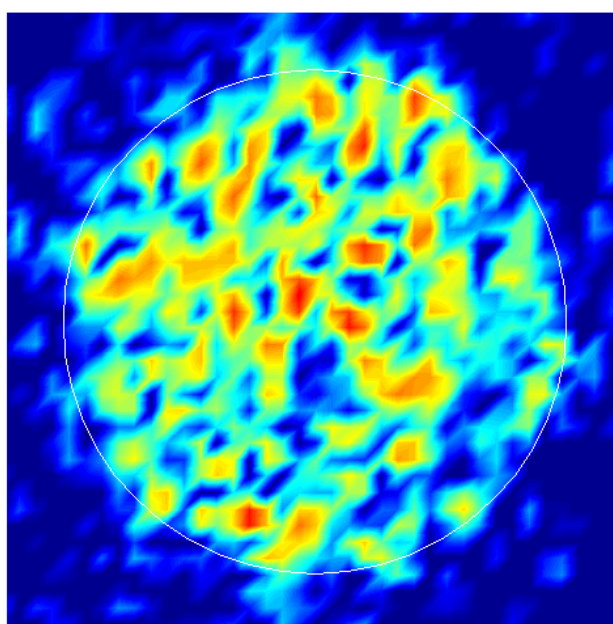
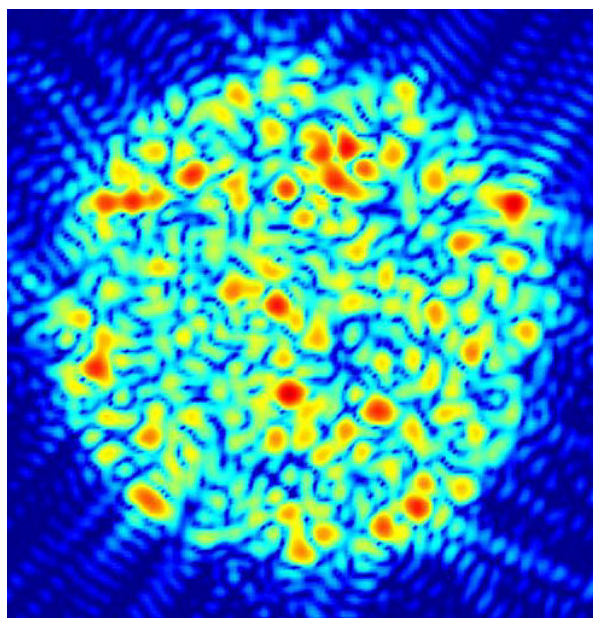
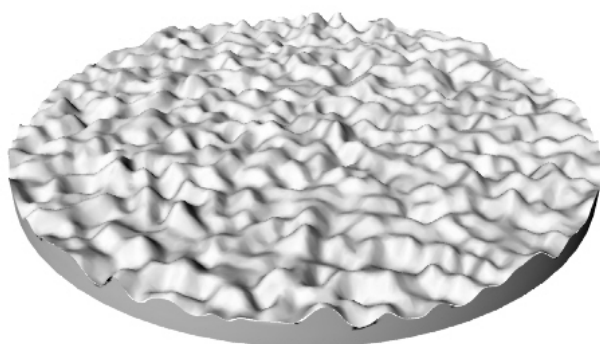


Mätning och beräkning av bistatisk RCS för markkytor

Magnus Gustafsson
Magnus Herberthson
Stefan Nilsson
Jonas Rahm
Erik Zdansky
Anders Örbom



FOI är en huvudsakligen uppdragsfinansierad myndighet under Försvarsdepartementet. Kärnverksamheten är forskning, metod- och teknikutveckling till nytta för försvar och säkerhet. Organisationen har cirka 1350 anställda varav ungefär 950 är forskare. Detta gör organisationen till Sveriges största forskningsinstitut. FOI ger kunderna tillgång till ledande expertis inom ett stort antal tillämpningsområden såsom säkerhetspolitiska studier och analyser inom försvar och säkerhet, bedömningen av olika typer av hot, system för ledning och hantering av kriser, skydd mot hantering av farliga ämnen, IT-säkerhet och nya sensorers möjligheter.



FOI
Totalförsvarets forskningsinstitut
Sensorteknik
Box 1165
581 11 Linköping

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

www.foi.se

Magnus Gustafsson
Magnus Herberthson, Stefan Nilsson
Jonas Rahm, Erik Zdansky, Anders Örbom

Mätning och beräkning av bistatisk RCS för markytor

Utgivare FOI - Totalförsvarets forskningsinstitut Sensorteknik Box 1165 581 11 Linköping	Rapportnummer, ISRN FOI-R--1806--SE	Klassificering Metodrapport
	Forskningsområde 6. Telekrig och vilseledning	
	Månad, år December 2005	Projektnummer E3015
	Delområde 62 Signaturanpassning	
	Delområde 2	
Författare/redaktör Magnus Gustafsson Magnus Herberthson Stefan Nilsson Jonas Rahm Erik Zdansky Anders Örbom	Projektledare Jonas Rahm	
	Godkänd av Lena Klasén	
	Uppdragsgivare/kundbeteckning FM	
	Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig Magnus Gustafsson, Erik Zdansky	
Rapportens titel Mätning och beräkning av bistatisk RCS för markytor.		
Sammanfattning (högst 200 ord) Denna rapport redogör för resultaten av en delstudie inom ett projekt som syftar till att ta fram metoder och underlag för uppskattning av inverkan av bakgrundsväxelverkan på objektsignaturer. I delstudien har en typ av modellyta för mark studerats genom beräkningar och mätningar. Studien har varit koncentrerad på effekter av ytans geometriska form och därför har en metallyta d.v.s. en yta utan absorberande egenskaper använts. Mätningar har också gjorts mot en mera naturlig modellyta, gräsmatta. Beräkningarna har gjorts med två metoder, dels IEM, dels med programmet SPECRAY som är baserat på fysikalisk optik i kombination med GO. IEM- och SPECRAY-resultaten uppvisar tillfredsställande överensstämmelse med varandra. Även mätvärden uppvisar en liknande trend, men endast en kvalitativ jämförelse har kunnat göras med dessa. Mätningarna mot gräs uppvisar både likheter och skillnader gentemot gaussytan vilket är förväntat. Mätningarna har inneburit att L. Gåras nya insamlingssystem och nyutvecklad programkod för dataanalys för första gången prövats vid användning av den bistatiska mätbågen. Resultaten av detta är lovande och vunna erfarenheter förväntas medföra att jämförelser mellan mätta och beräknade värden fortsättningsvis ska kunna göras även kvantitativt.		
Nyckelord Bistatisk mätning, bistatisk RCS, bistatisk markspridning, radarmålära, RCS, IEM, Specray EM		
Övriga bibliografiska uppgifter	Språk Svenska	
ISSN 1650-1942	Antal sidor: 37 s.	
Distribution enligt missiv	Pris: Enligt prislista	

Issuing organization FOI – Swedish Defence Research Agency Division of Sensor Technology Box 1165 581 11 Linköping	Report number, ISRN FOI-R--1806--SE	Report type Methodology report
	Programme Areas 6. Electronic warfare and deceptive measures	
	Month year December 2005	Project no. E3015
	Subcategories 62. Low observables	
	Subcategories 2	
Author/s (editor/s) Magnus Gustafsson Magnus Herberthson Stefan Nilsson Jonas Rahm Erik Zdansky Anders Örbom	Project manager Jonas Rahm	
	Approved by Lena Klasén	
	Sponsoring agency Swedish Armed Forces	
	Scientifically and technically responsible Magnus Gustafsson, Erik Zdansky	
Report title (In translation) Measurement and calculation of the bistatic RCS of ground surfaces.		
Abstract (not more than 200 words) The results of a study in a project aimed at finding methods and data for estimating the effects of interaction with background on object signatures are reported. A model surface for ground has been studied using both calculations and measurements. The emphasis has been put on the effects of the surface geometry and therefore a metallic surface was chosen. Measurements have also been made on a more natural model surface, grass lawn. Two methods, IEM and the program SPECRAY using PO supplemented by GO have been used in the calculations. The two methods show a satisfactory agreement. The measured values show a similar trend, but only a qualitative comparison has been made with these. As expected, the grass measurements show differences as well as similarities with the rough metallic model surface. For these measurements a new data collection system and new program code for data analysis have been used together with the bistatic arc for the first time. The results are promising and experiences gained are expected henceforth to allow quantitative comparisons between measured and calculated values.		
Keywords Bistatic measurement, bistatic RCS, bistatic ground scattering, radar cross section, IEM, Specray		
Further bibliographic information	Language Swedish	
ISSN 1650-1942	Pages 37 p.	
	Price acc. to pricelist	

Innehållsförteckning

1	INLEDNING	6
2	MÄTNINGAR.....	7
2.1	MÄTBÅGEN	7
2.2	MÄTUTRUSTNING OCH MÄTOBJEKT.....	8
2.3	KALIBRERING.....	10
2.4	MÄTPARAMETRAR	10
2.5	MÄTMETODIK	11
2.6	DATABEHANDLING.....	11
2.7	MÄTRESULTAT	13
3	BERÄKNINGAR.....	17
3.1	IEM	17
3.2	SPECRAY	18
3.3	CAD-YTA.....	20
3.3.1	Generering av CAD-yta.....	21
3.4	BERÄKNINGSPARAMETRAR, OBJEKTPARAMETRAR OCH VINKELDEFINITIONER.....	23
3.5	BERÄKNINGSRESULTAT.....	23
3.5.1	IEM.....	23
3.5.2	SPECRAY	24
3.6	JÄMFÖRELSE MELLAN IEM OCH SPECRAY EM	32
4	DISKUSSION OCH SLUTSATSER.....	35
5	REFERENSLISTA	37

1 Inledning

Inom FoT-projektet *Radarmål i bakgrund* har bistatiska beräkningar och mätningar utförts för en typ av markmodell. Mätningar har också gjorts på en naturlig gräsyta. Syftet med arbetet är att finna modeller som beskriver markens bistatiska spridningsegenskaper. Denna kunskap krävs för att vi skall ha möjlighet att beräkna radarsignaturen från ett objekt i bakgrund, t ex markfordon i olika terrängtyper. Denna kunskap och förmåga är en förutsättning för att kunna:

- Lämna tillförlitligt radarmålareaunderlag till duellsimuleringar.
- Signaturanpassa sjö- och/eller markbundna farkoster.
- Använda beräkningsdata som jämförelsedata vid målidentifiering.
- Göra en fenomenologisk bedömning av radarmålarean hos ett objekt i komplicerad miljö.

Mot bakgrund av att Sverige är tänkt att delta med marktrupper i internationella insatser är det av stor vikt att vi utifrån hot, uppgift, taktiskt uppträdande mm, har verktyg och kompetens för att kunna åstadkomma effektiva signaturmodifieringar på insatsmaterielen.

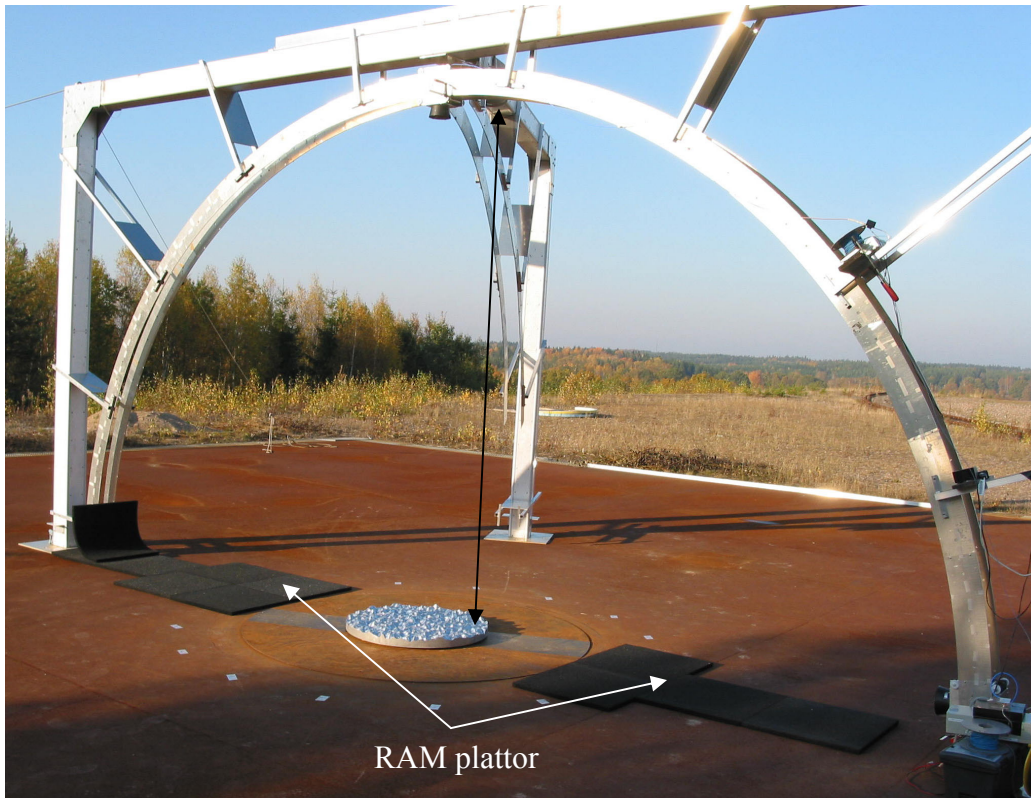
Denna rapport presenterar dels de bistatiska mätningar som utförts på en skrovlig aluminiumyta samt på gräs och dels de beräkningar som har utförts på den tillverkade aluminiumytan. Beräkningarna har gjorts med hjälp av två olika metoder.

2 Mätningar

Mätningarna utfördes hösten 2005. Utmärkande för denna höst var att vädret var mycket bra, dvs relativt varmt och vindstilla, långt in i oktober.

2.1 Mätbågen

I [1] ges en genomgång över vad som krävs av ett mätsystem och även idéer vad gäller mätmetodik för att man skall kunna få relevanta radarmålareadata som kan användas för modellering av interaktionen med omgivningen. Efter denna studie beslöt FOI att bygga en mätbåge, se Figur 1.

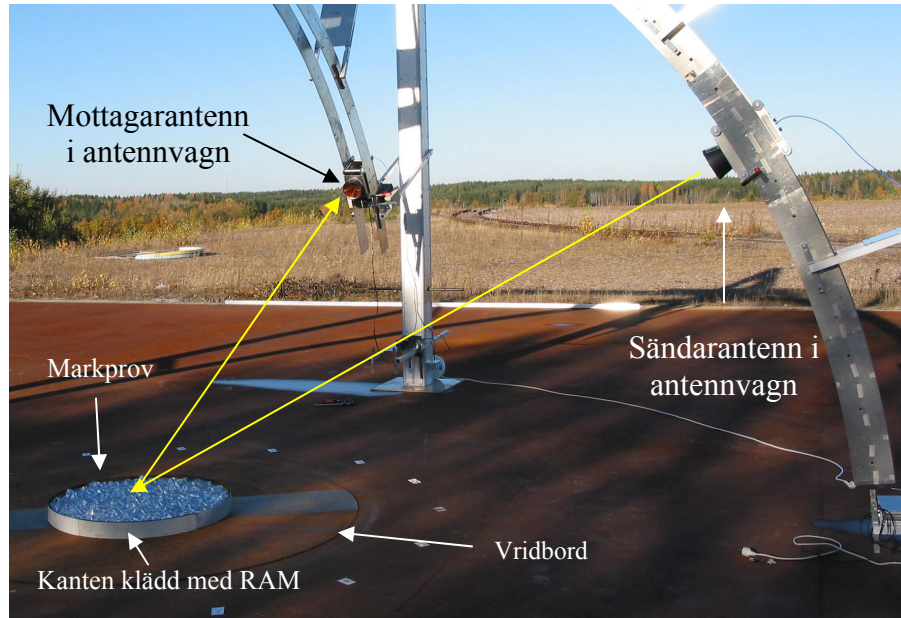


Figur 1. FOI:s mätbåge. Bågradien är 3.5 meter. Stativet kan justeras i höjd m.h.a. domkrafter vid stativbenen för att få bågcentrum på samma nivå som markplanet och justera in vinkelskalans nollpunkt. RAM (Radar Absorbent Material) - plattorna användes för att dämpa multipel- och sidolobseffekter.

Konstruktionen är, till en början, relativt enkel med möjligheten att kunna uppgradera bågen med tiden. Hela konstruktionen är gjord i aluminium. Stativet som stödjer bågen är ca 7.5 meter långt och ca 4 meter högt. Stativet till kvartsbågen, se Figur 1, är ledat kring en vertikal axel så att den asimutala vinkeln mellan kvartsbågen och huvudbågen kan ställas in. Stativet bär upp bågstrukturen som består av två parallella bågar. Bågarna är uppbyggda av bågsegment frästa med en NC-fräsmaskin*. Bågsegmenten skruvas ihop och har en yttre bågradie på 3.5 meter. Bågen hålls upp genom att några av bågsegmenten

* NC, numerically controlled, numeriskt styrd

är fästa i stativets yttre ram av kraftiga aluminiumsektioner. Bågarna fungerar som räls för antennvagnar, se Figur 2. Vagnens vinkelposition relativt markplanet, ställs in med hjälp av elektronisk klinometer ("digitalt vattenpass") med en vinkelupplösning på 0.1° .



Figur 2. Antennvagnarna löper över mätbågen.

Ett vridbord är placerat i centrum av bågen vilket möjliggör bistatiska ISAR-mätningar. Rent geometriskt finns med denna konfiguration, dvs mätbåge och vridbord, stor frihet att välja nästan godtyckliga antennriktningar. Möjligheten finns också att utföra SAR-mätningar om antennerna kan positioneras med tillräcklig noggrannhet. I praktiken kräver detta motoriserade antennvagnar samt modifieringar av datainsamlingsprogrammet. Hur stor del av vinkelrymden som i praktiken kan utnyttjas beror till stor del på hur man lyckas med att hålla ner bakgrund och överhörning. Vissa ISAR/SAR-kombinationer kan också förväntas ge dålig upplösning.

Lilla Gåras mätsystem har använts vid mätningarna. Mätsystemet har redovisats i [2]

2.2 Mätutrustning och mätobjekt

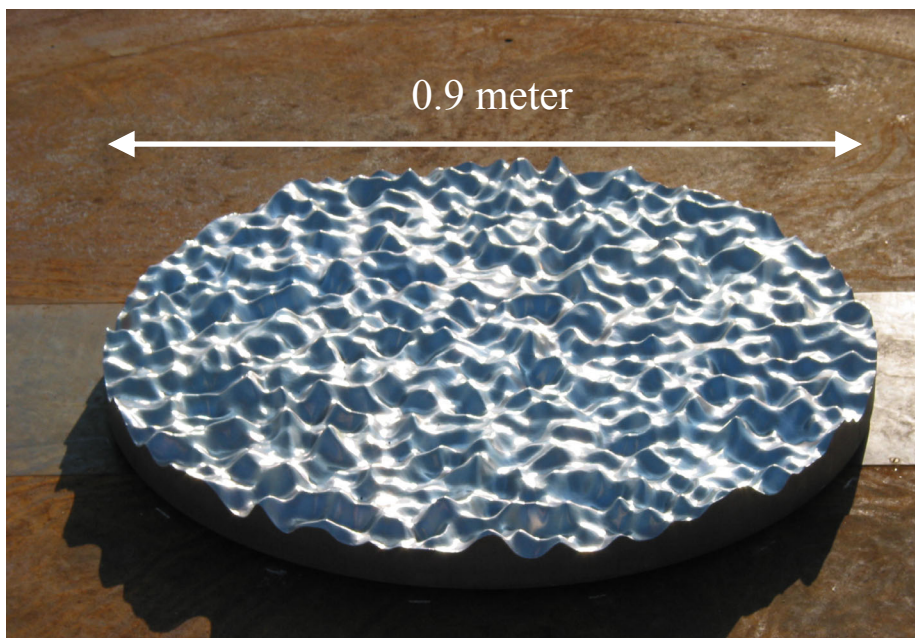
Antenner:	Rygghornsantenn 2-18 GHz, 5-18 dB gain, 60 till 10° lobbredd (-3 dB), för 6-16 GHz kan lobbredden antas vara 30 till 12° .
Sändarförstärkare:	Miteq, 6-18 GHz, 30 dB, max uteffekt 30 dBm
Mottagarförstärkare:	Miteq, 6-18 GHz, 26 dB

Optolänkar:

Miteq MDDT 100M 11G-28-20-M14
Miteq MDDR 100M 18G-10-20-0

Objekt:

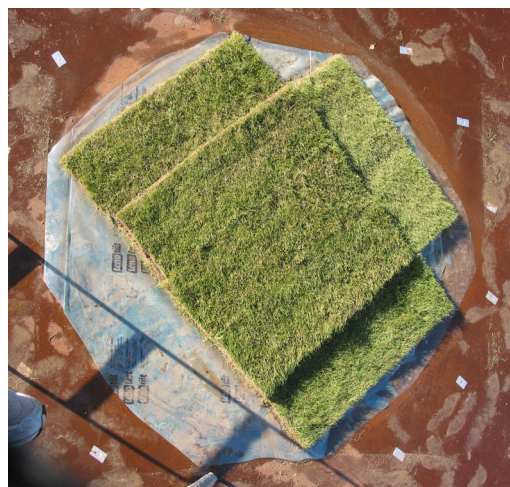
Skrovlig cirkulär aluminiumyta (Figur 3) som har tillverkats utifrån den CAD-modell som beskrivs i beräkningsavsnittet och gräsyta (Figur 4 och Figur 5).



Figur 3. Skrovlig aluminiumyta. Ytan är NC-fräst.



Figur 4. Pseudomonostatisk (nära monostatisk) mätning mot gräsprov.



Figur 5. Provytan bestående av gräs utplacerad på vridbordet.

För gräsmätningarna användes som prov färdig gräsmatta på rulle. För att få tillräcklig tjocklek lades tre skikt korsvis på varandra, de två nedersta med jorden uppåt. Packens tjocklek var c:a 8 cm till den övre jordytan och ytterligare 3 cm till grässtrånas toppar.

Gräsmattan användes i leveranstillstånd som med anledning av väderläget vid denna tid innebar relativt låg fukthalt. Runt denna packe lades på tre sidor enkla skikt med gräsmatta medan den fjärde sidan lämnades fri för placering av referensobjekt.

2.3 Kalibrering

För mätningarna prövades användningen av kalibrering utan referensobjekt. Antennerna riktades mot varandra och mottagen signal mättes som funktion av utsänd signal. Eftersom signalstyrkan vid detta förfarande kan bli hög användes en dämpning. Med tillgång till uppmätta signalstyrkor och mätförhållanden kunde mätfilerna sedan kalibreras med hjälp av radarekvationen. Fasen kalibreras mot kalibreringsfilens fas och ges ett skift som svarar mot skillnaden i gångväg mellan kalibrering och mätning. Med objektfri kalibrering kan man undvika osäkerheter i kalibreringsobjektens upplinjer, målarea och bakgrundssubtraktion, minska problemen med närfältsavstånd och flervägsutbredning och lätt få en god signalstyrka, som nämnt så god att signaldämpning krävs. Metoden är också lämpad för studier av mätsystemets stabilitet. Metoden förutsätter att antennerna kan separeras. Metoden skulle också kunna tillämpas på andra fall om strålgången viks genom reflexion i en stor plan yta.

2.4 Mätparametrar

Frekvenser: 7.5 – 12.5 GHz i 401 steg. Detta ger ett invikningsavstånd om ca 12 m och en upplösning om ca 3 cm. I vissa fall har mindre bandbredder använts vid dataanalysen (8-12 resp 9-11 GHz)

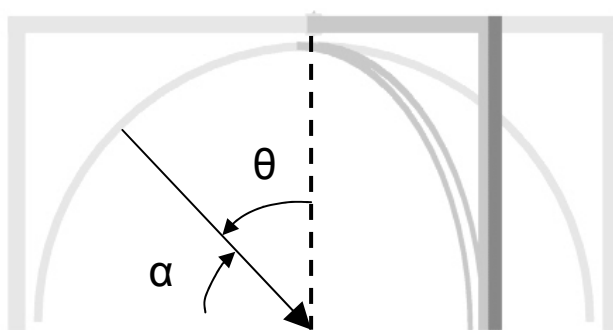
Mätavstånd: 3.5 meter

Polarisation: HH

Pulslängd: 80 ns sändpuls.

Pulsrepetitionstid: 10 μ s

Radarns teoretiska "fotavtryck": Beroende av frekvens och vinkel samt pulstider. Vid frekvensen 11 GHz kan lobbredden (-3 dB) uppskattas till 17° vilket vid 3.5 m ger 1.0 m tvärs antenricktningen. Längs med antenricktningen inverkar projektion och puls/grindtider. Det effektiva fotavtrycket utgör produkten av sändarens och mottagarens avtryck.



Figur 6. Figuren visar vinkeldefinitionerna som används i rapporten. Figuren visar en vy från sidan av bågkonstruktionen. α utgår från horisontalplanet.

2.5 Mätmetodik

Mätningarna har koncentrerats på mätning av den numeriskt frästa gaussytan (se avsnitt 3.3) av aluminium. Denna har vid mätningen legat på tunna underlägg för att underlätta grepp vid byte av objekt. För att undvika vågutbredning under plattan har ett absorbentark av ungefär samma tjocklek placerats där. Varje bistatisk mätning har innefattat ett varvs vridning av vridbordet. Detta innebär att vi har haft möjlighet att analysera data med hjälp av bistatisk ISAR. Efter att ha utfört en mätning har mottagarantennen flyttats till nästa position. Vinkelpositioneringen gjordes med hjälp av en elektronisk klinometer ("elektroniskt vattenpass") med 0.1° vinkelupplösning.

Vid mätningarna har Lilla Gåras nya datainsamlingssystem använts. Den kraftigt ökade datainsamlingstakten för detta system öppnar nya möjligheter att kartlägga de bistatiska spridningsegenskaperna för mark och den bistatiska signaturen för olika objekt. Den högre hastigheten minskar också inverkan av eventuell drift i mätsystemet eller ändringar i markprovets egenskaper mellan och under mätningarna. Samtidigt medför det nya insamlingssystemet ett behov av nya mjukvaruverktyg, dels för att hantera nya typer av datafiler, men speciellt för att på ett effektivt sätt processera och analysera det ökade dataflödet.

2.6 Databehandling

Data har samlats in med Lilla Gåras mätsystem, kalibrerats och konverterats till MatLab-format lämpat för vidare analys med analysverktyget Columbus [3]. Columbus och `columbus_analys` eller rättare sagt `columbus_cb` och `columbus_analys_cb` med resp programkärnor i C-kod har skrivits om för att välfokuserade och odistorderade bistatiska ISAR-filmer ska kunna genereras, och utgrindningar kunna göras ur dessa filmer. För att optimera bildgeometrin har också en parameter, `z_ground`, som gör det möjligt att flytta projektiionsplanet från $z = 0$ till $z = z_ground$ lagts till. Nolldopplerfiltrering, som tidigare måste göras externt, har lagts in i `columbus_cb`. Programmet har dessutom skrivits om så att det från data täckande 360° också kan generera en film täckande ett helt varv. Även detta har tidigare krävt externa manipulationer. Utgrindning i

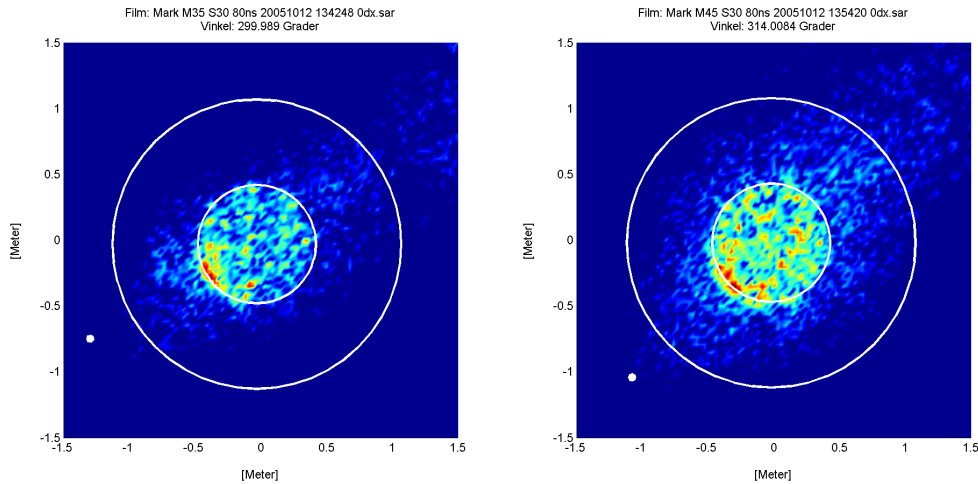
columbus_analys_cb kan nu göras över både frekvens och vinkel medan man tidigare varit hänvisad till antingen en frekvens eller en vinkel. Olika typer av datafiler har införts för att göra skillnad på t.ex. rådata och filmer och därigenom få bättre överblick i filkatalogerna. En ny typ av kommando- eller batch-fil ger möjlighet till satsvis film-generering samtidigt som dokumentationen av använda parametrar förbättras. Detta ger möjlighet till betydande rationaliseringar av analysarbete, vilket också krävs för att hantera det ökade dataflödet från det nya mätsystemet. Fördelarna ligger här inte bara i att man lätt kan processera många filer utan även i att en och samma fil lätt kan processeras på olika sätt för att t.ex. utprova den bästa fokuseringen. Vidare har vissa fel rättats, detaljförbättringar gjorts och nya hjälpprogram, bl.a. för hantering av filer från det nya mätinsamlingssystemet utvecklats (detta gäller även columbus_stat_cb). Både det bistatiska Columbuspaketet och det mesta av hjälpprogrammen måste dock ännu betraktas som s.k. betaversioner. Utvecklingen har drivits så långt som krävs för att lösa de aktuella uppgifterna men generaliseringar av programkoderna återstår.

Mätningar som tagits upp i samband med utprovning av lämplig dämpnivå för kalibrering har även kunnat användas för korrigering av olinjäriteter i amplituddetektorn och viss kompression i mottagarsidans elektronik. För mätningar på aluminiumytan har dessa korrekationer vid många delfrekvenser visat sig bli alltför stora för att vi ska kunna dra några säkra kvantitativa slutsatser om ytans bistatiska reflektivitet σ^0 . Trots detta erhålls goda ISAR-bilder som visar att om bara signalnivåerna anpassas ska det inte möta några hinder att erhålla goda mätvärden. Mätningarna har främst varit inriktade på denna aluminiumyta med tanken att detta skulle medge jämförelse med beräknade data. Mätningar har också gjorts på en mer naturlig yta, gräs. Även dessa mätningar har delvis påverkats av kompression men har enligt vår bedömning kunnat ges en acceptabel korrektion.

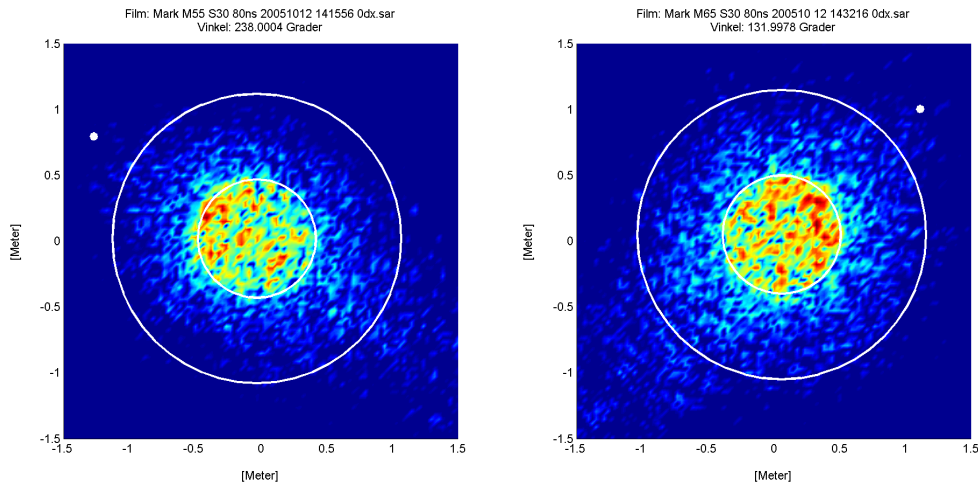
Nolldopplerfiltrering bygger på antagandet att medelvärdet av spridningsamplituderna över en stor vinkelsektor svarar mot spridningen från fasta spridare. Dessa kan då avlägsnas ur data genom subtraktion av medelvärdet. Nolldopplerfiltrering utgör en form av bakgrundssubtraktion som kan användas som komplement till, eller i stället för, traditionell bakgrundssubtraktion. Till fördelarna hör inte bara att man sparar tid utan också att instabiliteter i bakgrunden får mindre inverkan och att man tar hänsyn till objektets skuggning av bakgrunden. Även bidrag från överhörning mellan antenner bör kunna reduceras på detta sätt. Rörliga objekt antas däremot ge mycket små nettobidrag till medelvärdet (idealt sett noll) och blir därför kvar. Alla mätdata som presenteras i denna rapport har 0-dopplerfiltrerats.

2.7 Mätresultat

Nedanstående ISAR-bilder har genererats vid 7.5-12.5 GHz. Bilderna har tagits fram utan annan översampling än den som den eleverade antennen ger upphov till (se nästa avsnitt). Någon kompressionskorrektur har heller inte gjorts eftersom korrektionerna bedömdes vara för stora. P.g.a. de stora kompressionskorrektionerna görs ingen utgrindning och bilderna måste tolkas med försiktighet. Dock verkar intensiteten på ytan öka med ökande mottagavinkel. De starkaste intensitetsmaxima svarar sannolikt i många fall mot ”blänkpunkter” på ytan d.v.s. punkter med en tangentyta som ger spekulär reflexion, men någon jämförelse med den geometriska ytan har ännu inte gjorts på den detaljnivån. Vid små bistatiska vinklar fås som väntat ett markant maximum vid den dieder som bildas av kanten och underlaget.



Figur 7. ISAR-bilder av mätningar mot gaussisk yta fräst i aluminium. Frekvensintervall 7.5-12.5 GHz utan kompressionskorrektur. Intensitetsskalan är densamma för alla bilderna (Figur 7-9). Vita cirklar visar plattans resp vridbordets ytterkonturer. ISAR-bilden till vänster för antennvinklarna $\alpha_t=30^\circ$ och $\alpha_r=35^\circ$ och till höger $\alpha_t=30^\circ$ och $\alpha_r=45^\circ$.



Figur 8. ISAR-bilder av mätningar mot gaussisk yta fräst i aluminium. Frekvensintervall 7.5-12.5 GHz utan kompressionskorrektur. Intensitetsskalan är densamma för alla bilderna. Vita cirklar visar plattans resp vridbordets ytterkonturer. ISAR-bilden till vänster för antennvinklarna $\alpha_t=30^\circ$ och $\alpha_r=55^\circ$ och till höger $\alpha_t=30^\circ$ och $\alpha_r=65^\circ$.

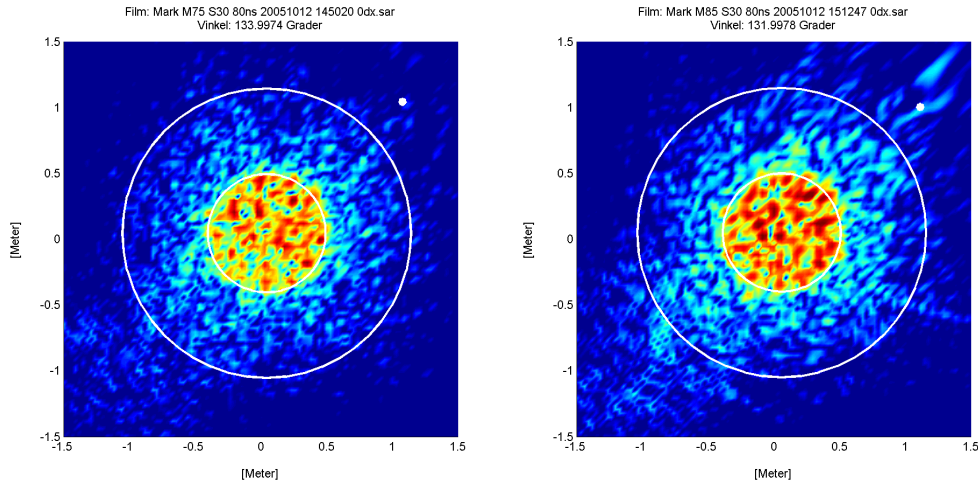


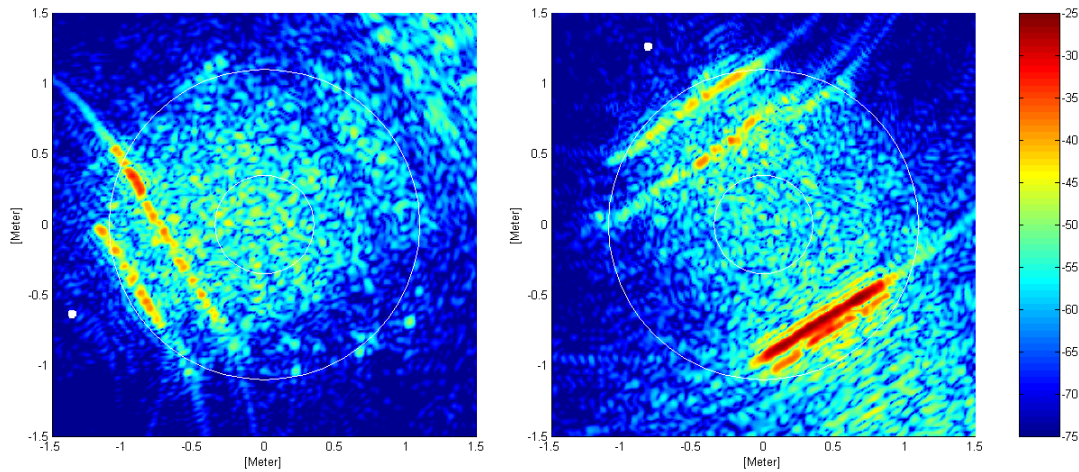
Figure 9. ISAR-bilder av mätningar mot gaussisk yta fräst i aluminium. Frekvensintervall 7.5-12.5 GHz utan kompressionskorrektion. Intensitetsskalan är densamma för alla bilderna. Vita cirklar visar plattans resp vridbordets ytterkonturer. ISAR-bilden till vänster för antennvinklarna $\alpha_t=30^\circ$ och $\alpha_r=75^\circ$ och till höger $\alpha_t=30^\circ$ och $\alpha_r=85^\circ$.

Figureerna 10 - 13 visar exempel på ISAR-bilder från de använda bistatiska kombinationerna som användes vid gräsmätningarna. Gräsmattan innehåller inga urskiljbara detaljer utan den enda tillgängliga informationen är signalnivån i klottret. Man ser dock att grovleken på klottret ökar längs serien beroende på att upplösningen sjunker med ökande (bisektris-) depression och bistatisk vinkel. Gräsmattans ytterkanter ger däremot starka signaler i riktningarna vinkelrät mot dessa. Detta gäller inte bara det pseudomonostatiska fallet, utan effekten finns för alla mottagarvinklar även om den relativa styrkan avtagit för de högsta mottagarvinklarna. Skarvar i gräsmattan kan däremot knappast urskiljas. Inlagt i bilderna finns cirklar som markerar vridbordets kontur, respektive det vid utgrindning använda området. Notera att vissa gräsmattehörn sticker något utanför (Figur 5). Området är 0.7 m i diameter och har en uppskattad effektiv area* av 0.34 m^2 . Bilderna är genererade för 8-12 GHz. Översamplingen är c:a $2.5/\cos 30^\circ \approx 2.9$ ggr för det pseudomonostatiska fallet. Eftersom upplösningen sjunker då α_r ökar blir översamplingen för kombinationen $\alpha_t=30^\circ$, $\alpha_r=85^\circ$ ungefär $2.5/\cos((30+85)/2)\cos((85-30)/2) \approx 5.2$.

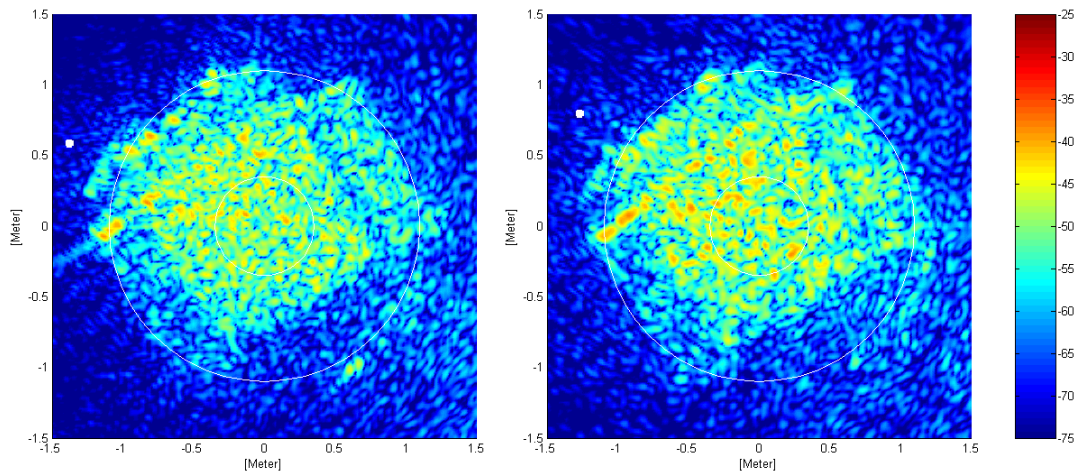
Utgrindningen gjordes över 360° och delbandet 9-11 GHz i steg om 0.25° resp. 0.1 GHz . Dessa steg bedömdes uppfylla samplingskriteriet någorlunda väl, vilket dock egentligen inte är nödvändigt för beräkning av en medelnivå. Delbandet är valt för att kompressionskorrektionerna där bedömdes vara mindre. För mottagarvinklarna 32° och i någon mån 40° och 50° kan dock en viss restkompression finnas. Medelvärden över dessa vinklar och frekvenser finns redovisade i Figur 14. För de bistatiska situationerna är nivån anmärkningsvärt jämn vilket kan tolkas som att gräsyten delvis verkar som en Lambertspridare. Det måste dock betonas att vi här endast betraktar riktningar i en del av infallsplanet. Nivån för sådana riktningar är för många ytor, särskilt om GO-approximationen kan tillämpas, betydligt högre än för riktningar utanför infallsplanet.

* Area korrigerad för radarns fotavtryck

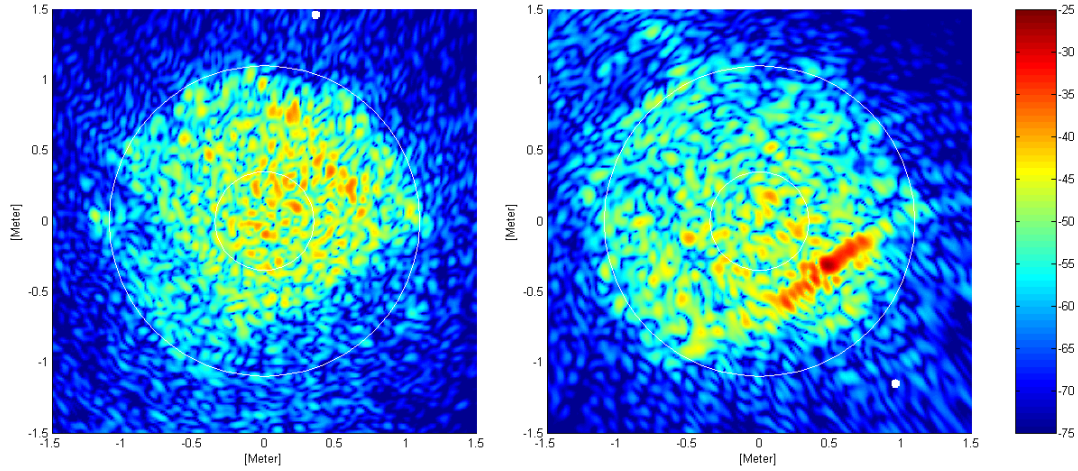
Bakåtspridningen är enligt dessa mätningar påtagligt lägre. För denna geometri var kompressionskorrektionerna något större, troligen p.g.a. hög intensitet från gräsmattekanterna, och man kan tänka sig att detta skulle sänka den skenbara nivån från gräsmatteytan. Denna sänkning skulle bara förväntas då kanterna uppvisar hög intensitet, men någon påtaglig omvänd korrelation mellan kant- och ytintensitet verkar inte finnas. För fallen med referenscylinder närvarande fås något lägre värden, men denna skillnad är mindre än mellan $27.5^\circ/32^\circ$ (α_t/α_r) och $30^\circ/>45^\circ$ -fallen. Vid $27.5^\circ/32^\circ$ är kompressionskorrektionerna större med referenscylinder närvarande och det gäller också vid $30^\circ/85^\circ$ även om korrektionerna över huvud taget är mindre där. Sannolikt är således den lägre nivån i bakåtspridningsriktningen inte huvudsakligen en följd av kompressionsfel.



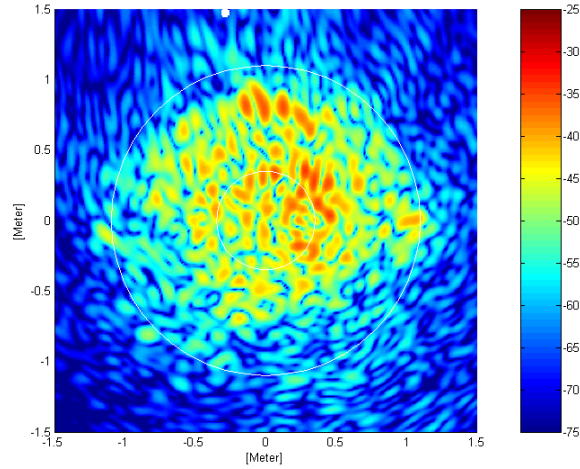
Figur 10. ISAR-bilder av gräs resp. gräs och referenscylinder vid $\alpha_t=27.5^\circ$, $\alpha_r=32^\circ$. Vita cirklar betecknar utgrindat område resp. vridbord. Vit prick markerar i vilken asimetrikriktning radarn stått. 8-12 GHz. Översampling c:a 2.9 ggr.



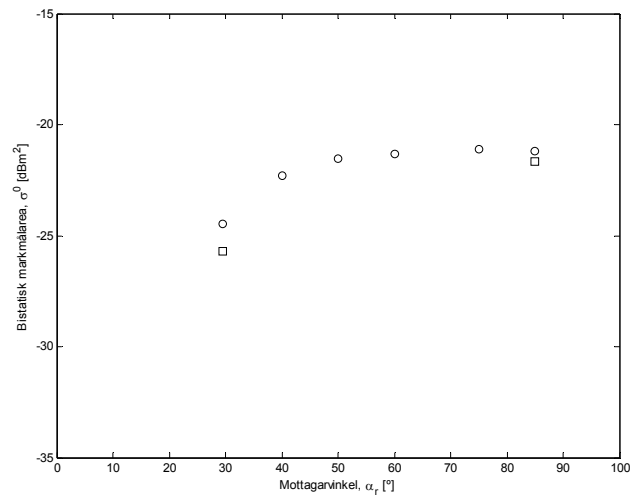
Figur 11. ISAR-bilder av gräs vid $\alpha_t=30^\circ$ och $\alpha_r=40^\circ$ resp 50° .



Figur 12. ISAR-bilder av gräs vid $\alpha_t=30^\circ$ och $\alpha_r=60^\circ$ resp $\alpha_r=75^\circ$.



Figur 13. ISAR-bilder av gräs vid $\alpha_t=30^\circ$ och $\alpha_r=85^\circ$.



Figur 14. Ur mätningar uppskattade bistatiska σ^0 -värden för gräs vid $\alpha_t=30^\circ$ ($\theta_t=60^\circ$) som funktion av α_r ($\theta_r=90^\circ-\alpha_r$). Medelvärden över $\varphi=0-360^\circ$ och 9-11 GHz. Fyrkant markerar data grindade ur film med referenscylinder.

3 Beräkningar

Tidigare avsnitt har presenterat förutsättningar för mätningar på en skrovlig metallisk markyta. Av stort intresse är det naturligtvis att jämföra dessa mätningar med beräkningar av samma markytas spridningsegenskaper. Skillnaderna mellan mätningar och beräkningar kan bero på till exempel beräkningsprogrammets bristande modelleringsförmåga, men också på svårigheter i att i mätsituationen isolera precis det som beräkningsprogrammet beaktar. Diskrepanserna kan också förklaras av de kompressionsfel som tyvärr uppträder.

Beräkningar av markbitens spridningsegenskaper har gjorts på två olika sätt, vilka beskrivs i avsnitt 3.1 samt avsnitt 3.2. Den stora skillnaden är att den ena metoden är statistiskt baserad och av den anledningen beräknar ett förväntat radarmålareabidrag, dvs ett medelvärde, medan den andra metoden är deterministisk och utgår från en fasettering av den aktuella ytan, och härvid ger värden med både fas och amplitud för en viss yta och riktning.

3.1 IEM

IEM, Integral Equation Method [4] är ett sätt att beskriva en ytans tangentiella H- och E-fält genom två integralekvationer, en för H-fältet och en för E-fältet, där den första termen i ekvationernas vänsterled enkelt kan beskrivas som vektorprodukten mellan ytans normal och det infallande E- eller H-fältet. Genom att tillämpa dessa ekvationer på en stokastisk yta beskriven med gaussisk höjdfördelningsfunktion och en given korrelationsfunktion kunde Fung [4] m.h.a. fysikalisk optik-approximationen [5] få fram ett uttryck på ytans normaliserade bistatiska markspridningskoefficient σ_{qp}^0 , vilken beror av bl.a. frekvens, infallsriktning spridningsriktning, ytans material samt geometriska egenskaper. Man bör påpeka att metoden enligt Fung för beräkning av den bistatiska spridningsfunktionen ger ytans diffusa spridningsegenskaper, vilken definieras enligt ekvation (1).

$$\langle P_{qp\text{incoh}}^s \rangle = \frac{1}{2\eta_1} \left[\langle E_{qp}^s E_{qp}^{s*} \rangle - \langle E_{qp}^s \rangle \langle E_{qp}^{s*} \rangle \right] \quad (1)$$

$$\langle P_{qp\text{coh}}^s \rangle = \frac{1}{2\eta_1} \left[\langle E_{qp}^s \rangle \langle E_{qp}^{s*} \rangle \right] \quad (2)$$

$\langle E_{qp}^s \rangle$ är medelvärdet av det spridda fältet och indexen q, p anger den mottagna respektive infallande polarisationen. Vid mätning måste därför ytans koherenta bidrag (ekv. (2)) subtraheras bort innan en jämförelse sker. Detta bidrag är dock litet för spridningsriktningar utanför den spekulära.

IEM har validerats mot mätningar och visat sig ge bra överensstämmelse [6], [4]. Metoden har utvecklats genom åren och en del förbättringar har gjorts som främst påverkar resultaten då markens skrovligheter är relativt små jämfört med våglängden.

I IEM utgår man från en exakt iterativ beskrivning av ytströmmarna där de två första strömtermerna beaktas. Man inför sedan approximationen att startvärdet i den första iterationen är fysikalisk optik-strömmen, dvs att strömmen i varje punkt på ytan har samma värde som om den inducerades vid reflektion mot ett oändligt stort plan. Eftersom den första strömtermen itereras ytterligare en gång i IEM möjliggör denna extra korrektion beräkningar med IEM på ytor med variationer betydligt kortare än våglängden, ett fall där fysikalisk optik inte är användbar. Vid allt högre frekvens minskar korrektionstermens betydelse vilket ger en minskad skillnad mellan IEM och fysikalisk optik. Ytströmmar på skuggsidor sätts till noll.

I den här rapporten används en IEM-modell enligt [6] där en del ytterligare korrektioner har gjorts. Ingen hänsyn kommer i denna IEM-version tas till multipelspridningsbidrag, men utvecklingsarbete pågår för att i framtiden även inkludera sådana termer.

3.2 SPECRAY

SPECRAY EM [7] är en kommersiell programvara som använder approximationerna geometrisk optik i kombination med fysikalisk optik och ILDC (Incremental Length Diffraction Coefficient) för beräkning av elektromagnetiska fält i en syntetisk omgivning. ILDC har dock inte använts i dessa beräkningar. Ovan nämnda approximationer är s.k. asymptotiska metoder vilka generellt ger förbättrad överensstämmelse med verkligheten vid högre frekvenser.

Programmet förutsätter fasettbaserade CAD-geometrier vilka läses in i programmet. I princip beror inte beräkningstiden på hur fint dessa geometrier är fasetterade eftersom man i programmet anger ett utgående strålavstånd vilket spänner upp ett antal polygoner över ytan. Om strålavståndet är för stort i förhållande till CAD-geometrin, undersamlas den senare, vilket ger felaktiga resultat. Detta medför att om CAD-geometrin är extremt fint fasetterad och man mycket noggrant behöver beakta varje fasetts bidrag krävs ett stort antal strålar vilket ger en längre beräkningstid. Hur fint en yta behöver fasetteras och samplas bestäms till stor del av våglängden för vilken ytans spridningsbidrag skall beräknas. Ju kortare våglängd desto finare fasettering krävs för att få bra överensstämmelse med verkligheten.

Vid beräkning av CAD-ytan med SPECRAY EM fås det totala spridda fältet. För att resultaten skall vara jämförbara med IEM där markens inkoherenta bistatiska målarea betecknas σ^0 ges motsvarande storhet i SPECRAY EM av (3)

$$\sigma^0 = 4\pi R^2 P_{incoh} / (E_0^2 A_0) \quad (3)$$

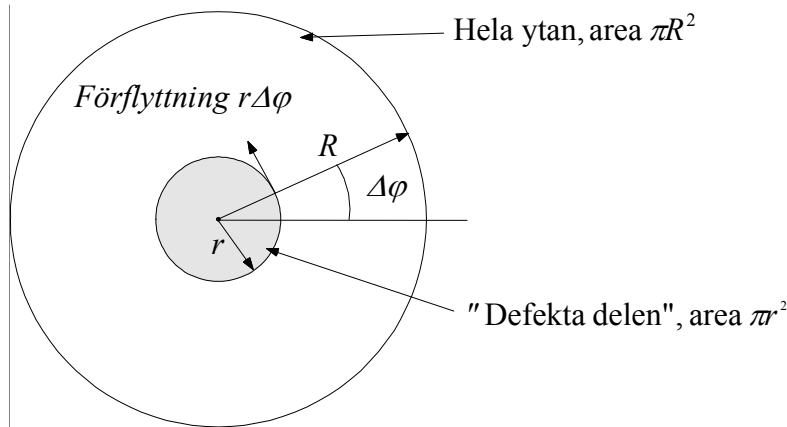
där R är avståndet från spridaren till mottagaren, E_0 är den infallande vågens amplitud och A_0 är den belysta arean.

För att medelvärdesbildning enligt ekvation (1) skall kunna göras på SPECRAY EM – data krävs att antingen ett stort antal oberoende CAD-ytor beräknas eller att endast en

CAD-yta beräknas, men att den vrids i asimutled så mycket att man kan anse att de ger oberoende beräkningar. Dessa kan sedan medelvärdesbildas. Nedan följer ett resonemang som uppskattar hur många vridningar (oberoende sampel) som kan vridas fram från en enda yta.

Tumregel: Förmoda att två mätningar kan betraktas som oberoende ifall vridningen av plattan gör att nästan alla punkter förflyttas minst en koherenslängd. För punkter närmast centrum blir dock vridningen så liten att punkterna ej kan betraktas som oberoende.

Denna tumregel kan ifrågasättas; Jämför med en ren translation av en yta sträckan L . Den translaterade ytan kan knappast ses som oberoende av den ej translaterade, även om den är det 'punktvis'. Notera dock att vårt fall även innehåller en vridning. Utgående från tumregeln beräknas för en platta med radie R , och koherenslängd L , hur många oberoende ytor som kan vridas fram. Inför defektparametern p som talar om på hur stor del av ytan som vi kan tillåta att punkterna flyttas en sträcka d där $d < L$. Sålunda har vi att $0 \leq p \leq 1$ även om rimliga värden på p bör vara hyggligt nära 0. För att kunna skatta p fixeras vridningsvinkeln $\Delta\varphi$.



Figur 15. Diverse självförklarande parameterar.

Man inser att den kritiska gränsen för att uppfylla translationsvillkoret $d \geq L$ blir att $r \geq L/\Delta\varphi$ där r är radiellt avstånd om vi betraktar bågen med längd $\Delta\varphi$ (Figur 15) som en sträcka. Defektparametern p blir sålunda:

$$p = \frac{\pi(L/\Delta\varphi)^2}{\pi R^2} \text{ så att } \Delta\varphi = \frac{L}{\sqrt{p}R} \text{ vilket ger att antalet tillåtna vridningar på ett varv blir}$$

$$N_{\text{vrid}} = \frac{2\pi}{\Delta\varphi} = \frac{2\pi R\sqrt{p}}{L} \quad (4)$$

Kritiken ovan är förmodligen befogad, men det är svårt att bedöma hur allvarligt problemet är. Som tidigare nämnts får man också en vridning av alla ytor/fasetter, vilket är till hjälp.

3.3 CAD-yta

Den CAD-yta på vilka beräkningar och mätningar görs specificeras av att det skall vara möjligt att använda fysikalisk optik-approximationen för beräkning av ytan, vilket gör att korrelationslängden L inte får vara för kort i förhållande till våglängden. Samtidigt bör inte korrelationslängden vara för stor i förhållande till frekvensen eftersom man då bara använder beräkningsmetoderna vid frekvenser där man vet att de ska fungera. Vidare vill vi även undersöka hur stora multipelspridningsbidragen blir. Dessa ökar med ökande grovlek på ytan vilket medför att ytans höjdstandardavvikelse σ_s inte skall vara alltför liten i förhållande till korrelationslängden L , men ändå inte ofysikaliskt grov. Nedanstående parametrar gör att ytan klassificeras i medelgrova området vid 7,5 GHz för vilket IEM är den enda kända metod som fungerar bra, samt det grova området vid 10 GHz där högfrequensmetoder kan användas. Vid låga frekvenser kan spridningen beräknas med IEM eller perturbationsmetoder. Eftersom vi i denna rapport endast vill undersöka en markytas geometriska spridningsegenskaper valdes en yta av aluminium som kan betraktas som en perfekt elektrisk ledare (PEC = oändlig konduktivitet) vid mikrovågsfrekvenser. För att på enkelt sätt skapa statistik genom vridning av ytan, valdes en isotrop korrelationsfunktion, dvs medellutningen är densamma oberoende av riktning. Ytans korrelationsfunktion valdes även att vara gaussisk men skulle likaväl kunna vara exponentiell, eller av annan typ. Egentligen vill man, för att få så bra statistik som möjligt, tillverka en så stor yta som möjligt. Begränsningar av vikt, tillverkningstid och kostnad gjorde att ytans diameter valdes till 0,9 m. Ovanstående krav gav följande korrelationslängd, höjdstandardavvikelse, korrelationsfunktion och dielektricitetskonstant ϵ_r :

$$\begin{array}{lll} kL = 4 & \text{vid } f = 10 \text{ GHz} & \Rightarrow L = 19 \text{ mm} \\ k\sigma_s = 1.5 & \text{vid } f = 10 \text{ GHz} & \Rightarrow \sigma_s = 7.1 \text{ mm} \\ \epsilon_r = \infty & & \end{array}$$

Korrelationsfunktionen ges av $p(\xi) = \exp(-\xi^2 / L^2)$, där ξ är korrelationsavståndet.

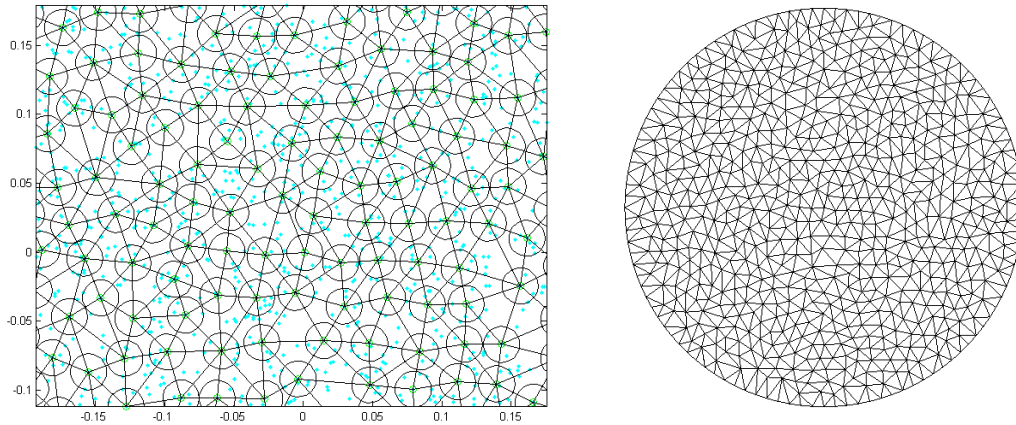
3.3.1 Generering av CAD-yta

För att erhålla en CAD-yta med ovan nämnda egenskaper implementerades via Matlab en metod enligt [8].

Ytan har genererats på en rektangulär grid, vilket gav en regelbunden fasettering. Ur elektromagnetisk spridningssynpunkt är detta olyckligt eftersom ett visst fasettbrus kan uppkomma genom att en stor del av fasettkanterna är parallella. Vid grov fasettering kan detta brus förväntas bli relativt stort och därmed förstöra den medelvärdesbildning som görs enligt avsnitt 3.1. För att reducera problemet med fasettbrus genereras ett mer slumpmässigt rutnät ovanpå det gamla kvadratiske nätet. En nackdel med denna metod är att vissa nodpunkter kommer nära varandra vilket leder till att beräkningarna skulle belastas med många små eller smala fasetter. För att undvika detta genereras därför först ett överskott av nodpunkter som sedan gallras. Den här använda gallringsmetoden utgår från att den nodpunkt som ligger närmast centrum ska behållas. Alla nodpunkter som ligger inom ett förbjudet avstånd från denna stryks varefter den återstående punkt som ligger närmast centrum också behålls och proceduren upprepas med strykningar kring utvalda punkter och behållande av de återstående punkter som ligger närmast centrum. Nodnätet definieras därför av den primära nodtätheten och gallringsradien samt ett ev. använt utgångsvärde för slumpvalsgeneratorn. Som stöd för parameterintervall har ett empiriskt samband mellan primär nodtäthet och gallringsradie och den resulterande gallringsfaktorn tagits fram. Genom att dela den önskade nodtätheten med gallringsfaktorn erhålls ett lämpligt värde på den primära nodtätheten. Om gallringen är hård nog för att ge någorlunda jämnstora fasetter kommer den genomsnittliga kantlängden att ligga nära kantlängden för ett hexagonalt nät med samma nodtäthet.

En yta med given ytterkontur, i detta fall en cirkel, kan erhållas genom att lägga ut punkter längs med denna kontur och sedan rensa alla slumpnoder inom det förbjudna avståndet från dessa (Figur 16). Därefter följer nodgallring utgående från centrum på vanligt sätt. Utanför konturen rensas givetvis alla punkter. Avståndet mellan konturnodpunkterna bör normalt väljas så att det svarar mot önskat nodavstånd inom ytan.

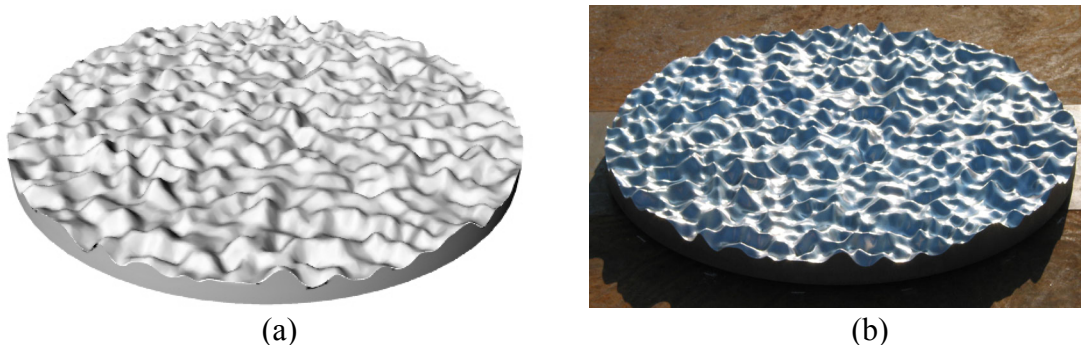
Sedan alla noder genererats och valts ut ska de förbindas till ett nät. Vi har använt oss av Matlabs Delaunay-triangulering som är deterministisk och i görligaste mån ger liksidiga fasetter. Höjdvärdena i nodpunkterna interpoleras med Matlabs 2D-splineinterpolation.



Figur 16. Bilden till vänster visar ett utsnitt nära centrum med bortgallrade nodpunkter (ljusblå) och använda noder (gröna). Svarta cirklar representerar gallringsavståndet, inga nodpunkter får ligga inom en sådan cirkels diameter från varandra. Streck visar hur punkterna slutligen förbinds. Till höger visas ett resulterande nodnät med cirkulär begränsning. Dessa bilder är beräknade med en nodtätthet om 2% av den valda (4% av den senare använda).

Gallringsfaktorn 0.12 bedömdes ge någorlunda jämnstora fasetter utan allt för mycket domänbildning. Nodtättheten valdes med sikte på en genomsnittlig fasettkantlängd svarande mot 1/4 av ytans koherenslängd vilket ger ca 64000 fasetter på en yta med diametern 0.9 m. Eftersom man i SPECRAY väljer ett visst strålavstånd med vilken ytan skall samplas kommer fasetter missas om inte ett väldigt litet strålavstånd väljs, vilket är beräkningskrävande. Därför reduceras antalet fasetter med en faktor 2 till ca 32000 st vilket ger c:a 2,8 kantlängder per koherenslängd. I Figur 17 (a) och (b) visas den frästa ytan respektive den CAD-genererade ytan för vilka mätningar och beräkningar gjorts.

Som man ser från Figur 17 (a) och (b) har ytorna en cylindrisk mantelyta. För att kunna jämföra resultaten med IEM krävs att spridningen från denna yta inte beaktas. I beräkningsfallet har mantelytan beklättats med en perfekt absorbent, men för mätfallet krävs utgridning så att inte denna yta bidrar då jämförelse mellan mätningar och beräkningar görs.



Figur 17. (a) Illustrerar den CAD yta som beräknades på med SPECRAY EM och (b) den utfrästa yta som mätningar utfördes på.

3.4 Beräkningsparametrar, objektparametrar och vinkeldefinitioner

Beräkningar har utförts med följande parameteruppsättning:

Sändarriktning: $\theta_t = 70^\circ$, $\varphi_t = 180 + \varphi_r$ = godtycklig vinkel
(vinkeldefinitioner, se Figur 6)

Mottagarriktningar: $\theta_r = 0, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60$ och 65.8° , $\varphi_t = \varphi_r$

Frekvenser: 7.5, 8.0,..., 12.5 GHz (IEM)
7.5, 7.6,..., 12.5 GHz (SPECRAY EM)

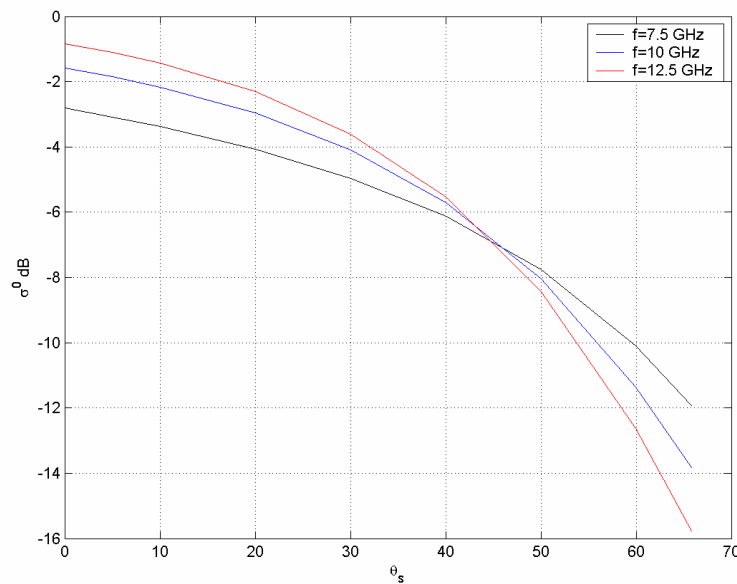
Polarisation: HH

3.5 Beräkningsresultat

I detta kapitel redovisas beräkningsresultat från IEM och SPECRAY EM. I Avsnitt 3.5.1 redovisas IEM-resultat och i 3.5.2 SPECRAY EM-resultat. En jämförelse mellan dessa olika beräkningsmetoder görs i avsnitt 3.6.

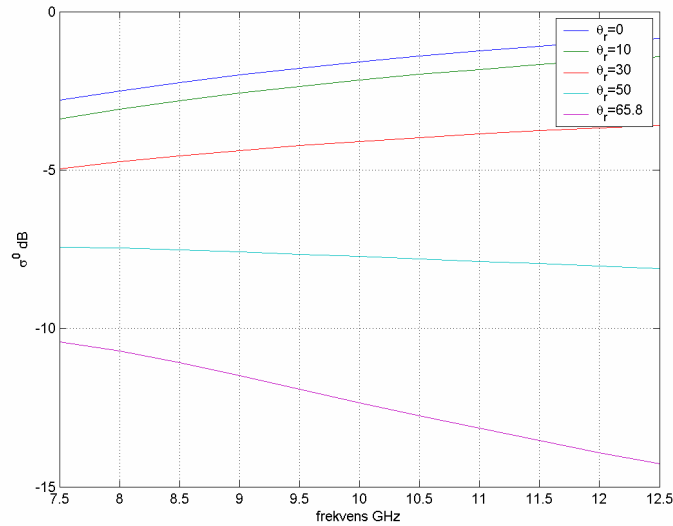
3.5.1 IEM

I detta avsnitt redovisas σ_{hh}^0 för enkelspridningsbidraget beräknat med IEM. Figur 18 visar σ_{hh}^0 som funktion av mottagarvinkeln θ_s . Gemensamt för alla kurvor i diagrammet är att infallsvinkeln $\theta_t = 70^\circ$ och att $\varphi_t = 180 + \varphi_r$.



Figur 18. Illustrerar σ_{hh}^0 som funktion av mottagarvinkeln beräknad vid frekvenserna 7.5, 10 och 12.5 GHz och med infall 70° från ytans normalriktning.

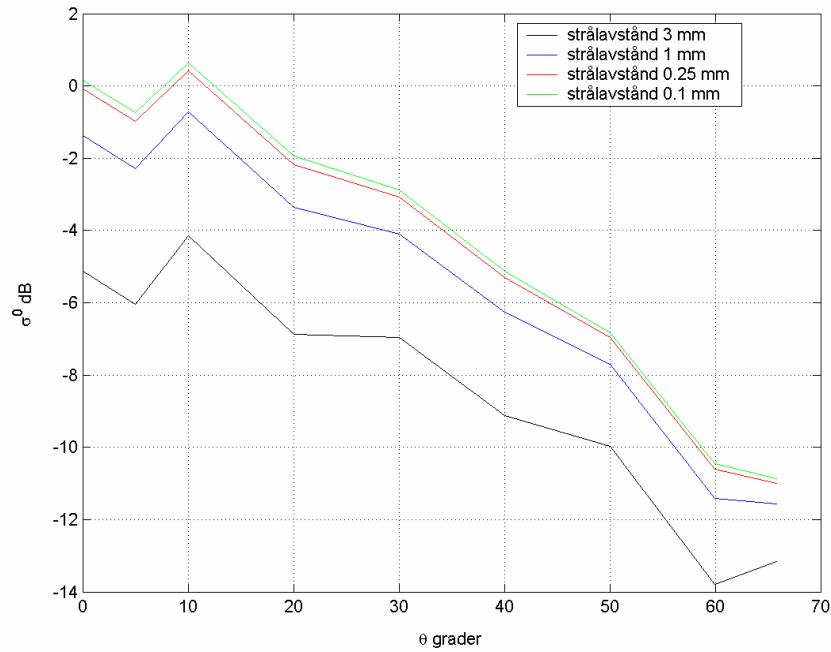
Figur 20 visar σ_{hh}^0 som funktion av frekvensen och vid de olika spridningsvinklarna. Gemensamt för alla kurvor i diagrammet är att infallsvinkeln $\theta_t = 70^\circ$ och att $\varphi_t = \varphi_r$. Man noterar från Figur 19 att ytan har ett relativt kraftigt frekvensberoende i detta intervall.



Figur 19. Illustrerar σ_{hh}^0 som funktion av frekvens vid mottagarvinklarna $\theta_r = 0, 10, 30, 50$, och 65.8° .

3.5.2 SPECRAY

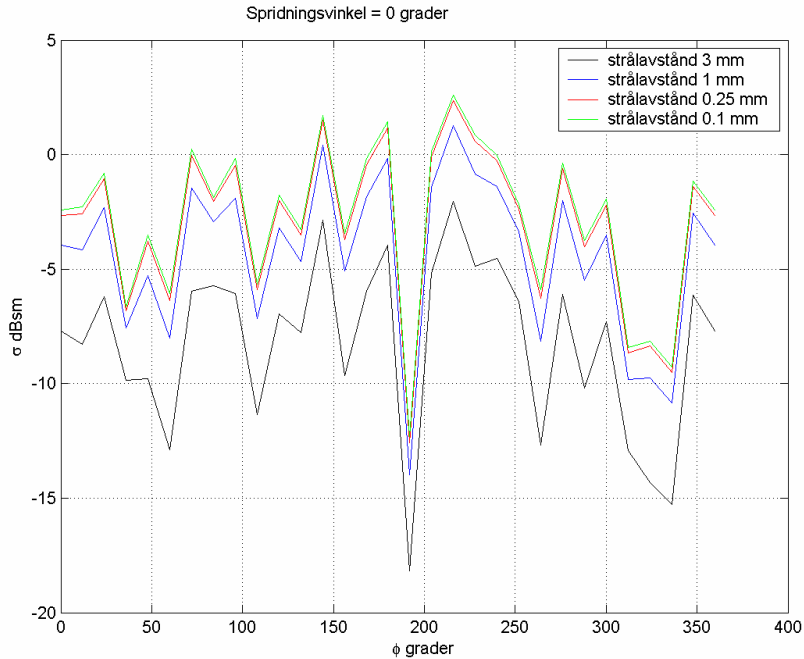
Vid fältberäkningar med SPECRAY anges ett strålavstånd med vilken ytan samplas. Det finns ingen generell regel för hur tät denna sampling måste vara utan detta är helt beroende av frekvens, infallsvinkel och framförallt scenens geometriska struktur. Generellt kan sägas att vid låga infallsvinklar, höga frekvenser samt vid ytor som uppvisar kraftiga geometriska förändringar krävs ett litet avstånd mellan strålarna. För att ställa in detta avstånd krävs ofta att en konvergensstudie görs. I Figur 20 illustreras den bistatiska markspridningsfunktionen (endast direktbidrag) σ_{hh}^0 som funktion av spridningsvinkeln. I beräkningarna har olika avstånd mellan strålarna används för att undersöka ytans konvergens. Medelvärde har bildats genom att ytan vridits 30 steg à 12 grader vilket enligt ekvation 3 ger att ca 4% av ytan inte kan anses vara oberoende. I själva verket är enligt tidigare nämnda resonemang, detta bidrag förmodligen ännu mindre.



Figur 20. Illustrerar σ_{hh}^0 vid 12.5 GHz som funktion av mottagarvinkeln då infallsvinkeln är 70° från ytans normalriktning. De olika kurvorna representerar resultaten för olika strålavstånd, där svart ~ 3 mm, blå ~ 1 mm, röd ~ 0.25 mm och grön ~ 0.1 mm.

Man noterar från Figur 20 att resultaten kvalitativt konvergerar relativt snabbt. Vid strålavstånd 1 mm (blå) avviker kurvans utseende endast marginellt från 0.25 mm (röd) och 0.1 mm (grön). Kvantitativt är skillnaden alltför stor varför man kan anse sig ha konvergens vid 0.25 mm strålavstånd eftersom skillnaden mellan grön och röd kurva är mycket liten.

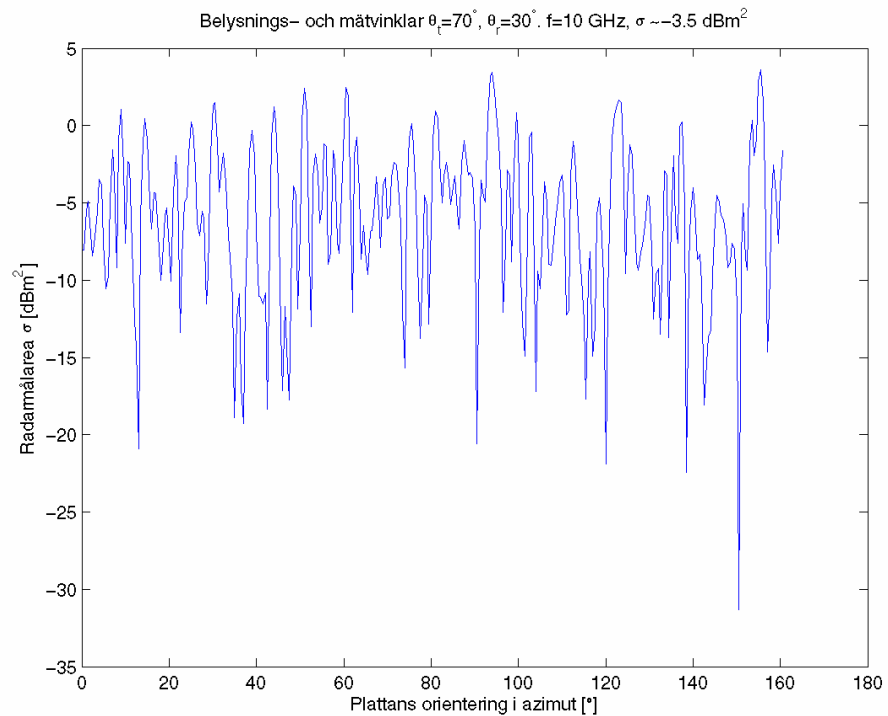
Värt att notera är att denna yta kräver extremt litet strålavstånd, samt att medelvärdesbildning ej eliminerar felet eftersom ett mindre strålavstånd verkar ge större radarmålyta för alla vridningsvinklar ϕ på plattan. Detta illustreras i Figur 21.



Figur 21. Illustrerar markytans radarmålärea vid 12.5 GHz som funktion av vridningsvinkeln ϕ då mottagarvinkeln är 0° från ytans normalriktning och infallsvinkeln är 70° . De olika kurvorna visar resultaten för olika strålavstånd.

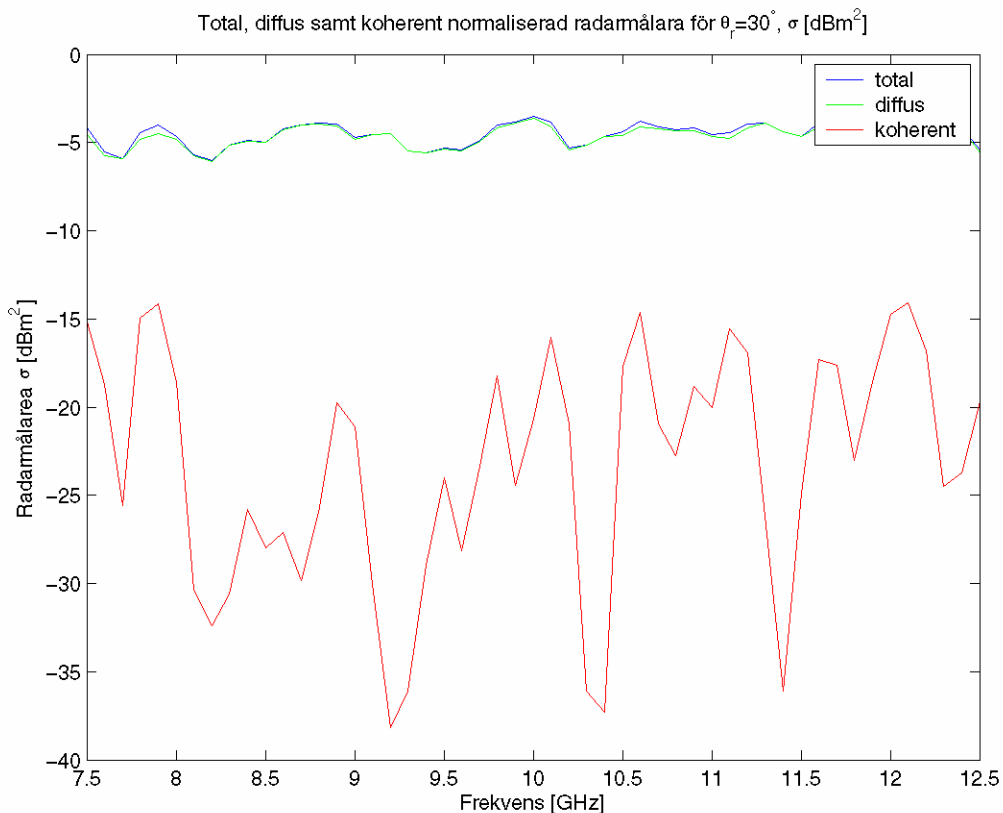
Figur 21 visar ovan nämnda effekt. Skillnaden mellan de olika kurvorna är mindre för varje sampel men eftersom kurvorna med litet strålavstånd alltid ger högre målyta kan inte felet reduceras med medelvärdesbildning.

Nedan presenteras exempel på resultat från beräkningarna med SPECRAY där strålavståndet 1 mm används. Enligt Figur 20 är detta avstånd för stort varför inte kvantitativ konvergens erhållits. Dock så anses att kvalitativ konvergens erhållits varför det är intressant att undersöka ytans målareastatistik. Utdata är omräknade till att motsvara radarmålärea i kvadratmeter för beräkningen i fråga. Som ett exempel tittar vi på radarmålarean hos plattan med 321 orienteringar i fallet $\theta_t = 70^\circ$, $\theta_r = 30^\circ$ och $f = 10$ GHz.



Figur 22. Illustrerar markytans radarmålärea som funktion asimutvinkeln φ då $\theta_t = 70^\circ$, $\theta_r = 30^\circ$ vid 10 GHz.

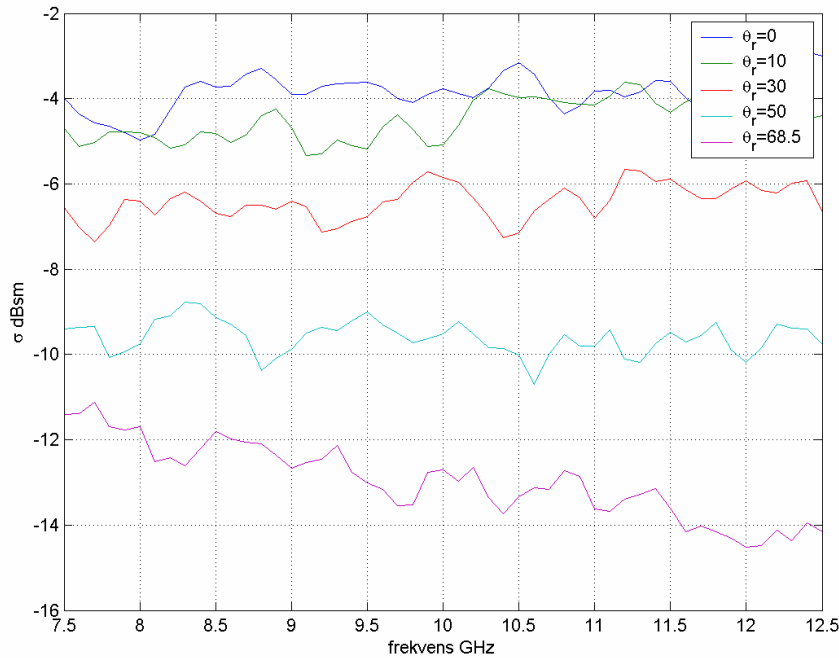
Ur dessa data kan man skatta plattans medelradarmålarea och, eftersom man även har fasinformation, skatta den koherenta respektive inkoherenta delen enligt (1) och (2). Genomgående är den koherenta delen liten jämfört med den inkoherenta. För mätvinkeln $\theta_r = 30^\circ$ blir dessa skattningar, som funktion av frekvens enligt Figur 23.



Figur 23. Visar den totala, diffusa samt koherenta skattade normaliserade radarmålarean för plattan som funktion av frekvensen. Mottagarvinkeln är 30° och sändarvinkeln är 70° . Det koherenta bidraget kan försummas vid sidan av det diffusa.

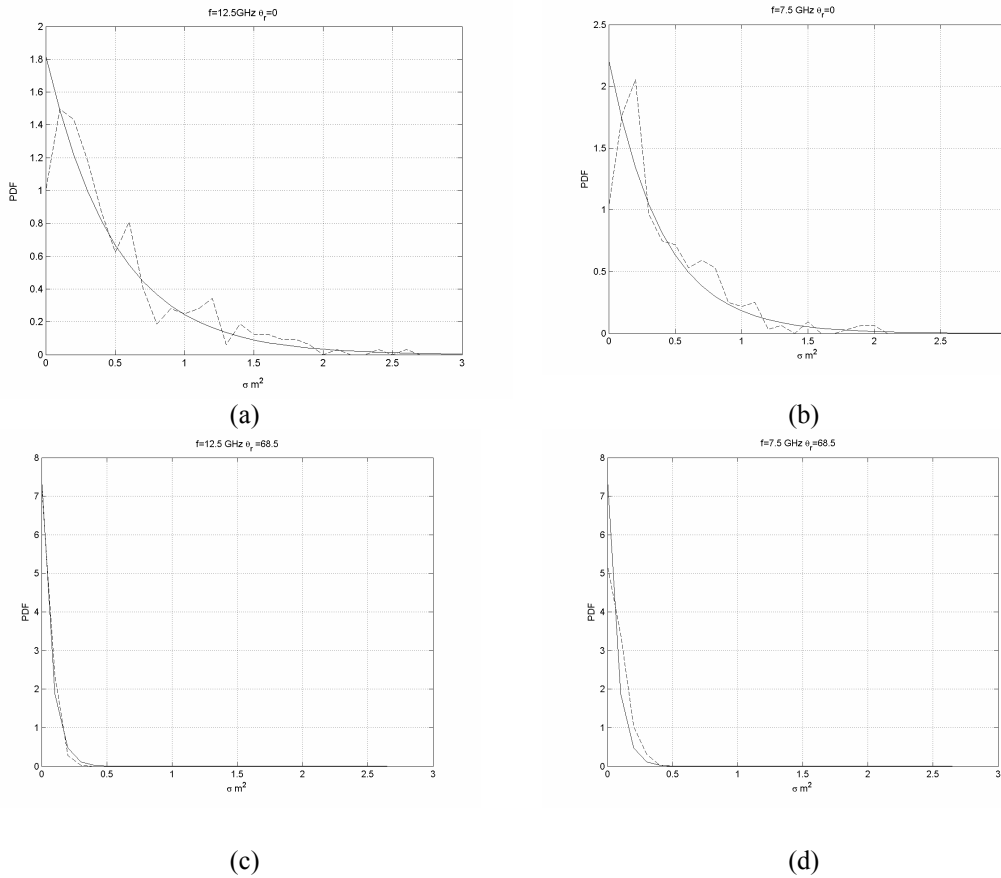
Det koherenta bidraget är försumbart vid sidan av de övriga bidragen, och samma förhållande gäller för övriga mätsituationer eftersom mottagaren är långt från den spekulära riktningen. Vi kommer nedan därför enbart att redovisa den normaliserade totala radarmålarean.

För fem av de nio mottagarvinklarna blir motsvarande normaliserade radarmålarean enligt Figur 24.



Figur 24. Visar den totala radarmålarean i dBm^2 för fem av mottagarvinklarna som funktion av frekvensen. Sändarvinkeln är i samtliga fall $\theta_t = 70^\circ$. Genomgående är att radarmålarean avtar med ökande värde på θ_r , men att frekvensberoendet är litet utom vid 65.8° .

I Figur 25 a - d illustreras markytans radarmålareastatistik som en PDF (probability density function) vid vinklarna $\theta_r = 0^\circ$ och 65.8° och vid frekvenserna 7.5 och 12.5 GHz. Resultaten jämförs med en Rayleighfördelning som motsvarar en sannolikhetsstäthetsfunktion för M stycken oberoende spridare [9] där ingen hänsyn till skuggning mellan spridarna tas. Om vi antar att en del av ytan är oberoende av en annan del om den ligger utanför korrelationslängden, fås att antalet spridare, M , grovt uppskattat blir $M \approx (D/L)^2 \approx (0.9/0.019)^2 \approx 2200$ st., vilket utgör en stor population.



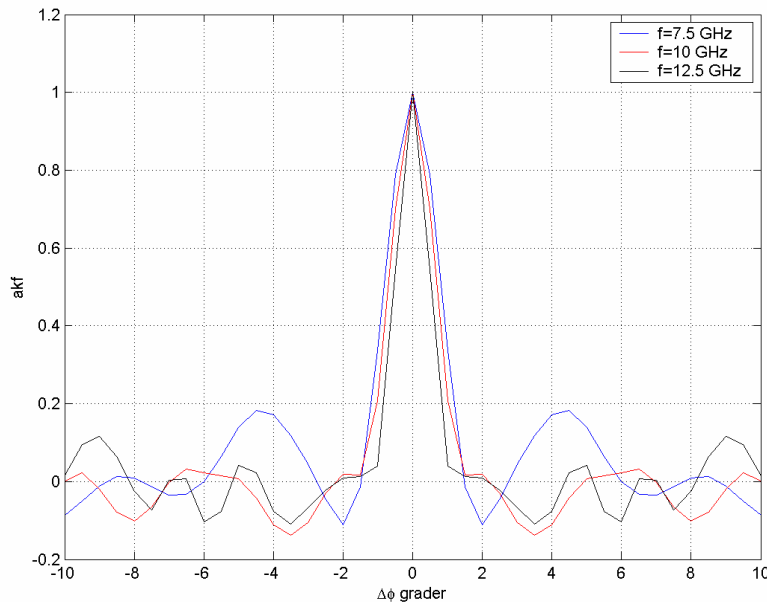
Figur 25 a–d. Illustrerar sannolikhetstäthetsfunktionen (PDF) för beräknade data (streckad linje) och teoretiskt data enligt Rayleighfördelning (heldragen linje). (a) visar data för frekvensen 12.5 GHz och spridningsvinkeln $\theta_r = 0^\circ$. (b) visar för 7.5 GHz och $\theta_r = 0^\circ$ (c) för 12.5 GHz och $\theta_r = 68.8^\circ$, (d) 7.5 GHz och $\theta_r = 65.8^\circ$. Infallsvinkeln är $\theta_i = 70^\circ$.

Ovanstående figurer visar på relativt god överensstämmelse med SPECRAY EM-genererade data och den statistiska Rayleighmodellen som är baserad på en punktspridarmodell där alla spridare är inbördes lika [9]. Man noterar också att spridningen uppvisar ännu större likheter med Weibullfördelningen [9] som används som statistisk klottermodell vid bl.a. låga depressionsvinklar.

Vidare noteras att spridningsvinkeln θ_r inte verkar påverka de kvalitativa skillnaderna mellan kurvorna. Detta antyder att vår yta möjligtvis kan anses bestå av en stor andel oberoende punktspridare vid dessa frekvenser. Överensstämmelsen mellan Rayleigh/Weibull-modeller och SPECRAY EM förväntas bli sämre vid lägre frekvens eftersom bl.a. antalet oberoende spridare kan anses minska. I ovanstående beräkningar har 322 st vinkelvridningar av markytan använts för att skapa statistik. För att öka antalet sampel skulle även närliggande frekvenser kunna betraktas som oberoende sampel eftersom ytans radarmålarea är relativt svagt beroende av frekvensen. Från Figur 24 syns att radarmålarea är relativt konstant över frekvensområdet. Men eftersom frekvensberoendet enligt IEM (se Figur 19) är relativt markant görs ingen medelvärdesbildning enligt detta sätt.

Man bör beakta att markytans medelmålearea är en betydande parameter varför det är av intresse att noggrant kunna beräkna denna. Man bör också vara medveten om att fysikalisk optik är en approximation som bör användas med försiktighet vid låga frekvenser i förhållande till ytans undulationer, vilket gör att sämre överensstämmelse mellan det verkliga fallet och simulerade data (fysikalisk optik) kommer att fås för situationer motsvarande Figur 25 (b) och (d).

Man noterar vidare från Figur 22 att radarmålytan inte ändras helt slumpmässigt mellan vridningsvinklarna. Genom att beräkna radarmålytans korrelationsfunktion skattas beroendegraden. Figur 26 illustrerar en autokorrelationsfunktion, $akf = \langle (\sigma(\varphi + n) - \bar{\sigma})(\sigma(\varphi) - \bar{\sigma}) \rangle$, där σ är ytans radarmålearea, $\bar{\sigma}$ är ytans medelmålearea och φ är plattans vridningsvinkel i asimutled för frekvenserna 7.5, 10 och 12.5 GHz.



Figur 26. Illustrerar radarmålytans autokorrelationsfunktion som funktion av vridningsvinkeln φ då $\theta_t = 70^\circ$, $\theta_r = 30^\circ$ och för frekvenserna 7.5 GHz (blå kurva) 10 GHz (röd kurva) och 12.5 GHz (svart kurva).

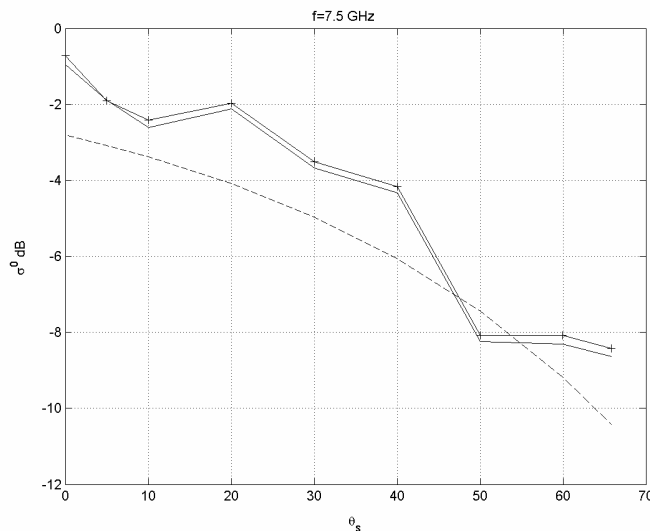
Figur 26 visar att radarmålytans korrelationslängd ($akf \approx 0.36$) är ca 1° . Detta gäller i princip för samtliga frekvenser men det är tydligt att ju lägre frekvens desto mer korrelerad är radarmålytan. Detta är naturligt eftersom vid längre våglängd spelar ytans undulationer en mindre roll vilket ger en mer isotrop och därmed korrelerad spridning. Värt att notera är också att denna korrelationsvinkel endast motsvarar en translation av de yttre ytelementen på $2/5$ av ytkorrelationslängden L . Det är ändå viktigt att påpeka att inte endast en translation av ytelementen fås utan även en vridning vilket kan spela in i radarmålytans snabba fluktuationer. En ytterligare förklaring till den snabba dekorrelationen fås genom att jämföra radarmålytan med en cirkulär antennapertur där halvvärdeslobbredden ges av $\theta_{hp} \approx 1.02 * \lambda / d$, där d är aperturens diameter. För en flat antenn med

$d=0.9$ m fås lobbredden 0.95° vid 10 GHz. En liten utvidning av antennen har således en stor påverkan på antenndiagrammet. En liknelse kan göras med akf:en där toppvärdet kan ses som en summation över ytan där alla element ligger i fas. Utanför toppen ligger elementen ur fas, vilket i analogi med flatantennfallet ger en smal lob. Således är ytans utsträckning av avgörande betydelse för akf:ens utseende.

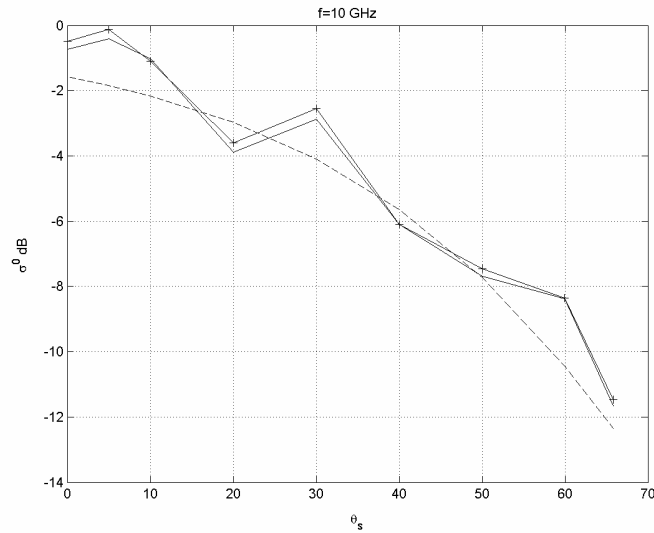
3.6 Jämförelse mellan IEM och SPECRAY EM

Bättre överensstämmelse mellan IEM och fysikalisk optik förväntas då frekvensen är hög. Som tidigare nämnts presenteras endast enkelspridningsbidraget från IEM varför det är av intresse att undersöka även högre ordningens termer. I SPECRAY EM beräknas såväl ytans direkt- som dubbelbidrag. Även högre ordningens spridningstermer är av intresse men p.g.a. långa beräkningstider har dessa inte varit möjliga att producera till denna rapport.

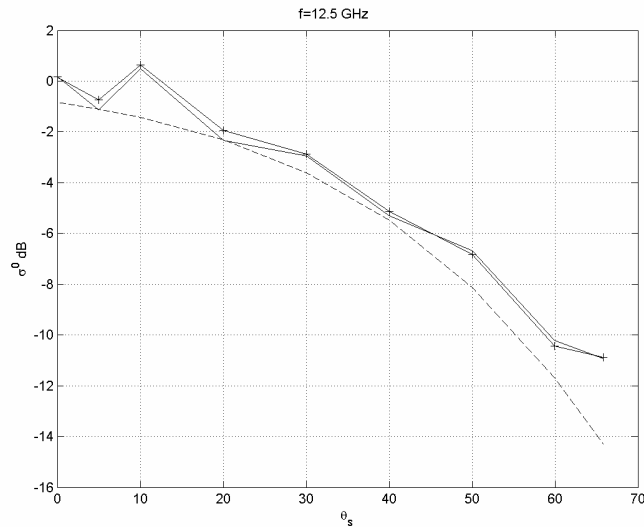
Jämförelser mellan IEM och fysikalisk optik visas i Figur 27 - Figur 29.



Figur 27. Visar jämförelse mellan σ^0 , beräknad med IEM (streckad kurva), SPECRAY EM dubbelstuds (+ kurva) och SPECRAY EM direktbidrag (heldragen kurva), som funktion av spridningsvinkeln θ_s vid frekvensen 7.5 GHz. Sändarvinkeln $\theta_t = 70^\circ$.



Figur 28. Visar jämförelse mellan σ^0 , beräknad med IEM (streckad kurva), SPECRAY EM dubbelstuds (+ kurva) och SPECRAY EM direktbidrag (heldragen kurva), som funktion av spridningsvinkeln θ_r vid frekvensen 10 GHz. Sändarvinkeln $\theta_t = 70^\circ$.



Figur 29. Visar jämförelse mellan σ^0 , beräknad med IEM (streckad kurva), SPECRAY EM dubbelstuds (+ kurva) och SPECRAY EM direktbidrag (heldragen kurva), som funktion av spridningsvinkeln θ_r vid frekvensen 12.5 GHz. Sändarvinkeln $\theta_t = 70^\circ$.

Jämförelse av resultaten från Figur 28-Figur 29 visar att skillnaderna är små mellan IEM och fysikalisk optik vid 10 och 12.5 GHz. För 7.5 GHz fås en skillnad på ca 2 dB för en stor del av vinkelintervallet. Skillnaden minskar dock då skillnaden mellan sändar- och mottagarriktning minskar. Skillnaderna mellan IEM och fysikalisk optik minskar också med ökande frekvens eftersom fysikalisk optik fungerar allt bättre vid höga frekvenser. Generellt sett överskattar fysikalisk optik σ^0 vid dessa frekvenser. Vidare noteras att skillnaderna mellan direktbidrag (heldragen kurva) och dubbelbidrag plus direktbidrag

(+ kurva) är små. Detta bidrag förväntas öka med ökande ytskrovlighet, men man bör beakta att även spridningsbidrag av högre ordning än två kan komma att bidra. Man bör också påpeka att kurvorna beräknade med SPECRAY EM har sitt ”kantiga” utseende p.g.a. att endast 31 sampel används vid medelvärdebildningen. Fler sampel skulle jämna ut kurvorna.

4 Diskussion och slutsatser

Den använda mätmetoden ser ut att, för det använda mätområdet d.v.s. bistatiska vinklar mindre än 90° , kunna infria förväntningarna om att med bistatisk ISAR-teknik separera signalen från provytan från övriga signaler, som dessutom kunnat hållas nere på en måttlig nivå. För större bistatiska vinklar, som är av intresse för beräkning av växelverkanstermer, kan man förvänta ökade svårigheter i form av försämrad upplösning, ökande fokuseringssvårigheter då vinkeln mellan projektiions- och Δk -planen normaler ökar och risken för direkt överhörning mellan sändar- och mottagarsida ökar. Vi står emellertid beredda att försöka möta även dessa problem genom att förflytta mottagarantennen och på så sätt bilda en fiktiv/virtuell gruppantenn. De kompressions-effekter som uppträtt under dessa mätningar har gett upphov till problem därför att de uppmärksammats först vid dataanalysen och ska inte utgöra något hinder för att vid framtida mätningar få goda kvantitativa resultat.

Utvärdering av resultaten för Gaussytor har två sidor. Dels frågan om huruvida och under vilka förhållanden beräkningsmodellerna ger korrekta uppskattningar av ytornas bistatiska målarea, dels frågan om hur dessa modellytor kan tillämpas på naturlig terräng. Ingen av dessa frågor kan förväntas få ett slutgiltigt svar i en enstaka studie, redan frågan om att ta fram klottermodeller för det monostatiska fallet har krävt stora NATO-studier under många år.

Vad gäller den första frågan har vi redan konstaterat att de två beräkningsmodellerna sinsemellan visar en relativt god överensstämmelse för höga frekvenser. För 7.5 GHz är den kvantitativa överensstämmelsen dock sämre. Fysikalisk optik tycks överskatta målarean vid denna frekvens. IEM uppvisar ett starkare frekvensberoende. Man kan också konstatera att Figur 7-Figur 9 uppvisar en kvalitativ överensstämmelse med Figur 18, målarean ökar med ökande riktningskillnad mellan infallande och utgående stråle.

Vad gäller den andra frågan har vi redan inledningsvis deklarerat att studiens beräkningsdel i detta skede inriktar sig på geometriska effekter, eftersom endast en PEC-yta behandlats. Från denna rapport kan således inga slutsatser dras beträffande dielektriska material. Dock fås PEC-liknande egenskaper hos dielektrika med hög vattenhalt eller vid strykande infall. Det är dock känt att modellerna har begränsningar för strykande infallsvinklar. Vidare måste modellen sägas vara idealiserad, men det behöver inte vara någon stor begränsning eftersom även starkt idealiserade fysikaliska modeller kan äga vid tillämplighet. Att utan vidare utsträcka modellen till vegeterad terräng torde dock vara vanskligt. Den öppna litteraturen om bistatiska markmodeller är ganska begränsad och är starkt inriktad mot gaussytor och liknande idealiserade modeller. Vegetation berörs i mycket ringa utsträckning. Ett bättre underlag i form av mätresultat och modeller för vegeterad terräng krävs därför för att effekterna av spridning via omgivande terräng ska kunna uppskattas.

Föreliggande resultat för gräs, visar att även här ökar målarean då riktningskillnaden mellan infallande och en i infallsplanet utgående stråle ökar. I fallet gräs (figur 14) verkar ökningen dock snart avstanna på en konstant nivå som dessutom är betydligt lägre än för den metalliska gaussytan. Att nivån är lägre är ingalunda oväntat och beror sannolikt

både på absorption i gräsyta och på skillnader i spridningsbild. Mer mätningar behövs för att kartlägga skillnaderna i spridningsbild, och avgöra om en gaussyta med andra geometriska och dielektriska parametrar kan användas för modellering av gräs. Skillnaderna kan ligga i att den jämnare gräsyta har en mer spekulär karaktär så att en större del av den spridda intensiteten hamnar i den spekulära framåtspridningsriktningen och/eller på att grässtråna ger en mer diffus och isotrop, Lambertliknande spridningsbild.

Sammanfattningsvis visar rapporten på FOI:s förmåga att för ett givet objekt kunna utföra mätningar på och beräkningar av bistatiska spridningsfenomen hos detta. En sådan jämförande förmåga är naturligtvis av avgörande betydelse för realistiska och förutsägbara specifikationer vad gäller till exempel design och/eller signaturanpassning av mål i komplicerad bakgrundsmiljö. Rapporten pekar vidare på brister och svagheter i de hittills gjorda mätningarna och beräkningarna, men visar också på en medvetenhet om dessa. Ytterligare arbete kan förväntas ge resultat som utöver den kvalitativa aspekten medger en mer kvantitativ dataanalys.

5 Referenslista

- [1] E. Zdansky, et al, "Mätmetoder för bistatisk markmålararea en förstudie," FOI-R--0575--SE, 2002.
- [2] J. Rasmusson, N. Gustafsson, J. Rahm, "Outdoor broadband RCS measurements of model-scale aircraft," presented at AMTA, Cleveland US, 2002.
- [3] H.-O. Berlin, J. Rahm, C. Larsson, "Utveckling och implementering av Columbus, ett verktyg för ISAR-analys. Delrapportering inom VU-SAT," FOA-R-00-01491-615--SE, 2000.
- [4] A. K. Fung, *Microwave Scattering and Emission Models and Their Applications*. Boston: Artech House, 1994.
- [5] G. Kristensson, *Spridningsteori med antenntillämpningar*. Lund: Studentlitteratur, 1999.
- [6] F. Koudogobo, P. F. Combes, and H.-J. Mametsa, "Numerical and Experimental Validations of IEM for Bistatic Scattering from Natural and Manmade rough Surfaces," *Progress In Electromagnetics Research*, vol. 46, pp. 203-244, 2004.
- [7] M. Karlsson, M. Gustafsson, M. Molin, och F. Näsström, "Utvärdering av SPECRA EM," FOI-R--1354--SE, 2004.
- [8] T.-K. Chan, Y. Kuga, A. Ishimaru, and C. Le, "Experimental Studies of Bistatic Scattering from Two-Dimensional Conducting Random Rough Surfaces," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 34, pp. 674-680, 1996.
- [9] N. Levanon, *Radar principles*, John Wiley & Sons, 1988.