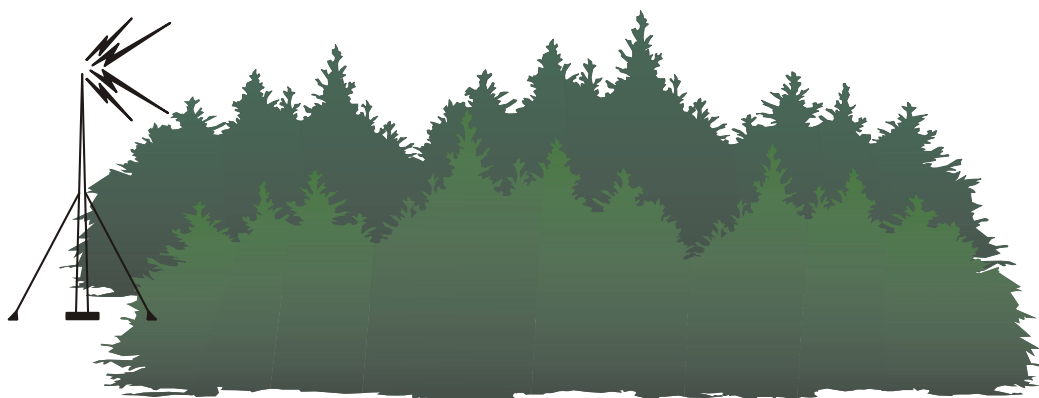


Åsa Waern, Gunnar Eriksson, Bengt Lundborg, Peter Holm, Elisabeth Löfsved,
Ulf Sterner

Slutrapport Projekt Radiokanalen - Vegetation, vegetationens inverkan på radiovågutbredning



TOTALFÖRSVARETS FORSKNING SINSTITUT

Ledningssystem

Box 1165

581 11 Linköping

FOI-R--0708--SE

December 2002

ISSN 1650-1942

Användarrapport

Åsa Waern, Gunnar Eriksson, Bengt Lundborg, Peter Holm, Elisabeth Löfsved,
Ulf Sterner

Slutrapport Projekt Radiokanalen - Vegetation, vegetationens inverkan på radiovågutbredning

Utgivare Totalförsvarets Forskningsinstitut - FOI Ledningssystem Box 1165 581 11 Linköping	Rapportnummer, ISRN FOI-R--0708--SE	Klassificering Användarrapport
	Forskningsområde 4. Spaning och ledning	
	Månad, år December 2002	Projektnummer E7029
	Verksamhetsgren 5. Uppdragsfinansierad verksamhet	
	Delområde 41 Ledning med samband och telekom och IT-system	
Författare/redaktör Åsa Waern Gunnar Eriksson Bengt Lundborg Peter Holm Elisabeth Löfsved Ulf Sterner	Projektledare Åsa Waern	
	Godkänd av Christian Jönsson	
	Uppdragsgivare/kundbeteckning HKV	
	Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig Bengt Lundborg	
Rapportens titel Slutrapport Projekt Radiokanalen - Vegetation, vegetationens inverkan på radiovågutbredning		
Sammanfattning (högst 200 ord) Under åren 2000 - 2002 har försvarsmaktsprojektet Radiokanalen - Vegetation studerat vegetationens inverkan på radiovågutbredning. Denna rapport summerar projektet och ger en enkel beskrivning av den beräkningsmodell baserad på parabolisk ekvationsteknik som utvecklats. Som avslutning redovisas ett par beräkningsexempel med vår PE-modell samt idéer för fortsatt verksamhet inom området.		
Nyckelord vågutbredning, paraboliska ekvationer, vegetation		
Övriga bibliografiska uppgifter	Språk Svenska	
ISSN 1650-1942	Antal sidor: 29 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	Report number, ISRN FOI-R--0708--SE	Report type User report
	Research area code 4. C4ISR	
	Month year December 2002	Project no. E7029
	Customers code 5. Commissioned Research	
	Sub area code 41 C4I	
Author/s (editor/s) Åsa Waern Gunnar Eriksson Bengt Lundborg Peter Holm Elisabeth Löfsved Ulf Sterner	Project manager Åsa Waern	
	Approved by Christian Jönsson	
	Sponsoring agency Armed Forces Headquarter , Sweden	
	Scientifically and technically responsible Bengt Lundborg	
Report title (In translation) Final report The radio channel - vegetation project, influence on radio wave propagation from the vegetation		
Abstract (not more than 200 words) During the years 2000 - 2002 the "Radio Channel - Vegetation" project has studied the influence on radio wave propagation from the vegetation. This report sums up the project and gives a simple description of our model based on parabolic equation technique. The report concludes with two examples calculated with our PE-model and finally we suggest some areas for further research.		
Keywords Wave propagation, parabolic equations, vegetation		
Further bibliographic information	Language Swedish	
ISSN 1650-1942	Pages 29 p.	
	Price acc. to pricelist	

Innehåll	Sida
1 Inledning	7
1.1 Projekt mål och motiv	7
1.2 Aktiviteter	7
2 Vegetationens inverkan på vågutbredning	8
3 Modellering av utbredningsdämpning i vegetation	10
4 Parabolisk ekvationsteknik för beräkning av vegetationseffekter på vågutbredning i kuperad terräng	14
4.1 Kort teori för PE	14
4.2 Olika lösningsmetoder för paraboliska ekvationer	15
4.3 Modellering av vegetation	15
4.4 Trunkering av beräkningsområdet	16
4.5 Antenndiagram	16
4.5.1 Beräkning av initialfält	16
4.5.2 Beräkning av mottagen antenssignal	17
4.6 Kuperad terräng	17
4.7 Vegetationens dielektriska egenskaper	18
4.8 Beräkningsresultat	18
4.8.1 Utbredning över en skogskant	18
4.8.2 Utbredning i homogen skog	21
5 Resultat	23
6 Rekommendationer för framtiden - öppna frågor	23
7 Referenser	25

1 Inledning

Under åren 2000 - 2002 har försvarsmaktsprojektet Radiokanalen, inom FOI avdelning Ledningssystem och institution Informationsöverföring, studerat vegetationens inverkan på radiovågutbredning. Projektet har betraktats som ett basprojekt inom området radiovågors utbredning och har därigenom bidragit till att säkra en långsiktig kompetensuppbyggnad på området. Denna rapport summerar projektet och behandlar de frågeställningar som uppkommit under projektets treåriga tid. Som avslutning redovisas idéer för fortsatt verksamhet inom området.

1.1 Projektmål och motiv

Målen för projekt Radiokanalen har varit att, med inriktning mot radiokanalen inverkan på robusta bredbandiga radiokommunikationssystem:

- Utveckla modeller för planeringsverktyg,
- Ta fram underlag för simulering/värdering av radiosystem, komplexa antennsystem och mobila radionät.
- Bevaka utvecklingen på området.

Motivet har varit det faktum att radiokanalen är en gränssättande faktor för trådlös kommunikation och därmed har en avgörande betydelse för ett väl fungerande ledningssystem. Den ökade rörligheten på stridsfältet, sensorteknikutvecklingen och ett allmänt ökande informationsflöde leder till större krav på förståelsen av radiokanalen och hur den skall beskrivas i termer av bredbandighet, kapacitet, tillgänglighet och dynamik. Behovet av system med smygegenskaper och robusthet mot såväl aktiv störning som besvärliga vågutbredningsförhållanden är stort.

Generellt kommer den nya kunskapen kunna tillämpas vid design av nya radiosystem, vid strategisk och taktisk radio/frekvens-planering, värdering av telekrigsinsatser, simulering av mobila radionät samt för satellitkommunikation.

1.2 Aktiviteter

Förutom huvudaktiviteten inom projektet, att utveckla en beräkningsmodell för vegetationseffekter på vågutbredning, har projektgruppen genomfört nedanstående aktiviteter genomförs under åren:

- Utveckla en bredbandig kanalmodell med spatiell information (vektorkanalmodell) för elektriskt styrbara antenner. Modellen redovisas i *A geometry-based vector channel model* [Lundborg och Löfsved, 2000].
- Studerat resultaten från tidigare utförda transmissionsförlustmätningar i Östersund. Utvärderingen återfinns i *Evaluation of transmission loss measurements performed in a forest environment and over a forest edge* [Waern m.fl., 2002].
- Författat ett bidrag till 5th Meeting of the Management Committee of COST 273. Bidraget, *Radio wave propagation over a forest edge* [Löfsved m.fl., 2002], är en sammanfattning av utvärderingen av de tidigare utförda transmissionsförlustmätningarna i Östersund.

- Författat ett bidrag till konferens, PIMRC2002, The 13th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. Bidraget heter *Wave propagation over a forest edge – Parabolic equation modelling vs. measurements* [Holm m.fl., 2002].
- Omvärldsbevakning [Lundborg m.fl., 2000; Waern m.fl., 2001; Lundborg m.fl., 2002].
- Författat en vetenskaplig rapport innehållande en fullständig teoretisk genomgång av vår utvecklade beräkningsmodell, byggd på paraboliska ekvationer. *Parabolisk ekvationsteknik för vegetation* [Holm och Eriksson, 2002].

Projekt Radiokanalen 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 23 europeiska länder skrivit under ett MoU (Memorandum of Understanding), vilket är nödvändigt för att landet skall få delta. Utöver dessa finns även Kanada och USA 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>.

2 Vegetationens inverkan på radiovågutbredning

Militär verksamhet i skogsmiljö kommer med stor sannolikhet alltid att vara av betydelse och det är därför viktigt att förstå hur en sådan miljö påverkar förutsättningarna för radiosamband. Terräng med olika former av hinder som vegetation, byggnader och rörliga föremål påverkar radiosignalernas utbredning på en rad olika sätt. Vegetation har stor inverkan på bland annat taktisk radiolänk och taktiska kommunikationssystem men även på satellitkommunikation [Asp m.fl., 2000].

De mätningar, av transmissionsförlusten hos en radiolänk, som under år 2000 utfördes i Östersund [Larsson, 2001], visade att radiosignalen påverkades kraftigt då den passerade över en skogskant. Mätningarna utfördes på tre olika avstånd från skogskanten, på olika höjder över marken och på ett antal olika frekvenser. Vid analys av mätresultaten [Waern m.fl., 2002] visade det sig att transmissionsförlusten var i stort sett lika hög för samtliga frekvenser vid en bestämd plats bakom skogskanten då mottagarantennen var placerad från ett par meter under trädtopps-höjd och uppåt. Då mottagarantennen sänktes ytterligare förändrades transmissionsförlusterna olika beroende på frekvensen. Förlusterna varierade också på olika höjder vilket tyder på flervägsutbredning och markreflektioner. Mätresultaten från mätplatsen närmast skogskanten visade på avsevärt större påverkan av fler-

vägsutbredning och markreflektioner än mätresultaten från mätplatsen längst ifrån skogskanten.

Vid analysen av mätresultaten aktualiserades några av de svårigheter som uppkommer när vågutbredningsfenomen i skogsmiljö skall förklaras, nämligen: Vegetationen kan i de värsta fall betraktas som ett stokastiskt inhomogent utbredningsmedium. Detaljinformation om sammansättningen av mediet (skogen) saknas och vi har enbart kännedom om vissa statistiska egenskaper. Vi vet till exempel inte den geometriska utsträckningen hos varje enskilt träd eller dess position, utan möjligtvis skogens medelhöjd och antalet träd per ytenhet. Under vissa förutsättningar kan dock skogen modelleras som ett homogent utbredningsmedium med hjälp av dessa statistiska egenskaper. En skog som kan betraktas som homogen vid en låg frekvens (ex 40 MHz) kan dessutom vara mycket inhomogen vid en hög frekvens (ex 60 GHz).

Modeller som beräknar vågutbredningseffekter från vegetation brukar delas in i tre huvudgrupper, nämligen de som behandlar:

- Dämpning för utbredning genom och över vegetation.
- Spridning och reflektion mot vegetationsytor.
- Mottagen signals tidsdynamiska egenskaper (p.g.a. terminalrörelser och/eller mediets egna rörelser).

I de flesta kommunikationsfall på och över mark, möjligen med undantag av kommunikation mellan höga plattformar, är det nödvändigt att kunna beräkna dämpningen av signaler som utbreder sig genom och över skogen. Spridningsdelen har i de flesta fall viss inverkan, men den har störst betydelse vid behandling av problematiken med flervägsutbredning, och då främst för bredbandiga system. I detta senare fall är det väsentligt att kunna beräkna flervägskomponenternas styrka för bedömning av flervägsutbredningens inverkan på mottagaren. Vid kommunikation mellan höga plattformar, dvs. flygfallet, kan markreflexen från exempelvis skog medföra störande flervägsutbredning med ökad bitfelshalt som följd. Signalvariationen i skog kan vara betydande och ge upphov till väsentlig ökning av bitfelshalten, även för fixt monterade antenner. De dynamiska egenskaperna i vegetation är därför också intressanta att försöka modellera.

Vegetation orsakar en mängd olika problem och fenomen som är svåra att modellera och hantera vid kvantitativa beräkningar. Särskilt besvärligt och komplext blir det om många parametrar, exempelvis frekvens, bandbredd, polarisation, avstånd, antennhöjd med mera ska tillåtas variera inom vida gränser.

3 Modellering av utbredningsdämpning i vegetation

Vi kommer i det här avsnittet att diskutera en del kring vad som skiljer modelleringen av hinder i form av vegetation från andra typer av terränghinder, samt att ge exempel på några mer eller mindre etablerade tekniker för att beräkna utbredningsdämpning i vegetation.

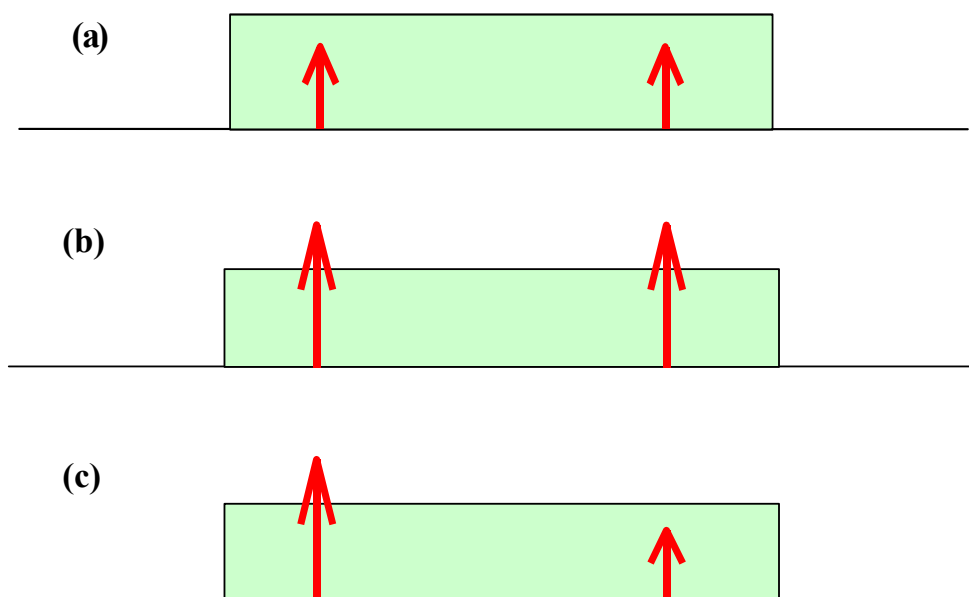
Utbredningen av radiovågor inom VHF-området, 30 – 300 MHz, och högre frekvenser påverkas starkt av olika former av hinder mellan sändaren och mottagaren. Terränghinder i form av berg och kullar, och i viss utsträckning större byggnader, kan i de flesta fall betraktas som icketransparenta. Signaler som skall tas emot i skuggzonen, bakom denna typ av hinder, måste antingen diffrakteras (avböjas) kring hindret eller spridas (byta riktning) med hjälp av andra hinder för att komma fram. Begränsas modelleringen till att bara ta hand om diffraktionsfallet kan dessa hinder ganska framgångsrikt modelleras med hjälp av olika former av diffraktionsmodeller, t.ex. kniveggsmodeller och geometrisk diffraktionsteori (GTD).

Vegetationshinder är däremot semitransparenta, dvs. de har förmåga att släppa igenom (transmittera) en del av signalen. Den transmitterade komponenten dämpas dock exponentiellt med avståndet till följd av förlusterna i mediet. Hur snabbt denna dämpning sker beror bl.a. på vegetationens sammansättning, täthet och radiosignalens frekvens.

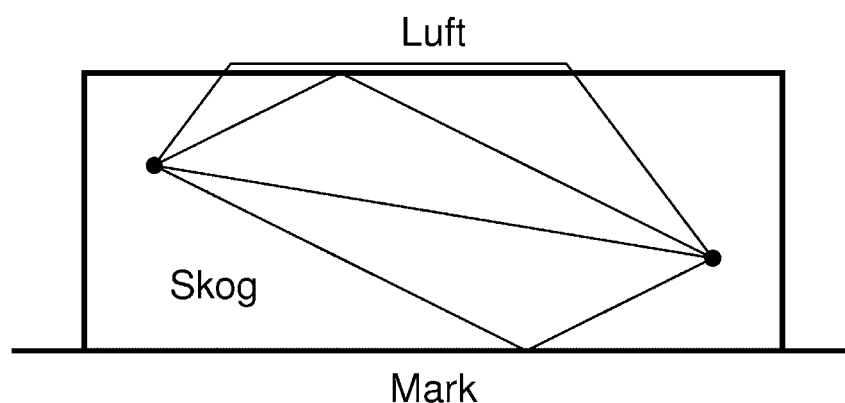
För vissa utbredningssituationer kan den transmitterade komponenten försummas och vegetationen modelleras som ett icketransparent hinder. Så är ofta fallet om man någonstans på mitten av en utbredningssträcka har hinder i form av skog. I allmänhet kan då skogens höjd adderas till markhöjden och problemet lösas genom att applicera en diffraktionsmodell på den resulterande höjdprofilen. I de fall vi har någon av antennerna i skogen, eller nära en skogskant, fungerar naturligtvis inte detta förfarande. Här måste i allmänhet både effekter av diffraktion och transmission beaktas.

En modell som är ganska välkänd och som kan användas för beräkning av vågutbredning i ett sammanhängande skogparti (figur 1a) är modellen av Tamir [*Tamir*, 1967; 1977; *Dence och Tamir*, 1969]. Giltighetsområdet för denna modell anges till 20 – 200 MHz. Modellen förklarar även de skillnader i transmissionsförlust mellan vertikal och horisontell polarisation som finns vid utbredning i vegetation.

Modellen är tvådimensionell och antennerna antas befinna sig inuti en sammanhängande skogsvolym. Skogen approximeras med en homogen dielektrisk skiva ovan plan mark. Modellen bygger på den så kallade lateralvågslösningen till utbredningsproblemet med antenner placerade i en dielektrisk skiva med förluster. Lateralvågen, som utbreder sig i luften längs gränsytan mot skogen, dämpas relativt lite i jämförelse med de komponenter som utbreder sig inuti skogen, se figur 2. Modellen förenklar vågutbredningsproblemet genom att anta att alla strålar som utbreder sig helt i skogsmediet dämpas ut. Modellen fungerar således inte för korta avstånd, framför allt inte i en skog med låga förluster, där även direkta komponenter genom skogen kan ge betydande bidrag.



Figur 1: Tvådimensionell vågutbredning med antennerna inuti en sammanhängande skog (a); antennerna ovanför skogen (b); och en antenn ovanför och en inuti skogen (c).

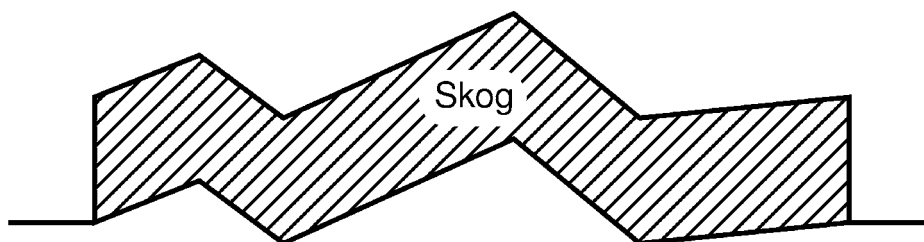


Figur 2: Tamirs modell för vågutbredning i skog. I figuren visas de viktigaste strålgångarna, en lateraltvåg längs gränssnittet skog - luft, två reflekterade strålar samt en direktvåg.

Tamirs modell förutsätter plan geometri men för måttligt kuperad mark fungerar modellen fortfarande med tillfredställande resultat. Om den underliggande marken däremot skulle vara mycket kuperad, figur 3, minskar giltigheten drastiskt på grund av att inga diffraktionseffekter längs sträckan beaktas. Det finns även andra situationer som Tamirs modell inte klarar av att beskriva; se [Holm, 1999]. Exempelvis faller situationerna i figur 1(b) och 1(c) utanför den ursprungliga modellen, även om vissa försök gjorts att täcka in dessa [Tamir, 1977].

En teoretiskt möjlig väg att modellera såväl vegetationens diffraktions- och transmissionseffekter, som effekter från kuperad terräng, är att använda GTD med

transparenta kilar [Rouvier *m.fl.*, 1997; 1999]. Det innebär att både ytterligare strålkomponenter och nya termer i diffraktionskoefficienter behöver läggas till i GTD-formalismen. Ett uppenbart problem med transparenta kilar är svårigheten att identifiera alla betydelsefulla strålgångar. Förutom att antalet strålar växer mycket kraftigt, i förhållande till fallet med icke-transparenta kilar, så måste strålarnas brytning vid övergången mellan olika medier beaktas. Den praktiska möjligheten att implementera en vågutbredningsmodell, för godtycklig höjdprofil med vegetation, baserad på GTD med transparenta kilar bedöms därför som mycket liten.



Figur 3: Skogsparti i kuperad terräng.

En annan modell för att beräkna transmissionsförlusten i vegetation har utvecklats av ett konsortium i Storbritannien. De har på senare tid gjort omfattande mätningar av vegetationsdämpningen i GHz-området och därefter gått vidare och tagit fram en generisk modell för dämpningen. Modellen gäller för området 1–60 GHz, men är inriktad framför allt på arter av lövträd som är vanliga i engelsk miljö. Arbeten relaterade till modellen har publicerats flitigt under året [Caldeirinha och Al-Nuaimi, 2002; Richter *m. fl.*, 2002a; Richter *m. fl.*, 2002b; Rogers *m. fl.*, 2002; Savage *m. fl.*, 2002; Seville *m. fl.*, 2002; Shukla *m. fl.*, 2002] och den förs nu fram som ett förslag till revision av ITUs gällande rekommendation för området [ITU, 2001].

Konsortiet bildades på uppdrag av statliga brittiska Radiocommunications Agency (RA) och bestod av deltagare från QinteiQ, Rutherford Appleton Laboratory (RAL), Univ. of Portsmouth, Univ. of Glamorgan samt RA. Eftersom RA är en statlig myndighet är alla resultat offentliga. Slutrapporten [Rogers *m. fl.*, 2002] är omfattande och kommer att kunna hämtas från RAs hemsida; enligt uppgift ska även alla mätserierna finnas tillgängliga. Man uppmuntrar andra grupper att bygga vidare på modellen med data från andra vegetationstyper, egna analyser etc.

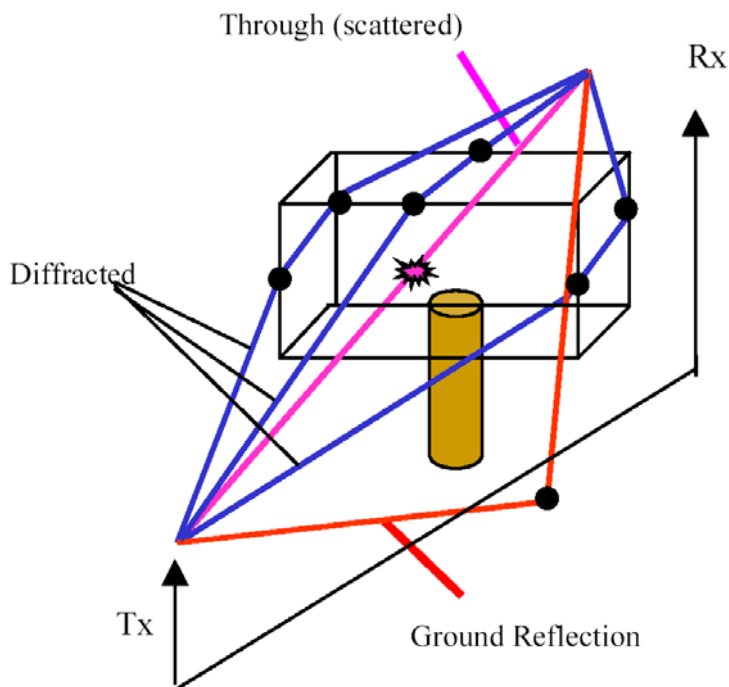
Den presenterade modellen bygger på mätningar på 12 platser i England, under olika årstider, med eller utan löv på träden. Smalbandiga, alternativt bredbandiga mätningar gjordes på totalt 7 frekvenser mellan 1.3 och 61.5 GHz.

Modellen är i huvudsak inriktad på beräkningar av transmissionsförlusten. I modellen behandlas vegetationen som en homogen "låda" en bit ovanför marken;

effekter från stammarna beaktas inte. Man bygger upp signalen av bidrag från fem utbredningsvägar som antyds schematiskt i figur 4, nämligen:

- Tre diffraktionsbidrag med icke-transparent vegetation (GTD): ovanför, samt till höger resp. vänster om vegetationen.
- En markreflekterad komponent under vegetationen.
- Den transmitterade komponenten (dämpning och spridning) baserad på RET-teori (Radiative Energy Transfer). Bidraget ges av ett analytiskt uttryck som innehåller sex parametrar för varje frekvens [Al-Nuaimi och Hammoudeh, 1994; Rogers m. fl., 2002].

Relativt omfattande mätningar krävs för att bestycka modellen; förutom länkrelaterade parametrar som frekvens, antenndiagram och sträcka genom vegetationen behövs det fyra vegetationskaraktäristiska parametrar för att definiera spridningskomponenten i RET. Därför har man hunnit mäta ett ganska litet urval trädslag som dessutom är typiska i engelsk miljö. Tillämpbarheten på våra inhemska gran, tall och björk är inte alls uppenbar. Hur mätningarna går till i praktiken beskrivs i [Richter m. fl., 2002a; Richter m. fl., 2002b]. Tekniken får betraktas som långt ifrån mogen. En hel del öppna frågor kvarstår.



Figur 4: Schematisk bild av vegetationen och signalbidragen vid vågutbredning genom denna; från [Seville m. fl., 2002].

I arbetet med den generiska vegetationsmodellen ingick även en del bredbandiga mätningar [*Savage m. fl.*, 2002]. Man har mätt och analyserat flervägsutbredningen i två artificiella vegetationsmiljöer med regelbundet planterade träd i alléer. Inte oväntat finner man att objekt vid sidan om direktvägen genom vegetationen har en påtaglig inverkan på resultaten; lyktstolpar, bilar mm. Lärdomen att dra av detta är väl närmast att man måste vara ”vidsynt” då man bygger vågutbredningsmodeller för att få med väsentliga utbredningsvägar.

När radiosignalen passerar genom vegetation förekommer dopplerspridning även med stillastående terminaler, beroende på att träden rör sig i vinden och löven fladdrar. I [*Paulsen och Seville*, 2000] presenteras mätningar av denna effekt på 42 GHz, samt några enkla modellsimuleringar av densamma. Man fann att vinden förorsakade en påtaglig dämpning genom att grenar blockerade direktvägen för signalen. Dessutom uppmätte man djupa fädningsminima upp till 50 dB med en varaktighet av storleksordningen 10 ms. Resultaten är inte helt klarlagda och frågan är hur tillförlitliga de är; vid mätningarna var det vindstilla och man fick simulera vind genom att knyta fast rep i träden som man sedan ruskade på.

4 Parabolisk ekvationsteknik för beräkning av vegetationseffekter på vågutbredning i kuperad terräng

Med hjälp av vågutbredningsmodeller baserade på parabolisk ekvationsteknik (PE) finns det möjlighet att i en och samma modell hantera diffraktionseffekter och effekter från transmission genom semitransparenta material. I den litteraturstudie kring vegetationseffekter som skedde i början av projektet [*Asp m. fl.*, 2000] kunde inget publicerat material hittas kring PE-modeller applicerade på vågutbredningsproblem i vegetation. Inom ramen för projektet har därför problematiken studerats vidare och en försöksimplementation av en PE-modell har genomförts.

I detta kapitel återges en sammanfattande beskrivning av vår utvecklade beräkningsmodell. För en fullständig beskrivning hänvisas till rapporten *Parabolisk ekvationsteknik för vegetation* [*Holm och Eriksson*, 2002].

4.1 Kort teori för PE

PE-metoden är en helt numerisk metod att lösa Maxwells ekvationer för vågutbredning. Den vanliga vågekvationen är en differentialekvation av elliptisk typ. Genom att anta att det finns en dominerande utbredningsriktning (paraxiell riktning) kan den ursprungliga differentialekvationen transformeras till en parabolisk typ. Denna har den trevliga egenskapen att fältet i ett tvådimensionellt snitt (höjd och avstånd), mellan sändare och mottagare, kan beräknas successivt genom att lösningen i vertikal ledd stegas fram i avståndsled. Därigenom kan mycket effektiva numeriska lösningsmetoder implementeras. Nackdelen med denna metod är att riktningen på det utbredda fältet måste hålla sig inom vissa gränser i förhållande till den paraxiella riktningen. Den s.k. paraboliska standardekvationen har en vinkelbegränsning på ungefär 15° , medan vidvinkligare varianter klarar vinklar bortåt 45° mot den paraxiella riktningen. I den modell som vi utvecklat har den

vidvinkliga varianten implementerats och därmed är modellen betydligt mer användbar än tidigare publicerade modeller.

Med PE-metoder finns goda möjligheter att modellera godtyckliga variationer hos utbredningsmediet genom att låta dess brytningsindex variera i både höjd och avståndsled. Brytningsindex måste dock, på grund av de bakomliggande approximationerna, vara nära ett för att PE skall kunna användas. Kraftiga variationer i brytningsindex måste därför hanteras genom att tillse att vissa randvillkor blir uppfyllda. Det senare gäller t.ex. för gränssytan mellan luft och mark.

Utbredning över kuperad terräng kan relativt enkelt hanteras genom att applicera olika transformationer på den paraboliska ekvationen. Transformationerna överför det ursprungliga problemet till ett utbredningsfall över plan mark.

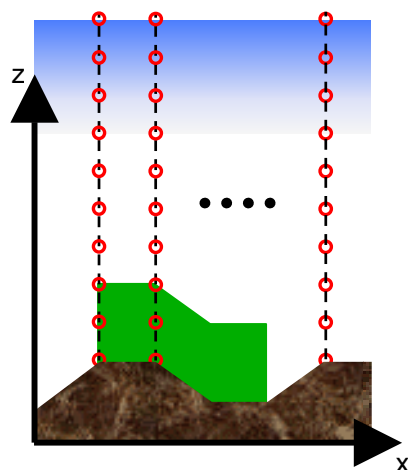
4.2 Olika lösningsmetoder för paraboliska ekvationer

Algoritmerna för lösning av paraboliska ekvationer kan delas in i två kategorier: split-step respektive finit differens. Metoderna för split-step bygger på att fältet i ett vertikalt snitt fouriertransformeras och propageras till nästa avståndssteg i transformdomänen. Därefter beräknas det nya fältet med invers fouriertransform. Split-step har funnit stor tillämpning för beräkning av vågutbredning i troposfären inom mikrovågsområdet; i synnerhet för beräkning av vågutbredningsanomalier över hav. Anledningen är att man med denna metod kan ha förhållandevis stor steglängd (relativt våglängden) i avståndsled. Nackdelen med metoden är att en korrekt modellering av gränssytan mellan luft och mark (vatten) är något komplicerad.

Lösningsalgoritmer baserade på finit differens bygger på att de partiella derivatorna, i den paraboliska vågekvationen, approximeras med differenser i de diskreta beräkningspunkterna. Resultatet blir ett system av linjära differensekvationer som skall lösas. Finita differensmetoden har, förutom goda möjligheter att modellera markytan, fördelen att vara förhållandevis enkel att implementera.

4.3 Modellering av vegetation

Vegetationen modelleras i PE-ramverket genom dess komplexa brytningsindex. Detta är möjligt genom att absolutbeloppet för brytningsindexet för skog ligger mycket nära ett, åtminstone för frekvenser inom VHF-området och uppåt. Beräkningsgriden anges schematiskt i figur 5 för en delvis skogsklädd sträcka i kuperad terräng.



Figur 5: Beräkningsgrid för PE-modell i kuperade terräng. Skogen är modellerad med hjälp av dess komplexa brytningsindex. Beräkningsområdet trunkeras uppåt med hjälp av ett absorberande skikt.

4.4 Trunkering av beräkningsområdet

Området för PE-beräkningarna måste begränsas, såväl nedåt som uppåt i höjd. Nedåt begränsas området naturligt av markytan, medan det uppåt måste införas någon form av artificiell begränsning för att undvika falska reflexioner vid gränstytan. Markens inverkan på det beräknade fältet beaktas genom att tillse att fältet uppfyller uppställda randvillkor. För trunkering av beräkningsområdet uppåt finns flera olika tekniker beskrivna i litteraturen. Den metod som vi implementerat bygger på att ett absorberande område införs i den övre delen av beräkningsområdet.

4.5 Antendiagram

En styrka hos PE är att de använda antennernas strålningsdiagram har möjlighet att beaktas direkt i vågutbredningsmodellen. Detta innebär att antennernas belysning av olika terrängtyper kommer med på ett korrekt sätt i beräkningarna.

4.5.1 Beräkning av initialfält

För att kunna starta PE-lösaren behövs ett begynnelsefält i ett vertikalt snitt. Detta startfält kan beräknas på ett antal olika sätt. Ett av alternativen är att beräkna antennens aperturfält, utifrån dess strålningsfunktion, och använda det som initialfält i PE-modellen. Relationen mellan aperturfältet och strålningsfunktionen kan beskrivas med hjälp av en fouriertransform. För den paraboliska standardekvationen, som bara gäller för små utbredningsvinklar i förhållande till den paraxiella riktningen, fås aperturfältet direkt genom fouriertransformering av strålningsfunktionen; medan det för vidvinkligare paraboliska ekvationer är en något mera komplicerad funktion som skall fouriertransformeras.

För riktantenner med relativt smala öppningsvinklar och som är placerade på ganska höga höjder över marken (många våglängder) är detta oftast en ganska bra metod. Däremot är metoden mindre tilltalande för antenner med brett strålnings-

diagram, och som inte är placerade högt över marken i förhållande till våglängden. Orsaken är att PE-metoderna, för att uppfylla kraven på tillåtna utbredningsriktningar, kräver att en artificiell vinkelbegränsning införs för antenner med stora öppningsvinklar. Detta leder i dessa fall till att aperturfältet för antennen får en utsträckning som vida kan överstiga antennens höjd över marken. Aperturfältet behöver då speglas i marken; något som blir extra besvärligt om markens reflektionsförmåga är starkt vinkelberoende, som till exempel vid vertikal polarisation. Utan artificiell begränsning av antennens strålningsfunktion ska det beräknade aperturfältet ha en utsträckning som motsvarar den fysiska utsträckningen hos antennen.

Ett annat alternativ för beräkning av startfältet, som kan vara att föredra i den nyss nämnda situationen, är att beräkna ett initialfält ett stycke bort från antennen med hjälp av en markvågsmodell. I de fall ytvågskomponenten hos markvågen är av betydelse måste markvågsmodellen hantera denna korrekt för att startfältet till PE-modellen ska bli riktigt. Med detta sätt att beräkna begynnelsefältet blir vågutbredningsmodellen egentligen en hybridmodell, och inte en ren PE-modell.

4.5.2 Beräkning av mottagen antenssignal

Själva PE-beräkningen ger som resultat fältet i varje beräknad gridpunkt. Den mottagna antenssignalen, med hänsyn tagen till antennens strålningsdiagram, kan beräknas genom att utföra en faltning i vertikal ledd mellan det beräknade fältet och antennens normerade aperturfält. Aperturfältet kan beräknas på samma sätt som beskrivits i avsnitt 4.5.1.

För en fix höjd hos mottagarantennen innebär detta att den mottagna antenssignalen erhålls genom att det beräknade fältet vid mottagaren medelvärdesbildas över antennens vertikala utsträckning, med det normerade aperturfältet som viktsfunktion. Användningen av denna teknik vid mottagaren kompliceras inte av någon artificiell begränsning av strålningsfunktionen, som i fallet vid beräkning av initialfältet.

4.6 Kuperad terräng

En verklig terräng kan normalt inte beskrivas som en jämn plan eller jämn sfärisk yta, utom för riktigt låga frekvenser, vilket i kuperad terräng skulle vara nedåt ca. 1 MHz. I VHF- och UHF-området kommer berg och i viss mån även stora stenblock att ha en klar inverkan på vilken signalstyrka som erhålls vid mottagaren. För ännu högre frekvenser är denna inverkan, vilken till stor del är diffraktionseffekter, vanligtvis större.

Diffraktionseffekter från icke genomskinliga hinder, typ berg och stora stenblock, kan vanligtvis beräknas med någon kniveggmodell eller med geometrisk diffraktionsteori (GTD) men dessa kan även behandlas med hjälp av en PE-modell som använder s.k. shift map teknik. Shift map teknik innebär att icke genomskinliga hinder ses som höjdskillnader hos marken mellan terminalerna. Praktiskt löses problemet genom att den kuperade terrängen approximeras till styckvis linjära segment. Varje segment kan sedan transformeras till en plan markyta.

4.7 Vegetationens dielektriska egenskaper

För att kunna modellera en verklig skogsterräng behövs kunskaper om vegetationens dielektriska egenskaper. Olika vegetationstyper har olika värden på de dielektriska parametrarna. Vidare får parametrarna olika värden beroende på frekvensen hos den utsända radiovågen.

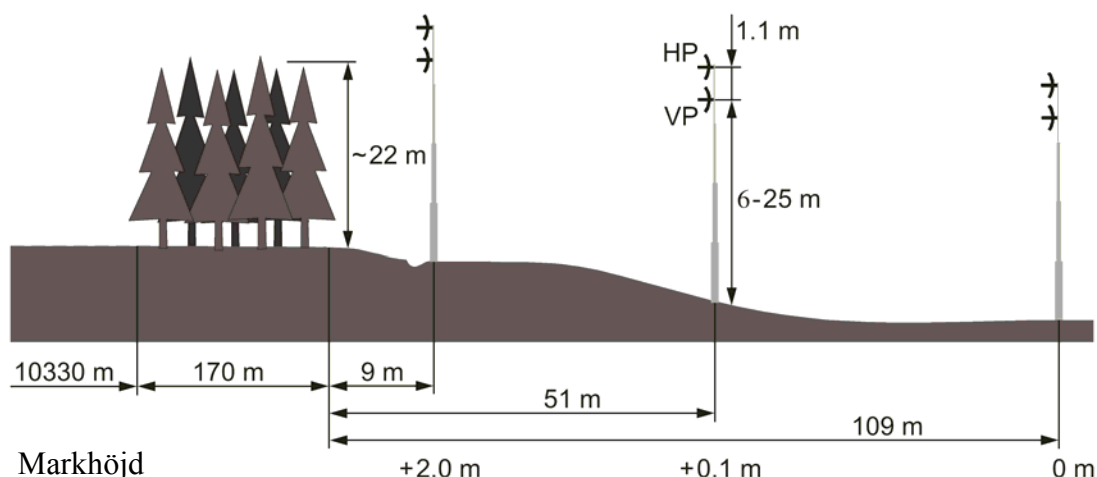
Till hjälp vid bestämning av vegetationstypen, som skall modelleras, finns rikstäckande kartdatabaser. I kartdatabaserna finns 23 olika marktyper som anges med tresiffriga koder. Vegetationen klassas med hjälp av sex av dessa marktyper nämligen; tät barrskog, gles barrskog, ung barrskog, lövskog, lövsly och nya hyggen. I viss mån återspeglar dessa klasser hur tät skogen förväntas vara och vilka trädtyper som dominerar. Dock finns ingen information om höjden på vegetationen.

4.8 Beräkningsresultat

För att testa den implementerade PE-modellen, och få en uppfattning om tillämpbarheten av PE-tekniken på vågutbredningsproblem i vegetation, har en del beräkningar och jämförelser med mätningar utförts.

4.8.1 Utbredning över en skogskant

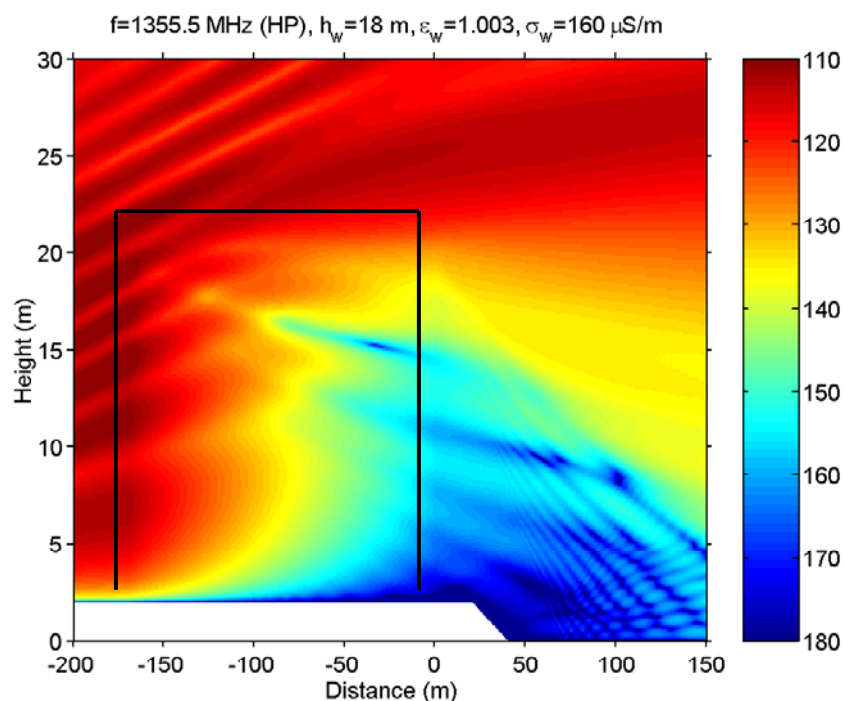
Detta beräkningsexempel motsvarar vågutbredningssituationen för en sträcka som det finns mätresultat [Larsson, 2001] att jämföra med. Mätningarna utfördes över en 10.5 km lång sträcka utanför Östersund vid ett stort antal frekvenser inom området 1.3 – 1.8 GHz. Huvuddelen av sträckan var fri från hinder; förutom den allra sista delen som bestod av 170 meter tät granskog. Strax bakom skogen fanns ett öppet fält där mätningar utfördes på olika höjder och avstånd från skogskanten. Geometrin för den sista delen av sträckan framgår av figur 6.



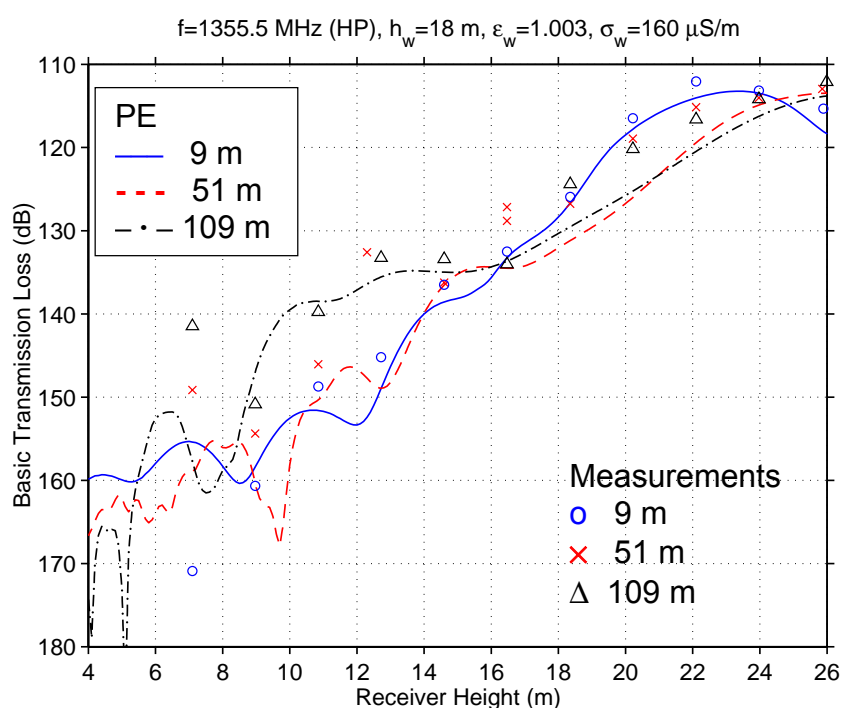
Figur 6: Geometri på mottagarsidan; från [Larsson, 2001].

Utförligare beskrivning av dessa beräkningar och jämförelse med mätningarna finns redovisade i [Holm *m.fl.*, 2002] och [Holm och Eriksson, 2002]. Resultaten av de utförda mätningarna har även studerats separat och finns redovisade i [Waern *m.fl.*, 2002].

Av resultatet från en beräkning vid 1355.5 MHz i figur 7, kan vi se att fältet som transmitteras genom själva skogen dämpas ut ganska snabbt och att signalen diffrakteras runt skogshindret. Strax bakom skogskanten domineras fältbidraget dock av komponenter som transmitterats igenom skogen. I figur 8 visas hur transmissionsförlusten varierar som funktion av antennhöjden för de tre olika avstånden bakom skogskanten. Mätresultaten finns också markerade i samma figur.



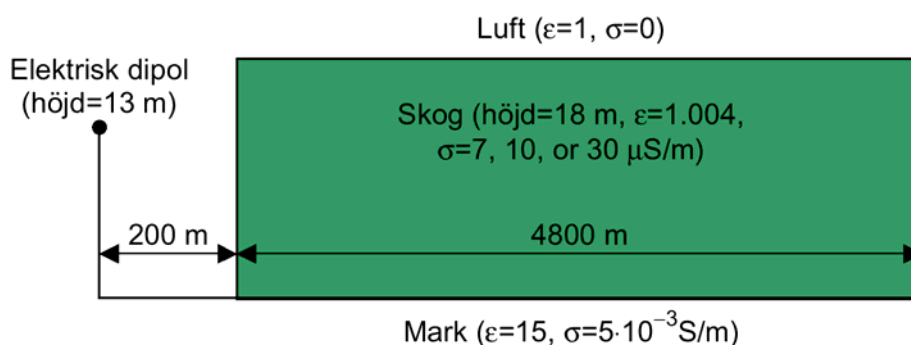
Figur 7: Transmissionsförlust för frekvensen 1355.5 MHz., horisontal polarisation. Skogen i slutet av utbredningssträckan är markerad med en svart linje.



Figur 8: Transmissionsförlust som funktion av antennhöjden för 1355.5 MHz. De heldragna, streckade och punktstreckade kurvorna är för avstånden 9, 51 respektive 109 m från skogskanten. Motsvarande mätningar är markerade med o, \times respektive Δ .

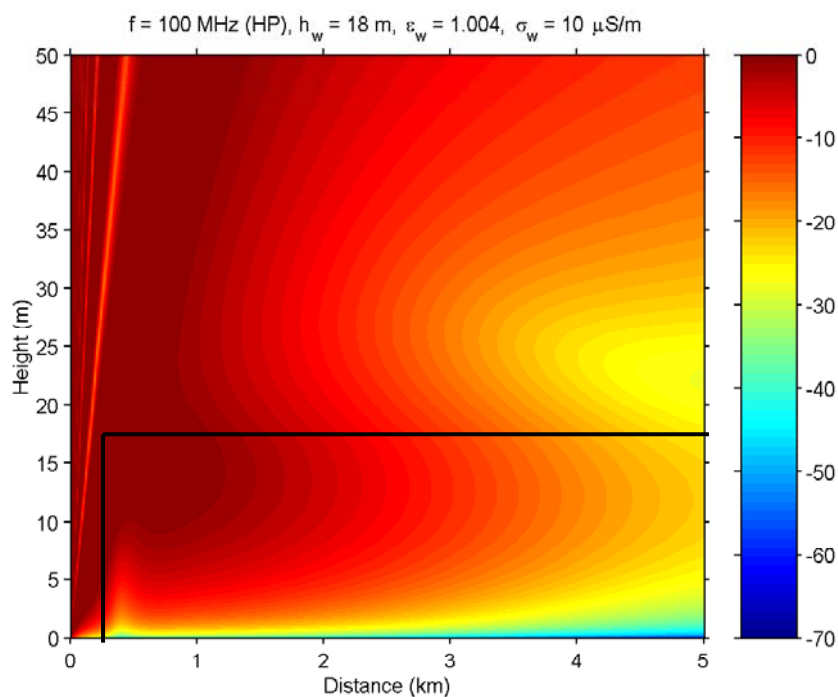
4.8.2 Utredning i homogen skog

Detta exempel visar vågutbredningen längs en 5 km lång sträcka i en homogen skog över plan mark. Geometrin för beräkningarna framgår av figur 9. Vid dessa beräkningar studerades effekterna av att variera de elektriska parametrarna för skogen vid ett antal olika frekvenser mellan 50 och 200 MHz. Resultaten från dessa undersökningar finns rapporterade i [Holm och Eriksson, 2002].

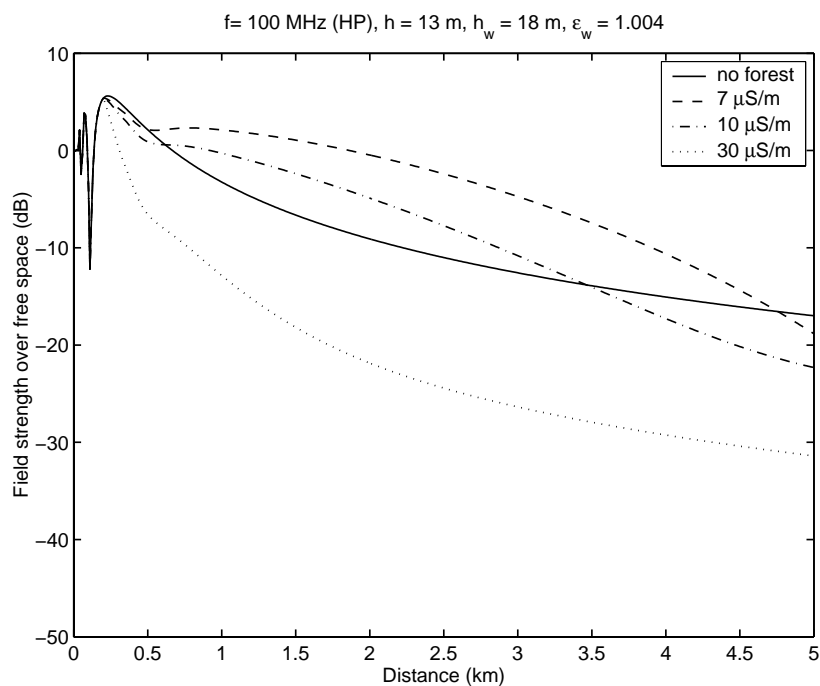


Figur 9: Geometri för utbredningssträckan. Skogen är modellerad som en homogen dielektrisk skiva. De dielektriska egenskaperna har antagits vara: $\epsilon=1.004$ och $\sigma=7, 10$ eller $30 \mu\text{S/m}$.

Ett exempel på hur fältet ser ut längs sträckan vid 100 MHz och en skogskonduktivitet på $10 \mu\text{S/m}$ visas i figur 10. I figur 11 kan vi se hur dämpningen varierar längs sträckan för en fix mottagarhöjd på 13 meter och för varierande konduktivitet hos skogen. En intressant iakttagelse som kan göras här är att dämpningen för de båda lägre konduktiviteterna för vissa avstånd är lägre än i fallet att det inte hade funnits någon skog alls längs sträckan.



Figur 10: Tvådimensionell färgplott som visar dämpningen relativt frirymdsdämpningen för frekvensen 100 MHz, horisontell polarisation och skogskonduktiviteten $\sigma=10 \text{ } \mu\text{S/m}$. Den modellerade skogen börjar vid avståndet 0.2 km och slutar vid avståndet 5 km och är markerad med en svart heldragen linje.



Figur 11: Dämpning relativt utbredning i fritt rum för höjden 13 m, frekvensen 100 MHz och horisontell polarisation.

5 Resultat

Sammanfattningsvis har Projekt Radiokanalen kommit fram till följande:

- PE-tekniken är en sedan länge känd beräkningsmetod för vågutbredning i troposfären över öppna havssträckor. Tekniken är numera också en erkänd metod för beräkning av transmissionsförlusten vid troposfärutbredning över både plan och kuperad terräng. Vi har här utvecklat en modell baserad på PE-teknik som lämpar sig mycket väl för att ta hand om större delen av de effekter som vegetationen i terrängen har på vågutbredningen.
- I vår modell har den vidvinkliga varianten av paraboliska ekvationen implementerats i ett Finit Differensschema. Vidare har terrängprofilen inkluderats med hjälp av ”shift map” teknik. Modellen är därmed betydligt mer användbar än tidigare publicerade modeller.
- Resultaten av de tester som utförts visar att PE-modellen, om den görs användarvänlig, kan vara en intressant efterföljare till DETVAG [*Asp m.fl.*, 1997] för beräkning av vågutbredning i kuperad terräng.
- Modellen lämpar sig för att beräkna vågutbredningseffekter till följd av anomalier i troposfärens brytningsindex (t.ex. ledsikt) över havssträckor där det även förekommer terräng. Den är därför intressant att använda i marina miljöer i t.ex. programmet LBM (Lokal Brytningsindex Modul) [*Karlsson m.fl.*, 1988].

6 Rekommendationer för framtiden – öppna frågor

Ett projekt föder nya frågeställningar och vi anser att följande områden bör behandlas ytterligare:

- För många typer av vågutbredningsmodeller och predikteringsredskap har innehållet i kartdatabaser en betydande inverkan på resultatet [*Asp m.fl.*, 2000]. Detta gäller både kvalitet som konkret innehåll. För framtiden är det viktigt att ta fram databaser där markbeklädningens höjd finns med samt att dessa uppdateras med rimligt tidsintervall. Kvaliteten på data måste anges på ett adekvat sätt för att möjliggöra bedömning av kvaliteten på färdiga prognoser och modeller. Utvecklingsarbete att ta fram högkvalitativa terräng- och vegetationsdata har genomförts på METRIA [*Pålsson m. fl.*, 2002]. Det är angeläget att följa upp deras arbete genom att försöka tillämpa resultaten på vågutbredningsberäkningar.
- Vidare är det av stort intresse att ur kartdatabaserna kunna bestämma de dielektriska parametrarna. Men eftersom vetenskapen om dessa, beträffande vegetationen, är liten så behövs ytterligare forskning på området.
- Det är av intresse att undersöka vad som händer i gränssnittet mellan skogen och luften där kontinuitetsvillkoren för fältet inte nödvändigtvis är satisfierade. Det bör kunna ge upphov till reflektioner vilket i sin tur medför ett polarisationsberoende hos den elektromagnetiska vågen. Detta polarisa-

tionsberoende modelleras inte på ett riktigt sätt om skogen endast beskrivs som en variation i brytningsindex, eftersom brytningsindex inte beror på polarisationen.

- Den PE-modell som vi utvecklat klarar en terrängprofil som lutar maximalt 10-15° från horisontalplanet. Det är önskvärt att öka den maximala lutningen på terrängen och idéer finns för hur en sådan förbättring kan göras.

7 Referenser

- M. O. Al-Nuaimi och A. M. Hammoudeh, "Measurements and predictions of attenuation and scatter of microwave signals by trees", *IEE Proceedings of Antennas and Propagation*, Part H, Vol 141, No 2, 1994.
- B. Asp, G. Eriksson, P. Holm, B. Lundborg "Vegetationseffekter på vågutbredning – Forskningsinriktning för försvarsmaktens behov", *FOA Memo Dnr. 00-3474/L*, juni 2000.
- B. Asp, G. Eriksson, P. Holm, "Detvag-90 - Final Report" *FOA-R--97-00566-504--SE*, September 1997.
- R. F. S. Caldeirinha och M. O. Al-Nuaimi, "Propagation modelling of bistatic scattering of isolated trees for micro- and millimeter wave urban microcells", *Proc PIMRC 2002* Vol. 1, pp. 135–139, Lisbon, Portugal, September 2002.
- D. Dence and T. Tamir, "Radio loss of lateral waves in forest environments", *Radio Sci.*, vol. 4, no. 4, pp. 307-318, April 1969.
- P. Holm, "Vegetationsmodeller för vågutbredning över jord", *FOA Memo Dnr. 99-4184/L*, Oktober 1999.
- P. Holm, G. Eriksson, P. Krans, B. Lundborg, E. Löfsved, U. Sterner, Å. Waern, "Wave propagation over a forest edge – Parabolic equation modelling vs. measurements", *Proc PIMRC2002*, vol 1, pp. 140-145, Lisbon, Portugal, September 2002.
- P. Holm, G Eriksson, "Parabolisk ekvationsteknik för vegetation." *FOI-R--0637--SE*, December 2002.
- ITU, "Attenuation in Vegetation", *Recommendation ITU-R 833-3*, 2001.
- E. Karlsson, A-C. Nilsson, M. Nordstrand, "Lokal brytningsindexmodell på fartyg. Beskrivning av beräkningsmetodik och mätsystem.", *FOA Rapport E 40037*, 1988.
- P. Larsson, "Uppmätning i fält av transmissionsförlust hos radiolänk", *Aerotech Telub Teknisk rapport E014-TR 010149*, September 2001.
- B. Lundborg, E. Löfsved, "A geometry-based vector channel model", *FOA Memo Dnr. 00-3473/L*, Juni 2000.
- B. Lundborg, B. Asp, G. Eriksson, P. Holm, E. Löfsved, M. Rundgren, "Radiokanalerna - Omvärldsbevakning år 2000", *FOI-R--00-01711-504--SE*, December 2000.

- B. Lundborg, U. Sterner, Å. Waern, "Radiokanalen - Omvärldsbevakning år 2002", *FOI Memo Dnr. 02-2154*, December 2002.
- E. Löfsved, Å. Waern, G. Eriksson, B. Lundborg, P. Krans, "Wave propagation over a forest edge", *COST 273 TD(02) 106*, September 2002.
- A. Paulsen och A. Seville, "Attenuation and distortion of millimetre radio waves propagating through vegetation", *Proc. AP-2000, Vol II*, Davos, Switzerland, April 2000.
- S. Pålsson, M. Rosengren, T. Rost, E. Willén, "Användning av satellitdata för vågutbredningsmodeller till ledningssystem", *Projektrapport M01681, METRIA Miljöanalys*, Juni 2002.
- J. Richter, M. O. Al-Nuaimi och R. F. S. Caldeirinha, "Phase function measurement for modelling radio wave attenuation and scatter in vegetation based on the theory of radiative energy transfer", *Proc PIMRC 2002*, Vol. 1, pp. 146–150, Lisbon, Portugal, September 2002a.
- J. Richter, M. O. Al-Nuaimi, N. Savage, A. Seville, N. C. Rogers, "Input parameter and phase function measurements for modelling propagation through vegetation based on the theory of radiative energy transfer", *Proc IEE Conf 02/112: Getting the most out of the radio spectrum*, pp. 38/1–5, London, UK, Oktober 2002b.
- N. C. Rogers, A. Seville, J. Richter, D. Ndzi, N. Savage, R. F. S. Caldeirinha, A. K. Shukla, M. O. Al-Nuaimi, K. Craig, E. Vilar, J. Austin, "A generic model of 1–60 GHz radio propagation through vegetation – Final report", *QI-NETIQ/KI/COM/CR020196/1.0*, maj 2002.
- J. F. Rouviere, N. Douchin, and P. F. Combes, "Improvement of the UTD formulation for diffraction of an electromagnetic wave by a dielectric wedge", *Electronics Letters*, Vol. 33, No. 5, pp. 373–375, February 1997.
- J. F. Rouviere, N. Douchin, and P. F. Combes, "Diffraction by dielectric wedges using both heuristic UTD formulations and FDTD", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, Vol. AP-47, No. 11, pp. 471–477, November 1999.
- N. Savage, D. Ndzi, E. Vilar, A. Seville, J. Richter, N. C. Rogers, "Wideband analysis of radio wave propagation through vegetation", *Proc IEE Conf 02/112: Getting the most out of the radio spectrum*, pp. 39/1–4, London, UK, Oktober 2002.
- A. Seville, N. C. Rogers, D. Ndzi, N. Savage, J. Richter, D. Eden, "A generic model of 1–62 GHz radio attenuation in vegetation". *Proc IEE Conf 02/112: Getting the most out of the radio spectrum*, pp. 24/1–6, London, UK, Oktober 2002.

A. K. Shukla, A. Seville, D. Ndzi, J. Richter, D. Eden, "Description of a generic vegetation attenuation model for 1–60 GHz", *COST 280, First International Workshop*, Juli 2002.

T. Tamir, "On radio wave propagation in forest environments", *IEEE Trans. Antennas and Propagat.*, vol. AP-15, no. 6, pp.806-817, November 1967.

T. Tamir, "Radio wave propagation along mixed paths in forest environments", *IEEE Trans. Antennas and Propagat.*, Vol. AP-25, No. 4, pp. 471-477, July 1977.

Å. Waern, B. Lundborg, P. Holm, U. Sterner, S. Linder, "Radiokanalen - Omvärldsbevakning år 2001", *FOI Memo Dnr. 01-3929*, December 2001.

Å. Waern, E. Löfsved, G. Eriksson, B. Lundborg "Evaluation of transmission loss measurements performed in a forest environment and over a forest edge", *FOI Memo Dnr 02-1484*, Juni 2002.