

Elisabeth Löfsved, Gunnar Eriksson, Peter Holm, Peter Johansson,
Magnus Pettersson, Per Sakari, Åsa Waern

Litteratur- och konferensbevakning 2003



TOTALFÖRSVARETS FORSKNING SINSTITUT

Ledningssystem

Box 1165

581 11 Linköping

FOI-R--1051--SE

December 2003

ISSN 1650-1942

Underlagsrapport

Elisabeth Löfsved, Gunnar Eriksson, Peter Holm, Peter Johansson,
Magnus Pettersson, Per Sakari, Åsa Waern

Litteratur- och konferensbevakning 2003

Utgivare Totalförsvarets Forskningsinstitut - FOI Ledningssystem Box 1165 581 11 Linköping	Rapportnummer, ISRN FOI-R--1051--SE	Klassificering Underlagsrapport
	Forskningsområde 4. Spaning och ledning	
	Månad, år December 2003	Projektnummer E7063
	Verksamhetsgren 5. Uppdragsfinansierad verksamhet	
	Delområde 41. Ledning med samband och telekom och IT-system	
Författare/redaktör Elisabeth Löfsved Åsa Waern Gunnar Eriksson Peter Holm Peter Johansson Magnus Pettersson Per Sakari	Projektledare Åsa Waern	
	Godkänd av Lennart Nyström	
	Uppdragsgivare/kundbeteckning Försvarsmakten, HKV	
	Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig Bengt Lundborg	
	Rapportens titel Litteratur- och konferensbevakning 2003	
Sammanfattning (högst 200 ord) Denna rapport redovisar den konferens- och litteraturbevakning som genomförts inom projektet KOMET, Kommunikationskanalens egenskaper i tätort, under 2003. Rapporten inleds med en sammanfattning av det arbete som bedrivits inom COST 273. Sedan följer en rapportering från konferensen "The 2003 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC)". Där de intressantaste bidragen inom vårt område behandlade vågutbredning i korridorer och tunnelmiljö. Efter det återger vi något av det som skrivits om Parabolisk Ekvationsteknik, PE, i stadsmiljö. Vidare presenteras mycket kort en studie som gjorts på FOI om kommunikation i THz-området. Avslutningsvis redovisar vi ett antal artiklar om optisk kommunikation som publicerats under året, där bland annat kommunikation med ultraviolett laser behandlas.		
Nyckelord Kommunikation i stadsmiljö, optisk kommunikation, Paraboliska ekvationer (PE), COST 273		
Övriga bibliografiska uppgifter	Språk Svenska	
ISSN 1650-1942	Antal sidor: 31 s.	
Distribution enligt missiv	Pris: Enligt prislista	

Issuing organization FOI – Swedish Defence Research Agency Command and Control Systems P.O. Box 1165 SE - 581 11 Linköping Sweden	Report number, ISRN FOI-R--1051--SE	Report type Base Data Report
	Research area code 4. C4ISR	
	Month year December 2003	Project no. E7063
	Customers code 5. Commissioned Research	
	Sub area code 41. C4I	
Author/s (editor/s) Elisabeth Löfsved Åsa Waern Gunnar Eriksson Peter Holm Peter Johansson Magnus Pettersson Per Sakari	Project manager Åsa Waern	
	Approved by Lennart Nyström	
	Sponsoring agency Armed Forces Headquarter, Sweden	
	Scientifically and technically responsible Bengt Lundborg	
Report title Literature and conference survey 2003		
Abstract (not more than 200 words) This report summarizes the conference and literature survey made within the project KOMET (The properties of the Communication Channel in urban Environment) during 2003. The report begins with a summary of the works performed within COST 273. Then follows a report from the conference "The 2003 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC)". There, the most interesting papers in our area treated wavepropagation in corridors and tunnel environment. After that we present some written works about using Parabolic Equation (PE) in an urban environment. Furthermore, we give a brief presentation about a study on communication in THz-frequency range performed by FOI. Finally, we summarize a few articles published during the year about optical communication, for instance about communication with ultraviolet lasers.		
Keywords Communication in urban environments, optical communication, Parabolic Equation (PE), COST 273		
Further bibliographic information	Language Swedish	
ISSN 1650-1942	Pages 31 p.	
	Price acc. to pricelist	

Innehållsförteckning

1.	Inledning	7
1.1.	Projektet KOMET.....	7
1.2.	Översikt över dokumentet	7
1.3.	Referenser	8
2.	COST 273.....	9
2.1.	Fördelar med vårt deltagande i COST.....	9
2.2.	Mötet i Barcelona.....	10
2.2.1.	Tutorial.....	10
2.2.2.	Styrgruppsmöte 6.....	11
2.3.	Mötet i Prag.....	11
2.3.1.	Tutorial.....	11
2.4.	Temporary documents	13
2.5.	Referenser	15
3.	The 2003 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC).....	16
3.1.	UHF ray tracing propagation model for corridors.....	16
3.2.	Analysis of propagation characteristics of radio waves in tunnels	17
3.3.	EMC mätningar i Buenos Aires tunnelbanesystem.....	17
4.	Parabolisk ekvationsteknik för stadsmiljö	18
4.1.	2D hybrid PE	19
4.2.	3D vektor PE	21
4.3.	Referenser	23
5.	Kommunikation i frekvensområdet mellan 100 GHz och 10 THz.....	25
6.	Optisk kommunikation.....	26
6.1.	Kommunikation med ultraviolett laser.....	26
6.1.1.	Vågutbredning.....	26
6.1.2.	Modulation.....	27
6.1.3.	UV-källor	27
6.1.4.	Solblinda detektorer.....	27
6.1.5.	Genomförda experiment.....	28
6.2.	Våglängdsberoendet hos optiska kommunikationslänkar	29
6.3.	Utvecklingen av modulatorer för retrokommunikation	30
6.3.1.	Retroreflekterande modulatorer vid 1550 nm	30
6.3.2.	Snabba MQW-reflektorer med stort synfält	30
6.4.	Referenser	31

1. Inledning

Ett delmål inom projektet KOMET är att bevaka utvecklingen i omvärlden inom vårt område, det vill säga radio- och optisk kommunikation. I den här rapporten redovisar vi den litteratur- och konferensbevakning som genomförts under 2003.

1.1. Projektet KOMET

Projektet startades i januari 2003 och är en treårig beställning inom försvarsmaktens FoT-uppdrag. KOMET står för Kommunikationskanalens Egenskaper i Tätort. Uppgifterna inom projektet fokuserar på kommunikation i urban miljö. För att få underlag till hur projektet bör inriktas gjordes i början av året en förstudie som resulterade i rapporten *"The communication channel in urban operations – A first survey"*. [Waern *et al.*, 2003].

Ett av de viktigaste syftena med projektet är att utreda, ur vågutbredningssynpunkt, bra sätt att kommunicera i urban miljö, t.ex. under en militär operation eller när infrastrukturen av något skäl är skadad. Vi har startat med att betrakta ett brett spektrum och undersöker såväl radiokommunikation som optisk kommunikation. Vi vill bland annat undersöka om det går att använda fri optisk kommunikation som ett komplement till radiokommunikation. Under året har vi inom optisk kommunikation gjort en studie som resulterade i rapporten, *"Optical Communication in Urban Areas, Focus on Non Line-of-sight Optical Communication"*. [Sakari och Pettersson, 2003]

På FOI har vi sedan tidigare erfarenheter av att använda Parabolisk Ekvationsteknik (PE-teknik) för att beräkna vegetationens påverkan på utbredningen av radiovågor. För att ta vara på denna kunskap har vi gjort en undersökning om samma teknik är applicerbar på kommunikation i urban miljö, detta har resulterat i rapporten, *"Parabolic equation technique in vegetation and urban environments"*. [Holm *et al.*, 2003]

1.2. Översikt över dokumentet

Vi uppmärksammar årets aktiviteter i COST 273 i kapitel 2. Förutom i COST 273 har projektet deltagit i konferensen "The 2003 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC)" i Istanbul i Turkiet. Konferensen ligger i gränskanten för vårt intresseområde men vi anser att det behövs mer av kommunikationsaspekter inom EMC och därför valde vi att delta på den konferensen. En kort rapportering från konferensen och en sammanfattning av några bidrag finns i kapitel 3. I kapitel 4 återges det vi observerat om PE i stadsmiljö under året. För en utförligare presentation av det området hänvisas till [Holm *et al.*, 2003]. Vi har också uppmärksammat en studie som genomförts inom FOI. Studien har undersökt användbarheten av de komponenter som finns för THz-området för bland annat kommunikation. Vi presenterar en sammanfattning av kommunikationskapitlet i kapitel 5. Rapporten avslutas med kapitel 6 där vi redovisar ett antal artiklar som publicerats under året inom optisk kommunikation.

Projektet har tidigare under året givit ut två rapporter, en förstudie ”The communication channel in urban operations – A first survey” [Waern *et al.*, 2003] samt rapporten ”Optical communication in urban areas, focus on non line-of-sight optical communication” [Sakari och Pettersson, 2003]. De litteraturstudier som genomförts i samband med dessa rapporter återges inte i denna rapport.

1.3. Referenser

[Holm *et al.*, 2003] P. Holm, B. Lundborg, Å. Waern, “Parabolic equation technique in vegetation and urban environments,” FOI, Linköping, FOI-R--1050--SE, December 2003

[Sakari och Pettersson, 2003] P. Sakari, M. Pettersson, “Optical communication in urban areas, focus on non line-of-sight optical communication,” FOI, Linköping, FOI-R--0944--SE, September 2003.

[Waern *et al.*, 2003] Å. Waern, P. Johansson, B. Lundborg, E. Löfsved, P. Sakari, “The communication channel in urban operations - a first survey,” FOI, Linköping, FOI-R--0884--SE, June 2003.

2. COST 273

COST är ett europeiskt forum för samarbete inom naturvetenskaplig forskning. I juni 2001 startades COST-aktiviteten 273 under namnet "Towards Mobile Broadband Multimedia Networks". Då COST 273 är en uppföljare till COST 259 har den preliminära projektplanen ungefär samma struktur som den i COST 259 och dess syfte anges i Memorandum of Understanding:

The main objective of the Action is to increase knowledge of the radio aspects of mobile broadband multimedia networks, by exploring and developing new methods, models, strategies and tools to further the implementation of fourth generation mobile communication systems. It will consider frequencies ranging from upper UHF to millimeter waves, and data rates higher than 2 Mb/s (probably up to 155 Mb/s).

Från svensk sida deltar förutom FOI bland annat Ericsson, Telia Research, Chalmers och Lunds Universitet. Information om projektet finns på <http://www.lx.it.pt/cost273/>

Arbetet under COST 273 är indelat i tre arbetsgrupper:

1. Radio system aspects
2. Propagation and antennas
3. Radio network aspects

Inom KOMET har vi framförallt intresse i det arbetet som genomförs i arbetsgrupp 2, "Propagation and antennas" och dess underarbetsgrupper.

Sessionerna inom COST 273 är informella och det som presenteras är ofta pågående arbeten som kanske ännu inte är mogna för publicering. Det ges gott om tid för diskussioner, som är öppna och konstruktiva. Det presenterade materialet klassas som interna dokument som är tillgängliga på projektets webbsida, men enbart för registrerade medlemmar. För att stävja missbruket att man bara registrerar sig och laddar ner dokument har en regel införts att varje registrerad organisation måste hålla minst en presentation per år. Det finns möjlighet för organisationer från icke-europeiska länder att delta i COST som observatörer men de måste ge ett mervärde till COST, så därför bestämdes på årets första möte att de skall hålla minst två presentationer per år.

Under 2003 var styrgruppsmötena (management committee meetings) i Barcelona, Paris och Prag. FOI har deltagit vid mötena i Barcelona och Prag.

2.1. Fördelar med vårt deltagande i COST

FOI har deltagit i COST 273 sedan september 2001 och vi kan nu se en rad fördelar med att delta, bland annat

1. Vårt deltagande har lett till de kontakter vi nu har med Lunds universitet, där nu en av våra projektmedlemmar påbörjat doktorandstudier. FOI har dessutom slutit ett

avtal med LTH angående inköp av en frekvensmodul till ett nytt mätsystem, en MIMO-kanalsounder (Multiple Input – Multiple Output). Det finns ca 10 stycken liknande mätsystem i världen men detta är det enda kända som förutom att mäta på 2 GHz och 5 GHz områdena även kommer att klara av att mäta på det försvarsintressanta frekvensområdet runt 300 MHz.

2. Ungefär 140 deltagare kommer till varje möte och det är ofta samma personer som återkommer. Detta ger oss tillgång till ett stort nätverk av personer med kunskaper inom vårt område.
3. Eftersom materialet som presenteras ofta är nytt och inte alltid helt färdigt får man en god insyn i vad universitet, myndigheter och företag anser är viktigt och vad man satsar resurser på.

2.2. Mötet i Barcelona

Det sjätte management commite meeting hölls i Barcelona, Spanien, den 15-17 januari 2003. Lokalerna för mötet fanns på campus nord på UPC, Kataloniens tekniska universitet. Management mötet pågick från onsdag lunch till fredag lunch. På onsdagens förmiddag gavs två tutorials parallellt. "Propagation models and the impact of their accuracy on TDMA and CDMA network planning" och "Game theory and its application in wireless communications".

Deltagare från FOI var Åsa Waern och Elisabeth Löfsved.

2.2.1. Tutorial

Den för vårt projekt intressantaste tutorialen var "Propagation models and the impact of their accuracy on TDMA and CDMA network planning". Den presenterades av AWE Communications och IHF, Institute of Radio Frequency Technology, Stuttgart Universitet, Tyskland.

Presentationen handlade mest om simuleringsverktyget WinProp som utvecklas och tillhandahålls av AWE Communications där AWE står för Antennas, Wave propagation and Electromagnetics.

WinProp är samlingsnamnet på ett antal programvaror där de ingående modulerna är:

- AMan: Används för att generera och modifiera antenndiagram.
- ProMan: Används för vågutbredningsberäkningar för inomhus, stad och landsbygd samt övergången mellan dessa. Programvaran för inomhus och stad är av typen 3D medan landsbygd bara är 2D (jfr Detvag).
- WallMan: Används för att skapa databaser för stadsmiljö och inomhusmiljö.

För var och en av de olika miljötyperna kan man välja mellan ett flertal olika modeller. För landsbygd används bland annat PE. Att notera är att man använder en 3D PE-modell för beräkningar i tunnlar.

En utförligare beskrivning av programmets egenskaper finns i "*Kommersiella programvaror för 3D kanalmodeller*", [Löfsved *et al.*, 2001].

2.2.2. Styrgruppsmöte 6

Mötena börjar och slutar alltid med att alla deltagare samlas till ett administrativt möte för att få information och diskutera och besluta om sådant som berör hela auditoriet. En av de saker som diskuterades under detta möte var ett Network of Excellence. När frågan diskuterats på ett tidigare möte var det väldigt många som var intresserade av att delta. Efter att ha undersökt vad det skulle innebära i praktiken att genomföra det hela var det bara 13 organisationer som registrerat sig för deltagande. Ett Network of Excellence innebär en hel del arbete och vi bedömer att värdet för FOI att delta är mindre än arbetsinsatsen.

2.3. Mötet i Prag

Det åttonde management committee meeting hölls i Prag, Tjeckien, den 24-26 september 2003 på CTU FEE, Technical University in Prague, Faculty of Electrical Engineering. Management mötet pågick från onsdag lunch till fredag eftermiddag. I anslutning till mötet gavs även en tutorial på onsdagsförmiddagen.

Deltagare från FOI var Åsa Waern, Gunnar Eriksson och Elisabeth Löfsved. På mötet presenterade vi bidraget från EMC konferensen i Istanbul, *Wave propagation over a forest edge - Parabolic equation modelling vs. GTD modelling*.

Samordnat med COST-mötet var ett möte mellan FOI, LTH och MEDAV. MEDAV är det företag som tillverkar det mätsystem som inköpts av LTH och vars utvidgning till 300 MHz-bandet finansieras av FOI. Mötet avhandlade problematiken med kalibreringen av det antensystem vi inhandlat och möjligheten att finna platser att utföra kalibreringen på.

2.3.1. Tutorial

Titeln på den tutorial som gavs var "MIMO Channel Modeling Revisited". Den presenterades av Ernst Bonek och Werner Weichselberger från tekniska universitetet i Wien, Österrike.

Föreläsningen började från grunden med vad en MIMO-kanal är och vad som är unikt för en sådan. En kort historik över hur man har beskrivit kanalmodeller i allmänhet gavs också. Från början var beskrivningen helt deterministisk för att så småningom övergå till att bli helt stokastisk och nu är man på väg tillbaka mot en mer deterministisk beskrivning igen. För att kunna göra en modell som beskriver MIMO-kanalens egenskaper måste man försöka definiera de krav som ställs på modellen. Dessa krav beror på vad man skall använda modellen till och också på ur vilket perspektiv man startar. De som framförallt arbetar med vågutbredning har en utgångspunkt medan informationsteoretikerna har en annan. Gemensamt för båda är dock att kanalkopplingen mellan utsända signalen x och mottagna signalen y beskrivs med matrisekvationen:

$$y = \mathbf{H}x + n.$$

Förutom de egenskaper som beskrivs av en "vanlig" kanalmodell så måste även de egenskaper som karaktäriserar MIMO-kanalens egenskaper modelleras. Ett exempel på en modell som beskriver kanalen med utgångspunkt från vågutbredningsperspektivet är Mascaraa. Det är en modell på länknivå som är gjord av France Telecom R&D.

För att använda sig av informationsteori och signalbehandling så behövs en modell som:

- Är en analytisk beskrivning av kanalen.
- Har en koncis matematisk beskrivning.
- Beskriver den rumsliga strukturen av kanalens egenskaper så precist som möjligt.
- Har så få parametrar som möjligt.

När de krav som ställs på en MIMO-kanalmodell beskrivits så presenterades en beskrivning av hur man kan bygga modeller med en fysikalisk utgångspunkt. Här beskrevs bland annat modeller som bygger på spridare, lite om den forskning som bedrivs för att bestämma hur spridarna skall placeras. Det presenterades också hur man från mätningar på en specifik plats kan generera en överföringsmatris $\mathbf{H}$ och hur överföringsmatrisen kan tas fram med ray-tracing.

När föreläsarna gått igenom hur en fysikalisk modellbeskrivning kan se ut så övergick de sedan till att göra en analytisk beskrivning av kanalen. Som startpunkt för den här delen av föreläsningen försökte man beskriva hur en signalprocessor upplever radiokanalen. För att inte starta på en allt för abstrakt nivå gavs en introduktion till kanalstatistik och egenmoder för MISO-system (Multiple Input – Single Output). Det går att utvidga beskrivningen så att även MIMO-kanalens överföringsmatris $\mathbf{H}$ kan beskrivas med hjälp av egenmoder. Den beskrivning som fås med hjälp av egenmoderna är ganska komplex men samtidigt väldigt noggrann. För att göra en första förenkling av beskrivningen kan man använda sig av egenskapen att egenmoder alltid är ortogonala. Man kan därför övergå till en vektorbeskrivning i stället och får då en beskrivning av överföringsfunktionen med hjälp av vektormoder. Görs förenklingen på ett strukturerat sätt så att en vektor beskriver mottagarsidan och en annan vektor sändarsidan fås något som kallas strukturerade vektormoder och som beskrivs av kopplingsmatrisen, $\mathbf{\Omega}$, samt en fädningsmatris. Kopplingsmatrisens egenskaper beror på den fysikaliska miljön och hur den gör det beskrevs ganska ingående. Genom att sedan göra ännu en förenkling, där man bland annat låter bli att ta hänsyn till kopplingen mellan vinklarna på sändar- respektive mottagarsida fås ännu en analytisk beskrivning av överföringsmatrisen. Den här beskrivningen kallas Kronecker-struktur och är en förhållandevis enkel beskrivning.

Utgående från det som hittills sagts om den analytiska beskrivningen av kanalen så visades hur man kan göra ännu några förenklingar för det kollapsade MIMO-kanalfallet, den så kallade nyckelhålskanalen. För beskrivningen med strukturerade vektormoder sker genom att ersätta fädningsmatrisen med en med lägre rang. Efter genomgången av detta specialfall beskrev föreläsarna hur man kan förenkla de mer komplexa modellerna genom att enbart beakta de starkaste moderna hos överföringsmatrisen.

Efter dessa genomgångar startade man om med att göra en beskrivning av kanalens egenskaper med hjälp av styrvektorer i stället. En jämförelse mellan egenskaperna hos egenvektorer och styrvektorer gjordes också. Till slut hade vi fått oss till livs 11 olika sätt att analytiskt beskriva kanalens egenskaper. Det var väldigt mycket, men upplagt på ett så strukturerat sätt att det var mycket intressant att lyssna på.

Allra sist i föredraget nämndes det lite om standardiseringsarbete och om vad det är vi egentligen behöver.

2.4. Temporary documents

Pappren som presenteras inom COST är interna dokument. Dessa får ej spridas till andra utan författarnas direkta tillstånd, såtillvida att dokumentet inte är publicerat någon annanstans. Vi har i den här rapporten valt att referera till dem med det nummer och titel de har inom COST. Nedan följer en kort sammanfattning av några av de dokument som presenterats under 2003.

TD(03)67– Is a bad channel a good channel?

Är en dålig kanal en bra kanal? Den frågan har några forskare från Tekniska Universitetet i Wien försökt svara på. Egentligen beror svaret mest på hur man tolkar frågan. En kanal som är bra för en användare karaktäriseras av att den har en utbredningsväg som är starkare än de andra och som gärna innehåller en direktkomponent dvs. fädningen har rice-karaktäristik. Den skall helst ha så få fördröjda utbredningsvägar som möjligt. Men vilken typ av kanal är bra för ett MIMO-system? För att besvara den frågan har de genomfört en omfattande mätkampanj i en kontorsbyggnad. Mätningarna utfördes på 5,2 GHz och för ett 8x8 elements MIMO-system. Svaret på frågan blev att för att få så bra egenskaper som möjligt för MIMO-systemet, vid givet signal-brusförhållande, så vill man ha en kanal som har ett flertal utbredningsvägar med ungefär samma signalnivå och karaktäriseras av rayleighfädning. En dålig utbredningskanal är alltså en bra MIMO-kanal men under förutsättning att signal-brusförhållande är fixt.

TD(03)6– MIMO channel measurements in an urban street microcell

Arbetet har utförts på Ericsson Research och pappret har också presenterats på RVK'02.

De har utfört smalbandiga mätningar på 1547 MHz i en gatukanjon. Mätningarna har utförts både för LOS och NLOS förhållanden. Mätdata användes för att bestämma radiokanalens karaktäristik och för att undersöka den möjliga MIMO-kapaciteten. Vid analysen av data har de fokuserat på förståelsen för vilka parametrar hos överföringskanalen som framförallt påverkar kapaciteten hos ett MIMO-system. I tidigare försök har man sett att det går bra att approximera radiokanalen med hjälp av plana vågor och deras inbördes vinklar för SISO-system (Single Input – Multiple Output) och här undersöktes om detta även gäller för MIMO-system. En maximum-likelihood-metod har använts för att estimerar angle of departure vid sändaren och angle of arrival vid mottagaren. Jämförelse mellan kanalens överföringsmatris och den estimerade kanalen har gjorts och överensstämmelsen är tillräckligt bra för att använda den approximerade radiokanalen vid kapacitetsberäkningar.

TD(03)27– A New Heuristic UTD Diffraction Coefficient for Prediction of Radio Wave Propagation.

Arbetet har utförts på HUT, Helsingfors Tekniska Universitet.

För att få bättre resultat vid UTD (Uniform Theory of Diffraction) beräkningar har de undersökt ett sätt att ansätta andra vinklar än de vanliga som inargument till reflektionskoefficienterna. De har för ett antal specialfall satt upp regler för hur dessa vinklar ska ansättas och sedan undersökt om det ger någon förbättring. Sättet att välja

vinklarna på är dock inte fysikaliskt riktigt men ger i ett bättre resultat vid en jämförelse med en mer exakt metod.

TD(03)199– Performance evaluation of real antenna arrays for high-resolution DoA estimation in channel sounding - Part 1: Channel parameter resolution limits

Dokumentet behandlar en teknik för att bestämma Cramer-Raos undre gräns (CRLB) för estimeringsfelet vid bestämning av ankomstriktningar till en antenn. Gränsen kan användas för att bestämma prestanda för de högupplösande metoder som brukar användas för att ur kanalsonderingsdata extrahera de olika utbredningskomponenternas riktningar i förhållande till sändar- och mottagarantennerna. Denna extraktion är mycket viktig för att kunna erhålla kanalmodeller med dubbel riktningsinformation för MIMO-system.

CRLB för de estimerade parametrarna kan erhållas från diagonalelementen till inversen av Fishers informationsmatris (FIM). För idealiserade antenner kan analytiska uttryck erhållas, men för verkliga antennfunktioner kan enbart numeriska lösningar komma ifråga. Dokumentet beskriver hur man på ett relativt enkelt sätt kan beräkna FIM utifrån det uppmätta strålningsdiagrammet för en antenn. Genom att transformera antennfunktionen från vinkeldomänen till en effektiv aperturfördelningsfunktion (EADF) kan de partiella derivatorna som ingår i uttrycket för FIM enkelt erhållas. För att transformationen av antennfunktionen, från den diskretiserade tvådimensionella vinkeldomänen (θ, φ) , skall bli entydig sker först en utvidgning av funktionen så att den blir periodisk med 2π även med avseende på elevationsvariabeln θ .

TD(03)196– Performance evaluation of real antenna arrays for high-resolution DoA estimation in channel sounding - Part 2: Experimental ULA measurement results

I den andra delen av detta dokument presenteras experimentella resultat för den teknik som har beskrivits i del ett. Testobjektet är en likformigt linjär array (ULA) med 8 element för 5.2 GHz. Antennens effektiva aperturfunktion har tagits fram genom diskret fouriertransformering i två dimensioner av antennens komplexvärda strålningsfunktion, vilken uppmätts i ett ekofritt rum. För mätningen användes en MEDAV RUSK kanalsonderingsutrustning. Fördelen med att använda en sonderingsutrustning framför en nätverksanalysator uppges vara snabbheten hos den förra. Mätningen är ändå en tidskrävande procedur, eftersom antennens strålningsfunktion behöver mätas i två dimensioner med hög vinkelupplösning. Tiden för en mätning uppges till flera timmar. Problem med fasstabiliteten hos sonderingsutrustningen över den långa mättiden rapporteras också. För att erhålla godtagbara resultat behövde fasdriften följas och kompenseras för.

I dokumentet presenteras Cramér-Raos undre gräns (CRLB) för estimeringsfelet vid två uppmätta utbredningsfall. Det första för enbart en utbredningskomponent och det andra för två koherenta utbredningskomponenter. I det första fallet visas CRLB för ankomstriktning som funktion av signal-brusförhållande, SNR. För fallet med två utbredningskomponenter är SNR 15 dB och CRLB har beräknats för ankomstriktning och komplex amplitud som funktion av infallsvinkel och fasskillnad mellan komponenterna. Vinkelskillnaden mellan komponenterna var i detta fall 5 grader. Resultaten visar att felet i

estimaterna kan öka tiotals gånger för koherenta signalkomponenter med liten vinkelskillnad, i förhållande till felen när enbart en signalkomponent är närvarande.

2.5. Referenser

- [Löfsved *et al.*, 2001] E. Löfsved, A. Thomasson, L. Ladell, ”Kommersiella programvaror för 3D kanalmodeller”, FOI Memo. dnr 01-2142:3, juni 2001.
- TD(03)6- *MIMO channel measurements in an urban street microcell*, Jonas Medbo , Henrik Asplund, David Browne, Jan-Erik Berg, Mattias Törnqvist, Ericsson Research, Sverige
- TD(03)27- *A New Heuristic UTD Diffraction Coefficient for Prediction of Radio Wave Propagation.*, Hassan M. El-Sallabi, Pertti Vainikainen, Helsingfors tekniska universitet, HUT, Finland
- TD(03)67- *Is a bad channel a good channel?*, Hueseyin Oezcelik, Markus Herdin, Ernst Bonek , Ralph Prestros, Tekniska Universitetet i Wien, Österrike
- TD(03)196- *Performance evaluation of real antenna arrays for high-resolution DoA estimation in channel sounding - Part 2: Experimental ULA measurement results.* Gerd Sommerkorn. FG EMT, Ilmenau Technical University, Germany.
- TD(03)199- *Performance evaluation of real antenna arrays for high-resolution DoA estimation in channel sounding - Part 1: Channel parameter resolution limits.* Markus Landmann. FG EMT, Ilmenau Technical University, Germany.

3. The 2003 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC)

Konferensen "The 2003 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC)" gavs den 11 - 16 maj 2003 i Istanbul i Turkiet. Från FOI deltog 5 personer med 4 bidrag från Institutionen för informationsöverföring samt 5 personer från Institutionen för mikrovågsteknik med 5 bidrag.

Konferensen hade tidigt av säkerhetsskäl flyttats från Israel till Turkiet men kriget i Irak och oro för SAR-viruset i Asien medförde att flera bidrag aldrig presenterades. Vi hade ett bidrag "*Wave propagation over a forest edge - Parabolic equation modelling vs. GTD modelling*" som presenterades som en poster. Samtliga bidrag under rubriken vågutbredning presenterades i form av postrar. Detta kan i många fall vara en fördel då det är lättare att diskutera specifika frågor med författarna.

Nedan följer sammanfattningar från några av bidragen.

3.1. UHF ray tracing propagation model for corridors

Sammanfattning

Denna artikel handlar om vågutbredning i korridorer [Seker *et al.*, 2003]. Modellen som presenteras tar hänsyn till både reflekterade och diffrakterade strålar. Det nya med denna UTD baserade modell är att den diffraktionskoefficient som används är tagen från [Hwang *et al.*, 1998]. Koefficienten gäller för en kil med icke oändligt ledande kilytor, vilket bör ge ett bättre resultat vid jämförelse med experiment. De presenterade jämförelserna med mätningar visar också bra överensstämmelse med mätningar. Vågutbredningsgeometrierna är dock enkla. Någon hänsyn till t.ex. dubbeldiffraktioner ska inte behöva tas, vilket inte heller görs.

Referenser

- [Seker *et al.*, 2003] S. Seker, A. Y. Tesneli, and O. Cerezci, "UHF ray tracing propagation model for corridors," In *Proc. 2003 IEEE International Symp. on EMC*, 11-16 May 2003, Istanbul, Turkey.
- [Hwang *et al.*, 1998] Y. Hwang, Y. P. Zhang, and R. Kouyoumjian, "Ray-optical prediction of radio-wave propagation characteristic in tunnel environments – Part 1: Theory," *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol. AP-46, no. 9, pp. 1328–1336, Sept. 1998.

3.2. Analysis of propagation characteristics of radio waves in tunnels

Sammanfattning

Ett problem som påminner väldigt mycket om vågutbredning i korridorer är vågutbredning i tunnlar, vilket är ett problem som presenteras i en artikel av Kasashima och Hirai [2003]. Geometrin är mycket enkel, en rak tunnel med rektangulärt tvärsnitt, d.v.s. man behöver bara ta hänsyn till reflektioner i golv, väggar och tak. Det viktiga i detta paper är således modelleringen av reflektionerna. Enligt artikeln är det vidare mycket viktigt att ge dielektricitetskonstanten och konduktiviteten rätt värden. Jämförelserna med mätningarna visar på ett någorlunda gott resultat.

Referenser

Y. Kasashima and J. Hirai, "Analysis of propagation characteristics of radio waves in tunnels," In *Proc. 2003 IEEE International Symp. on EMC*, 11-16 May 2003, Istanbul, Turkey.

3.3. EMC mätningar i Buenos Aires tunnelbanesystem.

Sammanfattning

CAERCEM, tekniska institutet i Buenos Aires, har utfört EMC mätningar i Buenos Aires tunnelbanesystem. Arbetet, som utfördes på uppdrag av stadsförvaltningen, innebar att hela tunnelbanesystemet skulle mätas upp med avseende på elektromagnetiska fältstyrkan. Teamet upptäckte att ingen tidigare mätning utförts i tunnelbanan och rapporter om mätningar i tunnelbanesystem utomlands är häpnadsväckande få.

Tunnelbanesystemet är nerlusat med olika antenner från olika företag. De flesta antennerna är dipolarrayer eller liknande med en längd på minst 100 cm. De är vertikalt uppsatta på en höjd av minst 2.3 m från golvet. Frekvensområdena var 880 MHz och 1950 MHz. Eftersom miljön i tunnelbanan, åtminstone ur elektriska fältmätningars synvinkel, är besvärlig så ansåg teamet att mätningarna skulle utföras så att man fick statistiska resultat. Mätningar gjordes i samtliga 66 tunnelbanestationer. Dessutom placerades en mätprob inne i tågen för att mäta upp samtliga fem linjer. Ytterligare mätningar i passager mellan de olika tunnelsystemen gjordes i de fall där det fanns antenner uppsatta. Över 500 mätningar utfördes och de statistiskt baserade resultaten har sedan jämförts med gällande standard för maximalt tillåten effekttäthet. Resultatet visade att de uppmätta värdena var långt under tillåten gräns i gällande Argentinsk standard.

Referenser

V. Padula Pintos, B. Alvarez Ovide, C. Muñoz and R. Saint-Nom, "EMC measurements in Buenos Aires Metro System," In *Proc. 2003 IEEE International Symp. on EMC*, 11-16 May 2003, Istanbul, Turkey.

4. Parabolisk ekvationsteknik för stadsmiljö

Eftersom militära operationer i stadsmiljö förväntas bli vanligare i framtiden är det viktigt att förstå hur en sådan miljö påverkar ett radiosystem. I stadsmiljö, som skiljer sig väldigt mycket från landsbygd, tvingas radiovågor att diffrakteras över hustak och runt hörn på grund av avsaknaden av direkta vågor. Vidare reflekteras och sprids vågorna inte bara mot väggar och mark utan även mot bilar, lyktstolpar och trafikskyltar. Allt detta ger upphov till så kallad flervägsutbredning och kan inte försummas i en stadsmiljö, utan kan här vara den process som bidrar mest till signalstyrkan. Flervägsutbredning innebär också att radiovågor anländer till mottagaren från flera olika riktningar, vilket kräver en behandling av vågutbredningsproblemet i tre dimensioner (3D). Ett sätt att lösa detta är att använda en strålbaserad modell såsom geometrisk diffraktionsteori (GTD) [McNamara *et al.*, 1990]. GTD är en modell som väldigt ofta används för att ta hand om flervägsutbredning i 3D. Modellen kan även ta hand om bakåtspridda vågor eller strålar, dvs. utbredningsvägar som bitvis går från mottagaren. Ett exempel på en sådan kan ses i figur 4.1.

Bakåtspridning är en process som man ofta kan bortse från vid vågutbredning på landsbygd men inte i stadsmiljö. Detta gör den numera ganska välkända paraboliska ekvationstekniken [Levy, 2000] till en tveksam teknik att använda i stadsmiljö, eftersom denna inte tar hänsyn till bakåtspridning. Startpunkten i PE-tekniken är att välja en huvudriktning i vilket den huvudsakliga energitransporten sker. Valet av en sådan riktning, som vanligtvis är direktvägen mellan sändaren och mottagaren längs med marken, gör det möjligt att använda vissa approximationer som resulterar i en parabolisk differentialekvation (PE). Approximationerna är dock bara giltiga om energin utbreder sig med vinklar nära den valda huvudriktningen. Tyvärr är detta ett villkor som är svårt att uppfylla i stadsmiljö på grund av flervägsutbredning. Vi kommer här att titta närmare på några papper där man har tillämpat PE-tekniken i olika former för att beräkna vågutbredning i stadsmiljö.

Trots att vågutbredning i stadsmiljö normalt kräver en behandling i 3D finns det många artiklar som behandlar den i två dimensioner (2D). I [Eibert, 2003] används en 2D PE-modell, men bara på en makroskopisk nivå med sändaren ovanför vegetation och byggnader. I närområdet till mottagaren, som antas vara placerad i en stadsmiljö, används en 2D stråloptisk metod för att ta hand om effekter av byggnader. Även om den stråloptiska metoden är i 2D bör den vara mer tillförlitlig än en 2D PE-metod i stadsmiljö. De två modellerna, den stråloptiska och den paraboliska, bildar tillsammans en så kallad 2D hybridPE-modell, vilken kommer att beskrivas i avsnitt 4.1.

I [Janaswamy, 2003] beskrivs en PE-teknik för stadsmiljö i 3D, vilket naturligtvis bör vara bättre än en modell i 2D. Denna så kallade 3D vektor PE-modell kan ta hand om polarisationseffekter, vilket är viktigt i stadsmiljö. Modellen skiljer sig från en 2D PE-modell, där fältet (signalstyrkan) beräknas i ett vertikalt plan mellan sändaren och mottagaren, genom att även det horisontella planet mellan sändaren och mottagaren inkluderas i beräkningen. En situation i stadsmiljö som denna modell kan ta hand om visas

i figur 4.2. Modellen är dock fortfarande en PE-modell och på grund av detta kan den inte ta hand om situationer med bakåtspridning, liknande den i figur 4.1, eftersom bakåtspridda vågor inte inkluderas alls i PE-tekniken. 3D vektor PE-modellen kommer att beskrivas närmare i avsnitt 4.2.

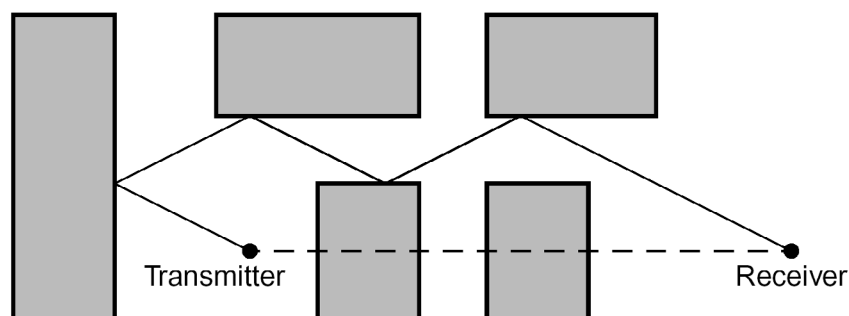


Fig. 4.1. Exempel på en multipelreflektad stråle (heldragen linje) och en (multipel-) diffrakterad i stadsmiljö. Den reflekterade strålen sprids av husväggarna både i framåt- och bakåtriktningen mot mottagaren. Den diffrakterade strålen böjs av då den passerar hustaken.

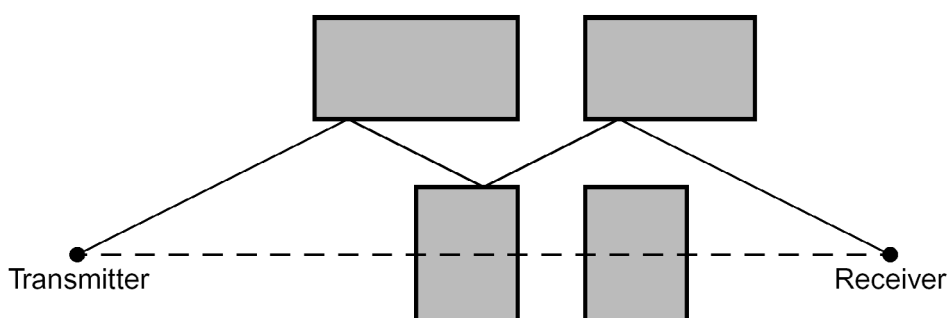


Fig. 4.2. Exempel på en multipelreflektad stråle (heldragen linje) och en (multipel-) diffrakterad i stadsmiljö. Den reflekterade strålen sprids av husväggarna i framåtriktningen mot mottagaren. Den diffrakterade strålen böjs av då den passerar hustaken.

4.1. 2D hybrid PE

Från det ovan nämnda är det klart att PE-tekniken har en del begränsningar; den kan t.ex. inte ta hand om bakåtspridning eller vågutbredningssituationer där det finns strålar med stora vinklar mätt från den i PE-modellen valda huvudriktningen. Detta gör att PE-tekniken inte är ett första val av modell för stadsmiljö, eftersom det ofta är omöjligt att välja en huvudriktning som inte ger utbredningsvägar med stora vinklar i en sådan miljö. Ett sätt att ta hand om begränsningarna är att byta till en annan metod i de områden där PE-tekniken inte är tillförlitlig, t.ex. till en stråloptisk metod. I och med detta får man en så kallad hybrid PE modell.

I [Eibert, 2003] används en stråloptisk modell i kombination med en 2D PE. PE-tekniken används här för att finna en lösning på en makroskopisk nivå med sändaren ovan vegetation och byggnader. Terrängen approximeras med linjära segment. Vegetation och byggnader representeras som homogena skikt; se figur 4.3, vilken är tagen från [Eibert, 2003]. Målet med denna del av beräkningen är att finna fältfördelningen i luften ovanför terrängen.

Den paraboliska vågekvationen löses med Fourier split-step (FSS) teknik [Donohue and Kuttler, 2000; Levy, 2000; Eibert, 2002], vilket ger lösningar där fälten representeras i form av planvågsuppdelningar. I [Eibert, 2003] antas att en sådan planvågsrepresentation av fältet i luften ovanför terrängen är tillgänglig nära alla mottagarpositioner av intresse. Varje planvåg antas sedan infalla mot närområdet till mottagaren. Det mottagna fältet beräknas i nästa steg med hjälp av en 2D stråloptisk modell som inkluderar direkt, reflekterade och diffrakterade strålarna; se figur 4.4 och 4.5, vilka är tagna från [Eibert, 2003].

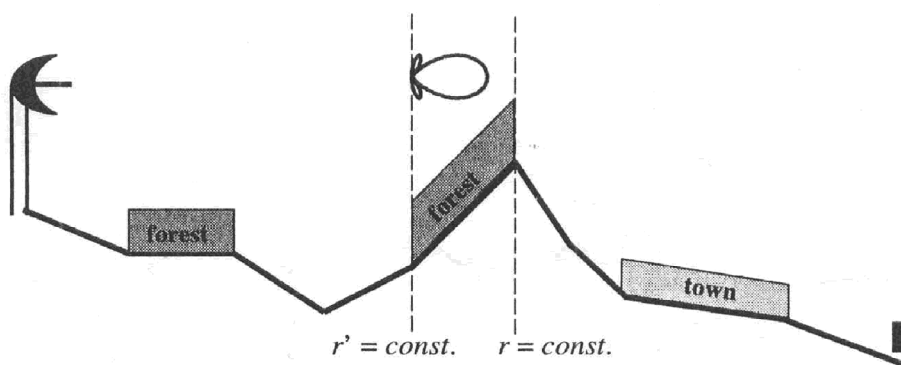


Fig. 4.3. Makroskopisk terrängprofil med vegetation och stadsmiljö modellerad som homogena skikt. Figuren är tagen från [Eibert, 2003].

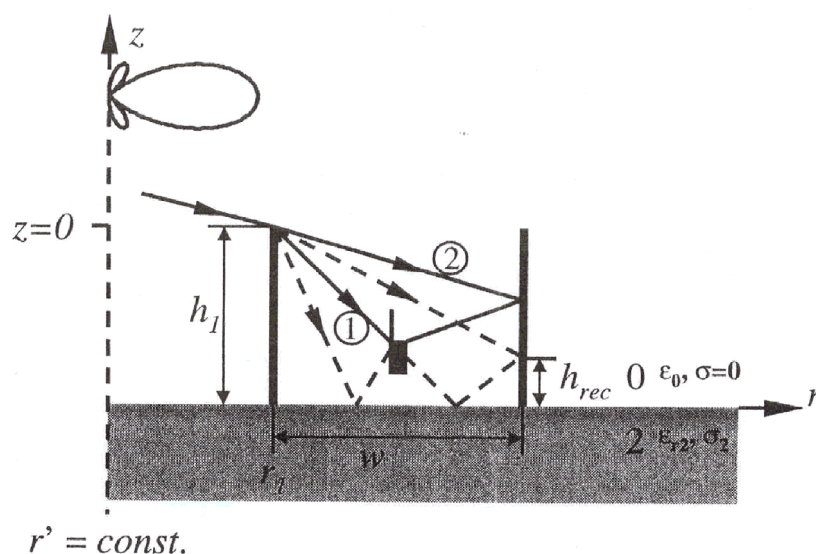


Fig. 4.4. Diffrakterade och reflekterade strålbidrag i en stadsmiljö. Figuren är tagen från [Eibert, 2003].

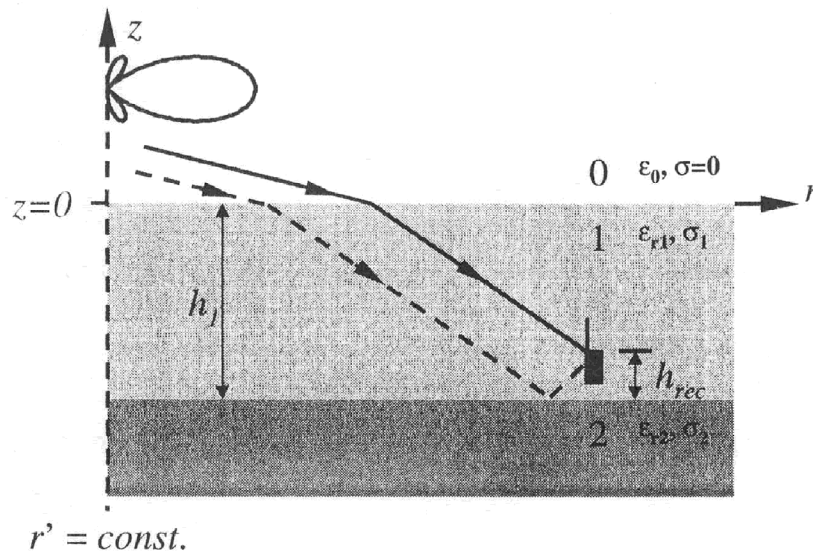


Fig. 4.5. Refrakterade och dämpade strålbidrag i ett skogsområde. Figuren är tagen från [Eibert, 2003].

Eftersom FSS ger ett spektrum av planvågslösningar måste strålbidragen från varje planvåg summeras, dvs. strålbidragen måste integreras, för att det totala fältet ska erhållas. I praktiken innebär detta att bara ett fåtal stråltyper kan användas för att ta hand om den sista delen av utbredningssträckan, eftersom alltför många strålar skulle resultera i väldigt långa beräkningstider. Lyckligtvis bör ett fåtal viktiga strålar räcka, eftersom den stråloptiska modellen bara används i ett litet område nära mottagaren; se figur 4.4.

I [Eibert, 2003] jämförs hybrid PE-modellen mot mätdata. Det sägs att PE-modellen ger bättre resultat än "state-of-the-art" semiempiriska modeller. Detta är möjligtvis sant men skillnaderna mellan modellerna är ganska små i jämförelse med beräkningsfelens storlek. Även om den nya PE-modellen är mer avancerad än de semiempiriska är det fortfarande en 2D modell. En stadsmiljö ger i realiteten i stort sett alltid utbredningsvägar (strålar) som kräver en behandling i 3D. Vad det gäller utbredningsvägar med stora vinklar (mätt från horisontalplanet) är modellen i [Eibert, 2003], mer eller mindre, bara i stånd att ta hand om sådana om de har sitt ursprung från det sista hustaket. Den kan inte ta hand om situationer i stadsmiljö där viktiga strålar kräver en behandling i 3D. Exempel på sådana strålar finner vi i figur 4.1 och 4.2, dvs. de strålar som är representerade med heldragna linjer och som utbreder sig i horisontalplanet.

4.2. 3D vektor PE

En 3D PE-modell kan ta hand om situationer såsom den som visas i figur 4.2, vilket inte en 2D PE-modell kan. Detta gör att det till en viss del är möjligt att använda en 3D PE-modell som en självständig metod i stadsmiljö. Begränsningen ligger i att man fortfarande måste välja en huvudriktning och att modellen bara är giltig om energin utbreder sig med vinklar nära denna riktning.

Ett av de första försöken att formulera en 3D PE lösning finns beskriven i [Zaporozhets and Levy, 1996]. Här presenteras en lösning som använder sig av en skalär PE för en enskild byggnad. Lösningen går dock inte att tillämpa på ett mer realistiskt scenario med

många byggnader. I [Zelley and Constantinou, 1999] presenteras en mer användbar 3D skalär PE för vågutbredning över terräng med svag sluttning. Båda dessa lösningar är dock baserade på den skalära Helmholtz-ekvationen, vilket innebär att korspolarisation mellan vågor inte inkluderas. En naturlig utvidgning av den skalära 3D-modellen till en vektormodell är att använda tre skalära Helmholtz-ekvationer, en för varje fältkomponent. I en källfri region kopplas sedan de tre skalära ekvationerna i rummet via det divergensfria villkoret.

I [Zaporozhets, 1999] formuleras en 3D vektor PE och löses med finit differens teknik. Det divergensfria villkoret appliceras dock bara i närheten av ett objekt såsom en byggnad, dvs. en bit bort från objektet kopplas inte de tre skalära ekvationerna. Detta gör att tre oberoende ekvationer erhålls vilket inte har någon riktig teoretisk grund [Janaswamy, 2003]. Anledningen till förfaringssättet är svårigheterna att kombinera ett vidvinkligt Padé schema med randvillkoret för ett objekt. Istället används ett icke vidvinkligt Padé schema för att hantera fält-till-objekt kopplingen nära t.ex. en byggnad. En bit bort från objektet (3-5 våglängder) låter man fältet utbreda sig som i fritt rum men med hjälp av ett vidvinkligt Padé schema. Detta bör åtminstone ge ett bättre uppförande för stora vinklar, men kopplingen mellan fältkomponenterna är inte helt korrekt.

I [Janaswamy, 2003] presenteras en mer rigorös lösning. Här börjar man med att formulera det exakta randvärdesproblemet i tre dimensioner, genom att betrakta skalärpotentialerna för det elektriska och magnetiska strömmarna. För att numeriskt lösa detta elliptiska problem krävs stora datorresurser och för stora avstånd är det nära nog omöjligt. Approximationer måste således göras. I [Janaswamy, 2003] väljs en huvudriktning längs vilken endast vågor som sprids i framåtriktningen tillåts. Sedan används den paraboliska approximationen [Levy, 2000] för att ge en parabolisk ekvation i tre dimensioner. Eftersom man här har börjat med det exakta randvärdesproblemet i 3D bör den resulterande 3D vektoriella PE-lösningen beskriva kopplingen mellan fältkomponenterna bättre än den i [Zaporozhets, 1999]. En fördel med lösningen i [Zaporozhets, 1999] är dock dess enkelhet i jämförelse med den i [Janaswamy, 2003].

Den 3D vektoriella PE-modellen skiljer sig från en 2D PE-modell, där fältet beräknas i ett vertikalt plan mellan sändaren och mottagaren, genom att den även inkluderar den vinkelräta riktningen mellan sändaren och mottagaren i beräkningen. Detta är oundvikligt om man vill ta hänsyn till polarisationseffekterna. Genom att initialfältet för 3D-modellen är definierad i ett plan istället för längs en linje i 2D-modellen ger detta ett mycket större antal lösningsprodukter att marschera mot mottagaren definierat i ett plan, vilket ger ett ökat antal lösningspunkter att marschera i avståndsriktningen i jämförelse med en 2D PE-modell. Som resultat kan en 3D PE lätt bli 100 gånger långsammare vad det gäller beräkningstider än en 2D PE, vilket naturligtvis är en nackdel.

Om vi nu ser till de redovisade beräkningsexemplen i [Janaswamy, 2003] är alla för ganska enkla objektgeometrier. Ingen av dem är för ett realistiskt möjligt scenario i en stadsmiljö. Terminalerna är t.ex. lokaliserade ganska långt bort från byggnaderna. Våra funderingar kring detta kan illustreras via ett resultat från en 2D PE beräkning i ett annat papper. Resultatet visas i figur 4.6 och är från [Donohue och Kuttler 2000]. Här kan ett distorderat fält ses nära spetsarna till pyramiderna (kilarna). Detta fel kan bero på begränsningar i "shift-map" tekniken för att ta hand om en varierande terräng och/eller "split-step" tekniken som används för att numeriskt lösa problemet, vilka båda har begränsningar som direkt är relaterade till diskontinuerliga ändringar i terrängens lutning [Donohue and Kuttler, 2000]. Eftersom en byggnad som står på marken innebär en diskontinuerlig ändring i terrängens lutning som är drastisk bör även ett distorderat fält vara att förvänta

nära byggnader även för metoden av Janaswamy [2003]. Hur uttalad denna distorsion kan vara indikerar inte beräkningsexemplen, eftersom dessa inte alls visar vad som händer när man närmar sig objekten eller byggnaderna. Denna omständighet gör det lite svårt att säga hur bra modellen av Janaswamy fungerar i ett realistisk scenario i en stadsmiljö, där det är högst sannolikt att hamna nära en byggnad.

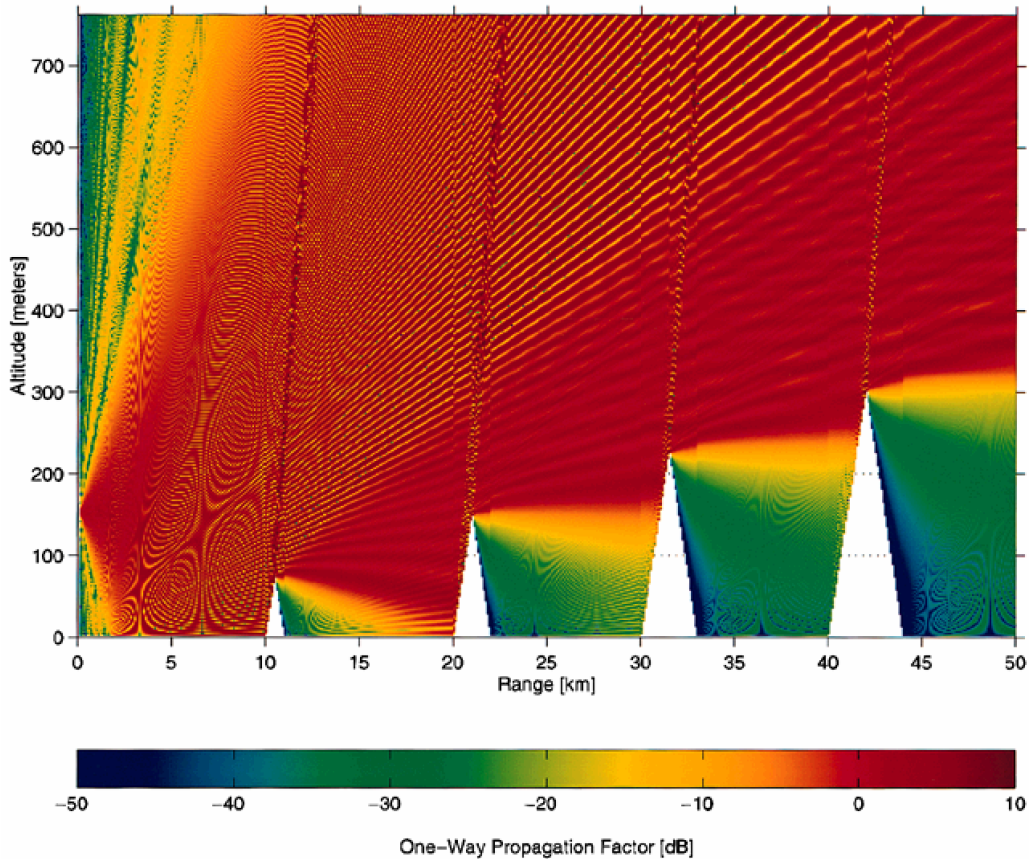


Fig. 4.6. Fältstyrkan relativt fri rymd (dB) för en terrängprofil. Beräkningen är gjord via en styckvis linjär vidvinkel "shift-map" teknik. Pyramiderna har alla lutningen 8.67° . En horisontellt polariserad 3 GHz källa är placerad 152 m ovanför origo. Ytan är perfekt ledande. Figuren är tagen från [Donohue and Kuttler, 2000].

4.3. Referenser

- [Donohue and Kuttler, 2000] D. J. Donohue and J. R. Kuttler, "Propagation modeling over terrain using the parabolic wave equation," *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol. AP-48, no. 2, pp. 260–277, Feb. 2000.
- [Eibert, 2002] T. F. Eibert, "Irregular terrain wave propagation by a Fourier split-step wide-angle parabolic wave equation technique for linearly bridged knife-edges," *Radio Sci.*, 37(1), doi: 10.1029/2000RS002560, 2002.
- [Eibert, 2003] T. F. Eibert, "Built-up terrain wave propagation by Fourier split-step parabolic wave equation-ray optical techniques," *Radio Sci.*, 38(2), 1020, doi: 10.1029/2002RS002743, 2003.

- [Janaswamy, 2003] R. Janaswamy, "Path loss predictions in the presence of buildings on flat terrain: A 3-D vector parabolic equation approach," *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol. AP-51, no. 8, pp. 1716-1728, Aug. 2003.
- [Levy, 2000] M. Levy, *Parabolic equation methods for electromagnetic wave propagation*, IEE, London, UK, 2000.
- [McNamara *et al.*, 1990] D. A. McNamara, C. W. I. Pistorius, and J. A. G. Malherbe, *Introduction to the Uniform Geometrical Theory of Diffraction*, Artech House, Norwood, MA, 1990.
- [Zaporozhets, 1999] A. A. Zaporozhets, "Application of the vector parabolic equation method to urban propagation problems," *Proc. Inst. Elec. Eng., Pt. H*, vol. 146, no. 4, pp. 253-256, Aug. 1999.
- [Zaporozhets and Levy, 1996] A. A. Zaporozhets and M. F. Levy, "Modelling of radiowave propagation in urban environment with parabolic equation method," *Electron. Lett.*, vol. 32, no. 17, pp. 1615-1616, Aug. 1996.
- [Zelley and Constantinou, 1999] C. A. Zelley and C. C. Constantinou, "A three-dimensional parabolic equation applied to VHF/UHF propagation over irregular terrain," *IEEE Trans. Antennas and Propagat.*, vol. AP-47, no. 10, pp. 1586-1596, Oct. 1999.

5. Kommunikation i frekvensområdet mellan 100 GHz och 10 THz

Dagens komponenter för frekvensgenerering, detektering och manipulering av elektromagnetisk strålning i frekvensområdet 0.1 – 10 THz, populärt kallat THz-området, baseras på två helt olika teknologier. Mikrovågselektronik (radio) som traditionellt arbetar under 100 GHz och optronik (laser) som normalt opererar med frekvenser över 10 THz. Båda teknologierna gör framsteg från var sitt håll in i THz-området. Fortfarande är det så att dessa två teknologier inte överlappar varandra vilket resulterar i ett gap i frekvensspektrumet där det saknas lämpliga komponenter. Det görs för närvarande stora insatser på komponentutveckling på många olika håll i världen för att minska det så kallade THz-gapet.

Vågutbredningsförhållanden i THz-området kan grovt sammanfattas med att dämpningen vid havsnivå är ca 3 dB/km för frekvenser under 300 GHz med undantag för frekvenser kring 60, 118 och 183 GHz där en elektromagnetisk våg kommer i resonans med vatten- och syremolekyler, vilket resulterar i mycket hög dämpning. För frekvenser över 300 GHz är atmosfären nästan ogenomtränglig vid havsnivån med undantag för några få transmissionsfönster kring 400, 670 och 840 GHz. Med stigande höjd över havet sjunker dämpningen på grund av att atmosfären tunnas ut. På en höjd av 10 km är dämpningen mindre än 0.1 dB/km i området 1 – 10 THz men det är svårt att utnyttja det eftersom det finns många resonansfrekvenser där och det saknas kunskap om exakt vilka molekyler som är inblandade och hur de interfererar med en elektromagnetisk våg.

Kommunikation i THz-området skulle ha många fördelar, stor bandbredd, hög datatakt och stora områden av fria frekvensband. Nackdelen är naturligtvis den höga atmosfärsdämpningen. Dagens komponenter kan inte utnyttja potentialen i THz-området på grund av att komponenterna inte är tillräckligt utvecklade. De kommunikationslänkar som praktiskt kan realiseras erbjuder inte kommunikationsavstånd som är intressanta i något relevant scenario, undantaget friskt korthållslänkar på några meter. Även om vi räknar hem en komponentutveckling som skulle resultera i 30 dB högre marginal i länkbudgeten är det tveksamt om någon fördel skulle uppnås jämfört med kommunikationslänkar baserat på traditionell mikrovågs eller laserteknik opererande i de traditionella frekvensbanden.

För en mer utförlig genomgång av komponenter, vågutbredning och applikationer i THz-området hänvisas läsaren till [Rudner *et al.*, 2003].

S. Rudner *et al.*, "Future military applications of THz technology", FOI-MEMO 03-2566. Linköping, December 2003

6. Optisk kommunikation

Detta avsnitt redovisar ett antal artiklar inom området optisk kommunikation publicerade under 2003.

6.1. Kommunikation med ultraviolett laser

Vid MIT Lincoln Laboratory har man byggt ett system som demonstrerar möjligheten till att kommunicera med ultraviolett (UV) laser på platser där fria siktförhållanden saknas [Shaw *et al.*, 2003]. Man ser möjligheter med UV-kommunikation som ett komplement till korthållsradio, där sådan inte är möjlig att använda på grund av omgivningens höga dämpning av radiovågorna eller av avlyssnings- och störningsrisk. Avstånd på flera hundra meter och överföringshastigheter på tiotals kbps tror man ska vara möjligt.

Konceptet med UV-kommunikation beskrivs som två transceivers (sändare/mottagare) som är separerade tiotals till hundratals meter ifrån varandra, och riktade rakt upp i luften. Genom att utnyttja tillbakastrålning ifrån atmosfären från en laser med en våglängd inom det ultravioletta området ska man med känsliga detektorer kunna möjliggöra kommunikation. Det är atmosfärens egenskaper att absorbera solstrålning och därmed i stort sett eliminera bakgrundsbruset som ska göra det möjligt.

Man intresserar sig för det så kallade solblinda området av det ultravioletta spektrumet (mid-UV), och speciellt våglängder omkring 280 nm eller mindre. Inom detta område dämpar atmosfären solstrålningen till bara några fotoner per sekund för en detektor på marknivå. Om övriga bruskällor än solen, som t ex lampor, nämner man inte så mycket. Man menar att man i många fall kan använda sig av paritet och återsända informationen.

6.1.1. Vågutbredning

Det är ozonet i atmosfären som absorberar UV-fotonerna, och absorptionen är maximal vid våglängden 255 nm. Området mellan 100 nm och 280 nm kallas det solblinda området eftersom i stort sett ingen strålning från solen når marken. Ozonets absorption gör dessutom att strålningen från lasern utsätts för en exponentiell dämpning och därmed kan inte avlyssning ske på längre avstånd. Störning på långa avstånd är heller inte möjlig av samma orsak.

Laserstrålningen som sänds ut rakt upp i luften utsätts för spridning både i aerosoler och i gasmolekyler. Det är främst spridningen i gasmolekylerna som ska kunna möjliggöra kommunikation. Den molekylära spridningen varierar omvänt proportionellt med våglängden upphöjt till fyra, medan aerosolspridningen i mindre omfattning varierar med våglängden. Hur stor effekt som sprids tillbaka mot mottagaren är inte bara en funktion av spridningskoefficienten, utan också av vinkeln för spridningen ut ifrån gasmolekylerna eller aerosolerna. Storleken på molekylerna och aerosolerna har också betydelse. Molekylerna är betydligt mindre än UV-våglängder och så kallade Rayleigh scattering-modeller används för att beräkna bakåtspridningen. Aerosolerna är däremot generellt större än UV-våglängder och

beräkningar av bakåtspridningen görs med så kallade Mie Scattering-modeller, där partikelns storlek och brytningsindex samt våglängden utgör grund för beräkningen. Teorin visar på åtminstone en tiopotens bättre bakåtspridning ifrån molekylerna än ifrån aerosolerna. Därför anses bakåtspridningen ifrån aerosolerna kunna försummas i beräkningarna.

6.1.2. Modulation

Den modulationsteknik man tänker sig är pulse-position-modulering (PPM). PPM har fördelar jämfört med on-off-keying (OOK) i en lägre energiförbrukning, men kräver samtidigt en högre bandbredd. Tidssynkroniseringen i mottagaren kan precis som för OOK fås genom själva signalen. Med en maximum-likelihood-avkodare kan man undvika behovet av en detektor med en viss tröskelnivå och detta innebär en bättre känslighet. Man nämner också möjligheten med DPIM (Differential Pulse Interval Modulation) vilket utnyttjar bandbredden bättre, men samtidigt innebär ett behov av högre effekt.

6.1.3. UV-källor

Själva konceptet med UV-kommunikation är inte nytt. Det är bristen på kompakta, lågeffektskällor och detektorer som gjort kommunikation omöjlig. 2002 inledde DARPA ett program kallat SUVOS (semiconductor ultraviolet optical sources) för att få fram lysdioder (UV LED, även UVLED) och laserdioder som emitterar i UV-området. Man menar att den begränsade toppeffekten för dioder inte behöver vara en nackdel i det solblinda området. Man kan istället för en laser med hög effekt och korta pulser ha dioder med längre pulser som kompenserar för en hög effekt. Lysdioder har fördelen att man inte behöver spridande optik eller temperaturstabilisering. DARPA:s program resulterade första året i olika typer av UVLED, med våglängder vid 340 nm och uppåt. Utvecklingen går mot att ta fram dioder med våglängder ner mot 280 nm.

6.1.4. Solblinda detektorer

De parametrar hos detektorn som har störst inverkan på ett UV-kommunikationssystems prestanda är den aktiva detektorarean, känsligheten utanför aktuellt våglängdsband och mörkerströmmen (brus). Prototyper av detektorer för UV-kommunikation har hittills varit av typen PMT (Photomultiplier tube). Solblinda PMT:er kan produceras med relativt stor area och med liten mörkerström, men storleken, effektförbrukningen och priset gör dem mindre användbara för ett kommunikationssystem. Utvecklingen av halvledardetektorer för UV kan dock komma att innebära effektsnålare, billigare och mindre detektorer. För att detta ska vara möjligt måste forskning lösa problemet med de relativt höga mörkerströmmarna i halvledardetektorerna. Men man hoppas på fotolavindiodernas utveckling för att de ska kunna bli ett alternativ till PMT-detektorer för sådana här applikationer som kräver fotonräkning.

Den aktiva arean hos halvledardetektorer kan inte göras större än några kvadratmillimeter och behovet av aktiv area i storleksordningen en kvadratcentimeter anses behövas. Därför ser man behovet av att skapa detektorarrayer och möjligtvis också någon typ av optik framför detektorarrayerna.

Om detektorerna har ett känslighetsområde som sträcker sig utanför det solblinda området krävs passiva filter framför detektorerna. Dessa filter behöver ha ett brett synfält, och

eftersom interferensfilter är riktningskänsliga anses dessa inte användbara. Däremot anser man att absorptionsfilter (av typ glas eller NiSO_4), som kan ha synfält på upp till $\pm 80^\circ$, kan vara användbara. De bästa solblinda absorptionsfilter som producerats har en dämpning på 200 dB eller mer utanför det aktuella våglängdsbandet.

6.1.5. Genomförda experiment

Man har genomfört två stycken försök utomhus. Dessa har dock genomförts vid våglängden 340 nm, d v s något utanför det solblinda området och därmed är detektionen begränsad av bakgrundsljuset. Lasern som användes hade en uteffekt på omkring 10 mW. Experimenten utfördes på natten för att på så sätt minimera bakgrundsljuset. Det ena försöket var vid klart väder och det andra vid mulet väder. Lasern var on-off-modulerad med 4 kHz och en duty cycle på 50 %. Detektorn var en PMT och framför detektorn testades både interferensfilter och absorptionsfilter. Avståndet mellan sändare och mottagare var ca 15-18 meter.

För den tillbakareflekterade strålningen från himlen uppnådde man i bästa fall ett signal-brusförhållande, SNR på 2,5-2,7 beroende på väderförhållandena. För att kunna uppnå en BER (Bit Error Ratio) på 10^{-5} med direkt detektion behövs en SNR omkring 8 till 9, d v s vid mätningarna var SNR inte tillräcklig. Man menar dock att bakgrundsbruset i det solblinda området är ungefär sju tiopotenser mindre än vid 340 nm. Slutsatsen man drar ifrån mätresultaten är därför att en ordentlig SNR-marginal skulle uppnås i det solblinda området.

Räckvidd för sådana här system beror på vilken uteffekt man kan uppnå hos källorna. Man tror dock på räckvidder på upp till ca 400 meter, förutsatt att uteffekten kan nå ca 80 mW. Man tror också att det kan finnas tillämpningar även vid fri siktsträcka mellan sändare och mottagare, t ex för kommunikation ifrån UAV:er.

Man har också demonstrerat UV-kommunikation genom att bygga ett system med en liten sändare (storlek 1 in^2) med en lysdiod emitterande 340 nm. Mottagaren bestod av en Hamamatsu PMT, ett interferensfilter och en avkodare. Överföringen var tillräcklig för överföring i form av ljud. Detta system fungerade inomhus genom att använda reflexioner från taket. Vad man ville visa var att UV-system går att göra väldigt små, och sådana skulle vara möjliga om lasrar och detektorer i det solblinda området tas fram i framtiden.

6.2. Våglängdsberoendet hos optiska kommunikationslänkar

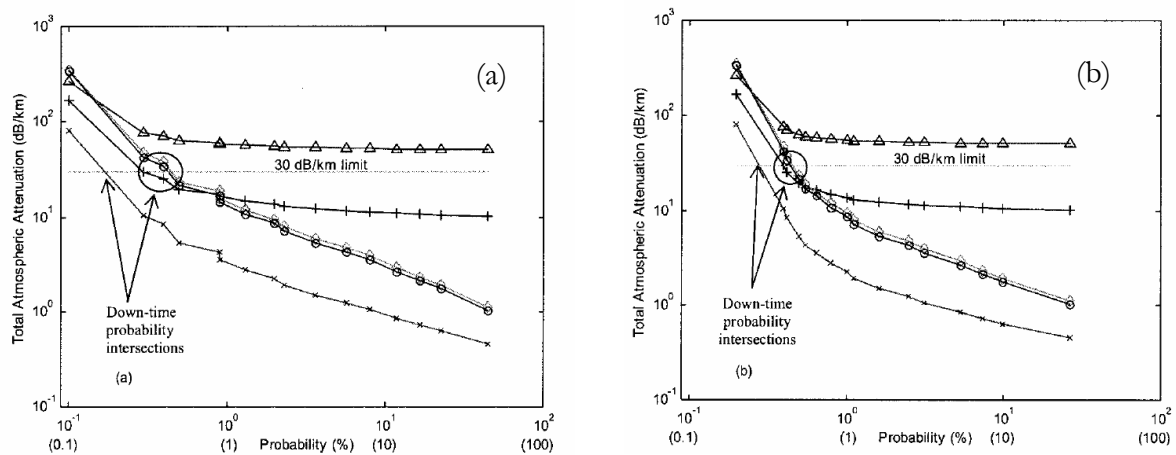
Studier har tidigare presenterats där man visat på en bättre utbredning för laser med lägre våglängder. Laserkommunikationslänkar idag använder sig av laser- eller lysdioder vid våglängderna 785 nm, 850 nm eller 1550 nm. Dessa har visat sig ha en viss begränsad tillgänglighet, vilken varierar från system till system beroende på konstruktion och väderförhållanden. Skillnaden för dessa tre våglängder vad gäller dämpning i dis, dimma och nederbörd har visat sig vara marginell, och tillgängligheten för sådana system är därmed relativt likvärdig.

De senaste åren har utvecklingen av kvantkaskadlasrar (QCL) med våglängder mellan 3 och 20 μm gått framåt. QCL förväntas ha mycket god möjlighet till direktmodulering och teoretiskt är bandbreddsbegränsningen på hundratals GHz [Hanor och Arnor, 2003]. Vid ca 10 μm finns ett våglängdsband med låg dämpning i atmosfären. Intressant är därför möjligheten att använda kvantkaskadlasrar med våglängden 10 μm för fri optisk kommunikation och på så sätt öka tillgängligheten.

Vid Ben-Gurion University of Negev i Israel har man studerat dämpningen i atmosfären som funktion av våglängden [Hanor och Arnor, 2003]. Man har bl.a. teoretiskt utifrån data på siktförhållanden och data från MODTRAN (en atmosfärsmodell utvecklad av US Air Force Phillips Laboratory) räknat ut vilken fördel QCL vid 10 μm har jämfört med de vanligen använda våglängderna. MODTRAN tar inte hänsyn till turbulens utan bara dämpningen i atmosfären. Fädnigen av signalen orsakade av turbulens är på kilometeravstånd typiskt omkring 4-5 dB, vilket är betydligt mindre än den dämpning (totalt dB) som dåliga siktförhållanden medför. Tillgängligheten ska därför alltså inte påverkas av turbulens i någon större utsträckning.

Data för siktförhållanden i New York och San Francisco har använts vid simuleringen. De våglängder som simulerats är 785 nm, 1,55 μm , 7 μm , 10 μm och 20 μm . Resultatet utgående från de två städernas siktförhållanden visas i figur 6.1. I figuren är en linje dragen för atmosfärsdämpningen 30 dB/km, vilket man anser vara en typisk marginal för dämpning i sådana optiska kommunikationssystem. Där denna linje skär kurvorna för dämpningen vid de olika våglängderna kan man se hur stor del av tiden som kommunikation inte är möjlig. Man kan i figuren bl.a. se hur våglängden 10 μm medför den bästa tillgängligheten medan kommunikation vid 7 μm inte är möjlig oberoende av vilka siktförhållanden som råder. Om man jämför 10 μm med 785 och 1550 nm (som har relativt lika transmission) kan man utläsa en något bättre tillgänglighet vid 10 μm . Skillnaden är ca 0,2 % (99,6 % jämfört med 99,8 %) för en marginal för atmosfärsdämpning på 30 dB/km. Man kan utifrån dessa simuleringar se att den avsevärt förbättrade transmissionen i dimma för våglängder omkring 10 μm ändå inte förbättrar tillgängligheten i någon större skala. En högre marginal för atmosfärsdämpningen än 30 dB krävs för att ge tillgängligheter bättre än 99,8 %.

Den relativt ringa förbättringen man kan åstadkomma med 10 μm kan ställas i förhållande till komplexiteten och kostnaden med QCL och detektorer för denna våglängd. Dessutom kan den relativt höga bakgrundsstrålningen från solen i våglängdsbandet 9-13 μm medföra problem i länkar begränsade av bakgrundslyuset.



Figur 6.1. Dämpning som funktion av sannolikheten för förekomsten av olika siktförhållanden. (a) Beräkning med siktdata från New York City. (b) Beräkning med siktdata från San Francisco. Fem olika våglängder; 785 nm (o), 1550 nm (◊), 7 μm (Δ), 10 μm (x) and 20 μm (+).

6.3. Utvecklingen av modulatorer för retrokommunikation

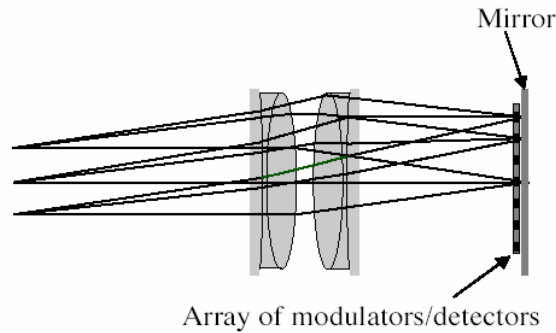
6.3.1. Retroreflekterande modulatorer vid 1550 nm

Retroreflekterande modulatorer för fri optisk kommunikation studeras av bland annat NRL (U.S. Naval Research Laboratory). På NRL har man utvecklat en MQW-modulator (Multiple Quantum Well) som arbetar vid den ”ögonsäkra” våglängden 1550 nm [Gilbreath *et al.*, 2003]. Modulatorn klarar av en hastighet av 5 Mbps vilket är tillräckligt för att överföra video i realtid med 30 bilder per sekund (NTSC). Modulatorn är uppbyggd av InGaAs/InAlAs och är transmitterande, vilket innebär att laserljuset reflekteras med hjälp av en hörnkub bakom modulatorn. Modulatorn är 0,63 cm i diameter och har en bandbredd på cirka 10 nm med en centervåglängd på 1550 nm. Lyckade försök med modulatorn har genomförts i laboriemiljö på korta avstånd (2 m). I nästa steg kommer man att genomföra försök utomhus och på längre avstånd (km). Vid dessa försök är tanken att utnyttja en array av dessa MQW modulatorer.

6.3.2. Snabba MQW-reflektorer med stort synfält

Hastigheten hos retroreflekterande modulatorer begränsas av dess area. Modulatorns interna kapacitans som begränsar modulationshastigheten ökar proportionellt med arean. Kraven på ett stort synfält och tillräcklig känslighet gör att de modulatorer som hittills konstruerats har begränsad överföringshastighet.

För att öka modulationshastigheten och samtidigt bibehålla ett relativt stort synfält och bra känslighet har möjligheten att utnyttja en pixelerad MQW studerats [Rabinovich *et al.*, 2003]. Studien bygger på att använda små modulatorer med hög fyllnadsgrad och fokuserande så kallad cat's eye-optik (se figur 6.2).



Figur 6.2. Principen för en pixelerad MQW modulator med cat's eye optik.

Tekniken har testats med en array bestående av tre små modulateror med en diameter på 1 mm vardera. Den uppmätta maximala modulationsfrekvensen uppgick till 25 MHz (3 dB). Synfältet uppmättes till $2,5^\circ$ per pixel och aperturstorleken hos optiken var 1 cm.

Studierna visade att tekniken med att använda cat's eye-optik istället för hörnkuber tillåter betydligt högre överföringshastigheter och lägre effektkrav om synfältet är litet. Då synfältet ökar minskar fördelen med cat's eye-optik. Försöken visar att cat's eye-optik är fördelaktigt för synfält mindre än $12,5^\circ$. För större synfält finns ingen effektvinst gentemot hörnkuber.

6.4. Referenser

- [Gilbreath *et al.*, 2003] G. Chairmaine Gilbreath *et al.*, Real-Time 1550 nm Retromodulated Video Link, Proc. of the 2003 IEEE Aerospace Conference, Paper No 1560, 2003.
- [Hanor och Arnor, 2003] H Manor, S Arnon, Performance of an Optical Wireless Communication System as a Function of Wavelength, Applied Optics, Vol 42, No 21, pp 4285-4294, 2003.
- [Rabinovich *et al.*, 2003] W.S Rabinovich *et al.*, A Cat's Eye Multiple Quantum-Well Modulating Retro-reflector, IEEE Photonics Technology Letters, Vol 15, No 3, mars 2003.
- [Shaw *et al.*, 2003] G A Shaw *et al.*, Demonstration System and Applications for Compact Wireless Ultraviolet Communications, Proc. of SPIE, Vol 5071, pp 241-252, 2003.