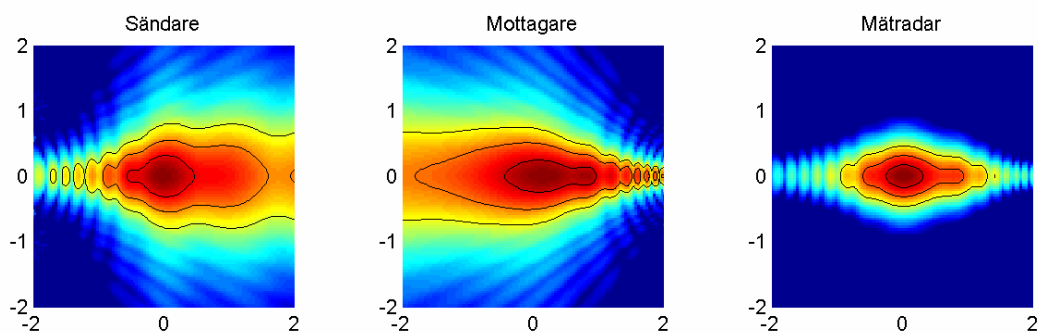


Erik Zdansky, Magnus Gustafsson, Nils Gustafsson
Stefan Nilsson, Jonas Rahm, Johan Rasmusson

Mätmetoder för bistatisk markmålarea - en förstudie -



TOTALFÖRSVARETS FORSKNINGSINSTITUT

Sensorteknik

Box 1165

581 11 Linköping

FOI-R--0575--SE

September 2002

ISSN 1650-1942

Metodrapport

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

Mätmetoder för bistatisk markmålarea

- en förstudie -

Utgivare Totalförsvarets Forskningsinstitut - FOI Sensorteknik Box 1165 581 11 Linköping	Rapportnummer, ISRN FOI-R--0575--SE	Klassificering Metodrapport
	Forskningsområde 6. Telekrig	
	Månad, år September 2002	Projektnummer E 3015
	Verksamhetsgren 5. Uppdragsfinansierad verksamhet	
	Delområde 62. Signaturanpassning	
Författare/redaktör Erik Zdansky Magnus Gustafsson Nils Gustafsson Stefan Nilsson Jonas Rahm Johan Rasmusson	Projektledare Jonas Rahm	
	Godkänd av Svante Ödman	
	Uppdragsgivare/kundbeteckning Försvarsmakten	
	Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig Jonas Rahm	
Rapportens titel Mätmetoder för bistatisk markmåladarea - en förstudie.		
Sammanfattning (högst 200 ord) Den effektiva signaturen för ett mark- eller sjöobjekt bestäms inte bara av dess frirymdssignatur utan även av dess växelverkan med omgivningen via multipelspridning. För att dessa effekter ska kunna förutsägas och markfordon och fartyg ska kunna specificeras ur signatursynpunkt krävs data om bistatisk spridning för mark. Markspridningen kan delas in i en spekulär och en diffus del. Denna studie är särskilt inriktad på mätning av den senare, för vilken tillgången på bistatiska data ännu är mycket begränsad. Mätning av markspridningsegenskaperna erbjuder delvis andra problemställningar än vanlig målareamätning, t ex är ju geometrin bistatisk och marken har i princip oändlig utbredning. Detta medför att belyst area måste korrigeras för tapering och att mättradarn måste flyttas mellan olika aspektvinklar. Utgående från relevanta markspridningsgeometrier inriktar sig studien på att identifiera vilka särskilda krav mätningarna ställer och att finna möjliga lösningar. T ex kan nämnda problem delvis kringgås om hjälpprefektor användas. Slutligen analyseras för- och nackdelar med några tänkbara mätuppställningar.		
Nyckelord RCS, radarmåladarea, markmåladarea, bistatisk, radarmätning, radarreflektivitet, markspridning, mark-mål-växelverkan, diffus spridning		
Övriga bibliografiska uppgifter	Språk Svenska	
ISSN 1650-1942	Antal sidor: 39 s.	
Distribution enligt missiv	Pris: Enligt prislista	

Issuing organization FOI – Swedish Defence Research Agency Sensor Technology P.O. Box 1165 SE - 581 11 Linköping	Report number, ISRN FOI-R--0575--SE	Report type Methodology Report
	Research area code 6. Electronic warfare	
	Month year September 2002	Project no. E 3015
	Customers code 5. Contracted research	
	Sub area code 62. Stealth Technology	
Author/s (editor/s) Erik Zdansky Magnus Gustafsson Nils Gustafsson Stefan Nilsson Jonas Rahm Johan Rasmusson	Project manager Jonas Rahm	
	Approved by Svante Ödman	
	Sponsoring agency Swedish Armed Forces	
	Scientifically and technically responsible Jonas Rahm	
Report title (In translation) Measurement methods for bistatic ground reflectivity - A pilot study		
Abstract (not more than 200 words) The effective radar signature of ground or sea objects is determined not only by its free-space radar cross section but also by its interaction with the environment through multiple scattering. In order to predict this interaction data on bistatic scattering properties of the ground (sea) surface is required. It is customary to make a distinction between specular and diffuse ground scattering. This study is focussed on the measurement of the latter, for which bistatic data is still scarce. Compared to regular monostatic measurements of object cross sections additional aspects need to be considered i.e. the geometry is bistatic and the ground surface is, in principle, infinite. Due to this antenna tapering corrections are always needed and the radar needs to be moved around. Starting from potentially relevant ground scattering geometries the study concentrates on identifying the special requirements for measurements of this kind and on finding possible solutions. The problems mentioned may for example be partly circumvented by using an auxiliary reflector. Finally the pros and cons of some plausible measurement setups are investigated.		
Keywords RCS, radar cross section, bistatic, bistatic scattering coefficient, measurement, radar reflectivity, ground scattering, ground-target interaction, diffuse scattering		
Further bibliographic information	Language Swedish	
ISSN 1650-1942	Pages 39 p.	
Price acc. to pricelist		

Innehåll

Inledning.....	5
Litteratur.....	7
Multipelreflexion via omgivningen.....	8
Markspidningsparametrar.....	8
Spekulär växelverkan.....	8
Diffus växelverkan.....	9
Signifikanta spridningsvägar.....	10
Relevanta bistatiska geometrier för markspidning.....	11
Mätprinciper.....	16
Mätgeometrier.....	16
Monostatiska mätningar.....	16
Bistatiska mätningar.....	16
"Tristatiska mätningar".....	17
Mätning nära strykande reflexionsförhållanden.....	17
Polarisation.....	18
Närfält och fjärrfält.....	18
Kalibrering.....	19
Aperturkontroll.....	20
Positions- och riktningskänslighet, upplösning.....	23
Avståndsupplösning.....	24
Utrustning och hjälpmedel.....	25
Tillgängliga mätsystem.....	25
Lilla Gåra.....	25
Arkensystemet.....	27
NRL-båge.....	28
Wiltron 37269B.....	29
Antennndiagram.....	29
Sekundärreflektorer.....	30
Stödstrukturer och fästen.....	30
Absorbenter och skärmar.....	30
Positionering av utrustning (sändare, mottagare, hjälprelektorer etc).....	30
Statistiska variationer.....	31
Mätning av inriktning och position.....	31
Mätning av lutningsvinkel.....	31
Mätning med radar.....	32
Mätning med laser.....	32
Optisk mätning utan laser.....	32
Mätplats.....	33
Dokumentation av mätförhållanden.....	33
Fukthalt, jordartsbestämning, temperatur.....	33
Jordmånsprofil.....	33
Vegetation.....	34
Speciella mätförhållanden.....	34
Anlagda markprov.....	34
Mätning i marin miljö.....	34
Några implementeringsförslag.....	35
Direkt bistatisk mätning.....	35
Implementering på Lilla Gåra.....	35
"Tristatisk" mätning.....	36
Referenser.....	38

Inledning

Signaturanpassning innebär taktiska fördelar, informationsöverläge och dessutom ökad överlevnadsförmåga. Signaturanpassningsteknikområdet (SAT-området) har därför utpekats som en prioriterad utvecklingsgren inom försvaret och anses som en viktig del vid såväl nykonstruktion som modifiering av olika plattformar. Välkända amerikanska och relativt resurstunga utvecklingsprojekt är flygplanen F-117 och B2 som kombinerar formgivning och materialval för att försvåra upptäckt. Generellt kan man säga att SAT-området har haft sin tyngdpunkt på, och därför också inriktats mot och präglats av flygfallet. Man har utvecklat verktyg för att beräkna och optimera radarmålarean för en viss hotbild för objekt i frirymd. Det finns dock en hel del problemställningar kvar att lösa inom detta område innan man kan anse sig ha god kontroll på verktygens giltighet och tillämpning, se t ex referens [1].

På senare år har SAT även applicerats på sjö- eller markbundna plattformar, t ex fartyg och terrängfordon. När det gäller markbundna objekt kommer flera ytterligare problem- och frågeställningar in, som exempelvis hur man modellerar mark, hur radarsignaturen påverkas av växelverkan mellan mark och objekt, m m. Bland annat på grund av svårigheten att modellera mark har man utformat plattformarna ur ett frirymdsperspektiv och därmed satt frirymdskrav på objektens radarmålarea. Detta innebär att kraven varken varit särskilt relevanta eller realistiska för dessa plattformar. Dock har man varit medveten om problemet och gjort en del uppskattningar på hur stor markens inverkan är på den totala signaturen [2, 3]. När det gäller verifiering genom mätningar blir förhållandet omvänt. Frirymdsmätningar är generellt svårare att utföra än markmätningar på fullskaleobjekt, mätningarna görs ofta i ett begränsat vinkelintervall och bara på mätplatsens konstlade mark. Det är därför mycket viktigt att man redan från början av utvecklingsarbetet med nya markbundna plattformar kan ta hänsyn till olika marktyper, och motsvarande gäller i sjöfallet.

Man kan således identifiera tre områden som måste studeras och utvecklas för att vi nationellt ska ha god förmåga att kunna utföra tillförlitliga signaturanpassningsåtgärder på olika objekt. För det första: Utveckla, implementera och validera olika verktyg för radarmålareaberäkningar. Man måste också skaffa bättre kännedom om gränserna för metodernas tillämplighet. Det blir då möjligt att ställa toleranskrav på CAD-underlag och tillverkning och att göra prioriteringar för vidare kodutveckling. Man skall också vara medveten om att beräkningsresultat till stor del ligger till grund i duellsimuleringsverksamheten, vilket ytterligare understryker behovet av att ha tillförlitliga och noggranna beräkningsverktyg. För det andra: Skaffa förmågan att göra relevanta och realistiska markmodeller för att redan på designstadiet, och även för duellsimuleringsverksamheten, kunna ta hänsyn till markens inverkan på radarsignaturen. För det tredje: För de ovan nämnda punkterna krävs ett betydande valideringsarbete. Därför krävs både mätmetodutveckling och modifiering av de befintliga mätsystemen. Mätningar och beräkningar behöver gå hand i hand så att de kan bekräfta varandra och ge ett stabilt beslutsunderlag.

I referensen [4] redovisas det pågående arbetet på FOI med att utveckla modelleringsmetoder för att ta hänsyn till interaktionen mellan målobjekt och markbakgrund. I referens [5, 6] presenteras en mätning respektive en jämförelse mellan beräknade och mätta data för ett typfall som utgörs av en rektangulär platta med variabel lutning vars ena sida vilar mot skrovlig mark. Jämförelsen av resultaten visade betydande diskrepanser. För att på ett systematiskt och effektivt sätt kunna gå vidare med att utveckla bakgrundsmodeller krävs, som nämnts ovan, mätdata med god noggrannhet och precision att jämföra med. I föreliggande rapport kommer fokus ligga på att beskriva 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 växelverkan med omgivningen.

Centralt för beräkning av de effekter växelverkan med omgivningen har på ett fordon eller fartygs signatur är att ha tillgång till lämpliga beskrivningar av hur marken eller havsytan sprider radarvågor för olika kombinationer av infalls- och spridningsriktningar. Dessa beskrivningar kan ligga på olika nivåer och implementeras på olika sätt. En indelning som vi tidigare [4] använt oss av är 1) medelvärden, 2) beskrivning av statistisk spridning kring dessa medelvärden och 3) fullt koherenta beskrivningar för korrekt simulering av högupplösta signaturer (avståndsp profiler och SAR-bilder). Vi vill här lägga tyngdpunkten på de bistatiska spridningsfunktionerna som är en beskrivning på nivå 1, helst kompletterad till nivå 2 med någon form av statistisk beskrivning av variationerna. Förutom dessa funktionsbeskrivningar kan terrängen också beskrivas med CAD-modeller uppbyggda av olika typer av elementarspridare. Dessa modeller når i princip nivå 3 men ger beräkningsmässiga problem, dels därför att terrängavsnitt långt från objektet kan delta i växelverkan, dels för att de kräver mycket minne och beräkningstid. Hittillsvarande arbete, som legat på nivå 1 [4, 7, 28] och nivå 3 [4, 8], har visat att växelverkan kan vara betydelsefull, och för att nå kvantitativt korrekta resultat lämpliga för hot- och signaturvärdering är det nu nödvändigt att skaffa kunskaper om markens spridningsegenskaper på en grundläggande nivå.

Ett viktigt mål måste därför vara att jämföra olika beskrivningar med varandra och med mätningar med hänsyn tagen till olika spridningsgeometriers relevans. Som förutsättning för detta måste man också söka lämpliga metoder för mätning och utvärdering. På längre sikt kan ett mål vara att finna alternativa metoder för att nå nivå 3. Planerat arbete inom CEPA har beräkning av växelverkans inverkan på högupplösta radarsignaturer som mål.

Denna studie är avsedd att ge en generell översikt av möjligheter och problem vid mätning av markmålarea. Därför är den inte inriktad på något visst frekvensområde, men för låga frekvenser får man räkna med att andra eller modifierade metoder måste tillämpas. Praktiska försök bör inledningsvis begränsas till ett frekvensband, förslagsvis X eller K_u . Syftet är att finna lämpliga beskrivningar av den bistatiska markmålarean för att kunna uppskatta effekterna av växelverkan mellan mål och omgivning. Monostatiskt terrängklotter däremot är inte en växelverkanseffekt och behandlas därför inte här även om det i och för sig är av avgörande betydelse för detektionsgränserna. Omgivningen benämns här ofta mark eller terräng men kan vanligtvis lika gärna vara havsyta.

Litteratur

Litteraturen om monostatisk mätning av sjö- och terrängklotter är omfattande [9-13, 27] och arbetet för att bygga upp denna datamängd har varit mycket stort. Bistatiska markmåläreor eller bistatiska spridningsfunktioner, som behövs för förståelsen av växelverkan mellan mål och mark, är betydligt sämre kända och kräver dessutom fler, och delvis svårare, mätningar för att kartlägga.

En litteraturdatabassökning har genomförts [22] i syfte att kartlägga existerande mät- och modelleringsmetoder för bistatisk markspridning inom mikrovågsområdet. I förekommande fall har också närliggande våglängdsområden och spridning från havsytor och vegetation etc medtagits eftersom analogier ofta finns. Litteraturstudien kan delas upp på två sökvägar: sökning i befintlig FOI-litteratur och sökning i kommersiella databaser. En utförlig redovisning av litteratursökningen i databaser redovisas i [22], vilken kan betraktas som en bilaga till föreliggande rapportering.

Det slutgiltiga resultatet av litteratursökningen gav 190 referenser, där 122 omfattade undergruppen modellering/mätning, 25 st på Mätning & modellering, 33 st artiklar i undergruppen mätning och slutligen 10 st obestämda dvs då inte någon kategorisering kunnat göras p g a för lite information. Dessa artiklar har ändå bedömts vara av intresse för fortsatta studier inom området.

I undergruppen modellering/teori utgör referenser som innehåller någon av undergrupperna rough surface, skog, vegetation och sjö den största andelen av referenser. De metoder som är flest förekommande är Kirchhoff, IEM och BRDF, medan undergruppen mätutrustning till största delen utgörs av undergruppen radar.

Bland övrig litteratur inom området kan Beckmanns och Spizzichinos tidiga monografi [14] nämnas liksom Ogilvys [15] översiktsmonografi från 1991. Den senare redogör också utförligt för mellanliggande arbeten av översiktskaraktär. Long [11] har ett kort kapitel om bistatiskt klotter liksom den ledande monografin om bistatisk radar [16]. Long beskriver området som befinnande sig i ett tidigt utvecklingsstadium. Kirchhoffmetoder, som utgår från ansatser liknande fysikalisk optik finns bl a behandlade i [17-18] och har använts i [4, 7]. Få av de teoretiska modellerna tycks vara inriktade på vegeterad mark. En modell för bistatiskt klotter finns beskriven i [19] och har använts i [20] som också ger en översikt av sådana modeller. Som klottermodell är den storskalig ("odlade områden och skogsområden med inslag av små sjöar"), och den är dessutom bara prövad mot monostatiska data [20].

Utvecklingen inom datorgrafik med krav på naturtrogen återgivning av glans och textur har sannolikt lett till ett förnyat intresse för spridning av elektromagnetisk strålning från ojämna ytor. Med hänsyn till skillnaderna (våglängd, polarisation, koherens etc) kan sådana metoder troligen inte tillämpas på radarfallet utan vidare, men de bör heller inte lämnas obeaktade. Vi har försökt fånga upp detta genom att ta med BRDF (bidirectional reflectance distribution function) i litteratursökningen.

Litteraturdatabassökningen kommer att ligga till grund för en litteraturstudie inom området markmodellering. Litteraturstudien är tänkt att ingående förklara viktiga begrepp, vilka markspridningsmodeller som finns, deras giltighet och på vilka objekt de är applicerbara. Vidare kommer studien att utgöra en grund för vidareutveckling av markmodellering inom radarsignaturgruppen vid FOI i Linköping. Den slutliga litteraturstudien med slutsatser och kommentarer redovisas i mars 2003.

Multipelreflexion via omgivningen

Markspridningsparametrar

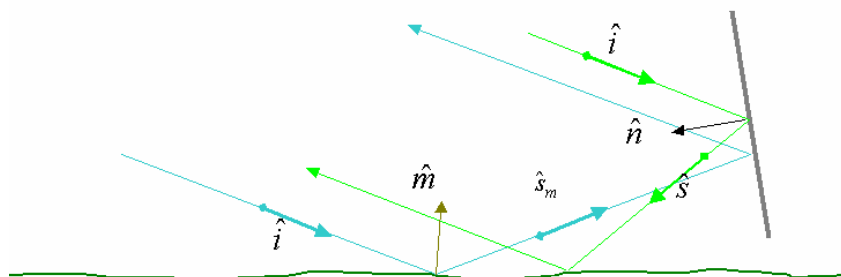


Fig 1 Multipelspridning via mark. Grön stråle speglas i plattan. Om marken är jämn nog kan strålen spridas spekulärt även i denna (blå stråle). De omvända strålgångarna ger liknande bidrag.

Fig 1 visar ett exempel på multipelspridning via mark. I exemplet ligger alla strålar i den infallande strålens vertikalplan, men formlerna nedan är generella.

Efter reflexion i plattan får strålen riktningen:

$$\hat{s} = \hat{i} - 2\hat{n}(\hat{n} \cdot \hat{i})$$

Den infallande och reflekterade strålens utbredningsriktningar och plattans ytnormal beskrivs i formeln av enhetsvektorer $\hat{i}$, $\hat{s}$ resp $\hat{n}$.

För tillräckligt jämn mark (havsyta) kan en riktning, den spekulära, komma att dominera spridningen från marken. Denna ges på motsvarande sätt av

$$\hat{s}_m = \hat{i} - 2\hat{m}(\hat{m} \cdot \hat{i}) = \hat{i} - 2\hat{z}i_z$$

Sista likhetstecknet gäller då $\hat{m} = \hat{z}$ d v s horisontell mark.

Spekulär växelverkan

De spekulära markreflexerna växelverkar koherent med direktreflexen vilket brukar hanteras med "F-faktorer" (se t ex Levanon [21] vars framställning dock inte är direkt tillämplig på smyg-anpassade mål). Vid spekulär reflexion, är spridningsamplituden, inte målarean, är proportionell mot den reflekterande ytans storlek. Därför är det reflexionskoefficienten¹, ρ , snarare än markmålarean,

¹ Distinktionen mellan reflexionskoefficient, reflektans och reflektivitet kan vara svår att se från själva orden. Kristensson [22] låter reflexionskoefficient beteckna amplitudkvoten, och reflektans effektkvoten vid spekulär reflexion. Levanon [21] tycks ansluta till detta bruk av termen reflexionskoefficient. I åtminstone viss radarlitteratur [11, 23] används radarreflektivitet mer eller mindre som synonym till radarmålarea, och kanske särskilt för area- eller volymsnormaliserad målarea (jfr optikens albedobegrepp).

σ_0 , som ger en relevant beskrivning av marken i detta sammanhang. Objekt faktorn i den term som står för växelverkan via spekulär markstuds är en bistatisk målares för objektet. Därutöver är interferensen med objektets frirymdsterm viktig. Markens reflexionskoefficient bestäms i huvudsak av markens jämnhet, dielektriska egenskaper, infallsvinkel och polarisation. Effekterna av ojämnheter (beskriven av standardavvikelsen σ_z) beskrivs t ex av en faktor kallad spekularitet, σ_s :

$$\langle \sigma_s^2 \rangle = \exp \left[- \left(\frac{4\pi\sigma_z \cos \theta}{\lambda} \right)^2 \right]$$

θ är infallsvinkeln och λ våglängden.

Korrelationslängden är ett uttryck för hur stora områden som i genomsnitt har tillräcklig koherens för spekulär spridning. Korrelationslängden bestämmer den spekulära lobens bredd. Som diskuteras nedan är spekularitet delvis en fråga om skala och avstånd. Lutningsvariationerna mellan olika spekulära delytor komplicerar därför bilden.

Växelverkan via spekulära reflexioner kan ge bidrag av samma storleksordning som målet. Liksom målreflexerna kan de trängas samman till ett begränsat vinkelintervall. Genom god utformning kan man undvika växelverkan via huvudloben och försöka få markreflekterade sidolober att grovt sammanfalla med vinkelintervallen för direktbidragen. Markojämnheter kommer dock alltid att sätta en gräns för hur väl man kan lyckas med det senare.

Diffus växelverkan

Den diffusa markspridningen kan förväntas ge relativt låga bidrag, men över betydligt större vinkelintervall. Därför kan den tänkas dominera den effektiva signaturen inom dessa och därför är det mätning av markens diffusa spridning som är huvudämnet för denna studie. Eftersom den diffusa markspridningens medelvärde är proportionellt mot den markyta som är belyst så beskrivs den av en specifik bistatisk markmålares, $\sigma_0(\hat{i}, \hat{s})$. De objektberoende faktorerna i de diffusa termerna är här belyst markarea, som kan beräknas geometriskt för en delyta i taget på målobjektet. Om omgivningen är stabil är det diffusa bidragets fas visserligen deterministisk, men den är ändå så godtycklig att bidraget vid beräkning brukar adderas inkoherent till direktbidraget.

Vi använder också termen bistatisk spridningsfunktion för att beteckna den funktion som för varje kombination av infallsriktning, $(\hat{i})$, och spridningsriktning, $(\hat{s})$, ger medelvärdet för $\sigma_0(\hat{i}, \hat{s})$. Den motsvarar eller är i varje fall starkt förknippad med BRDF, som brukar användas i det optiska området. Förutom $\hat{i}$ och $\hat{s}$ beror den bistatiska spridningsfunktionen av frekvens, polarisation, marktyp och marktillstånd etc vilka, om så önskas, kan anses vara argument till funktionen. Med infalls- och spridningsriktningar specificerade som vinklar (θ, φ) i ett sfäriskt koordinatsystem är den bistatiska spridningen en funktion av minst fyra variabler. För många marktyper kan man av symmetriskäl nöja sig med de tre kvantiteterna θ_i , θ_s och $\varphi = \varphi_s - \varphi_i$. Detta gäller dock inte t ex plöjd mark och havsvågor. Det kan t o m finnas fall där $\sigma_0(\theta_i, \varphi_i, \theta_s, \varphi_s) = \sigma_0(\theta_i, \varphi_i + 180, \theta_s, \varphi_s + 180)$ ej gäller, se Fig 2. En symmetri som däremot alltid anses gälla så länge linjära material är inblandade är reciprociteten, d v s att $\sigma_0(\hat{i}, \hat{s}) = \sigma_0(-\hat{s}, -\hat{i})$.

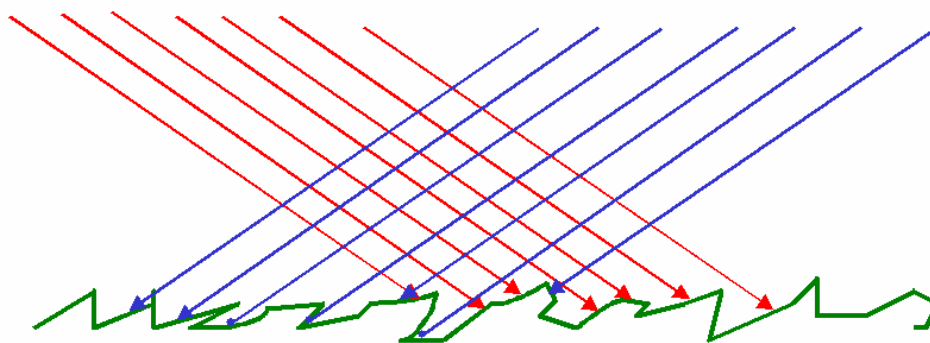


Fig 2 Ett fall där φ_i och φ_i+180 ej ger samma resultat. Strålar infallande från höger har rimligen större sannolikhet att absorberas genom multipelspridning i markkavititeterna.

De bistatiska funktionerna behöver kompletteras med beskrivningar av den statiska (klotterstatistik) och dynamiska variationen (t ex dopplerkomponenter från vindrörelser i vegetation) i markmålären. Vid mätning kommer man förstås att erhålla den bistatiska spridningsfunktionen med dessa statistiska variationer.

Signifikanta spridningsvägar

Indelningen i spekulär och diffus spridning är delvis en fråga om skala och avstånd och marken är till sin natur fraktal, d v s innehåller strukturer på många olika skalor. Gränsdragningen mellan spekulär och diffus växelverkan erbjuder därför betydande utmaningar, både när den ska tillämpas i en beräkningssituation och då man i en blandad situation vill separera mätresultat i spekulära och diffusa komponenter. Huvudprincipen kan sägas vara att indelningen är en makroskopisk beskrivning som tar vid där den mikroskopiska beskrivningens upplösning inte längre räcker till. Praktiskt kan det innebära att en CAD-modell används för att beskriva marktopografin ned till en viss skala och att spekularitet och bistatiska spridningsfunktioner anpassade till denna skala används för att beskriva de enskilda elementen.

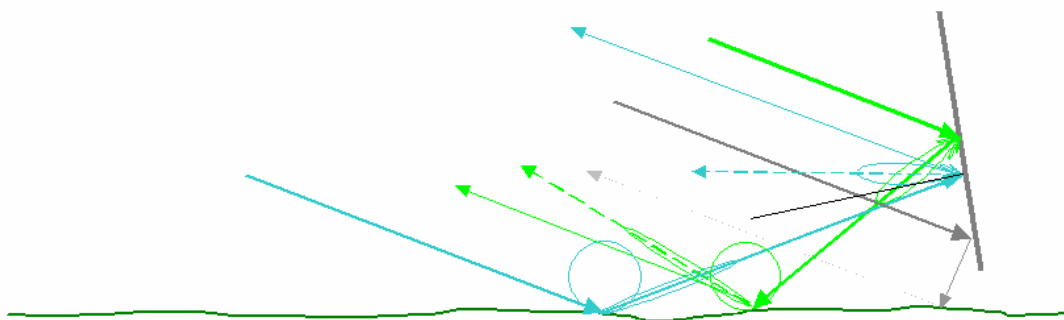


Fig 3 Några olika strålvägar för dubbelstuds. Grön stråle reflekteras av plattan och sprids sedan diffust av marken. Blå stråle reflekteras av marken som är delvis spekulär. Huvudloben av dess nästa reflexion i plattan är inte riktad mot radarn, men genom sidolober når en signal ändå fram. Den kraftigaste återspridningen fås i de streckade pilarnas riktningar, men eftersom de inte är riktade mot radarn bidrar de inte till målets effektiva signatur. Den grå strålen sprids först genom en sidolob till plattan och sedan diffust av marken, kombinationen av två svaga spridningar ger en svag signal.

För att en multipelreflexion ska ge signifikanta bidrag krävs naturligtvis att kombinationen av de ingående spridningsamplituderna inte blir för liten vilket i sin tur innebär att de flesta spridningarna bör vara starka, helst spekulära, se Fig 3. Man skulle kunna invända att övriga presumtiva strålvägar är så många fler. Om sidlobs/huvudlobsförhållandet för plattan är litet ($\ll 1$) får dock även den samlade intensiteten för multistuds via diffus markspridning och plattans sidolober antas vara liten. Följande markspridningsegenskaper kan därför antas vara av primär betydelse för plattans effektiva radarsignatur.

Spridningsväg	Bistatiska markspridningsparametrar
<u>enkelstuds</u>	
sgr	klotterbakgrund, $\sigma_0(\hat{i}, -\hat{i}) = \sigma_0(\hat{i})$, monostatisk markmålära
str	σ_{igt} målets frirymdsmålära mark ej inblandad
<u>dubbelstuds</u>	
stgr	$\sigma_0(\hat{s}, -\hat{i}), \rho_g(-\hat{s}_m, -\hat{i})^*$
sgtr	$\sigma_0(\hat{i}, -\hat{s}), \rho_g(\hat{i}, \hat{s}_m)^*$
<u>trippelstuds</u>	
stgtr	$\sigma_0(\hat{i}, -\hat{i}) = \sigma_0(\hat{i})$, monostatisk markmålära, bakåtspridning ofta svag.
sgtgr	Två markstudsar, stor dämpning vid diffust spridande mark. Signifikant under spekulära förhållanden, t ex lugn sjö.
s = sändare, g = mark (ground), t = mål (target), r = mottagare (receiver) * $\sigma_0(\hat{s}, -\hat{i}) = \sigma_0(\hat{i}, -\hat{s})$ och $\rho_g(\hat{i}, \hat{s}_m) = \rho_g(-\hat{s}_m, -\hat{i})$ p g a reciprocitet. Markens reflexionskoefficient, ρ_g, får betydelse då spridningen från marken har en spekulär komponent (jämn mark, strykande infall) och $\sigma_{igt}(\hat{i}, -\hat{s}_m)$ ej är försumbart.	

Relevanta bistatiska geometrier för markspridning

Eftersom det är svårt att åstadkomma tydliga perspektivbilder av spridningsförhållanden, i synnerhet om många riktningar är inblandade, är det vanligt att man försöker ge dem en tvådimensionell representation, vilket går utmärkt eftersom θ och ϕ räcker för att beskriva en riktning. Att direkt använda θ, ϕ som Cartesiska koordinater ger emellertid en dålig uppfattning om geometrin. Bättre är att utgå från riktningarna representerade av enhetsvektorer och sedan projicera dessa på xy-planet. Vanligen projiceras både den övre och den undre halvsfären inom enhetscirkeln, vilket alltså leder till att man har en dubbeltydighet att hålla reda på. Här är det lämpligt att utgå från den övre halvsfären men göra skillnad på infallande strålar och utgående. I detta fall kan strålgångarna förväntas vara dubbelriktade (stgr resp sgtr), så att båda tolkningarna är aktuella. En direkt projektion på xy-planet genom att z-koordinaten sätts till noll är i allmänhet olämplig eftersom alla riktningar kring enhetssfärens ekvator kommer att bli hopträngda inom ett litet område strax

innanför enhetscirkelns periferi medan riktningar nära polerna kommer att få oproportionerligt mycket utrymme.

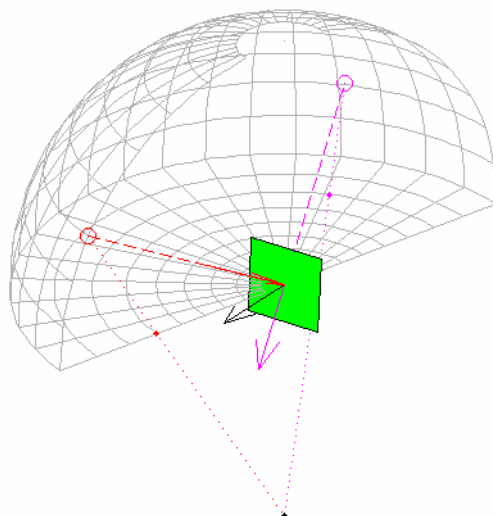


Fig 4 Projektion av en infallande (röd) och en reflekterad (purpur) stråles infallsriktningar mot marken på en enhetscirkel. I denna figur används stereografisk projektion, i de följande Wulffprojektion, som är ytriiktig. Plattans lutning är 5° , sidovinkeln 20° och ytnormalen representeras av svart pil. Radarns depressionsvinkel är 30° .

Fig 4 visar ett exempel på hur riktningar representeras av vektorer, eller om man så vill, av sina skärningspunkter med enhetssfären. Figuren visar också en projektion av dessa på enhetscirkeln. Eftersom det är riktningar som ska representeras måste sfären placeras så att alla strålar går genom dess centrum, ev måste också vissa strålar parallellförflyttas. Därför har origo inte placerats i markplanet utan i reflexionspunkten i plattans plan. Marken är dock fortfarande parallell med xy-planet. Den infallande strålen (röd) representeras av den punkt där den skär enhetssfären och figuren visar också hur denna punkt projiceras på en enhetscirkelyta i xy-planet. I figuren visas den sk stereografiska projektionen där projektionslinjen dras mot sfärens sydpol. Fortsättningsvis används i stället för stereografisk projektion Wulff-projektionen som är ytriiktig men svårare att illustrera rent geometriskt. Med denna projektion avbildas en viss rymdvinkel alltid på samma area, men avbildade ytor på sfären deformeras, som för alla projektioner, mer eller mindre.

Den mot marken reflekterade strålen är i figuren markerad med purpur. För att representera denna stråle dras en förlängning bakåt mot den punkt på sfären som den skenbart kommer ifrån, och denna punkt projiceras på samma sätt ned på xy-planet. Markens bistatiska spridningsegenskaper för infall i den reflekterade strålens riktning med spridning i riktningen mot radarn (eller omvänt) är viktiga, ja enligt ovanstående resonemang ofta avgörande, för hur växelverkan med marken bidrar till signaturen för en platta med denna orientering.

Då plattan som i figuren belyses snett från vänster reflekteras strålarna snett ned mot höger, men deras förlängningar bakåt kommer att representeras på enhetscirkeln, från belysningsriktningen sett, vänstra sida. I markfallet kommer infall från vänster resp höger i allmänhet att vara likvärdiga, men i sjöfallet kan det ena innebära att den reflekterade strålen sekundärbelyser havsytan längs med vågorna, det andra belysning tvärs vågorna vilket innebär icke-ekvivalenta geometrier.

Fig 5 visar exempel på de viktiga markspridningsriktningarna för olika hötelevationer. Radarn representeras av en svart triangel till vänster om origo. För varje elevation har den reflekterade strålens riktning beräknats för ett antal plattlutningar (-20° till $+30^\circ$) och sidvinklar (0° - 50°). Varje

plattlutning representeras av en färg. Reflexen för sidvinkel 0° ligger på x-axeln, i allmänhet till höger om origo. Sidvinklarna ökar sedan i 5° steg ut från x-axeln. Polarisation visas med pilar som motsvarar E-vektorn sedd i utbredningsriktningen. Tangentialkomponenten svarar mot H-polarisation och radialkomponenten mot V-polarisation.

I dessa diagram visas också, med en streckad ring, den riktning i vilken en av spekulär mark reflekterad stråle infaller mot plattan. Observera att dessa strålar till skillnad från de övriga är uppåtående och ringen markerar var en stråle från origo går ut genom enhetssfären. Ringen representerar den riktningsspridning som lokala variationer i marklutningen (här satta till 5°) ger upphov till.

Här visas endast sidvinklar svarande mot infall mot plattan snett från vänster, d v s sett uppifrån har plattan vridits moturs kring z-axeln medan radarn stått stilla. Strålen reflekteras då snett mot höger vilket då den förlängs bakåt mot sin skenbara källa innebär att den vid infall mot marken ser ut att komma snett bakifrån vänster. Infall snett från höger ger motsvarande riktningar i den nedre halvcirkeln. Fall då plattans framsida ej är vänd mot radarn eller den reflekterade strålen ej träffar marken är borttagna. På symmetri behöver, som ovan diskuterats, i allmänhet endast den ena halvcirkeln kartläggas, och det endast för hotriktningar längs en "eker" i diagrammet. För plöjd mark och hav med vågor kan däremot den behövliga datamängden öka från en delmängd av en 3D riktningsrymd $(\theta_r, \theta_b, \varphi_t - \varphi_r)$ till en 4D-rymd $(\theta_r, \theta_b, \varphi_t, \varphi_r)$.

För sidvinkeln 0° infaller den reflekterade strålen från höger med en infallsvinkel som är radardepressionen minus dubbla plattlutningen. Lägg märke till att detta medför att plattor med stor positiv lutning endast leder till markstuds vid höga hotelevationer.

Då en platta med 0° lutning roteras i sidled länkas den reflekterade strålen av i sidled med dubbla sidvinkeln. Förenklat kan man beskriva det som att för växelverkan är det markstuds med framåtspridning i θ -led (med en offset från den spekulära riktningen svarande mot dubbla plattlutningen) och bakåtspridning i $\Delta\varphi$ -led som är intressant. Detta gäller approximativt även för övriga plattlutningar, men avlänkningen blir något mer än dubbla sidvinkeln för negativa plattlutningar och något mindre för de positiva. Man ser också att infallsvinkeln för den reflekterade strålen ökar med ökande sidvinklar för negativa plattvinklar och minskar för de positiva.

Strålar som i diagrammen ligger nära den positiva x-axeln, och i synnerhet de som ligger nära den ring som markerar markreflexion kan förväntas leda till större växelverkansbidrag. Detta kan förväntas gälla även om spridningsförhållandena inte är spekulära. För låga radardepressioner smalnar ringen i sidled men inte i höjdled. Om den plana ytan är vinkelrät mot marken och hotriktningen (d v s platt- och sidovinkel 0°) så ligger den i plattan reflekterade strålen i centrum av ringen och stora bidrag (bistatisk huvudlob, vinkelrät infall mot en rätvinklig platta-markdieder) kan förväntas. Spridning från dessa riktningar mot radarns riktning (eller omvänt) utgör fall av framåtspridning medan övriga riktningar ger sid- eller bakåtspridningsgeometrier och därmed svagare spridningssignaler.

Förutom att markspridningsgeometrin blir ogynnsam (eller snarare tvärtom ur signatursynpunkt) vid stora sidvinklar så sprids dessa strålar till områden vid sidan av eller bakom målet. Gångvägen ökar därmed och beroende på geometri och radarns upplösning kan de komma att i stället bidra till omgivande klotter. Sådana strålar kan också förväntas ge bidrag med lägre Dopplerhastighet. Då sidvinkeln för en viss yta blir stor kan man i allmänhet räkna med att andra delytor hos målet har vridits in till en liten sidvinkel och därför är viktigare för målets signatur i denna aspekt.

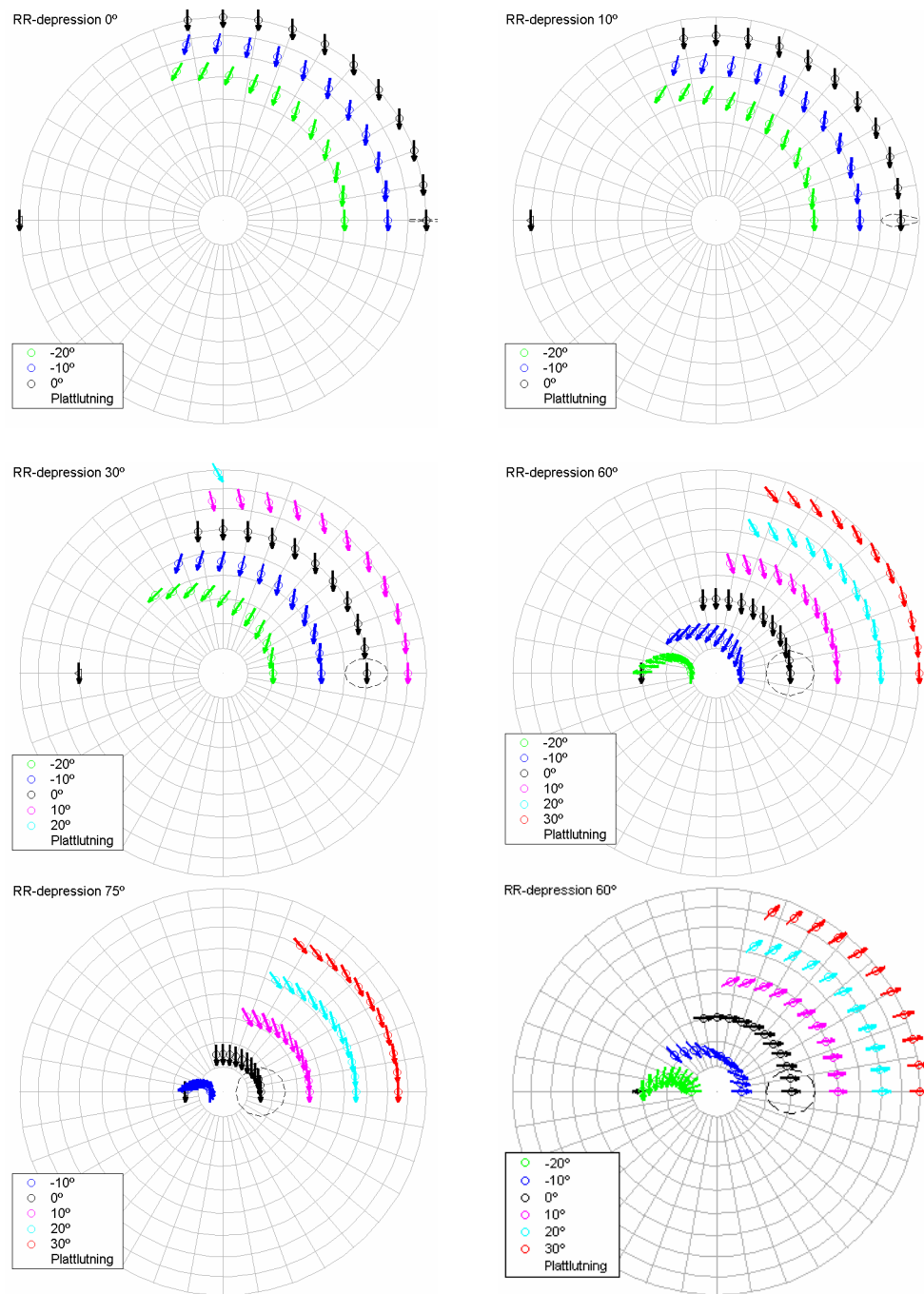


Fig 5 Wulffprojektioner av bistatiska markspridningsriktningar. Spridning från infallsriktning representerad av ring (sekundärbelysning via plattan) till riktningen representerad av triangel (hotradar) eller omvänt. Streckad ring är utgående spekulär reflex från marken breddad med 5° lutningsvariation. Polarisation representeras av pil. Radarns polarisation H utom för sista delfiguren (V). Se text för detaljer och diskussion.

Om den reflekterade strålens riktning ligger nära radarn innebär det att situationen är nästan monostatisk och att denna bistatiska markmålararea kan förväntas ligga nära den monostatiska klotternivån. Riktningen är signifikant ur den synpunkt som diskuteras här, nämligen att det är en bistatisk geometri som kan uppträda vid multipelreflexion, men i slutänden blir endast de riktningar för vilka markmålararean ger bidrag som är av samma storleksordning som eller större än målets direktbidrag av betydelse.

Figureerna visar också att polarisationen vid reflexion i plattan ändras på ett inte helt lättöverskådligt sätt. H och V ändras, vrids, i princip på samma sätt. Mätningarna behöver därför göras antingen med samma polarisationsförhållanden eller så att alla behövliga komponenter mäts upp. Det senare bör helst göras i polarisationsrena geometrier (t ex HH och HV) även om de rena geometrierna i princip skulle kunna beräknas ur olika uppsättningar av blandade geometrier. Möjligen skulle cirkulärpolarisation kunna erbjuda förenklingar ur mätsynpunkt. Om den bistatiska markmålärea är liten för korspolarisation kan detta leda till minskad signifikans för vissa vinkelområden, men dessa är i stället av särskild signifikans ur polarimetrisk synpunkt.

Sammanfattningsvis kan sägas att de ur multipelspridningssynpunkt signifikanta riktningarna huvudsakligen ligger i första kvadranten (+ motsvarande i 4:e) med mer eller mindre uttalad tyngdpunkt kring x-axeln. Om de är signifikanta även ur intensitetssynpunkt är mätningarnas sak att utvisa, men är också beroende av om ett måls utformning är väl genomtänkt ur signatursynpunkt eller inte!

Mätprinciper

Mätgeometrier

Monostatiska mätningar

Med en monostatisk (i mätsammanhang vanligen pseudomonostatisk) mätgeometri når man primärt bara att mäta monostatisk markmålararea, d v s bakåtspridning. Det är av begränsat värde för beräkning av växelverkan och betydande mängder litteraturdata finns redan tillgängliga [9-13, 27]. Sådana värden är också av begränsat värde för prövning av bistatiska spridningsfunktioner, eftersom denna prövning måste göras över för multipelspridning viktiga vinkelavsnitt, främst framåt-spridningssituationer.

Om man, som för den "tristatiska" metoden, använder sig av hjälpreflektor kan man nå ett begränsat utsnitt av alla bistatiska vinklar. Detta snitt är dock i hög grad relevant ur hotsynpunkt, eftersom det är just det utsnitt som kan förväntas bidra till multipelreflexion i ett verkligt fall av ett monostatiskt radarhot. Denna typ av mätningar är dock långt ifrån problemfria och huvudproblemet är att man inte gör renodlade mätningar av den bistatiska spridningsfunktionen utan att man får en kombination av direktbidrag från objektet och en, eller vanligen flera, multipelreflexionsvägar med av antenntaperingen beroende viktning. Till detta kommer att polarisationen vid markstudsens kan skilja sig från radarns polarisation och mellan olika spridningsvägar. Särskilt komplex blir situationen om dessa även omfattar trippelstuds och högre multipelreflexionsbidrag.

Bistatiska mätningar

Med en bistatisk mätgeometri kan den bistatiska spridningen (med variationer från den statistiska fördelningen) mätas direkt. Beroende på hur antenninriktningssystemet är uppbyggt blir det mer eller mindre svårt att mäta på samma markbit vid olika vinklar och att mäta olika markbitar under samma bistatiska geometri för att studera den statistiska fördelningen. Bistatisk geometri ger enkla, rena, polarisationsförhållanden.

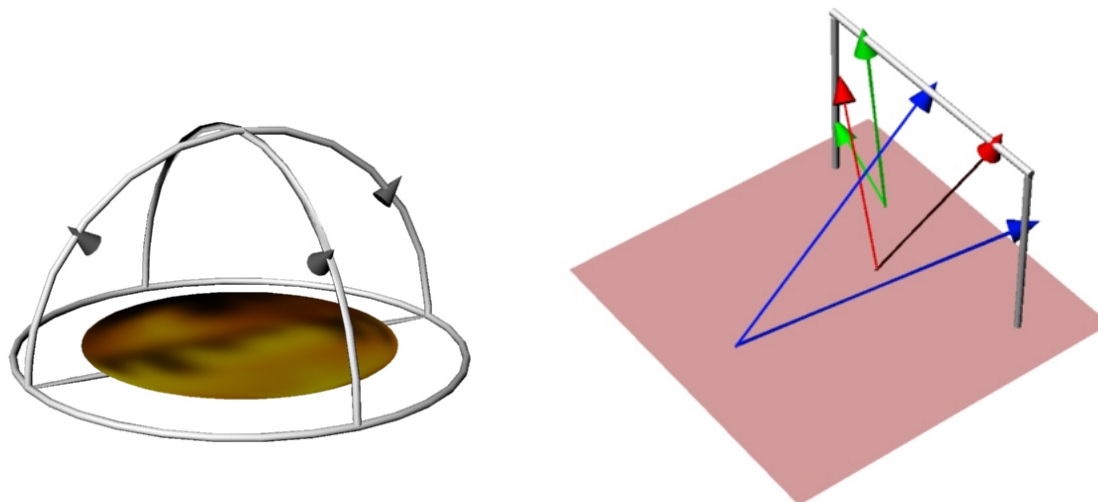


Fig 6 I bågstrukturen till vänster är antennerna riktade mot centrum och mäter samma markavsnitt. Många geometrier nås även med den högra mätkonfigurationen, men mätningen görs då mot olika markavsnitt.

Till nackdelarna med bistatisk geometri hör att stödstrukturerna kan behöva bli mycket stora, att det blir svårt att få kontroll över den effektiva aperturen, att det som en följd därav blir dålig vinkel- och rumsupplösning, och att mätningar vid låga vinklar ger upphov till speciella problem. Genom att utnyttja ISAR/SAR-metodik kan aperturkontrollen och upplösningen förbättras.

"Tristatiska" mätningar

Ett bistatiskt system kombinerat med en hjälpreflektor (ev två), se Fig 9 nedan, kan komma förbi många av de problem som uppträder om ett monostatiskt mätsystem kombineras med hjälpreflektor. I synnerhet bör det vara möjligt att bättre renodla spridningsvägarna och att nå mer godtyckligt valda spridningsgeometrier. Jämfört med bistatiska mätningar utan hjälpreflektor kan antenninriktningssystemet göras mindre och framför allt lägre eftersom man med hjälpreflektorn kan vika strålgångarna. Det kan också ge möjlighet att ha sändare och mottagare närmare varandra än vid bistatiska mätningar vilket minskar behovet av långa kablar. Den kanske viktigaste funktionen hos hjälpreflektorn är att den bidrar till aperturkontrollen vilket förenklar kalibrering och förbättrar vinkel- och rumsupplösningen. Tristatiska system torde i allmänhet behöva flyttas för att konsekvent mäta på samma markbit. Polarisationsförhållandena blir lätt komplexa vilket måste beaktas då mätningarna planeras. Genom att flytta hjälpreflektorn i normalens riktning kan bakgrunden ev undertryckas genom dopplerdiskriminering.

Mätning nära strykande reflexionsförhållanden

Eftersom låga hotelevationer är viktiga kommer spridning under förhållanden då infalls- och spridningsriktningarna bildar liten vinkel med horisontalplanet att vara viktiga. Än viktigare blir de av att det rör sig om framåtspridning som vanligen är stark. Dessutom blir markens karaktär ofta spekulär vid låga vinklar. Detta kan i princip hanteras med en lämpligt utformad "F-faktor-formalism", men att vid mätning separera de diffusa spridningsbidragen från de spekulära erbjuder betydande utmaningar. Några ansatser för att få fram markreflexionskoefficienten under blandade förhållanden (spekulära/diffusa) kan vara att 1) uppskatta diffus nivå genom interpolation mellan närliggande icke-spekulära vinklar eller helt enkelt försumma den vid den spekulära vinkeln 2) variera det belysta områdets storlek 3) försöka extrahera information om reflexionskoefficienten ur en uppmätt fältbild. Den stora statistiska variationen i det diffusa klottret kan antas utgöra en stötesten vid separationsförsök.

Strykande vinklar ger också ett svårt fall ur mätsynpunkt särskilt då $\varphi_s - \varphi_i$ närmar sig 180° eftersom risken för överhörning mellan sändare och mottagare då är stor. Vidare är lobens projektion på marken långt, ev oändligt, utdragen i antennriktningen, vilket kan medföra störande bidrag från stödstrukturer och omgivning. God avståndsupplösning kan användas för att diskriminera mot dessa bidrag, men vid direkt överhörning från sändaren är gångvägsskillnaden mot den önskade, av marken spridda signalen, liten i dessa geometrier. En möjlighet är att skärma den direkta strålen, se Fig 10, vilket samtidigt kan hjälpa till att avgränsa det belysta markområdet, jfr avsnittet om aperturkontroll. Uppmärksamhet måste dock ägnas åt sidlobber från avskärmningen.

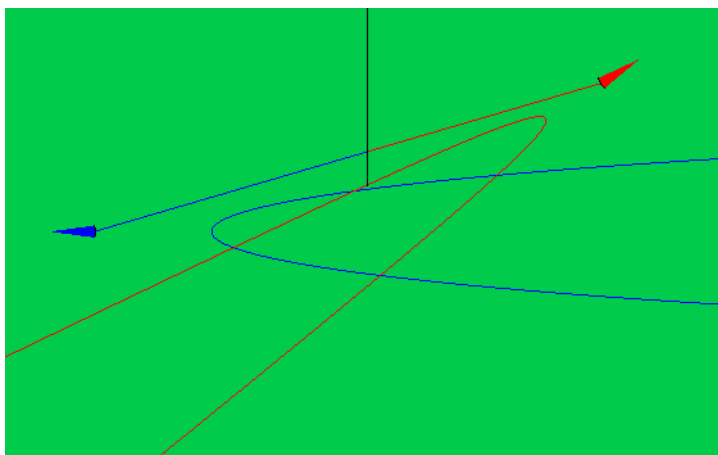


Fig 7 Skärmning av direkt stråle mellan antenner för att hindra överhörning via sidolober. Lägg märke till antennernas mycket stora fotavtryck vid strykande vinklar. Se också Fig 10 för en skärm med fler funktioner.

Ett elegant och potentiellt prestandamässigt tilltalande sätt att reducera överhörningen mellan sändare (el hjälmpreflektor) och mottagare vore att använda en mottagarantenn med flera element (två kan räcka) och i signalbehandlingen skapa ett nollställe i mottagarloben som reducerar överhörningen.

En annan möjlighet vore att använda en hjälmpreflektor. Den direkta signalen från denna kan vara lättare att ta hänsyn till än den från sändarantennen. Kraven för att en sådan compensation ska bli effektiv är dock höga vilket tillsammans med andra komplikationer gör att någon avgörande fördel troligen inte föreligger.

Polarisation

Om en hjälmpreflektor vinklas i både höjd- och sidled för att spegla ned ett strålknippe i lämplig vinkel mot marken kommer, som Fig 5 i avsnittet om relevanta vinklar visar, detta inte att träffa marken med samma polarisation som det från antennen utsända. Situationen kompliceras av att det finns olika konventioner rörande polarisation. Ref. [24-25] redogör utförligt för matrisalgebran för polarisation vid reflexioner. Det är tänkbart att man kan förenkla genom att gå omvägen via cirkulärpolarisation, eftersom hjälmpreflektorn ger en enkel växling i rotationsriktningen sett i utbredningsriktningen. Eftersom cirkulärpolarisationsdata ofta beräknas ur mätdata för linjärpolarisation, och man således ändå skulle behöva mäta alla fyra linjärpolarisationer, och det inbördes koherent, är det dock mycket möjligt att det i realiteten inte erbjuder några fördelar.

Polarisationsalgebran kan behöva arbetas in i programvara för styrning och planering av mätningarna. Ev kan en vridning av sändarantennen kring sin axel användas för att ge renodlad polarisation vid infall mot marken. Man behöver också vara uppmärksam på de använda antennernas polarisationsrenhet och behovet av polarimetrisk kalibrering [25]. Vissa antenner har t ex sämre polarisationsrenhet i sidoloberna.

Närfält och fjärrfält

Med närfält avses fältet på så korta avstånd från sändare (mottagare) att planvågsapproximationen inte längre är godtagbar. Närfältsavståndet brukar definieras av uttrycket $r = kD^2/\lambda$ vilket svarar mot att en sfärisk vågfront som avvika högst $\lambda/8$ eller $\lambda/16$ över målet. Detta är viktigt när koherensen

mellan olika delar av målet är av betydelse. Vad gäller markmålärea under icke-spekulära förhållanden så kan signalen antas vara summan av bidragen från många oberoende spridare. Fasen för ett sådant bidrag är i någon mening slumpmässig i förhållande till de andra. Om till dessa bidrag adderas den systematiska avvikelse som den sfäriska vågfronten ger upphov till har man fortfarande en uppsättning oberoende spridare med slumpfas. För sådana uppsättningar gäller att effekten kan summeras icke-koherent och att avvikelser från planvåg får liten betydelse. Enskilda värden kan tänkas avvika kraftigt till följd av närfältsförhållandena, men väntevärdet och spridningen bör bli densamma. Skulle värdena däremot användas i någon form av högupplösningssmetod kan man förvänta sig en av vågfrontskrökningen orsakad deformation. Under spekulära förhållanden får fjärrfältsavståndet i princip samma betydelse som vid mätningar på normala målobjekt. Vanligen är marken endast partiellt spekulär, och det är då rimligt att anta att man kan utgå från markens korrelationslängd vid beräkning av fjärrfältsavståndet. Reflexionskoefficienter, som ju är den relevanta storleken för den spekulära delen, mäts dock typiskt, t ex för RAM, på korta avstånd i en NRL-båge med en speglade plåt som referensobjekt.

I de "tristatiska" mätningarna är det en fördel om marken ligger i närfältet från sekundärreflektorn eftersom idén är att vika av ett väldefinierat utsnitt av det primära strålknipppet ned mot marken. Om hjälpreflektorn ligger långt från sändaren men nära marken kommer detta utsnitt att ha karaktären av en plan våg.

Kalibrering

Vid val av kalibreringsobjekt ska man välja objekt med välkänd målarea och helst med måttlig känslighet för inriktningsfel. Storleken på kalibreringsobjektet ska avvägas på sådant sätt att man kan betrakta den direkta fasfronten som plan över hela objektet och att man väl befinner sig inom antennernas lobvidd. Ofta är det en fördel om de har en stor målarea så att bakgrundsnivån får mindre inverkan. Dessa avvägningar bestäms därför ofta av valet av frekvens och typ av antenner. Det är därför inte alltid optimalt att använda samma kalibreringsobjekt för de olika frekvensbanden. Vanliga kalibreringsobjekt är t ex sfärer, cylindrar, plattor, hörnreflektorer och Lüneberglinser. För polarimetrisk kalibrering är dessutom diedrar viktiga [25].

Inverkan från stativ eller andra stödstrukturer måste hållas under kontroll, se avsnittet om stödstrukturer. Bidragen från dessa är att betrakta som en del av bakgrunden och ytterligare reduktion kan fås vid bakgrundssubtraktionen.

Mycket viktigt är att kalibreringen görs utan påverkan av flervägeffekter. Dessa kan härröra från t ex växelverkan stativ-objekt eller objekt-mark. För att minska inverkan från flervägeffekter är det en fördel om kalibreringsmätningen kan göras med antennerna mer eller mindre uppåtriktade, så att mark ej kan växelverka. Detta ställer dock höga krav vad gäller stabilitet på kalibreringsstativ och stödstrukturer. Genom att variera kalibreringsobjektets höjd samt att man utnyttjar en bandbredd som möjliggör avståndsprofiler, kan man kontrollera om och hur fältbilden varierar och därmed ha möjlighet att kompensera för flervägeffekter i analysarbetet. Det är dock alltid en fördel att ha kontroll på sådana effekter innan en mätning vilket gör det möjligt att reducera dem genom t ex skärmning eller geometrimodifieringar.

Bistatisk kalibrering bjuder på särskilda problem, t ex så kan inte hörn- eller andra retroreflektorer användas i lika stor utsträckning. Om man skall utföra en bistatisk kalibrering är man främst hänvisad till att använda sfärer, cylindrar och plana plattor. Vid utförandet av bistatiska mätningar är det dock inte givet att man behöver göra bistatiska kalibreringar. I de fall det är relativt lätt att flytta sina antenner och samtidigt ha god kontroll på positioneringen av dessa, dvs kontroll på avstånd och

apertur för sändar- och mottagarantennerna, är det snarare en fördel att utföra monostatiska kalibreringar. En av fördelarna är att man slipper överhörningsbidragen i det monostatiska fallet. I fall då det inte är praktiskt lämpligt att flytta antennerna går det dock att trycka ned överhörningsbidraget genom bland annat användning av pulsning, skärmning, signalbehandling (avståndsp profiler) och bakgrundssubtraktion.

Med monostatisk kalibrering ges den fasriktiga kalibrerade bistatiska målarean av ekv (1) - (2):

$$S_{bistat}^{obj}(f, \phi_{s,m}, \theta_{s,m}) = \frac{S_{mstat}^{kalobj}(f, \phi, \theta)}{V_{mstat}^{kalobj}(f, \phi, \theta) - V_{mstat}^{bkg}(f, \phi, \theta)} \cdot [V_{bistat}^{obj}(f, \phi_{s,m}, \theta_{s,m}) - V_{bistat}^{bkg}(f, \phi_{s,m}, \theta_{s,m})] \cdot \frac{r_s r_m}{r_{mstat}^2} \cdot e^{ik(r_s + r_m - 2r_{ms})} \quad (1)$$

$$\sigma_{bistat}^{obj}(f, \phi_{s,m}, \theta_{s,m}) = |S_{bistat}^{obj}(f, \phi_{s,m}, \theta_{s,m})|^2 \quad (2)$$

V betecknar uppmätta signalamplituder och S betecknar kalibrerad resp teoretisk spridningsamplitud för mät- resp kalibreringsobjektet. Indexen *obj*, *kalobj*, *bkg*, *bistat* och *mstat* står för objekt, kalibreringsobjekt, bakgrund, bistatisk och monostatisk. f är frekvensen och r_s , r_m och r_{mstat} är sändar- och mottagar antennernas avstånd till mätobjektet vid bi- respektive monostatiska fallet. Vinklarna $\phi_{s,m}$ och $\theta_{s,m}$ representerar sändar- och mottagarantennernas asimut- och depressionsvinklar i ett koordinatsystem där marknormalen är parallell med z-axeln. De sista faktorerna i ekvation (1) räknar om amplitud resp fas mellan olika avstånd vid mätning resp kalibrering. Fasomräkningen förutsätter förstås att avståndsinmätningarna görs med god noggrannhet.

Omräkning till specifik markmålararea görs slutligen genom division med markarean.

$\sigma_0^{bistat} = \sigma_{bistat}^{gnd} / A_{eff}$. Att bestämma den effektiva markarean är en kärnpunkt i kalibreringsarbetet som behandlas i nästa avsnitt.

Aperturkontroll

Vid mätningar mot vanliga målobjekt brukar man använda så bredlobiga antenner att taperingen över målet blir liten. Marken däremot har ju oändlig utbredning, men kan förstås ändra karaktär i sidled. Vid mätningar mot marken (mono- eller bistatiskt) måste man därför ta hänsyn till taperingen, även då smallobiga antenner används. Används bredlobiga antenner får man dålig upplösning i vinkel och i rumsled, och ev bidrag från mark av annan typ eller annat i närheten.

Att vinna kontroll över sändar- och mottagarsidans "fotavtryck" på marken, och den effektiva areans storlek benämner vi aperturkontroll. Kontroll ska alltså förstås som både bestämning (kalibrering) och reglering av den effektiva areans storlek. Aperturkontroll står i nära relation till kalibreringsarbetet.

Om man antar att marksignalen beror av många oberoende spridare (icke-spekulär markreflexion) så att deras målarebidrag kan summeras inkoherent fås:

$$\sigma = \int_A |S(\vec{r})|^2 |R(\vec{r})|^2 \sigma_0(\vec{r}) dA$$

σ är det målareavärde signalen svarar mot vid kalibrering mot t ex hörnreflektor. A är hela det belysta markområdet. $S(\bar{r})$, $R(\bar{r})$ beskriver sändar- resp mottagartapering i markkoordinater och amplitudkänslighet. De ska normeras till 1 i centrum och ev kompenseras för laterala variationer i strålgångslängd. $\sigma_0(\bar{r})$ beskriver den lokala markmålararea. Om marken antas vara någorlunda homogen kan man sätta $\sigma_0(\bar{r}) = \sigma_0$ och erhålla:

$$\sigma = \sigma_0 \cdot A_{eff} \quad \text{där} \quad A_{eff} = k \int_A |S(\bar{r})|^2 |R(\bar{r})|^2 dA$$

A_{eff} och därmed σ_0 kan vara svår att bestämma även om den i princip ska kunna beräknas ur geometri och antenndiagram. Man kan tänka sig att ta A_{eff} ur en kalibreringsmätning mot en spekulärt orienterad plåt ($\sigma_{plåt} = 4\pi A_{eff,coh}^2 / \lambda^2$), större än mätsystemets kombinerade fotavtryck (jfr Fig 8). Förutom problemet med att noggrant justera in plåten måste man också göra en teoretiskt beräknad korrektion för skillnaden mellan inkoherent och koherent summation. Denna skillnad kommer också att leda till fel om marken är partiellt spekulär (i vilket fall σ_0 är en haltande beskrivning).

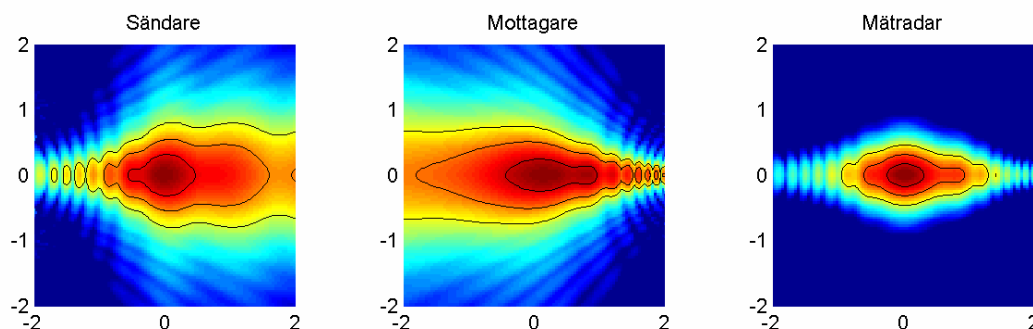


Fig 8 Schematisk bild av hur sändarens, $|S(\bar{r})|^2$, och mottagarens, $|R(\bar{r})|^2$, fotavtryck kombineras till mätredarnas, $|S(\bar{r})|^2 \cdot |R(\bar{r})|^2$. Integralen över mätredarnas föravtryck delat med effektkänsligheten i centrum ger effektiv area, A_{eff} , som kan användas för normalisering av markmålararea. Sändaren belyser snett från vänster och mottagaren ser området snett från höger.

En tilltalande metod för aperturkontroll vore att bestämma markmålararea ur skillnaden mellan två mätningar där man i det ena fallet täckt ett centralt, någorlunda otaperat, område med absorbent och i det andra har marken otäckt. Tyvärr är denna metod troligen svår att tillämpa. Det är svårt att framställa riktigt effektiva absorbenter. Bortspgling med en platta kan vara ett alternativ, men man måste ta hänsyn till dess egenmålararea. Subtraktionsförfarandet är en annan svaghet. Differensen är förmodligen mindre än båda de ingående termerna och termerna kan ha betydande inkoherenta bidrag som inte låter sig subtraheras. Dessutom blir hanteringen av absorbent eller platta omständlig och kan ge störningar som fördärvar behövlig koherens.

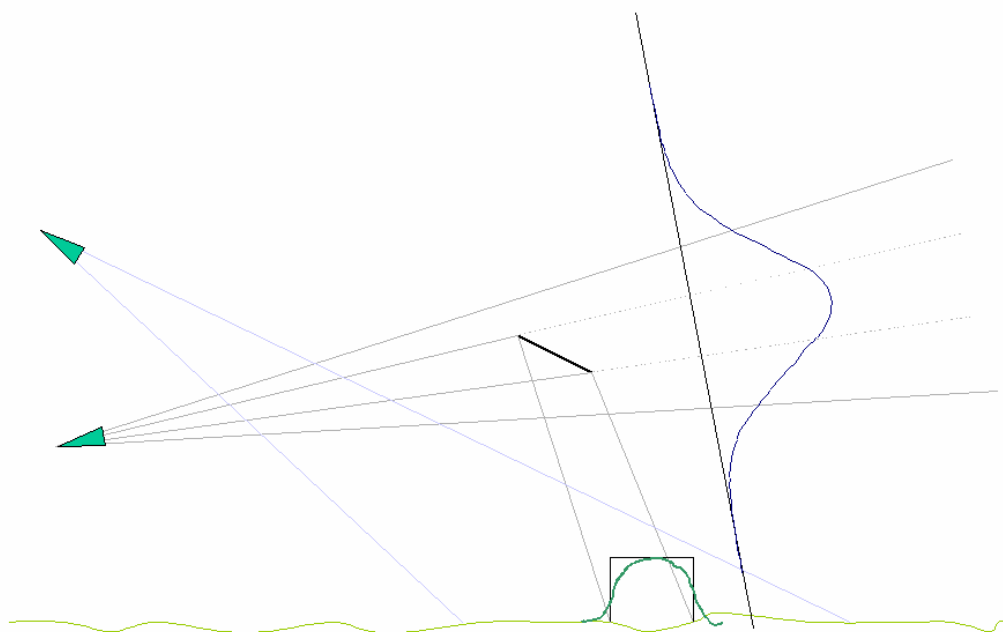


Fig 9 Aperturkontroll med reflektor, "tristatisk" mätning. Reflektorn skär ut ett smalare, mer väldefinierat och homogent utsnitt ur det primära strålknipet. Belysningsprofilen får bli på g a breddning ej den ideala rektangulära profilen, men denna breddning påverkar ej den samlade belysningseffekten.

Dessa problem kan man komma ifrån genom att införa något som avgränsar och definierar aperturen. I den "tristatiska" metoden är detta en hjälpreflektor se Fig 9. I den metod som föreslagits för mätning i strykande geometrier fås en apertur genom avskärmning. Den avgränsning som görs kommer förstås att leda till en del sidolober, vilket ger en viss liten inverkan på rums- och vinkelupplösning, men det totala effektförflödet kommer ändå att definieras av aperturen, åtminstone så länge inte sidloberna når ut till mottagarantennens tapering. Idén är att med hjälpreflektorn, som lätt kan göras större och därmed smallobigare än antennen och placeras närmare den mark som ska belysas, kan bekymren med breda taperade lobar begränsas.

För geometrier med bistatisk spridningsvinkel nära 180° kan det i stället vara lämpligt att använda en skärm med ett hål i för aperturkontroll och för att begränsa den direkta överhörningen mellan sändare och mottagare.

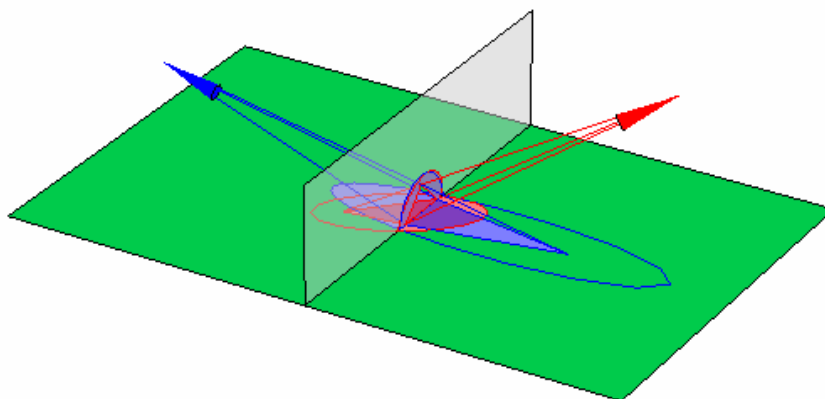


Fig 10 Aperturskärm som begränsar aperturen och förhindrar direkt överhörning. Man måste vara uppmärksam på att antennerna som här inte nödvändigtvis täcker hela den apertur skärmen ger och att skärmens kanter kan ge sidlober.

Ett sätt att åstadkomma aperturkontroll som bör övervägas är att utnyttja sig av utgrindningar i (I)SAR-bilder eller ev avståndsp profiler. ISAR-bilder kan också ge en uppfattning om fintexturen i och skalaberoendet för σ_0 . Användning av utgrindningar förutsätter att man utreder hur man ska kompensera för de distorsioner som antennplacering (kombination av elevationer och bistatisk vinkel) ger upphov till. Man måste också behärska de artefakter som transformationerna kan ge upphov till.

De för växelverkan viktigaste markspredningsfallen är framåtspredningsfall där skillnaden i gångväg tenderar att bli liten och därmed ställa betydligt högre krav i downrange-upplösning än monostatisk ISAR. Mot detta kan ställas att behovet att urskilja detaljer i marken är begränsat och huvudsyftet är att filtrera fram ett markavsnitt utan störande kanter och liknande.

ISAR-avbildningen bör helst göras med vridning kring marknormalen för att reducera risken för blandning av information för icke-ekvivalenta infalls- och spridningsriktningar. Eftersom man för varje bistatisk vinkelkombination måste mäta över behövtligt frekvens- och vinkelintervall (det senare troligen i praktiken ett helt varv) så kommer utgrindning i ISAR-bilder att kräva en kraftig ökning av mängden mätningar.

Positions- och riktningskänslighet, upplösning

För koherent behandling av mätvärdet krävs hög fasnoggrannhet och därmed noggrann positionering. Vid subtraktion av två likstora spridningsvektorer leder ett fasfel $\delta\psi$ till en rest:

$$|\Delta V| = |V| \cdot 2 \tan(\delta\psi/2) \approx |V| \cdot \delta\psi \quad \Leftrightarrow \quad \left| \frac{\Delta V}{V} \right| = \delta\psi = \frac{2\pi\Delta r}{\lambda} = \frac{2\pi f \Delta r}{c_0}$$

Formeln bortser från amplitudens r^2 -beroende (d v s effektens r^4 -beroende). Δr är felet i fasavstånd, laterala positioneringsfel inverkar endast sekundärt genom skillnad i sekundärbelysning, skuggning, tapering eller liknande.

$\Delta r = \lambda/100$ leder till en restnivå 24 dB under det bidrag som skulle subtraheras bort. För 10 dB reduktion krävs $\lambda/20$. Även amplitudfel kommer givetvis att påverka differensens noggrannhet.

Vid addition blir känsligheten för fasfel mindre. För likstora, likfasiga spridningsvektorer fås:

$$|\Delta V| = |V| \cdot (1 - \cos \frac{\delta\psi}{2}) \approx |V| \cdot \frac{(\delta\psi/2)^2}{2} \Leftrightarrow \left| \frac{V + \Delta V}{V} \right| = 1 + \frac{(\delta\psi/2)^2}{2} = 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{\pi \Delta r}{\lambda} \right)^2 = 1 + \frac{1}{8} \left(\frac{2\pi f \Delta r}{c_0} \right)^2$$

$\lambda/8$, ibland använt som närfältskriterium, ger då ett fel om 0,65 dB. Vid gränsen mellan närfält och fjärrfält är dock medelfelet för de olika bidragen i allmänhet betydligt mindre än maxfelet $\lambda/8$.

För de fall man har att ta hänsyn till direktbidraget från t ex en hjälmpreflektor kommer kravet på inriktningsnoggrannhet för denna att sättas av lobmönstret och av hur starkt direktbidraget behöver kunna reduceras genom subtraktion eller bortspegling. Avståndet mellan sidolober ges av $\theta \approx (180^\circ / \pi) \lambda / b$ där b är den bredd som bestämmer sidoloberna. För en platta som är 0,5 m bred ger detta vid 18 GHz $1,9^\circ$. Vinklarna behöver kunna ställas in och mätas betydligt bättre än detta (t ex 10-200 ggr bättre).

Om antenner och hjälmpreflektorer inte riktas centralt mot mätområdet kommer det att påverka känslighet och beroende på konfiguration även vad som mäts. Antag att en antensns effektkänslighet inom 3 dB-gränsen kan beskrivas av en Gaussian

$$S = e^{-\frac{\Delta\theta^2}{\Theta/2\sqrt{2\ln 2}}}$$

och att lobbredden, Θ , kan beräknas ur antennförstärkningen G i dB enligt

$$\Theta = (180^\circ / \pi) \cdot \frac{4}{10^{G/20}}$$

För en antenn, 25 dB antennförstärkning och 1° vinkelfel ger detta räknat i en punkt (d v s ej integrerat över belyst område) ett effekttaperingsfel om 0,07 dB.

Fel i inriktning mot mark måste bedömas med hänsyn till hur snabbt signalen varierar med infalls- och spridningsriktningar och med hänsyn till upplösning i sida och vinkel.

Klart är att olika feltyper visar en kraftigt varierande känslighet för positions- och inriktningsfel. Det är därför en stor fördel om mätmetodiken kan utformas så att känsligheten för position (fasfel) och inriktning (direktbidrag) blir låg. Direktbidrag och fasläge skulle i stället kunna användas för att förbättra inmätning och inriktning. Vinkelupplösningen bestäms av kombinationen av belysningens vinkelspridning, belyst område och mottagarantennens känslighetsområde.

Avståndsupplösning

Det är en fördel om mätningarna kan utföras så att andra bidrag till signalen än den marksignal man önskar mäta kan separeras med andra metoder än subtraktion. Det främsta alternativet till subtraktion är god avståndsupplösning. Riktigt god avståndsupplösning kan främst åstadkommas med bredbandiga mätningar kombinerat med Fouriertransformmetoder. De främsta nackdelarna med sådana är de artefakter som kan uppstå vid utgrindning av de intressanta bidragen och de invikningar som uppträder. Med pulssade mätningar kan invikningar undvikas.

Utrustning och hjälpmedel

Tillgängliga mätsystem

I följande avsnitt görs en genomgång av, vid FOI i Linköping, befintliga system för mätning av radarmålarea, och möjligheten att med dessa genomföra bistatiska radarmålareamätningar. Följande system behandlas: Lilla Gåra och Arken-systemet. Dessutom kommenteras NRL-bågen med tillhörande antennsystem, vilken används för reflexionsmätningar av material.

Lilla Gåra



Fig 11 Flygfoto över Lilla Gåra - FOIs mätplats för radarmålarea.

Vid FOI:s utomhusmätplats Lilla Gåra genomförs koherenta radarsignaturmätningar inom frekvensområdet 0,3 - 110 GHz. Pulslängd 10 ns - cw. Härvid medges ISAR-avbildningar av objekt från några centimeters storlek och upp till flera meter. Anläggningen har tre fasta mätsträckor; frirymdsmätsträckan (AE), markmätsträckan (BE) samt toppattackmätsträckor (AH, BH, CH) från ett 48 m högt torn.

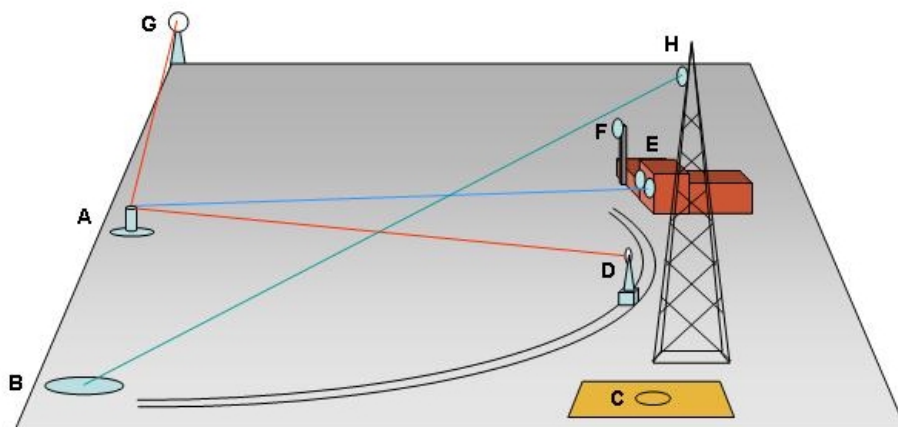


Fig 12 Principskiss över Lilla Gåra: lilla vridbordet (A), stora vridbordet (B), marinplanets vridbord (C), rälsvagn (D), antenner huvudbyggnad (E), mast vid huvudbyggnad (F), östra masten (G) och tornet (H). Linjerna representerar några av de möjliga mätsträckorna.

Tre stycken vridbord finns tillgängliga på området: lilla vridbordet (A), stora vridbordet (B) och marinplanets vridbord (C). Det lilla vridbordet består egentligen av två stycken vridbord varav det övre kan lutas i vinkel och därigenom kan koniska snitt erhållas. De övriga två vridborden ger endast storcirkelsnitt.

	Vridbord	Diameter (m)	Maxhöjd över markplanet (m)	Maxlast (ton)
A	Lilla vridbordet*	0,5	4,6	1,5
B	Stora vridbordet	7,0	-	80
C	Marinplanets vridbord	2,2	-	-

* Består av en platta (0,5 m) med skruvhål på vilken större plattor kan fästas.

Det finns flera antennbärande konstruktioner vid Lilla Gåra och här upptas endast de som anses aktuella vid bistatiska mätningar: rälsvagnen (D), huvudbyggnad (E), mast vid huvudbyggnad (F), östra masten (G) samt tornet (H).

	Antennbärande konstruktion	Maxhöjd över markplanet (m)	Max-avstånd* till A (m)	Maximal elevationsvinkel A	Max-avstånd* till B (m)	Maximal elevationsvinkel B
D	Rälsvagnen	4,5	92	2,8°	-	-
E	Huvudbyggnad	5,5	104,1	3,0°	162,7	1,9°
F	Mast vid huvudb.	8,0	ca 105	4,4°	ca 170	2,7°
G	Östra masten	6,0	92	3,7°	179	1,9°
H	Tornet	48,6	105	27,6°	103,5	28°

* Med maxavstånd menas det maximala frirymdsavståndet mellan antenn och vridbordscentrum.

Lilla Gåra erbjuder också flera möjligheter att utföra bistatiska mätningar och däribland finns en fast installation. Denna består av en järnvägsräls som är utlagd i en 105° cirkelbåge med radien 92 m. I cirkelbågens centrum är ett vridbord (A) placerat. En vagn (D) försedd med antingen sändar- eller mottagarantenn förflyttas utmed rälsen för att bilda önskade vinklar till mätobjektet på vridbordet och den separerade antennen som är placerad i en mast (G) i försöksområdets nordöstra hörn. Med denna konstruktion kan frirymdsmätningar utföras med 0 - 180° bistatisk vinkel. Bistatisk markspredning skulle troligen också kunna mätas genom att ett tillräckligt stort markprov placerades i något slags tråg som monterades fast på vridbordet. Det är dock osäkert hur stor lutning olika slags markprov tål.

Flera andra bistatiska mätkonfigurationer är möjliga vid Lilla Gåra, och ett av de intressantaste alternativen är att använda det nya antenntorn (H) som uppförts på området. Tornet innehåller sex fasta plan samt en personhiss på vilka antenner kan monteras. Denna antenn kan sedan riktas mot något av de tre vridborden och där det lilla vridbordet erbjuder den största friheten. En intressant bistatisk konfiguration där mycket hög elevationsvinkel kan uppnås är då sändarantennen placeras i tornet och riktas mot marinplanets vridbord (CH). Den maximala elevationsvinkeln om ca 70° uppnås på antennhöjden 48 m. Mottagande antenn kan eventuellt placeras i den långa arm som tillhör marinplanet och som rör sig i en cirkelbåge på konstant avstånd från själva vridbordet.

Tornet kan i framtiden förlängas med upp till 24 m och skulle då få en höjd av 72 m och därmed ökar elevationsvinkeln i förhållande till markplanet. Den maximala elevationsvinkeln till stora vridbordet (B) skulle öka från 24° till 38°. Den i nuläget mest generella bistatiska mätkonfigurationen är den som erhålls genom att använda tornet - lilla vridbordet - rälsvagn (HAD).

Arkensystemet



Fig 13 Arkensystemet är ett koherent mobilt radarsystem som arbetar inom 8 -18 GHz.

Arken är ett mobilt, koherent radarmätsystem, som kan utföra både hotorienterade och högupplösande mätningar av olika objekt i vitt skilda miljöer. Arken har använts för radarsignaturmätningar mot flertalet fartyg inom marinen, mot flygande plattformar samt använts för högupplösta avstånd profiler och dopplermätningar mot rörliga fordon.

Arkensystemet består av åtskilda sändar- och mottagarantennar, med dubbla sändar- resp mottagarkanaler för V och H polarisation. Såväl polarisation som sändfrekvens kan växlas från puls till puls. Detta möjliggör högupplösta avståndsmätningar.

Polarisation	V/H	Mottagning i båda, sändning kan växlas från puls-till-puls
Frekvens	8 - 18 GHz	X/Ku, (växling puls-till-puls)
Antennlob Az.	2 – 4 °	Frekvensberoende
Antennlob El.	2 – 4 °	Frekvensberoende
Uteffekt	ca 20 W	
PRF	4 - 50 kHz	Datainsamlingstakten begränsande
Pulslängd	0,2 - 10 µs	
Lucklängd	0,05 - 10 µs	Rangegates i luckan är separerade med 0,05 µs (7,5 m).
Mätavstånd	0,2 - 100 km	Beroende på mätobjektets geometriska storlek och dess målarea.

Arkensystemet kan inte i sin befintliga konfiguration användas för bistatiska mätningar. För detta skulle sändar- och mottagarantennerna behöva separeras från varandra. Att montera ned och flytta den befintliga mottagarantennen är inte praktiskt genomförbart, utan enklare är att koppla ifrån ordinarie mottagarantenn och ersätta den med en extern. Härvid kan problem med upplinjer och dämpning uppstå.

NRL-båge

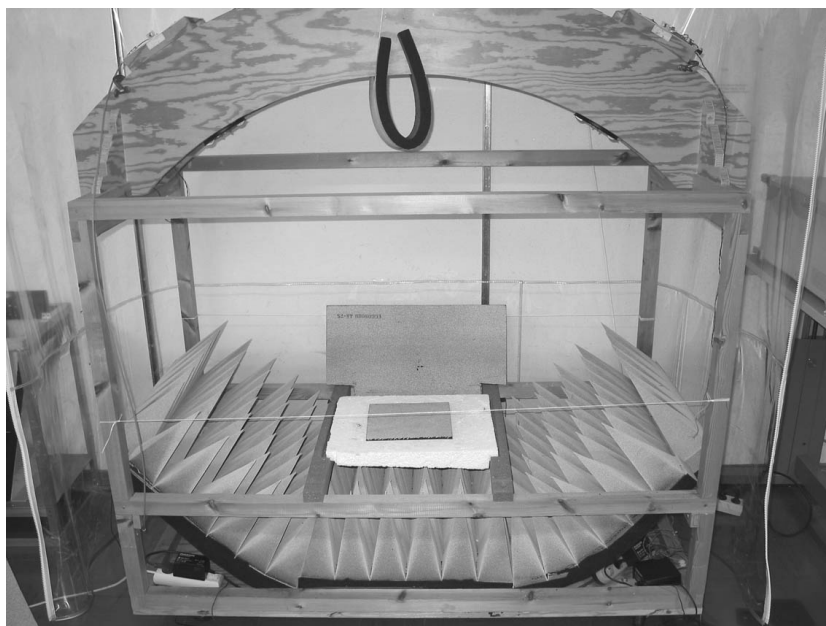


Fig 14. NRL-båge för bistatisk mätning av reflektionsegenskaper.

NRL-bågen används för bistatiska reflexionsmätningar i närfält. Systemet består av en sändar- och en mottagarantenn som vilar mot en vertikalt stående cirkelbåge i trä. Antennerna, av horntyp, är placerade på vardera sida om lodlinjen och inriktade mot bågens centrum, där materialprovet placeras. Antennernas vinkel relativt lodlinjen kan varieras mellan 8 - 43°. Den bistatiska vinkeln varierar sålunda mellan 16 och 86°. En anledningen till att man inte klarar mindre vinklar är att antennerna tar upp plats. Radarabsorbenten mellan antennerna dämpar bort effekt från sändarantennens sidolober och förhindrar överhörning. Bågformskonstruktionen gör att avståndet mellan antennernas aperturplan och provet är konstant ~ 1 m. Genom att använda antenner anpassade för olika frekvensomfång kan reflexionsmätningar utföras mellan 1-20 GHz, 23-40 GHz, 43-120 GHz, 120-185 GHz (troligen upp till 220 GHz). Samtliga antenner har polarisationsomkopplare för antingen V- eller H-polarisation. Vid mätning är antennerna kopplade till en skalär eller en vektoriell nätverksanalysator. Den senare innebär faskontroll och att bakgrundsubtraktion utförs.

Transmissionsmätningar utförs genom att antennerna flyttas in i ett litet mätrum. Antennerna placeras mitt emot varandra på avståndet 1 meter. Kombinationen av reflektions- och transmissionsmätningarna gör att dielektricitetskonstanten kan bestämmas.

En viktig begränsning är att det spridda fältet endast kan mätas i infallsplanet. Det är också viktigt att konstatera att reflektionsmätningarna sker i närfält.

Den beskrivna mätkonfigurationen är inte unik, utan snarast en standardutrustning för karaktärisering av RAM. Liknade mätsystem finns på flera platser i Sverige och på andra håll i världen. Systemet är placerat inomhus vid Sensorteknikavdelningen, Institutionen för Signaturmaterial.

Wiltron 37269B

FOI har flera olika typer av nätverksanalysatorer. Markegenskaper kan visserligen i princip mätas med en skalär nätverksanalysator, men en vektoriell nätverksanalysator ger betydligt bättre kontroll över mätsituationen och är därför att föredra. Koherent mätning ger möjlighet till bakgrunds-subtraktion och avståndsprofiler kan användas för att ge avståndsupplösning. Tyvärr medger deras mottagarbandbredd i allmänhet inte pulsning av signalen vilket medför mångtydighet i avstånd p g a invikning. En nätverksanalysator av typen Wiltron 37269B har använts i försök med monostatisk mätning av markväxelverkan [5-6]. Wiltronsystemet arbetar inom frekvensbandet 40 MHz - 40 GHz. Systemet medger frekvensstegning och CW. En typisk mättid för 1601 mätpunkter är 3,3 sek.



Fig 15 Radarsystem med Gåra-antennerna kopplade till Wiltron 37269 som användes vid RCS-mätningar utomhus under hösten 2001.

Antenndiagram

För planering av mätningar och feluppskattningar, t ex överhörningsbidrag, är det viktigt att ha tillgång till goda beskrivningar av antennkänslighetens vinkelberoende. Antenndiagrammen bör vara kända för åtminstone två polarisationer och i åtminstone två vinkelräta huvudriktningar för aktuella frekvenser.

Arbetet med ett program som med enkel teori beräknar strålningsdiagram i två dimensioner för rektangel- och diagonalthorn har påbörjats. För en förlustfri antenn (inga absorptionsförluster) kan antenndiagrammet erhållas ur målareamätningar.

Ett närstående problem är hur de lobber som uppstår vid avlänkning med hjälpreflektor ser ut. Bland annat är det av intresse att granska hur spridd effekt fördelas mellan huvudlob och sidolober. Man kan också behöva ta hänsyn till om den utanför reflektorn transmitterade vågens sidolober är av betydelse. Effekten i dessa är enligt Babinets princip densamma som för reflexens sidolober. Sidoloberna kan sägas vara en fjärrfältseffekt. I extremt närfält är däremot geometrisk optik, som inte ger sidolober, en korrekt approximation. Om hjälpreflektorn sitter nära marken kommer därför inte sidoloberna att ha hunnit utbildas. För en lång 0,5 m bred reflektor vid 10 GHz och normalt infall kommer i fjärrfältet 3 % av den reflekterade energin att höra till sidolober utanför första minimum, men hela 27,5 % av energin räknat ligger utanför 3 dB-gränsen. För en 0,5 m kvadrat kan dubbelt så mycket antas ligga i sidolober.

Sekundärreflektorer

Syftet med hjälpreflektorer, att definiera aperturer, minska lobbredder och vika strålgångar har behandlats ovan. Man skulle också kunna använda dem för att forma plana vågfronter, så som man gör för kompaktmätsträckor (compact ranges). Svårigheten är att formen troligen skulle behöva ändras med geometrin. Ev kan formningen för två vinkelräta riktningar (t ex horisontell och vertikal) delas upp på två hjälpreflektorer. Behovet är dock litet så länge som närfältseffekter inte behöver beaktas.

Särskilt om korrektion för reflektorns direktbidrag behöver göras måste vikt läggas vid dess planhet. Förslagsvis kan de tillverkas av 10-15 mm tjock hård aluminiumlegering. Vid behov kan de lättas genom utfräsning av lämpliga fackverksstrukturer på baksidan. Kanterna bör fasas från baksidan. Formen bör väljas så att sidloberna kan vinklas bort (parallelogram, helst rektangel) eller så att det ej spelar någon roll om plattan roteras kring sin normal (cirkulär form).

Stödstrukturer och fästen

Antenner och hjälpreflektorer måste kunna hållas på plats med lämpliga fixturer som ska medge behövlig positionering och vara tillräckligt stabila. Kraven i dessa hänseenden måste naturligtvis ställas från fall till fall. Till tillgängliga medel för att minska stödbidragen hör att dölja dem bakom det de ska bära, att göra dem transparenta (frigolitpyloner) eller absorbentklädda eller tillämpa formningsprincipen. Även antensidor och reflektorbaksidor kan behöva beaktas. Slutligen kan avståndsupplösning och bakgrundssubtraktion tillämpas.

Montering av antenner på standardfäste för snabb och repetitiv fastsättning av antenner på stödstrukturerna bör övervägas.

Absorbenter och skärmar

Användning av absorbenter på stödstrukturer har nämnts i ovanstående avsnitt. Användning av motsvarande mätbollsinklädnad vid utomhusmätningar rör främst markavsnitt som inte ska bidra till mätsignalen. Av praktiska och kostnadsmässiga skäl begränsas den till kritiska områden, t ex där marken kan ge spekulära flervägsbidrag. Ett alternativ till absorbenter kan vara skärmar eller "staket" av metalliskt eller resistivt material. Skärmar kan också ha en viktig roll som aperturbegränsare.

Positionering av utrustning (sändare, mottagare, hjälpreflektorer etc)

Eftersom stora datamängder ska samlas in och vinklar behöver kunna ändras noggrant och snabbt i små steg bör inriktning av åtminstone vissa antenner och hjälpreflektorer kunna utföras automatiskt. Väl så viktigt är att man därigenom också undviker att personal stör mätningarna genom att uppehålla sig i mätområdet eller förstör mätområden t ex genom trampsador.

Primärt viktigast är att kunna ställa riktningen på antenner och hjälpreflektorer etc. Man kan också behöva rotera dem kring sina axlar för att ställa in önskad polarisation eller vrida bort sidlobsplan. Vidare kan man önska att translatera dem för att belysa rätt område eller för att variera fasläget. Konstruktioner kan utformas för att renodla vissa rörelser eller för att på effektivaste och stabilaste sätt åstadkomma behövliga frihetsgrader. Det kan då i vissa fall bli mycket komplext att göra behövliga inställningar eller svep men detta kan i princip lösas mjukvaruvägen. Man bör ge akt på att man med vissa konstruktioner visserligen kan nå många olika bistatiska

spridningskombinationer, men inte för samma markstycke. I andra fall tittar man verkligen konsekvent på samma markstycke, men ha svårt att nå andra för att få ett behövligt statistiskt underlag.

Balansvikter kan användas för att minska de statiska positioneringsmomenten, men man måste ha deras effekter på mätningarna i åtanke.

Statistiska variationer

Markmåläreor uppvisar stora statistiska variationer. För att få en bättre uppfattning om detta än vad som kan fås genom jämförelse med intilliggande vinklar är det en fördel om systemet tillåter mätning över olika markstycken under samma (eller ekvivalenta) aspektförhållanden. I implementeringsförslagen för bistatiska mätningar föreslås t ex mätning av varje använd bistatisk geometri för alla sändarasimuler. Även om det grundläggande syftet är att åstadkomma ISAR-avbildningar så ökar även det statistiska underlaget. Det "tristatiska" exemplet nedan visar också ett att samma geometri kan nås på flera olika sätt, som innebär mätning mot olika markavsnitt.

Mätning av inriktning och position

Det är alltid viktigt att ha god kontroll över mätutrustningens inriktning. Särskilt gäller detta vid strykande vinklar där markens avvikelser från horisontalplanet också måste vara väl kända. Om en hjälpreflektor kan ge bidrag till mätsignalen som inte kan separeras genom t ex avståndsupplösning måste dess orientering vara så väl känd att detta bidrag kan uppskattas noggrant nog för att det ska kunna subtraheras eller kunna avskrivas som försumbart. För subtraktion krävs då att inte bara riktning är känd utan även läget, så att fasen kan beräknas (i vissa fall kan fasen kanske anpassas ur mätdata).

Mätning av lutningsvinkel

Mätning av lutningsvinklar intar en särställning eftersom man har tillgång till en god rikttningsreferens i form av tyngdkraftens riktning, som kan utnyttjas av vattenpass, lod och liknande. Naturligtvis hindrar inget att de andra inriktningsmetoder som man är hänvisad till för t ex sidvinklar används även för lutningsvinklar.

När vattenpass, eller dess vitala del, libellen, kombineras med en gradskiva eller liknande i syfte att mäta lutningar brukar man tala om klinometer. Upplösningen på en bra, rent mekanisk klinometer kan vara bättre än 0.01° . Ett sådant instrument kan kosta 30 – 100 kkr. Det finns betydligt enklare instrument som mäter in lutningsvinklar bättre än 0.1° för några hundralappar. Vattenpass och klinometrar fungerar utmärkt "ute i fält" då de inte kräver tillgång på elektricitet eller annan kringutrustning. Idag finns på marknaden flera intressanta kombinationer av vattenpass och lasrar för någon tusenlapp.

Nya intressanta givare finns idag på marknaden som kan utnyttjas för elavationsmätningar. Dessa baseras på en rad olika tekniker, t.ex kapacitansmätning, accelerometrar och gyron. Det finns enkla tvåaxliga givare för några tusenlappar som samtidigt kan mäta både tipp och rollvinklar med en vinkelupplösning bättre än 0.03° . Fördelar med många av de nya givarna är att de är robusta, vibrationståliga samt ger elektriska signaler som via A/D omvandlare etc. snabbt (> 10 Hz) samlas in för datorregistrering. De är ofta små vilket gör att de i princip kan placeras på mätobjektet för vinkelregistrering under hela mätningen. Nackdelar kan vara att det i många fall krävs

kringutrustning, elektricitet samt regelbunden kalibrering och kompensering för temperaturdrift och olinjaritet för att erhålla god noggrannhet.

Mätning med radar

I vissa fall kan radarn själv användas för att hitta den spekulära orienteringen för en sekundärreflektor och andra orienteringar sedan erhållas genom kända vridningar. Särskilt värdefull är metoden att vinna kontroll över sidvinkeln, där ju inte vattenpass kan användas. Förutsatt att reflektorn kan vridas automatiskt i lämpliga frihetsgrader kan detta vara väl så effektivt för att bestämma dess orientering som lasermätning. Vriddonet bör då vara en integrerad del av reflektorns stödstruktur och kan då ge den snabbhet i reflektorinställning som behövs för rationella mätningar. För inriktning av antenner torde laserriktning vara att föredra.

Mätning med laser

Laser är användbart för bl a inriktning av antenner och ytnormaler och för avståndsmätning. Laser monterad på antenn (gärna snabbfäste) kan ge utpekning av riktning. Med två lasrar med linjeoptik kan parallaxfel undvikas, polarisationsplan markeras och om linjeoptiken är diffraktiv lobbredder markeras. Med klass 2 lasrar ($<1\text{ mW}$) är ögonsäkerheten ett relativt litet problem, men räckvidden i dagsljus blir i stället begränsad (20-30 m). Val av våglängd (ögat är betydligt känsligare för grönt än rött ljus), kontrastfilter och lämpliga reflexbeläggningar kan öka räckvidden. Räckvidden blir också bättre om observationen görs nära den belysta fläcken än från laserns position. För större avstånd är det lämpligt att expandera laserstrålen eftersom divergensen då blir mindre. Genom att strålen expanderas förbättras också ögonsäkerheten eftersom endast en liten del av ljusflödet då kan passera pupillen.

Med spegelpolerad yta på en hjälpreflektor eller en tillfälligt fäst (magnet, dubbelhäftande tejp, vakuum) spegel kan strålavlänkning följas och ytans orientering bestämmas. Då spegeln är vinkelrät mot lasern ska strålen reflekteras rakt mot denna. En känd vridning eller hjälpkilar mellan objekt och spegel kan användas för att nå andra vinklar. Laser kan även användas för avståndsmätning. På L Gåra finns tillgång till en laserbaserad avståndsmätare med noggrannhet 1,5 mm. Den markerar med laserpekning i vilken riktning mätningen görs. I normalt dagsljus är räckvidden 30 m.

Optisk mätning utan laser

För att undvika intensitets- och ögonproblem med laser kan man tänka sig att i stället montera kikare eller kamera med teleobjektiv för att titta mot hjälpspeglarna. Ännu enklare sikten, utan optik, kan vara tillfyllest för antenninriktning, men är förmodligen svåra att använda med hjälpspeglar. Med spegeln riktad mot antenn ska optiken se en spegelbild av sig själv, i andra fall kan den användas för att se det markområde en mot hjälpreflektorn utsänd stråle avlänkas mot. Liksom för en ensam laser måste hänsyn tas till parallaxfel. Användbarheten av på marknaden tillgängliga lantmäteriinstrument med eller utan laser bör undersökas. På L Gåra finns några Aimpoint rödpunktsikten för antennriktning. Dessa ger inte laserutpekning med ljusfläck på målet utan rödpunkten finns bara inne i sikten. En nackdel med sikten, som undviks med laser eller TV-kamera är att åtkomligheten vid antennen kan vara dålig, t ex p g a hög placering eller stödanordningar som sitter i vägen.

Lantmäteriinstrumenten har på senare år genomgått en revolution, med bl a laser och GPS, så att noggranna positionsinmätningar i tre dimensioner nu kan göras mycket snabbt, men de mest avancerade instrumenten, "totalstationer", är dyra ($\geq 1\text{ Mkr}$) och förmodligen måste också en investering i arbetstid göras innan deras potential kan utnyttjas. Det finns dock också billigare instrument, liksom äldre begagnade. Användbarheten av dessa bör undersökas.

Mätplats

Dokumentation av mätförhållanden

Datainsamlingssystem bör i görligaste mån utformas för att dokumentera förhållandena i så stor utsträckning som möjligt. Det systemet ej klarar självt bör den begära uppgift från operatören om eller uppmana denne att dokumentera. Vid databehandling bör information om behandlingen och för bakåtspårning genereras och dokumenteras automatiskt. Mätplats och uppställningar bör fotograferas och väderförhållandena dokumenteras.

Marktopografin kan bestämmas genom laserskanning. Viktigt är deras upplösning och noggrannhet, men rationell hantering vid mätning och mätvärdesbehandling är också betydelsefullt.

FOI har tillgång till några laserskanningsystem, varav ett har karaktären av digitalkamera. VTI har ett system monterad på fordonsburen ramp för vägmätning. Scandiaconsult har operativa system för vägmätning. Scandiaconsults system har i allmänhet datareduktion till statistiska vägkvalitetsparametrar online, men kan kanske ställas om för att ge topografimätning. Fordonsburna system kompenserar automatiskt för variationer i rampens höjd, men kan troligen ha bristfällig kontroll av position i sidled och mark(väg)lutning.

Topografibestämning bör göras i nära samband med mätningarna, men alltid i efterhand om det innebär körning över området eller annan påverkan.

Fukthalt, jordartsbestämning, temperatur

Fukthalten är den enskilda faktor som har störst inverkan på markens dielektriska egenskaper. Fukt bestäms vanligen genom torkning till konstant vikt vid 105 C eller 110 C. I Dobsons semiempiriska markmodell [10, 26] används volumetrisk fukt och prov bör därför helst tas med en känd volym och utan att komprimeras eller smulas sönder eller torka före mätning. Porositet föreslås beräknas ur skrym- och bulkdensitet där bulkdensiteten kan bestämmas med pyknometri. Jordartssammansättningen kan ha en direkt inverkan på permittiviteten, men framför allt fås en indirekt påverkan genom att finkorniga jordarter binder vatten så att permittiviteten sjunker. Arbetet med dessa bestämningar bör lämnas som externa uppdrag, t ex till SGI, VTI eller laboratorium dessa föreslår. Vissa bestämningar kan ev göras i Grindsjön. Hänsyn bör tas till jordmånsprofil och inträngningsdjup. Sannolikt kommer gränsskiktet mellan vegetation och jord (inkl rötter) i många fall att vara gränsyta för strålningsfältets inträngning vilket gör det svårt att åstadkomma meningsfulla fukt- och jordartsbestämningar.

Temperaturen inverkar på vattnets och därmed markens dielektriska egenskaper. Temperaturen i markens ytskikt bör därför mätas. Vegetationens temperatur får på motsvarande sätt betydelse, men eftersom den är svår att mäta kan man nöja sig med att dokumentera lufttemperaturen ev kompletterad med uppmätta eller kvalitativa uppgifter om instrålningsförhållanden.

Jordmånsprofil

Profilen från markytan och nedåt bör kortfattat dokumenteras. Uppskattade inträngningsdjup ger ledning i hur djupt man behöver gå.

Vegetation

Vegetationens typ och höjd dokumenteras. Biomassan (exkl rötter) kan mätas genom att en viss yta klipps och vägs. Vattenhalten i biomassan kan bestämmas genom torkning.

Speciella mätförhållanden

Anlagda markprov

För att kunna utnyttja befintlig infrastruktur vid t ex Lilla Gåra kan det vid inledande försök vara lämpligt att anlägga markavsnitt direkt på mätplatsen. I nedanstående förslag används t ex markprov på vridbord. Förutom att det kan vara svårt att få sådan mark att helt motsvara naturlig terräng så kommer sådana markavsnitt att vara betydligt mer avgränsade än de naturliga. Det är därför nödvändigt att ge akt på kanteffekter som annars kan komma att dominera resultatet helt. Kan inte radarns "fotavtryck" med god marginal hållas innanför kanten måste någon form av högupplösningsmetod, t ex ISAR, tillämpas.

Mätning i marin miljö

I marin miljö är mycket av "terrängens" variation av temporal snarare än geografisk karaktär. Därigenom blir det svårt eller snarare omöjligt att få en komplett uppsättning bistatiska mätdata som koherent svarar mot en och samma mätsituation. Däremot blir det enklare att samla statistik, man behöver i princip bara göra fler mätningar, och vågformerna kan mätas in med en linjär skanner. Vidare gör vågstrukturen att man måste ta hänsyn till både φ_i och φ_s , inte bara differensen, och att dopplerinnehållet blir viktigt. Därutöver kan särskilda åtgärder behöva vidtas för att skydda mätutrustningen mot den tuffa marina miljön.

Några implementeringsförslag

Direkt bistatisk mätning

Den främsta fördelen med direkta bistatiska mätningar är att man med lämplig utformning på ett enkelt sätt konsekvent kan mäta mot samma markavsnitt. Man bör därför försöka hålla sig till sådana utformningar eller välja andra mätgeometrier.

För fältbruk kan det bistatiska stativet med fördel bestå av en halv- och en kvartscirkelbåge, vilka i sin tur monteras på ett cirkulärt underrede för att lätt kunna flyttas mellan olika markavsnitt. Radien bör av hanterbarhetsskäl begränsas till 1,5-4 m.

Implementering på Lilla Gåra

För preliminära försök kan troligen antingen marinplanet eller stora vridbordet på Lilla Gåra användas med fördel. Användning av marinplanet förutsätter ett extra stativ för den antenn som inte kan sättas på den befintliga mätbommen. Denna bom täcker alla depressioner i ett halvplan över mätobjektet. Det extra stativet måste nå alla önskade radarelevationer och kunna flyttas i asimutled över minst 90° och helst 200°. Om stativet utformas som en båge med centrum över vridbordets mitt på samma höjd som den befintliga mätbommens vridcentrum kan högre depressionsvinklar nås och antennens inriktning kan förenklas. Det kan också bli lättare att utforma för undvikande av kollisioner mellan stativ och bom. Om antennens horisontella avstånd sätts till halva marinplanets kantlängd (den första antennens avstånd är knappt halva diagonalen) ska en ev stativbåge ha denna radie, medan ett lodrätt stativ behöver vara 5 m högt för att nå 30° depression. Marinplanet medger genom sitt vridbord ISAR-avbildning av marken, samtidigt som detta förmodligen krävs för att undvika bidrag från det uppbyggda markstyckets kanter. ISAR-avbildning kräver i sin tur att den befintliga antennbommen och det extra stativet är stabila nog.

Fig 16 nedan visar en schematisk skiss på hur en bistatisk uppställning för stora vridbordet skulle kunna utformas. Markprov i form av t ex utrullningsbar färdig gräsmatta placeras på vridbordet. Antennerna skall kunna flyttas oberoende av varandra och styras och positioneras, helst automatiskt. En av cirkelbågarna måste kunna roteras kring vridbordets rotationsaxel. Med rätt utformning kommer antennerna hela tiden att vara riktade mot vridbordets centrum, men en peklaser eller ett sikte kan gärna användas för kontroll. Kalibrering kan utföras t ex genom att antennerna riktas om mot ett kalibreringsobjekt på frirymdsmätplatsen.

Fördelarna med denna uppställning är: 1) Att man kan processa SAR/ISAR avbildningar av sina resultat och därmed ha möjlighet att grinda ut ett väldefinierat område. På detta sätt skulle man få en god aperturkontroll och undvika problemen med för sändar- och mottagarantennerna olikstora, taperade lobprojektioner på marken (footprints) genom att välja ett centralt avsnitt med liten tapering. 2) Att mycket av den utrustning som krävs, dvs antenner, vridbord, generatorer, datainsamling och analysprogram, finns men kan komma att behövas modifieras. 3) För varje sändardepression görs mätningen vid alla sändarasimuter vilket ökar det statistiska underlaget och avslöjar ev asimutal anisotropi. 4) Att ISAR-bilden ger en uppfattning om klottrets finstruktur och footprintberoende. 5) För högre mät hastigheter kan antalet mottagarantennerna ökas. 6) Ett stativ av denna typ vore också, i ett senare skede, lämpligt för mätningar på olika platser ute i fält. Om den nedre stödringen utformas som en cirkulär räls skulle SAR-avbildning kunna göras även vid mätning ute i fält.

Nackdelarna med uppställningen är: 1) Att avstånden är korta vilket medför begränsningar dels då det gäller att studera mark med storskaliga ojämnheter, t ex blockrik terräng. 2) Närfältseffekter skulle kunna göra sig gällande för den spekulära markreflexionen, men eftersom fjärrfältsavståndet är storleksberoende kan markstycke av anpassad storlek väljas i ISAR-bilden.

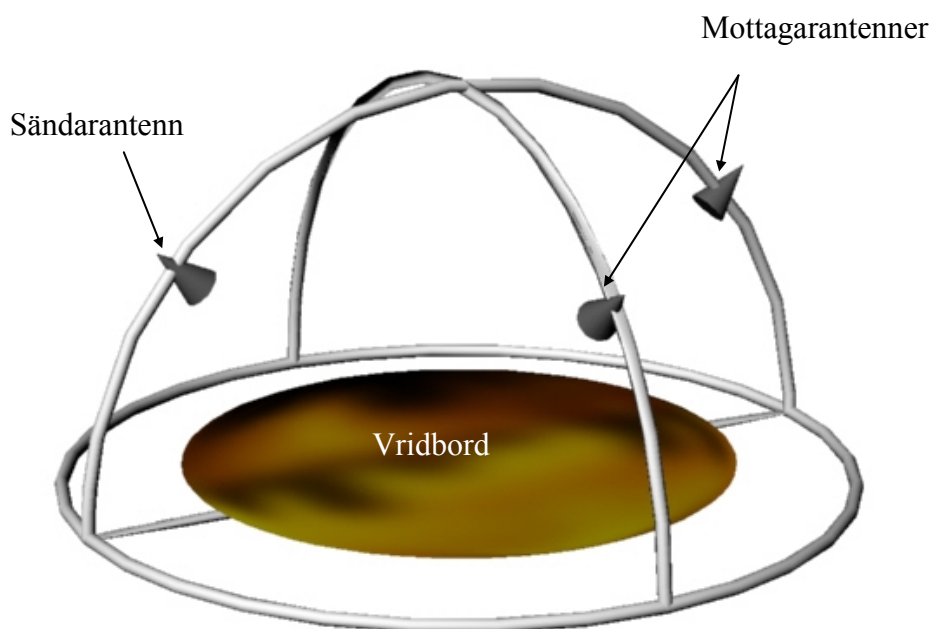


Fig 16 Schematisk skiss på möjlig bistatisk mätuppställning. Den ena bågen ska kunna vridas i asimutal led, och kan också utformas som en kvartscirkel. Fler mottagarantennar kan användas för att öka mät hastigheten.

"Tristatisk" mätning

En av svårigheterna med planering av tristatiska mätningar är att man har ett stort antal frihetsgrader (antennernas och hjälpreflektorns position och riktning x , y , z , θ , ϕ , totalt 15 st, polarisation oräknad), som inte på ett enkelt och naturligt sätt är kopplade till de 3-4 vinklar vi är intresserade av. Naturligtvis finns vissa randvillkor, en antenn ska vara riktad mot hjälpreflektorn som i sin tur ska rikta strålen mot samma punkt på marken som den andra antennen. Trots dessa återstår 11 frihetsgrader (x , y , z för antenner och reflektor, x , y för mark). Markkoordinaterna vill man för all del gärna hålla konstanta, men den omflyttning av stativ som detta kräver gör att detta inte är något realistiskt alternativ. Man kan mäta många markpositioner från olika stativkonfigurationer och sedan i efterhand sammanställa informationen som gäller en viss position, men i praktiken kan man inte räkna med att täcka någon enskild punkt från särskilt många riktningskombinationer. I praktiken finns också begränsningar för inställning i enskilda frihetsgrader, begränsningar från direktsignaler som inte kan separeras eller på annat sätt ogynnsamma geometrier. Ett sätt att skapa en överblick över möjliga geometrier är att begränsa frihetsgraderna till ett hanterligt antal och undersöka vilka geometrier det leder till för att därefter undersöka vilka ytterligare frihetsgrader som krävs för att nå ouppnådda geometrier.

Vi begränsar oss här till att undersöka vilka geometrier som nås med sändare och mottagare tillsammans på ett 5 m högt tornstativ och hjälpreflektorn på ett annat 10 m bort. Eftersom

antennerna fortfarande riktas individuellt räknar vi det ändå som ett "tristatiskt" fall. Samplacering ger bra möjligheter att växla sändare och mottagare. Radarhögjd resp reflektorhögjd kan varieras och vi undersöker vilka geometrier punkter på marken inom ett rektangulärt område med en kant längs sträckan mellan tornen och 12 m ut åt sidan ger upphov till. Inga andra inskränkningar görs i inriktningsmöjligheterna. Utöver spridningsgeometri kan man beräkna t ex gångvägsskillnad mellan markreflektad signal och direkreflektad signal eller uppskatta styrkan för olika typer av störande signaler.

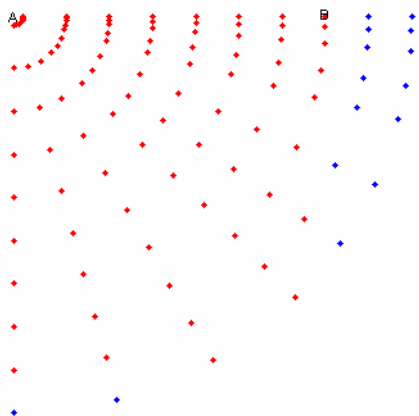


Fig 17 Exempel på mätpunktmönster vid "tristatisk" mätning. Radarn vid A, hjälmpreflektor vid B. 20° radardepression, stativhöjdssteg 0,5 m.

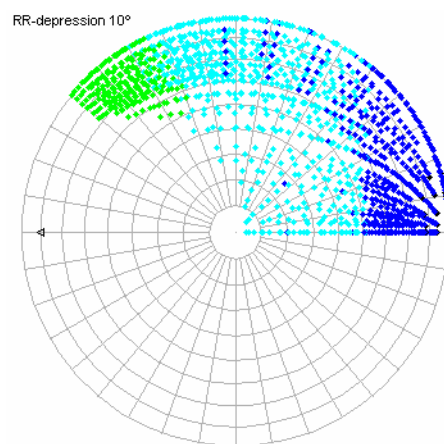


Fig 18 Exempel på uppnåeliga spridningsgeometrier vid "tristatisk" mätning. Radardepression 10°, stativhöjdssteg 0,1 m. Färgerna kodar gångvägsskillnader. Se text för utförligare beskrivning.

Mottagarantennen har för varje önskad radardepression ställts in i denna och från olika höjder skannats i sidled. Sändarantennen har riktats mot hjälmpreflektorn vars höjd varierats men hela tiden orienterats så att den reflekterade strålen riktats mot samma punkt på marken som mottagarantennen. Fig 17 visar ett exempel på hur dessa punkter är fördelade över markområdet. Rödmärkta punkter ligger utanför området och sorteras därför bort. För varje punkt beräknas infallsvinkel mot marken och asimutvinkeln mellan mottagare och hjälmpreflektor samt gångvägsskillnad. Fig 18 visar dessa spridningsgeometrier som alltså kan nås med denna konfiguration. Gångvägsskillnaderna har delats in i olika klasser. Grönt anger att direkreflexen från hjälmpreflektorn och den sökta bistatiska reflexen kan särskiljas genom tidgrindning. Grönblått att man har god marginal för att skilja dem åt i Fouriertransformbaserade avståndsprofiler. Blått att vägskillnaden är över den teoretiska upplösningssgränsen, men att separationen bör göras med större försiktighet. Svart slutligen innebär att signalerna ej kan särskiljas i avstånd. I exemplet har avståndsgränserna satts till 8 m, 1 m resp 0,05 m. 8 m svarar mot en pulslängd < 30 ns, 0,05 m svarar mot bandbredden 6 GHz. Att flera färger kan finnas inom ett och samma vinkelområde beror på att, som ovan diskuterats, flera geometrier kan ge samma spridningsvinklar. Även om signalerna med viss utrustning ej kan särskiljas i avstånd kan reflektorn ligga utanför mottagarloben eller ge ett direktbidrag som är alltför litet för att störa mätningen. Figuren visar att de flesta viktiga spridningsgeometrier kan nås och att förutsättningarna för att särskilja signalerna är goda. Polarisationsgeometrin, som inte visas här, är komplex. Förutom att punktnätet kan förtätas kan grundkonfigurationen ändras, t ex genom att använda högre stativtorn eller flytta dem närmare varandra för högre elevationer. Högre elevationer kan också nås genom att sätta in en hjälmpreflektor även i mottagarstrålgången. För geometrier nära 180° spridningsvinkel krävs andra mätgeometrier, t ex med aperturskärm.

Referenser

- [1] T. Martin, "EMB användargrupp - sammanställning av beräkningsresultat", FOI Memo 01-2947 (2001)
- [2] Bilaga 3, "Simulering av inverkan från vagnsidans lutning på radarmålararea". Ingår i Teknikdemonstrator 2, Förstudiefas 1, Ra10114 (98-03-01), Barracuda Technologies AB, Gamleby
- [3] "Radarsimuleringar med korrugerat markplan", 7.1.2.11 i SAT/Mark fas 3 Bilaga 1 till kapitel 7.1, Ra10171 (98-11-12), Barracuda Technologies AB, Gamleby. Ingår i SAT/Mark Rapport "Förstudiefas 3 pdf teknikdemonstrator 2 (IgTD)".
- [4] E. Zdansky, J. Fagerström, M. Gustafsson, S. Nilsson och J. Rahm, "Redovisning av utveckling av bakgrundsmodellering", FOI-R--0187--SE (2001)
- [5] J. Rasmusson, S. Nilsson, N. Gustafsson och J. Rahm, " Lägesrapport 2002-03-31 Radarmätningar platta-mark för bakgrundsmodellering ", FOI Memo 02-0724 (2002-03-31)
- [6] E. Zdansky, J. Rasmusson, M. Gustafsson, N. Gustafsson, S. Nilsson och J. Rahm, "Jämförelse mellan beräkningar och mätningar av radarmålararea för plan platta i markbakgrund", FOI Memo 02-1742 (Juni 2002)
- [7] S. Axelsson, "Two-bounce Microwave Scattering between a Flat Plate and a Rough Ground Surface", *Radiovetenskap och kommunikation 96 (RVK 96)*, Luleå, juni 1996, s.311-315, ISBN 91-630-4455-2.
- [8] J. Fagerström, "Modellering av radarsignatur för objekt på skrovlig yta", FOA-R--99-01234-615--SE (1999)
- [9] F. T. Ulaby, R. K. Moore, A. K. Fung, *Microwave remote sensing active and passive volume III From theory to applications*, kap 20-21 och app E, Artech House (1986)
- [10] F. T. Ulaby och M. C. Dobson, *Handbook of radar scattering statistics for terrain*, ISBN 0-890006-336-2, Artech House (1989)
- [11] M. W. Long, *Radar reflectivity of land and sea*, 3:e uppl, ISBN 1-58053-153-9, Artech House (2001)
- [12] J. B. Billingsley, *Low-angle radar land clutter, Measurements and empirical models*, ISBN 1-891121-16-2 and 0-85296-230-4, William Andrew Publishing and The Institution of Electrical Engineers (2002)
- [13] F. T. Ulaby and C. Elachi, *Radar polarimetry for geoscience applications*, ISBN 0-89006-406-7, Artech House (1990)
- [14] P. Beckmann and A. Spizzichino, *The scattering of electromagnetic waves from rough surfaces*, ISBN 0-89006-238-2, Artech House Inc. Norwood MA USA (1987). Originally published as *Electromagnetic waves*, vol 4 (1963) by Pergamon Press Ltd.

- [15] J. A. Ogilvy, *Theory of wave scattering from random rough surfaces*, ISBN 0-7503-0063-9, IOP Publishing (1991)
- [16] N. J. Willis, *Bistatic radar*, ISBN 0-89006-427-X, Artech House (1991)
- [17] F. T. Ulaby, R. K. Moore, A. K. Fung, *Microwave remote sensing active and passive volume II Radar remote sensing and surface scattering and emission theory*, kap 12, Artech House (1982)
- [18] G. T. Ruck, D. E. Barrick, W. D. Stuart and C. K. Krichbaum, *Radar Cross Section Handbook Volume II*, kap 9, Plenum Press (New York London 1970)
- [19] T. Lindquist, "Markekomodell för radartillämpningar", LM Ericsson, rapport MI/Xe 3043 (1974)
- [20] S. Björklund, "En studie av markekon vid bistatisk radar", FOA-R--99-01264-408--SE (ISSN 1104-9154) (1999)
- [21] N. Levanon, *Radar principles*, kap 4, ISBN 0-471-85881-1, John Wiley & Sons (1988)
- [22] M. Gustafsson, S. Nilsson och E. Zdansky, "Litteraturoverblick inom området bistatisk markspredning", FOI Memo 02-2332, (2002)
- [23] N. C. Currie (Editor), *Radar reflectivity measurement: Techniques & applications*, ISBN 0-89006-345-1, Artech House (1989)
- [24] S. Axelsson, "Polarimetric statistics of electromagnetic waves scattered by distributed targets", FOA rapport C 30656 3.3 (1993)
- [25] C. Johansson och A. Sume, "Polarimetrisk kalibrering av koherent radar med tillämpning vid 94 GHz", FOI R 0161 SE (2001)
- [26] M. C. Dobson et al IEEE Trans Geosci. Remote Sensing GE-23 (1985) pp 25-46
- [27] J. Fagerström och M. Georgson, "Bakgrundsklotter i ett signaturperspektiv", FOA R 98 00884-615 SE (1988)
- [28] P. Klum, J. Rahm, K. Rixon, L. Bergström och C. Larsson, "Användarhandledning Mfactor 1.0", FOA R 00 01546 616 SE (2000)