

Åsa Waern, Bengt Lundborg, Elisabeth Löfsved, Gunnar
Eriksson, Johan Öhgren, Jouni Rantakokko, Magnus
Pettersson, Per Sakari



FOI är en huvudsakligen uppdragsfinansierad myndighet under Försvarsdepartementet. Kärnverksamheten är forskning, metod- och teknikutveckling till nytta för försvar och säkerhet. Organisationen har cirka 1350 anställda varav ungefär 950 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, bedömningen av olika typer av hot, system för ledning och hantering av kriser, skydd mot hantering av farliga ämnen, IT-säkerhet och nya sensorers möjligheter.



FOI
Totalförsvarets forskningsinstitut
Ledningssystem
Box 1165
581 11 Linköping

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

www.foi.se

Slutrapport för projekt KOMET

Utgivare FOI - Totalförsvarets forskningsinstitut Ledningssystem Box 1165 581 11 Linköping	Rapportnummer, ISRN FOI-R--1810--SE	Klassificering Användarrapport
	Forskningsområde 4. Ledning, informationsteknik och sensorer	
	Månad, år December 2005	Projektnummer E7063
	Delområde 41 Ledning med samband och telekom och IT-system	
	Delområde 2	
Författare/redaktör Åsa Waern Bengt Lundborg Elisabeth Löfsved Gunnar Eriksson Johan Öhgren Jouni Rantakokko	Projektledare Åsa Waern	
	Godkänd av Martin Rantzer	
	Uppdragsgivare/kundbeteckning Försvarsmakten, HKV	
	Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig Bengt Lundborg	
	Magnus Pettersson Per Sakari	
Rapportens titel Slutrapport för projekt KOMET		
Sammanfattning Radiokanalen är alltid en gränssättande faktor för trådlös kommunikation. Behovet av system med smygegenskaper liksom robusthet mot såväl aktiv störning som vågutbredningsfenomen är stort. Strider i bebyggelse, vilket innebär att soldater kommer att gå in i hus och krypa ner i kulvertar, ställer nya krav på förståelsen av en kommunikationslänk och dess begränsningar. I vissa situationer kan kanske fri optisk kommunikation vara mer fördelaktigt än radiokommunikation. Projekt KOMET, Kommunikationens egenskaper i tätort, har under åren 2003 – 2005 studerat radiovågutbredning i urban miljö. Beräkningar har utförts med hjälp av en kommersiell programvara och experimentell verksamhet med kanalmätningar har bedrivits bland annat tillsammans med Lunds universitet. Två typer av fri optisk kommunikation har studerats, kommunikation utan fri siktsträcka d.v.s. via väggreflexer och retrokommunikation. Urban krigföring har också studerats. Rapporten sammanfattar den verksamhet som bedrivits under åren och ger förslag på fortsatt verksamhet.		
Nyckelord urban miljö, vågutbredning, MIMO, modeller, urban krigföring		
Övriga bibliografiska uppgifter	Språk Svenska	
ISSN 1650-1942	Antal sidor: 50 s.	
Distribution enligt missiv	Pris: Enligt prislista	

Issuing organization FOI – Swedish Defence Research Agency Ledningssystem Box 1165 581 11 Linköping	Report number, ISRN FOI-R--1810--SE	Report type User report
	Programme Areas 4. C4ISTAR	
	Month year December 2005	Project no. E7063
	Subcategories 41 C4I	
	Subcategories 2	
Author/s (editor/s) Åsa Waern Bengt Lundborg Elisabeth Löfsved Gunnar Eriksson Johan Öhgren Jouni Rantakokko	Project manager Åsa Waern	
	Approved by Martin Rantzer	
	Sponsoring agency Armed Forces Headquarter, Sweden	
	Scientifically and technically responsible Bengt Lundborg	
	Report title (In translation) Final report of the project KOMET	
Abstract The radio channel sets limits for wireless communication systems. There is a substantial demand for systems with stealth capability and robustness to jamming as well as to difficult wave propagation conditions. Military operations in urban environment are in general conducted with dismounted soldiers, both outside and inside buildings, including below ground in basements and culverts. The situation puts new demands on our understanding of the communication links and their limitations. For some situations, free space optics may be a better choice than radio communication. During 2003 – 2005, the project KOMET, “The properties of the communication channel in urban environment”, has studied the radio wave propagation in urban environment. Calculations with a commercial software have been performed as well as channel measurements, some in collaboration with Lund University. Two different techniques of free space optics were studied, non-line-of-sight and retro communication. Urban warfare has also been studied. This report summarizes the work and proposes areas of further work.		
Keywords urban environment, wave propagation, MIMO, models		
Further bibliographic information	Language Swedish	
ISSN 1650-1942	Pages 50 p.	
	Price acc. to pricelist	

Innehåll	Sida
1 Inledning	6
1.1 Projekt mål och motiv	6
1.2 Aktiviteter	6
2 Urban krigföring.....	7
2.1 Kommunikation vid urban krigföring.....	9
3 Radiokommunikation.....	9
4 Radiovågutbredning	10
4.1 Vågutbredningsmodeller.....	14
5 Radio wave propagation simulator - RPS	15
6 Karakterisering av radiokanalen för MIMO-system	17
6.1 Syfte med mätningar av MIMO-kanalen	18
6.2 Introduktion till MIMO	18
6.2.1 Teoretiska kapacitetsvinster som kan uppnås med MIMO-tekniker	20
6.3 RUSK kanalsond.....	21
6.3.1 Funktionsbeskrivning.....	21
6.4 Modellering av MIMO-kanalen	22
6.4.1 Extrahering av kanalparametrar	23
6.5 Antenner.....	23
6.6 Resultat från kanalmätningar	25
6.6.1 Scenario.....	25
6.6.2 Överföringsfunktioner.....	27
6.6.3 Fördröjningsspektrum	28
6.6.4 Beräkning av kanalkapacitet.....	28
6.6.5 Diskussion.....	30
7 Fri optisk kommunikation	32
8 Laserkommunikation utan fri siktsträcka.....	32
8.1 Kommunikation via väggreflexioner	32
8.2 Ultraviolett kommunikation.....	32
9 Retrokommunikation.....	34
9.1 Mätningar med retrokommunikationslänk.....	35
9.2 Demonstration av retrokommunikation	38
10 Översikt av tekniker som kan förbättra prestanda i retrokommunikationssystem.....	40
10.1 Överföringskanalens egenskaper	40
10.2 Tekniker som kan ge en förbättrad prestanda i retrokommunikationssystem	41
10.2.1 Alternativa modulationsmetoder och flernivåmodulation	41
10.2.2 Optimal detektion.....	41
10.2.3 Felrättande kodning i kombination med interleaving	42
10.2.4 Flernivåmodulation	42
10.2.5 Adaptivitet.....	42
10.2.6 Rumsdiversitet	43
10.3 Sammanfattning och rekommendationer	44
11 Projektresultat	47
12 Rekommendationer för framtiden – öppna frågor	48
13 Referenser	49

1 Inledning

Under åren 2003–2005 har försvarsmaktsprojektet Kommunikationskanalens egenskaper i tätort, KOMET, inom FOI avdelning Ledningssystem och institution Informationsöverföring, studerat den enskilda soldatens möjligheter att upprätthålla samband i den urbana miljön. Projektet har under tre år studerat radiovågutbredning i den urbana miljön, samt möjligheten att använda fri optisk kommunikation. Denna rapport summerar projektet och behandlar de frågeställningar som uppkommit under arbetet. Som avslutning redovisas idéer för fortsatt verksamhet inom området.

1.1 Projektmål och motiv

Målen för projekt KOMET har varit att:

- Utveckla vågutbredningsmodeller för typiska scenarier vad gäller strid i bebyggelse.
- Studera möjligheten att använda fri optisk kommunikation i en förväntad urban miljö.
- Bevaka utvecklingen på området.

Motivet har varit det faktum att radiokanalen är en gränssättande faktor för trådlös kommunikation och att behovet av system med smygegenskaper och robusthet mot såväl aktiv störning som vågutbredningsfenomen är stort. Strider i bebyggelse, vilket innebär att soldater kommer att gå in i hus och krypa ner i kulvertar, ställer nya krav på förståelsen av en kommunikationslänk och dess begränsningar. I vissa situationer kan kanske fri optisk kommunikation vara mer fördelaktig än radiokommunikation.

Generellt kommer de nya kunskaperna kunna tillämpas vid design av nya radiosystem, vid strategisk och taktisk radio/frekvensplanering, värdering av telekrigsinsatser, simulering av mobila radionät samt för GPS och satellitkommunikation mot stadsmiljö.

1.2 Aktiviteter

Projektet har under åren genomfört en rad aktiviteter. Ett samarbete med Lunds universitet har inletts med doktorandstudier för en projektmedlem samt delfinansiering av ett avancerat mätsystem. Ett kommersiellt beräkningsprogram för radiovågutbredning i stadsmiljö har anskaffats. Vidare har urban krigsföring studerats bland annat med hjälp av MSS Kvarn, Mats Walldén och Thomas Höglund Kåberger, och HKV tema SIB ansvarig Håkan Bergsten.

Genomförda aktiviteter har presenterats på seminarier och demonstrationer, men även sammanfattats i nedanstående rapporter:

- *The communication channel in urban operations – a first survey* [Waern m.fl., 2003] FOI-R--0884--SE.
- *Optical communication in urban areas, focus on non line-of-sight optical communication* [Sakari m.fl., 2003] FOI--0944--SE.
- *Litteratur- och konferensbevakning 2003* [Löfsved m.fl., 2003] FOI-R--1051--SE.
- *Parabolic equation technique in vegetation and urban environments* [Holm m.fl., 2003] FOI-R--1050--SE.
- *Kommunikationskanalen i urban miljö – beskrivning av MIMO-konceptet och RUSK kanalsond* [Waern m.fl., 2004] FOI-R--1200--SE.
- *Kommunikation vid urban krigsföring - Radio och laser* [Waern m.fl., 2004] FOI-R--1279--SE.

- *Deterministic calculation of wave propagation in urban areas* [Löfsved m.fl., 2004] FOI-R--1339--SE.
- *Retrokommunikation i stadsmiljö* [Sakari m.fl., 2004] FOI-R--1466--SE.
- *Konferensbidrag presenterade på RVK 05* [Löfsved m.fl., 2005] FOI MEMO 1370.
- *Storstadslivet hårt för militära radiosignaler* Framsyn 4-2005, sid. 40 – 43.

Projekt KOMET har även deltagit i det europeiska samarbetsprojektet COST 273, Towards Mobile Broadband Multimedia Networks. COST står för European Co-operation in the Field of Scientific and Technical Research och är en organisation med säte i Bryssel. De flesta europeiska länderna är medlemmar i COST, alltså inte enbart EU-länderna. För projekt COST 273 har 21 europeiska länder skrivit under ett MoU (Memorandum of Understanding), vilket är nödvändigt för att landet skall få delta. Utöver dessa finns även Kanada, USA, Japan och Taiwan med som observatörer.

Syftet med COST är att skapa relativt öppna fora för kontakter och idéutbyten mellan specialister inom olika områden. COST-länder som går in som "signatories" i ett projekt – en procedur på departementsnivå – kan delta på nationell nivå genom att utse delegater som deltar i beslutsprocessen i projektet. I praktiken är det vanligt att även utomeuropeiska grupper deltar på expertnivå i projekten.

Ytterligare information se COSTs hemsida, <http://www.cordis.lu/cost/home.html>.

COST 273 avslutades i juni 2005 men långtgående planer på ett uppföljande projekt finns.

2 Urban krigföring

Den främsta uppgiften för svensk militär är att försvara svenskt territorium, men en allt viktigare uppgift är att medverka vid internationella insatser. Dessa insatser kommer med stor sannolikhet ske i urban miljö. Internationella insatser och urban krigföring påverkas av en rad faktorer [Berglund och Waern, 2004] varav de viktigaste är:

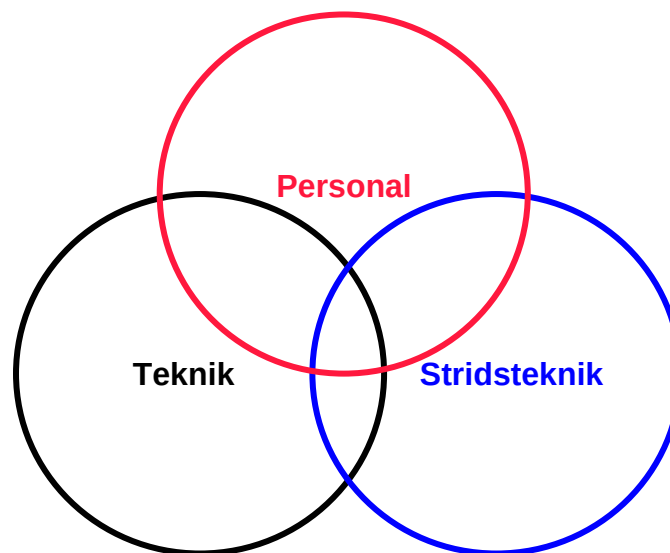
1. Strid i bebyggelse förväntas öka. Eftersom världens befolkning mer och mer söker sig in till städerna kommer med stor sannolikhet strider, av olika art, att utspela sig där.
2. Civilbefolkningen kommer att finnas kvar eftersom det inte är praktiskt genomförbart att evakuera en stad med ett invånarantal på en eller flera miljoner. Militär verksamhet kommer att utspela sig mitt bland befolkningen.
3. Språkkunskaper och kunskaper om kulturen är väsentlig. Goda kultur- och språkkunskaper kan vara direkt avgörande för utgången av en operation. Även om lokalbefolkningen först välkomnar militär närvaro så kan opinionen snabbt vända om de upplever att de inte respekteras.
4. Strid i urban miljö är inte sekventiellt, "three block war" [<http://www.cdi.org/iraq/urban-pr.cfm>]. Vid en tidpunkt och plats behövs humanitär hjälp av något slag. I nästa stund krävs ett ingripande mot någon och helt plötsligt byts detta mot regelrätta strider – allt under samma dag och i godtycklig ordning.
5. Större flexibilitet hos chefer på lägre nivå. På grund av de korta avstånden, den besvärliga terrängen och problemet med lägesbilden kan situationen snabbt

förändras. På förhand uppgjorda planer kan behöva förändras och det behövs chefer som vågar och framför allt som orkar att ändra och tänka nytt.

6. Information och underrättelse nerifrån och upp. Strid i urban miljö kräver soldater till fots. Information och lägesuppfattning om närområdet måste finnas hos dem. För att vara något så när säker på att dessa soldater har relevant information måste informationsflödet ske nerifrån och upp. Detta ställer högre krav på de högre cheferna att kunna delegera ansvar och befogenheter, de högre cheferna måste acceptera att de får vänta på informationen.
7. Förbandssammansättning. För att få så bra styrkor som möjligt behövs samarbete från flera olika kompetenser – joint forces. Miljön gör att det måste finnas en beredskap för flera olika typer av scenarier.
8. Träning. Träning är oerhört viktigt och den måste vara varierande eftersom ingen urban operation är den andra lik.
9. Mediabevakning. Media har och kommer än mer att ha en stor påverkan på militär verksamhet. Det är viktigt att den bild som förmedlas hem, via medierna, accepteras av hemmaopinionen. Om en bild som allmänheten hemma inte vill se levereras kan hela uppdraget äventyras.

Internationella insatser kommer med stor sannolikhet utövas i urban terräng och materiel som tas fram måste tjäna till att minska den enskilde soldatens fysiska och psykiska påfrestningar.

Den materiel som finns att tillgå idag har lett till ett visst taktiskt uppträdande i olika situationer. Ett förbands förmåga beror av de tre delarna; personal, teknik och stridsteknik. Ändras någon del kommer de övriga två att påverkas, se figur 2.1.



Figur 2.1: Samverkan och balans mellan personal, teknik och stridsteknik. De tre delarna hänger ihop och påverkar varandra.

2.1 Kommunikation vid urban krigföring

För att effektivt kunna leda ett förband är det väsentligt att kunna kommunicera med alla ingående enheter, inklusive avsuttna soldater, utplacerade sensorer och autonoma farkoster. Det betyder inte att alla ska kommunicera med alla alltid, utan att det ska vara möjligt att överföra viktig information till vem som helst när som helst, antingen direkt eller via någon mellanliggande.

För att uppnå den gemensamma lägesbilden är positionsinformation av egna enheter av yttersta vikt vid alla typer av militära operationer, i stadsmiljö är det dessutom viktigt att positionerna anges i 3 dimensioner så att det går att identifiera på vilket våningsplan en soldat befinner sig.

Kartor över aktuellt område måste kunna uppdateras efter hand. Broar och hus kan raseras, egna och fientliga trupper förflyttas, markering av mål, säkra och osäkra områden, speciellt viktiga eller farliga byggnader osv.

En viktig källa till information för hur lägesbilden ska uppdateras under en operation är olika typer av sensorer. Sensorerna kan vara, ur kommunikationssynpunkt, allt ifrån ganska enkla rörelsedetektorer, mikrofoner, kemiska och biologiska varningssensorer till mer avancerade bildalstrande sensorer såsom video, IR, UV och laser. Sensorinformation måste göras tillgänglig för ledningssystemet om det ska vara någon större vits med att satsa resurser på att placera ut dem. För det krävs ett relativt avancerat kommunikationsnätverk i området där sensorerna är placerade, där information kan reläas av mellanliggande noder från en nod som inte står i direkt kontakt med övriga förbandsenheter.

Vissa sensorer kan dessutom placeras i autonoma farkoster på mark och i luften. Förutom att kommunikationsnätverket ska kunna hantera att noden i detta fall rör sig, måste styr- och statusinformation förmedlas till och från farkosterna.

Sensorer av många olika typer finns redan idag och används dessutom inom försvaret, men sensorinformationen är inte tillgänglig för alla som skulle behöva den. Kommunikationsnätverket och sensorerna är inte integrerade med varandra vilket gör att informationen från sensorerna måste översättas av en operatör för att bli tillgänglig. I framtiden ligger att samverkande enkla sensorer som spritts över en yta tillsammans kan bilda en avancerad sensor. För att detta ska bli verklighet krävs det att ett kommunikationsnätverk integreras fullständigt med sensorerna.

3 Radiokommunikation

Det militära behovet att leda sammansatta styrkor i urban miljö skiljer inte så mycket från det behov som räddningstjänsterna har då de genomför större gemensamma operationer. I vissa situationer finns ett reellt störhott mot militära enheter men erfarenheten har visat att det inte är speciellt vanligt förekommande. Blåljusmyndigheternas nya kommunikationssystem baserat på TETRA-standarden uppfyller många av de militära kraven på funktionalitet och säkerhet förutom störskyddet och kan vara ett mycket intressant alternativ för dagens internationella operationer. För operationer inom Sverige, som inte är regelrätt krig, krävs det att Försvarsmakten samarbetar och underställer sig svensk polis. Det samarbetet skulle underlättas om Försvarsmakten och blåljusmyndigheterna har ett gemensamt radiosystem. TETRA-terminaler är relativt billiga och kan fungera utan stöd av basstationer. Det finns också utrustning för att ganska snabbt upprätta egna basstationer i ett område.

Civilt är utvecklingen av 3:e generationens mobiltelefonsystem (3G) och trådlösa datornätverk (WLAN) stark, där stora insatser görs för att knyta samman dessa till ett

gemensamt nätverk. Den och liknande kommunikationslösningar kan vara intressant för militära operationer i urban miljö eftersom 3G och WLAN utvecklas i första hand för platser där det finns många kunder, dvs. i städerna. Man ska dock vara medveten om att civila systemlösningar har sina risker, driftsäkerheten och tillgängligheten i systemen är inte högre än vad civila kunder precis accepterar. Sårbarheten mot avsiktliga attacker är stor. Målet är att maximera vinsten för operatörerna, inte maximera tillgängligheten för användarna.

GTRS, Gemensamt Taktiskt Radio System, är under anskaffande inom försvarsmakten. GTRS tillhör kategori D som, enligt FM benämning, innebär högsta krav på robusthet och funktion. Projektet är stort och därför indelat i olika faser. Valet av det nya gemensamma radiosystemet har fallit på en s.k. mjukvaruradio, SDR - Software defined radio. En sådan radio kan i viss mån jämföras med en dator med en hårdvara och en mjukvara innehållande radions egenskaper. Dessa egenskaper kan förändras genom att radion kan laddas med olika mjukvaror, s.k. vågformer. Hittills har följande arbeten påbörjats:

- TDRS/GTRS-Demo, är en hård- och mjukvarudemonstrator som är under upphandling. TDRS står för Taktiskt DataRadio System. Radion skall i första hand användas för att demonstrera principerna med mjukvarudefinierad radio. Det är dock oklart om den kommer att ingå i den framtida GTRS-familjen, även om ambitionen i dagsläget är så.
- Vågform TETRA, är ett arbete som syftar till att öka kunskapen om hur en vågform skall upphandlas samt att ge insyn i processen att ta fram en produkt. Ingående frågeställningar är bl.a. hur godkännanden går till och vilka verktyg som måste tillhandahållas. Vågformen, som utvecklas av ett företag i Nederländerna, är inte en komplett TETRA. Arbetet är ett samarbete mellan amerikanska Joint Program Office, JPO och FMV.
- Vågform RA180, syftet med uppgiften är att utreda hur befintliga vågformer kan tas fram som mjukvara till en SDR.

4 Radiovågutbredning

Förutsättningarna för radiokommunikation i stadskärnor skiljer sig kraftigt från landsbygd. Terminalerna befinner sig ofta i gatunivå med den direkta förbindelseriktningen djupt skuggad av höga byggnader. Vågutbredning i stadsmiljö är komplicerat och det är ett antal vågutbredningsfenomen som påverkar radiosignalen under dess väg till mottagaren och som sammantaget utgör det som vi kallar radiokanalen. Några exempel på vad som händer radiovågen är:

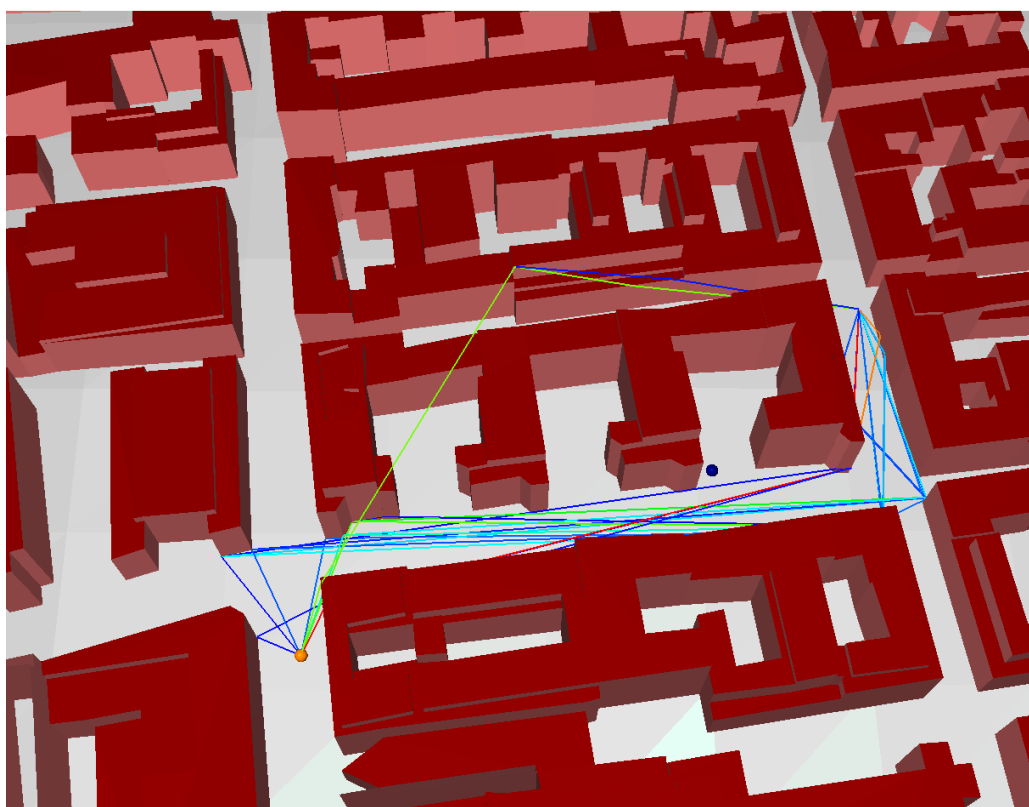
- Frirymdsdämpning. Signalen dämpas och minskar med kvadraten på avståndet.
- Extra dämpning på grund av lättare hinder i vägen. Det kan vara t.ex. lövverk. Signalen går igenom hindret, men kommer fram försvagad.
- Reflexioner. Signalen reflekteras mot husväggar och andra stora objekt. Det är den reflekterande ytans beskaffenhet som avgör hur signalen reflekteras. Är det en slät yta minskar inte signalstyrkan så mycket som om ytan är skrovlig. I det senare fallet sprids signalen åt många olika håll. Det blir då många och svaga signaler som kanske inte kan tas tillvara av mottagaren.
- Flervägsutbredning. Signalen sänds ut från sändaren åt flera olika håll. Signalkomponenterna kommer via en eller flera reflektioner till mottagaren från många olika håll. Figur 4.1 visar ett exempel på olika utbredningsvägar för de olika signalbidragen i ett Stockholmsscenario beräknat med RPS (se avsnitt 5).

- Uppstickande objekt. Det kan vara berg eller hus. Signalen diffrakteras, d.v.s. böjs av runt objektet om den träffar nära en kant eller ett hörn. Träffar signalen på ytan reflekteras den.

Vågutbredningen i stadsmiljö sker alltså huvudsakligen via multipla reflexioner mot husväggar och diffraktion runt hörn och över hustak. Antalet reflektioner och diffraktioner beror på frekvensen, infallsvinkel mot objekten och objektens form och material.

Vid smalbandig överföring sammanlagras alla bidragen genom direkt addition av komplexvärda vektorer till en totalsignal. Om någon av terminalerna rör sig, eller om viktiga objekt i utbredningsmiljön rör sig, får man en överföringskanal som varierar i tiden, den fädrar.

Då objekt i miljön, t.ex. byggnader och terrängformationer, under rörelsen temporärt skymmer olika utbredningsvägar får man en långsam variation i signalstyrkan, så kallad storskalig fädning. Fluktuationerna har en rumslig skala direkt kopplad till storleken hos de skymmande objekten.



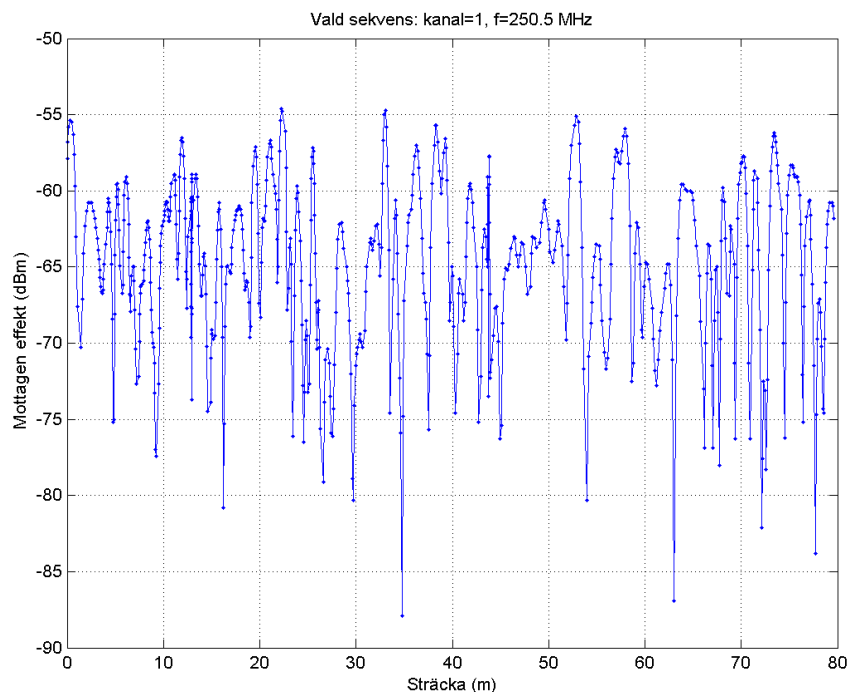
Figur 4.2. Identifierade utbredningsvägar (strålar) för ett Stockholmsscenario. Sändaren (orange punkt) är en bil på Regeringsgatan nära korsningen med Mäster Samuelsgatan, mottagaren är en fotsoldat på Norrlandsgatan. Den utsända effekten är 10 W och frekvensen 300 MHz. Strålarnas färgskala visar signalstyrkan för de olika bidragen.

Dessutom uppkommer så kallad snabb eller småskalig fädning genom våginterferens; de olika signalkomponenterna förstärker eller släcker ut varandra. Fluktuationerna kan vara starka, upp till några tiotals dB. Den rumsliga skalan är typiskt en halv våglängd, någon eller några decimeter.

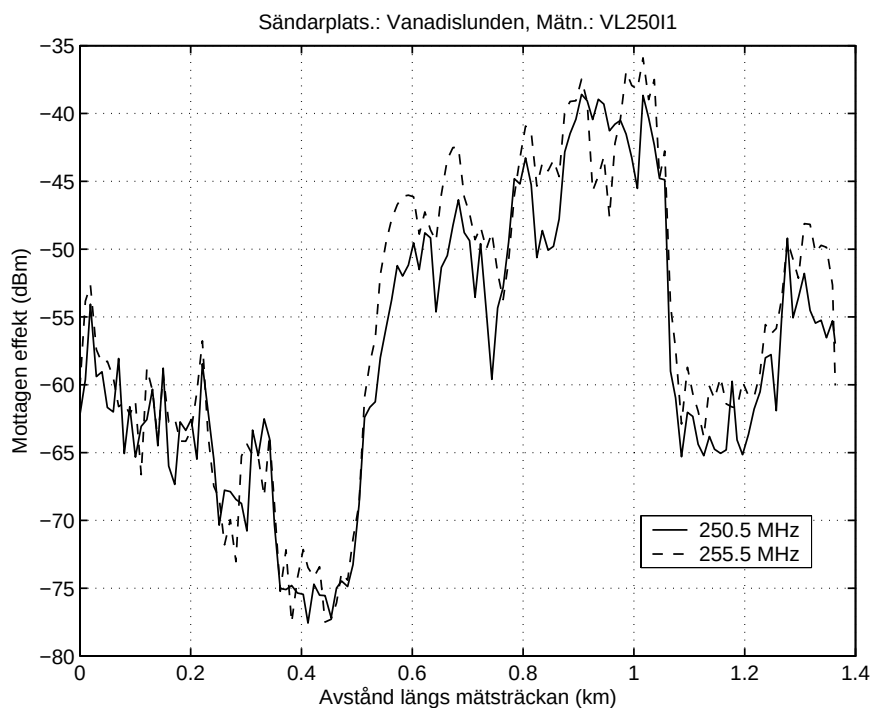
Ett exempel på fädning från en smalbandig mätning vid 250 MHz ges i fig. 4.2 och 4.3. Mätningen är gjord i norra Stockholm inom projektet "3D vågutbredning och kanalmodell" [Ladell, 2002; Krans m.fl., 2003; Holm m.fl., 2004]. Sändarbilen befann sig relativt högt uppe i Vandadislunden. Mottagarbilen rörde sig längs med en slinga i den närbeläga Vasastaden, i djup skugga från sändarplatsen. Det innebär en typisk flervägssituation med diffrakterade och multipelreflekterade signalbidrag, men ingen direktvåg.

Fig. 4.2 visar den snabba fädningen över en del av körsträckan. Karaktäristiska skallängden är halva våglängden, dvs. 60 cm, och signalen fädr inom ett ca 30 dB stort intervall då mottagaren förflyttar sig. Den storskaliga fädningen framgår av fig. 4.3; den snabba fädningen är där bortfiltrerad genom medelvärdesbildning av signalstyrkan över 10 m.

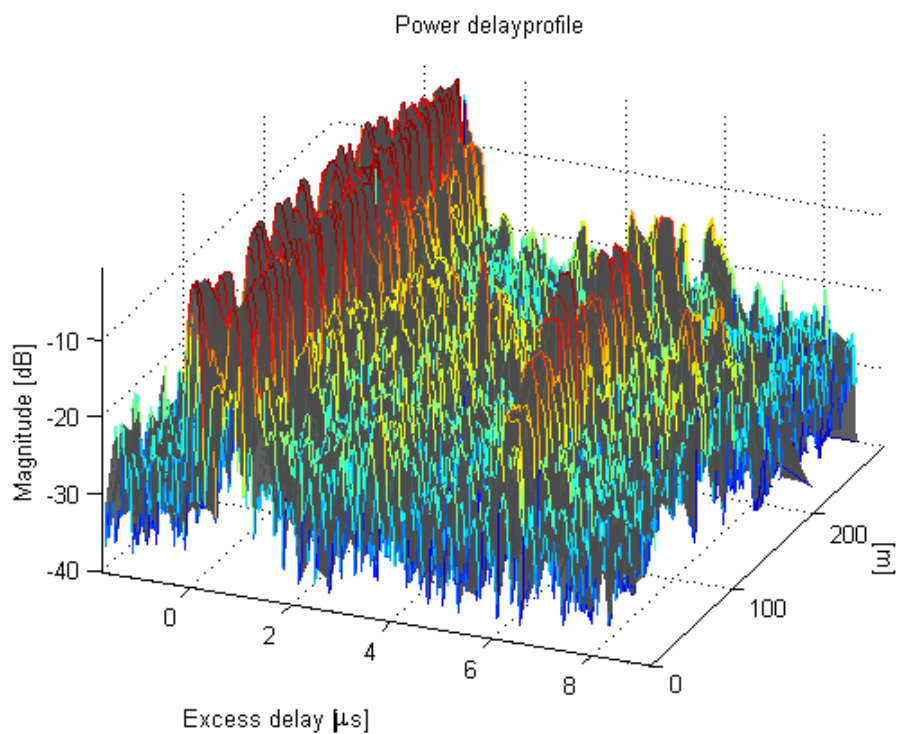
Vid bredbandig överföring måste man dessutom beakta signalkomponenternas individuella fördröjningar som beror på olika gångvägar mellan sändare och mottagare. Det illustreras bäst genom det så kallade impulssvaret som visar hur en mycket kort utsänd puls tänjs ut i tiden av kanalen. Figur 4.4 visar ett uppmätt dynamiskt impulssvar då sändaren befann sig på taket till dåvarande (1977) FOAs byggnad på Linnégatan i Stockholm och mottagaren rörde sig en sträcka om ca 300 m längs Frejgatan i Vasastaden. Frekvensen var 445 MHz och signalens bandbredd 5 MHz, vilket innebär en upplösning i impulssvaret av storleksordningen 0.2 μ s [Holm m.fl., 2004].



Figur 4.2. Småskalig fädning längs med en körsträcka i Vasastaden i Stockholm då sändaren var högt belägen i Vanadiaslunden. Frekvensen var ca. 250 MHz och den typiska skalan på fädningen är halva våglängden.



Figur 4.3. Storskalig fädning längs med en körsträcka i Vasastaden i Stockholm då sändaren var högt belägen i Vanadislunden. Frekvensen var ca. 250 MHz och den småskaliga fädningen är utjämnad genom medelvärdesbildning över 10 m.



Figur 4.4. Uppmätt impulssvar på 445 MHz för en körsträcka om 300 m längs med Frejgatan i Stockholm.

4.1 Vågutbredningsmodeller

Vågutbredningsmodeller har berörts i tidigare rapporter inom projektet [Waern m.fl., 2003; 2004; Löfsved m.fl., 2004]. För planering av radiosamband är det oftast tillräckligt med enkla modeller som endast beräknar transmissionsförlusten för en önskad länk eller ett täckningsområde. Sådana modeller brukar delas in i tre olika klasser [Cátedra och Pérez-Arriaga, 1999]:

- Empiriska modeller
- Semiempiriska eller semideterministiska modeller
- Deterministiska modeller

Empiriska modeller, bygger på statistik från ett stort antal mätningar och är enkla att använda och har ofta lika god noggrannhet som de mera avancerade modeller som är tillgängliga i dag. Detta förutsätter dock att empiriskt underlag finns från samma typ av utbredningsmiljö som den man vill studera.

Deterministiska modeller bygger på elektromagnetisk teori. Terrängen och byggnader beskrivs med hjälp av kart- och byggnadsdatabaser. De flesta deterministiska modeller bygger på så kallad ray tracing-teknik. Även en annan deterministisk teknik, baserad på paraboliska ekvationer (PE), har studerats inom projektet [Holm m.fl., 2003]. Denna har dock ännu ej funnit någon större användning i stadsmiljö. Styrkan med dessa modeller är att de räknar utifrån "first principles"; man behöver således inte känna till vågutbredningsförhållandena för någon liknande typ av miljö för att genomföra sina beräkningar.

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

Vid uttestning av nya bredbandiga systemkoncept har man i allmänhet krav på mera detaljerade kanalmodeller. Vid sidan av signalnivåer behöver man även ta hänsyn till de dynamiska och dispersiva kanalegenskaperna – fördelningen av signalenergi i domänerna fördröjning och Doppler, som t.ex. ges av impulssvaret (fig. 4.4). Om antennarrayer ingår behöver man dessutom riktningsinformation för de olika signalkomponenterna. Sådana kanalmodeller baseras ofta på någon form av tredimensionell representation av utbredningsgeometrin.

Det finns ett utbud av sådana enklare modeller som simulerar dynamiska kanalegenskaper, så kallade stokastiska kanalmodeller [Waern m.fl., 2003]. Dessa är närmast att betrakta som semideterministiska då de baseras på vissa antaganden från vågutbredningsteori samt på mätningar i några olika typmiljöer. De har fördelen av att vara lättanvända och snabba och ger ofta tillräckligt bra resultat då man är intresserad av systemprestanda i just dessa typmiljöer.

Då man vill simulera systemuppträdanden kopplade till olika geografiska scenarier är man dock hänvisad till de mer avancerade deterministiska modellerna. Dessa kräver omfattande miljöbeskrivning, kan vara komplicerade att styra, kräver långa beräkningstider och ger i dagsläget sannolikt inte bättre resultat än de enkla modellerna i de miljöer de enkla modellerna byggts för.

Ett antal kommersiella beräkningsprogram baserade på deterministiska metoder finns på marknaden; se [Waern m.fl., 2003]. Projektet har köpt ett sådant, RPS, som är utvecklat av företaget Radioplan i Tyskland.

5 Radio wave propagation simulator - RPS

Information om programvaran RPS (Radiowave Propagation Simulator) från Radioplan GmbH, Dresden, Tyskland, finns på <http://www.radioplan.com>

RPS bygger på en deterministisk modell för vågutbredningsberäkningar i stadsmiljö, som enligt leverantören gäller för frekvensområdet 0.3 till 300 GHz. Modellen baseras på geometrisk optik, dvs. signalerna som registreras av en mottagare sätts samman av strålar som skickas ut från sändaren och letar sig fram genom utbredningsmiljön. I vårt fall har vi till denna använt en CAD-databas som i detalj beskriver byggnadsbeståndet i norra Stockholm och som placerats ovanpå en terrängprofil för området enligt kartdatabasen RT90. Strålmotoden är tredimensionell (3D) och tar hänsyn till reflektioner och diffraktioner längs med strålvägen. Programmet kan även räkna på inträngning i byggnader, men det har hittills inte använts av oss. Beräkningarna blir i många fall extremt tidskrävande och därför finns i programmet även algoritmer (2.5D) som på ett förenklat sätt tar hänsyn till höjddimensionen. För mera översiktliga beräkningar finns dessutom den empiriska modellen Walfisch-Ikegami. Beräkningarna kan ta hänsyn till effekterna av relativt godtyckliga antenndiagram som definieras av användaren. Programvaran är flexibel med möjlighet till egna plug-ins för beräkningar och efterbehandling av resultat.

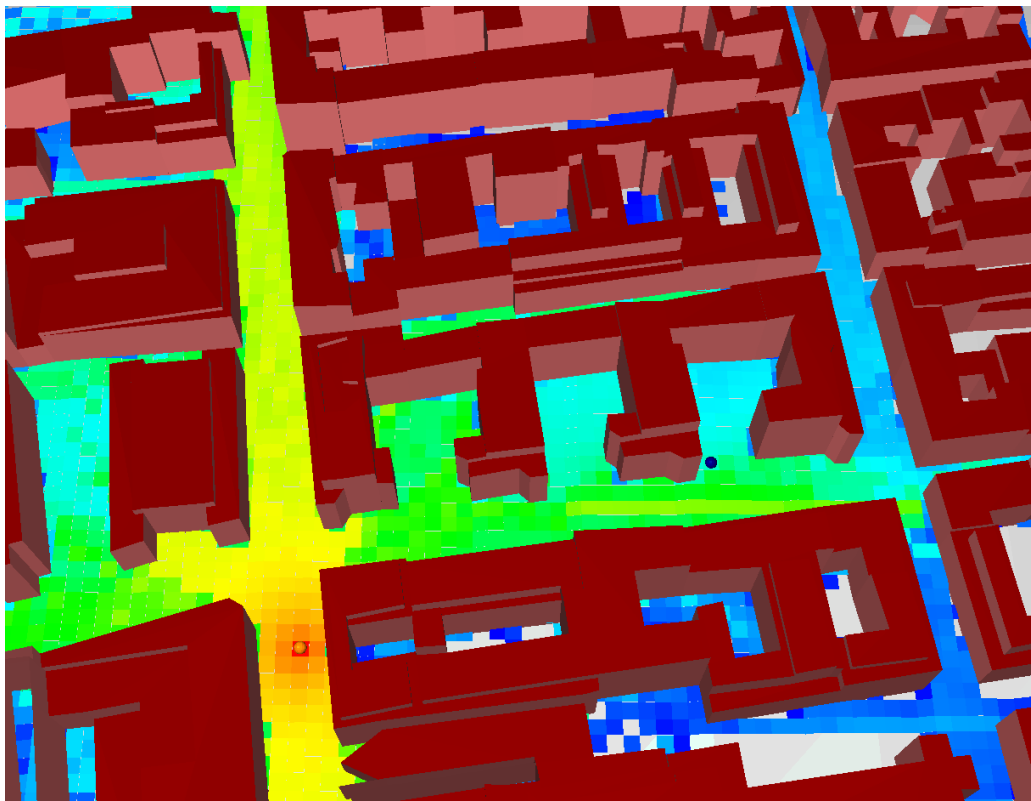
Med de begränsningar som ligger i vågutbredningsmodellerna ger RPS en fullständig representation av radiokanalen. För varje stråle som letar sig fram till en mottagarpunkt beskrivs fältbidraget av parametrarna amplitud, fas, polarisation, fördröjning samt utsänd och mottagen riktning. Detta sker genom den direkta kopplingen till utbredningsgeometrin, vilket illustreras av strålbilden i fig. 4.1. Då man beräknar strålar till ett raster av mottagarpunkter kan man skapa täckningsdiagram, vilket exemplifieras i fig. 5.1. Dynamiska resultat då mottagaren rör sig kan genereras på olika sätt. Fig. 5.2 visar ett exempel som svarar mot fig. 4.4, dvs. det beräknade dynamiska impulssvaret då sändaren befinner sig på taket till en byggnad på Linnégatan i Stockholm och mottagaren rör sig en sträcka om ca 300 m längs Frejgatan i Vasastaden. Frekvensen är 445 MHz och signalens bandbredd 5 MHz.

RPS har använts i några olika studier inom projektet [Waern m.fl., 2003, Löfsved m.fl., 2004], samt i olika samarbeten [Ladell m.fl., 2004; 2005; Lundborg m.fl., 2004; 2005]. Våra erfarenheter hittills har lett oss fram till följande slutsatser:

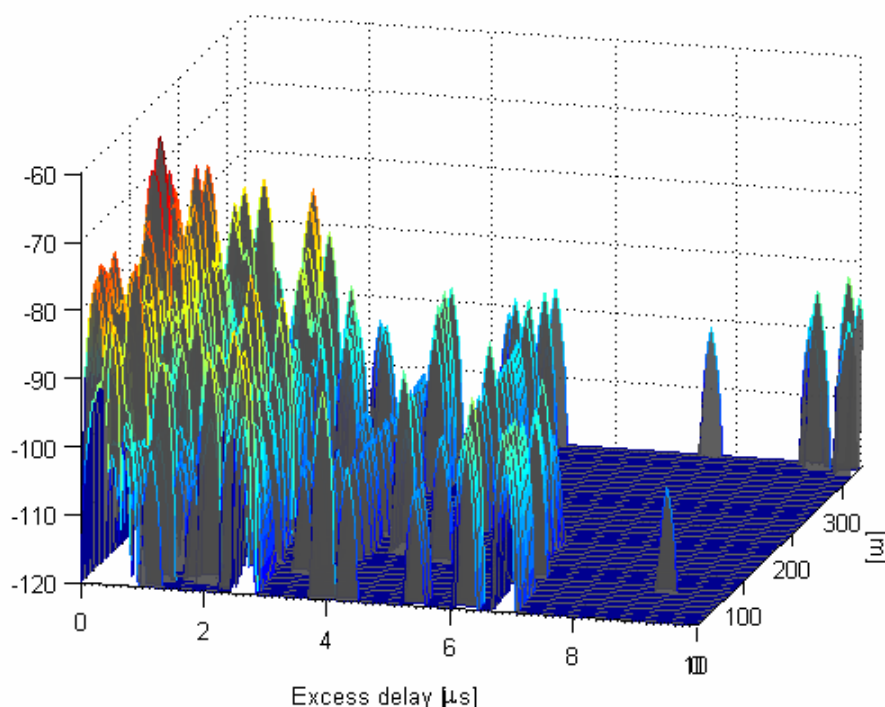
- Transmissionförlusten beräknas i nuläget lika bra eller bättre med enkla empiriska modeller.
- Dynamiska impulssvar i stadsmiljö är användbara för t ex nätsimuleringar.
- Då man vill simulera specifika geografiska scenarier, t.ex. taktiska uppträdanden i stadsmiljö, är en deterministisk beräkningsmetod det enda som duger.
- Vi bedömer att RPS och liknande program har framtiden för sig.
- RPS erbjuder en stor flexibilitet för användaren i fråga om att göra egna plug-ins för beräkningar och hantering av utdata.

- Beräkningar över större områden av typ stadsdel kräver i dagsläget parallella processorer för att bli hanterbara.

I kommande projekt avser vi att använda beräkningsresultat från RPS i simuleringar av radiolänkar och nät. Användningen av RPS för inomhusscenarioer samt kommunikation utomhus till inomhus bör studeras. Försörjningen med byggnadsdata på CAD-format, nationellt och internationellt, är i dagsläget oklar. Beräkningsmodeller i programmet är inte optimala för de lägre frekvensband som är av militärt intresse. En vidareutveckling av dessa modeller, eventuellt i samverkan med leverantören, vore därför av intresse. Underlaget avseende materialparametrar och betydelsen av dessa samt inverkan av vegetation bör undersökas närmare.



Figur 5.1. Täckningsdiagram för samma Stockholmsscenario som i fig. 4.1. Sändaren (orange punkt) är en bil på Regeringsgatan nära korsningen med Mäster Samuelsgatan. Den utsända effekten är 10 W och frekvensen 300 MHz. Färgskalan visar signalstyrkan över ytan (från -20 dBm till -110 dBm).



Figur 5.2. Impulssvar beräknat i RPS för ett scenario i Stockholm svarande mot fig. 4.4.

6 Karakterisering av radiokanalen för MIMO-system

Radiosystem där både sändaren och mottagaren är utrustade med multipla antenner (gruppantenner) kallas för MIMO-system (Multiple-Input-Multiple-Output). Det har de senaste åren genomförts intensiv forskning om MIMO-tekniker och deras användning i främst civila kommunikationssystem. Anledningen är de kraftiga förbättringar i bl.a. kapacitet som kan uppnås. MIMO-tekniker används redan i befintliga civila kommunikationssystem, t.ex. WLAN, och finns i någon form även med i standarderna för i stort sett alla befintliga 3G- och de föreslagna 4G-systemen.

Möjligheterna med MIMO-system avgörs till största delen av kanalens egenskaper och för att kunna bedöma hur MIMO-system kommer att fungera i mobila taktiska kommunikationssystem behövs kunskap om kanalens spatiella egenskaper, för typiska frekvensområden och taktiska scenarion. Frekvensområdet 200–500 MHz är intressant för framtida taktiska radiosystem, men det finns idag inga mätningar som visar hur radiokanalens spatiella egenskaper är för dessa frekvenser. Det saknas även kunskap om radiokanalens egenskaper för scenariot där vi har två lågt placerade gruppantennor på t.ex. stridsfordon eller stridsvagnar i urbana miljöer.

Den civila aktiviteten inom MIMO-området är ganska starkt fokuserad på frekvensområdena kring 2 och 5 GHz. Dessa frekvensområden är naturligtvis även intressanta ur försvarets perspektiv, men det är viktigt att skaffa sig kunskap om hur radiokanalen i frekvensområdet 200–500 MHz skiljer sig i förhållande till de högre frekvenserna. Detta gäller i första hand för urbana miljöer, men det finns naturligtvis även ett intresse att karakterisera detta frekvensområdes MIMO-potential i landsbygds- och skogsmiljö. Den senare miljön förväntas, i likhet med stadsmiljö, uppvisa en relativt hög grad av flervägsutbredning, vilket är ett nödvändigt, men dock inte tillräckligt, villkor för att uppnå goda MIMO-prestanda.

6.1 Syfte med mätningar av MIMO-kanalen

För att kunna värdera möjligheterna med MIMO-system i taktiska tillämpningar behöver därför kunskapen om kanalens spatiella egenskaper för dessa frekvenser och militärt intressanta scenarion förbättras avsevärt. Därför har FOI, i samarbete med Universitetet i Lund, införskaffat ett MIMO-kanalmätningssystem. Mätningar kommer att genomföras för militärt intressanta scenarier, främst i urban miljö men senare även i skogsmiljö och på landsbygd.

Mätningarna ska sedan användas till att utveckla så kallade dubbeldirektionella kanalmodeller som krävs för att på ett tillförlitligt sätt analysera prestanda för MIMO-system i militära tillämpningar. Kanalmätningarna kan dessutom användas till att direkt estimerade de maximala kapacitetsvinster som skulle kunna uppnås med MIMO-system i de aktuella scenarierna.

6.2 Introduktion till MIMO

Det finns ett stort antal olika MIMO-tekniker som ger olika fördelar och vars komplexitet skiljer sig [Gesbert m.fl., 2003]. De flesta MIMO-teknikerna försöker antingen att maximera kapaciteten (datatakten) eller minimera felhalten (genom att maximera diversitetsvinster).

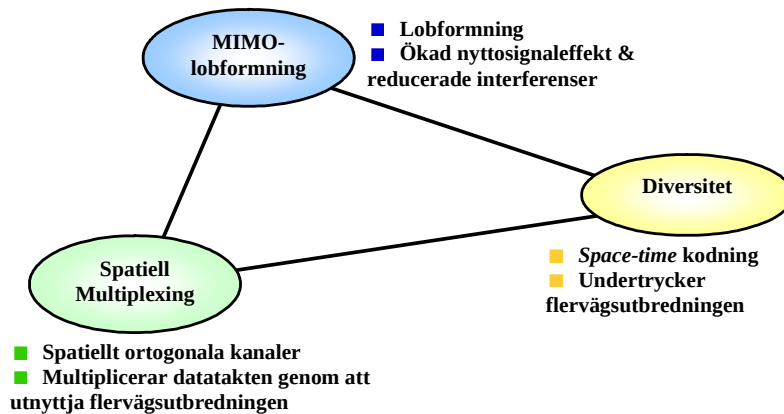
MIMO-tekniker delas ofta upp i tre olika klasser (se fig. 6.1) utifrån de huvudsakliga vinster som kan uppnås:

- Lobformningsvinst
- Diversitet
- Spatiell multiplexing

Lobformning kan genomföras i både sändaren och mottagaren. Lobformningsvinster ger ett förbättrat signal-till-brus förhållande (SNR), som kan användas till att förbättra radiosystemets kapacitet, räckvidd, eller minska felhalten. Adaptiv störundertryckning kan dessutom utföras i mottagaren vid lobformningen.

Rumsdiversitet är en bandbreddseffektiv metod för att motverka fädningens negativa effekter. Principen är enkel, om två eller fler antenner används som är tillräckligt separerade så kommer signalen i de olika antennerna att fäda olika. Genom att välja att använda signalen från den antenn som har starkast signal för tillfället, eller genom att kombinera signalerna från de olika antennerna på ett smart sätt, kan fädningen reduceras kraftigt. Bandbreddseffektiv rumsdiversitet kan även uppnås vid sändning. Genom att koda signalen över både tid (eller frekvens) och rum [Rantakokko m.fl., 2004] innan den sänds ut kan rumsdiversitet uppnås utan att offra kapacitet. Rumsdiversitetstekniker kan ge mindre signalfluktuationer i den mottagna signalen samtidigt som medel-SNR kan förbättras.

Rumsdiversitet är en effektiv teknik som relativt enkelt kan ge betydande vinster, men prestanda vid rumsdiversitet kan försämrats under vissa förutsättningar. Om de mottagna signalerna i de olika antennerna inte fädras tillräckligt olika kommer diversitetsvinster att reduceras. En hög korrelation kan uppstå på grund av tätt placerade antenner på t.ex. ett stridsfordon eller en stridsvagn, där plattformen begränsar de maximalt möjliga antennseparationerna.



Figur 6.3. Skiss av olika MIMO-tekniker.

Spatiell multiplexing är en teknik som kan användas till att förbättra spektrumeffektiviteten i radiosystem som opererar i scenarion med betydande flervägsutbredning. Spektrumeffektiviteten är ett mått på antalet bitar som i medel kan sändas över en viss bandbredd, och den anges oftast mot 1 Hz. Vid spatiell multiplexing utnyttjas flervägsutbredningen, istället för att undertryckas som vid diversitet. Idéen är att sända separata dataströmmar parallellt på de olika sändarantennerna, på samma frekvens, och därmed förbättras kapaciteten. Förutsatt att flervägsutbredningen är tillräckligt kraftig är det sedan möjligt att separera de olika dataströmmarna i mottagaren. I teorin är det därmed möjligt att uppnå en kapacitetsvinst som ökar proportionellt med antalet sändarantennerna. Dessa stora kapacitetsvinster kan uppnås under förutsättning att antalet mottagarantennerna är minst lika många som antalet sändarantennerna, samt att flervägsutbredningen är tillräckligt kraftig.

Vid rumsdiversitet och spatiell multiplexing krävs att kanalen mellan de olika antennerna kan estimeras i mottagaren. Kanalestimeringen kan bli något komplicerad att genomföra i situationer då kanalen varierar snabbt, vilket ofta är fallet vid mobil taktisk kommunikation, och vissa försämringar av systemets prestanda bör förväntas pga icke-perfekt kanalinformation. Hur väl kanalestimeringen kan utföras begränsar hur stora vinster MIMO-system kan ge. Om även sändaren har information om kanalen kan prestanda förbättras ytterligare vid t.ex. spatiell multiplexing.

De flesta MIMO-algoritmerna förutsätter att kanalen är flat färdande, dvs kanalens påverkan på signalen är lika över hela frekvensbandet. Ett sätt att åstadkomma flat färdande kanaler i bredbandiga radiosystem är genom att använda OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), vilket ger ett flexibelt radiosystem som medger hög kapacitet. I ett OFDM-system transformeras en frekvensselektiv kanal till multipla flat färdande subkanaler genom att sända data på ortogonala smalbandiga underbärvågor, se t.ex. [Rantakokko m.fl., 2004]. Istället för att sända datasymbolerna sekventiellt över en stor bandbredd under en mycket kort tid sänds de istället parallellt på de smalbandiga underbärvågorna över en lång tid. OFDM-system är en mycket intressant kandidat för användning i framtida högkapacitetsvägformer för taktisk kommunikation.

6.2.1 Teoretiska kapacitetsvinster som kan uppnås med MIMO-tekniker

Den maximala teoretiska kapaciteten som kan uppnås för ett SISO-system i additivt vitt Gaussiskt brus, C_{SISO} , visades av Shannon [Foschini och Gans, 1998],

$$C_{SISO} = \log_2(1 + E_s / N_0) = \log_2(1 + \rho) \text{ [bps/Hz]}, \quad (6.1)$$

där E_s är symbolenergin, N_0 är brusenergin i mottagaren och ρ anger (medel) SNR. Kapaciteten ökar därmed logaritmiskt med ett ökat SNR, vilket bland annat kan åstadkommas genom en ökad sändareffekt.

Den maximala teoretiska kapaciteten då multipla antenner används i mottagaren, C_{SIMO} , ges istället av följande uttryck [Foschini och Gans, 1998],

$$C_{SIMO} = \log_2(1 + \rho \mathbf{h} \mathbf{h}^*) \quad (6.2)$$

där $\mathbf{h}$ är en radvektor som innehåller de (normerade) tidsvariabla komplexa kanalsvaren från sändarantennen till alla mottagarantennerna, och ρ anger medel-SNR för varje mottagarantenn. Motsvarande kapacitetsuttryck för ett radiosystem med multipla antenner i sändaren men med en ensam antenn i mottagaren (dvs MISO-fallet) är

$$C_{MISO} = \log_2 \left(1 + \frac{\rho}{n_{Tx}} \mathbf{h} \mathbf{h}^* \right) \quad (6.3)$$

och det gäller för situationen då vi inte har kanalinformation i sändaren. Kapaciteten för SIMO-system kan därmed, i teorin, öka logaritmiskt med antalet antenner, vilket inte är möjligt i MISO-fallet då vi inte har kanalinformation i sändaren. Det största motivet till att utföra sändnings- eller mottagningsdiversitet är normalt att motverka fädningen och på så sätt minska felhalten på det mottagna meddelandet. Över en Rayleigh-fädande kanal kan t.ex. bitfelssannolikheten approximeras enligt följande

$$P_e \cong SNR^{-d}, \quad (6.4)$$

där d är diversitetsordningen (ung. antalet mottagarantenner med okorrelerad fädning vid mottagningsdiversitet). Diversitetsmetoder kan därmed väsentligt reducera felsannolikheten i scenarion med kraftig fädning.

För ett MIMO-system ges slutligen den teoretiska maximala kapaciteten, C_{MIMO} , av [Foschini och Gans, 1998]

$$C_{MIMO} = \log_2 \left(\det \left[\mathbf{I} + \frac{\rho}{n_{Tx}} \mathbf{H} \mathbf{H}^* \right] \right), \quad (6.5)$$

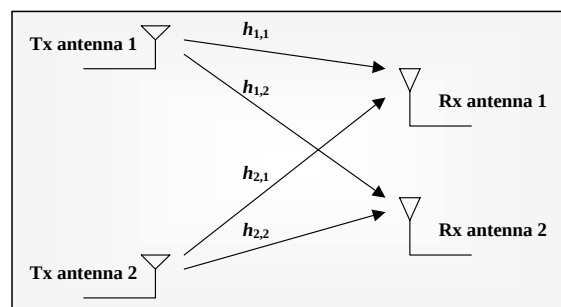
där $\det[\cdot]$ anger determinantoperatorn, $(\cdot)^*$ representerar komplexkonjugattransponat, n_{Tx} är antalet sändarantenner, och $\mathbf{I}$ är identitetsmatrisen. För ett MIMO-system med två sändarantenner och två mottagarantenner reduceras kapacitetsuttrycket till följande,

$$C_{2 \times 2} = \left(\log_2 \left[1 + \frac{\rho}{2} \lambda_1 \right] + \log_2 \left[1 + \frac{\rho}{2} \lambda_2 \right] \right), \quad (6.6)$$

där λ_1 och λ_2 är egenvärdena till matrisen $\mathbf{H}\mathbf{H}^*$. Den normerade MIMO-kanalmatrisen $\mathbf{H}$ är då uppbyggd enligt

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{1,1} & h_{1,2} \\ h_{2,1} & h_{2,2} \end{bmatrix} \quad (6.7)$$

där kanalerna mellan de olika sändar- och mottagarantennerna ges i fig. 6.2.



Figur 6.4. Kanalerna mellan sändar- och mottagarantennerna för ett 2x2 MIMO-system .

Från uttrycket för den maximala kapaciteten för ett MIMO-system kan vi alltså se att kapaciteten kan ökas linjärt med antalet sändarantennor, under förutsättning att antalet mottagarantennor är minst lika många. För att uppnå dessa imponerande kapacitetsvinster krävs dessutom, se ekvation (6.5) och (6.6), att tillräckligt många av egenvärdena av $\mathbf{H}\mathbf{H}^*$ ligger över brusegenvärdena, samt att de är av ungefär samma storleksordning. Detta kan endast uppnås i scenarion med betydande flervägsutbredning, annars kan de olika dataströmmarna som sänds från de olika antennerna (vid spatiell multiplexing) inte separeras i mottagaren. I en frisiktskanal utan flervägsutbredning finns endast ett starkt egenvärde och spatiell multiplexing ger då ingen kapacitetsvinst. I ett sådant fall bör istället lobformningstekniker användas.

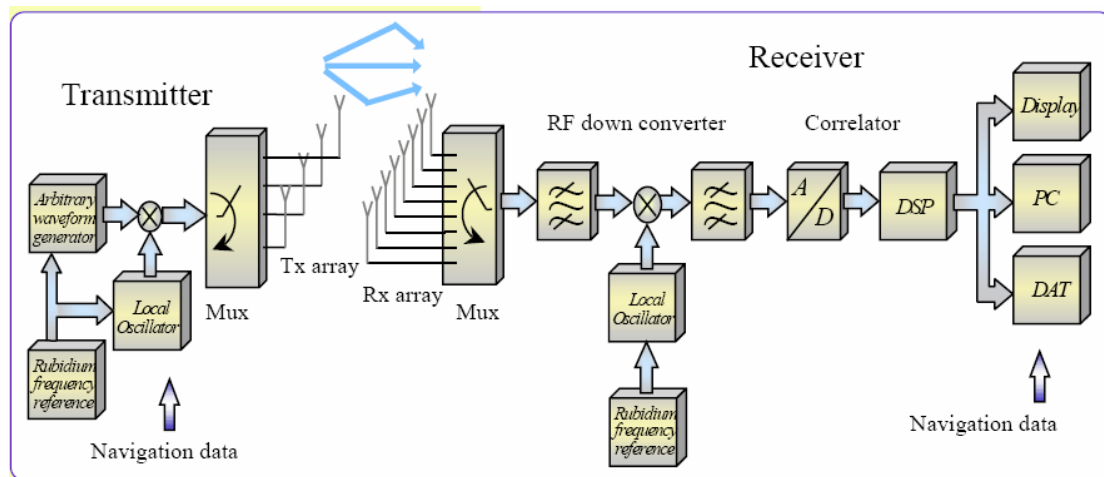
6.3 RUSK kanalsond

6.3.1 Funktionsbeskrivning

Mätsystemet levereras av det tyska företaget Medav Digitale Signalverarbeitung. Systemet består av en sändardel och en mottagardel. Sändarenheten är försedd med en vågformsgenerator som genererar en bredbandig testsignal anpassad för de kanalegenskaper man är intresserad av. Testsignalen består av en flertonssignal med en varaktighet i tiden i relation till kanalens uppskattade impulssvar. Denna blandas med lokaloscillatorfrekvensen och förstärks sedan i slutsteget för att via en multiplexer matas till respektive antennelement i sändarens gruppantenn. Mottagarens antennelement växlas med hjälp av en multiplexer, antennsignalen bandpassfiltreras och blandas ned till en mellanfrekvens på 60 MHz för att sedan digitaliseras med en 8-bitars A/D-omvandlare.

Korrelation och signalbehandling sker i en digital signalprocessor och resultatet lagras i en hårddiskarray för efterbearbetning, se figur 6.5.

Sändarsidan sänder signalen på ett av antennelementen och mottagarsidan mäter på varje antennelement i tur och ordning. Därefter växlas antennelement på sändarsidan och mottagarsidan upprepar sin mätsekvens. Växlingen mellan sändarantennelementen är synkroniserad med signalperioden på testsignalen, tidsintervallet mellan växlingen av mottagarantennerna är anpassat efter uppskattad maximal tidsspridning på kanalen. På så sätt mäts kanalens impulssvar för varje antennelement, med endast en sändarantenn aktiverad åt gången.



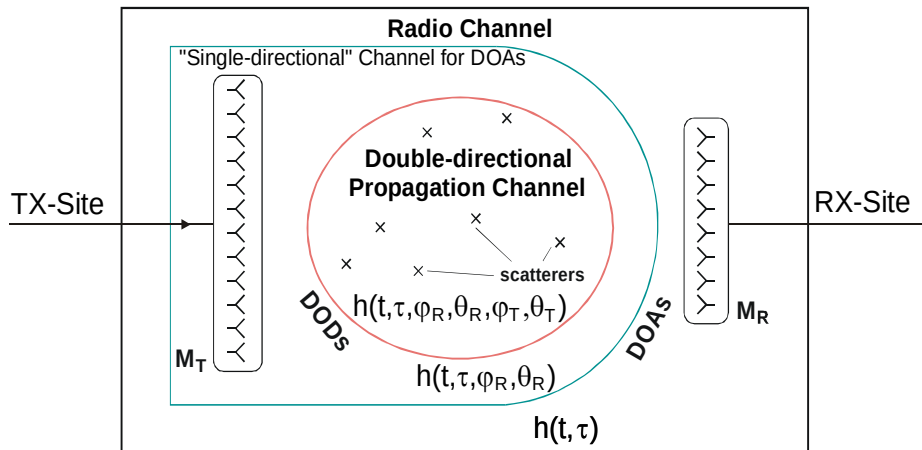
Figur 6.5. Blockschem (hämtad från www.channelsounder.de/medavdocs/).

6.4 Modellering av MIMO-kanalen

Syftet med mätningarna är att ge oss möjlighet att ta fram tillförlitliga dubbeldirektionella kanalmodeller med spatiell information för militärt intressanta scenarion. Kanalmodellerna ger oss sedan möjlighet att med god noggrannhet värdera och analysera prestanda för MIMO-system i framtida taktiska mobila kommunikationssystem.

Kanalbeskrivning med hjälp av överföringsmatrisen lämpar sig mycket väl för analytiska studier och en stokastisk beskrivning av MIMO-kanalen. En kraftfull analysmetod är att, utgående från kanalens korrelationsmatris, dela upp kanalen i egenmoder med tillhörande egenvärden. Ur dessa kan många kanalegenskaper identifieras; som till exempel kanalkapacitet, diversitetsgrad och lobformningsvinst.

Kanalbeskrivning med så kallad dubbel riktningsinformation är ett sätt att göra kanalbeskrivningen oberoende av de använda antennerna [Steinbauer m.fl., 2001]. På det sättet kan en och samma kanalbeskrivning användas för att till exempel utvärdera hur ett radiosystems prestanda påverkas av olika antenntlösningar, utan att nya mätningar behöver utföras. Varje identifierbar flervägskomponent karakteriseras med hjälp av utgående och ankommande riktning vid sändaren respektive mottagaren, dess fördröjning, dopplerskift, komplex amplitud och polarisation. Kanalmodellen kan schematiskt beskrivas med hjälp av figur 6.6.



Figur 6.6. Kanalmodell med dubbel riktningsinformation, illustrerad genom den inre röda ellipsen med en geometri av spridare. Den yttre rektangeln illustrerar kanalmodellen i signaldomän.

6.4.1 Extrahering av kanalparametrar

Om en kanalbeskrivning baserad på överföringsmatris önskas kan i princip resultatet från en kanalmätning användas direkt för att utvärdera kanalens egenskaper.

För att kunna beskriva en kanal med hjälp av en kanalmodell med dubbel riktningsinformation behöver kanalparametrarna bestämmas från inhämtat mätdata. För detta krävs i allmänhet så kallade högupplösande metoder. Med högupplösande menas att det är möjligt att särskilja signalkomponenter som skiljer sig mindre åt än den konventionella fourierupplösningen. Ett exempel på en sådan högupplösande algoritm är SAGE (Space-Alternating Generalized Expectation-maximization) [Fleury m.fl., 2002]. För evaluering av data från RUSK-systemet har en variant av denna algoritm implementerats.

Med hjälp av SAGE-metoden kan DOD (direction-of-departure) och DOA (direction-of-arrival) estimeras utifrån mätningarna. De ska sedan användas till att bygga upp de önskade dubbeldirektionella kanalmodellerna. Kalibrering av mätantennerna har inte kunnat slutföras och därför har vi ännu inte analyserat kanalens spatiella egenskaper med hjälp av SAGE-algoritmen. Tidigare har SAGE-algoritmen applicerats på mätningar som genomfördes på 5 GHz [Wyne m.fl., 2004]. Liknande information kommer då kalibreringen är färdig att tas fram även för mätningarna som genomfördes runt 285 MHz.

6.5 Antenner

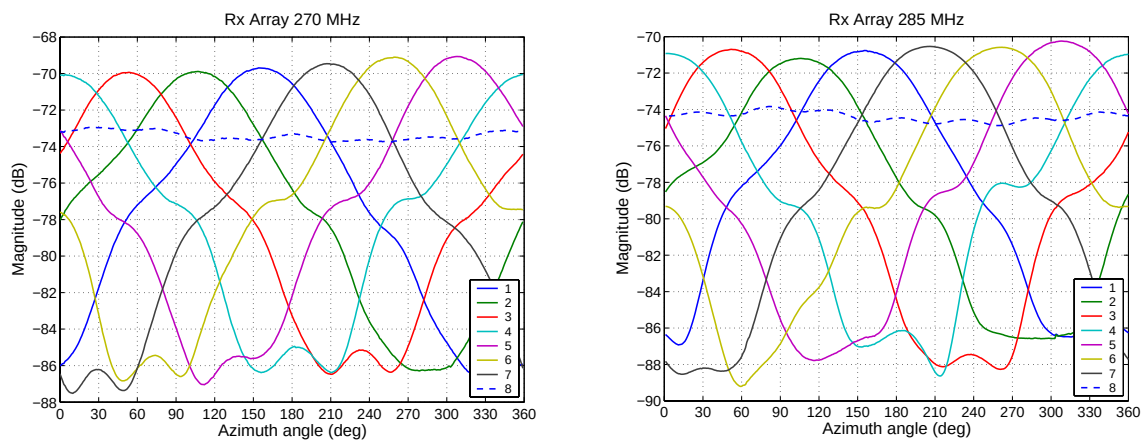
Mätantennerna utgör en mycket viktig komponent i en kanalsonderingsutrustning som skall användas för att generera kanalmodeller med dubbel riktningsinformation. Antennerna måste ha sådana egenskaper att de olika utbredningskomponenternas riktningar kan bestämmas entydigt vid respektive mätantenn. Vid användning av högupplösande estimeringsmetoder korreleras den mottagna signalen med den antagna signalmodellen, där antennens strålningsfunktion är en komponent. Det är därför av stor vikt att denna korrelationsfunktion har ett entydigt maximum och inte uppvisar starka sidlobar [Tan m.fl., 2002].

Sändar- och mottagargruppantennerna består av 8 stycken så kallade *sleeve*-dipolantennerna, där 7 antennelement är placerade i en cirkel runt ett 7-kantigt gallerjordplan medan ett antennelement istället är placerat centralt uppe på jordplanet, se figur 6.7. Jordplanet

fungerar som en reflektor och de 7 antennelementen får därmed en (halveffekts-) lobbredd som är i storleksordningen 100 grader. Centerelementet är däremot, i huvudsak, rundstrålande. Uppmätta strålningsdiagram för de olika antennelementen visas i figur 6.8, vid 270 och 285 MHz.



Figur 6.7. Antenn för MIMO-kanalmätningar. Jordplanets diameter är ca. 1.7 m.



Figur 6.8. Strålningsdiagram för de enskilda antennelementen. Den streckade kurvan (element 8) är strålningsdiagrammet för centrumelementet.

6.6 Resultat från kanalmätningar

Leverantören av mätsystemet, MEDAV, har haft stora problem med att få utrustningen att fungera tillfredställande, i synnerhet tilläggsmodulen som är avsedd för mätningar vid 300 MHz. Mycket arbete har tyvärr gått till att försöka få systemet funktionellt. Mätningar av antennernas strålningsdiagram har genomförts på antennmätplatsen AMPA i Arboga. På grund av problemen med mätsystemet har dock kalibreringsarbetet tagit mycket tid och kalibreringen är ännu inte slutförd. Kalibreringen är nödvändig för att kunna applicera bland annat SAGE-algoritmen på mätdata. Egenstörningar hos systemet begränsar fortfarande den möjliga räckvidden för kanalmätningarna, och på grund av problemen med mätsystemet kan vi än så länge endast presentera preliminära resultat från mätningar som är gjorda på ganska korta avstånd, omkring FOI i Linköping. Trots dessa kraftiga begränsningar så visar kanalmätningarna att det finns potential för att uppnå oerhört höga kapacitetsvinster även för dessa korta avstånd.

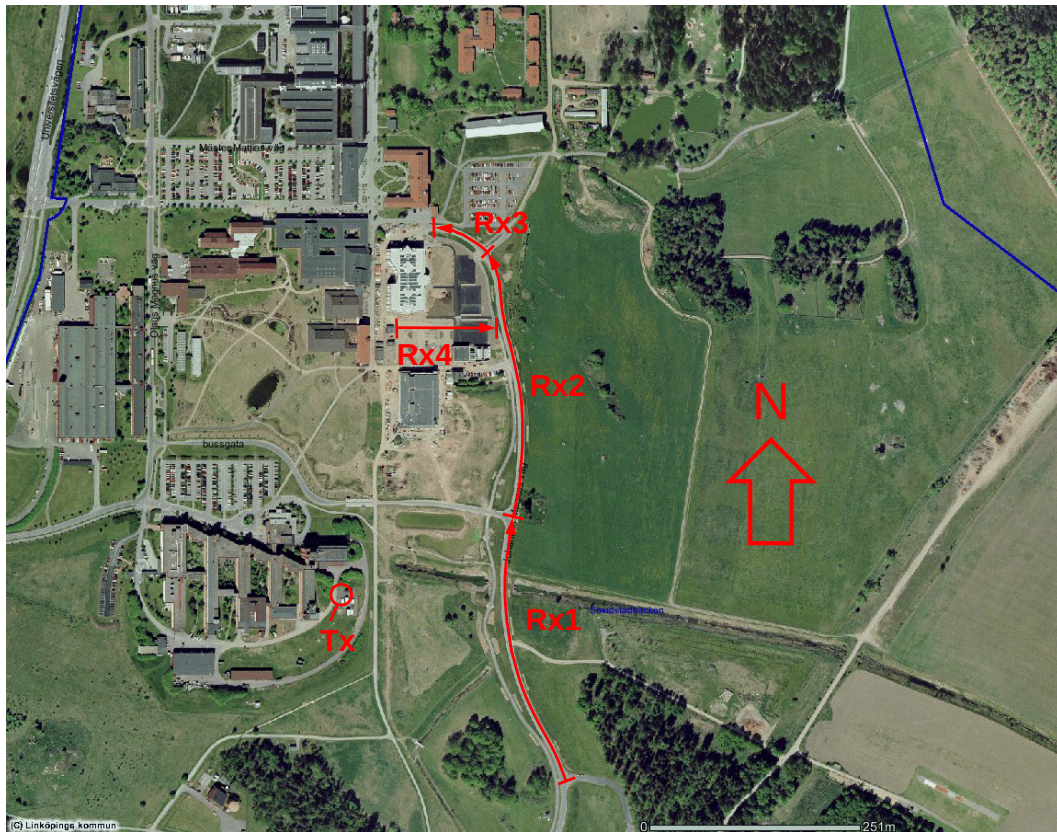
6.6.1 Scenario

De mätningar som presenteras här genomfördes i slutet av mars 2005, alldeles i utkanten av Linköpings universitets campusområde. Både sändaren och mottagaren var placerade i personbilar, med mätantennerna monterade på biltaken. Antennhöjderna var ungefär 1.6 och 1.9 meter för sändaren, respektive mottagaren. Sändaren var under mätningarna stationär medan mottagarbilen kördes längs de aktuella mätsträckorna. Avstånden mellan sändaren och mottagaren varierade mellan 180 och 450 meter. Mätdatainsamlingen initierades av pulser från en odometer, placerad på ett av mottagarbilens hjul. Avståndet mellan pulserna var 0.125 m.

Mätsignalen centerfrekvens var 285 MHz medan signalens bandbredd var 20 MHz. På grund av de låga antennhöjderna utgjordes en ganska liten del av mätningarna av rena frisiktssträckor, trots de mycket korta mätavstånden.

Mätningarna utfördes på fyra stycken delsträckor, i fortsättningen benämnda Rx1, Rx2, Rx3 och Rx4. De tre första av dessa är alla tagna längs den södra infarten till universitetet, se figur 6.7. I slutet på sträckan Rx1 och i början på Rx2 utgörs utbredningsförhållandena av i stort sett fri sikt. Mindre träd och buskar förekommer dock i siktlinjen även här. I mitten av Rx2 blir sträckan blockerad av en stor byggnad (Campushallen). Under mätsträcka Rx3 befinner sig mottagaren bakom stora byggnader, belägna relativt nära mottagaren. Rx4 är också blockerad av Campushallen, med undantag för den allra första delen av denna sträcka.

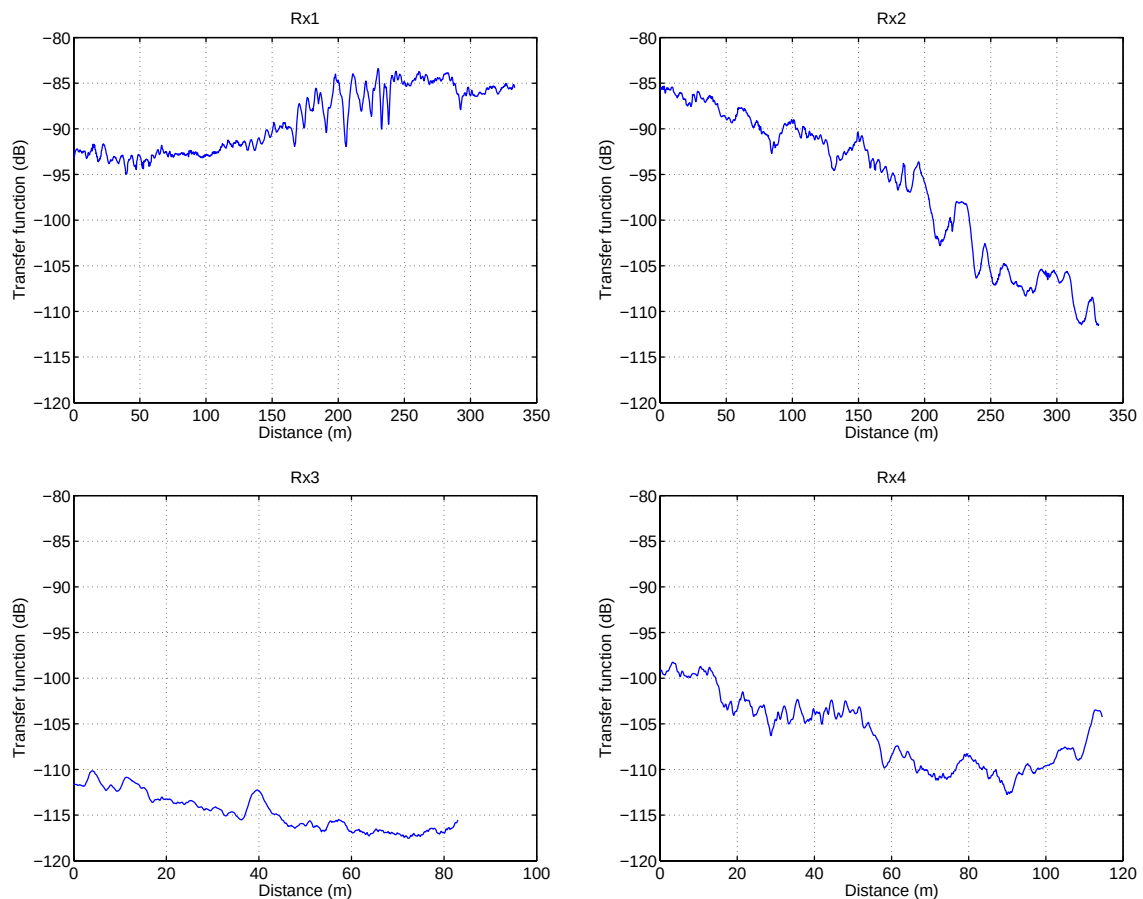
Utförligare analyser av mätdata har utförts i ett antal positioner längs de olika mätsträckorna. För Rx1 och Rx2 är det 8 positioner, och för Rx3 och Rx4 har 6 positioner längs vardera sträckan studerats. Eftersom det inte finns möjlighet att presentera analyserna för samtliga positioner här har vi valt att exemplifiera med resultat från två positioner. Vi har då valt de positioner som gav de bästa respektive de sämsta resultaten vad avser MIMO-prestanda. Dessa positioner (Rx3-1 och Rx2-1601) är startpunkten för sträcka Rx3 och en punkt belägen 200 m från start längs sträcka Rx2.



Figur 6.7. Flygfoto av försöksområdet. Sändarens position är markerad med en ring vid "Tx" och de olika mottagarsträckorna är markerade med röda pilar (Rx1 - Rx4). (Copyright Linköpings Kommun)

6.6.2 Överföringsfunktioner

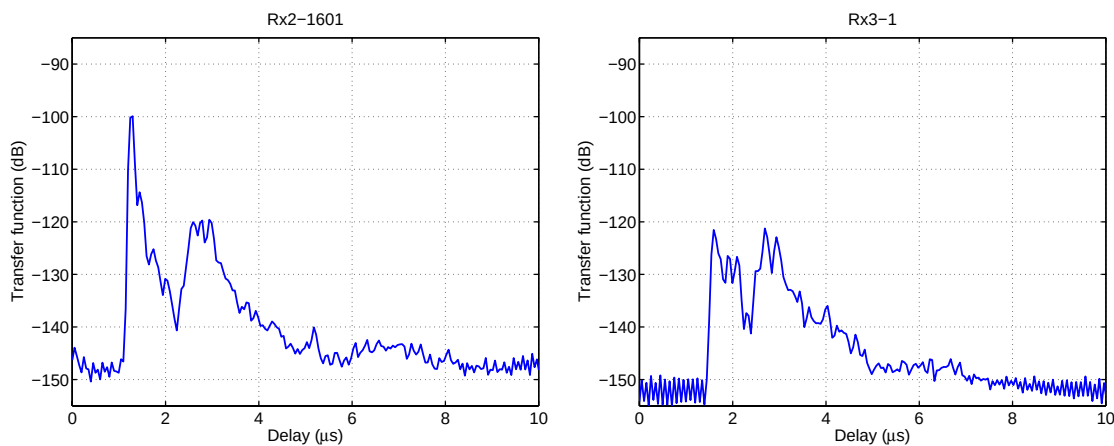
För att ge en överblick över utbredningsförhållandena inom mätområdet visas i figur 6.8 medelvärdet av överföringsfunktionen (som bland annat anger hur mycket kanalen dämpar signalen) längs de fyra mätsträckorna som funktion av avståndet längs respektive sträcka. Medelvärdesbildningen har skett över alla de 64 (8x8) spatiella kanalerna och över alla 257 frekvenserna inom mätbandbredden.



Figur 6.8. Överföringsfunktionens medelvärde som funktion av avståndet längs respektive mätsträcka.

6.6.3 Fördröjningsspektrum

Fördröjningsspektrum har beräknats genom att medelvärdesbilda effekten i impulssvaren för samtliga spatiella kanaler. Fördröjningsspektra för de två mätpositionerna visas i figur 6.9. I båda positionerna ser vi att den mottagna signalen är sammansatt av ett stort antal komponenter med olika tidsfördröjning. I den vänstra figuren är dock en relativt stor andel av den mottagna effekten koncentrerad till den första delen av fördröjningsprofilen



Figur 6.9. Kanals fördröjningsspektrum för de två mätpositionerna.

6.6.4 Beräkning av kanalkapacitet

Vid kapacitetsberäkningarna har de uppmätta överföringsmatriserna normaliserats så att

$$\frac{1}{n_{Rx} n_{Tx} N} \sum_{i=1}^N \|H(i)\|_F^2 = 1, \quad (6.8)$$

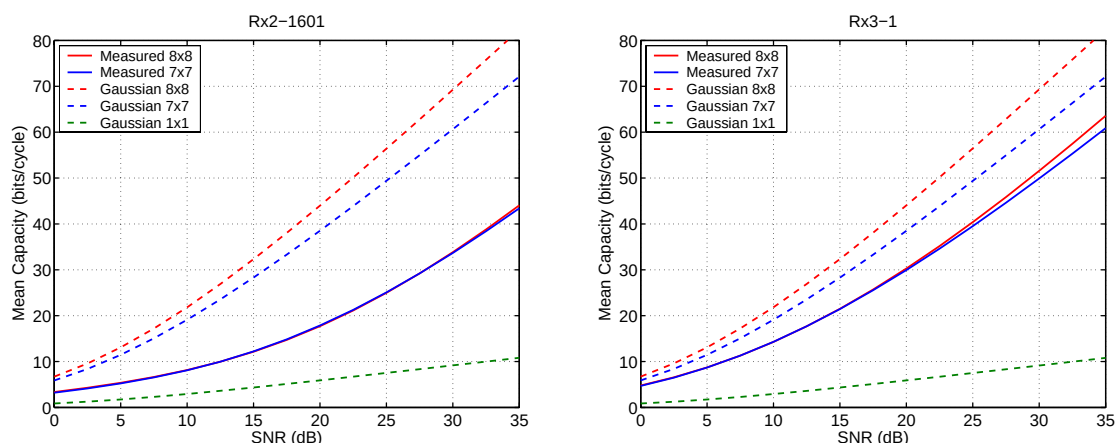
dvs medeleffekten i den normaliserade överföringsmatrisens element är 1 över de N realiseringar som beaktats.

MIMO-kanalens medelkapacitet har beräknats genom medelvärdesbildning av kapacitetsuttrycket i (6.5) över de 254 kanalrealiseringarna i frekvensdomänen. (Tre frekvenser av de totalt 257 har undantagits på grund av smalbandiga egeninterferenser i mätsystemet.)

I figur 6.10 visas medelkapaciteten som funktion av SNR för de två mätpositionerna. För 8x8 fallet har samtliga antennelement i mätantennen använts. I 7x7 fallet har mätantennens eleverade centrumelement uteslutits. Som framgår av figuren är skillnaderna med och utan centrumelement mycket små för dessa positioner. Om alla signalkomponenter ligger i horisontalplanet bör det extra antennelementet teoretiskt inte tillföra nämnvärt. För andra mätpositioner som varit direkt bakom hus har något större skillnader noterats.

Om vi först studerar kapaciteten vid 30 dB så ser vi att kapacitetsvinsten som kan uppnås genom att använda spatiell multiplexing i de här mätningarna varierar från ungefär 3.5 ggr till mer än 5 ggr. De potentiella kapacitetsvinsterna är imponerande stora. Om vi istället analyserar resultaten för en fix kapacitet på 10 (bits/cycle) så kan den vid spatiell

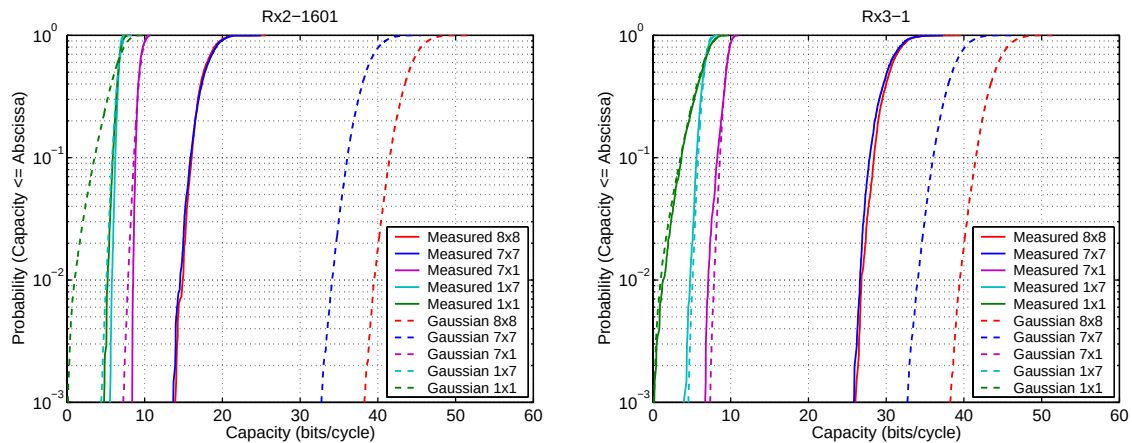
multiplexing i bästa fall uppnås redan vid ett SNR på mellan 7-12 dB över scenariot, medan det för SISO-fallet krävs över 30 dB. Det är därmed omöjligt att uppnå motsvarande kapacitetsvinster som kan uppnås vid MIMO genom att t.ex. öka sändareffekten.



Figur 6.10. Medelkapacitet som funktion av SNR för de två mottagarpositionerna, uttryckt i bitar/s/Hz. De heldragna kurvorna är resultat från mätningar och de streckade är resultat för överföringsmatriser med oberoende komplext normalfördelade element. De streckade linjerna anger därmed de högsta möjliga kapaciteterna som kan uppnås, medan mätningarna visar hur höga kapaciteter som är möjliga att uppnå specifikt för de uppmätta kanalerna. De röda kurvorna gäller för ett MIMO-system med 8 sändar- och mottagarantennerna, medan de blå kurvorna är för 7 antennelement. Den gröna kurvan visar kapaciteten för ett SISO-system.

Vid utvärdering av radiosystems prestanda är i allmänhet kapacitetens fördelningsfunktion mera intressant än medelvärdet. Uppmätta fördelningsfunktioner för kapaciteten för SISO, MISO, SIMO och MIMO visas i figur 6.11 tillsammans med motsvarande fördelningsfunktioner för Rayleighfäddande överföringsmatriser. Kapaciteterna gäller för situationen då sändaren inte har kanalinformation. MISO innebär då sändningsdiversitet (lobformningsvinst är inte möjlig).

I de allra flesta undersökta mätpositionerna kan betydande diversitetsvinster uppnås. I den högra av figurerna nedan ser vi t.ex. att kapaciteten vid 0.01-nivån genom sändnings och mottagningsdiversitet kan ökas från knappt 2 bps/Hz till 5 respektive 7 bps/Hz. I den vänstra figuren är kapacitetsvinsterna relativt små på grund av att denna kanal uppvisar begränsad fäddning. Troligen beroende på en stark LOS-komponent vilket kan ses i figur 6.9. De möjliga kapacitetsvinsterna som kan uppnås genom spatiell multiplexing överträffar vida vad som kan erhållas genom enbart diversitetsmetoder.

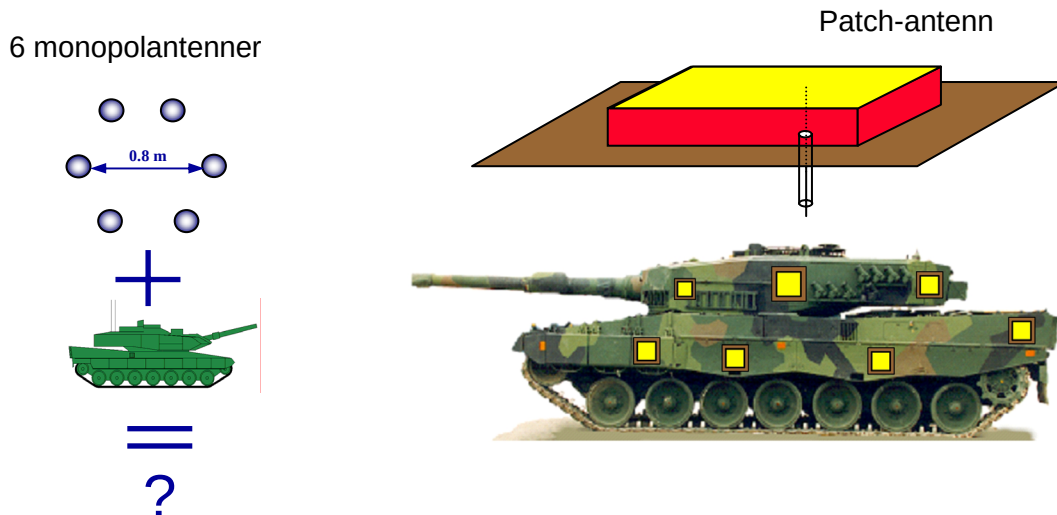


Figur 6.11. Kanalkapacitetens fördelningsfunktioner vid de två mottagarpositionerna. De olika färgerna anger kapaciteten för SISO- (1x1), MISO- (1x7), SIMO- (7x1) och MIMO-kanalen (7x7 och 8x8). De heldragna kurvorna är resultat från de uppmätta kanalerna medan de streckade är kapaciteterna för överföringsmatriser med oberoende komplext normalfördelade element.

6.6.5 Diskussion

Kanalmätningarna har genomförts med ett mätsystem som är designat specifikt för att möjliggöra en karakterisering av kanalens spatiella egenskaper. Vid en användning av MIMO-system i framtida taktiska kommunikationssystem kommer bland annat antennsystemet att se annorlunda ut, vilket kommer att påverka de prestandavinster som kan uppnås. I praktiken är det sannolikt möjligt att använda mellan 4 och 8 antenner, t.ex. i form av monopolantennerna placerade på tornen på stridsfordon och stridsvagnar eller som strukturintegrerade patch-antennerna på fordonssidorna. Kapacitetsvinsten som kan uppnås genom spatiell multiplexing om endast 4 antenner används kommer att vara lägre än de som indikeras i mätningarna ovan. Däremot så är det troligt att antennerna då kommer att ha en större separation och det leder till en lägre korrelation mellan antennerna, och därmed en högre relativ kapacitet. Polarisationsdiversitet kan förbättra prestandan ytterligare, speciellt i urban miljö.

Mätningarna har indikerat att de potentiella kapacitetsvinsterna är oerhört stora även för de relativt korta avstånd där mätningarna genomfördes. I praktiken kommer kommunikationsavstånden att vara betydligt längre och i de flesta urbana scenarier förväntar vi oss också att flervägsutbredningen kommer att vara kraftigare även för motsvarande avstånd. Den kraftigare flervägsutbredningen som sannolikt uppstår i taktiska tillämpningar, för t.ex. en mekaniserad bataljon som opererar i urban miljö, förväntas öka den möjliga kapacitetsvinsten vid spatiell multiplexing.



Figur 6.12. Exempel på möjliga antennplaceringar på stridsvagn 122.

Kanalestimering måste genomföras i mottagaren och vissa förluster i t.ex. kapacitet bör förväntas pga icke-perfekt kanalkunskap. I MIMO-system måste dessutom kanalerna från alla sändarantennerna estimeras och det kan, i vissa fall, innebära att de måste estimeras sekventiellt, vilket då kan reducera de kapacitetsvinster som kan uppnås.

Kvarvarande utmaningar inför införandet av MIMO-system i taktiska tillämpningar:

- Kunskapen om kanalens spatiella egenskaper behöver fördjupas för militära scenarion för vissa frekvensområden (t.ex. vid 300 MHz). Utan denna kunskap kan inte MIMO-teknikers prestanda i militära radiosystem värderas tillförlitligt. Nya mätningar måste genomföras och förfinade kanalmodeller behöver tas fram.
- Design av antennsystemet för militära plattformar, bland annat typ av antennelement, antal antennelement och placering för dessa, samt plattformens (t.ex. strv122/strf90) påverkan på det resulterande strålningsdiagrammet (fig. 6.12).
- Design av OFDM-system som effektivt kan kombinera adaptiv modulation och MIMO-tekniker. Adaptiv modulation är en förutsättning för att kunna uppnå höga kapaciteter och robusthet i taktiska radiosystem.
- Analyser av MIMO-systemens påverkan på nätprestanda, bland annat hur länkförbättringar påverkar nätkapaciteten i mobila ad hoc-nät, och uppfyllnadsgrad (QoS) för önskade kommunikationstjänster.
- Samdesign (s.k. cross-layer) av MIMO-system och högre lager (t.ex. MAC och routing). Modifikationer av de högre lagren är nödvändiga för att användaren fullt ut ska kunna utnyttja prestandavinsterna som uppnås på länknivån, se t.ex. [Dyberg m.fl., 2002] eller [Eklöf och Rantakokko, 2003].
- Vidareutveckling av MIMO-algoritmer, t.ex. metoder som automatisk anpassas till omgivningen och väljer den för stunden bästa tekniken, och som kan uppnå en bra *trade-off* mellan diversitet – kapacitet – störskydd.

7 Fri optisk kommunikation

Laserkommunikation, eller fri optisk kommunikation som det också brukar kallas, är en teknik som kan komma att bli allt vanligare i framtiden som ett alternativ eller komplement till radiokommunikation. Det är framförallt möjligheten till att konstruera system med mycket hög bandbredd som gör tekniken intressant. Systemen kan därtill göras ytterst svåra att störa ut och svåra att avlyssna. Då laser utnyttjas för exempelvis avståndsmätning och målutpekning finns möjlighet till flerfunktionssystem som även innefattar kommunikationslänkar. Prestanda och tillgänglighet för optiska länkar påverkas dock av atmosfären och dess sammansättning. Rök, dis, dimma och regn är faktorer som kan begränsa prestanda för länken.

Kommersiellt finns idag redan system med hög bandbredd för fast installation mellan byggnader. Inom KOMET-projektet har laserkommunikation kallad retrokommunikation studerats. Retrokommunikation är en typ av assymetrisk kommunikation där lasern bara finns i ena änden av länken, något som kan förenklar konstruktionen och underlättar inriktningen av sändarenheten. Vidare har koncept där fri siktsträcka inte kan uppnås studerats, där väggar eller atmosfären används för att reflektera laserstrålningen vidare mot mottagaren.

8 Laserkommunikation utan fri siktsträcka

Laserkommunikation har vanligtvis begränsningen att en fri siktsträcka krävs mellan sändare och mottagare. Inom KOMET-projektet har två möjligheter till laserkommunikation studerats, där fri siktsträcka inte krävs och som skulle kunna användas i urban miljö; Kommunikation via väggregreflexioner samt ultraviolett kommunikation.

8.1 Kommunikation via väggregreflexioner

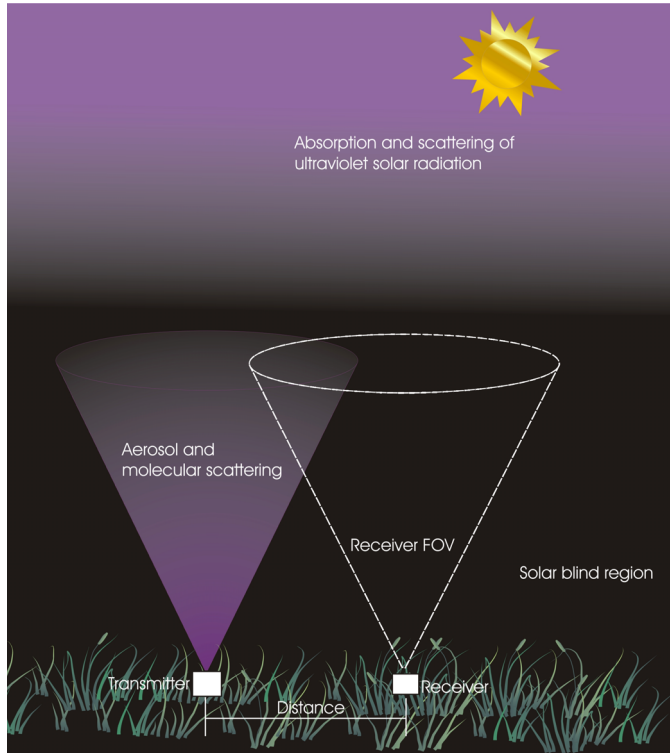
Möjligheten finns till att kommunicera med hjälp av en laser som riktas in mot lämplig byggnad eller punkt i terrängen och där en mottagare riktas in mot samma punkt. Möjligheten finns till en mycket hög bandbredd om laserloben hålls smal. En hög bandbredd innebär att mottagaren måste ha ett smalt synfält och den kräver därför en inriktningsnoggrannhet i samma storleksordning som lasersändaren. Det som till största del begränsar räckvidden för ett sådant system är laserns uteffekt och bandbredden. Små lasrar med hög effekt som är modulerbara för en hög bandbredd är idag inte vanliga, men utvecklingen sker ständigt inom området. En högre bandbredd innebär ett större brus i detektorn och därmed en kortare räckvidd. En annan faktor som kan begränsa räckvidden för ett tänkt kommunikationssystem är ögonsäkerheten, även om det kommer fler och fler lasrar med våglängd omkring 1,5 μm vilka är ögonsäkra upp till höga effektnivåer. Mer om kommunikation via väggregreflexioner finns att läsa i [Sakari och Pettersson, 2003].

8.2 Ultraviolett kommunikation

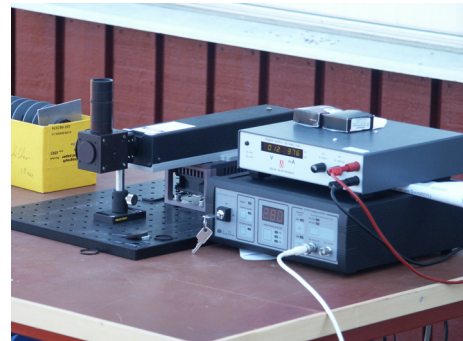
Alternativet till att använda radio kan vara en optisk länk med överföring i det ultravioletta våglängdsbandet. En sådan länk skulle kunna fungera genom utnyttjande av bakåtspridningen från aerosoler och molekyler i atmosfären. Både sändare och mottagare riktas rakt upp i luften, och förhoppningen är att kunna bygga länkar med hundratals meter mellan sändare och mottagare. Figur 8.1 illustrerar principen för ultraviolett kommunikation. Den strålning som solen sänder ut med våglängd mindre än 280 nm

absorberas till allra största del i atmosfären, vilket innebär att bakgrundsbruset orsakat av solen blir mycket litet. Endast ett fåtal fotoner per sekund når en detektor placerad vid jordytan. Våglängdsbandet under 280 nm kallas därför det solblinda området. Om ett lämpligt filter används kan en mycket känslig mottagare konstrueras. Eftersom dämpningen av strålning i det solblinda våglängdsbandet är hög, innebär det också att röjningsrisken på längre avstånd (> 1 km) är minimal. Den senaste tidens utveckling av kompakta och strömsnåla laserkällor samt utvecklingen av kompakta och känsliga detektorer kan möjliggöra den här typen av kommunikation.

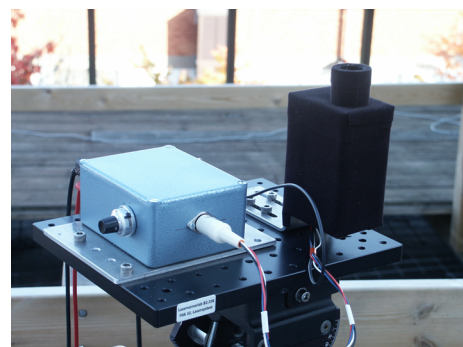
Under 2004 genomfördes inledande försök inom KOMET-projektet med att undersöka konceptet ultraviolett kommunikation. Testerna genomfördes utomhus och med en laser med våglängden 355 nm, i brist på källor i det solblinda våglängdsbandet. Eftersom laserns våglängd var utanför det solblinda området var detektorn begränsad av bakgrundsljuset, d v s solljuset, och försöken genomfördes därför efter skymning. De inledande försöken gav goda resultat och visade på en god möjlighet till att använda ultraviolett laser för kommunikation. Resultaten ledde vidare till ett internfinansierat uppdrag under 2005, med avsikt att undersöka konceptet djupare. En laser med våglängd i det solblinda området (266 nm) har köpts in och en detektor med mycket lågt brus i fullt dagsljus har använts vid ett antal mätningar. Mätningarnas syfte är undersöka hur spridningen i atmosfären möjliggör kommunikation, t ex vilka effektkrav som finns och vilka räckvidder som är möjliga. Därtill ska det undersökas hur olika väder inverkar på spridningen i atmosfären, samt om det finns en möjlighet att konstruera mottagare som inte begränsas av brus orsakat av solen. Figuren 8.2 och 8.3 visar den sändare respektive mottagare som byggts vid FOI.



Figur 8.1. Principen för ultraviolett kommunikation.



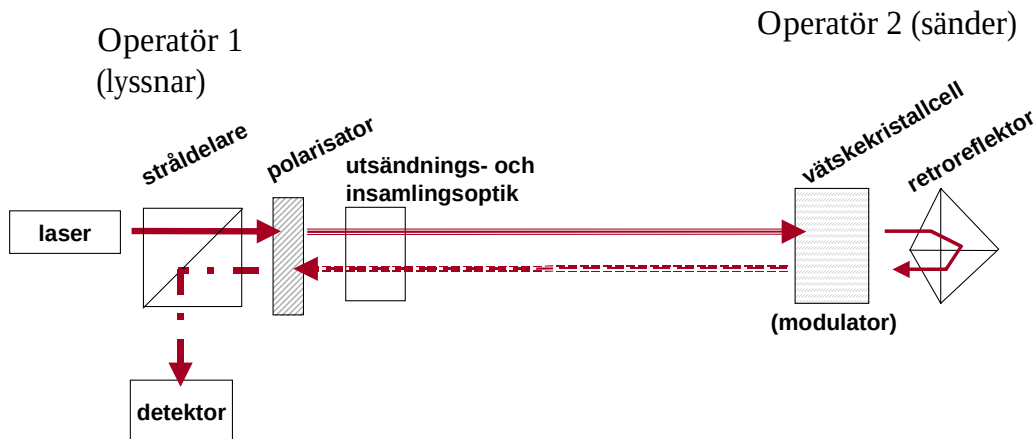
Figur 8.2. Sändare.



Figur 8.3. Mottagare.

9 Retrokommunikation

Principen och tekniken bakom retrokommunikation har beskrivits mer ingående i en tidigare KOMET-rapport [Sakari m.fl., 2004]. Figur 9.1 visar principen, där sändaren består av en retroreflektor, som gör att strålen går tillbaka i samma riktning som den kommer in, och en modulator, som påför data antingen i laserstrålningens intensitet eller i dess polarisation. I figuren visas polarisationsmodulering.

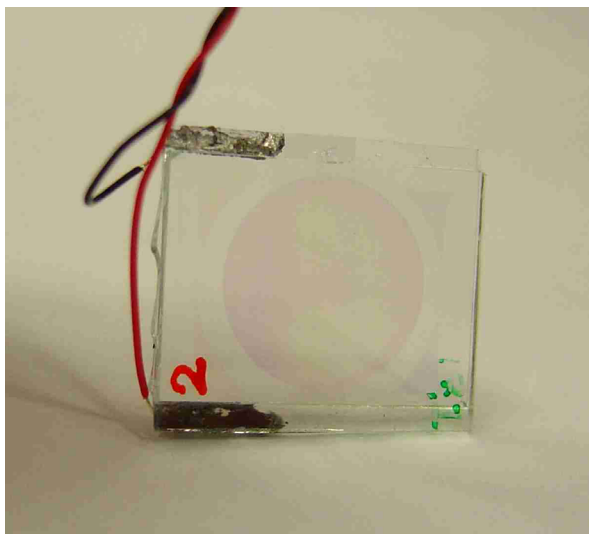


Figur 9.1. Principen för retrokommunikation, med polarisationsmodulering.

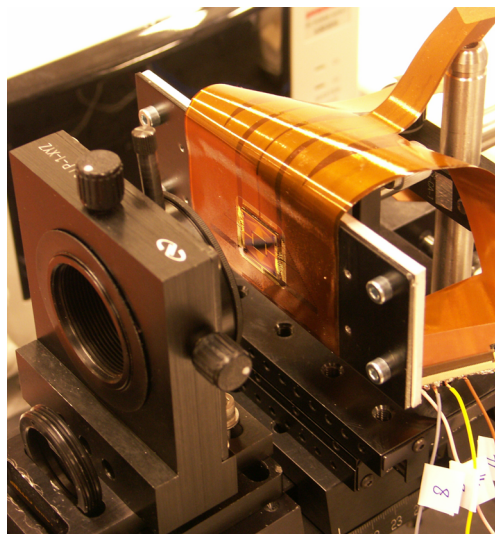
Polarisationsmodulering kan ske med vätskekristallmodulatorer. Sådana modulatorer finns framtagna på FOI med hjälp ifrån Chalmers tekniska högskola, CTH [Öhgren och Wahlberg, 2004]. Dessa modulatorer är uppbyggda av ferroelektriska vätskekristaller i ett tunt skikt mellan två glasskivor. Figur 9.2 visar en sådan modulator. Modulatorens transmissivitet och kan därför monteras framför en retroreflektor. Vätskekristallcellen har egenskaper som gör det möjligt att med en påförd spänning över den vrida polarisationsriktningen hos inkommande laserstrålning. Vid mottagaren används en polarisator som omvandlar polarisationsmoduleringen till en intensitetsmodulering för att möjliggöra detektion med en detektor. Polarisatorn ger reflexion av ena polarisationsriktningen och transmission av den andra.

Möjligheten finns också till att bygga modulatorer med kvantbrunnsteknik. Kvantbrunnsmulatorer är lämpliga för att åstadkomma höga överföringshastigheter. Till skillnad mot vätskekristallmodulatorerna sker moduleringen i laserstrålningens intensitet och inte i dess polarisation. I försök som har gjorts av Naval Research Institute (NRL) i USA har länkar med 5 Mbit/s använts på 2 km avstånd [Rabinovich m.fl., 2005]. Från svensk sida har Acreo i Kista utvecklat olika slags kvantbrunnsmulatorer, vilka sedan utvärderats på FOI. Bildsekvenser och ljud har överförts på 100 meters avstånd. Bithastigheten låg på omkring 10 Mbit/s [Sjöqvist m.fl., 2004]. Försöken inkluderade även icke-mekanisk strålstyrning mot modulatorens. Den teknik som använts i tillverkningen av modulatorens, "multiple quantum well (MQW)", medger i teorin bithastigheter över 1 Gbit/s.

Under hösten 2005 har FOI utvärderat en ny kvantbrunnsmulator från Acreo. Den består av 64 långsmala pixlar med måtten $2 \text{ mm} \times 80 \text{ }\mu\text{m}$ som ligger bredvid varandra i en dimension. Modulatorens visas i figur 9.3. Varje pixel kan fungera som både sändare (modulator) och mottagare (detektor) och modulatorens kan betjäna flera länkar samtidigt. Konstruktionen blir mer kompakt, då sändare och mottagare ryms i samma komponent.



Figur 9.2. Vätskekristallmodulator av transmissiv typ, 15 mm i diameter.



Figur 9.3. Kvantbrunnsmulator med detektor, 64 pixlar.

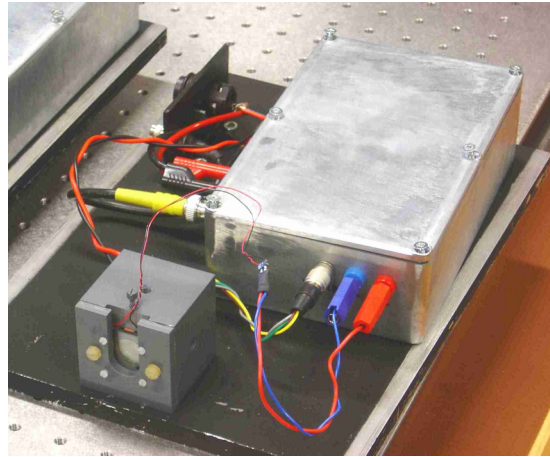
9.1 Mätningar med retrokommunikationslänk

Ny drivelektronik för vätskekristallmodulatorerna konstruerades under våren 2005 och efter det utfördes nya försök med retrokommunikationslänkar. Bland annat gjordes ett nytt försök med en kommunikationslänk mellan två byggnader. På liknande sätt som vid tidigare försök under 2004 [Sakari m.fl., 2004] placerades utrustningen i varsitt rum i två olika byggnader med fri sikt mellan. Avståndet var cirka 150 meter och strålgången gick utomhus några meter över taken på andra byggnader (se figur 9.4).

Vid mätningarna användes en lasertransceiver innehållande laser, optik och detektorer (se figur 9.4). Transceivern var konstruerad med två detektorer som mätte två polarisationsriktningar samtidigt, vilket ger möjlighet att minska störningarna från turbulensen. För att öka avståndet mellan sändare och mottagare placerades en spegel i den andra byggnaden 150 meter bort, medan modulaton placerades i samma rum som transceivern. De två vätskekristallmodulatorerna användes en åt gången tillsammans med den nya drivningen (se figur 9.5).

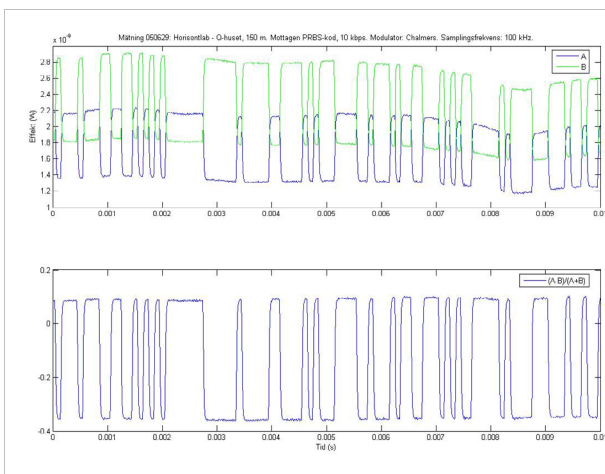


Figur 9.4. Lasertransceiver (mottagare).

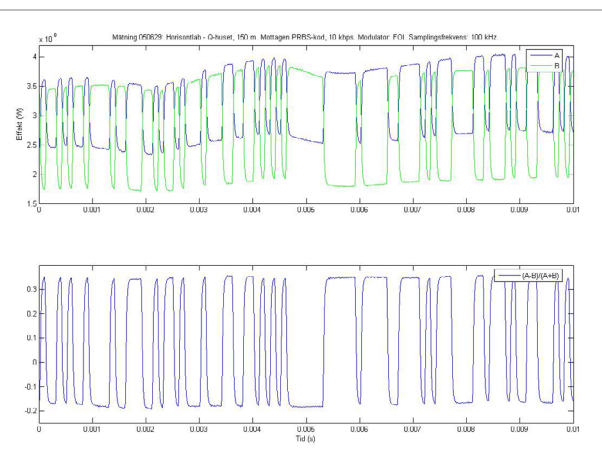


Figur 9.5. Retromodulator med drivning och temperaturreglering (sändare).

Två typer av modulatorer användes, en som var tillverkad på FOI (beteckning F), och en som var tillverkad på Chalmers (beteckning CH). Jämfört med tidigare kunde bithastigheten ökas i den nya utrustningen. Båda modulatorerna klarade av 10 kbit/s. Den mottagna signalen i transceivern visas i figur 9.6 och 9.7. De övre graferna visar detektionen hos de två kanalerna (A och B), medan den undre visar skillnadsdetektion beräknad som $(A-B)/(A+B)$. Signalen som överfördes var en PRBS-kod (Pseudo-Random Bit Sequence) som efterliknar en ordinär bitström i kommunikationssammanhang. Fluktuationerna som uppstod i signalstyrkan på grund av turbulens var lätta att komma till rätta med tack vare att två detektorer och skillnadsdetektion utnyttjades. Modulator F uppvisade bäst modulationsdjup (ca 0,3) men hade inte lika hög bandbredd som modulator CH (vars modulationsdjup gick ned till hälften vid 35 kHz.)



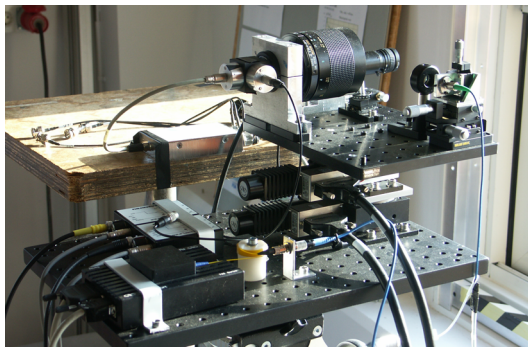
Figur 9.6. Exempel på mottagen signal, CH-modulator.



Figur 9.7. Exempel på mottagen signal, F-modulator.

Vätskekristallmodulatorerna av F- och CH-typ har under sommaren 2005 provats även på längre avstånd. Modulatorerna har då monterats i en större låda (figur 9.9). Anledningen är att lådan ska användas i ett annat FOI-projekt och sättas upp i en tv-mast på 120 meters höjd och på 7 kilometers avstånd från mottagaren som ska placeras innanför ett fönster. Detta kan ses som en förberedelse för att kunna kommunicera optiskt till obemannade flygfarkoster.

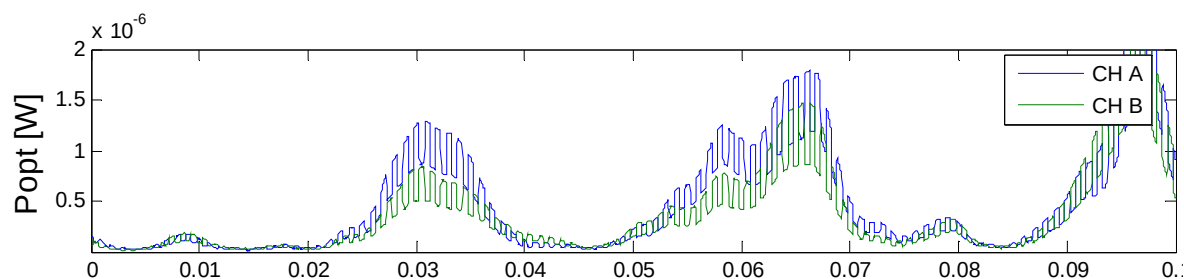
Lådan med modulatorerna flyttades ut på fälten utanför FOI; som längst var avståndet 1,4 km. Lådan fick stå på en vagn strax ovanför marknivån och strålen gick över ett område med fält, buskar och vägar till transceivern som fanns inne i en byggnad på cirka 10 m höjd (Figur 9.8) Försöket utfördes en varm sommardag i augusti när det var påtaglig turbulens i luften. Det visade sig att kommunikationssignalen var ganska svag när den togs emot i transceivern, och därför kopplades en erbium-dopad fiberförstärkare (EDFA) in för att öka lasereffekten. Därigenom förbättrades signalen något, men den var fortfarande svag. Ett exempel på den detekterade signalen visas i figur 9.9. En närmare undersökning med hjälp av en kamera avslöjade att laserstrålens intensitetsprofil inte var jämn, och dessutom förekom scintillationer. Vidare försök kommer att genomföras i andra projekt i framtiden.



Figur 9.8. Lasertransceivern i horisontlabbet på FOI.



Figur 9.9. Låda med två modulatorer i. Lådan uppställd för kommunikation till lasertransceivern i byggnaden i bakgrunden. Avståndet är cirka 1,4 km och strålgången går över fält och vägar.



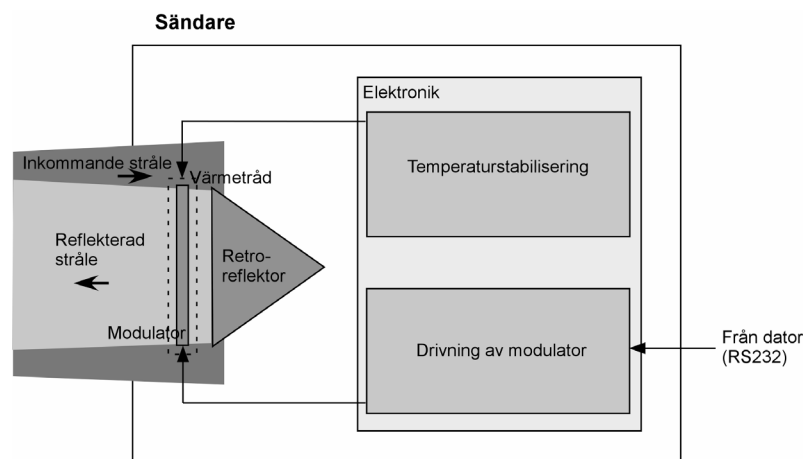
Figur 9.10. Exempel på detekterad signal på 1,4 kilometers avstånd, för de två detektorerna CH A och CH B.

9.2 Demonstration av retrokommunikation

Under november och december 2005 kommer vi att demonstrera Retrokommunikation, dels på Försvarshögskolan i Stockholm och dels i Försvarets utvecklingscentrum i Enköping. Ett demosystem håller därför på att byggas. Systemet består av en kompakt sändare innehållande en retromodulator och en handhållen mottagare innehållande bland annat en laser och en detektor. Vid demonstrationerna kommer bild- och ljudöverföring att visas. Överföringen kommer att ske i en riktning (simplex) från en dator till en annan och överföringshastigheten kommer att vara upp till 115 kbit/s. Här nedan beskrivs sändaren och mottagaren som håller på att byggas.

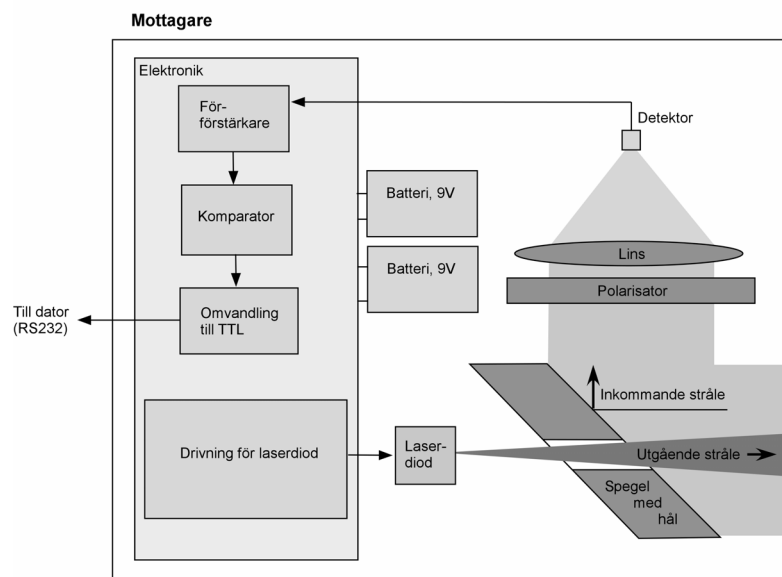
Sändaren består av en modulator, en retroreflektor, drivning av modulaton och temperaturreglering (fig. 9.11). Modulaton är en glascell fylld med ferro-elektriska vätskekristaller, en modulortyp som studerats och använts vid mätningar i KOMET-projektet [Sakari m.fl. 2004]. Moduleringen sker i polarisationen hos laserstrålningen och polarisationen kan påverkas genom en pålagd spänning över glascellen. Modulaton är transmissiv och sitter framför retroreflektorn. Retroreflektorn är en hörnkub som alltså har egenskapen att inkommande stråle går tillbaka i samma riktning som den kom in. Snabbheten i omslag och modulationsdjupet är två faktorer som beror på temperaturen hos vätskekristallen. Temperaturen hos modulaton är därför stabiliserad med hjälp av reglerelektronik som reglerar temperaturen till ca 30°, en temperatur som ger en bra kompromiss mellan bandbredd och modulationsdjup. Temperaturen läses av av en sensor placerad mot glaset på modulaton.

Från datorn skickas data via RS232 till drivkretsen för modulaton. Drivkretsen omvandlar TTL-nivåerna och driver modulaton med en spänning på +36 V för logisk etta och -36 V för logisk nolla. På detta sätt vrids polarisationen hos inkommande laserstrålning mellan två lägen. Laserstrålningen med data modulerad i polarisationen går sedan rakt tillbaka mot mottagaren.



Figur 9.11. Sändare med retromodulator och elektronik.

Mottagaren innehåller en laserdiod som drivs med en konstant ström. Lasern är kontinuerlig och skickar ut en divergent stråle genom ett litet hål borrarat genom centrum av en spegel. Spegeln används för att reflektera in strålen som kommer tillbaka från retromodulatorn mot en polarisator och en lins som fokuserar ner strålningen på detektorn. Den strålning som kommer in mot mottagaren är som tidigare beskrivits polarisationsmodulerad och den har därmed en konstant effektnivå (amplitud). Polarisationen gör att signalen istället blir amplitudmodulerad och därmed kan detekteras av detektorn. Signalen förstärks och högpasfilteras (AC-kopplas) för att sedan kopplas in till en komparator som avgör bitsekvensens innehåll av ettor och nollor. Därefter omvandlas signalen till TTL-nivå igen för att kunna kopplas in i datorn via RS-232. Figur 9.12 visar hur mottagaren är uppbyggd.



Figur 9.12. Mottagare med laserdiod, optik och elektronik.

10 Översikt av tekniker som kan förbättra prestanda i retrokommunikationssystem

I de existerande experimentssystemen för retrokommunikation är det i huvudsak hårdvaran, i form av retromodulatorens, som begränsar modulationshastigheten och därmed även överföringskapaciteten [Sakari m.fl., 2004; Sjöqvist m.fl., 2004; Ögren och Wahlberg, 2004]. I [Rantakokko, 2005] studerades huruvida olika radiosignalbehandlingstekniker kan användas för att förbättra prestanda i retrokommunikationssystem. Målet var både att försöka förbättra datatakten under goda förhållanden samt att minimera turbulensens och den varierande atmosfärsdämpningens negativa effekter. Prestanda kan givetvis även förbättras genom att vidareutveckla de ingående hårdvarukomponenterna i ett retrokommunikationssystem.

Sammanfattningsvis kan prestanda för ett retrokommunikationssystem förbättras på bl.a. följande sätt:

- ✓ Anpassa beprövade signalbehandlingstekniker som används i radiosystem, t.ex. felrättande kodning, flernivåmodulation, adaptivitet och diversitet, till retrokommunikationssystemets speciella förutsättningar.
- ✓ Förbättrad målföljning av retromodulatorens vid höga mobiliteter, t.ex. genom användning av s.k. "tip-tilt" speglar som snabbt kan göra små korrigeringar av laserns strålriktning.
- ✓ Snabbare retromodulatorer (med bibehållen modulatorarea).
- ✓ Adaptiv optik för att reducera turbulensens påverkan.
- ✓ Förbättrade lasrar med högre uteffekt och minskad divergens.
- ✓ Effektivare optiska filter som reducerar det optiska bakgrundsbruset.

10.1 Överföringskanalens egenskaper

En viktig faktor som begränsar prestanda för ett retrokommunikationssystem är den överföringskanal som laserstrålen färdas igenom [Zhu och Kahn, 2002]. Atmosfärsdämpningen kan variera kraftigt för ett laserkommunikationssystem beroende på väderleken, se tabell 10.1, och vid svåra förhållanden som kraftig dimma eller kraftigt regn är det i praktiken nästan omöjligt att överföra information annat än för korta avstånd.

Turbulens i atmosfären orsakas av att atmosfärens temperatur och tryck varierar, vilket resulterar i ett variabelt brytningsindex där laserstrålen passerar. Turbulens i atmosfären orsakar variationer i mottagen signalstyrka, s.k. fädning, pga strålvandring och scintillationer. Turbulensen orsakar även en breddning av strålen vilket minskar signalenergin i detektorn. Turbulensen är kraftigast där strömmar av kall och varm luft möts, t.ex. nära marken, fönster eller väggar, och turbulens kan därmed utgöra ett problem speciellt vid användning i urbana miljöer. Turbulensens inverkan på systemets prestanda ökar dessutom med avståndet. Vid vissa tillämpningar, t.ex. strid i urban miljö, kan även bränder uppstå som kan orsaka kraftig turbulens, samtidigt som brandröken i värsta fall även kan orsaka en kraftigt ökad atmosfärsdämpning. Även stridsrök kan leda till en

kraftigt ökad dämpning. Turbulensens negativa effekter kan minskas genom ett antal olika metoder, bl.a. diversitet, adaptiv modulation och/eller felrättande kodning.

Tabell 10.1: Atmosfärsdämpningen varierar som en funktion av de rådande väderförhållandena.

Väderförhållande	Sikt	Transmission, vid 100m	Dämpning
God sikt	23 km	99.6 %	0.17 dB/km
Måttlig sikt	5 km	98.2 %	0.80 dB/km
Dimma	500 m	41.4 %	38 dB/km
Tät dimma	200 m	13.4 %	87 dB/km

10.2 Tekniker som kan ge en förbättrad prestanda i retrokommunikationssystem

Härnäst beskrivs kortfattat de mest intressanta av de tekniker som undersöktes i [Rantakokko, 2005]. De förväntas kunna leda till högre kapacitet och en minskad bitfelssannolikhet i framtida retrokommunikationssystem, både under gynnsamma kanalförhållanden och även då atmosfärsdämpningen och turbulensen är kraftig.

10.2.1 Alternativa modulationsmetoder och flernivåmodulation

Valet av modulationstyp påverkar både överföringskapaciteten, felsannolikheten och robustheten mot kanaleffekter. Anledningen är att kanalen påverkar olika egenskaper hos laserstrålen olika mycket. Turbulens kan exempelvis orsaka stora fluktuationer av laserstrålens amplitud, medan dess polarisation inte påverkas i samma utsträckning. I retrokommunikationssystem begränsas, eller avgörs helt, valet av modulationsmetod av vilken teknik som använts i retromodulatore.

10.2.2 Optimal detektion

Optimala detektorer för både singeldetektorsystem och mottagare som använder rumsdiversitet, vid binär "on-off keying" modulation med direktdetektion, presenteras i [Zhu och Kahn, 2002]. Detektorn kan ses som regeln för hur mottagaren utifrån mottagen signal avgör när en etta respektive en nolla sändes. Beroende på vilken information mottagaren kan antas ha om fädningen bör olika detektorer användas [Zhu och Kahn, 2002; 2003].

10.2.3 Felrättande kodning i kombination med interleaving

Felrättande kodning är ett sätt att förbättra bitfelshalten i mottagaren genom att lägga till redundanta bitar som sedan används för att säkrare avgöra vilka databitar som sändes [Proakis och Salehi, 1994]. Kodning, tillsammans med interleaving, är bl.a. ett effektivt sätt att minska fädningens negativa effekter.

Det finns oerhört många olika typer av koder, och valet av kod och dess kodtakt avgörs av kanalens utseende, bl.a. fädningsstatistiken. Blockkoder ger i många fall tillräcklig felrättningsförmåga och de är intressanta då de har en relativt låg komplexitet. Under svåra förhållanden eller på långa avstånd där signal-till-brusförhållandet (SNR) är lågt kan sannolikt s.k. turbokoder ge en förbättrad prestanda, till priset av en ökad beräkningskomplexitet i avkodaren.

10.2.4 Flernivåmodulation

Genom att använda flera s.k. modulationsnivåer kan mängden information som kan sändas ökas utan att retromodulatorens behov av snabbare. Vid "on-off keying" och intensitetsmodulation används två nivåer, och mottagaren detekterar en "nolla" om den mottagna signalenergin är under en tröskelnivå och den detekterar en "etta" om signalnivån överstiger tröskelvärdet. Vid intensitetsmodulation genomförs detta i retromodulatorens genom att olika spänningar läggs på retromodulatorens som gör att antingen mycket eller väldigt lite av laserstrålen reflekteras tillbaka. Det som begränsar den möjliga datatakten är hur snabbt reflektansen i retromodulatorens hinner förändras då spänningen ändras. Om det istället är möjligt att använda fler intensitetsnivåer, dvs att reflektansen kan förändras i flera steg genom att olika spänningsnivåer läggs på utan att reflektansförändringen sker långsammare, kan informationsdatatakten därmed ökas. Genom att använda flera modulationsnivåer (istället för två som vid binär "on-off keying") fördubblas kapaciteten över länken.

Nackdelen med flernivåmodulation är att felsannolikheten ökar eftersom detektorns beslutsintervall minskar. Om felsannolikheten blir oacceptabelt hög så kan den reduceras genom att applicera en kraftigare felrättande kod för den extrakapacitet som erhålls genom att övergå till fler modulationsnivåer [Rantakokko m.fl., 2004]. I situationer med ett högt SNR är normalt den resulterande felhalten fortfarande acceptabelt låg och flernivåmodulation är därför väldigt intressant att införa i system där SNR ofta eller ibland är högt.

10.2.5 Adaptivitet

Genom att anpassa modulationen och kodningen till de rådande kanalförhållandena kan systemets kapacitet och robusthet förbättras väsentligt. Hur stora förbättringar som kan uppnås vid länkadaptivitet avgörs av

- hur kanalen varierar,
- hur väl kanalen kan estimeras.

Idag används normalt en fix dataakt i de experimentella retrokommunikationssystemen. Den högsta dataakten begränsas normalt av retromodulatorens, men lägre dataakter kan givetvis användas. Kanalens SNR kan variera snabbt pga fädning som orsakas av turbulens, samtidigt som en långsammare variation kan orsakas av förändringar i atmosfärsdämpningen (som bl.a. är väderberoende) eller avståndsförändringar som orsakas av förflyttningar.

Kanalens SNR kan estimeras i retromodulatorens enhet genom att ha en separat sensor/detektor som känner av laserns intensitet och därefter kan även SNR i sändtagarens detektor relativt enkelt beräknas. Om SNR för den mottagna signalen i detektorn kan estimeras med tillräcklig noggrannhet kan modulationstakten anpassas till SNR, t.ex. genom att låta bli att sända då kanalen är riktigt dålig eller genom att sända långsammare (vilket ökar nyttsignalens energi i mottagaren och därmed även SNR). Flernivåmodulation kan också användas i kombination med adaption, istället för att ändra modulationshastigheten. Alternativt så kan kodtyp och kodtakt adapteras så att en kraftigare kod används då kanalen är dålig och en svagare kod då kanalen är bra.

Oftast tillåts systemet adaptera mellan ett begränsat antal fördefinierade modulations- och kodmoder, vilket förenklar adaptionen [Rantakokko m.fl., 2004]. Olika adaptationskriterier estimeras kontinuerligt, t.ex. SNR och olika fädningsparametrar, och prestanda för de olika moderna har då undersökts i förväg och den mod som ger högst kapacitet samtidigt som felsannolikheten ligger på en acceptabel nivå används sedan.

Adaptiv modulation och kodning förväntas ge stora vinster i framtida retrokommunikationssystem. Vid ett högt SNR, på kortare avstånd under goda kanalförhållanden, är tanken att ett stort antal bitar ska kunna sändas i varje symbol genom flernivåmodulation. Antalet bitar som maximalt kan sändas i varje symbol (vid flernivåmodulation) begränsas sannolikt av retromodulatorns egenskaper och var begränsningen ligger för dessa är ännu inte känt utan behöver undersökas närmare. Turbulensen är även den en begränsande faktor vid lite längre avstånd. Vid sämre väderförhållanden blir istället atmosfärsdämpningen sannolikt begränsande för systemet. Vid stark atmosfärsdämpning kan istället en kraftig kod appliceras, med t.ex. 99% redundanta bitar, vilket tillsammans med binär modulation ger en betydligt lägre bitfelshalt men med en kraftigt reducerad kapacitet. Kapacitet byts då mot räckvidd för systemet.

10.2.6 Rumsdiversitet

Vid rumsdiversitet (mottagningsfallet) används flera detektorer som är placerade på fysiskt olika positioner. Om avståndet är tillräckligt stort mellan detektorerna kommer den mottagna signalen i de olika detektorerna att fäda olika, och ju fler detektorer som används desto mindre är sannolikheten för att signalenergin i alla detektorerna är låg vid en viss tidpunkt. Genom att välja den detektor som för stunden har starkast signal (valdiversitet) kan därmed signalstyrkan i mottagaren förbättras i svårt fädande miljöer. En ännu effektivare diversitetskombinering, s.k. maximalviktskombinering (MRC), är att vikta signalerna från de olika detektorerna med deras SNR och sedan addera dessa. Diversitetsmetoder har potentialen att väsentligt reducera signalfluktuationerna vid turbulensinducerad fädning.

Strålen tillbaka från retromodulatorens enhet sprids betydligt mindre än laserstrålen som sänds i riktning mot retromodulatorens. Därför är strålen betydligt mer samlad i sändtagaren,

vilket minskar möjligheterna att uppnå mottagningsdiversitetsvinster i sändtagarenheten genom att utnyttja multipla detektorer.

I ett retrokommunikationssystem som ska operera på långa avstånd, där turbulensen kan förväntas vara kraftig, kan sändningsdiversitetsmetoder istället användas till att förbättra systemets prestanda. Om flera retromodulatorer används som är separerade i rummet så kan den laserstråle som når dem pga av turbulensinducerad fädning ha olika intensitet. I sådana situationer kan diversitetsvinster eventuellt uppnås genom att använda kombinerad rums-tids-kodning (t.ex. Space-Time-Block-Coding - STBC) [Rantakokko m.fl., 2004]. STBC är en relativt enkel teknik som medger att sändningsdiversitets-vinster kan uppnås utan att sändaren behöver känna till kanalen.

10.3 Sammanfattning och rekommendationer

Flera olika metoder presenteras i [Rantakokko, 2005] som har potentialen att väsentligt förbättra kapaciteten och minska felsannolikheten i framtida retrokommunikationssystem, och de beskrivs kortfattat i tabell 10.2. Den prestandavinst som kan uppnås genom att applicera de föreslagna teknikerna avgörs till stor del av hur kanalen påverkar signalen. Den kunskap som finns idag om hur en retrokommunikationslänk påverkas av kanalen är inte tillräcklig för att möjliggöra tillförlitliga värderingar av teknikerna.

Kanalmätningar har genomförts på flera håll i världen, bl.a. på FOI med stationära sändare och mottagare, och de har visat på olika effekter som en laserstråle påverkas av, t.ex. den starkt väderberoende atmosfärsdämpningen samt den turbulensinducerade fädningen. Däremot saknas fortfarande kunskap om hur kanalen varierar i typiska mobila tillämpningar. Den taktiska tillämpningen påverkar starkt hur kanalen ser ut, den påverkar bl.a. avståndet som systemet ska operera på (större avstånd ger svårare turbulens), mobiliteten hos sändare och mottagare (påverkar fädningens egenskaper), miljön (marknära kommunikation i urban miljö ökar turbulensen jämfört med t.ex. kommunikation mellan stridsfordon och UAV), osv.

Tabell 10.2: Beskrivning av effekterna för olika tekniker som kan öka kapaciteten och reducera bitfelshalten för retrokommunikationssystem.

TEKNIK	EFFEKT: KAPACITET	EFFEKT: FEL-SANNOLIKHET	KOMMENTARER
Modulationsmetod (amplitud, fas, frekvens, polarisation, ...)	Ingen, kapaciteten avgörs av retromodulatorns hastighet (symboltiden)	Bitfelshalten för modulationsmetoderna beror på hur kanalen varierar	Valet av modulationsmetod begränsas av vilken typ av retromodulator som används
Flernivåmodulation (sänd fler bitar/symbol)	Potential till stor förbättring	Bitfelssannolikheten ökar något pga mindre beslutsintervall	Kan ej implementeras för alla typer av modulation och retromodulator
Felrättande kodning och interleaving	Minskar beroende på kodtakt	Väsentligt reducerad bitfelshalt	Typ av kod, kodtakt och interleaverlängd designas utifrån kanalens egenskaper
Rumsdiversitet	Ingen direkt, ökad kapacitet kan fås i kombination med adaptivitet	Kan ge betydande vinster vid kraftig fädning	Troligen störst vinst vid sändningsdiversitet, vilket kräver fler retromodulatorer
Adaptiv modulation och kodning	Potential till väsentlig förbättring	Minskar	Anpassar modulation och kodning till rådande kanalförhållanden, tillförlitlig kanalestimering krävs
Förbättrade detektionsmetoder	Ingen, eventuellt liten ökning vid adaptivitet	Reducerar bitfelssannolikheten	Anpassar symbolbeslut till bl.a. kunskap om fädningens statistik etc.

Ett retrokommunikationssystems prestanda kan givetvis även förbättras genom att förbättra hårdvarudelarna i systemet. Kvantbrunnsbaserade retromodulatorer med högre modulationshastigheter och förbättrade kontrastvärden (minskar felsannolikheten) är under utveckling. Fokalplanstekniken kan förhoppningsvis medge att mindre retromodulatorer kan användas, vilket skulle kunna leda till en ökning av modulationshastigheten med 10-100 gånger. Förbättrade lasrar med högre uteffekter och smalare stråldivergenser kan även ge vissa förbättringar. Avancerade laserinriktningssystem kommer förhoppningsvis relativt snart att medge att laserkommunikation kan genomföras även mot plattformar med hög mobilitet. Icke-mekanisk strålstyrningen är ett forskningsområde som på längre sikt förväntas ge mindre och smidigare sändarsystem och en snabbare, flexiblare och effektivare inriktning av laserstrålen mot mobila plattformar. Våglängdsmultiplexing används vid fiberkommunikation och kan möjligen även implementeras i retrokommunikationssystem. Systemen kräver dock mer hårdvara och blir mer komplexa.

Sammanfattningsvis rekommenderas i [Rantakokko, 2005] att följande punkter genomförs:

Felrättande kodning och interleaving förväntas kunna ge relativt stora förbättringar, och det kan implementeras utan att hårdvaran behöver modifieras. Därför bör felrättande kodning implementeras i de experimentsystem som finns på FOI, och prestanda för olika koder kan då undersökas.

Flernivåmodulation kan ge stora kapacitetsvinster vid höga SNR, men begränsningar i retromodulatorerna kan eventuellt medföra att det är svårt att införa flernivåmodulation. Experiment bör genomföras för att undersöka om kvantbrunnsmodulatorens kan ändra sin reflektivitet mellan stabila nivåer.

Adaptiv modulation och kodning ger ett flexibelt system som medger hög kapacitet under goda förhållanden och som sedan kan anpassa kapaciteten och felrättningsförmågan då kanalförhållandena ändras. Det bör vara möjligt att estimerar SNR i retromodulatorens genom att använda en extra detektor, och då har systemet färsk kanalinformation vilket vid adaptivitet är mycket fördelaktigt. Kapacitetsvinsterna med adaptiv modulation är något osäkra, eftersom det förutsätter användandet av flernivåmodulation. Kodtakten för den felrättande koden, och därmed även kapaciteten, kan dock direkt anpassas efter rådande kanalförhållanden. För att möjliggöra adaptivitet behöver olika modulations- och kodkombinationer undersökas närmare, dvs hur bitfelshalten varierar med SNR över typiska kanaler.

En förbättrad kanalkunskap medger tillförlitligare analyser av hur olika teknikerna kan påverka systemets prestanda. Förbättrade kanalmodeller, speciellt med avseende på fädningens tidskaraktistik och kanalens spatiella egenskaper, som är anpassade specifikt för militärt intressanta scenarion är därmed av stort intresse. Mätningar behöver först genomföras och parametrar som väsentligt påverkar signalen behöver identifieras.

Optimala detektorer för både singeldetektorsystem och mottagare som använder rumsdiversitet, vid binär "on-off keying" modulation med direktdetektion, presenteras i [Zhu och Kahn, 2002]. Detektorn kan ses som regeln för hur mottagaren utifrån mottagen signal avgör när en etta respektive en nolla sändes. Förbättrade detektorer kan relativt enkelt implementeras men prestandavinsterna är dock relativt begränsade i jämförelse med många av de övriga teknikerna som presenteras ovan.

11 Projektresultat

Projektet har forskat kring vågutbredning för radio och fri optisk kommunikation med särskild inriktning på den enskilde soldatens arbetsmiljö i staden. Med hjälp av MSS Kvarn har kunskapen om urban krigföring ökat väsentligt vilket har underlättat övriga arbetsuppgifter i projektet.

Projektet har i sin verksamhet innehållit väsentliga komponenter av grundforskning om vågutbredning. Syftet har främst varit kompetensbyggande med målet att studera, validera och vidareutveckla beräkningsmetoder för stadsmiljö. Noggranna beräkningar medför i praktiken alltid långa beräkningstider, vilket gör modellerna opraktiska för användning vid länk- och nätplanering i fält eller vid simuleringar av kommunikationssystem där stora scenarier behöver köras. Kompetensen om grundläggande vågutbredning tillsammans med noggranna beräkningsprogram är dock av avgörande betydelse för att kunna utveckla förenklade modeller passande för sådana tillämpningar. Projektet har lagt en grund till utvecklingen av enkla men tillräckligt giltiga modeller som är användbara för länk- och nätsimuleringar.

Projektet har anskaffat en kommersiell programvara, RPS, för deterministiska beräkningar av radiovågutbredning i stadsmiljö. Programmet är utformat så att egna beräkningsmoduler kan utformas för att ge utdata på särskilda format eller för att anpassa beräkningarna till t.ex. andra frekvenser än specificerat giltighetsområde. Beräkningsprogrammet behöver byggnadsdata som underlag och i dagsläget har vi endast tillgång till sådana data från delar av Stockholm. Lyckade försök har dock genomförts med att använda laserskannade byggnadsdata framtagna på FOI.

Projektet har inlett ett samarbete med Lunds tekniska högskola, dels genom doktorandstudier för en medarbetare i projektet och dels genom medfinansiering av ett MIMO kanalmätsystem (RUSK). Kanalmätsystemet har dock stora kvalitetsproblem vilket påverkat såväl projektet som doktorandstudierna mycket negativt. Lunds tekniska högskola har, med vår medverkan, regelbundna kontakter med leverantören för att komma till rätta med kvalitetsbristerna. Problemen visar också på ett tydligt sätt att all form av experimentell verksamhet är riskfylld. Icke desto mindre är mätningar i relevanta miljöer en viktig komponent för att validera och vidareutveckla teoretiska och numeriska beräkningsmodeller.

Förutom radiovågutbredning så har projektet studerat möjligheten att använda fri optisk kommunikation i urban miljö. Två tekniker har studerats, dels kommunikation utan fri sikt och dels retrokommunikation.

Experiment med kommunikation utan fri sikt har genomförts där laserstrålen reflekterats mot några olika ytor. Försöken visade att avståndet från den reflekterade ytan till mottagaren är starkt begränsat av den reflekterande ytans beskaffenhet. I det fall då ytan var slätlackerat trä klarade en PIN detektor ta emot signalen upp till 50 m från den reflekterande ytan, då bithastigheten var låg (några Mbps). Resultatet gällde såväl våglängden 1,5 μm som 0,8 μm men för våglängden 0,8 μm krävdes så pass hög uteffekt att den inte längre var ögonsäker.

Även experiment med retrokommunikation har genomförts. I testerna har vätskekristallmodulatorer använts och resultaten visar att dessa kan användas i en turbulent atmosfär på avstånd upp till 1 km, trots låg uteffekt hos lasern.

Projektet har i sin slutfas studerat om modulations- och kodningstekniker som används inom radiokommunikation kan förbättra prestanda hos fri optisk kommunikation. En teoretisk genomgång visar att det finns stora förbättringspotentialer väl värda att testa i praktiken.

12 Rekommendationer för framtiden – öppna frågor

Projektet har forskat på radiovågutbredning utomhus i ett stadsscenario där både sändare och mottagare befunnit sig i gatuplan. En viktig vidareutveckling av scenariot gäller inomhuskommunikation samt kommunikation utomhus till inomhus. För deterministiska beräkningar på dessa fall krävs en detaljerad byggnadsbeskrivning samt noggrannare uppskattning av byggnadernas materialparametrar. Detta bör studeras ytterligare.

RPS är ett avancerat beräkningsprogram som används för deterministiska beräkningar av radiokanalen. I större scenarier där länk- och nätsimuleringar är aktuella är dock den långa beräkningstiden ett hinder. För att kunna göra smidiga länk- och nätsimuleringar behövs kanalmodeller som är anpassade till respektive scenario. En angelägen uppgift är använda RPS tillsammans med mätresultat som underlag för att utveckla enkla men relevanta kanalmodeller för sådana simuleringar.

Genom samarbetet med Lunds universitet har vi tillgång till kanalsonden RUSK för mätningar på MIMO-kanalen på frekvensområden runt 300 MHz, 2 GHz och 5 GHz. Kvalitetsproblemen med RUSK har dock inneburit betydligt färre mätningar på radiokanalen än avsett. En mätkampanj i Stockholm är planerad och bör genomföras så snart mätsystemet är stabilt. Mätresultat bör då jämföras med såväl beräkningar i RPS som kanalmätningar utförda inom projektet 3D kanalmodeller.

Preliminär utvärdering av de kanalmätningar som ändå kunnat genomföras med RUSK tyder på att betydande kapacitetsvinster – en faktor 5 à 6 – kan uppnås genom att använda MIMO-system. Det är synnerligen angeläget att kunna visa att dessa vinster kan uppnås även med praktiskt realiserbara system på verkliga militärfordon. Således föreslår vi att resurser satsas på att utveckla en systemdemonstrator baserad på MIMO för det taktiskt viktiga frekvensområdet runt 300 MHz.

Fri optisk kommunikation kan vara mycket användbar i urbana scenarier, framför allt för kommunikation mellan sensorer och mellan flygburna sensorplattformar och marken. Ett ständigt återkommande problem är tillgängligheten som begränsas av tillståndet i atmosfären genom turbulens, dis, dimma och nederbörd. En teoretisk genomgång av de modulations- och kodningstekniker som används inom radiokommunikation visade dock att det finns stora förbättringspotentialer för fri optisk kommunikation. Det är angeläget att testa några av dessa tekniker i praktiken.

13 Referenser

- Berglund, L., Waern, Å. "Rapport från konferens Urban krigsföring 2004-01-21 – 22", FOI-R--1189--SE, Mars 2004.
- Cátedra, M. F., Pérez-Arriaga, J., "Cell planning for wireless communications". Artech House, Boston., 1999.
- Dyberg, K., Farman, L., Eklöf, F., Grönkvist, J., Rantakokko, J., Sterner, U. "On the performance of antenna arrays in spatial reuse TDMA Ad Hoc networks", *Proceedings of IEEE Conference on Military Communications (MILCOM 2002)*, Anaheim, USA, Oktober 2002.
- Eklöf, F., Rantakokko, J. "Smart antennas in mobile ad hoc networks: performance improvements and challenges", *Proceedings of Nordic Antenna Symposium (Antenn 03)*, Kalmar, Maj 2003.
- Fleury, B. H., Jordan, P., Stucki, A. "High-resolution channel parameter estimation for MIMO applications using the SAGE algorithm", *International Zürich Seminar on Broadband Communications (IZS 2002)*, 2002.
- Foschini, G. J., Gans, M. J. "On limits of wireless communications in fading environments when using multiple antennas", *Wireless Personal Communications*, 6:311-335, 1998.
- Gesbert, D., Shafi, M., Shiu, D.-S., Smith, P. J., Naguib, A. "From Theory to Practice: An Overview of MIMO Space-Time Coded Wireless Systems", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 21, No. 3, pp. 281-302, April 2003.
- Holm, P., Lundborg, B., Waern, Å., "Parabolic equation technique in vegetation and urban environments", *FOI-R--1050--SE*, 2003.
- Holm, P., Ladell, L., Lundborg, B., "Vågutbredningsmätningar i Stockholm – Arbetsmaterial", *AerotechTelub rapport K4-04:0205; FOI Memo 1122*, 2004.
- Krans, P., Ladell, L., Lundborg, B., "3D vågutbredning – delstudie inom projekt FFTK", *AerotechTelub K2-03:1375; FOI Memo Dnr 03-169:10*, 2003.
- Ladell, L. "VU-mätning Stockholm 1.1 (CD-ROM)". *AerotechTelub K2-02:1918; FOI Dnr 02-1111:12*, 2002.
- Ladell, L., Lundborg, B., Lindblad, A. "Aerostatstudie kommunikation – Vågutbredning", *AerotechTelub rapport K4-04:0138, FOI Memo 975*, 2004.
- Ladell, L., Lundborg, B., Löfsved, E. "Empiriska och deterministiska vågutbredningsmodeller för stadsmiljö", *AerotechTelub rapport K4-05:0082, FOI Memo 134*, 2005.
- Lundborg, B., Löfsved, E., Holm, P., Ladell, L. "Erfarenheter av RPS – Programvara för vågutbredningsberäkningar i stadsmiljö", *AerotechTelub rapport K5-04:0103, FOI Memo 1419*, 2005.
- Lundborg, B., Ladell, L., Persson, K., Löfsved, E. "Aerostatstudie kommunikation – Beräkningsfall", *AerotechTelub rapport K4-04:0139, FOI Memo 976*, 2004.
- Löfsved, E., Lundborg, B., Holm, P., Waern, Å., "Deterministic calculation of wave propagation in urban areas", *FOI-R--1339--SE*, 2004.
- Martin, T., Pettersson, L., Lorén, J., Erickson, R., Rahm, J. "A broadband circular antenna array", *FOA-R--99-01321-504--SE*, 1999.

- Proakis, J. G., och Salehi, M., *Communication Systems Engineering*, Prentice Hall Inc., NJ, USA, 1994.
- Rabinovich, W. S., m.fl., "Free-space optical communications link at 1550 nm using multiple-quantum-well modulating retroreflectors in a marine environment", *Optical Engineering* 44(5), 2005.
- Rantakokko, J., Linder, S., Wiklundh, K., Fors, K., Pääjärvi, L., Tullberg, H. "Adaptive techniques for tactical communication systems", *Teknisk rapport, FOI-R--1340--SE*, September 2004.
- Rantakokko, J., "Kan prestanda för retrokommunikationssystem förbättras genom att använda traditionella radiosystemtekniker?", *FOI-X--XXXX--SE*, November, 2005.
- Sakari, P., Pettersson, M., "Optical Communication in Urban Areas, Focus on Non Line-of-sight Optical Communication", *FOI-R--0944--SE*, 2003.
- Sakari, P., Pettersson, M., Öhgren, J., "Retrokommunikation i stadsmiljö", *FOI-R--1466--SE*, 2004.
- Sjöqvist, L., Hällstig, E., Öhgren, J., Allard, L., "Retrocommunication – final report", *FOI-R--1220--SE*, 2004.
- Steinbauer, M., Molisch, A. F., Bonek, E. "The double-directional radio channel", *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 43:51-63, August 2001.
- Tan, C. M., Landmann, M., Richter, A., Pesik, L., Beach, M. A., Schneider, Ch., Thomä, R. S., Nix, A. R. "On the application of circular arrays in direction finding — Part II: Experimental evaluation on SAGE with different circular arrays", *1:st Annual COST 273 Workshop*, Espoo, Finland, 29–30 May 2002.
- Waern, Å., Johansson, P., Lundborg, B., Löfsved, E., Sakari, P., "The communication channel in urban operations – a first survey", *FOI-R--0884--SE*, 2003.
- Waern, Å., Lundborg, B., Eriksson, G., Alexandersson, M., "Kommunikationskanalen i urban miljö – beskrivning av MIMO-konceptet och RUSK kanalsond", *FOI-R--1200--SE*, 2004.
- Wyne, S., Almers, P., Eriksson, G., Karedal, J., Tufvesson, F., Molisch, A. F. "Outdoor to indoor office MIMO measurements at 5.2 GHz", *IEEE 60th Vehicular Technology Conference 2004 (VTC2004-Fall)*, Vol. 1, pp. 101-105.
- Zhu, X., Kahn, J. M., "Free-space optical communications through atmospheric turbulence channels", *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 50, Nr. 8, sid. 1293-1300, Augusti 2002.
- Zhu, X., och Kahn, J. M., "Markov chain model in maximum-likelihood sequence detection for free-space optical communication through atmospheric turbulence channels", *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 51, Nr. 3, sid. 509-516, Mars 2003.
- Öhgren, J., Wahlberg, C., "Utveckling av nya vätskekristallmodulatorer – Bestämning av optiska och elektriska egenskaper", *FOI-R--1486--SE*, 2004.