



Studie av statistiskt växelvekansbidrag för beräkning av radarmålarea

MAGNUS GUSTAFSSON OCH JONAS RAHM

FOI är en huvudsakligen uppdragsfinansierad myndighet under Försvarsdepartementet. Kärnverksamheten är forskning, metod- och teknikutveckling till nytta för försvar och säkerhet. Organisationen har cirka 1000 anställda varav ungefär 800 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, bedömning av olika typer av hot, system för ledning och hantering av kriser, skydd mot och hantering av farliga ämnen, IT-säkerhet och nya sensorers möjligheter.



FOI
Totalförsvarets forskningsinstitut
164 90 Stockholm

Tel: 08-55 50 30 00
Fax: 08-55 50 31 00

www.foi.se

FOI-R--3491--SE
ISSN 1650-1942

September 2012

Magnus Gustafsson och Jonas Rahm

Studie av statistiskt växelverkansbidrag för beräkning av radarmålärea

Titel	Studie av statistiskt växelverkansbidrag för beräkning av radarmålarea
Title	Study of statistical interaction contribution for computation of radar-cross-section
Rapportnr/Report no	FOI-R--3491--SE
Månad/Month	September
Utgivningsår/Year	2012
Antal sidor/Pages	20 p
ISSN	1650-1942
Kund/Customer	FM
FoT område	Sensorer och signaturanpassning
Projektnr/Project no	E54017
Godkänd av/Approved by	Martin Rantzer
Ansvarig avdelning	Sensor- & TK-system

Detta verk är skyddat enligt lagen (1960:729) om upphovsrätt till litterära och konstnärliga verk. All form av kopiering, översättning eller bearbetning utan medgivande är förbjuden.

This work is protected under the Act on Copyright in Literary and Artistic Works (SFS 1960:729). Any form of reproduction, translation or modification without permission is prohibited.

Sammanfattning

Denna rapport presenterar en ny metod för radarmätning av det diffusa växelverkanbidraget mellan en skrovlig markyta och ett objekt. Metoden baseras på Invers-syntetisk-aperturradar (ISAR)-teknik vilken möjliggör separation av olika typer av målarebidrag. Mätningar har utförts på en plan metallisk platta som placerats med olika elevationsvinklar mot en skrovlig yta. Mätresultaten har jämförts med resultaten från en statistisk beräkningsmodell som bygger på geometrisk optik i kombination med Improved Integral Equation Method (IEM). Jämförelse mellan beräknade och uppmätta resultat visar på en relativt god överensstämmelse för både VV- och HV-polarisation vid 10 GHz. Slutsatsen är att beräkningsmetoden är mycket snabb och skulle kunna användas då man vill utföra beräkningar på stora objekt i stora scener.

Dessutom har beräkningar på samma scen utförts med en kommersiell beräkningskod (SPECRAY EM). SPECRAY EM är baserad på geometrisk optik i kombination med fysikalisk optik. Förutsättningen för att kunna utföra beräkningar med programmet är att man har en facetterad CAD-modell av hela beräkningsscenen. Det visar sig att programmet lämpar sig mindre bra för att beräkna radarreturen från denna uppställning. Slutsatsen är att det med en beräkningskod, som baseras på geometrisk optik i kombination med fysikalisk optik, är svårt att ta hänsyn till det diffusa mål-markväxelverkanbidraget. Beräkningarna blir orimligt stora i termer av CPU-tid och minneskrav.

Nyckelord: radar, växelverkan, diffus spridning, ISAR, radarmätningar, IEM

Summary

This report presents a new radar measuring method to be used to measure the diffuse interaction contribution between a rough surface and an object. The method is based on Inverse Synthetic Aperture Radar (ISAR) technique which enables separations between different contributions of the radar cross section. Measurements have been performed on a plane plate, which has been mounted at different elevation angels, over a rough surface. The measurement results have been compared with results from a statistical computational model which is based on a combination of geometrical optics and Improved Integral Equation Method (IEM). The comparison between the calculated och measured results shows a relatively good agreement at 10 GHz for both the VV- and HV-polarisation combination. The conclusion is that the computational model is very fast and can be used when calculate the radar cross section for large objects in large background scenes.

Furthermore, calculations have been performed with a commercial code (SPECRAY EM) which is base on geometrical- and physical optics. In contrast to the statistical method this code requires a faceted CAD-model of the scene. I turns out that this method is less suitable for this kind of scattering problems due to unreasonable large memory requirements and long CPU-times.

Key words: radar, interaction, diffuse scattering, ISAR, mearuments

Innehållsförteckning

1. INLEDNING	7
2. MÄTNINGAR	7
2.1. MÄTUPPSTÄLLNING.....	7
2.1.1. Mätutrustning	9
2.1.2. Mätparametrar	9
2.1.3. Kalibreringsmetodik.....	10
2.2. MÄTDATAANALYS	10
3. BERÄKNINGAR	14
3.1. IMPROVED INTEGRAL EQUATION METHOD (IEM)	14
3.1.1. Kalibrering av IEM-beräkningar	15
3.2. BERÄKNINGAR SPECRAY EM.....	15
4. JÄMFÖRELSER MELLAN BERÄKNINGS- OCH MÄTDATA	16
4.1. JÄMFÖRELSE MELLAN EXPERIMENTELLA RESULTAT OCH STATISTISK METOD	16
4.2. RESULTAT SPECRAY EM.....	17
5. SAMMANFATTNING OCH SLUTSATSER	19
6. REFERENSER	20

1. Inledning

För att på ett korrekt sätt kunna beräkna radarreturen från en farkost, exempelvis en stridsvagn i terräng, krävs att hänsyn tas till radarvågens växelverkan mellan omgivningen och objektet. Tidigare har objekten beräknats i frirymd och därefter har terrängens radarbidrag adderats till den totala radarreturen. Denna idealisering kan i viss mån fungera så länge som växelverkan med terrängen är liten i förhållande till objektets frirymdsbidrag. För moderna signaturanpassade plattformar kan frirymdsmålarean vara liten i förhållande till växelverkansbidraget. Detta i kombination med att hotsystemen tenderar att bli alltmer högupplösande, eller till och med bildalstrande (SAR), gör att växelverkan måste beaktas, inte bara vid design av farkoster, utan även vid design av hotsystem då moderna måligenkänningsalgoritmer ofta ”tränas” på beräknade data.

För att beräkna växelverkan kan i princip en facetterad CAD-modell av markytan och farkosten göras och därefter beräknas den totala radarreturen där växelverkanbidraget är en del av returen. Spridningen beräknas från varje facett och interaktionen mellan alla andra facetter vilket gör att problemen tenderar till att bli orimligt stora i termer av minneskrav och CPU-tider. Dessutom är man ofta intresserad av inte bara ett markavsnitt utan ett medelvärde av ett antal markavsnitt, vilket gör att beräkningsbördan ökar ytterligare. Lösningen är att betrakta markytan som en stokastisk storhet och därefter beräkna medelvärdet av växelverkan. För att kunna göra detta krävs att markens statistiska bistatiska spridningsegenskaper noggrant kan beräknas. En metod som visats sig lämplig för detta, är den så kallade integralekvations metoden (IEM) för skrovliga ytor. Vi har tidigare visat, i [1] att IEM-beräknade resultat ger god överensstämmelse med uppmätta bistatiska radarreturer från en skrovlig referensyta.

För att undersöka växelverkan presenterar vi en ny mätteknik där mätningar utförts på en rektangulär platta positionerad på ett stativ som kan vridas så att plattans normalvinkel ändras i förhållande till marken. Genom att nyttja s.k. ISAR-teknik [2] kan växelverkansbidraget separeras från plattans och markens direktbidrag. Vidare presenterar vi i denna rapport en statistisk metod för beräkning av första ordningens växelverkansbidrag, m.h.a. geometrisk optik i kombination med ”Improved IEM” (IEM) [3]. Resultaten jämförs vid 10 GHz för en slumpmässig yta med isotrop Gaussisk höjdfördelning och korrelationsfunktion.

2. Mätningar

Mätningarna utfördes under hösten 2010 vid FOI:s utomhusmätplats Lilla Gåra.

Eftersom beräkningsprogram ofta använder en fasetterad beskrivning av ett objekt och den totala spridningen från objektet fås genom en summation av bidragen från dessa fasetter, valde vi i detta arbete, för att på ett enkelt sätt kunna utvärdera växelverkansbidragen, en platta som ett lämpligt mål ovanför markytan, se figur 1 och 2.

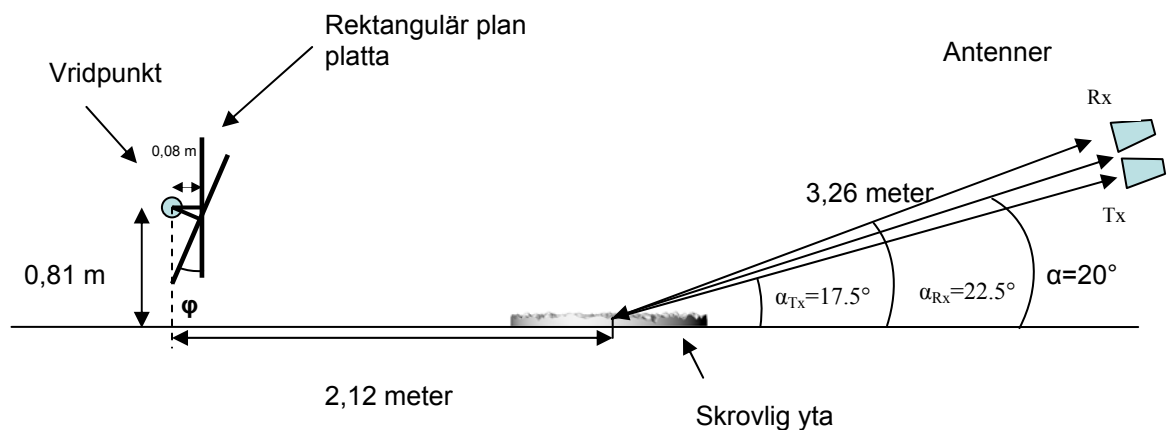
2.1. Mätuppställning

Mätobjekten utgjordes i detta fall dels av en cirkulär skrovlig referensyta, se figur 1, och dels av en rektangulär platta. Plattan placerades bakom och över den skrovliga ytan, se figur 2, och är tänkt att representera en del av en fordonskaross eller ett fartygsskrov, emedan den skrovliga ytan är tänkt att representera en liten del av ett mark- eller havsyteavsnitt. Den metalliska plattan, med dimensionerna 759 * 500 mm, är fäst i ett stativ vars fästpunkt, i centrum på plattan, kan roteras runt en horisontell axel. Därmed kan plattans ytnormalriktning vridas i olika riktningar relativt den skrovliga ytan. Den cirkulära skrovliga ytan är tillverkad i aluminium och har en diameter på 0.9 meter. Ytans skrovlighet beskrivs av en isotropisk Gaussisk höjd- och korrelationsfunktion, där ytans korrelationslängd och höjdvarians är $L = 0.0191$ m respektive $\sigma_h = 0.0072$ m. Detta ger $kL = 4$ och $k\sigma_h = 1.5$, där vågtalet är $k = 210$, vid 10 GHz. Den skrovliga ytan ligger centrerad på ett vridbord som roterar (medurs) under mätningen, vilket möjliggör generering av ISAR-bilder. Rotationen gör dessutom att man får oberoende statistiska sampel av ytan vilket i sin tur möjliggör

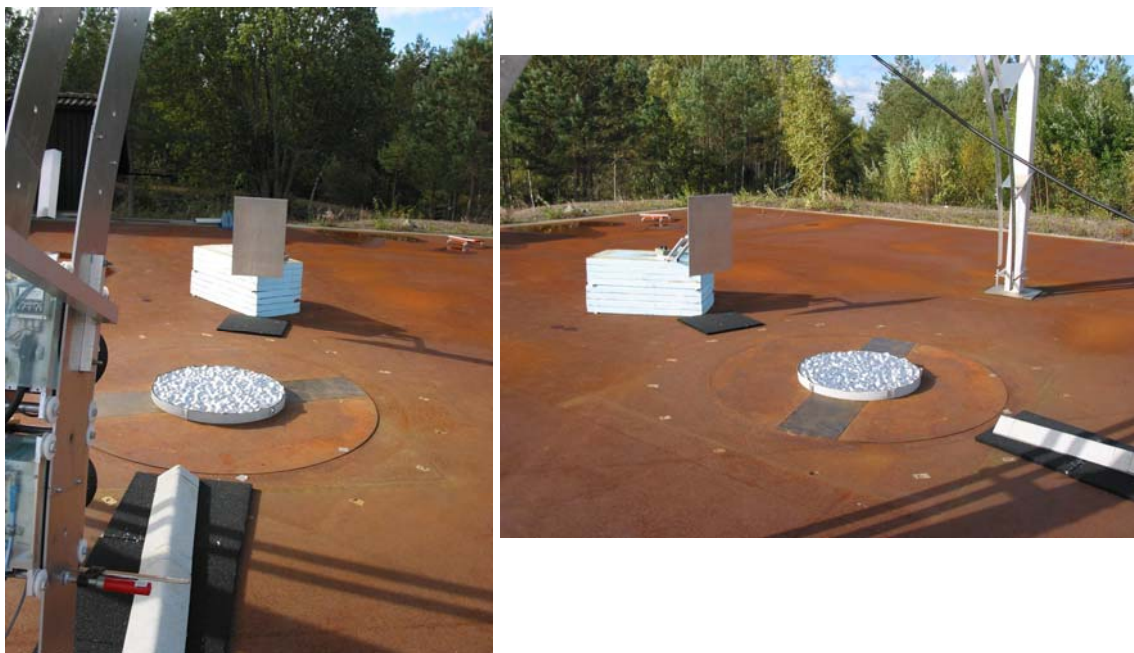
bestämning av ett medelvärdesmått på ytans spridningsförmåga. Sändar- och mottagarantennerna är riktade mot vridbordets och den skrovliga ytans, centrumpunkt. Depressionsvinkeln för sändar- och mottagarantennerna är 17.5° respektive 22.5° . Figur 2 visar en schematisk skiss av mätupställningen och fotografierna i figur 3 visar mätupställningen från två olika aspektvinklar.



Figur 1. En bild av den skrovliga referensytan som används som objekt vid radarmätningarna. Diametern på ytan är 0.9 meter.



Figur 2. En schematisk skiss av mätupställningen sedd från sidan. Den skrovliga ytan är placerad på ett vridbord vilket möjliggör generering av ISAR-bilder.



Figur 3. Fotografier på mätuppställningen från två olika aspekter . Den rektangulära plattan är placerad på en stack av frigolitblock. Runt den skrovliga ytan har ett lager radarabsorberande material applicerats. I vänstra fotot skymtas antennerna.

2.1.1. Mätutrustning

Vid mätningarna användes följande utrustning:

- Rygghornsantennerna, Watkins-Johnson P/N 754730-002 A WJ-48461 H, S/N 1048 och 1047, med ett antenn-gain på 5 - 18 dB inom frekvensintervallet 2 - 18 GHz.
- Ett vridbord med diametern 2.20 m.
- Optiska länkar Miteq MDDT 100M 11G-28-20-M14 och Miteq MDDR 100M 18G-10-20-0 inrymda i temperaturlådor för att hålla konstant temperatur på länkar, förstärkarsteg och blandare.
- Förstärkare: sändardel Miteq 6-18 GHz, 30 dB, mottagardel Miteq 0.1-18 GHz, 26 dB.

2.1.2. Mätparametrar

Vid mätningarna användes följande mätparametrar:

Frekvenser: 8 - 12 GHz i steg om 4 MHz, dvs #f = 1001

Polarisation: HV (Horisontell-Vertikal) och VV, där första bokstaven representerar sändarens och den andra mottagarens polarisationsriktning.

Antennposition: Antennerna placerades enligt figur 2, dvs $\alpha_{Tx} = 17.5^\circ$, $\alpha_{Rx} = 22.5^\circ \rightarrow \alpha = 20^\circ$. Mätavståndet från antennernas apertur till vridbordcentrum är 3.26 meter.

Vridbordsrotation:

Den skrovliga ytan roteras medurs $0^\circ - 360^\circ$ i steg om 0.05° , d.v.s. totalt 7201 vinklar.

Vridning av plan platta:

Vinkeln φ (enligt figur 2) har vridits från $0^\circ - 30^\circ$, i steg om 5° , d.v.s. totalt 7 vinklar.

2.1.3. Kalibreringsmetodik

Kalibrering av systemet utfördes genom att rikta antennerna mot varandra, se figur 4, och utföra mätningar. Denna kalibreringsmetod redovisas i detalj i, [4], [5].

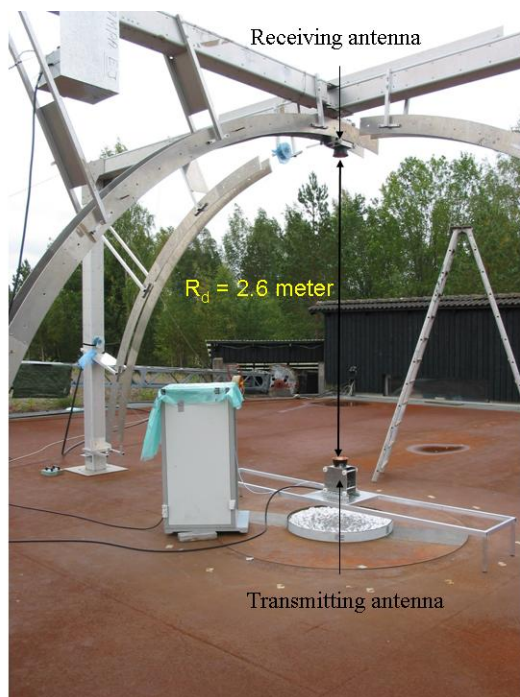
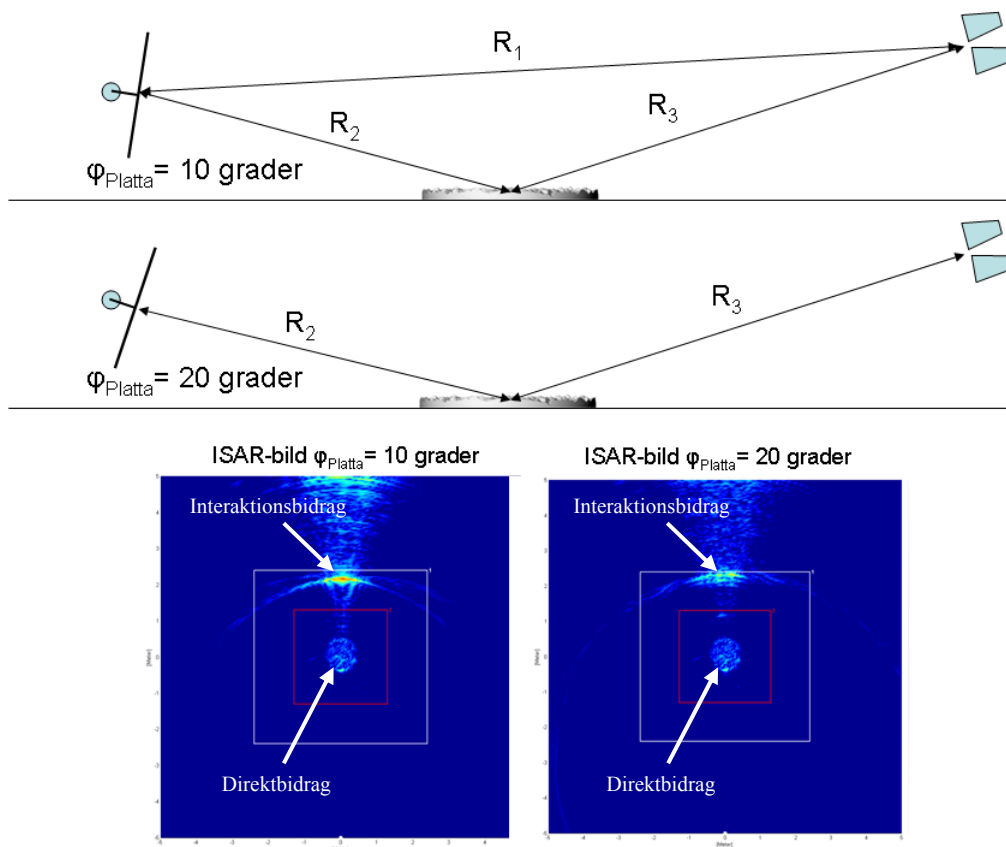


Figure 4. Fotografi av kalibreringsgeometrin. Sändarantennen är placerad på ett stöd ovanför den skrovliga ytan medan mottagarantennen är placerad i nadir på mätbågen och riktad mot sändarantennen. Avståndet mellan antennfrontsytorna är 2.6 meter.

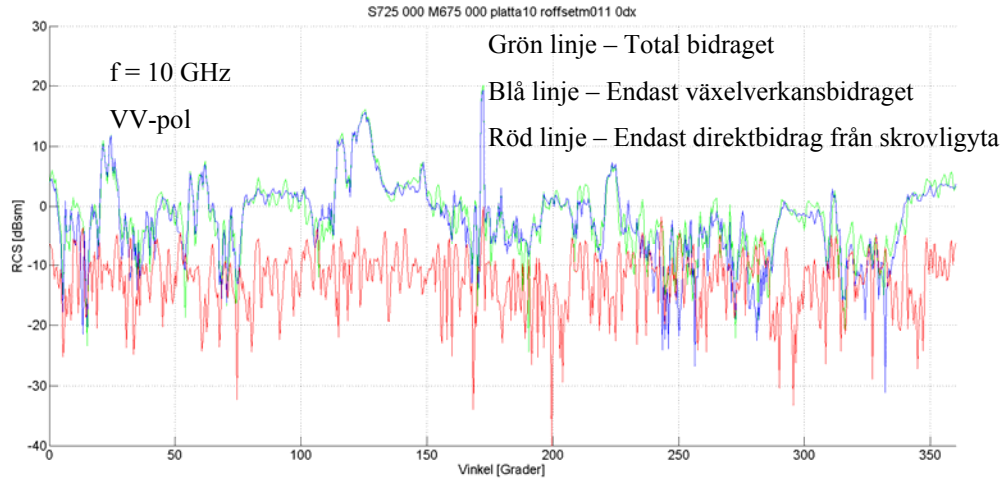
2.2. Mätdataanalys

För varje ny vinkel φ av den rektangulära plattan (se figur 2) görs ett antal ISAR-avbildningar. Genom detta förfarande har vi möjligheten att studera växelverkansbidraget som funktion av den skrovliga ytans rotationsorientering och därmed också möjlighet att få ett medelvärde på styrkan av på interaktionsbidraget. Vi har också möjlighet att separera växelverkansbidraget från den del av returen som kommer direkt ifrån den skrovliga plattan, se figur 5.



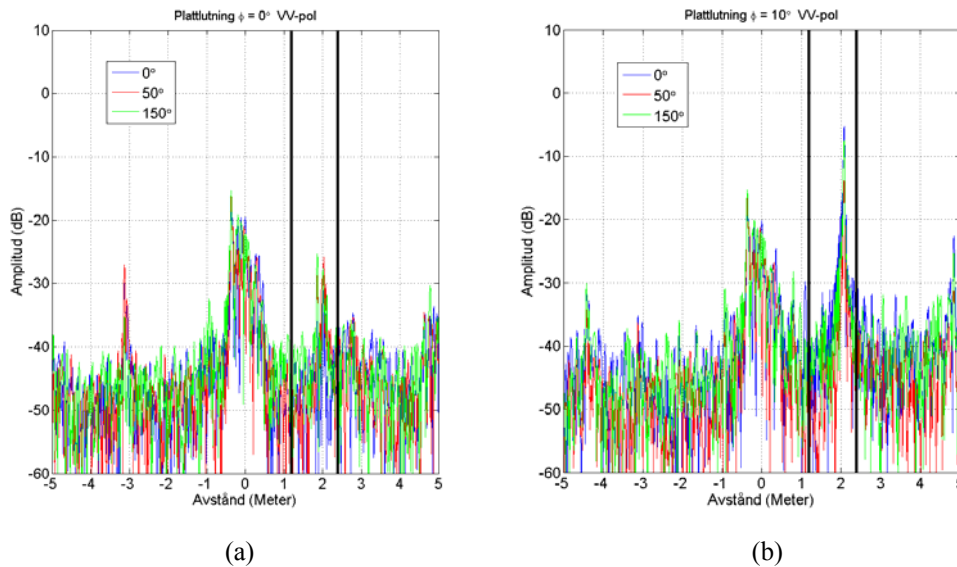
Figur 5. Övre bilden visar mätupställningen då den plana plattans lutning φ är 10° respektive 20° . Vid dessa vinklar uppstår en spekulär situation, se svarta pilar. Nedre bilderna visar ISAR-bilder från dessa mätgeometrier. I centrum på bilden ser man radarreturen som härrör från direktreturen från den skrovliga plattan medan interaktionsbidraget (mellan plana och skrovliga plattan) är väl separerat från direktbidraget.

Man ser i ISAR-bilderna i figur 5 att växelverkansbidraget är väl separerat ifrån det bidrag som kommer direkt från den skrovliga ytan. Med hjälp av ISAR-verktyget Columbus [2] kan man separera de olika bidragen samt konvertera bildinformationen tillbaka till radarmålareadata. I Columbus finns dock begränsningen att endast rektangulära/kvadratiska grindar kan användas vilket ger olika mycket bakgrundsbidrag för olika vridbordsvinklar. Alla data utanför den vita grinden (kvadraten) och innanför den röda grinden i ISAR-bilden i figur 5 har nollställs. Gränslinjerna för den vita och röda grinden är ± 2.4 meter respektive ± 1.2 meter i x- och y-led. Figur 6 visar hur de olika returena från en Columbusutgrindning bidrar till den totala målarean vid plattlutningen $\varphi = 10^\circ$.



Figur 6. Utgrindade data från Columbus. Den gröna linjen representerar den totala radarreturen från geometrin som visas i figur 5. Den blå linjen visar bidraget från endast växelverkan, medan den röda linjen visar direktbidraget från den skrovliga ytan.

Ett sätt att komma runt problemet med de rektangulära/kvadratiska grindarna är att istället göra utgrindningar utifrån avståndsprofiler, vilket i praktiken är ett sätt att införa cirkulära utgrindningar i ISAR-bilden. Figur 7 visar avståndsprofiler för några olika vridbordsvinklar då den plana plattan lutar $\phi = 0^\circ$ respektive 10° .

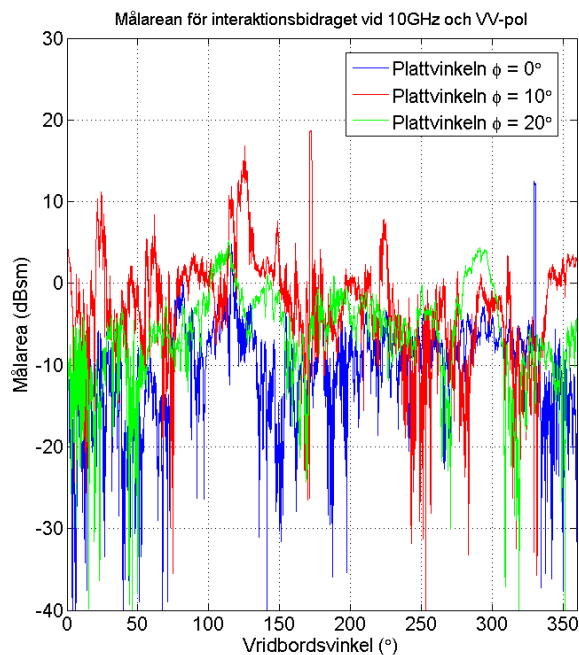


Figur 7. Avståndsprofiler för tre olika vridbordsvinklar (0° , 50° och 150°) då plattan lutar $\phi = 0^\circ$ (a) och $\phi = 10^\circ$ (b). Polarisationen är VV. Växelverkansbidraget hamnar inom området 1.2 till 2.4 m (här markerat med svarta linjer).

Data är kalibrerade så att avståndet 0 meter i avståndprofilerna motsvarar en kalibrerad amplitud. Området mellan de svarta linjerna i figuren ovan grindas ut och återkonverteras till komplexa data i frekvensdomän. Eftersom mätningarna utförs vid relativt korta avstånd behöver man utföra en avståndskorrektion av utgrindade data. Målarean korrigeras därför för de utgrindade växelverkansbidragen med formeln:

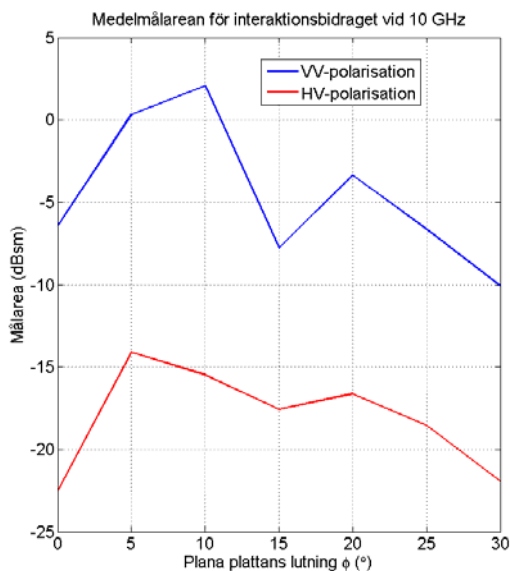
$$\sigma_{\text{vxx,korr}} = \sigma_{\text{vxx, utgr}} \cdot [(R_1 + R_2) / R_3]^2 \quad (1)$$

där avstånden R_1 , R_2 och R_3 framgår ur i figur 5. Figur 8 visar målarean som funktion av vridbordsvinkel för det utgrindade och avståndskorrigerade växelverkansbidraget vid 10 GHz och VV-polarisation.



Figur 8. Radarmålarean för det utgrindade växelverkansbidraget som funktion av vridbordsvinkel vid 10 GHz och VV-polarisation. De olika färglinjerna motsvarar olika lutningar på plattan.

För att få ett statistiskt mått på interaktionsbidraget så medelvärdesbildas radarmålarean över alla vridbordsvinklar och för varje lutningsvinkel på plattan. Figur 9 visar resultatet för dessa medelvärdesbildningar som funktion av den plana plattans lutning för de olika polarisationskombinationerna VV och HV.



Figur 9. Medelmålarean från interaktionsbidraget vid frekvensen 10 GHz och för polarisationskombinationerna VV och HV som funktion av den plana plattans lutning.

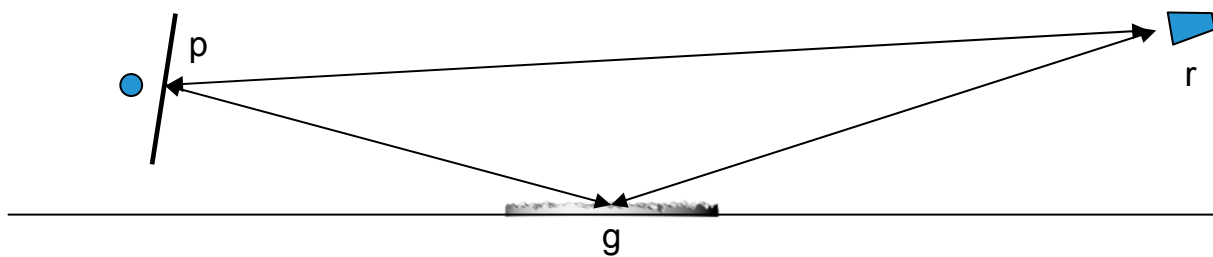
3. Beräkningar

I denna rapport presenteras två olika typer av radarmålyteberäkningar av den mätsituation som presenterats i föregående kapitel. Dels utförs en beräkning av målytan med en metod som kombinerar strålgångsoptik med Improved Integral Equation Method (IIEM) [3] och dels görs beräkningar med ett kommersiellt verktyg (SPECRAY EM) som kombinerar strålgångsoptik med fysikalisk optik. Den stora skillnaden mellan de olika beräkningsmetoderna är att SPECRAY-fallet kräver en facetterad CAD-modell av hela scenen. För IIEM krävs dels statistiska parametrar som beskriver ytans skrovlighet och dels en CAD-modell av den plana plattan. För- och nackdelar med de olika metoderna beskrivs under kapitlet ”Slutsatser”.

3.1. Improved Integral Equation Method (IIEM)

Med IIEM kan endast det diffusa [6] växelverkansbidraget mellan plattan och den skrovliga ytan beräknas. Strålgångsvägarna som modelleras är mellan punkterna och i ordningen r-p-g-r och r-g-p-r, se figur 10. Andra strålgångsvägar, som t. ex. r-g-p-g-r, modelleras inte med denna metod. Markens bistatiska spridningskoefficient σ^0 beräknas med IIEM [7]. Teorin för beräkning av växelverkansbidraget finns beskriven i [8] och i [9]. Utökningar har gjorts genom att hänsyn tas till mottagar- och sändarantenndiagram men även närfältseffekter som tapering och avståndsberoende har inkluderats för att på så sätt efterlikna aktuell mätuppställning så långt som möjligt. I närfältet krävs att hänsyn tas till hela scenens kovariansmatrix varför IIEM har utökats till att inkludera hela denna. Teorin utlämnas i denna rapport och återfinns i [1].

Vi antar att avståndet mellan sändare och mottagare är liten vilket gör att endast det monostatiska fallet betraktas i denna simulering. Reciprocitet gör då att interaktionen r-p-g-r är lika med interaktionen r-g-p-r. Vi behöver således endast beräkna interaktionen i den ena riktningen och multiplicera fältet från denna med en faktor två för att få hela växelverkansbidraget. Eftersom geometrisk optik (GO) tillämpas bäst på stora plan ytor och spridningen från en skrovlig yta kan beräknas med IIEM, så modelleras interaktionen r-p-g-r istället för r-g-p-r.



Figur 10. Schematisk bild av mätuppställning samt definition av strålgångsvägar. p och g är godtyckliga punkter på plattan respektive på den skrovliga ytans medelplan.

Gjorda approximationer för beräkningsmodellen är:

- Interaktionen mellan p och g beräknas med geometrisk optik, d.v.s. ingen hänsyn tas till diffraktion. Detta innebär att sidlober från plattan inte beaktas.
- Spridningen från markytan vid g beräknas statistiskt m.h.a. IIEM.
- Ingen hänsyn tas till randeffekter från markytan.
- Avståndet mellan sändare och mottagare antas vara litet vilket gör att det monostatiska fallet kan beaktas.

3.1.1. Kalibrering av IEM-beräkningar

För att kunna jämföra mätningar och beräkningar krävs att beräkningarna kalibreras genom att normera bort antennvinster och avståndseffekter. Eftersom mätningen sker i närfältet av platta och mark, finns inget tydligt sätt att definiera vilket avstånd som skall användas för beräkning av radarmålarean. Om mätavståndet är stort kan hela scenen approximeras med en punkt och kalibreringskonstanten C fås som (2)

$$C = G_{max}^2 / r_{cal}^4 \quad (2)$$

där G_{max} är antennens maxvinst och r_{cal} är avståndet mellan sändare och mottagare vid kalibreringen. I vår mätuppställning är målet utbrett varför både antennvinsten och radarvågens gångvägsavstånd, r , varierar över ytan. I mätkalibreringen tas ingen hänsyn till antenntapering varvid endast antennens maxvinst G_{max} ingår i mätningens kalibreringskonstant. För att efterlikna detta normeras även beräkningarna med G_{max} . Taperingseffekter inkluderas alltså inte i kalibreringen av beräkningarna.

Avståndskompensation av mätdata görs enligt den metod som beskrivs i kapitel 2.2 ”Mätdataanalys”. I den statistiska beräkningsmetoden finns inte denna möjlighet eftersom data är inkoherent. För att undersöka hur kalibreringsrutinen påverkar slutresultatet prövas två kalibreringsmetoder för beräkningarna, vilka beskrivs nedan.

Metod 1

Avståndsberoendet för delspidarna tas bort i beräkningsprogrammets källkod. Metoden efterliknar då ett fjärrfältsavstånd, men tas hänsyn till antenntapering och polarimetriska närfältseffekter.

Metod 2

Plattan och den skrovliga markytan betraktas som punktmål, varvid infallande vågs gångavstånd, r_{ical} beräknas från sändaren till plattans mittpunkt och vidare till markytans mittpunkt. Den spridda vågen gångavstånd, r_{scal} , beräknas från markytans mittpunkt till mottagaren.

Gångavstånden $r_{ical} = 7.31$ m och har beräknats från avstånden som är angivna figur 2 och r_{scal} är uppmätt till 3.26 m.

Markytans radarmålarea fås därefter genom att multiplicera beräknad mottagen effekt med kalibreringsfaktorn

$$\frac{4\pi r_{ical}^2 r_{scal}^2}{D_{max}^2} \quad (3)$$

Kommentar: egentligen bör infallande fält normeras med antennvinst i \hat{r}_{ical} riktning eftersom båda antenner pekar mot markytans mittpunkt. För att efterlikna mätningarna görs inte detta.

Figur 11 visar resultatskillnaderna mellan de två olika metoderna.

3.2. Beräkningar SPECRAY EM

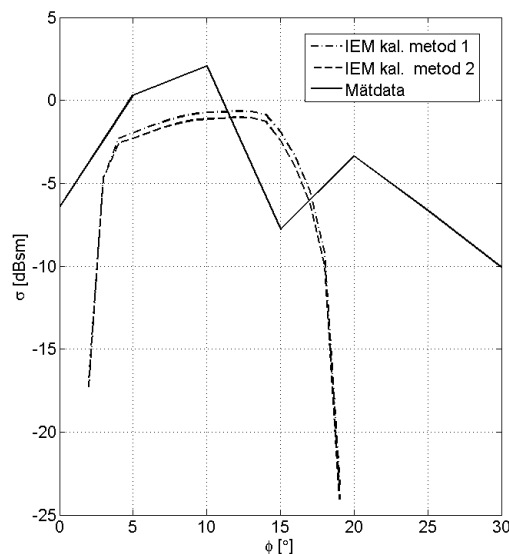
SPECRAY EM baseras på s.k. asymptotiska metoder för att beräkna det elektromagnetiska fältet. SPECRAY använder geometrisk-optik i kombination med fysikalisk-optik och diffraktionsteori för fältberäkning. Noggrann beskrivning av programmets funktionalitet finns i [10] och [11]. För att kunna utföra beräkningar med detta verktyg krävs en facetterad CAD-modell av scenen. I programmet finns möjligheten att bestämma vilka strålvågar som skall inkluderas/exkluderas i beräkningen. Detta ger användaren möjligheten att kunna analysera de olika strålgångarnas bidrag.

4. Jämförelser mellan beräknings- och mätdata

I detta avsnitt presenteras en jämförelse mellan de beräknade och de uppmätta resultaten.

4.1. Jämförelse mellan experimentella resultat och statistisk metod

I figur 11 visas jämförelse mellan mät- och IEM-målarea som funktion av plattvinkel vid frekvensen 10 GHz och VV-polarisation.

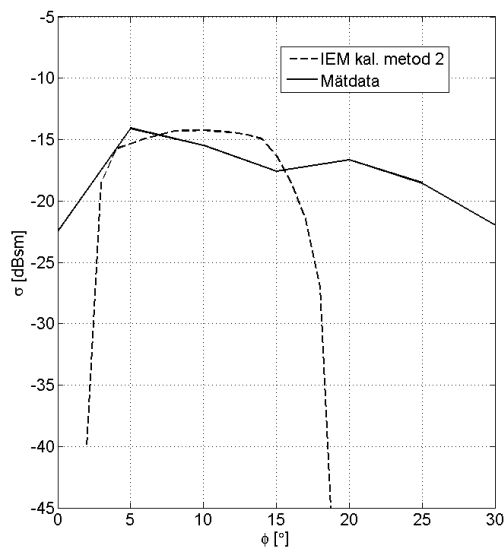


Figur 11. Medelnivån av målarea som funktion av den plana plattans lutning. Jämförelse mellan mätningar och statistisk beräkningsmetod för växelverkansbidraget ($r-p-g-r + r-g-p-r$) för aktuellt mätfall vid 10 GHz VV-polarisation. Helt dragen kurva visar mätningar. Punktstreckad kurva visar beräkningar kalibrerade enligt metod 1 och streckad kurva beräkningar kalibrerade med metod 2.

Vi noterar att i figur 11 att närfältet endast har en liten inverkan på data efter att avståndet kalibrerats bort, se skillnaden mellan IEM metod 1 och 2. Skillnaden mellan de båda kalibreringsmetoderna är < 0.5 dB och är som störst vid $\phi \approx 15^\circ$. Man noterar att relativt stora skillnader fås mellan mätningar och beräkningar, framförallt för $\phi < 4^\circ$ och $\phi > 20^\circ$ där beräkningsdata snabbt avtar emedan mätdata uppvisar betydligt högre nivåer vid dessa vinklar. Detta kan tillskrivas växelverkansbidraget $r-g-p-g-r$ som rent geometriskt uppvisar ett maximum då $\phi \approx 21^\circ$. Detta bidrag har ungefär samma gångvägsavstånd som växelverkansbidraget $r-p-g-r$ och kan därför inte separeras från detta bidraget. Värt och notera är att kurvornas maximum inträffar vid olika vridningsvinklar. För mätdata fås maximum vid $\phi \approx 10^\circ$, emedan de beräknade data fås max vid ca 14° . Mätningarna utfördes med 5° intervall på plattlutningarna vilket gör att det finns en osäkerhet vid vilken lutning som ger max retur.

Man måste beakta att mätdata endast är uppmätta i 5° intervall och för denna sampling av beräkningsdata inträffar maxvärdet för samma vinkel.

I nedanstående figur visas resultatet för HV-polarisation vid 10 GHz.

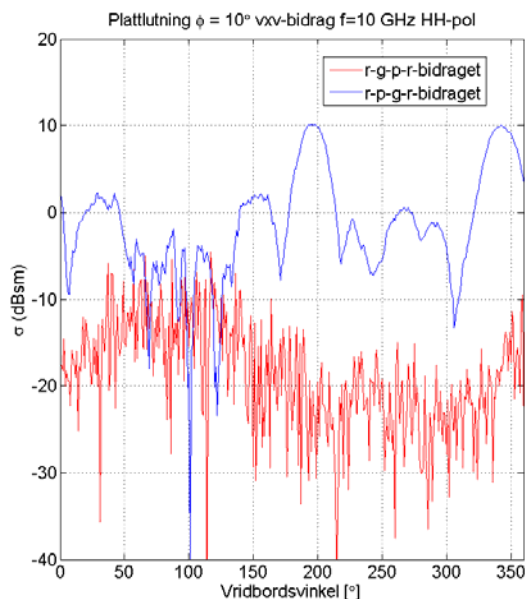


Figur 12. Medelnivån av målarean som funktion av den plana plattans lutning. Jämförelse mellan mätningar och statistisk beräkningsmetod för växelverkansbidraget $r-p-g-r + r-g-p-r$ för aktuellt mätfall vid 10 GHz och HV-polarisation. Heldragen kurva visar mätningar och streckad kurva beräkningar kalibrerade med metod 2.

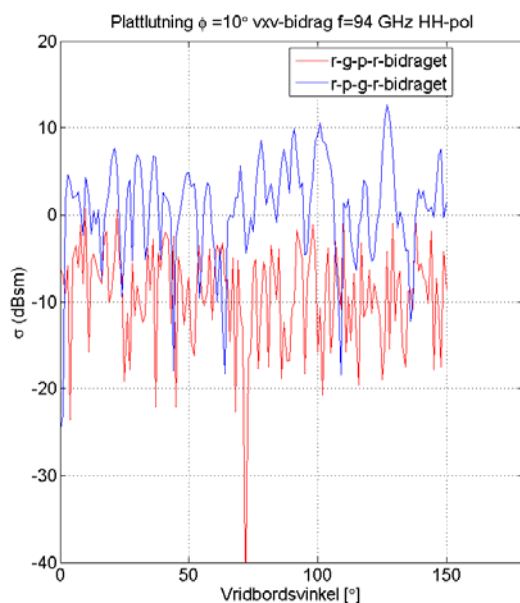
Det principiella utseende på kurvorna skiljer sig lite från VV-fallet. Framförallt gäller detta för den statistiska metoden. Vi noterar för mätfallet att minskningen av radarmåleran i intervallet $10^\circ \leq \phi \leq 20^\circ$ även förekommer för HV-fallet. I övrigt påverkas även detta resultat av plattans sidlobor som inte är inkluderade i växelverkansbidraget. Skillnaden mellan de olika kalibreringsmetoderna är inte noterbar för HV-polarisation.

4.2. Resultat SPECRAY EM

Figur 13 visar målarean av växelverkansbidraget som är beräknade med beräkningsverktyget SPECRAY. Målarean är här plottad som funktion av vridbordsvinkeln vid 10 GHz och HH-polarisation då den plana plattan har lutningen $\phi = 10^\circ$. Växelverkan som är inkluderad i beräkningarna representeras av strålgångsvägarna: radar-platta-mark-radar ($r-p-g-r$) respektive radar-mark-platta-radar ($r-g-p-r$), se figur 10. Enligt reciprocitetsteoremet skall dessa bidrag vara lika i det monostatiska fallet. SPECRAY-resultaten i figur 13 uppvisar relativt stora skillnader mellan dessa strålgångsvägar. Vi noterar att den blåa kurvan ($r-p-g-r$ -bidraget) uppvisar en betydligt högre målyta än den röda kurvan ($r-g-p-r$ -bidraget). Vi noterar också att den blåa kurvans variationer är mer långsamma vilket skulle kunna antyda att det finns en koherent term som bidrar. I båda fallen beräknas studsens med GO och spridningen med PO vilket ger en skillnad. GO fungerar bra då ytan har en krökning som är stor i förhållande till våglängden, något som är sant då studsens först sker i den plana plattan. För den omvända interaktionen, $r-g-p-r$, fungerar nödvändigtvis inte GO bra eftersom ytan lokalt innehåller kraftiga krökningar vilket gör att spridningen inte är spekulär av sin natur varvid GO ger en sämre approximation av fältet. Vid högre frekvenser blir markytans delytor större i förhållande till våglängden och GO fungerar bättre. Om frekvensen är tillräckligt hög bidrar endast de delelement av marken som ger en spekulär reflex i interaktionen $r-g-r$ och tvärtom. I figur 14 visas motsvarande beräkningar gjorda vid 94 GHz.



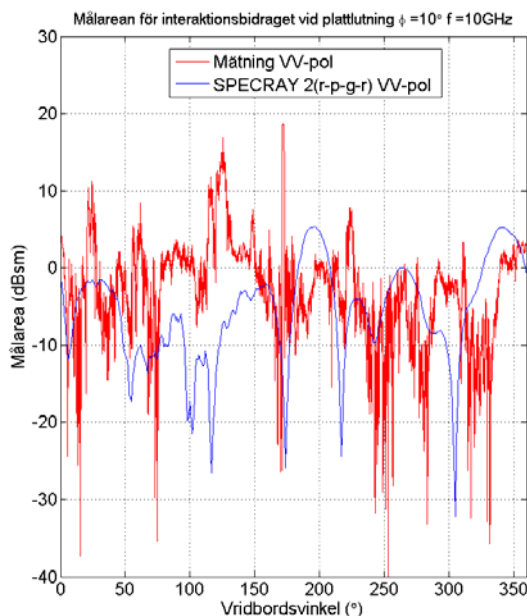
Figur 13. Visar radarmålarean som funktion av vridbordsvinkel för växelverkansbidragen r-p-g-r (blå) respektive r-g-p-r (röd) då den plana plattan lutar $\varphi=10^\circ$. Beräkningarna är utförda vid 10 GHz och HH-polarisation.



Figur 14. Visar radarmålarean som funktion av vridbordsvinkel för växelverkansbidragen r-p-g-r (blå) respektive r-g-p-r (röd) då den plana plattan lutar $\varphi=10^\circ$. Beräkningarna är utförda vid 94 GHz och HH-polarisation

Man kan konstatera från figur 14 att skillnaden minskar med ökande frekvens men att den fortfarande är betydande. En stor del av detta beror också på hur tätt beräkningsprogrammet ”samplar” av ytan varvid det vid högre frekvens krävs ett mycket stort antal betydande strålar vilket i sin tur medför en lång beräkningstid. Genom att öka stråltätheten förväntas skillnaden mellan kurvorna minska.

I Figur 15 visas SPECRAY-resultaten för växelverkansbidraget r-p-g-r där bidraget har multiplicerats med en faktor 2 (reciprocitet) och jämförs med mätresultaten vid plattvinkeln $\varphi=10^\circ$ och frekvensen 10 GHz. En relativt god överensstämmelse mellan data uppnås även om vissa systematiska skillnader kan noteras. Vad dessa skillnader beror på är i dagsläget oklart, men man skall vara medveten om att vridbordets absolutvinkel inte är densamma relativt de två dataseten.



Figur 15. Radarmålarrea för växelverkansbidraget som funktion av vridbordsvinkel vid VV-pol då den plana plattan lutar $\phi=10^\circ$ och vid frekvensen 10 GHz. Röd linje representerar mätdata för VV-polarisation och blå linje representerar SPECRAY-beräknade data för växelverkansbidraget r-p-g-r multiplicerat med en faktor 2 (reciprocitet).

Ovanstående figurer visar att SPECRAY EM inte lämpar sig för att beräkna växelverkan mellan mål-mark för ett godtyckligt objekt, om inte växelverkansbidraget r-p-g-r används och multipliceras med en faktor 2. För stora scenarion blir beräkningstiden lång eftersom data konvergerar långsamt p.g.a. markytans kraftiga undulationer. Detta har tidigare noterats i [12].

5. Sammanfattning och slutsatser

Vi har presenterat en ny mätmetodik för mätning av den diffusa delen av mål-markväxelverkansbidraget till den totala radarsignaturen. Mätningarna har utförts på en plan metallisk platta som placerats med olika elevationsvinklar mot en skrovlig yta. Skrovligheten av ytan beskrivs här med en isotrop Gaussisk korrelationsfunktion vid frekvensen 10 GHz. Mätresultaten har jämförts med resultaten från en statistisk beräkningsmodell som bygger på geometrisk optik i kombination med IEM [3]. Beräkningarna har endast tagit hänsyn till första ordningens växelverkansbidrag. Jämförelse mellan beräknade och uppmätta resultat visar på en relativt god överensstämmelse för både VV- och HV-polarisation vid 10 GHz. Resultaten antyder dock att högre ordningens växelverkansbidrag, radar-mark-platta-mark-radar, måste inkluderas i beräkningarna för att ytterligare förbättra beräkningsresultaten. Vidare visar resultaten att studsens platta-mark som modelleras med geometrisk optik inte ger en tillräckligt noggrann fältbild vid markytan för aktuella beräkningar. För att bättre beskriva fältet vid markytan bör hänsyn tas till den fälttapering som reflexen i den plana platta ger upphov till. Slutsatsen är dock att beräkningsmetoden är mycket snabb och skulle kunna användas då man vill utföra beräkningar på objekt i stora scener.

Dessutom har beräkningar utförts med den kommersiella beräkningskoden SPECRAY EM. Denna är baserad på geometrisk optik i kombination med fysikalisk optik. Förutsättningen för att kunna utföra beräkningar med programmet är att man har en facetterad CAD-modell av hela beräkningsscenen. Det visar sig att programmet inte lämpar sig att beräkna gångvägen radar-mark-platta-radar, se figur 10, då geometrisk optik approximationen som används i programmet inte lämpar sig för en skrovlig yta med undulationer som är av våglängdsstorlek. Detta leder till att de olika gångvägarna radar-platta-mark-radar och radar-

mark-platta-radar ger olika resultat vilket bryter mot reciprocitetsprincipen och är därmed ett ofysikaliskt resultat. Slutsatsen är att det är svårt att ta hänsyn till det diffusa mål-markväxelverkansbidraget till radarsignaturen med en beräkningskod, som baseras på geometrisk optik i kombination med fysikalisk optik. Beräkningarna blir orimligt stora i termer av CPU-tid och minneskrav.

6. Referenser

- [1] M. Gustavsson, M. Herberthsson, J. Rahm, E. Zdansky and A. Örbom, "A New Methodology for measuring the Bistatic ground scattering coefficient. Comparisons with the AIEM at large Bistatic angles", *To be published*, 2012.
- [2] H.-O. Berlin, Rahm, J och Larsson C, "Utveckling och implementering av Columbus, ett verktyg för ISAR-analys. Delrapportering inom VU-SAT", FOA-R--00-01491-615--SE, 2000.
- [3] A. K. Fung, Z. Li and K. S. Chen, "The Improved IEM Surface Scattering Model (IIEM)", *J. Electromagn. Wave Appl*, vol. 16, pp. 689-702, 2002.
- [4] E. Zdansky, "Kalibrering av radarmålarea, särskilt objektfri kalibrering", Swedish Defence Research Agency, Linköping FOI-R--2442--SE, 2007.
- [5] E. Zdansky and A. Örbom, "Prov med objektfri kalibrering av radarmålarea", Swedish Defence Research Agency, Linköping FOI-R--2443--SE, 2007.
- [6] M. Gustafsson, S. Nilsson, J. Rahm and E. Zdansky, "Modelleringsmetoder för bistatisk markspridning - Litteraturstudie-", FOI-R--0825--SE, 2003.
- [7] K. S. Chen, T.-D. Wu, L. Tsang, Q. Li, J. Shi and A. K. Fung, "Emission of Rough Surfaces Calculated by the Integral Equation Method With Comparison to Three-Dimensional Moment Method Simulations", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 41, pp. 90-100, 2003.
- [8] S. Axelsson, "Two-bounce Microwave Scattering between a Flat Plate and a Rough Ground Surface", presented at Radiovetenskap och kommunikation 96 (RVK 96), Luleå, 1996.
- [9] M. Gustafsson, M. Herberthsson and S. Nilsson, "Mål-markinteraktion -En studie-", FOI, Linköping FOI-R--1606--SE, 2005.
- [10] P. Pitot and P. Nguyen, "SPECRAY EM user guide", FERM/028 - 2003.17/A - v 1.16, 2007.
- [11] M. Karlsson, M. Gustafsson, M. Molin, and F. Näsström, "Utvärdering av SPECRAY EM", Swedish Defence Research Agency, Linköping FOI-R--1354--SE, 2004.
- [12] M. Gustafsson, M. Herberthsson, S. Nilsson, J. Rahm, E. Zdansky, and A. Örbom, "Mätning och beräkning av bistatisk RCS för marktytor.", Swedish Defence Research Agency, Linköping FOI-R--1806--SE, 2005.