

Erik Zdansky, Johan Rasmusson, Magnus Gustafsson,
Nils Gustafsson, Stefan Nilsson, Jonas Rahm

Jämförelse mellan beräkningar och mätningar av radarmålarea för plan platta i markbakgrund



TOTALFÖRSVARETS FORSKNINGSPENSTITUT

Sensorteknik
Box 1165
581 11 Linköping

FOI-R--0522--SE

Juni 2002

ISSN 1650-1942

Vetenskaplig rapport

Erik Zdansky, Johan Rasmusson, Magnus Gustafsson,
Nils Gustafsson, Stefan Nilsson, Jonas Rahm

Jämförelse mellan beräkningar och mätningar av radarmålarea för plan platta i markbakgrund

Utgivare Totalförsvarets Forskningsinstitut - FOI Sensorteknik Box 1165 581 11 Linköping	Rapportnummer, ISRN FOI-R--0522--SE	Klassificering Vetenskaplig rapport
	Forskningsområde 6. Telekrig	
	Månad, år Juni 2002	Projektnummer E 3015
	Verksamhetsgren 5. Uppdragsfinansierad verksamhet	
	Delområde 62. Signaturanpassning	
Författare/redaktör Erik Zdansky Johan Rasmusson Magnus Gustafsson Nils Gustafsson Stefan Nilsson Jonas Rahm	Projektledare Jonas Rahm	
	Godkänd av Svante Ödman	
	Uppdragsgivare/kundbeteckning Försvarsmakten	
	Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig Jonas Rahm	
Rapportens titel Jämförelse mellan beräkningar och mätningar av radarmålärea för plan platta i markbakgrund.		
Sammanfattning (högst 200 ord) Föreliggande rapport redovisar en jämförelse mellan beräknade och mätta RCS data för en plan metallisk platta placerad på en grusplan. Syftet är att utveckla metoder för beräkning av mål-markväxelverkan för framtida signaturberäkningar och stöd vid kravsättning. En koherent, deterministisk, markmodell har byggts av ett stort antal triangulära fasetter. Fresnelkoefficienter har beräknats ur semiempiriska litteraturdata för jord. Beräkningsdata har separerats i direkt-, dubbelstuds- och trippelstudsbidrag. RCS-mätningar på en plan rektangulär platta utfördes senhösten 2001 på en jämn yta av vått fint grus. Mätningarna gjordes i X-bandet (8-12 GHz) med CW-teknik. Avståndsupplösning erhöles genom Fouriertransformering och mjukvarugrindning. Antennhöjd och antennavstånd varierades liksom plattans lutning (-20 till +20°). Jämförelsen visar på avvikelser mellan mätta och beräknade värden. De möjliga orsakerna diskuteras. Resultaten visar att fortsatt utveckling av såväl mätmetodik som modelleringsmetoder är nödvändig.		
Nyckelord Bakgrundsmodellering, markmodell, växelverkan, multipelreflexion, radarsignatur, radarmålärea, RCS		
Övriga bibliografiska uppgifter	Språk Svenska	
ISSN 1650-1942	Antal sidor: 34 s.	
Distribution enligt missiv	Pris: Enligt prislista	

Issuing organization FOI – Swedish Defence Research Agency Division of Sensor Technology P.O. Box 1165 SE - 581 11 Linköping	Report number, ISRN FOI-R--0522--SE	Report type Scientific Report
	Research area code 6. Electronic warfare	
	Month year June 2002	Project no. E 3015
	Customers code 5. Contracted research	
	Sub area code 62. Stealth Technology	
Author/s (editor/s) Erik Zdansky Johan Rasmusson Magnus Gustafsson Nils Gustafsson Stefan Nilsson Jonas Rahm	Project manager Jonas Rahm	
	Approved by Svante Ödman	
	Sponsoring agency Swedish Armed Forces	
	Scientifically and technically responsible Jonas Rahm	
Report title (In translation) Comparison between calculated and measured RCS data for a flat rectangular PEC plate standing on a fairly smooth ground surface		
Abstract (not more than 200 words) <p>This report presents a comparison between measured and calculated RCS data for a flat rectangular PEC plate standing on a fairly smooth ground surface. The purpose is to develop methods for the calculation of ground-surface interaction to meet future needs for reliable signature estimates and specifications. The ground surface is described by a large number of triangular facets to provide a deterministic coherent model. Fresnel reflection coefficients based on literature semi-empirical dielectric data for soils have been used. Calculated data have been separated into direct, double-bounce and triple bounce contributions.</p> <p>RCS measurements on a flat rectangular plate were performed during late autumn 2001 on a smooth ground surface of coarse wet sand. The measurements employed a CW method using X-band frequencies (8-12 GHz) and vertical polarisation. Depth resolution was achieved using Fourier transformation and software gating. Antenna height and range were varied as well as the inclination (-20 to +20°) of the plate.</p> <p>The comparison shows differences. The possible causes of these deviations are discussed. The results call for further development of methods for measurements as well as modelling.</p>		
Keywords Background modelling, ground surface model, interaction, multiple reflection, radar signature, radar cross section, RCS		
Further bibliographic information	Language Swedish	
ISSN 1650-1942	Pages 34 p.	
	Price acc. to pricelist	

Innehåll

1	Inledning	5
2	Teoretisk modellering och beräkning av RCS för platta i markbakgrund.....	6
2.1	Allmänt	6
2.2	Deterministisk modellering av markbakgrund.....	8
2.2.1	Modellering av marktopografi	9
2.2.2	Modellering av markens dielektriska egenskaper.....	9
2.2.3	Separation av de ingående målarebidragen.....	10
3	Beräkningsresultat	12
4	Mätningar.....	19
4.1	Inledning	19
4.2	Mätningar.....	19
4.3	Kalibrering, bakgrundssubtraktion och utgrindningar	19
4.4	Resultat	20
4.4.1	Bakgrundsmätningar	20
4.4.2	Kalibreringsmätningar	21
4.4.3	Mätningar på rektangulär platta.....	23
4.4.4	Beräknad radarmålarea för platta.....	25
5	Jämförelse mellan teori och mätningar	26
6	Slutsatser.....	32
7	Fortsatt arbete	33
8	Referenser	34

1 Inledning

Uppdraget är att för försvarets behov utveckla metoder för beräkning, modellering, mätning, analys och värdering av radarsignaturer. Begreppet radarsignaturer innefattar här målobjektets egen-signatur, bakgrundmiljöns signatur samt interaktionen mellan målobjekt och bakgrund. Ett viktigt moment är att utveckla metoder för signaturanpassning av olika objekt i skilda bakgrundsmiljöer. Den ständiga utvecklingen av nya och alltmer sofistikerade hotsensorer gör att försvaret har ett stort behov av att signaturanpassa såväl befintlig som ny militär materiel.

Föreliggande arbete syftar till att utveckla avancerade koherenta modelleringsmetoder för RCS-beräkningar som också beaktar växelverkan mellan mål och markbakgrund. Härvid beräknas radarmålytan för ett typfall som utgörs av en godtyckligt lutande plan rektangulär platta vars ena sida vilar mot en skrovlig markyta. Själva markytan är uppbyggd av ett stort antal triangulära fasettytor.

Radarmätningar mot en dylik rektangulär platta vilande på en jämn grusplan utfördes under hösten 2001. Resultaten från dessa mätningar jämfördes därefter med de beräknade.

2 Teoretisk modellering och beräkning av RCS för platta i markbakgrund

2.1 Allmänt

Möjligheten att upptäcka och följa ett mål med radar är starkt beroende av bakgrunden. För mål på ytan (mark eller sjö) är denna bakgrund dominerad av terräng- eller sjöklotter. Denna beskrivs i markfallet av markmålarean, eller mer generellt av klottermålarean.

Direkta jämförelser mellan ett objekts frirymdsmålarea och klottermålarea är missvisande därför att de inte tar hänsyn till växelverkan mellan objektet och dess omgivning. Denna växelverkan domineras av multipelreflexioner mellan objektet och omgivningen. Man kan definiera en effektiv objekt-målarea som skillnaden mellan bakgrund med objekt och bakgrunden utan objekt. Observera att även skuggningen av bakgrunden kommer att ingå som ett bidrag (ofta negativt) i en sådan definition.

Modellering av denna växelverkan kan göras på olika nivåer, en indelning i tre fall kan t ex se ut på följande sätt:

1. *Medelvärdesmodellering* som utifrån vissa antaganden beräknar hur den effektiva målarean i genomsnitt ändras p g a växelverkan. Den främsta begränsningen ligger här i att metoden inte återspeglar den spridning i målareor som är en konsekvens av att växelverkan varierar i styrka och t o m kan ge negativa bidrag. Värden baserade på sådana metoder kan dessutom förväntas ge felaktiga eller missvisande resultat om de används för t ex simulering av SAR-bilder (SAR syntetisk aperturradar). Metoder av denna typ finns beskrivna i [3,4].
2. *Inkoherent modellering* av statistiska variationer. På denna nivå försöker man att med olika fördelningar och fördelningsparametrar (t ex standardavvikelse) beskriva hur variationen kring antingen de effektiva medelmålareorna eller markens medelegenskaper ser ut. Detta kan göras analytiskt eller med Monte Carlo-metoder. Resultaten för två olika sensorriktningar kommer då att svara mot två olika markavsnitt med samma medelegenskaper. De är då inte lämpade som indata för simulering av metoder som bygger på att samma område mäts in från många riktningar, t ex SAR. Inkoherenta bidrag kan dock vara aktuella för vajande vegetation eller för fordon som rör sig.
3. *Koherent modellering* av statistiska variationer. Detta kan åstadkommas genom att radarmålareaberäkningar görs för statistiskt modellerade terrängavsnitt (Monte Carlo-simulering). Bidragen från enskilda spridare kommer då att modelleras konsekvent för olika infallsriktningar vilket ger koherens och är en förutsättning för simulering av t ex avståndsp profiler och SAR-bilder. Nackdelen är att den komplexa beräkningen av radarmålarea för kombinationen objekt och mark behöver göras för ett stort antal fall, för att man ska kunna bilda sig en uppfattning om det genomsnittliga utfallet och dess variationer. Man bör vara uppmärksam på att marken är fraktal till sin natur, d v s innehåller strukturer av varierande storlek, från mycket mindre till mycket större än radarvåglängden. Även denna metod måste därför delvis förlita sig på någon form av medelvärdesbehandling, t ex för spridningen från en enskild fasett. En annan nackdel är att modelleringen försväras av att markelement relativt långt från objektet kan bidra. Detta leder

till stora CAD-modeller som inte bara kräver längre beräkningstider per vinkel och frekvens. För ISAR-avbildningar krävs dessutom fler vinklar och frekvenser. Ju längre ut från objektet mark-elementen ligger desto mer strykande blir infallet av de växelverkande strålarna mot marken. Därmed blir spridningen också mer spekulär (mindre diffus) och kan behandlas koherent med analytiska metoder. Exempel på tidigare studier finns i [5].

För alla tre metoderna gäller givetvis att de förutsätter en någorlunda korrekt modellering av markens spridningsegenskaper, åtminstone för de strålgångar som ger väsentliga bidrag till målarean. För multipelreflexion innebär det att man behöver ha tillgång till bistatiska markdata, d v s man behöver veta hur strålen sprids i andra riktningar än infallsriktningen.

En fullständig beskrivning av markens spridningsegenskaper är komplex. En central roll har den bistatiska spridningsfunktionen som ger spridningsamplituder för varje kombination av infallande och utgående strålriktningar. Spridningsegenskaperna beror i första hand av markojämheter och markens dielektriska egenskaper och av spridning från vegetation. För metoderna tillhörande grupp 2 behöver man dessutom den statistiska fördelningen för varje kombination av infallande och utgående stråle. I metod 3 fås den statistiska variationen i stället ur markens uppbyggnad, men motsvarande data skulle i stället behövas för validering.

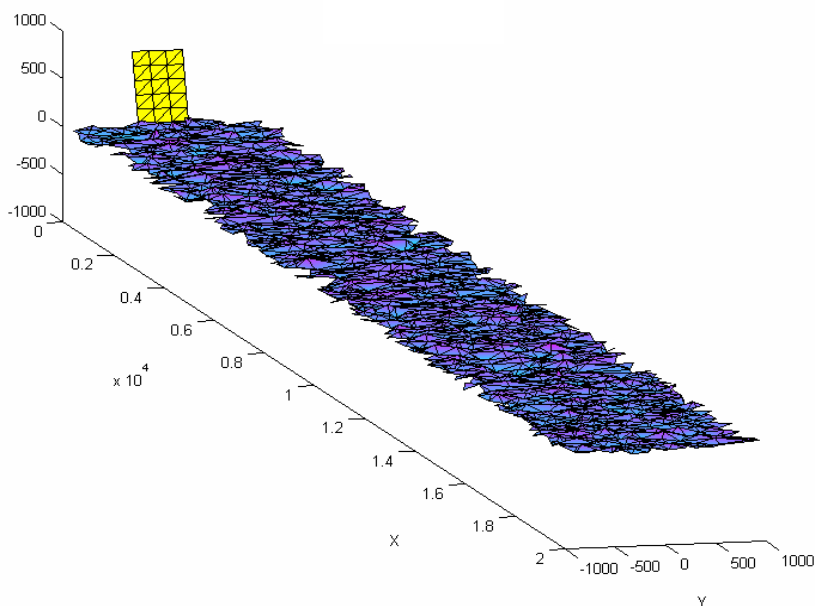
För att göra situationen hanterlig får man koncentrera sig på vissa snitt genom den bistatiska spridningsfunktionen. Det monostatiska är det bäst kända eftersom det finns en omfattande litteratur om monostatiska markmålareor [6,7]. Dessa behövs naturligtvis för en värdering av radarsignatur gentemot klotterbakgrunden men har liten betydelse för beräkning av den effektiva målarean eftersom geometrin i allmänhet skiljer starkt. De är därför t o m av begränsat värde för validering av använda modeller.

Viktigt för multipelspridning är det spekulära snittet d v s hur strålen påverkas (i första hand dämpas) vid en reflexion i en plan yta. Detta beskrivs av Fresnels formler.

Även snitt utanför det spekulära kan vara viktiga vilket man försöker simulera m h a fysikalisk optik och införande av fasetter eller andra delspridare.

2.2 Deterministisk modellering av markbakgrund

Beräkningsresultaten är genererade med PO-beräkningar på en fasettbaserad modell. Denna modellering har tidigare beskrivits [1]. Beräkningarna för denna rapport har gjorts med programmet RadBase 2, istället för som tidigare [1] med en uppgraderad version av FOPOL. RadBase 2 kan via look-up-tabeller göra beräkningar inte bara för metalliska (PEC) ytor utan även för ytor med dielektriska eller magnetiska skiktade beläggningar. RadBase har heller inte visat några tecken på att ge singulariteter av det slag som i vissa fall uppträtt i FOPOL. Genom överenskommelse med programvaruleverantören har vi fått tillgång till en version som kan hantera externt genererade tabeller och därmed använda Fresnels reflexionskoefficienter beräknade för gränssytor mellan luft och jord. RadBase kräver att tabellen genereras för en viss, ganska gles vinkeluppsättning och begränsar antalet frekvenser till ett odokumenterat men ganska litet antal frekvenser. RadBase förefaller inte interpolera mellan frekvenser (åtminstone inte för uppräknade frekvenser) men gör det troligen mellan vinklar. Tillämpningen av Fresnels reflexionskoefficienter på icke-spekulära fall förefaller rimlig och torde höra till praxis för PO-beräkningar på strukturer med ickemetalliska beläggningar, men är inte självklar och grunderna har inte dokumenterats av RadBase leverantör [8]. Kontroll av referensfall med ytrelekterande resp transparenta beläggningar har visat att för Radbase 2 är själva beläggningsens ovansida, den referensyta som CAD-modellen beskriver. Dielektriska data för jord har beräknats ur en semiempirisk modell [6]. Till nackdelarna med RadBase jämfört med FOPOL hör att beräkningarna måste upprepas, eftersom enkel-, dubbel- och trippelstudsbidragen inte redovisas separat som i FOPOL. Däremot beräknar RadBase hela polarisationsmatrisen samtidigt medan FOPOL bara gör beräkningen för en infallande polarisation åt gången. Vidare gör licensbegränsningar att RadBase bara kan arbeta med en beräkning åt gången medan flera FOPOL-beräkningar kan köras parallellt på en eller flera datorer.



Figur 1. Rektangulär platta och fasettmodellerad mark (dimensioner i mm).

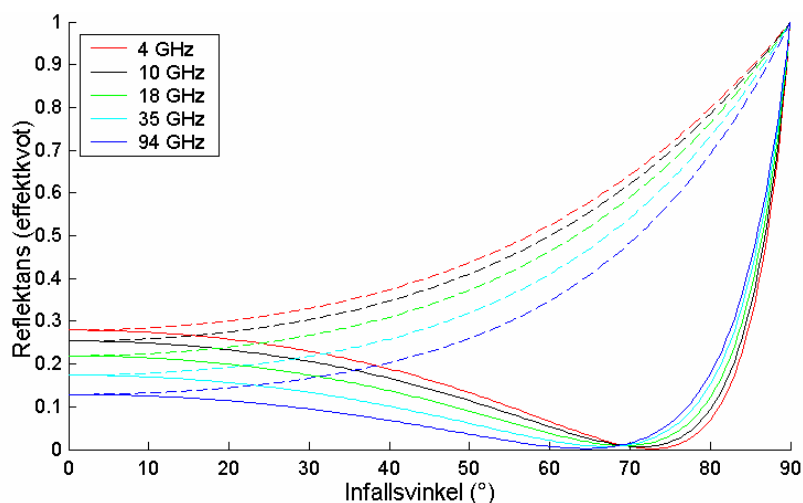
2.2.1 Modellering av marktopografi

Modelleringen av marktopografin är baserad på fasetter och har tidigare beskrivits mer i detalj [1]. Fasetteringen är gjord för att beskriva ett i huvudsak plant markstycke utan större stenar eller storskaliga terrängformer. Fasettmodellering begränsar möjligheterna att beskriva markens fraktala natur. Den är också begränsad till att beskriva bar mark (el hav och ev snötäckt mark), eller åtminstone mark där vegetationens spridningsbidrag kan försummas.

2.2.2 Modellering av markens dielektriska egenskaper

För beräkning av Fresnelkoefficienter har en semiempirisk modell, ursprungligen presenterad av Dobson 1985, sådan den återgivits i [7] använts efter modifiering så att en temperaturberoende formel för vattnets egenskaper används. Även vattenmodellen är tagen från [7] som ställt samman den från olika källor. Markens egenskaper beror främst av fukthalten, och vattnets egenskaper uppvisar i sin tur ett ganska kraftigt temperaturberoende, särskilt till följd av relaxationstidens temperaturberoende. Om vattnet fryser fullständigt sjunker permittiviteten mycket kraftigt men små mängder lösta ämnen kan hindra dess fullständiga frysning och restvätskan är då mycket betydelsefull för egenskaperna. Detta har främst studerats för havsis och snö. De dielektriska egenskaperna påverkas också av jordartssammansättning, främst genom att av finkorniga jordarter bundet vatten inte bidrar i samma utsträckning, och av porositet. Eftersom mätplatsen ej var vald vid den tidpunkt då beräkningarna påbörjades kunde parametrar ej väljas för att motsvara denna. De använda parametrarna är 20% volumetrisk fukt, 30% torrporositet, 50% silt (torrsutanshalt, sammanfattande beteckning på partiklar mellan sand och lera), 50% lera och temperaturen 5 C. En sammansättning med 2/3 sand och 1/3 silt som närmare svarar mot mätplatsens grusplan får snarlika egenskaper vid 15,4% fukt och 33% torrporositet.

Vid mätningarna i Ryd togs ett markprov för vilket två fukthaltsbestämningar gav resultaten 6,2 resp 7,2 viktsprocent. Om man antar att marken var vattenmättad (volumetrisk fukt = torrporositet) och att densiteten för grusmaterialet exkl luft och vatten är som för granit 2700 kg/m^3 så får man volumetriska fukthalter omkr 15-17% d v s ganska nära de antagna parametrarna.



Figur 2. Reflektans, $d v s$ kvadraten på Fresnelkoefficienternas absolutbelopp. Heldragna kurvor vv-polarisation, streckade hh-polarisation. Lägg märke till Brewsterminima omkring 70° infallsvinkel.

Figur 2 visar markreflektans enligt de beräknade Fresnelkoefficienterna. För direkt infall mot slät mark är infallsvinkeln=90°-depressionsvinkeln, och för sekundär belysning från plattan kan infallsvinkeln beräknas ur depressionsvinkel och plattlutning. Om marken inte är slät är det enligt stationär-fas-approximationen [4] så att radarreturen domineras av bidrag från punkter där ytans tangent har en sådan orientering att den tillsammans med plattan bildar en retroreflekterande struktur. Det blir då den lokala infallsvinkeln i dessa punkter som avgör markens effektiva reflektans.

För infallsvinklar under Brewstervinkeln ökar dämpningen med ökande frekvens, men för vertikal polarisation kan Brewstervinkelns förskjutning mot högre värden och de därmed sammanhängande lägre reflektanserna för mer strykande infall vara mer betydelsefulla.

2.2.3 Separation av de ingående målarebidragen

För en komplett separation av direktbidrag, dubbelstudsbidrag och trippelstudsbidrag krävs att beräkningar görs för platta i markbakgrund med 1, 2 resp 3 studsar och att samma beräkningar görs för enbart marken samt att direktbidraget för enbart plattan beräknas. Beräkningarna för enbart platta resp enbart mark kan förstås användas för alla mark-plattavinklar. Eftersom inre multipelreflexion i de fasetterade markytorna torde vara relativt liten kan det ev räcka med en beräkning på enbart mark, men effekterna av detta skulle behöva utvärderas först. Alla separationsberäkningar utförs koherent på de komplexa spridningsamplituderna. Första steget är att beräkna effektiv målarea, $d v s$ skillnaden mellan mark med mål och enbart mark, för n studsar:

$$V_{eff,n} = V_n - V_{gnd,n}$$

Det är lämpligt att kombinera subtraktion av direktbidraget med detta steg så att endast växelverkansdelen återstår:

$$V_{vxv,n} = V_n - V_{gnd,n} - V_{dir}$$

För enkelstudsfall är växelverkan lika med skuggbidraget:

$$V_{vxv,1} = V_{shdw} = V_1 - V_{gnd,1} - V_{dir}$$

I dessa modeller kommer skuggningsbidraget att vara litet och insignifikant eftersom markmodellen tar slut vid plattans nedkant. Endast en liten skuggning av plattan från markjämheter och numerisk onoggrannhet kommer att bidra, men den relevanta delen $d v s$ plattans skuggning av marken bidrar ej, p g a att marken ej modellerats bakom plattan.

Växelverkan upp t o m trippelstuds kallas här helt enkelt för växelverkan eftersom fler studsar inte beaktas. Observera att skuggningsbidraget kommer att ingå i denna term. Genom subtraktion av växelverkan upp t o m dubbelstuds fås trippelstudsbidraget:

$$V_{trippel} = V_{eff,3} - V_{eff,2}$$

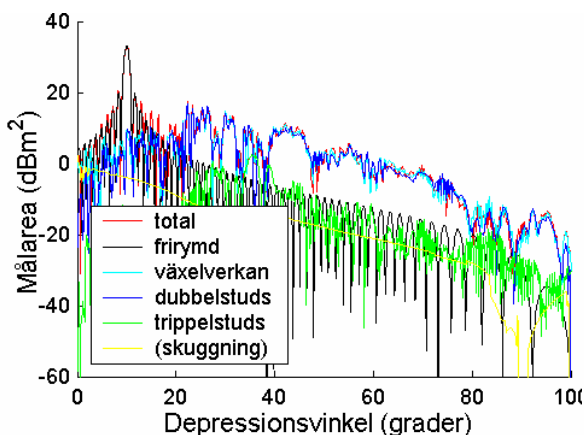
Dubbelstudsbidraget fås på motsvarande sätt ur växelverkan upp t o m dubbelstuds genom subtraktion av enkelstudsväxelverkan d v s skuggningsbidraget.

$$V_{dubbel} = V_{eff,2} - V_{eff,1} = V_{vxv,2} - V_{vxv,1} \approx V_{vxv,2}$$

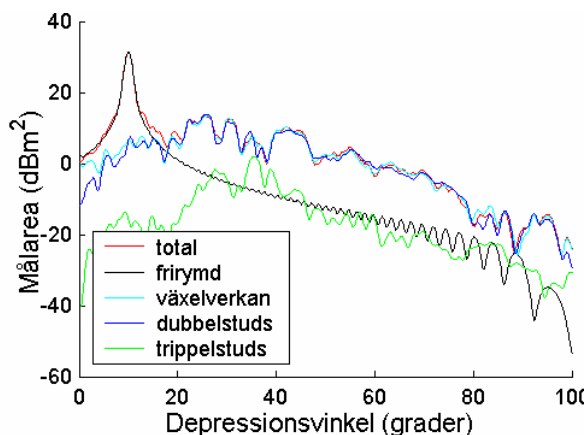
Här har skuggningsbidraget separerats där tillräckligt med beräkningsdata funnits tillgängliga för kontrollens skull. Skuggningsbidragen redovisas i allmänhet inte eftersom de inte säger något om den verkliga skuggan.

3 Beräkningsresultat

Beräkningarna har utförts på ett stort antal aspektvinklar och vid många frekvenser och plattvinklar. Dessutom har beräkningar utförts på både PEC- och dielektrisk mark. För att inte drunkna i figurer kommer endast en delmängd av beräkningsresultaten att presenteras här.

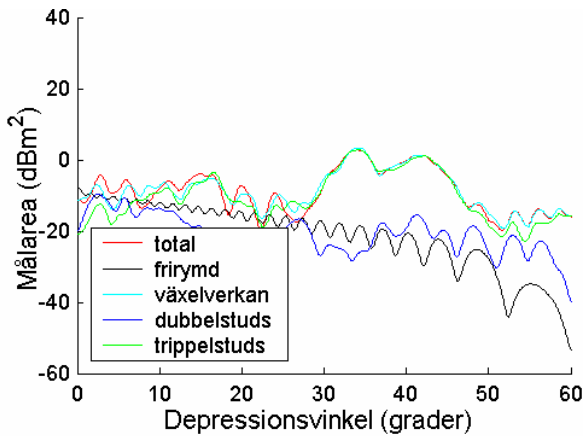


Figur 3. Beräknade målareavärden uppdelade i olika komponenter. Plattlutning $+10^\circ$, 10 GHz, polarisation hh. Fig visar värden beräknade i $0,1^\circ$ steg. Figuren ger också ett exempel på det skuggbidrag som diskuteras i texten.

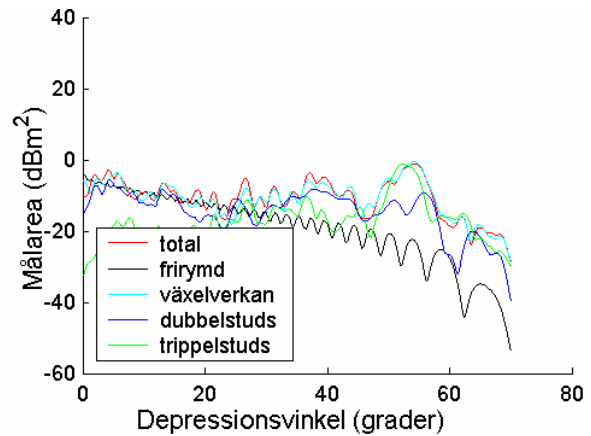


Figur 4. Beräknade målareavärden uppdelade i olika komponenter. Plattlutning $+10^\circ$, 10 GHz, polarisation hh. Fig visar värden beräknade i $0,1^\circ$ steg. Kurvorna har givits en löpande medelvärdesbildning genom faltning med en normaliserad Gausskurva.

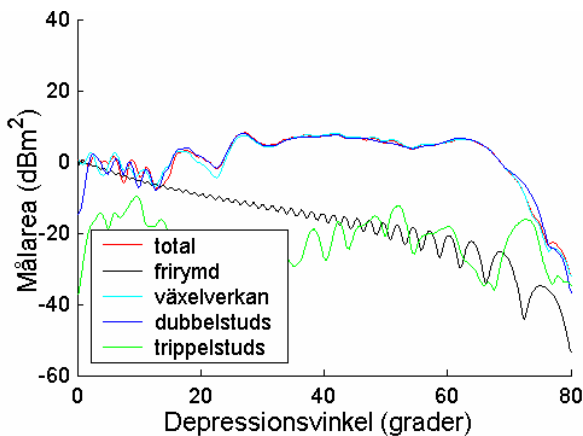
Figur 3 visar ett exempel på beräkningsresultat uppdelat i komponenter. Vid 10° uppträder den spekulära reflexen från plattan och kring denna sidolober. Eftersom plattan är relativt hög (25 våglängder) blir huvudloben förhållandevis smal och sidoloberna kommer tätt. I växelverkan-komponenterna och delar som domineras av dessa blir variationerna mer oregelbundna vilket återspeglar den ökade komplexiteten och framför allt markjämnheterna. Variationerna blir också snabbare beroende på att det spridande området är större. Det använda vinkelsteget $0,1^\circ$ är knappast tillräckligt litet för att fånga in alla variationer men bör med hänsyn till oregelbundenheterna kunna ge ett gott statistiskt urval. För att kurvorna för de olika komponenterna lättare ska kunna urskiljas har vi valt att filtrera kurvorna genom en löpande medelvärdesbildning med en Gausskurva som viktfunction (Figur 4). Den valda bredden ($0,5^\circ$ FWHM) är en kompromiss mellan önskemålen att bevara så mycket detaljer som möjligt och att få tydliga figurer. Framför allt filtreras låga värden bort medan toppvärden och enveloppformer påverkas ganska lite. För ytterligare diskussioner om kurvornas utseende hänvisas till motsvarande diskussioner för vv-polarisationsresultaten nedan.



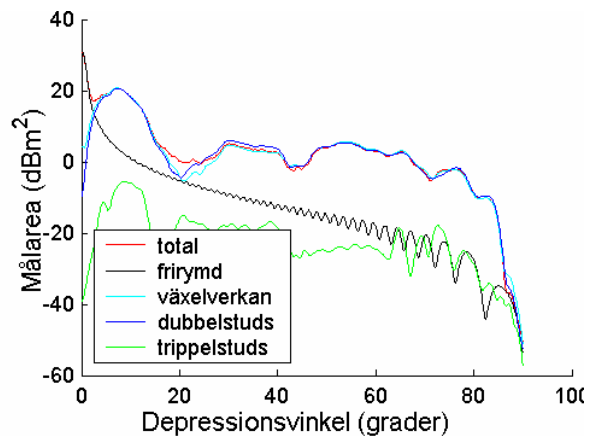
Figur 5. Målaareakomponenter för plattlutning -30° , 10 GHz, polarisation vv.



Figur 6. Målaareakomponenter för plattlutning -20° , 10 GHz, polarisation vv.



Figur 7. Målaareakomponenter för plattlutning -10° , 10 GHz, polarisation vv.

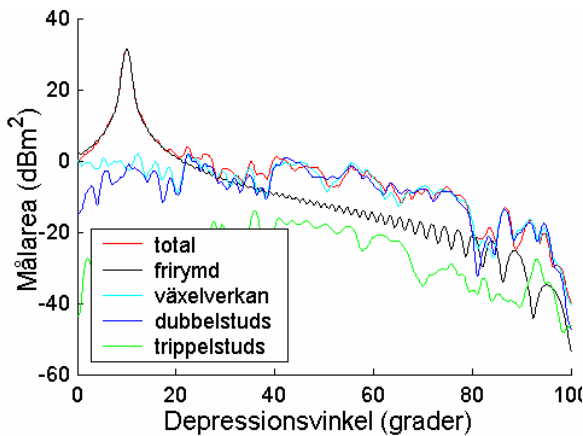


Figur 8. Målaareakomponenter för plattlutning 0° , 10 GHz, polarisation vv.

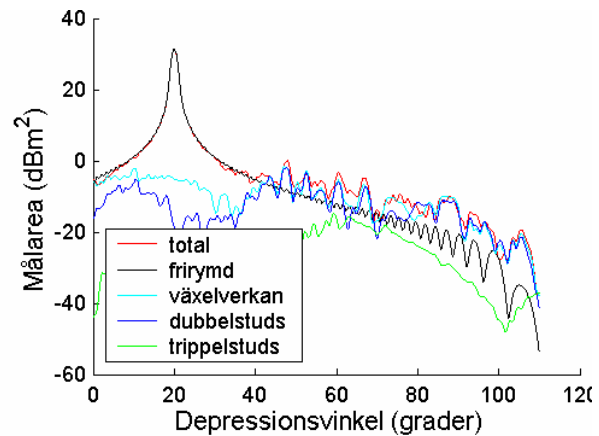
Figur 5 - Figur 8 visar beräknade komponentkurvor för plattlutningar som är negativa eller noll, dvs där multipelspridning via marken kan förväntas dominera. Vid depressionsvinklar synes dock direktbidraget vara av samma storleksordning som de övriga bidragen eller t o m större. Detta beror på att alla infallsriktningar ligger i ett plan som är vinkelrät mot plåten och två av dess kanter, dvs ett sidolobsplan där direktbidraget är väsentligt högre än för kringliggande azimutvinklar. Vid lutningen -30° är trippelstuds dominerande över stora vinkelområden, men redan vid -20° har dess relativa betydelse minskat väsentligt till förmån för dubbelstuds för att vid -10° vara av underordnad betydelse.

Det är här på sin plats att fråga sig om beräkningarna bör göras med mer än tre studsar. Svaret är att så knappast är fallet. För det första uppträder fyrstudsreflexioner idealt sett först för diedervinklar under 45° (jfr $<90^\circ$ för trippelstuds) och innan de blir betydelsefulla torde man få gå till ännu mindre diedervinklar. För det andra kommer två av studsarna att vara markstudsar som verkar dämpande genom spridning och absorption. För det tredje får man räkna med att approximationerna gradvis ökar med antalet studsar vid GO-PO-beräkning av multipelreflexion så att beräkningarna så småningom ändå inte längre vore meningsfulla. Även dessa beräkningar bör därför tolkas med försiktighet, särskilt vad gäller nivåer. För verkliga målobjekt är det dessutom vanligt att ytornas nederkanter ej når marken vilket ytterligare minskar eller t o m eliminerar betydelsen av trippelstuds och högre multipelreflexioner via mark.

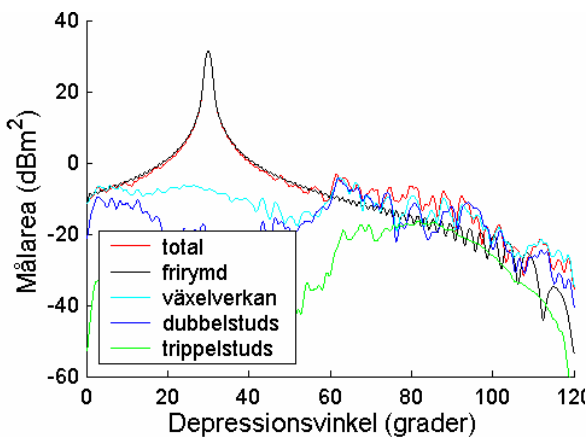
Trots den modellerade markens ojämnheter visar *Figur 8* att rätvinkliga, eller nära rätvinkliga plattamarkdiedrar kan ge avsevärda signaturhöjningar genom retroreflexionsmekanismer. Markojämnheterna, sannolikt i kombination med sidlobeffekter leder också till att beräkningarna även för plattlutning 0° , och t o m positiva lutningar ger trippelstudsbidrag. Dessa är dock av underordnad betydelse. För de positiva plattlutningarna fås den spekulära reflexen då depressionsvinkeln är lika med plattlutningen. Först vid depressioner svarande mot dubbla plattlutningen fås en ordentlig sekundärbelysning av marken som kan leda till kraftigare växelverkanstermer, men endast en liten del av markfasetterna kommer då att ha en orientering som är gynnsam för att ge höga värden. Det förhållande att dubbelstudsbidraget ändå är relativt högt i området mellan 0° depression och dubbla lutningsvinkeln tyder på att nivån kan vara bestämd av begränsningar i den numeriska noggrannheten. Man kan också tänka sig att sekundärbelysning från sidolober till plattan bidrar, men det är tveksamt i vilken mån GO-PO-metoden för beräkning av multipelreflexion skulle få med detta. Skillnaden mellan växelverkan och dubbelstuds beror av den skuggningsterm som diskuterats ovan. Trippelstuds termen är försumbar i sammanhanget. Positiva plattlutningar är gynnsamma ur signatursynpunkt eftersom de utanför sidlobplanet, som ju sammanfaller med dessa beräkningar, och under dubbla lutningsvinkeln ger lägre signaturer.



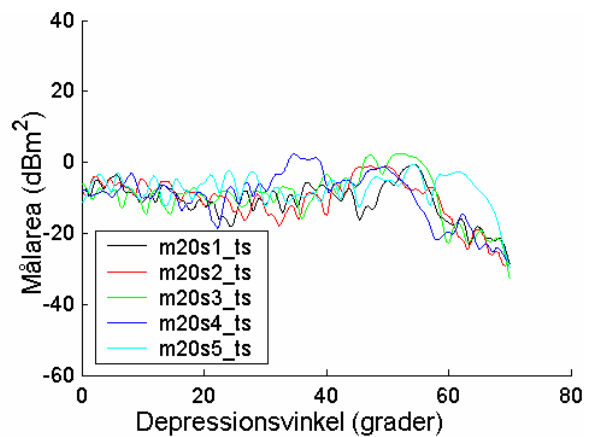
Figur 9. Målareakomponenter för plattlutning $+10^\circ$, 10 GHz, polarisation vv.



Figur 10. Målareakomponenter för plattlutning $+20^\circ$, 10 GHz, polarisation vv.

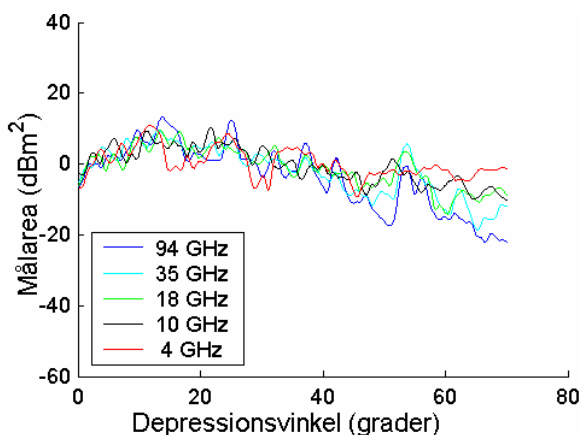


Figur 11. Målareakomponenter för plattlutning $+30^\circ$, 10 GHz, polarisation vv.

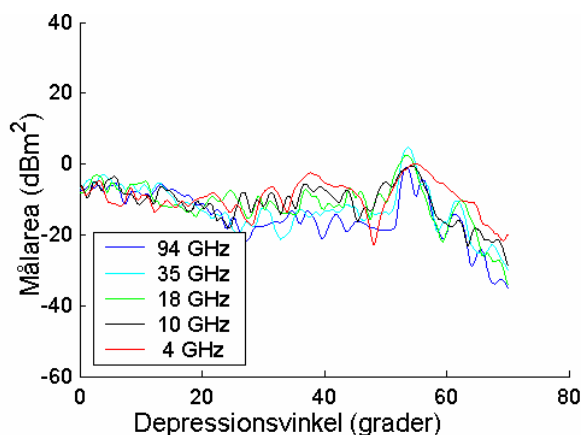


Figur 12. En jämförelse mellan total växelverkan beräknad för 5 olika markstycken som genererats stokastiskt med samma parameteruppsättning. plattlutning -20° , 10 GHz och polarisation vv.

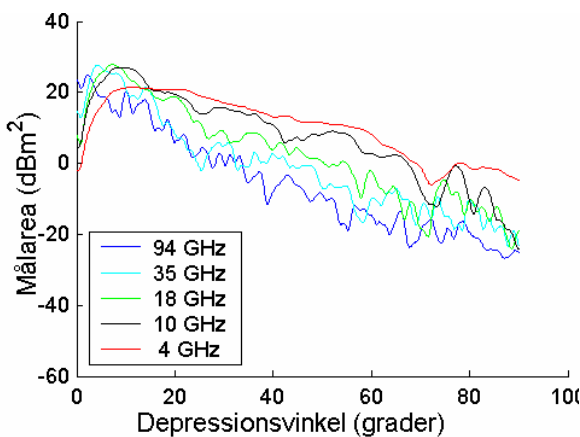
Figur 12 visar ett antal markstycken, som inte är lika, men genererade med samma styrparametrar (standardavvikelse i nodhöjd, nodtäthet och jordegenskaper). Vid högre depressioner är en mindre del av markplanet inblandat och enskilda fasetter har då större möjlighet att slå igenom. Även geometrin kan tänkas bidra till den lägre variationen vid lägre vinklar, så kan t ex en något ojämn yta uppträda spekulärt vid strykande infall. Resultaten för de olika markplanen är visserligen inte desamma men väl likartade. Beräkningar gjorda för en eller ett fåtal simulerade marktyper kan därför antas vara någorlunda representativa för mark med de genomsnittsegenskaper parameteruppsättningen motsvarar.



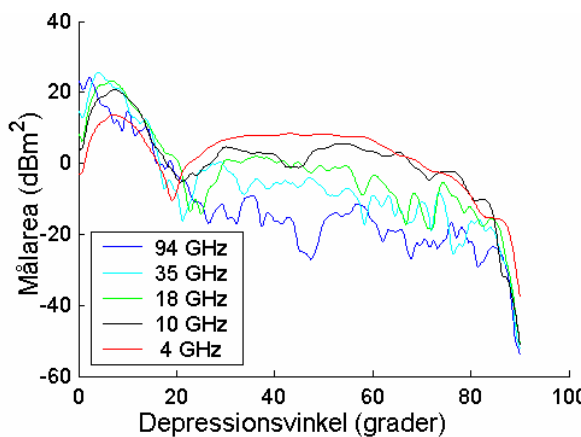
Figur 13. Växelverksbidrag beräknade vid olika frekvenser för en och samma modell. Plattlutning 20° , 10 GHz, polarisation hh.



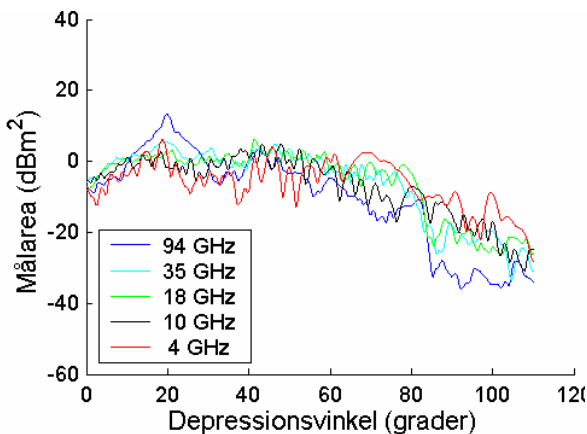
Figur 14. Växelverksbidrag beräknade vid olika frekvenser för en och samma modell. Plattlutning 20° , 10 GHz, polarisation vv.



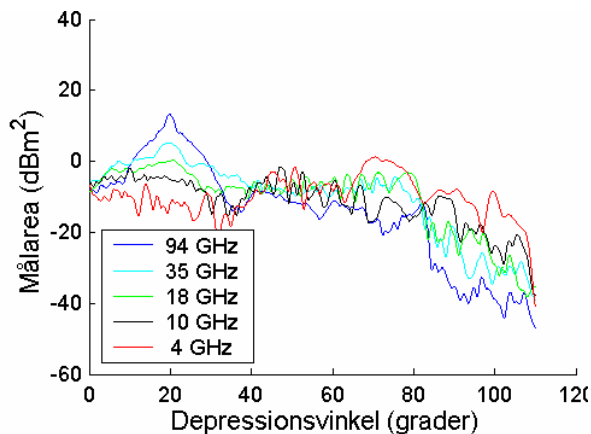
Figur 15. Växelverksbidrag beräknade vid olika frekvenser för en och samma modell. Plattlutning 0° , 10 GHz, polarisation hh.



Figur 16. Växelverksbidrag beräknade vid olika frekvenser för en och samma modell. Plattlutning 0° , 10 GHz, polarisation vv.



Figur 17. Växelverkansbidrag beräknade vid olika frekvenser för en och samma modell. Plattlutning +20°, 10 GHz, polarisation hh.



Figur 18. Växelverkansbidrag beräknade vid olika frekvenser för en och samma modell. Plattlutning +20°, 10 GHz, polarisation vv.

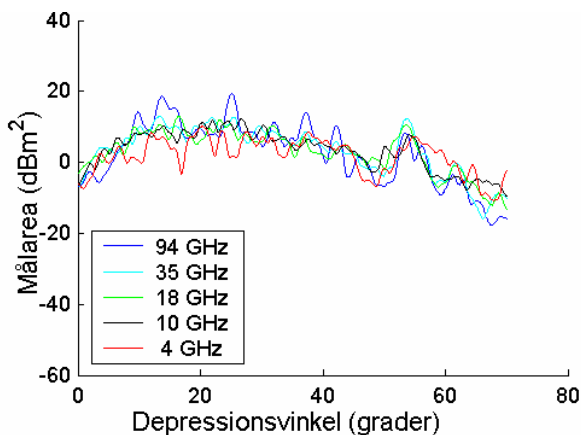
Figur 13-Figur 18 visar skillnaderna i växelverkansbidrag mellan olika frekvenser för tre olika plattlutningar och de två polarisationerna. Plana och linjära strukturer uppvisar ju starka frekvensberoenden (f^2 resp f^1) i de spekulära riktningarna vilket beror av en frekvensberoende direktivitet. Komplexa objekt uppvisar i allmänhet ett svagare beroende. Stora ostrukturerade grupper av oberoende spridare kommer visserligen att uppvisa fluktuationer som beror av frekvensen, men dessa fluktuationer ligger kring ett genomsnitt som motsvarar de enskilda spridarnas frekvensberoende. För markytan gäller att den har en viss struktur, den är storskaligt sett plan. Hur plan den är ur radarsynpunkt beror i första hand av våglängden och infallsvinkeln som tillsammans bestämmer spekulariteten, se t ex [4].

Diagrammen visar ett tydligt frekvensberoende för 0° plattlutning med högre målareor vid lägre frekvenser. Detta fås även vid +20°, och troligen fast mindre tydligt även -20° för höga depressionsvinklar. För +20° uppträder även ett omvänt frekvensberoende vid knappt 20° depression. För 0° lutning och vv polarisation vid ca 20° fås ett minimum som ev kan tolkas som ett Brewsterminimum. För de andra lutningarna är effekten inte lika tydlig och en mer ingående analys av lokala infallsvinklar skulle krävas.

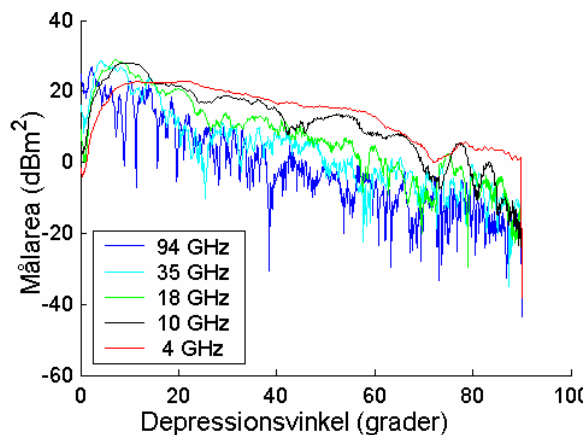
För att ge ledning till om frekvensberoendet beror av markens dielektriska egenskaper eller av direktivitet/lobbredd visas motsvarande resultat för metallisk mark i vv-fallet (Figur 19 - Figur 21). Samma frekvensberoende finns i huvudsak kvar om än kanske något försvagat. Detta visar att beroendet inte i huvudsak kan ha sin grund i de dielektriska egenskaperna. Närmare tolkningar av effekterna kräver en noggrann analys, och här kan endast några spekulativa ansatser göras. Med ökande frekvens kommer färre fasetter att ligga nära den ideala orienteringen som krävs för att de ska ge signifikanta bidrag. Man kan dock vänta sig att detta uppvägs av att direktiviteten ökar med frekvensen och att dessa effekter helt tar ut varandra. En med ökande frekvens sjunkande spekularitet skulle kunna vara en bra förklaring till att effekten är särskilt utpräglad för 0° plattlutning. Spekulariteten förväntas dock redan vid 35 GHz och 10° depressionsvinkel vara så låg att någon ytterligare sänkning för 94 GHz inte skulle erhållas. För andra plattlutningar, där växelverkan främst förväntas från diffus markspredning skulle spekularitet förväntas leda till ett omvänt frekvensberoende. Frekvensberoendet för +20° och -20° uppträder dessutom främst för höga depressionsvinklar där spekulariteten är liten eller måttlig även för 4 GHz. Eftersom fasettmodellen är en beräkningsansats måste man ha i minnet att det frekvensberoende som grundar sig på fasetternas direktivitet/lobbredd kan vara en artefakt som inte har någon motsvarighet i andra

beräkningsmetoder eller i verkligheten, men även detta får tills vidare ses som spekulationer. För $+20^\circ$ lutning observeras med frekvensen ökande växelverkan nära 20° depression. Detta skulle kunna bero på någon liten, gynnsamt orienterad fasett där den med frekvensen ökande direktiviteten får genomslag. Man får emellertid inte bortse från att direktbidragets spekulära topp ligger i detta område och att subtraktionsartefakter kan vara inblandade.

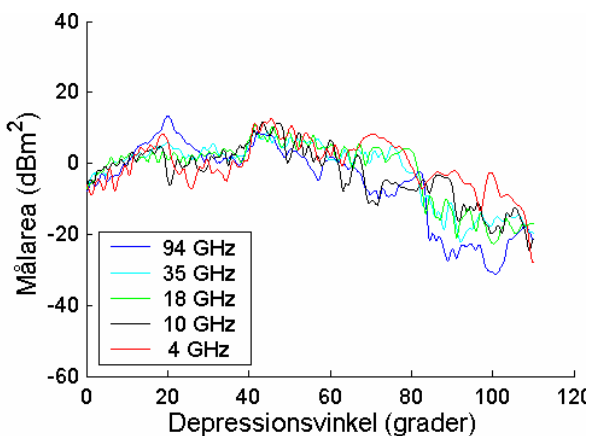
Figur 20 visar ytterligare två saker. Den skiljer sig från Figur 16 genom att inte ha något minimum nära 20° vilket bekräftar att detta minimum i Figur 16 återspeglar Brewsterminimat för Fresnelkoefficienten. Vidare visar den att högre frekvenser leder till snabbare variationer i målarean. Detta syns även i andra figurer, men dels verkar effekten vara särskilt utpräglad för 0° -fallet dels reducerar filtreringen av kurvorna i de andra figurerna effekten.



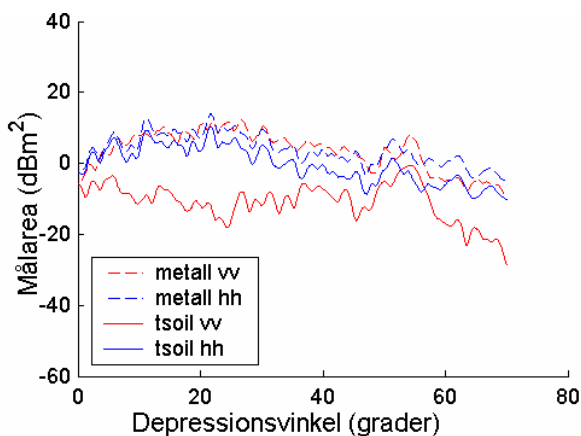
Figur 19. Växelverkansbidragets frekvensberoende för metallisk mark. 20° plattlutning, vv-polarisation.



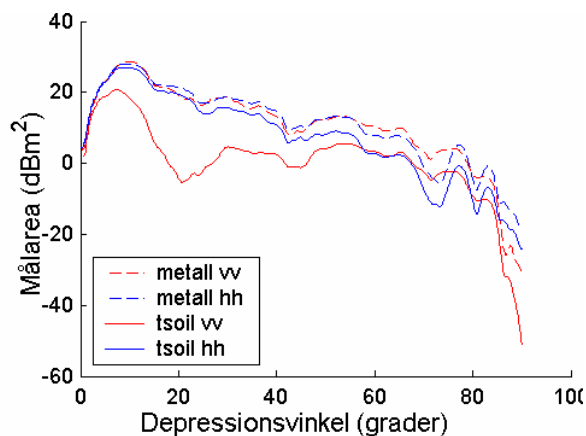
Figur 20. Växelverkansbidragets frekvensberoende för metallisk mark. 0° plattlutning, vv-polarisation. I denna figur ofiltrerade kurvor.



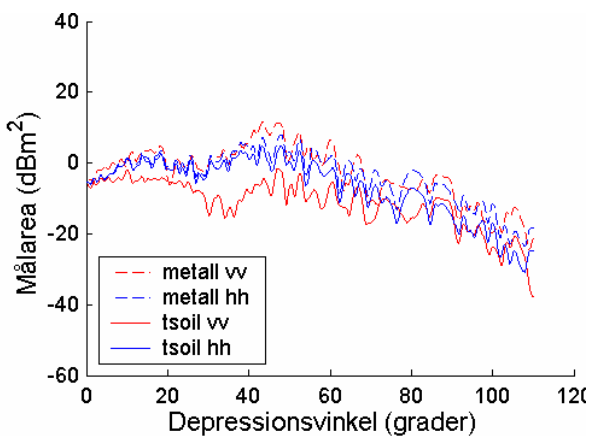
Figur 21. Växelverkansbidragets frekvensberoende för metallisk mark. $+20^\circ$ lutning, vv-polarisation.



Figur 22. Jämförelse mellan växelverksbidrag för metallisk mark och den dielektriska markmodellen för polarisationerna hh och vv. 10 GHz, plattlutning -20° .



Figur 23. Jämförelse mellan växelverksbidrag för metallisk mark och den dielektriska markmodellen för polarisationerna hh och vv. 10 GHz, plattlutning 0° .



Figur 24. Jämförelse mellan växelverksbidrag för metallisk mark och den använda jordmodellen för polarisationerna hh och vv. 10 GHz, plattlutning $+20^\circ$.

Figur 22 - Figur 24 visar jämförelser mellan växelverksbidragen för metallisk resp dielektrisk mark och de två polarisationerna vid tre olika plattlutningar. Skillnaderna mellan de två polarisationerna är relativt liten för metallisk mark. Med horisontell polarisation blir markens dämpning av växelverkanstermen också ganska liten, i synnerhet vid låga depressionsvinklar, eftersom markens vattenhalt gör den till en ganska god reflektor. För vertikal polarisation däremot leder den dielektriska karaktären till ett Brewsterminimum och betydligt lägre reflexionkoefficienter vilket tydligt återspeglas i dessa beräkningar.

4 Mätningar

4.1 Inledning

Radarmätningar på en plan rektangulär metallisk platta utfördes i november 2001 på en grusplan i Ryd. Mätningarnas utförande och preliminära mätresultat har rapporterats tidigare [FOI Memo dnr 02-0724]. Här presenteras kalibrerade och utgrindade resultat från dessa mätningar på en form anpassad för jämförelse med motsvarande beräknade data.



Figur 25. Rektangulär platta under radarmätning på grusplan i Ryd.

4.2 Mätningar

Radarmätningar på en plan, metallisk, rektangulär platta (0.50 m x 0.75 m) har genomförts vid mätavstånden 20 m och 30 m på en fotbollsplan av grus i Ryd. Mätningar gjordes mestadels på X-bandet (8-12 GHz) med 1601 frekvenser och vid vv-polarisation. Plattans nedre del var i kontakt med marken under mätningarna. Antennhöjderna var 1.40, 1.60 och 1.75 m. Sidvinkel (asimutvinkel) på plattan var nära 0°. Plattans eleverades relativt lodlinjen från -20° (lutad mot antenner) till +20° i steg om 5°. För inriktning av sidvinkel användes måttband och ögonmått. Mätfelet i sidvinkel uppskattas till någon enstaka grad. För inriktning av elevationsvinkel användes en enkel klinometer på plattans baksida. Mätfelet i elevationsvinkel uppskattas till ca en grad.

4.3 Kalibrering, bakgrundssubtraktion och utgrindningar

För kalibrering användes en kvadratisk hörnreflektor med kantlängden $a = 0.144$ m monterad på ett kamerastativ. Hörnreflektorn har radarmålarean 10.6, 12.6 resp. 14.1 dBsm vid 8, 10 respektive 12 GHz. Kalibrering gjordes vid 20 resp. 30 m mätavstånd med hörnreflektorns hörn på samma höjd som sändande och mottagande antenner. För inriktning av hörnreflektorn i sidvinkel användes syftning. För övrig inriktning användes vattenpass. Hörnreflektorns inre hörns höjd över marken mättes med måttband.

För bearbetning, analys och konvertering av mätdata användes följande egenutvecklade MATLAB-program:

- **SIM_RCS** för simulering av mätdata, t.ex. brus, platta och kalibreringsobjekt.
- **Wiltron_view** för kalibrering, koherent bakgrundssubtraktion och avståndsgrindning samt FFT-transformering mellan frekvens- och tidsplanet.
- **Columbus** för analys av mät och beräkningsdata.

Koherent bakgrundssubtraktion användes för att minska bidragen från den stationära bakgrunden.

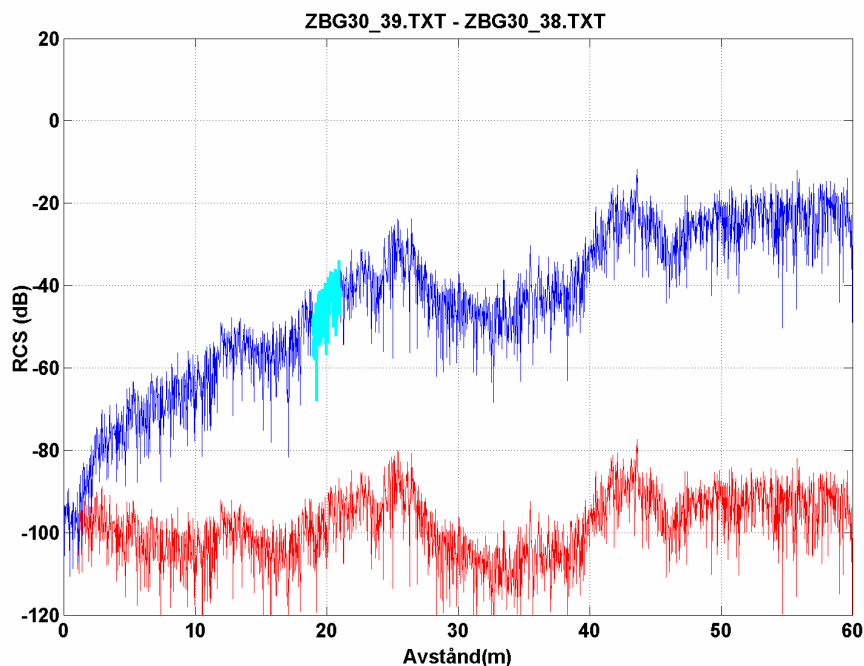
En avståndsgrind, optimerad till 2 m, med mätobjekt respektive kalibreringsmål i centrum, användes för att ytterligare reducera inverkan av bakgrunden. Större avståndsgrindar (> 2 m) ger mera oönskade bidrag från bakgrunden. Kortare avståndsgrindar (< 1 m) gav vid återtransformering till frekvensplanet upphov till mer oönskat rippel vid bandkanterna. Vid utgrindningarna användes rektangulär fönstring och enbart amplitudkalibrering.

4.4 Resultat

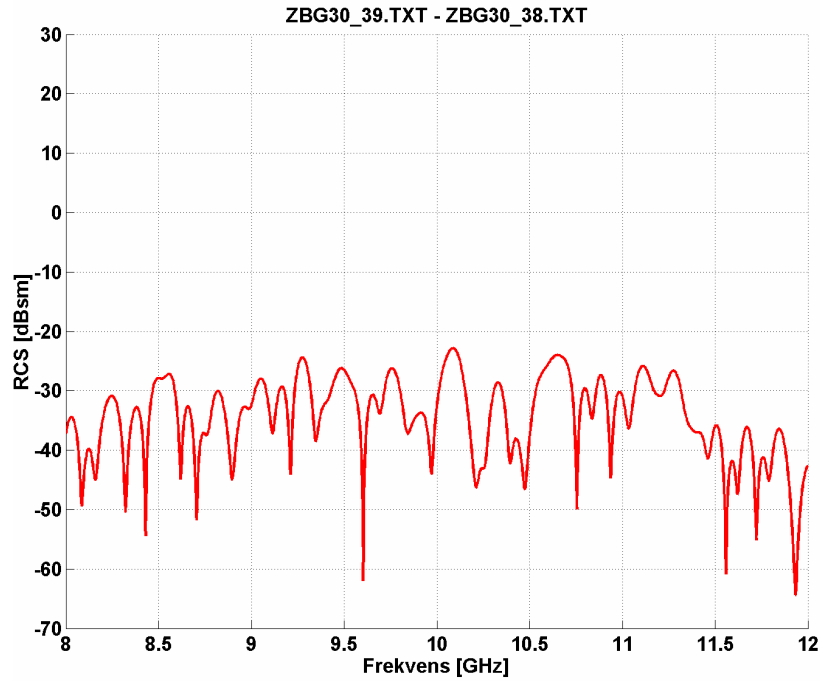
På samma sätt som i beräkningsresultatkapitlet kommer vi endast att presentera en delmängd av mätresultaten. Figurerna visar hur nivåerna för de olika delresultaten ligger.

4.4.1 Bakgrundsmätningar

Figur 26 visar kalibrerad avståndsprofil för bakgrund som subtraherats med samma bakgrund men där mätningarna utfördes med en tidsseparation på någon minut. Figur 26 och Figur 27 ger en indikation på hur låga nivåer vi klarar av att mäta.

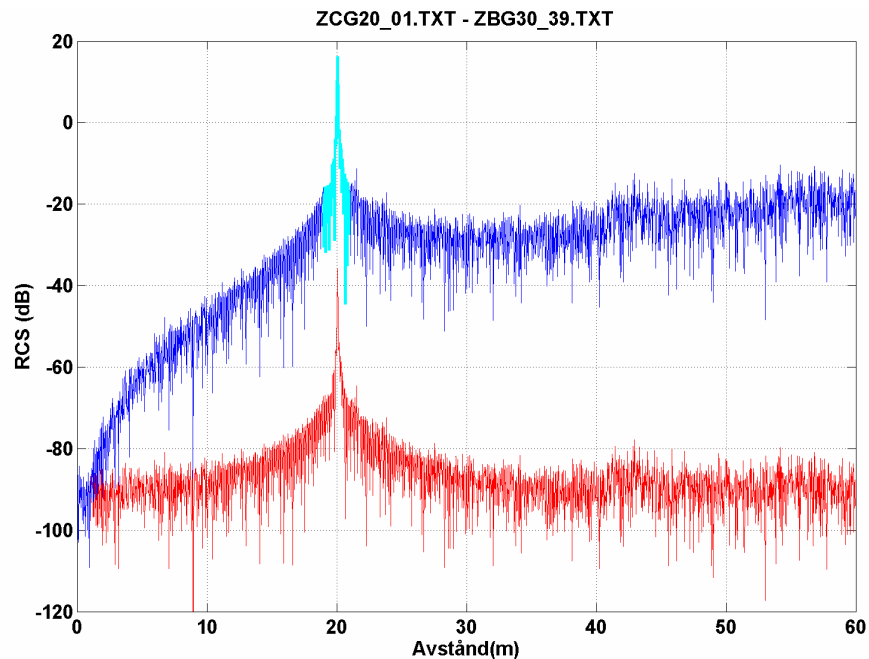


Figur 26. Avståndsprofil för bakgrundsdata baserad på kalibrerade avståndsdata. Den övre blå kurvan är dessutom R^1 -kompenserad. Utgrindade data från övre kurvan i området 19-21 m (ljusblå färg) visas i frekvensplanet i figuren nedan. Antennhöjden är 1.60 m.

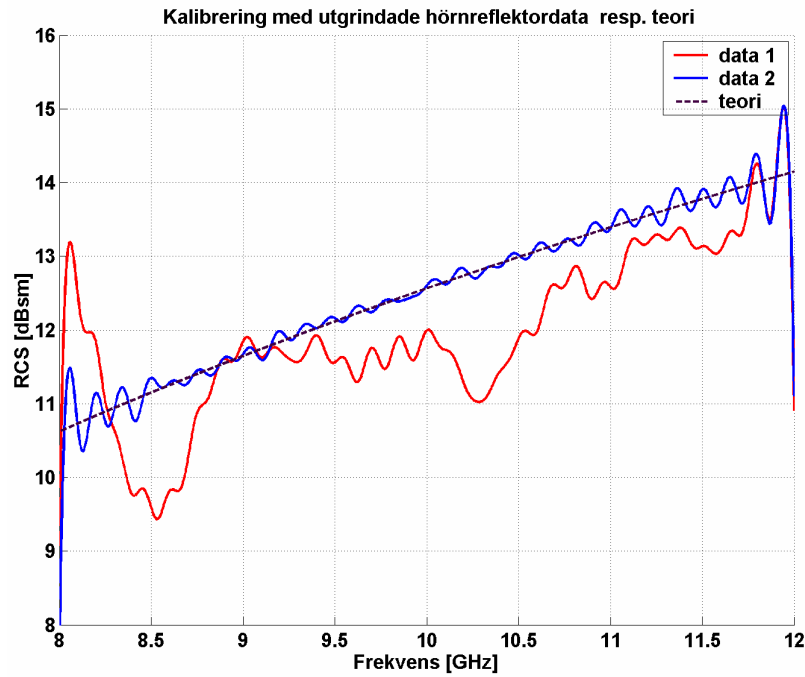


Figur 27. Kalibrerat frekvenssvop för utgrindade bakgrundsdata från området 19-21 m i figuren ovan. Antennhöjden är 1.60 m.

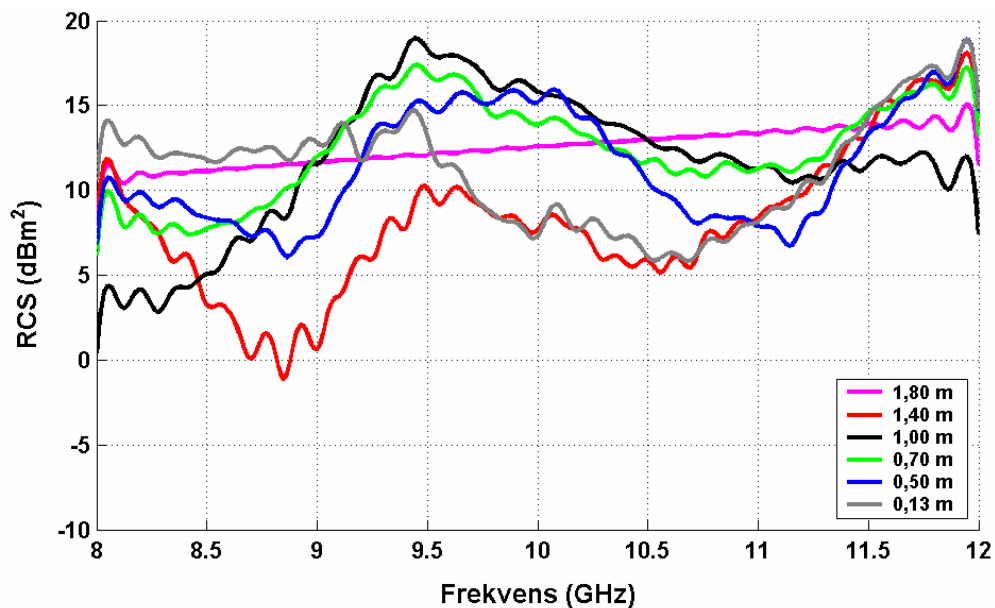
4.4.2 Kalibreringsmätningar



Figur 28. Kalibrerad bakgrundssubtraherad avståndsprofil för kvadratisk hörnreflektor med sidan 0.144 m på 20 m avstånd. Antenn- och reflektorhöjd är 1.60 m. Utgrindade data från övre kurvan (R^4 -kompenserad) i ljusblått område 19-21 m visas i frekvensplanet i figuren nedan.

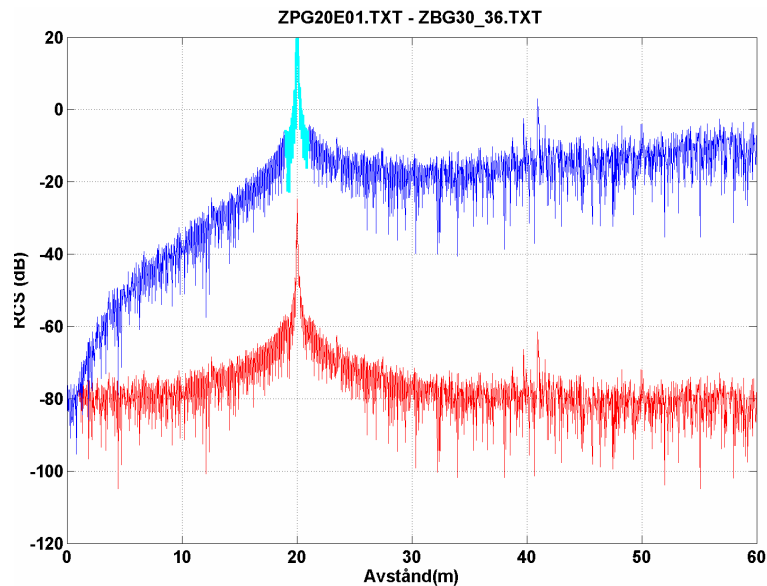


Figur 29. Kalibrerade frekvenssvop för kvadratisk hörnreflektor med sidan 0.144 m på 20 m avstånd. Den streckade kurvan är beräknade data för hörnreflektorn ovan. Data 2 (ligger närmast beräknade data) är mätta utgrindade data från området 19-21 m i föregående figur. Här har hörnreflektorn inte flyttats från föregående kalibreringsmätning med samma hörnreflektor. Data 1 är motsvarande utgrindade mätdata när hörnreflektorn flyttats och ungefärligen återställts till sitt ursprungliga läge på 20 m avstånd. Som förväntat blir avvikelserna här något större, maximalt ca 2.5 dB.

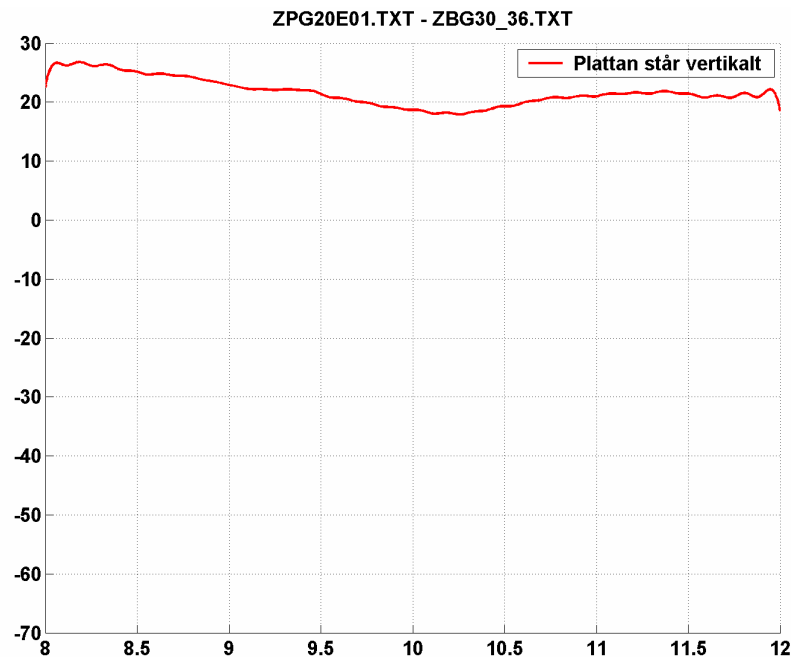


Figur 30. Utgrindade data för kvadratisk hörnreflektor på olika höjder. Alla kalibrerade mot hörnreflektor på 1,40 m höjd.

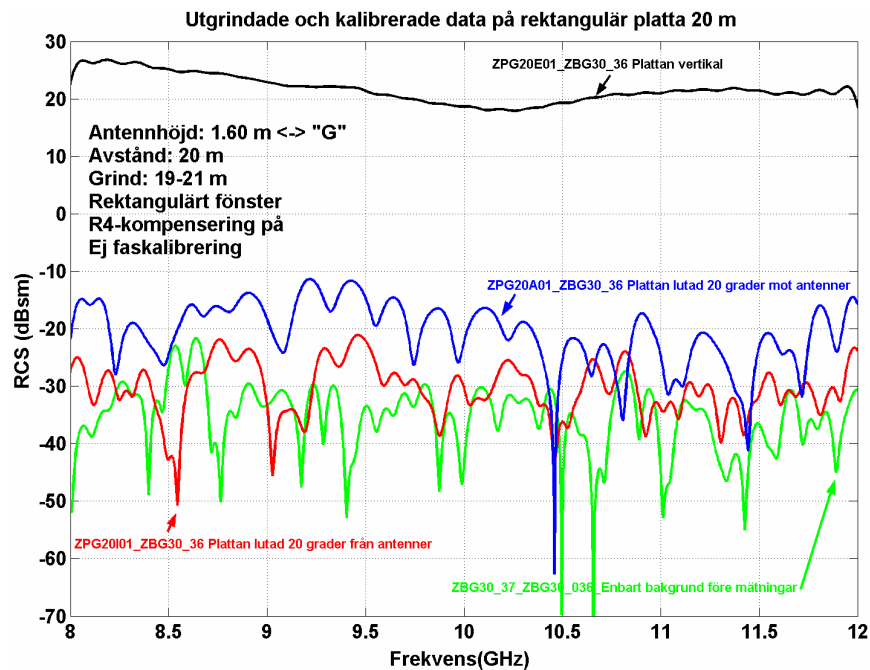
4.4.3 Mätningar på rektangulär platta



Figur 31. Kalibrerade data för en rektangulär platta på 20 m avstånd. Plattan står vertikalt på marken. Antennhöjd 1.60 m. Utgrindade data från övre kurvan (R^4 -kompenserad) i fetmarkerade området 19-21 m visas i frekvensplanet i figuren nedan.

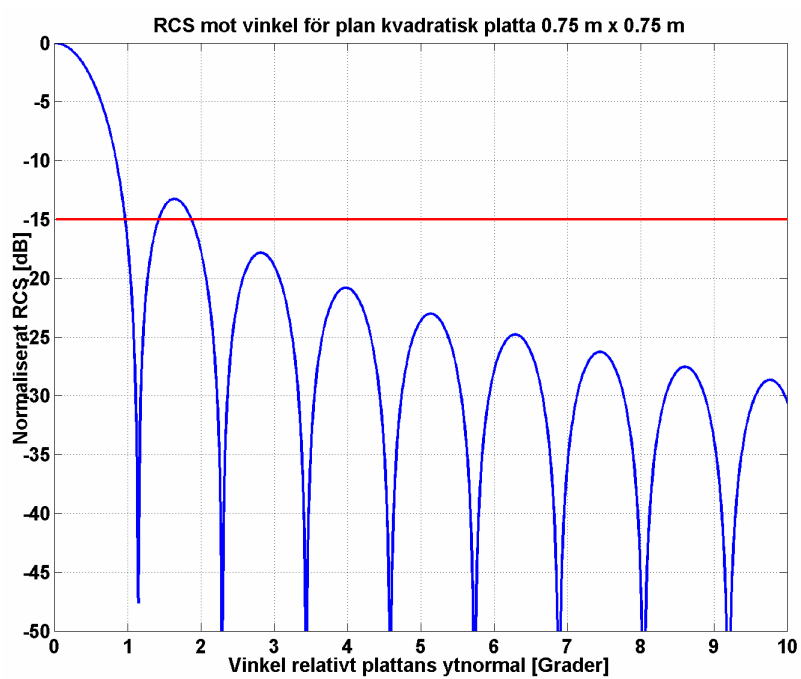


Figur 32. Kalibrerade och utgrindade mätdata i frekvensplanet för en rektangulär platta på 20 m avstånd. Visade mätdata är utgrindade data från området 19-21 m i föregående figur.



Figur 33. Kalibrerade och utgrindade mätdata i frekvensplanet för en rektangulär platta på 20 m avstånd vid olika plattlutningar (platta vertikal, lutad 20° mot antennerna respektive lutad 20° från antennerna). Visade mätdata är utgrindade data från området 19-21 m. För jämförelse visas även motsvarande utgrindade bakgrundsdata utan platta. Detta är kurvan nederst i figuren med lägst genomsnittlig radarmålearea.

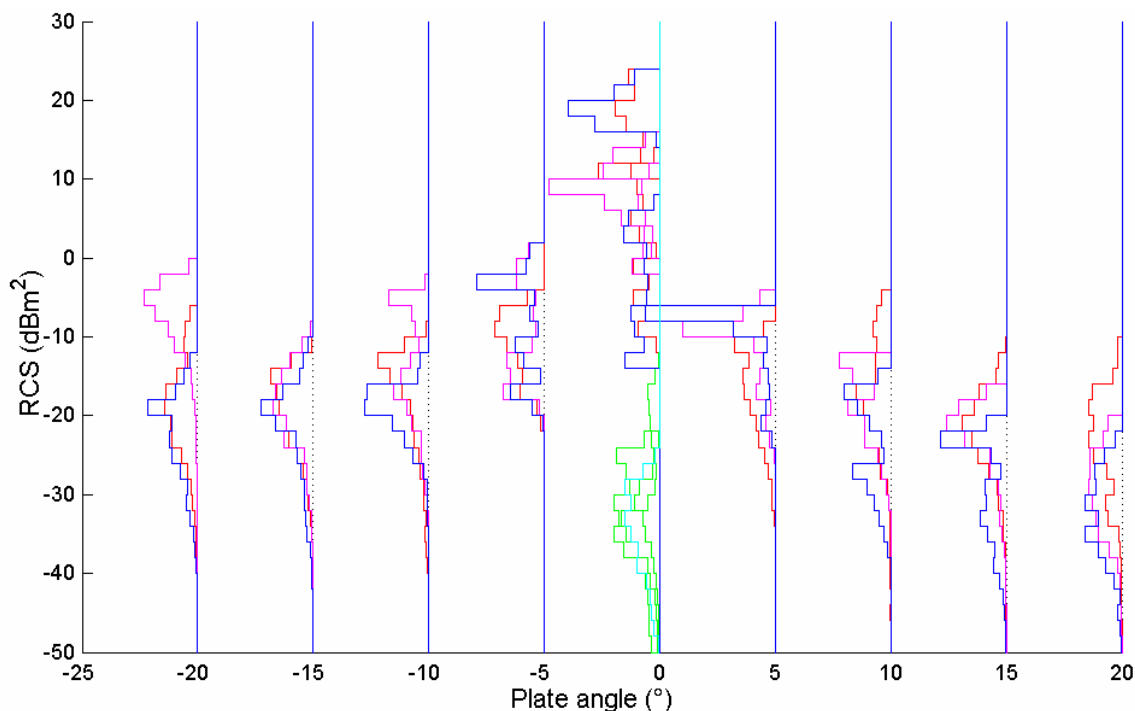
4.4.4 Beräknad radarmålarea för platta



Figur 34. Visar normaliserad målarea för en platta motsvarande den som använts vid mätningar. Den illustrerar att små avvikelser i vinkel kan ge stora avvikelser i målarea.

5 Jämförelse mellan teori och mätningar

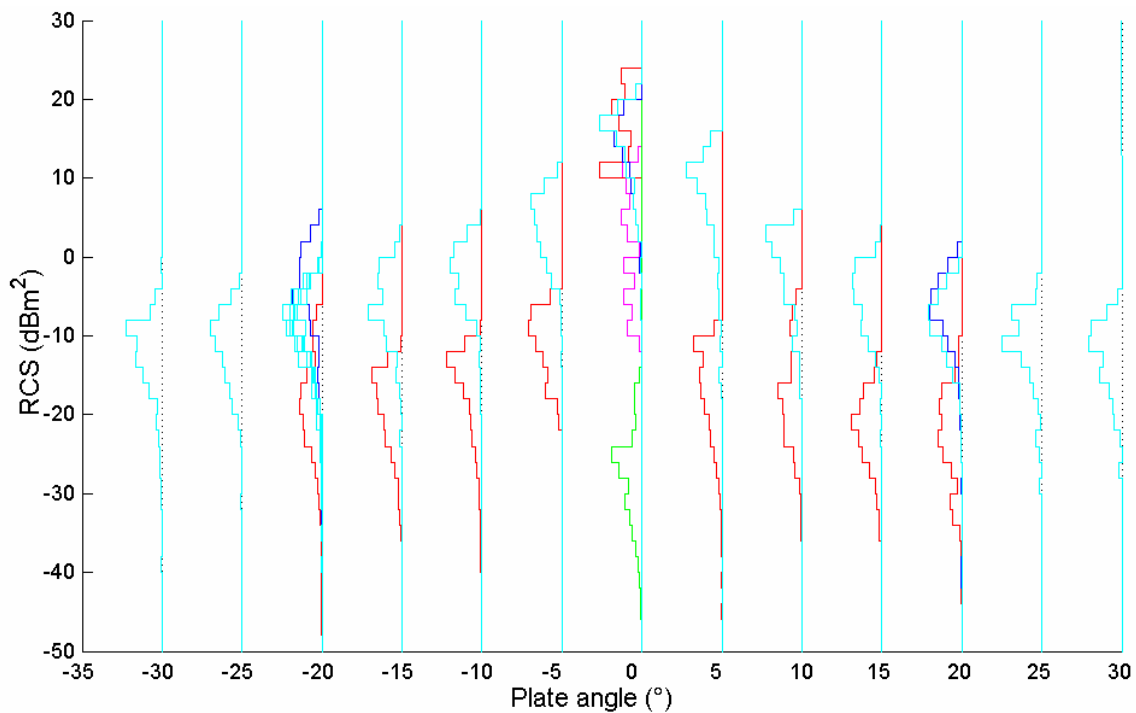
Radarmålareavärden kännetecknas ofta av stor dynamik och snabba variationer i framför allt aspektriktning men även frekvens. Jämförelse mellan enskilda datapunkter säger därför inte mycket om överensstämmelsen mellan olika resultat eftersom redan mycket små avvikelser kan ge helt andra värden. För att erhålla en helhetsbild bör man istället jämföra trender vid variation av t ex en vinkel eller frekvensen, jämföra fördelningar eller se på någon form av behandlade data som t ex avståndsprofiler eller ISAR-bilder.



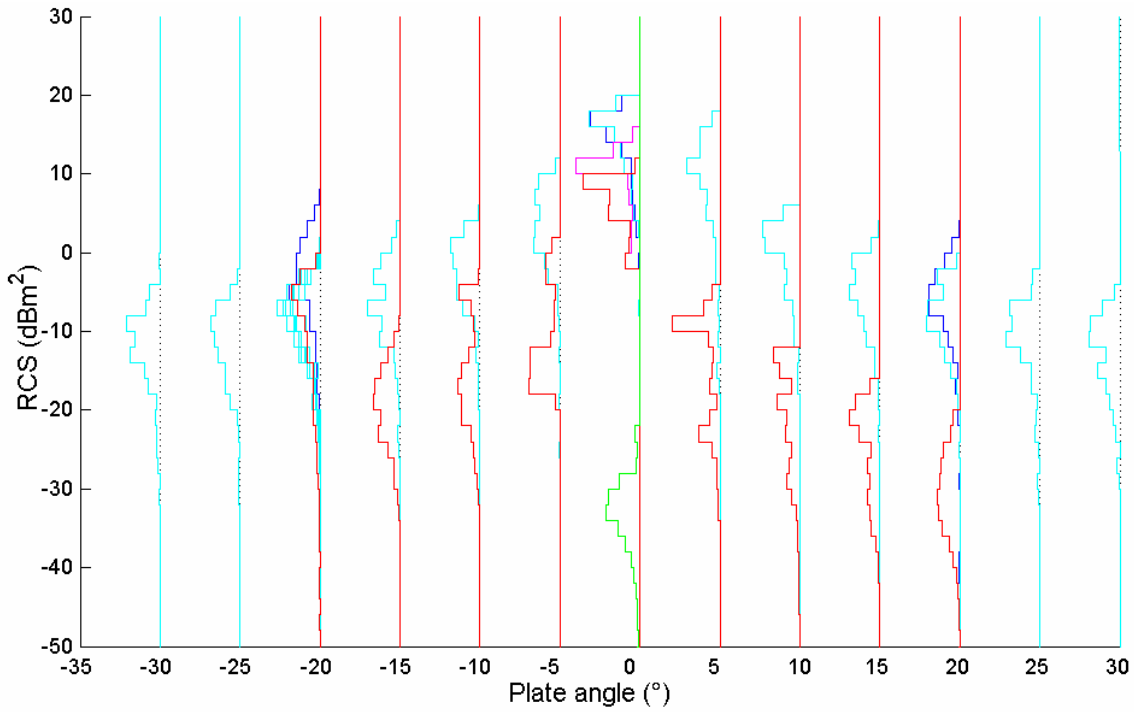
Figur 35. Fördelningshistogram för uppmätta målareor. Röd mätserie E30, radarhöjd 1,4 m, avstånd 30 m (depr 1,96°), purpur G30 1,6 m, 30 m (2,34°), blå G20 1,6 m, 20 m (3,50°). Bakgrundssubtraherade bakgrunder i grönt och ljusblått ger en antydning om mätmetodens bakgrundströskel.

I föreliggande fall har mätningarna gjorts för ett begränsat antal betraktningsriktningar men ett stort antal frekvenser. Detta beror framför allt på att mätningen behöver göras vid många frekvenser för att få god avståndsupplösning och stort invikningsavstånd. Vid beräkning däremot har ett begränsat antal frekvenser använts medan vinkelstegen gjorts relativt täta för att återspegla spridningen. Beräkningar har också gjorts över ett stort vinkelintervall. Om mät- och beräkningspunkter plottas med utsänd frekvens som x-koordinat och depressionsvinkeln som y-koordinat kommer de beräknade värdena att ligga som ett antal linjer parallella med y-axeln, medan mätvärdena bildar kortare linjer nära och parallellt med x-axeln. Allt för få mätpunkter, nämligen endast de som ligger vid skärningspunkterna mellan de båda linjeuppsättningarna, svarar mot beräkningspunkter för att man vid en direkt jämförelse ska kunna se några trender. För att få ett tillräckligt antal mät- resp beräkningspunkter har vi därför lagt ut små rektanglar kring skärningspunkterna i ovan nämnda

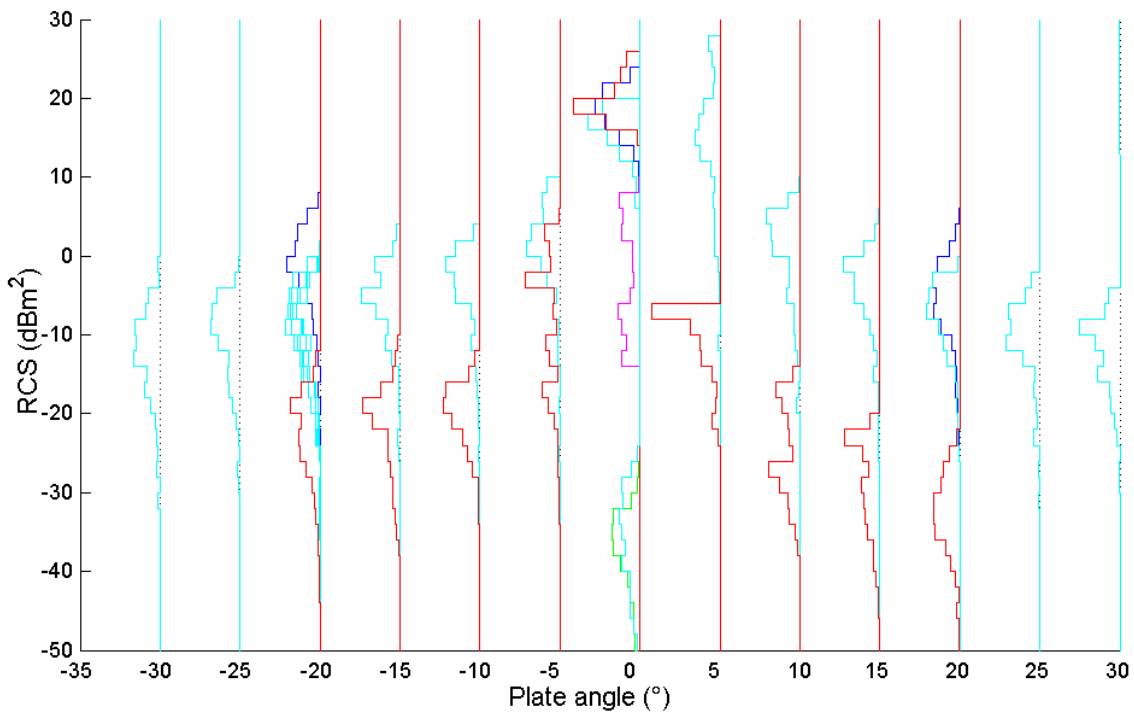
plan. Därefter har fördelningshistogram för de punkter som ligger inom dessa rektanglar beräknats. Rektanglarna har gjorts något olika för mätning resp beräkning eftersom den lokala resultatpunkttätheten är betydligt högre i det förra fallet. För varje aspektriktning har frekvenser från 8,5 till 11,5 GHz använts (1201 datapunkter). Beskrivningen har gjorts för att begränsa avbrottsartefakterna från gjorda Fouriertransformeringar. För beräkningarna har ett vinkelintervall om $\pm 1^\circ$ kring resp aspektriktning använts (20 vinklar). Detta innebär ett visst vinkelöverlapp med intilliggande mätserie. Frekvensintervallet har varit 8-14 GHz (7 frekvenser för dielektrisk mark resp 13 frekvenser för metallisk mark). Det senare frekvensintervallet är inte centrerat kring 10 GHz men om man bortser från de snabba variationer som representeras av fördelningens bredd så bedöms de långsamma systematiska variationer som kan påverka dess läge vara relativt små. Urvalet beräkningspunkter (140 st/fördelning för dielektrisk mark resp 260 st/fördelning för metallisk mark) är alltså mindre, men eftersom punkterna ligger glesare blir korrelationen dem emellan lägre.



Figur 36. Jämförelse mellan serie E30, depr $1,96^\circ$ (röd, purpur) och beräknade värden (ljusblå dielektrisk mark, mörkblå metallisk mark).



Figur 37. Jämförelse mellan serie G30, depr 2,34° (röd, purpur) och beräknade värden (ljusblå dielektrisk mark, mörkblå metallisk mark).



Figur 38. Jämförelse mellan serie G20, depr 3,50° (röd, purpur) och beräknade värden (ljusblå dielektrisk mark, mörkblå metallisk mark).

Figur 35 - Figur 38 visar areanormerade fördelningshistogram över målareor där den negativa x-riktningen representerar relativ frekvens men där baslinjerna förskjutits så att de representerar målplattans lutning. Y-axeln ger effektiva målareavärden i dBm².

Figur 35 visar resultat från de tre mätserierna. Dessutom visas fördelningar för bakgrunds-subtraherade bakgrunder som ger en uppfattning om hur låga nivåer som kan mätas. Resultaten för +20°-plattan närmar sig dessa nivåer. I allmänhet överlappar de olika fördelningarna varandra tämligen väl, men detaljer som t ex fördelningarnas form kan skilja rätt mycket mellan olika delserier. En serie för -20° skiljer dock 10-15 dB i nivå och mätserierna för 0° plattvinkel sprider ganska mycket både i nivå och fördelningens form.

Eftersom aspektriktningen skiljer sig mellan mätserierna och markens temperatur och fuktighet varierat, förväntas resultaten för de olika delserierna skilja något. Resultaten tillåter dock ej att man försöker dra några slutsatser om sådana skillnader. Det man kan konstatera är att ökande plattlutning sänker den effektiva målarean. Som förväntat ger positiv plattlutning, som inte reflekterar strålen mot marken där den kan återspridas mot radarn, lägre värden än likstora negativa lutningar. Om fördelningarna för negativa resp positiva plattlutningar extrapoleras mot plattlutning noll så ser man att fördelningarna för plattlutning 0° till stor del ligger väsentligt högre än den nivå trendlinjerna pekar mot. Vid plattlutning 0° bildar plattan en rätvinklig dieder med marken vilket kan leda till kraftig retroreflektion i diederns normalplan.

I *Figur 35 - Figur 38* har fördelningarna för mätserierna en i taget jämförts med fördelningen för beräkningsresultat på ovan beskrivet sätt. Även för de beräknade värdena gäller trenderna att målarean ökar då plattlutningarna närmar sig noll grader och att negativa lutningar ger högre effektiva målareor. För de beräknade värdena ligger fördelningen för nollgradersplattan betydligt närmre de andra fördelningarna än vad fallet är för mätresultaten. Den dominerande skillnaden mellan mätta och beräknade resultat är dock att mätningarna ligger 15-20 dB under beräkningarna. För positiva plattlutningar är skillnaden omkr 20 dB, för negativa mindre, ca 15 dB. Vid 0° är skillnaden mindre (0-20 dB).

Säkra slutsatser om orsakerna till denna betydande avvikelser är svåra att dra utan förnyade mätningar, men ett flertal orsaker, av vilka de flesta kan avvisas, kommer här att diskuteras.

Mätsystemet och kalibreringsmetoden har visat sig ge goda resultat vid kalibrering av en hörnreflektor mot en annan på samma höjd, se *Figur 30*. Mätning mot samma reflektor på andra höjder ses däremot leda till kraftiga avvikelser.

Interferens mellan direkta och markreflekterade strålar kan leda till komplexa och snabbt varierande fältbilder. Vikten av att sondera fältbilden brukar därför ofta framhållas, men metoderna att mäta den, och framför allt utnyttjandet av de uppmätta fältbilderna tycks ofta komma i skymundan. För isotropa spridare kan interferensen mellan olika strålvägar generera upp till 12 dB förstärkning av radarreturen. För retroreflektorer där färre strålvägar förväntas delta, begränsas den maximala förstärkningen till 6 dB. Utsläckningen kan i båda fallen i princip bli perfekt, d v s mycket stor dämpning, men i praktiken fås en betydande begränsning av att marken aldrig är perfekt speglade. Även reflektorernas utbredning begränsar dämpningen eftersom den högsta utsläckningen bara nås mycket lokalt. Särskilt vid korta mätavstånd kan intensitetsvariationerna i höjddled vara snabba. På utbredda objekt måste man ta hänsyn till att inte bara intensiteten utan även fasen varierar och att nettoeffekterna, som en följd av detta, kan bestämmas av en begränsad del av det belysta området. Detta motsvarar det förhållande att det bara är smala zoner längs kanterna till en plan yta som ger

upphov till sidolobsintensiteter i frirymdsfallet. Kombinationen av olika avvikelser (förstärkningar/dämpningar) för kalibreringsobjekt resp mål kan givetvis leda till att felet förstärks genom samverkan.

Fältbildseffekter kan vara en viktig förklaring till de i *Figur 30* påvisade kalibreringsproblemen. Eftersom effekterna till stor del beror av kvoten mellan gångvägsskillnad (som i sin tur beror av reflektorhöjden) och våglängd skulle man förvänta sig betydande förskjutningar mellan maxima och minima för de olika kurvorna. Här ligger de flesta kurvors maxima samlade kring 9,5 GHz med minima ovanför och nedanför. Detta skulle kunna förklaras som en artefakt av vald kalibratorhöjd om man antar att denna höjd ger ett ovanligt starkt frekvensberoende med minimum i radarreturen vid 9,5 GHz och maxima vid sidan av. Den valda höjden måste i så fall betraktas som olämplig och ett olycksfall i arbetet. Ett fel som huvudsakligen härrör sig från kalibreringsfaktorn skulle väl förklara varför skillnaden mellan mätta och beräknade värden, bortsett från 0° plattlutning, är förhållandevis konstant. Detta borde dock enligt resonemanget ovan ge högst 6 dB, och förmodligen mindre, fel.

Det bör framhållas att dessa mätningar syftar till att studera växelverkanseffekter och att fältbilden är ett uttryck för dessa effekter. Det är därför inget fel att fältbilden över plattan avviker från frirymdsfallet. Däremot är en god kontroll av effekterna på kalibreringsobjektet av stor betydelse för att undvika frekvensberoende nivåförskjutningar i mätresultaten. Bäst synes vara om de kan undvikas genom att kalibreringsobjektet placeras så högt att multipelreflexion via mark får liten betydelse. Radarn måste därvid givetvis riktas om mellan mätning och kalibrering och hänsyn tas till ev avståndsskillnader. Som komplement bör fältbildsmätningar göras med så små avståndssteg att man erhåller en tydlig bild av interferensmönstret. Detta bör göras kring kalibreringsobjektets position. Om man är intresserad av målobjektets frirymdsmålärea bör fältbilden dessutom kartläggas över målobjektet. Vid jämförelser mellan uppmätt och beräknad fältbild måste man förutom att ta hänsyn till sättet att mäta vara medveten om att diffus markspridning i allmänhet försummas i fältbildsberäkningar.

Eftersom avvikelserna mellan mätta och beräknade värden är betydande även för vinklar där direktbidragen bör dominera kan man anta att den huvudsakliga avvikelserna föreligger för mätresultaten. Vidare avviker de åtminstone för positiva plattlutningar med en någorlunda konstant faktor (konstant förskjutning i dB) vilket kan, men behöver inte, förklaras som ett kalibreringsfel. Mätvärdesfördelningarna skulle då alltså kunna skiftas med ett i dB konstant skift så att de överlappar på bästa sätt med beräknade resultat för positiva plattlutningar (som ju dominerades av direktbidraget). De mätta värdena för 0° plattlutning kommer då att väsentligt överstiga de beräknade. Detta kan i sin tur bero på att fotbollsplanen varit betydligt jämnare och därmed betydligt mer spekulär än den i beräkningarna använda marken. Detta leder i sin tur till högre retroreflexion från platta-mark-diedern (i diederaxelns normalplan). Ett takvärde för platta-markdiederns målarea vid låga depressionsvinklar kan förväntas ligga 6 dB över plattans målarea, dvs vid 38,9 dBsm vid 10 GHz. De uppmätta fördelningarna ligger under detta värde även om de skiftas 20 dB uppåt. Fotbollsplanen var också verkligen skrapad/ vältad till god jämnhet och åtminstone näst intill mättad med vatten. Att mätresultaten för 0° visar stora variationer skulle kunna bero på varierande fel i vinkeln mellan platta och mark eller möjligen skillnader i markspekularitet. En hög markspekularitet innebär också goda förutsättningar för att fältbildseffekter kan ge betydande fel vid kalibrering.

De låga mätvärdena kan inte förklaras med att marken är mer dämpande än den i beräkningsmodellen, eftersom man då ändå måste förvänta sig god överensstämmelse för positiva plattlutningar, där direktbidrag från plattan då dominerar.

Den i beräkningen använda, 20 m långa, markremsan kan ge begränsningar vid låga depressionsvinklar, men om detta inverkade skulle det vara de beräknade värdena som blir för låga. Dessutom finns, jfr nästa stycke, ofta motsvarande begränsning vid mätning.

De använda antennerna har en lobbredd (3 dB) och lobbhöjd (3 dB) om ca 14°. Detta ger på 20 m håll ett avstånd från lobens centrum till 3 dB-kanten om knappt 2,5 m. Även med horisontellt riktade antenner på höjden 1,6 m skulle målet därför vara belyst. En viss dämpning kan ändå förväntas eftersom radarn då ej är riktad mot målets centrum, men den bör vara mindre än $2 \cdot 3 = 6$ dB. I detta fall kommer marken att vara belyst (3 dB) fram till c:a 7 m framför plattan, och där är infallsvinkeln en annan än på plattan. Detta begränsar det område som bidrar till växelverkan, men förklarar fortfarande inte varför man för plattvinklar som bör domineras av direktbidrag får lägre värden än förväntat.

Den spekulära returen från plattan är känslig för plattans orientering relativt radarn, men plattan är stor nog för att man ska ligga utanför den spekulära returen även vid 0° (där dock retroreflexion kan förväntas) och +5°. Utanför den spekulära loben blir känsligheten mindre, men en avvikelse i plattans sidvinkel kan i stället leda till att man hamnar utanför plattans vertikala sidolobsplan vilket också bör ge en snabb minskning. Gjorda överslag tyder på att det är svårt att förklara så stora avvikelser som 20 dB med vinkelfel. Vinkelfel borde dessutom leda till stora variationer, inte ett konstant fel.

Plattan är ej helt plan. Detta, liksom närfältseffekter, kan påverka direktbidrag men bör ha liten inverkan på växelverkanstermerna.

6 Slutsatser

Slutsatserna från detta arbete kan indelas dels i slutsatser som direkt berör de beräknade och uppmätta radarsignaturerna dels i slutsatser beträffande metodik och utvecklingsbehov inom detta område. Slutsatserna kring radarsignaturerna och utvecklingsbehov har i stor utsträckning redan behandlats i diskussionen av resultaten resp under fortsatt arbete.

Från beräkningar för plattan har vi, som förväntat, funnit att multipelreflexion via marken väsentligt höjer signaturen för negativa plattlutningar. Vid positiva plattlutningar för depressionsvinklar upp till dubbla plattlutningen dominerar direktbidraget, alltså dess frirymdssignatur. Alla beräkningar har dock gjorts för infallsriktningar i plattans vertikala sidlobplan vilket starkt höjer direktbidraget. Även växelverkanstermen kommer att höjas av sidloberna men den effekten kommer förmodligen bara delvis att fångas upp av GO-PO-beräkningar. Trippelstudsbidrag börjar göra sig gällande vid höga depressionsvinklar för lutningar mellan -10° och -20° . Vid -30° är de betydelsefulla om än ej dominerande även vid låga vinklar. Modellering av markens dielektriska egenskaper leder till att växelverkan minskar jämfört med fallet metallisk mark, men det är bara för vertikal polarisation som sänkningen kan anses vara betydelsefull. Detta är i överensstämmelse med vad som kan förväntas från Fresnels formler. Signifikanta frekvensberoenden har observerats för 0° plattlutning och i övrigt främst vid höga depressionsvinklar. Vanligen ger lägre frekvenser högre växelverkan men även det omvända förekommer. En förståelse av dessa frekvensberoenden kräver en mer ingående analys, och tolkningar utan en sådan måste ses som spekulativa, men klart är att beroendet måste sökas i lobbredd/direktivitet och i Fresnelkoefficienternas frekvensberoende.

Både mätresultaten och beräkningarna visar tydligt att det som väntat ur signatursynpunkt är gynnsamt att undvika reflektorer som är vinkelräta mot marken och reflektor-markvinkeln helst bör göras trubbig. Skillnaden mellan mätta och beräknade värden är dock betydande och måste i första hand förklaras med någon form av mätfel. Kalibreringsfel är troligast, men stor omsorg bör också läggas vid kontroll av mätgeometrin. Mätförfarandet var nytt vid dessa mätningar och därför oprövat. Stor vikt måste därför läggas på utveckling av det så att vi vid framtida mätningar kan erhålla korrekta resultat och resultat som ger tydliga besked om markegenskaper. Att skillnaden avviker för negativa plattlutningar och framför allt för lutning 0° antyder att det även finns signifikanta skillnader i markegenskaper.

Det mest centrala problemet är att hitta, över relevanta vinkelområden verifierade, beskrivningar av olika marktypers bistatiska spridningsegenskaper och vidare arbete bör därför inriktas mot detta till dess rimliga beskrivningar har hittats för åtminstone några marktyper. Detta kräver, om inte lämpliga litteraturdata kan hittas, utveckling av utrustning och metodik för mätningar.

RadBase och FOPOL har kapacitet att pröva fasettbaserade modeller men kan inte anses ha tillräcklig kapacitet för tillämpning av dem. De båda programmen kompletterar varandra i olika avseenden och båda bör därför behållas och i rimlig omfattning underhållas. Vi behöver dock på sikt få tillgång till kraftfullare, mer mångsidiga och framförallt bättre validerade programvaror. Dessa bör ha för oss öppen källkod och inte vara begränsade till enstaka datorer. Vid utvärdering av programmens kapacitet måste hänsyn tas till hur mycket för och efterarbete en beräkning kräver. Det är också önskvärt att finna alternativ till fasettbaserade metoder, särskilt som de kan antas vara mindre lämpliga för vegeterad terräng.

7 Fortsatt arbete

För fortsatt arbete inom området är det mycket viktigt att mätningar och beräkningar samordnas. Inom dessa områden bör arbetet inriktas på karakterisering av mark resp markmodeller. Denna karaktärisering bör kunna sammanfattas som en bistatisk spridningsfunktion. Detta ger bättre förutsättningar för prövning av resultatens giltighet än försök att göra jämförelser för kompletta objekt. Med tillgång till relevanta modeller för marken synes vägen för beräkningar av växelverkan med mark i målobjektens närområde i princip ligga lika öppen, och förete samma svårigheter, som frirymdsberäkningar på objekt. För markväxelverkan på större avstånd från objekten torde gängse vågutbredningsmodeller kunna tillämpas, men att skarva dessa zoner, dvs att beskriva växelverkan på "medellånga" avstånd kan bereda svårigheter. Denna zon är betydelsefull för det viktiga fallet med låga depressionsvinklar för hotradarn. Den bistatiska spridningsfunktionen kan, beroende på vilken detaljeringsnivå som önskas, behöva kompletteras med beskrivning av terrängens topografi, den statistiska spridningen och koherens, varav det senare kan komma att bjuda på svårbehandlade problem.

Det är av synnerlig vikt att få fram mätdata lämpliga för prövning av beräkningsmodeller. Litteraturdata kan finnas, men tillgången är liten. Vi avser därför att utreda förutsättningarna för hur mätningar bör utformas för att på bästa sätt ge relevanta resultat. Till dess förutsättningarna för att validera/verifiera beräkningsmodeller föreligger bör arbetet med dessa inriktas på att karaktärisera dem och att jämföra olika modeller med varandra vad avser resultat och effektivitet. En god del av verifieringsarbetet kan då vara gjort när mätresultat blir tillgängliga. Eftersom signalbehandling t ex MTI och Dopplerdetektion är viktig då målsignaler ska urskiljas i en klotterbakgrund kan det vara en god ide att studera mål-markväxelverkan även ur signalbehandlingssynpunkt. Verifieringsarbetet bör också förberedas genom att man med enkel modellering i geometrisk optik/strålföljning för reella eller generiska målobjekt och en tänkt hotbild undersöker vilka spridningsgeometrier som kan förväntas vara betydelsefulla för växelverkan och därför behöver modelleras väl. Detta arbete kan med fördel kombineras med enkla beräkningar av genomsnittlig växelverkan för dessa objekt. Möjligheterna att tillämpa vågutbredningsmetodik på växelverkansproblemet bör också studeras eftersom det kan ge kraftfulla lösningar eller täcka andra områden, t ex låga vinklar eller närfältssituationer där fasettbaserade modeller är svåra att tillämpa. Vågutbredningsstudier kan också ge för mätmetodikens utformning viktiga resultat. Man får därvid vara beredd att komplettera vågutbredningsmodellerna med t ex diffus spridning och kanske statistiska variationer.

Det centrala är alltså att hitta, över relevanta vinkelområden verifierade, beskrivningar av olika marktypers bistatiska spridningsegenskaper.

8 Referenser

- [1] E. Zdansky, J. Fagerström, M. Gustafsson, S. Nilsson, J. Rahm, "Redovisning av utveckling av bakgrundsmodellering", FOI-R--0187--SE, Linköping, december 2001.
- [2] J. Rasmusson, S. Nilsson, N. Gustafsson och J. Rahm, "Lägesrapport 2002-03-31 Radarmätningar platta-mark för bakgrundsmodellering", FOI Memo 02-0724, Linköping, mars 2002.
- [3] S. Axelsson, "Two-bounce Microwave Scattering between a Flat Plate and a Rough Ground Surface", *Radiovetenskap och Kommunikation 96 (RVK 96)*, Luleå, juni 1996, s.311-315, ISBN 91-630-4455-2.
- [4] F.T. Ulaby, R.K. Moore och A.K. Fung, "Introduction to random surface scattering and emission", *Microwave remote sensing active and passive, Vol. II Radar remote sensing and surface scattering and emission theory*, Kap. 12, F.T. Ulaby, R.K. Moore och A.K. Fung, Artech House (1986), ISBN 0-89006-191-2.
- [5] J. Fagerström, "Modellering av radarsignatur för objekt på skrovlig yta", FOA-R--99-01234-615--SE, Linköping, oktober 1999.
- [6] F.T. Ulaby, R.K. Moore and A.K. Fung, *Microwave remote sensing active and passive, vol III From theory to applications*, Artech House (1986), ISBN 0-89006-192-0.
- [7] F.T. Ulaby and M.C. Dobson, *Handbook of radar scattering statistics for terrain*, Artech House (1989), ISBN 0-89006-336-2.
- [8] Surface Optics Corporation, 11555 Rancho Bernardo Rd. San Diego, CA 92127, <http://www.surfaceoptics.com>
- [9] N. Levanon, *Radar Principles*, Wiley Interscience, New York, 1988, kap 4.