändå lämpligt att försöka separera elementen. På ett fordon kan det vara lämpligt med 4-6 element.

Genom att utnyttja antenner med olika polarisation kan antalet antennelement på plattformar med begränsat utrymme ökas. Två antenner med olika polarisation behöver i princip ingen elementseparation för att verka som oberoende antenner. Detta ger möjlighet till åtminstone två antennelement även på de minsta plattformarna, till exempel på handhållna terminaler.

14 Sammanfattning

Projektet ”Telekommunikationer för operationer i urban miljö” har pågått under tre år, från 2006 till 2008. Syftet har varit att undersöka möjliga kommunikationslösningar för ett taktiskt kommunikationssystem i stadsmiljö.

Speciellt har MIMO-teknikens användbarhet på frekvenser runt 300 MHz undersökts. MIMO-teknik ger möjlighet till hög kapacitet i traditionellt sett besvärliga kommunikationsmiljöer som stadsmiljö. För att kunna påvisa möjliga kapacitetsvinster har MIMO-kanalmätningar genomförts och analyserats. Resultat från mätningarna i Linköping visar att möjlig kapacitet i snitt är 70 % av den teoretiskt möjliga kapaciteten för MIMO-system. Detta innebär att det är möjligt att få betydande kapacitetsvinster med ett MIMO-system.

Några systemaspekter hos kommunikationssystem har också undersökts, exempelvis hur separationen mellan antennelement påverkar kapaciteten i ett MIMO-system, hur adaptiv modulation och kodning bör designas för ett OFDM-system och vilka för- och nackdelar som finns vid cross-layer design.

En metod för att kunna analysera störningsmiljön vid radioplattformar har tagits fram. Arbetet har haft inflytande i standardiseringsarbetet i CISPR och mätmetoden är idag standardiserad och finns implementerad i nyare mätmottagare.

Tillsammans med militära användare har en studie av framtida krav på tjänster vid kommunikation i stadsmiljö genomförts. I studien undersöktes också vilka avancerade tekniker som är väsentligast för att uppnå dessa krav. Syftet var också att skapa en länk mellan användarbehov och möjliga tekniska lösningar.

En demonstrator har byggts i form av en mjukvaruradio med kommersiell hårdvara och mjukvara. Demonstratorn ger möjlighet att utveckla och prova egna signalbehandlingsalgoritmer i en verklig miljö.

14.1 Förslag fortsatta arbeten

Förutsättningarna för vinster med ett MIMO-system i stadsmiljö har visat sig mycket goda i mätningarna som genomförts i centrala Linköping. Även mätningarna på Universitetsområdet i Linköping pekade på relativt stora möjliga vinster för ett MIMO-system. Vinsterna i den senare miljön var större än förväntat då det inte finns så många byggnader som kunde bidra till flervägsutbredningen. Det visade sig dock att reflektioner från mindre trädgångar och andra objekt i omgivningen gav betydande bidrag till flervägsutbredningen. Dessa observationer gör att det vore intressant att även genomföra en mätkampanj i

icke-urban miljö, kanske främst skogsmiljö, för att undersöka vilka vinster man skulle kunna göra i denna miljö.

Den mätkampanj som genomförts i Malmö har inte blivit fullständigt analyserad och det vore naturligtvis intressant att analysera mätdata från denna kampanj. Dels för att byggnadshöjden i Malmö är betydligt högre än i Linköping, men framförallt för att de flesta av mätningarna i Malmö är gjorda för ett scenario med en nod i höjd med hustaken. Resultaten skulle sedan kunna jämföras med resultaten från Linköping för att se vilka skillnader som finns på grund av miljön och det annorlunda scenariot med en upphöjd sändare.

Det vore även intressant att genomföra mätningar tillsammans med Lunds Universitet på både 300 MHz, 2 GHz och 5 GHz. Detta för att kunna se hur frekvensvalet påverkar resultatet vid mätningar i samma situation.

I det här projektet har det undersökts hur förutsättningarna för ett MIMO-system ser ut i en stadsmiljö. Då resultaten från mätkampanjerna visat på lovande resultat är nästa steg att undersöka hur adaptiva länkalgoritmer ska designas för att utnyttja dessa möjligheter på bästa sätt. Det är även av stor intresse att undersöka hur vinster med ett MIMO-system kan utnyttjas i ett taktiskt radionät.

Den demonstrator bestående av kommersiell hårdvara och mjukvara bör utvecklas för att i större omfattning kunna användas för att undersöka tekniker på länk- och möjligtvis nätnivå. Demonstratorn kan naturligtvis även användas för att demonstera forskningsresultat och fördelar med mjukvaruradio.

14.2 Projektets publikationer

Verksamheten inom projektet har resulterat i 14 rapporter, varav tre examensarbeten och en doktorsavhandling. Två vetenskapliga artiklar har publicerats, två bidrag har presenterats inom COST-samarbetet och 14 konferensbidrag har presenterats på vetenskapliga konferenser.

14.2.1 Rapporter

- Maria Asplund. Mjukvaruradiobaserad SIMO-demonstrator. Teknisk rapport FOI-R--2355--SE, Totalförsvarets Forskningsinstitut (FOI), Linköping, november 2007.
- Gunnar Eriksson, Peter Holm, Peter Johansson, Sara Linder och Kia Wiklundh. Peer-to-peer MIMO channel measurements at 300 MHz in

an urban environment. Vetenskaplig rapport FOI-R--2547--SE, Totalförsvarets Forskningsinstitut (FOI), Linköping, juni 2008.

- Gunnar Eriksson, Elisabeth Löfsved och Mikael Alexandersson. MIMO-mätningar på 300 MHz - mätsystem och analysmetoder. Metodrapport FOI-R--2070--SE, Totalförsvarets Forskningsinstitut (FOI), Linköping, september 2006.
- Karina Fors. Dynamisk simulering med hjälp av RPS-beräkningar för radiovågors utbredning i urban miljö. Metodrapport FOI-R--2226--SE, Totalförsvarets Forskningsinstitut (FOI), Linköping, 2006.
- Andreas Jonsson och Mikael Nyman. Stokastisk kanalmodell för MIMO-system i urban miljö. Teknisk rapport FOI-R--2011--SE, Totalförsvarets Forskningsinstitut (FOI), Linköping, 2006.
- Peter Stenumgaard. Potentiella tillämpningar av MIMO-resultat. FOI Memo 2368, Totalförsvarets Forskningsinstitut (FOI), Linköping, februari 2008.
- Hugo Tullberg. Cross-layer design i kommunikationssystem – en översikt. Teknisk rapport FOI-R--2069--SE, Totalförsvarets Forskningsinstitut (FOI), Linköping, oktober 2006.
- Hugo Tullberg. Kommunikationsdemonstrator 2008. FOI Memo 1841, Totalförsvarets Forskningsinstitut (FOI), Linköping, 2006.
- Hugo Tullberg, Kia Wiklundh och Gunnar Eriksson. Practical design aspects on OFDM and MIMO systems. Vetenskaplig rapport FOI-R--2318--SE, Totalförsvarets Forskningsinstitut (FOI), Linkö, december 2007.
- Åsa Waern och Gunnar Eriksson. Kanalmodeller för urban miljö. Metodrapport FOI-R--2581--SE, Totalförsvarets Forskningsinstitut (FOI), Linköping, 2008.
- Åsa Waern, Börje Asp, Peter Holm och Magnus Uppsäll. Sensorteknik och kommunikation i urban miljö – ett exempel. Metodrapport FOI-R--2124--SE, Totalförsvarets Forskningsinstitut (FOI), Linköping, 2007.
- Kia Wiklundh. An approach to using amplitude probability distribution of an interfering signal for emission requirements to protect digital radio receivers using error-correction codes. Rapport ISSN 1403-266x; nr R001/2007, Chalmers University of Technology, Göteborg, 2007. FOI-S--2572--SE.

- Kia Wiklundh. On the coding gain of convolutional codes with unquantized soft decision decoding in an impulsive interference environment. Rapport 1403-266x; nr R002/2007, Chalmers University of Technology, Göteborg, 2007. FOI-S--2573--SE.
- Kia Wiklundh. *A new approach for considering the interference impact on digital radio systems from complex interference environments*. Doktorsavhandling, Chalmers University of Technology, 2007. FOI-S--2326--SE.

14.2.2 Artiklar och konferensbidrag

- Nicolai Czink, Ruiyuan Tian, Shurjeel Wyne, Gunnar Eriksson, Thomas Zemen, Juha Ylitalo, Fredrik Tufvesson och Andreas F. Molisch. Cluster parameters for time-variant MIMO channel models. In *Proc. The Second European Conference on Antennas and Propagation, EuCAP 2007*, pages 1–8, Edinburgh, UK, november 2007.
- Nicolai Czink, Thomas Zemen, Ernst Bonek, Ruiyuan Tian, Shurjeel Wyne, Gunnar Eriksson, Fredrik Tufvesson, Andreas F. Molisch, Jukka-Pekka Nuutinen, and Juha Ylitalo. Tracking time-variant cluster parameters in MIMO channel measurements: Algorithm and results. COST 2100 TD(07)336, EURO-COST, Duisburg, Tyskland, September 2007.
- Gunnar Eriksson, Peter D. Holm, Sara Linder och Kia Wiklundh. Results from a MIMO channel measurement at 300 MHz in an urban environment. In *Proc. IST-083 Symp. on Military communications with a special focus on tactical communications for network centric operations*, pages 1–7, Prag, Tjeckien, april 2008. FOI-S--2857--SE.
- Gunnar Eriksson, Peter D. Holm, Sara Linder och Kia Wiklundh. Results from a MIMO channel measurement at 300 MHz in central Linköping. In *Proc. RVK08 /MMWP08*, pages 1–5, Växjö, Sverige, juni 2008. FOI-S--2897--SE.
- Gunnar Eriksson, Sara Linder, Kia Wiklundh, Peter D. Holm och Peter Johansson. Urban peer-to-peer MIMO channel measurements and analysis at 300 MHz. In *Proc. of Military Commun. Conf., MILCOM 2008*, San Diego, CA, USA, november 2008. IEEE.
- Gunnar Eriksson, Fredrik Tufvesson och Andreas F. Molisch. Potential for MIMO systems at 300 MHz — Measurements and analysis. In *Proc.*

Antenn 06, Linköping, Sverige, maj 2006.

- Gunnar Eriksson, Fredrik Tufvesson och Andreas F. Molisch. Propagation channel characteristics for peer-to-peer multiple antenna systems at 300 MHz. In *Proc. IEEE GLOBECOM 2006*, San Francisco, USA, November 2006.
- Gunnar Eriksson, Fredrik Tufvesson och Andreas F. Molisch. Characteristics of MIMO peer-to-peer propagation channels at 300 MHz. COST 2100 TD(07)376, EURO-COST, Duisburg, Tyskland, september 2007.
- Hugo M. Tullberg. Reduced-complexity woven serial concatenated TCM for tactical OFDM communications. In *Proc. of Military Commun. Conf., MILCOM 2008*, San Diego, CA, USA, november 2008. IEEE.
- Hugo M. Tullberg, Maria Asplund och Mikael Alexandersson. Spectral properties of an SDR using universal software radio peripheral. In *Proc. Conference on RF measurement technology for state of the art production and design (RFMTC)*, pages 1–5, Gävle, Sweden, september 2007. FOI-S--2635--SE.
- Kia Wiklundh. A possibility to use the APD for emission requirements to protect communication systems with error correction codes. In *Proc. EMC Europe 2006*, Barcelona, Spanien, september 2006. FOI-S--2330--SE.
- Kia Wiklundh. Relation between the amplitude probability distribution of an interfering signal and its impact on digital radio receivers. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 48(3):537–544, August 2006. FOI-S--2326--SE.
- Kia Wiklundh. An approach to derive emission requirements on APD in order to protect digital communication systems. In *E3 konferens och mässta 2007*, pages 1–3, Göteborg, Sverige, april 2007. FOI-S--2574--SE.
- Kia Wiklundh. A study on some modulation methods and forward error-correction codes in an interference environment typical for the LF band and communication with submarines. In *Proc. Nordic Shortwave Conference*, pages 831–838, Fårö, Sverige, augusti 2007. FOI-S--2629--SE.
- Kia Wiklundh och Gunnar Eriksson. A study of the capacity for different element spacing on compact MIMO platforms. In *Proc. PIMRC*

2008, 19th annual IEEE Int. Symp. on Personal indoor and mobile radio communication, pages 1–5, Cannes, Frankrike, september 2008. FOI-S--2927--SE.

- Shurjeel Wyne, Peter Almers, Gunnar Eriksson, Johan Karedal, Fredrik Tufvesson, och Andreas F. Molisch. Outdoor to indoor office MIMO measurements at 5.2 GHz. In *Proc. Vehicular Technology Conference, 2004. VTC2004-Fall*, pages 101–105, Los Angeles, USA, September 2004.
- Shurjeel Wyne, Andreas F. Molisch, Peter Almers, Gunnar Eriksson, Johan Karedal och Fredrik Tufvesson. Statistical evaluation of outdoor-to-indoor office MIMO measurements at 5.2 GHz. In *Proc. Vehicular Technology Conference, 2005. VTC 2005-Spring*, pages 146–150, Stockholm, Sverige, maj–juni 2005.
- Shurjeel Wyne, Andreas F. Molisch, Peter Almers, Gunnar Eriksson, Johan Karedal och Fredrik Tufvesson. Outdoor-to-indoor office mimo measurements and analysis at 5.2 GHz. *IEEE Transactions on vehicular technology*, 57(3):1374–1386, May 2008. FOI-S--2856--SE.

14.3 Övrig resultatöverföring

Till projektet har en referengrupp varit knuten med representanter från FM, FMV, Lunds Universitet och Ericsson. Varje år har ett referensgruppsmöte hållits där resultat från projektet presenterats och diskuterats och referensgruppen har haft möjlighet att påverka inriktningen av projektet.

Årligen genomförs teknksamordningsdagar mellan FMV och FOI inom radioområdet. Under de två senare åren av projektet har resultat från projektet presenterats på dessa teknksamordningsdagar.

Under 2007 genomfördes en studie om kommunikationsbehov för operationer i urban miljö i dialog med representanter från FM (MSS Skövde, MSS Kvarn, Hkpflj Malmslätt).

Under 2007 genomfördes även tre kunddagar tillsammans med de andra kommunikationsprojekten inom FoT Ledning. Kunddagarna var mycket uppskattade och besöktes av representanter från Försvarmakten (HKV, FMTM, LedR, MSS, mfl), FMV, FHS och FRA.

Referenser

- [1] R. S. Thomä, D. Hampicke, A. Richter, G. Sommerkorn, and U. Trautwein, "MIMO vector channel sounder measurement for smart antenna system evaluation," *European Transactions on Telecommunications*, vol. 12, no. 5, pp. 427–438, Sep. / Oct. 2001.
- [2] RUSK channel sounder — Measurement principle. [Online]. Available: <http://www.channelsounder.de/ruskchannelsounder.html>
- [3] M. Steinbauer, A. F. Molisch, and E. Bonek, "The double-directional radio channel," *IEEE Antennas Propag. Mag.*, vol. 43, no. 4, pp. 51–63, 2001.
- [4] B. H. Fleury, P. Jourdan, and A. Stucki, "High-resolution channel parameter estimation for MIMO applications using the SAGE algorithm," in *Proc. 2002 Int. Zurich Seminar on Broadband Communications—Access, Transmission, Networking*, ETH Zurich, Switzerland, Feb. 2002, pp. 30–1–30–9.
- [5] G. Eriksson, E. Löfsved, and M. Alexandersson, "Mimo-mätningar på 300 MHz - mätsystem och analysmetoder," FOI, Report (in Swedish) FOI-R--2070--SE, Sep. 2006.
- [6] G. Eriksson, P. Holm, P. Johansson, S. Linder, and K. Wiklundh, "Peer-to-peer MIMO channel measurements at 300 MHz in an urban environment," FOI, Scientific Report FOI-R--2547--SE, Jun. 2008.
- [7] H. Tullberg, K. Wiklundh, and G. Eriksson, "Practical design aspects on OFDM and MIMO systems," Totalförsvarets Forskningsinstitut (FOI), Linköping, Sweden, Vetenskaplig rapport FOI-R--2318--SE, ISSN 1650-1942, Dec. 2007.
- [8] P. Stenumgaard, "Potentiella tillämpningar av MIMO-resultat," FOI, Linköping, Sweden, Memo FOI Memo 2368, Feb. 2008, in Swedish.
- [9] H. Tullberg, "Cross-layer design i kommunikationssystem – en översikt," Swedish Defence Research Agency (FOI), Linköping, Sweden, Technical report FOA-R--2069--SE, ISSN 1650-1942, Oct. 2006, in Swedish.
- [10] H. M. Tullberg, "Reduced-complexity woven serial concatenated TCM for tactical OFDM communications," in *Proc. of Military Commun. Conf.* San Diego, CA, USA: IEEE, november 2008.
- [11] M. Asplund, "Mjukvaruradiobaserad SIMO-demonstrator," Totalförsvarets Forskningsinstitut (FOI), Linköping, Sweden, Teknisk rapport FOI-R--2355--SE, ISSN 1650-1942, november 2007.
- [12] H. Tullberg, M. Asplund, and M. Alexandersson, "Spectral properties of an SDR using universal software radio peripheral," in *Proc of RF Measurement Tech. Conf., RFMTC07*, Gävle, Sweden, september 2007.

- [13] H. Tullberg, "Kommunikationsdemonstrator 2008," Totalförsvarets Forskningsinstitut (FOI), Linköping, Sweden, FOI Memo 1841, 2006.
- [14] Å. Waern, B. Asp, P. Holm, and M. Uppsäll, "Sensorteknik och kommunikation i urban miljö – ett exempel," Totalförsvarets Forskningsinstitut (FOI), Linköping, Metodrapport FOI-R--2124--SE, 2007.
- [15] Å. Waern and G. Eriksson, "Kanalmodeller för urban miljö," Totalförsvarets Forskningsinstitut (FOI), Linköping, Metodrapport FOI-R--2581--SE, 2008.
- [16] T. Gundmark, E. Dalberg, P. Svenson, D. Lindgren, P. Grahm, S. Linder, A. Hansson, and B. Kylesten, "Ledningssystem - demonstration och värdering av teknik och metodik, slutrapport," FOI, Användarrapport FOI-R--2645--SE, Dec. 2008.
- [17] K. Wiklundh, "A new approach for considering the interference impact on digital radio systems from complex interference environments," PhD Thesis, Chalmers University of Technology, 2007, FOI-S--2326--SE.