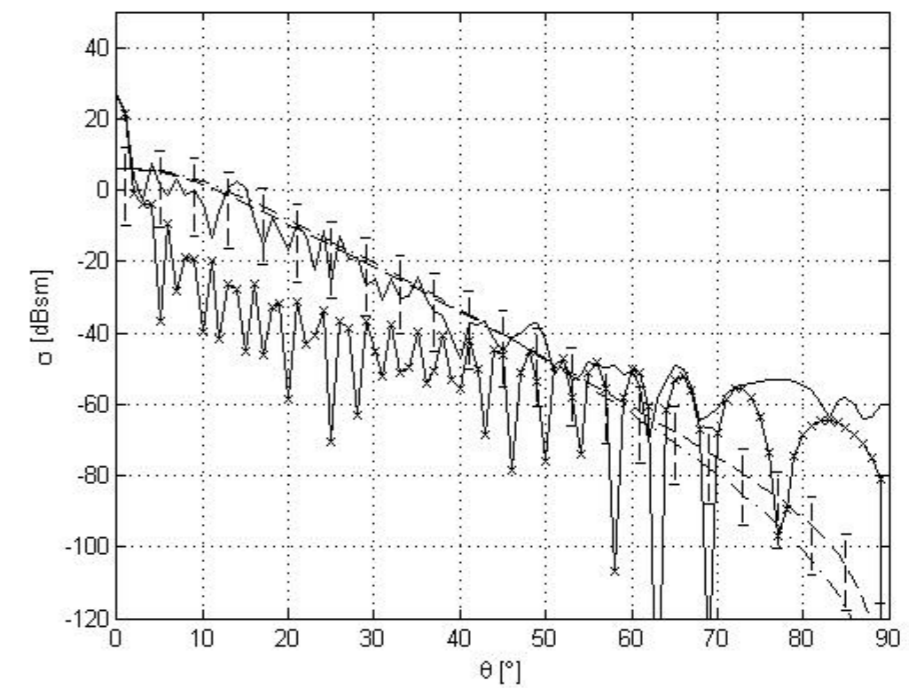


MAGNUS GUSTAFSSON



FOI är en huvudsakligen uppdragsfinansierad myndighet under Försvarsdepartementet. Kärnverksamheten är forskning, metod- och teknikutveckling till nytta för försvar och säkerhet. Organisationen har cirka 1250 anställda varav ungefär 900 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.

Magnus Gustafsson

Utvärdering bump-mapping i SPECRAY EM

Utgivare FOI - Totalförsvarets forskningsinstitut Sensorsystem Box 1165 581 11 Linköping	Rapportnummer, ISRN FOI-R--2271-SE	Klassificering Metodrapport
	Forskningsområde 4. Sensorer och signaturanpassning	
	Månad, år April 2007	Projektnummer E3015
	Delområde 45 Signaturanpassning	
	Delområde 2	
Författare/redaktör Magnus Gustafsson	Projektledare Jonas Rahm	
	Godkänd av Jonas Rahm	
	Uppdragsgivare/kundbeteckning FM	
	Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig Magnus Gustafsson	
Rapportens titel Utvärdering bump-mapping i SPECRAY EM		
Sammanfattning <p>Vid jämförelse mellan radarmålytemätningar och radarmålyteberäkningar av olika typer av stridsfordon vid 35 GHz har skillnader uppkommit som kan förklaras av att ytorna i cad-modellerna som använts i beräkningarna har varit för släta. I realiteten kan en yta på ett stridsfordon uppvisa en stokastisk struktur vilket medför reducering av radarmålarean i spekulära riktningar medan ökning i sidlobriktningar. I SPECRAY EM finns möjligheten, att m.h.a. yttexturering, behandla dessa ytundulationer, s.k. bump-mapping.</p> <p>I detta arbete har den s.k. bump-mapping algoritmen validerats mot IEM (Integral-Equation-Method) . Resultaten har visat på mycket god överensstämmelse för det koherenta spridningsbidraget, som i många fall dominerar, för alla typer av ytor. Mycket god överensstämmelse fås för den diffusa delen då ytan har liten intern ytlutning och om den belysande radarfrekvensen är hög jämfört med ytans korrelationslängd. Då frekvensen är låg i förhållande till ytans struktur ges acceptabla resultat, men bump-mapping tenderar att överskatta HH-polarisationsbidraget medan det motsatta gäller för VV-polarisation. När ytans interna lutning är stor kommer multipelspridningstermer, något som inte beaktas i bump-mapping, att vara betydande. Detta gör att den diffusa spridningen underskattas. Överlag kan kan sägas att bump-mapping utgör ett kompetent verktyg för användning vid radarmålyteberäkningar.</p>		
Nyckelord SPECRAY EM, radarmålarea, bump mapping, texturering, markspridning		
Övriga bibliografiska uppgifter	Språk Svenska	
ISSN 1650-1942	Antal sidor: 19 s.	
Distribution enligt missiv	Pris: Enligt prislista	

Issuing organization FOI – Swedish Defence Research Agency Sensor Systems P.O. Box 1165 SE-581 11 Linköping	Report number, ISRN FOI-R--2271--SE	Report type Methodology report
	Programme Areas 4. Sensors and Low Observables	
	Month year April 2007	Project no. E3015
	Subcategories 45 Low Observables	
	Subcategories 2	
Author/s (editor/s) Magnus Gustafsson	Project manager	
	Approved by	
	Sponsoring agency	
	Scientifically and technically responsible	
Report title (In translation) Evaluation of bump mapping in SPECRAY EM		
Abstract <p>Comparisons made between RCS calculations and measurements for different types of combat vehicles at 35 GHz show differences which can be explained by that the surfaces of the cad-models used in the calculations were too smooth. I real case a surface can show stochastic structure which lead to a reduction of the RCS levels in specular direction while, increase in side lobe directions. In SPECRAY EM there are tools, that by surface texturation, takes surface undulations into account by so called bump mapping.</p> <p>In this work the bump mapping algorithm has been validated against IEM. The results show very good agreement for the coherent scattering, which in many cases are the dominant part of the scattering, for all kinds of surfaces. A very good agreement is seen for the non-coherent part when the surface average slope is small and the incident wavelength is small compared to the correlation length of the surface structure. If the wavelength is long compared to the surface structure the results are acceptable. Bump-mapping tend to overestimate HH-polarisation contribution whereas the VV-polarisation contribution is underestimated. IWhen the internal surface slopes är large, multiple scattering terms not include in the bump mapping algorithm, will be significant, hence the non-coherent scattering will be underestimated. The overall conclusion is that bump mapping is competent tool used in RCS-calculations.</p>		
Keywords SPECRAY EM, radar cross section, bump mapping, texturing, ground scattering		
Further bibliographic information	Language Swedish	
ISSN 1650-1942	Pages 19 p.	
	Price acc. to pricelist	

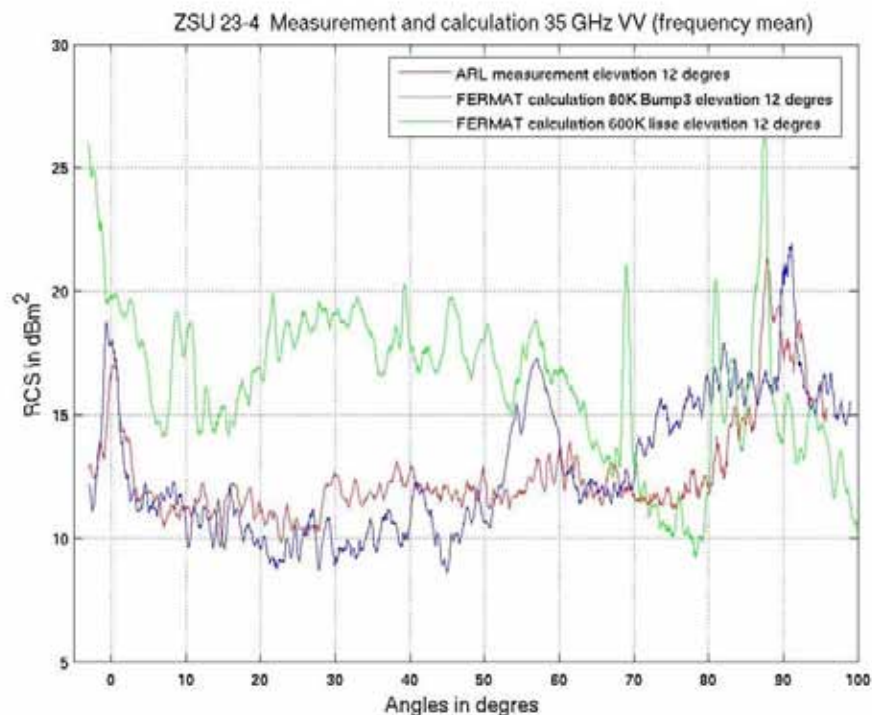
Innehåll

Innehåll	5
1 Inledning	6
2 Beskrivning av bump-mappning.....	7
2.1 Bump-genereringsmetodik.....	7
2.2 Höjd-bumping	7
2.3 Normal-bumping.....	8
3 Resultat	8
3.1 Ytor med mycket liten skrovlighet	9
3.2 Ytor med liten skrovlighet	12
3.3 Medelskrovliga ytor	13
3.4 Jämförelse av beräkningsresultat av T-72 med och utan bump-mapping.....	17
4 Slutsatser och diskussion	18
5 Referenser	19

1 Inledning

I studier som gjorts av ONERA [1] har jämförelser mellan mätningar och beräkningar gjorts. Vid jämförelse mellan radarmålytemätningar och radarmålyteberäkningar av olika typer av stridsfordon vid 35 GHz har skillnader (se Figur 1) uppkommit som kan förklaras av att ytorna i cad-modellerna som använts i beräkningarna har varit för släta. I det verkliga fallet uppvisar ytan en närmast stokastisk skrovlighet vilket vid höga frekvenser gör att dessa ytor ger upphov till en del diffus spridning vilket reducerar ytornas direktivitet. Detta medför att spekulära effekter reduceras medan sidlobsnivåer ökar vilket ändrar den monostatiska radarmålarean. I senare versioner av SPECRAY EM [2] finns s.k. bump-mapping implementerad vilket gör att stridsfordonets yta kan textureras med ett skrovligt material för att behandla ovan nämnda effekter. Denna rapport syftar till att klargöra funktionaliteten hos bump-mapping algoritmen och validera denna mot statistiska metoder. I rapporten ges även en metodik för bump-mapping-beräkningar.

I kapitel 3 beskrivs bump-mapping-algoritmen och dess användbarhet och i kapitel 4 presenteras resultat. Slutsatser och sammanfattning görs i kapitel 5.



Figur 1: Jämförelse av mätning (röd) och beräkning (blå och röd kurva) med SPECRAY EM av en luftvärnsvagn ZSU-23-4. Beräkningen har gjorts med och utan bump-mapping (blå respektive röd kurva). Bilden är tillhandahållen av Henri-Jose Mametsa ONERA-DEMR i Toulouse.

Effekten av bump-mapping i beräkningsresultaten som presenterad i Figur 1 syns tydligt. För många vinklar överskattas radarmålarean hos den icke-bumpade beräkningen med ca 8 dB. Denna effekt undertrycks kraftigt genom användandet av bump-mapping (blå kurva) och vi får överlag en mycket god överensstämmelse med mätdata. Vid jämförelsen måste man även beakta skillnader mellan uppmätt objekt och dess cad-modell. Exempelvis spelar detaljer som hjul- och bandpositioner roll. Positionering av kanoner och andra geometriska avvikelser kan också ge upphov till skillnader i radarmålarean. Man bör även beakta att hela stridsfordonet i ovanstående beräkning texturerats med en och samma bump, något som kan behöva justeras för att få ännu bättre överensstämmelse.

2 Beskrivning av bump-mappning

Vi har sett från Figur 1 att skrovligheten hos stridsfordonets yta kraftigt kan påverka radarmålarean. För att slippa cad-modellera ytstrukturen används en textur som innehåller exempelvis en stokastisk höjdprofil. Denna lagras på objektets verkliga yta. Från texturen beräknas sedan en störning för såväl normalriktning som fas, eller endera av dom varvid ytan elektromagnetiskt uppfattas som skrovlig. Störning av fas och normalriktning kallas "höjd-bumping" respektive "normal-bumping". I SPECRAY EM påverkar störningen endast spridningsbidraget från fysikalisk-optik-beräkningen, PO-passet. All ray-tracing som sker vid beräkning av exempelvis multipelbidrag beräknade m.h.a geometrisk optik påverkas således inte. Vidare antas ytans undulationer vara små varför interna skuggnings- och multipelspridningseffekter inte beaktas. Dessa effekter är för de flesta naturliga ytor små och bör därför i många fall kunna ignoreras.

2.1 Bump-genereringsmetodik

Bump-mapping ställer inga krav på vilka typer av ytor som används. Dessa måste dock genereras numeriskt i exempelvis Matlab och överföras till en texturfil (pattern file .ips). För automatisk generering av texturfiler från genererade höjdprofiler kan Matlab-funktionen *writeIPS* användas. Höjddata lagras som datatypen uint8. I SPECRAY EM skalas sedan data mellan 0 och 1 vilket gör att höjddata måste multipliceras med en ny skalfaktor för få rätt höjdstandardavvikelse. Skalfaktorn anges vid raderna <BUMP_SCALE> och <PHASE_SHIFT_SCALE> i tillhörande materialfil (.mat). En konsekvens av skalningen är att endast positiva perturbationer kan användas. Detta begränsar i princip inte funktionaliteten vid en vanlig fysikalisk-optik-beräkning med innehållande strålgångsoptik eftersom endast sista beräkningen tillbaka till mottagaren påverkas genom en liten avståndsändring. Om ett objekt belyses av en smalbandig signal kan detta ge upphov till konstruktiv eller negativ interferens mellan ytor eftersom dessa har förskjutits då endast positiva höjdundulationer kan användas. Ofta är dessa effekter små men kan i vissa extremfall bli tydliga. För generering av rätt skalfaktorer och nedlagring till texturfil kan Matlab-funktionen *makeBump* användas. För mer noggrann beskrivning av texturformat (.ips) och materialformat (.mat) hänvisas läsaren till [3] och [4].

I den här rapporten kommer ytor med gaussiska höjdprofiler och korrelationsfunktioner att studeras. För att generering av sådana ytor kan två olika Matlabfunktioner, *slumpytefunktion2* som garanterar rätt korrelationsfunktion, eller *gaussian2d* som garanterar rätt höjdfördelning, användas. De statistiska avvikelserna från rätt korrelationsfunktion eller höjdfördelningsfunktion [5] är små så länge ytan kan betraktas bestå av ett större antal oberoende punkter. Vilka punkter som kan betraktas som oberoende avgörs av ytans korrelationsfunktion, vilket medför att en större yta måste genereras om korrelationslängden är stor.

2.2 Höjd-bumping

Vid höjd-bumping finns höjdinformation om ytans höjdperturbationer färgkodslagrade i varje pixel definierade i tillhörande texturfil. Störning, Δz , från höjdnivån $z=0$ ger upphov till en störning av fassen som kan skrivas som $e^{i(\bar{k}_s - \bar{k}_i) \cdot \vec{r}'}$ där \bar{k}_s, \bar{k}_i är spridnings- respektive infallsvektorerna och där $\vec{r}' = x\hat{x} + y\hat{y} + (z + \Delta z)\hat{z}$. I SPECRAY EM definierar fyra strålar ett strålknippe. Om strålarna inte ligger i samma plan eller om fasskillnaden är för stor delas strålknippen i fyra nya strålknippen. Proceduren upprepas det antal gånger som specificeras av <ANTIALIASING_LEVEL> och tills det att fasskillnaden mellan två strålar är mindre än det som specificeras av parametern <RESOLUTION_PHASE_ALIASING> vars default-värde är satt till $\lambda/16$. Båda parametrarna definieras i mottagarfilen. Om inte kriterierna är uppfyllda förkastas stråltuben och ger därmed inget bidrag till beräkningen. Effekten av höjd-bumping blir att varje yta får en störd fas vilket i sin tur ger en mindre direktiv yta som ger ett lägre koherent bidrag.

2.3 Normal-bumping

Vid normal-bumpning tas hänsyn till att normalriktningen i spridningsintegralen som uppkommer vid fysikalisk-optik-beräkningen är pertuberad. Samma textur som i höjdbumpningen används men skillnaden är att ytnormalerna skattas i varje pixel. Skattningen går till på följande sätt: Från en färgkodad texturbild skattas de partiella derivatorna $dH(u,v)/du$, $dH(u,v)/dv$ där u,v är texturens koordinater. Derivatorna förutsätts vara små varför högre än 1:a ordnings skattade termer ignoreras. Derivatorna ger en störning till den otexturerade ytans normal och en störd normalriktning fås i varje pixel. På samma sätt som för höjdbumpnings-fallet görs subdelning, men nu också till nivå som anges av kommandoraden `<ANGLE_NORMAL_VECTOR>` i .cpt-filen. Om både höjd- och normal-bumping används samtidigt kombineras de olika antialiasingkriterierna för att samma spridningsbidragsgivare (contributors) skall fås. Om normal-bumping och höjdbumping kombineras beräknas således ytan som om den hade bestått av det antal ytor med både störda höjder och normalriktningar.

3 Resultat

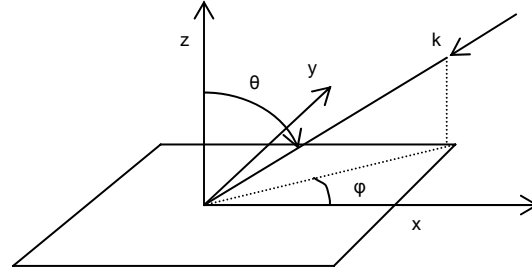
I detta kapitel studeras och jämförs tre olika ytor med IEM-metoden [6]. I avsnitt 3.1 studeras ytor med mycket liten skrovlighet. Ytor med liten skrovlighet studeras i avsnitt 3.2 och medelskrovliga ytor i avsnitt 3.3. I samtliga fall relateras skrovligheten till våglängden. Värden på höjdstandardavvikelse, σ_h , och korrelationslängd, L , har valts därför att IEM-metoden har validerats mot mätningar för dessa värden [6]. I avsnitt 4.4 tillämpas bump-mapping vid radarmålareberäkning 35 GHz av en T-72 stridsvagn vid 35 GHz. Resultaten jämförs sedan med en T-72 stridsvagn med helt släta ytor.

I samtliga, med IEM jämförande valideringsfall, studeras en metallisk kvadratisk platta med kantlängden 0.5 m. Plattans orientering illustreras i Figur 2. Radarsensorns elevationsvinkel, θ , varierar från 0-90° medan dess azimuthvinkel ϕ hålls konstant vid $\phi=45^\circ$ för att på så sätt minska det koherenta spridningsbidraget som uppkommer p.g.a. ytans ändliga utsträckning. Plattan utgör ett idealiskt objekt av tre skäl. Ytan är enkel och därmed lätt att tillämpa statistiska metoder på. Den är plan, vilket gör att bump-resultaten är lätta att jämföra med statistiska metoder som lokalt förutsätter plana ytor. Slutligen är cad-objekten uppbyggda av ett stort antal fasetter vilket gör att man genom studier av plana ytor kan dra slutsatser för mer komplicerade objekt. Samtliga bump-texturer är isotropa och har gaussisk höjd- och korrelationsfunktion. Samtliga plattberäkningar är gjorda vid 10 GHz. Detta påverkar endast den koherenta termen eftersom lobmönstret beror av ytans dimension.

SPECRAY EM använder fysikalisk optik som är en s.k. högfrequensmetod för fältberäkningar. Denna ger att HH- är lika med VV-polarisation samt att korspolarisationstermerna är lika med noll om endast ytans direktbidrag beaktas, något som inte stämmer i verkligheten. Om ytans utsträckning är större ett 5-6 våglängder utgör fysikalisk-optik en bra approximation till verkligheten.

Vid beräkning av markmålärean m.h.a. IEM fås olika resultat för de båda polarisationskanalerna. Dessa konvergerar vid allt högre frekvenser, s.k. kirchoffspridning [7]. Korspolarisation beror på multipelspridningseffekter och beaktas inte vid bump-mapping. Eftersom de flesta naturliga ytor uppvisar små ytlutningar kan dessa effekter ofta ignoreras.

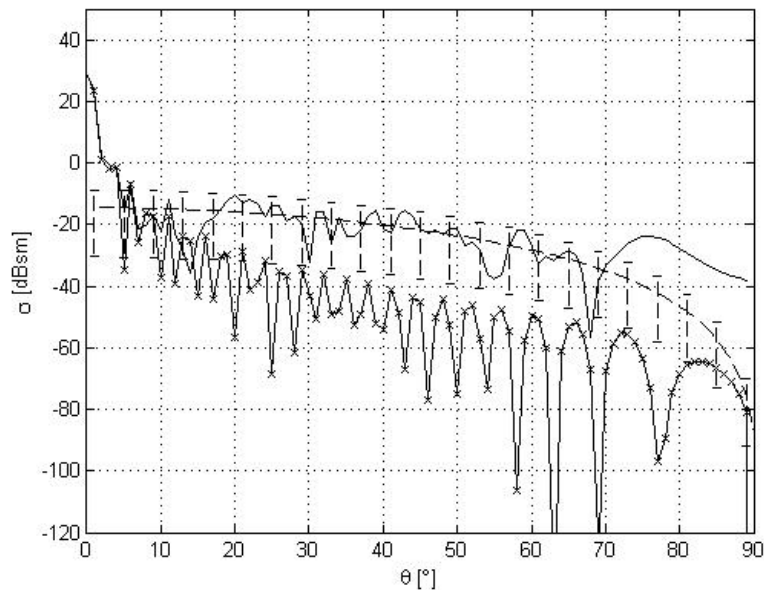
Vid varje beräkning görs konvergenstest för att se hur tät stråltäthet, `<RESOLUTION>`, som måste användas vid en viss typ av yta. Samtidigt görs också ett konvergenstest för att se hur hög upplösning bumpytan bör ha för att acceptabla resultat skall fås.



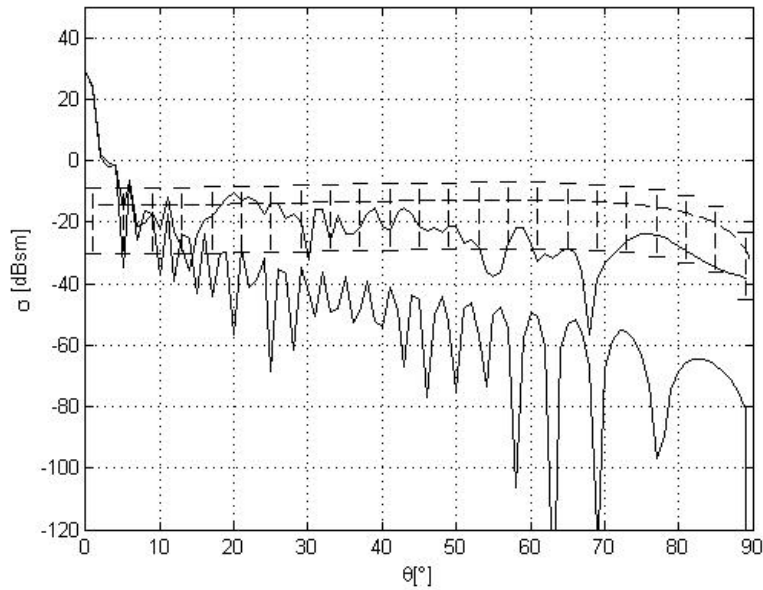
Figur 2: Beräkningsuppställning

3.1 Ytor med mycket liten skrovlighet

För ytor med mycket liten skrovlighet där $k\sigma_h < 0.3$ där $kL \ll 6$ bör pertubationsmetoder eller IEM-metoden användas [8]. Nedan presenteras beräkningar på en bumpyta med isotrop gaussisk höjd- och korrelationsfunktion där $kL=1$ och $k\sigma_h=0.2$. Dessa parametrar är valda då 1:a ordningens SPM-metoden (Small Perturbation Model) och IEM-metoden ger överensstämmande resultat [6]. Jämförelser mellan IEM och bump-mapping presenteras i Figur 3-Figur 4.



Figur 3: Jämförelse, vid HH polarisation, mellan diffus spridning beräknad IEM (streckad linje) och koherent spridning beräknad med Kirchoffmetoden (x linje) och SPECRAY EM (heldragen linje) för en kvadratisk platta med kantlängden 0.5 m. Bumpen har gaussisk höjd- och korrelationsfunktion med $kL=1$ och $k\sigma_h=0.2$. I bump-beräkningen har en textur på $1024 * 1024$ pixlar/ m^2 och stråltätheten $0.0001m$ använts. Stolparna visar 95% konfidensintervall för en exponentialfördelning med $\bar{\sigma} = \langle \sigma_{IEM} \rangle$.



Figur 4: Jämförelse, vid VV- polarisation, mellan diffus spridning beräknad IEM (streckad linje) och koherent spridning beräknad med Kirchoffmetoden (x linje) och SPECRAY EM (heldragen linje) för en kvadratisk platta med kantlängden 0.5 m. Bumpen har gaussisk höjd- och korrelationsfunktion med $kL=1$ och $k\sigma_h=0.2$. I bump-beräkningen har en textur på $1024 * 1024$ pixlar/ m^2 och stråltätheten 0.0001m använts. Stolparna visar 95 % konfidensintervall för en exponentialfördelning med $\bar{\sigma} = \langle \sigma_{IEM} \rangle$.

IEM ger tydliga skillnader mellan HH- och VV-polarisation. För $\theta=0^\circ$ fås samma nivåer, för övriga vinklar överstiger VV-polarisationen HH: HH-polarisationen är sedan strängt avtagande med ökande vinklar emedan VV antar sitt högsta värde vid $\theta \approx 70^\circ$, för att sedan snabbt minska på samma sätt som HH-polarisationsbidraget. Den snabbt avtagande diffusa markmålarean vid $\theta > 80^\circ$ är dels en effekt av internskuggning och dels en effekt av att skuggningen blir alltmer mer spekulär.

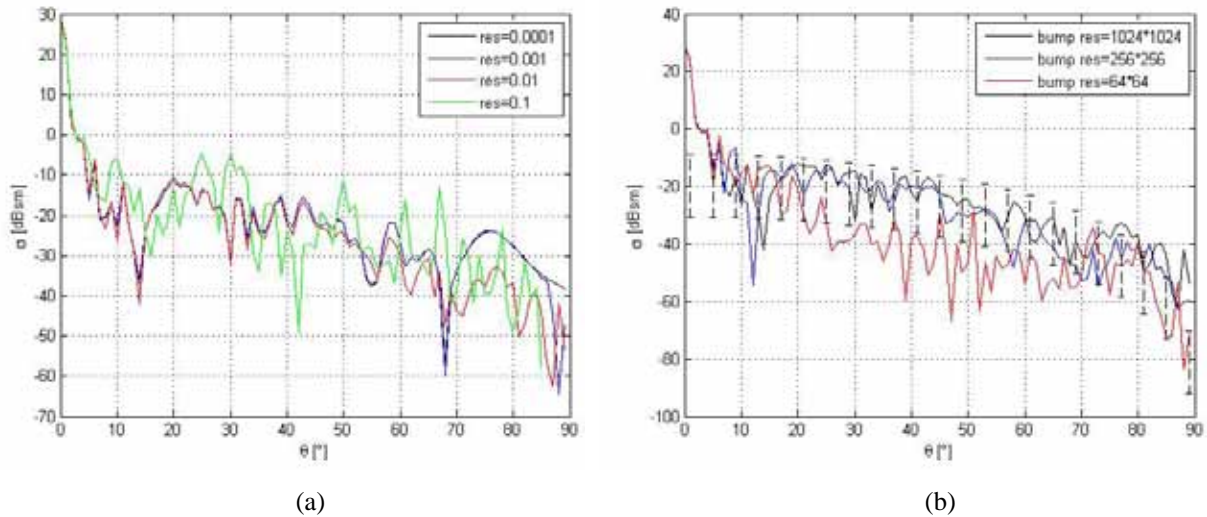
Tydligt är att det dominerande bidraget i intervallet $0 \leq \theta \leq 7^\circ$ utgörs av den koherenta termen. I övriga vinklar dominerar det inkoherenta bidraget. Större skillnader mellan metoderna fås i intervallet $\theta > 70^\circ$ vilket beror på att, det vid plattans kant, finns ett antal ytor riktade mot sändaren, något som inte modelleras i de statistiska metoderna. Man bör beakta att SPECRAY EM-beräkningen endast utgör ett sampel av den oändliga mängd ytor för vilka spridningsmedelvärdet beräknas. Medelvärdesbildandet ger IEM-kurvan dess jämnhet. Om detta görs i bump-mapping-fallet genom att medelvärdesbilda resultaten för ett stort antal ytor fås samma typ av jämna kurva [9]. För att slippa göra medelvärdesbildningen skattas ett 95 % konfidensintervall till den IEM-beräknade kurvan enligt beskrivning i nästa stycke. Eftersom ytans skorvlighet är liten ignoreras multipelspridningstermer och därmed eventuella korspolarisationsbidrag.

Man kan visa [10] att den diffusa spridningen från en yta med ett spridningsmedelvärde $\bar{\sigma}$, förutsatt att ytan innehåller tillräckligt många oberoende spridare, ger upphov till att ytans radarmålarea är exponentialfördelad. För vår typ av ytor anses beroendelängden lika med korrelationslängden. För ovanstående yta kan antalet oberoende spridare grovt skattas till $A / (\pi * L^2 / 4) \approx 1400$ st vilket kan antas var tillräckligt många spridare för att ge ett statistiskt underlag. Vi beräknar därför ett dubbelsidigt konfidensintervall på följande sätt: Anta för varje vinkel att radarmålarean är en exponentialfördelad stokastisk variabel, $\sigma_0 \in \exp(\bar{\sigma}_{IEM})$. Konfidensintervallet definieras av markmålareorna, σ_{01}, σ_{02} som uppfyller $P(\sigma_0 \leq \sigma_{01}) = 0.025, P(\sigma_0 \geq \sigma_{02}) = 0.025$.

Vi noterar att SPECRAY EM kurvan, för båda polarisationerna, ligger inom konfidensintervallet, för området där den diffusa spridningstermen är dominerande. Man bör dock beakta att konfidensintervallet endast innehåller ett sampel vilket ett väldigt stort konfidensintervall. Vi kan med detta underlag med 95 % säkerhet inte förkasta att SPECRAY EM och IEM ger samma medelvärde. Ett sätt att göra

konfidensintervallet mindre, förutom att beräkna ett antal ytor kan vara att notera att: för VV-polarisation underskattar SPECRAY EM, IEM, för samtliga vinklar där den diffusa termen dominerar. Man noterar att streckad kurva i Figur 4 är relativt konstant över ett stort vinkelintervall. Om $\sigma_0 \in \exp(\bar{\sigma})$, fås att $P(\sigma \geq \sigma_0) = e^{-1}$, vilket gör att i medel för ca 36 % av vinklarna, bör SPECRAY ge högre värden än IEM om dessa tillhör samma fördelning. Detta sker inte för VV-polarisation. Det är därför troligt att SPECRAY underskattar VV-polarisationsbidraget. För HH-polarisationen noteras att, för ca hälften av vinklarna, överstiger SPECRAY EM IEM i intervallet $10^\circ \leq \theta \leq 70^\circ$, där den diffusa spridningen är dominerande. Detta kan antyda SPECRAY EM överskattar IEM för HH-polarisationen. Ovanstående antydningar stämmer väl överens med vad som är känt angående Kirchhoffmetoden kontra IEM. För denna yttyp överskattas IEM av Kirchhoffmetoden vid HH-polarisationen medan det omvända gäller för VV-polarisation.

För att ställa in vilken stråltäthet och pixelupplösningen som behövs i beräkningen görs ett konvergenstest som presenteras i Figur 5.



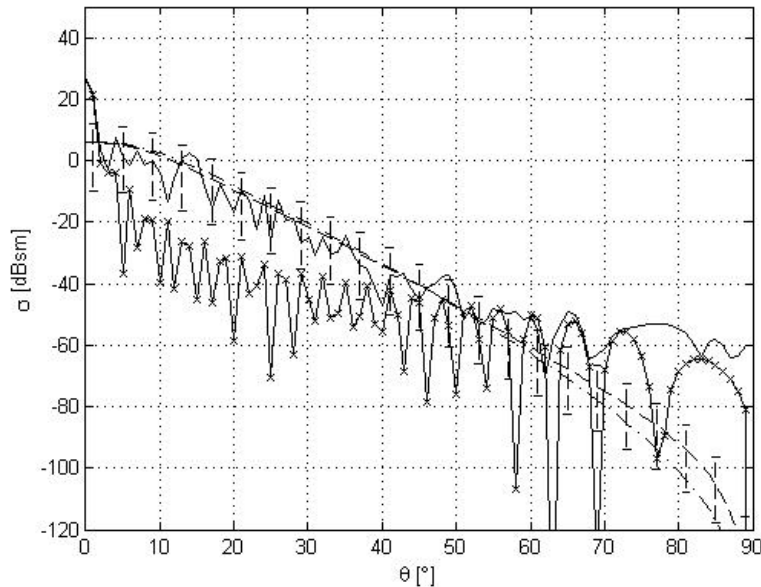
Figur 5 (a) - (b): Konvergenstest av stråltäthet (a) och pixelupplösning (b) för en bump med gaussisk höjd- och korrelationsfunktion där $kL=1$ och $k\sigma_h=0.2$. I den vänstra figuren har pixelupplösningen $1024 * 1024 / m^2$ använts. Den högra figuren visar resultaten då pixelupplösningen varierats men stråltätheten hållits konstant till $0.01 m$. I beräkningarna har antialiasingnivån satts till två. Stolparna visar 95% konfidensintervall för en exponentialfördelning med $\bar{\sigma} = \langle \sigma_{IEM} \rangle$. Stråltätheten anges i $[m]$ och bump res i $pixlar/m^2$.

Ovanstående figurer visar att rimlig konvergens erhållits då stråltätheten är 1 cm förutom, vid strykande infall. I beräkningstid skiljer minst en faktor 10 mellan närliggande upplösningar vilket tillsammans med låga målytenivåer vid strykande infall gör att stråltätheten 1 cm godtas. I den vänstra figuren har antalet pixlar varierats. Vi ser att en pixelupplösning på $256*256 / m^2$ ger acceptabla resultat. Vi noterar också att den koherenta termen inte verkar vara speciellt beroende av vilken bump-upplösning som används. Detta är helt naturligt eftersom upplösningen inte påverkar bumpens djup utan endast dess korrelationsfunktion vilken i sin tur inte påverkar den koherenta spridningstermen. Man måste beakta att kurvorna i figur (b) representerar resultaten från tre olika ytor. Vi noterar att den röda kurvan ligger utanför konfidensintervallet för $\langle \sigma_{IEM} \rangle$ vi drar därför slutsatsen att $64*64$ pixlar/ m^2 inte tillräckligt noga beskriver en yta med denna korrelationsfunktion.

3.2 Ytor med liten skrovlighet

Bump-mapping i SPECRAY sker med samma fysikaliska antaganden som spridning mot ytor med liten skrovlighet där medellutningen är mindre 0.25 och $kL > 6$, se ref [11],[6],[8]. Således förväntar vi oss en god överensstämmelse mellan bump-mapping och Kirchoffmetoden för denna skrovlighet.

Jämförelse mellan IEM-metoden och SPECRAY EM för en bumpmappad yta med $k\sigma_h = 0.42$ och $kL = 6.3$, vilket ger en medellutning på $\sqrt{2}\sigma_h / L \approx 0.1$. Resultaten presenteras i Figur 6.

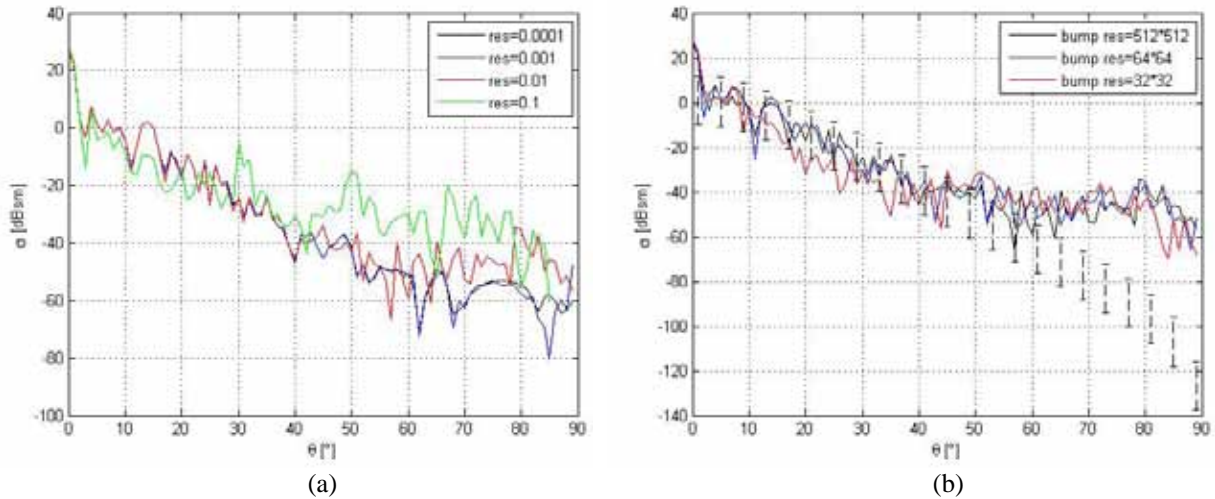


Figur 6: Jämförelse vid HH-polarisation, mellan diffus spridning beräknad med IEM (streckad linje), diffus spridning beräknad med Kirchoffmetoden för små ytlutningar (punkt-streckad linje), koherent spridning beräknad med Kirchoffmetoden (x linje) och med SPECRAY EM (heldragen linje) för en kvadratisk platta med kantlängden 0.5 m. Bumpen har gaussisk höjd- och korrelationsfunktion med $kL = 6.3$ och $k\sigma_h = 0.42$. I bump-beräkningen har en textur på $512 * 512$ pixlar/ m^2 och stråltätheten 0.0001m använts. Stolparna visar 95 % konfidensintervall för en exponentialfördelning med $\bar{\sigma} = \langle \sigma_{IEM} \rangle$.

För en yta med denna skrovlighet blir skillnaderna mellan HH- och VV-polarisation försumbara varför endast HH-polarisationsresultatet redovisas.

Vi ser från Figur 6 att en mycket god överensstämmelse fås mellan SPECRAY, IEM och Kirchoffmetoden. Man noterar att en viss avvikelse mellan IEM och Kirchoffmetoden fås vid strykande infall. I detta område bör båda metoderna användas med försiktighet eftersom bl.a. diffraktionsfenomen kan ge upphov till en betydande del av spridningen, något som inte inkluderas i de statistiska modellerna. Mest tillförlitlig är dock IEM-resultatet då denna inkluderar ytterligare korrektioner till den fysikalisk optik ytström som blir alltmer inkorrekt vid strykande infall och som används i Kirchoffmetoden. Man noterar att även för denna yta ger SPECRAY EM högre radarmålytenivåer vid strykande infall än de statistiska modellerna. Effekten är inte lika påtaglig som för tidigare yta då medellutningarna vid kanterna är mindre vilket ger en mindre projicerad yta mot det infallande fältet. Även för denna yta ligger bump-resultatet, i det område där den diffusa spridningen dominerar, inom det 95 % konfidensintervall som visas av stolparna i Figur 6. För denna yttyp överstiger SPECRAY EM IEM för ca 40 % av vinklarna i intervallet 5° - 50° , där den diffusa termen dominerar. Enligt tidigare resonemang indikerar detta att SPECRAY EM och IEM ger samma markmålarea. Värt att notera att området, där god överensstämmelse mellan SPECRAY och IEM fås, minskar till $\theta < 50^\circ$ jämfört med tidigare yta där god överensstämmelse gavs för vinklar $\theta < 70^\circ$. Man noterar att denna yttyp ger en betydligt snabbare avtagande markmålarea, samt lägre nivåer fås för infallsvinklar $\theta < 20^\circ$. De låga radarmålytenivåerna gör att den koherenta kanttermens betydelse ökar eftersom den beror

av projektionen av höjdvariansen på z-axeln och därmed inte avtar lika snabbt som den diffusa delen. Vid strykande infall uppfattas ytan som alltmer plan vilket medför att kanntermen endast beror av ytans dimensioner vid flacka infall.



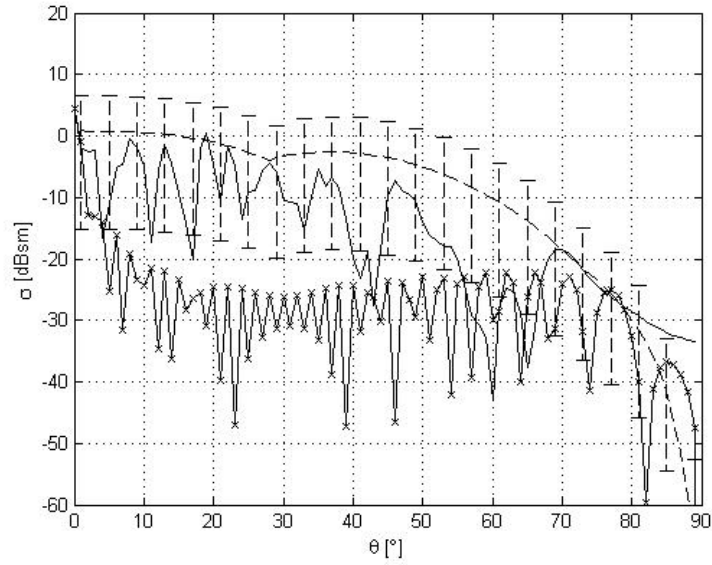
Figur 7 (a) - (b): Konvergenstest av stråltäthet (a) och pixelupplösning (b) för en bump med gaussisk höjd- och korrelationsfunktion där $kL=6.3$ och $k\sigma_h=0.42$. I den vänstra figuren har pixelupplösningen $512 * 512 / m^2$ använts. Den högra figuren visar resultaten då pixelupplösningen varierats men då stråltätheten hållits konstant till $0.01 m$. I beräkningarna har antialiasingnivån satts till två. Stolparna visar 95 % konfidensintervall för en exponentialfördelning med $\bar{\sigma} = \langle \sigma_{IEM} \rangle$. Stråltätheten anges i $[m]$ och bump res i $pixlar/m^2$.

Denna ytskrovlighet ger upphov till större konvergenkänslighet. Vi ser att stråltätheten 0.1 ger kraftigare avvikelser från blå kurva än för tidigare yttyp. En förklaring till ökande känslighet är de låga nivåerna gör att varje enskilt strålknippe betydelse ökar vilket kan ge ovan nämnda effekt. Vi noterar att stråltätheten 0.01 ger konvergens i området $\theta < 50^\circ$, där god överensstämmelse med IEM fås.

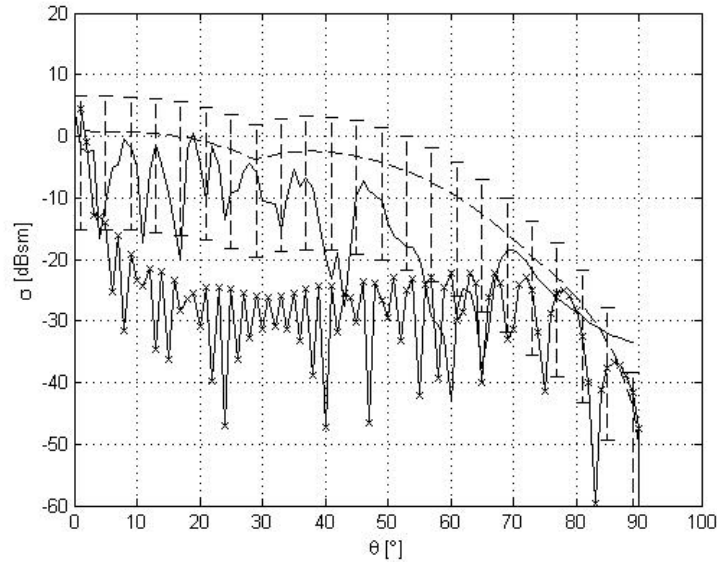
Från figur (b) syns att resultaten är relativt okänsliga för vilken bump-upplösning som används vilket beror på att korrelationslängden är större för denna yta. En stor korrelationslängd ger ett snävare ytspektrum vilket sin tur tillåter lägre samplingsfrekvens.

3.3 Medelskrovliga ytor

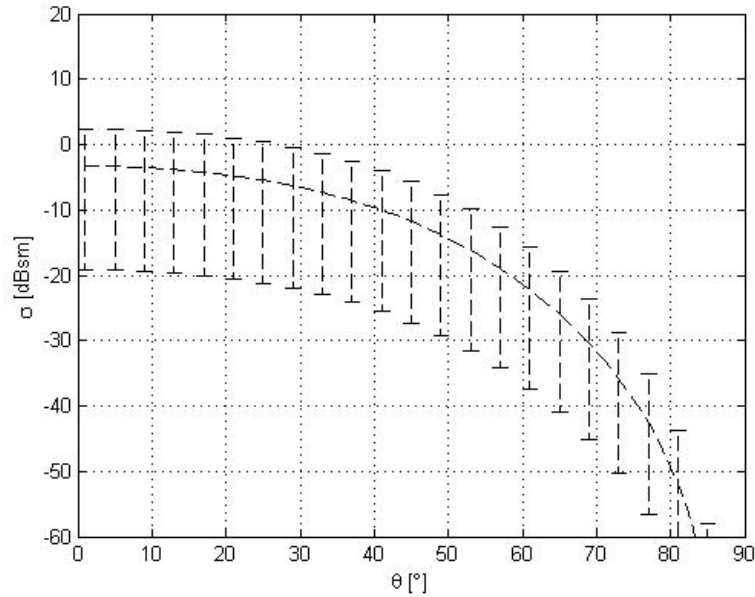
Ytor där medellutningen varierar mellan $0.5 \leq \sigma_{rms} \leq 1.5$ kallas medelgrova ytor och förekommer inte ofta i naturen. Det är dock inte otänkbart att vissa "mänskliga" störningar kan ge upphov till dessa ytparametrar varför dessa ändå studeras. För den här typen av ytor kan multipelspridningstermer vara betydande [8]. Som tidigare nämnts beaktas inte multipelspridning vid bump-mapping i SPECRAY EM. För ytor med denna grovhet kommer också korspolarisationsbidraget i bakåtspridningsriktningen vara skiljd från noll. Korspolarisationsbidraget kan visas [6] härröra från multipelspridningstermer, något som inte heller beaktas vid Kirchoffspridning. En jämförelse mellan SPECRAY EM och IEM med multipelspridningsbidrag inkluderat visas i figurerna Figur 8- Figur 10.



Figur 8: Jämförelse vid HH-polarisation, mellan diffus spridning beräknad IEM (streckad linje) diffus spridning beräknad med Kirchoffmetoden för små ytlutningar (punkt-streckad linje), koherent spridning beräknad med Kirchoffmetoden (x linje) och SPECRAY EM (heldragen linje) för en kvadratisk platta med kantlängden 0.5 m. Bumpen har gaussisk höjd- och korrelationsfunktion med $kL=3$ och $k\sigma_h=1.5$. I bump-beräkningen har en textur på $512 * 512$ pixlar/ m^2 och stråltätheten 0.0001m använts. Stolparna visar 95 % konfidensintervall för en exponentialfördelning med $\bar{\sigma} = \langle \sigma_{IEM} \rangle$.



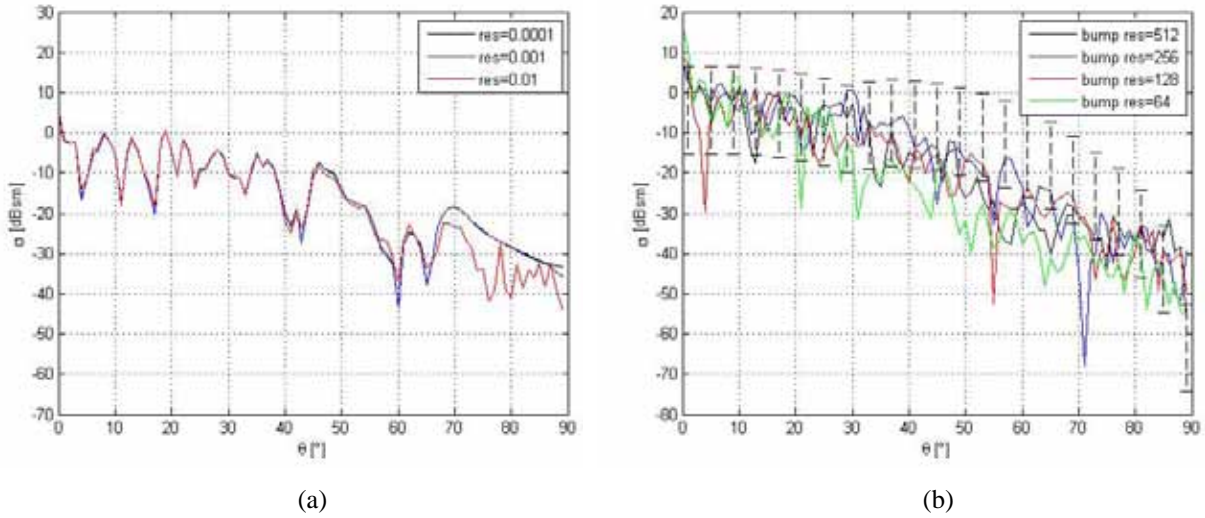
Figur 9: Jämförelse vid VV-polarisation, mellan diffus spridning beräknad IEM (streckad linje) diffus spridning beräknad med Kirchoffmetoden för små ytlutningar (punkt-streckad linje), koherent spridning beräknad med Kirchoffmetoden (x linje) och SPECRAY EM (heldragen linje) för en kvadratisk platta med kantlängden 0.5 m. Bumpen har gaussisk höjd- och korrelationsfunktion med $kL=3$ och $k\sigma_h=1.5$. I bump-beräkningen har en textur på $512 * 512$ pixlar/ m^2 och stråltätheten 0.0001m använts. Stolparna visar 95 % konfidensintervall för en exponentialfördelning med $\bar{\sigma} = \langle \sigma_{IEM} \rangle$.



Figur 10: Visar diffus spridning för HV- och VH-polarisation beräknad IEM (streckad linje). Stolparna visar 95 % konfidensintervall för en exponentialfördelning med $\bar{\sigma} = \langle \sigma_{IEM} \rangle$. Notera att det koherenta Kirchoffbidraget och SPECRAY EM-beräkningen inte ger något korspolarisationsbidrag i det monostatiska fallet.

Man noterar från Figur 8-Figur 10 att i princip samma resultat fås för HH- som för VV-polarisation. Endast små skillnader uppkommer vid strykande infall. En mycket god överensstämmelse mellan den koherenta Kirchofftermen och SPECRAY EM fås i områden där den koherenta termen är dominerande, $\theta \approx 0^\circ$ och $\theta > 80^\circ$. För övriga infallsvinklar, där det diffusa bidraget dominerar ger IEM högre radarmålytenivåer. Det bör påpekas att SPECRAY EM resultatet med god marginal ligger inom det 95 % konfidensområdet som begränsas av stolpdiagrammen. Vi kan således inte från ovanstående data med 95 % säkerhet förkasta SPECRAY EM-resultatet. För denna typ av yta utgör, som tidigare nämnts, multipelspridningsbidraget som inte beaktas i SPECRAY EM en betydande del av målytan. Med kännedom om att samma fysikaliska ansatser görs vid bump-mapping som vid statistisk markmålaberäkning med Kirchoffmetoden, och då denna ger lägre markmålaberäkningar än IEM för denna typ av yta bör därför bump-mapping användas med försiktighet för infallsvinklar långt från ytans normalriktning. För korspolarisationsbidraget som visas i Figur 10 blir den koherenta termen, Kirchofftermen och SPECRAY EM bidraget noll vilket gör att man kan med 95 % säkerhet förkasta hypotesen att korspolarisationsbidrag är nära noll. Man noterar också att korspolarisationstermen är ca 5 dB lägre än HH- och VV-polarisationstermerna.

Konvergensberäkningsresultat illustreras i Figur 11.

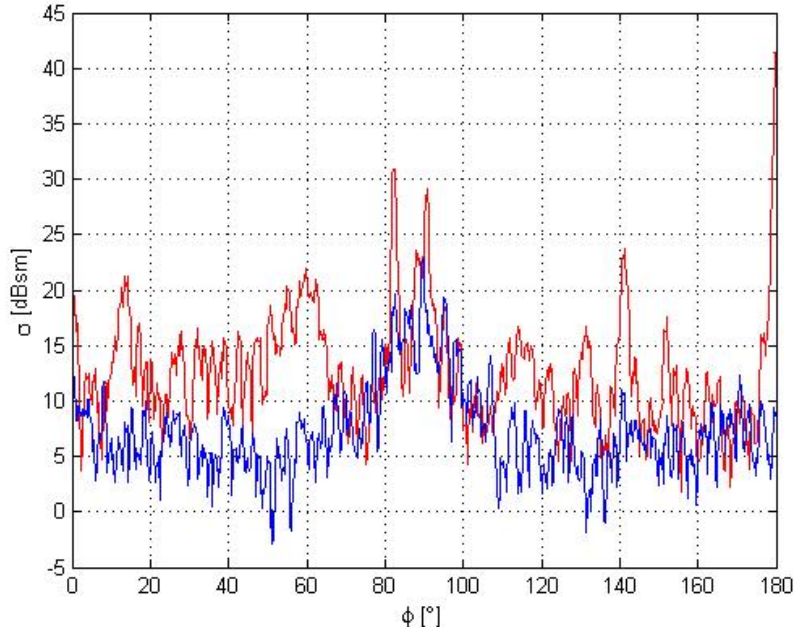


Figur 11: Konvergenstest av stråltäthet (a) och pixelupplösning (b) för en bump med gaussisk höjd- och korrelationsfunktion där $kL=3$ och $k\sigma_h=1.2$. I den vänstra figuren har pixelupplösningen $512 * 512 / m^2$ använts. Den högra figuren visar resultaten då pixelupplösningen varierats men då stråltätheten hållits konstant till $0.01 m$. I beräkningarna har antialiasingnivån satts till två. Stolparna visar 95 % konfidensintervall för en exponentialfördelning med $\bar{\sigma} = \langle \sigma_{IEM} \rangle$. Stråltätheten anges i $[m]$ och bump res i $pixlar/m^2$.

Man noterar från Figur 11 (a) att resultaten är okänsliga för vilken stråltäthet som använts. Endast små avvikelser noteras vid strykande infall mellan 0.0001- och 0.01-fallen. Från figur (b) syns att resultaten är okänsliga i intervallet 3° - 25° där samtliga resultat ligger innanför stolparna. För alltmer strykande vinklar tenderar resultaten att divergera. Skillnaderna i detta intervall mellan svart, blå och röd kurva anses dock vara relativt små varför vi anser oss ha en acceptabel konvergens vid bump res =128. Grön kurva tenderar att underskatta radarmålytan varför denna anses vara icke-konvergent. Vid $\theta=0^\circ$, där den koherenta termen kraftigt dominerar, överskattar grön kurva de andra kurvorna med ca 8 dB. En orsak till är att inte bara ytans korrelationslängd bestämmer hur tätt den skall samplas, utan även dess höjdvarians. Detta beror på att som tidigare nämnts används för att bestämma ytans lutningar. Eftersom ytlutningarna kan vara stora och endast linjärinterpoleras ställer detta krav på att interpolationsavståndet (pixelupplösningen) är liten för att få en korrekt beskrivning av ytorna. Uppenbarligen räcker inte $64 \text{ pixlar}/m^2$ för att tillräckligt noggrant bestämma ytlutningarna vilket medför att dessa underskattas och därmed ger högre radarmålytenivåer. Fasbumpning, i vilken ingen hänsyn tas till ytnormaler, ger betydligt mindre skillnader vid $\theta=0^\circ$ vilket ytterligare understryker höjdvariansens inverkan på samplingsstätheten.

3.4 Jämförelse av beräkningsresultat av T-72 med och utan bump-mapping

Bump-mapping algoritmen har validerats mot IEM i tidigare avsnitt. För att undersöka mer komplicerade objekt har jämförande beräkningar vid 35 GHz av en T-72 stridsvagn, med och utan bump gjorts. Dessa presenteras i Figur 12.



Figur 12: Visar flytande medelvärde av radarmålarean över 1° (fyra sampel), vid 35 GHz VV-polarisation, för en T-72 stridsvagn som är beräknad med (blå) och utan (röd) bump-textur. Infallsvinkeln är, $\theta=70^\circ$, från vertikal axel. Stridsvagnen är metalliserad och bump-texturen är isotrop och har en gaussisk höjd- och korrelationsfunktion där $kL=6$ och $k\sigma_h=1$.

Bump-texturen har kraftigt reducerat radarmålarean i medel med ca 10 dB. För vinklar där den släta T-72 stridsvagnen uppvisar höga signaturer dämpas radarmålarean mer. Extremfallet är vid $\phi=180^\circ$ där en reduktion på ca 35 dB noteras. Överlag reduceras målytan mer där den plana stridsvagnen uppvisar höga signaturer vilket beror på att en stor del av fasetternas ytor pekar mot radarn. Som tidigare nämnts är den koherenta dämpningen som störst i detta fall eftersom den beror av projektionen av vågen på ytans normal. Detta kan dock inte förklara hela reduktionen eftersom denna i maximalt, enligt Kirchoffspridning, kan vara $e^{-4} \approx -17$ dB. Eventuellt kan denna kraftiga reduktion vara en effekt destruktiv interferens som uppkommer mellan delytor. Att den bara uppkommer i bump-mapping fallet beror i så fall på att endast positiva undulationer kan hanteras i bump-texturen vilket ger en offset på ytorna som kan ge destruktiv respektive konstruktiv interferens även om det otexturerade fallet inte ger denna effekt. Man noterar att liknande radarmålytenivåer och typ utseende fås för T-72 stridsvagnen som för ZSU-23-4 vagnen som visas i Figur 1. För att mer noggrant beräkna stridsvagnen bör olika bump-textur användas på olika delar av stridsvagnen. Man bör också mäta upp fordonsskorv för ett antal olika objekt för att se vilken typ av skrovlighet ytorna har. Detta kan göras med exempelvis laserinmätningstekniker. Därefter "tillverkas" bump-texturer som appliceras på cad-modeller och radarmålarean beräknas.

4 Slutsatser och diskussion

Bump-mapping-funktionen i fysikalisk-optik-programmet SPECRAY EM har utvärderats. Metoden innehåller fysikaliskt samma approximationer som Kirchoffspridning [5], [8] och överensstämmer därför bra med IEM för ytor med liten skrovlighet och där korrelationslängden är relativt stor i förhållande till våglängden, $kL > 6$, och ytans medellutning är mindre än 0.25. Vid icke-strykande infall, till ca 50° från normalen, ges acceptabla resultat även för $kL \approx 3$. För den koherenta termen, som är dominerande i vinklar nära ytans normalriktning, ges god överensstämmelse för alla typer av ytor. Man måste dock beakta att jämförelsen för den koherenta termen endast gjorts med den koherenta Kirchofftermen, där exempelvis kanteffekter och korrektioner för ytkrökningar försummas. Dessa effekter är oftast små nära ytans normalriktning [6] vilket motiverar en negligering av dessa. Vid beräkningar av icke-smyganpassade objekt, som exempelvis stridsvagnar och stridsfordon, är i många fall den koherenta termen den största bidragaren och de diffusa termerna kan därför ignoreras. Detta förutsätter dock att objektet består av komplicerade struktur vars normaler är riktade mot den infallande vågen. Beräkningar ha gjorts på en T-72 stridsvagn som har texturerats med en bump-textur. Resultaten visar på en kraftig reduktion av radarmålarean i de flesta riktningar och bör därför alltid göras vid beräkning av stridsfordon vid hög frekvens.

Vid användning av bump-mapping i SPECRAY EM bör, om bumpen har gaussisk höjd- och korrelationsfunktion, göras med minst 2 pixlar/korrelationslängd. Förvisso har konvergens erhållits vid så låg samplingstakt som 1.3 pixlar/korrelationslängd (se Figur 5) men för denna yttyp är de överensstämmelsen med IEM dålig varför denna yta med försiktighet bör beräknas med IEM. För samtliga yttyper har konvergens erhållits med en stråltäthet på 1 cm och en antialiasingnivå på 2 [2] vilket maximalt ger en stråltäthet på 2.5 mm vilket är ca 2 strålar / korrelationslängd.

För att med säkerhet kunna modellera exempelvis en stridsvagnsyta krävs att denna mäts med exempelvis en laserscanner och därifrån skapa en syntetisk yta. Man får då en uppfattning om vilken korrelationsfunktion och höjdvarians ytan har och vid vilka frekvenser bump-mapping är nödvändig eller möjlig för att så noggrant beskriva objektets radarmålarean. Som tidigare nämnts fungerar bump-mapping bäst då frekvensen är hög jämfört med ytans undulationer vilket också är i det frekvensområde ytans skrovlighet påverkar radarmålarean mest.

5 Referenser

- [1] H.-J. Mametsa, "Comparisons between calculations and measurements on ZSU 23-4." Toulouse, 2005.
- [2] P. Pitot and P. Nguyen, "SPECRAY EM user guide," FERM/028 - 2003.17/A - v 1.7, 2003.
- [3] P. Rivaillion, "SDM Physical Material Extension (MPS) File Format," OKTAL-SE 85- 97.59/A - v 1.3, 2005.
- [4] P. Rivaillion, "Physical Material Texture (ÍPS) File Format," OKTAL-SE 85- 97.48/B - v 1.3, 2005.
- [5] J. A. Ogilvy, *Theory of wave scattering from random rough surfaces*: IOP Publishing, 1991.
- [6] A. K. Fung, *Microwave Scattering and Emission Models and Their Applications*. Boston: Artech House, 1994.
- [7] F. T. Ulaby, R. K. Moore, and A. K. Fung, *From Theory to Applications*, vol. 3. Norwood MA: Artech House, 1986.
- [8] M. Gustafsson, S. Nilsson, J. Rahm, and E. Zdansky, "Modelleringsmetoder för bistatisk markspredning - Litteraturstudie-", FOI-R--0825--SE, 2003.
- [9] M. e. a. Gustafsson, "Mätning och beräkning av bistatisk RCS för marktytor," Linköping FOI-R--1806--SE, 2005.
- [10] N. Levanon, "Radar principles," John Wiley & Sons, 1988.
- [11] F. T. Ulaby, R. K. Moore, and A. K. Fung, vol. III: Artech House, 1986.