

Modellering av sjöytans inverkan på radarsignaturen för fartyg

ÅSA ANDERSSON



Åsa Andersson

Modellering av sjöytans inverkan på radarsignaturen för fartyg

Omslagsbild: *Stealth-teknik Visbyklass*, målning av Bengt Saltö

Titel	Modellering av sjöytans inverkan på radarsignaturen för fartyg
Title	Modelling of the sea surface influence on the radar signature of ships
Rapportnr/Report no	FOI-R--4151--SE
Månad/Month	December
Utgivningsår/Year	2015
Antal sidor/Pages	32 p
ISSN	1650-1942
Kund/Customer	Försvarsmakten
Forskningsområde	7. Sensorer och signaturanpassning
FoT-område	Sensorer och signaturanpassning
Projektnr/Project no	E54573
Godkänd av/Approved by	Martin Rantzer
Ansvarig avdelning	Sensor- och TK-system

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

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

Sammanfattning

Rapporten presenterar pågående samt genomförd verksamhet rörande modellering och beräkningar av radarsignaturen för fartyg i sjöbakgrund. Den ger även en allmän introduktion till sjöklotter och sjöklottermodellering. Arbetet är en del av långsiktig forskning inom FoT om modellering och beräkning av marina radarsignaturer för tillämpning inom exempelvis utveckling och värdering av signaturanpassning, för duellsimuleringar samt för telekrigvärdering.

Modellering och beräkningar av radarsignatur för fartyg i sjöbakgrund är ett stort och komplext forskningsområde. Under de senaste åren har FOI utökat sin kompetens inom området. FOI har studerat modellering av sjöytor och sjöklotter, samt utvecklat programvara för generering av syntetiska sjöytor vid olika sjötillstånd. Vågytorna har använts för beräkning av sjöklotter samt vid kvalitativa studier av radarsignaturen för mål i bakgrund. Speciellt har inverkan av bakgrundsmodell, sjötillstånd och fartygsroll för mycket flacka infallsvinklar, som exempelvis vid sjörobotshot, studerats.

Resultat från beräkningar visar att bakgrunden har stor inverkan på målarean; beräkning av målobjekt i frirymd underskattar målarean jämfört med målobjektet på en vågyta. Ju högre sjötillstånd desto lägre blir målarean. Ett fartygs rörelse i vågorna har stor inverkan på radarmålarean framförallt på grund av att den geometriska yta som visas upp mot radarn varierar.

Fortsatt forskning inom området är nödvändigt, och förslag till framtida arbete ges i rapporten.

Nyckelord: Radarsignatur, radarmålarean, RCS, fartygssignatur, elektromagnetisk modellering, elektromagnetisk spridning, mål i bakgrund, sjöklotter, sjöytemodellering, vågor, skrovliga ytor, telekrigvärdering

Summary

The report presents ongoing and completed activities on modelling and calculations of radar signatures of ships in a sea environment. It also provides a general introduction to sea clutter and modelling of sea surfaces. The work is part of long-term research within R&T on the modelling and calculation of marine radar signatures for application in areas such as signature development and assessment, duel simulations as well as for electronic warfare assessment.

Modelling and calculations of the radar signatures of ships in the sea background is a large and complex area of research. In recent years, FOI has expanded its expertise in the field. FOI has studied modelling of sea surfaces and sea clutter, and developed software for generating synthetic sea surfaces at different sea states. The surfaces have been used for calculations of clutter and for qualitative studies of radar signature of targets in a background. Especially, the influence of the background model, the sea state and ship roll for grazing angles, as for the case of naval missiles, have been studied.

Results of calculations show that the background has a major impact on the radar cross section of the target; calculation of targets in free space underestimate the radar cross section compared to the target in a background. The higher the sea state, the lower the radar cross section. A ships movement in the waves has a great impact on the radar cross section, mainly due to variations in the geometric surface presented toward the radar.

Continued research in this area is necessary, and proposals for future work are given in the report.

Keywords: Radar signature, radar cross section, RCS, ship signature, electromagnetic computation, electromagnetic scattering, target in background, sea clutter, sea surface modelling, waves, rough surfaces, electronic warfare

Innehållsförteckning

1	Inledning	7
1.1	Bakgrund	7
1.2	Syfte	7
2	Arbetet i ett sammanhang	8
2.1	Läsanvisning	9
3	Radarsignaturmodellering av mål i bakgrund	10
4	Modellering och signaturberäkningar av sjöytor	11
4.1	Matematisk modell	11
4.2	Metodik	11
4.3	Radarsignaturberäkningar av sjöytor – slutsatser	13
5	Sjöklotter och sjöklottermodellering	15
5.1	Sjöklotter och dess uppkomst	15
5.2	Sjöklottermodellering	16
5.2.1	Reflektivitet	16
5.3	Sjöklotterberäkningar med empiriska metoder	17
6	Inverkan av kölvatten på havsyttans klotter i radarbilder	19
7	Litteraturöversikt: sjö/fartyg-interaktion	20
8	Inverkan av bakgrundsmodell, sjöstillstånd samt fartygsroll	22
8.1	Modeller	22
8.2	Beräkningsmetod	23
8.3	Inverkan av bakgrundsmodell	23
8.4	Inverkan av sjöstillstånd	25
8.5	Inverkan av fartygsroll och bakgrund	27
9	Slutsatser	29
10	Förslag till framtida arbete	30
11	Referenser	31

1 Inledning

Denna rapport är utgiven inom ramen för FoT-projektet Signaturmodellering inom FoT-område Sensorer och Signaturanpassning. Rapporten ger en sammanfattande presentation av genomförd samt pågående verksamhet rörande modellering och mätningar av radarsignaturen för fartyg i sjöbakgrund. Den ger även en allmän introduktion till sjöklotter och sjöklottermodellering. Arbetet har i huvudsak utförts inom FOI FoT-projekt Signaturmodellering samt Plattformssignaturer, under åren 2011–2015, på uppdrag av Försvarsmakten.

Rapporten vänder sig till dem som arbetar eller ska arbeta med radarsignatur för fartyg.

1.1 Bakgrund

Svenska marinens förband ska ha förmåga till såväl nationella som internationella militära insatser, i kustnära farvatten och på öppet hav. Övervakning av svenskt territorialhav är naturligtvis en av de viktiga uppgifterna. De senaste årens ökade engagemang inom marina uppdrag, både utom och inom Östersjön, samt den tekniska utvecklingen inom sensorområdet medför ökade krav på gott egenskydd. En viktig del är då plattformens Varnar- och MotverkansSystem (VMS), vilket till mycket stor del är baserat på telekrigstekniker. För att kunna utföra insatsoptimeringar krävs att man har god kännedom om sin egensignatur i de olika våglängdsband där man bedömer att det finns potentiella hot, t.ex. inom radar och infraröda området. Man vill dessutom optimera förmågan hos sina egna spanings- och målföljningssensorer. Ett tillämpningsområde som kräver stora mängder signaturdata är inom automatisk måligenkänning (*Automatic Target Recognition*, ATR) där signaturdata används som träningsdata för att testa olika typer av igenkänningsmetoder och algoritmer. Det finns alltså ett behov av att ta fram signaturdata för såväl egna operativa och framtida objekt, som för hotplattformar. Det är med anledning av det efterfrågade behovet av radarsignaturdata som FOI inom projektet studerar hur sjöbakgrunden inverkar på radarsignaturen för ett fartyg, samt hur radarsignaturen för fartyg i sjö kan modelleras och beräknas.

1.2 Syfte

Syftet med arbetet som presenteras här, är att öka kompetensen om hur sjöbakgrunden inverkar på radarsignaturen för ett fartyg, samt hur radarsignaturen för fartyg i sjö – med hänsyn tagen till interaktion mellan mål och bakgrund – kan modelleras och beräknas. Arbetet är en del av den långsiktiga forskningsambitionen inom FoT att kunna beräkna radarsignaturen för ett godtyckligt objekt i realistisk sjöbakgrund, för att sedan kunna användas exempelvis vid utveckling och värdering av signaturanpassning, för duell-simuleringar samt för telekrigvärdering.

2 Arbetet i ett sammanhang

Marina scenarier som innefattar radar och radarmål kan simuleras på olika nivåer beroende på vad syftet är, till exempel taktiska anvisningar, telekrigvärdering, algoritmutveckling för målföljning samt signaturanpassning. Vid flera av dessa stöter man på likartade frågeställningar gällande modellering, även om ”lösningen”, eller valet av metod, sedan är beroende av syftet. Exempel på områden som kan behöva modelleras är (se Figur 1):

- Vågor och vattenytan
- Sjöklotter
- Radarmål i frirymd
- Radarmål i sjö
- Radarspridning från bogvågor och kölvatten
- Radarmotmedel
- Radarmålsökare



Figur 1. Illustration över några av de många pusselbitarna inom modellering av marina radarscenarier.

Områdena överlappar delvis och de har mer eller mindre gemensamt med varandra. Vidare tillkommer beräkningstekniska aspekter på ovanstående modellering samt val av lämpliga metoder för beräkningar.

Som nämnts ovan är projektets långsiktiga mål att kunna modellera och beräkna radar-signaturen för ett godtyckligt objekt i realistisk sjö. Detta är ett brett och komplext forskningsområde som berör flera av de delområden som nämnts ovan. Vart och en av dessa innebär i sig en utmaning och kan vara mycket komplicerade.

FOI har under flera års tid arbetat med att ackumulera den kompetens som krävs för att överblicka forskningsfältet. Flera av områdena har studerats. Arbetet som presenteras i den här rapporten har främst genomförts inom FoT-projektet men även inom avtappande FMV-projekt så som projekt Viktor (2013–2015). Det kan grovt delas in i nedanstående arbetsområden:

1. Vågteori och modellering av vattenytan
2. Modellering och beräkning av sjöklotter
3. Modellering av inverkan av kölvatten på havsyntans klotter i radarbilder

4. Litteraturstudier rörande interaktion fartyg/sjöbakgrund
5. Modellering och beräkning av radarsignatur för fartyg i bakgrund:
 - Inverkan av bakgrundsmodell
 - Inverkan av sjötillstånd
 - Inverkan av fartygets rullning på vågor

Vissa av områdena har undersökts på djupet, medan andra delar har påbörjats. Det har delvis varit en iterativ process; ominriktningar och avgränsningar har behövt göras efter hand i och med ökad kunskap om möjligheter och begränsningar. Sjöområdet har på senare tid prioriterats upp.

2.1 Läsanvisning

Som en introduktion till det stora området *radarsignaturmodellering av mål i bakgrund*, ges i kapitel 3 en kort, allmän beskrivning av frågeställningar som behöver beaktas. Efterföljande kapitel redovisar arbetet inom vart och ett de arbetsområden som nämnts i avsnittet ovan.

Kapitel 4 beskriver metodik för modellering av sjöytor samt aspekter på radarsignaturberäkningar av sådana. I kapitel 5 ges en introduktion till radarsjöklotter och sjöklottermodellering. Exempel på beräkningar för telekrigstillämpning ges. Arbetsområdet som rör modellering av inverkan av kölvatten på klotter i radarbilder beskrivs kortfattat i kapitel 6. Kapitel 7 sammanfattar den litteraturöversikt som genomfördes i ett tidigt skede. Det sista arbetsområdet som behandlar modellering och beräkning av radarsignatur för fartyg i bakgrund, redovisas i kapitel 8. Beräkningsresultat rörande inverkan av bakgrundsmodell, sjötillstånd (våghöjd) samt fartygets rullning redogörs för i var sitt avsnitt. I kapitel 9 beskrivs slutsatser utifrån arbetet som helhet. Avslutningsvis ges förslag till fortsatt arbete i kapitel 10.

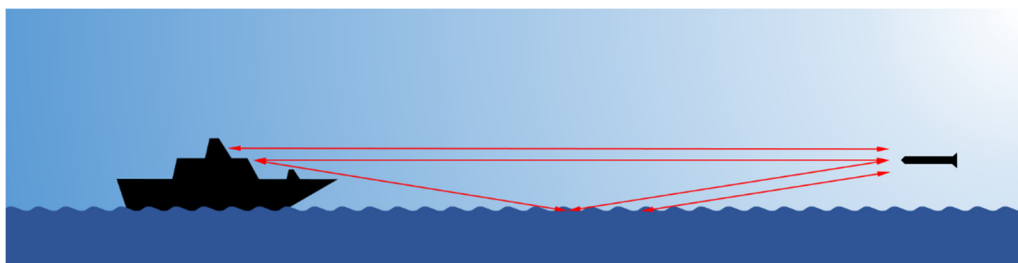
3 Radarsignaturmodellering av mål i bakgrund

Modellering och beräkningar av radarsignatur för mål i bakgrund är ett av projekt Signaturmodelleringens forskningsområden, se t.ex. Ref. [1]. Detta gäller både för sjö- och markfallet. I det här kapitlet ges en kort introduktion till ämnet och de utmaningar man ställs inför.

I ett teoretiskt perspektiv är det vanligt att radarsignaturen för ett objekt i en omgivning delas upp i tre olika komponenter, dessa illustreras nedan i Figur 2. Ett bidrag till den totala signaturen ges av hur radarn ser *objektet i fri rymd*, utan någon omgivning. Detta kallas objektets frirymdsmålarea. Det finns en uppsjö av beräkningsmetoder och beräkningsverktyg som utvecklats och validerats för att beräkna radarspridningen från objekt i frirymd. Metodiken och verktygen bygger ofta på att man har en fasetterad geometribeskrivning av objektet (t.ex. en CAD-modell) där man för ett infallande elektriskt fält applicerar Maxwells ekvationer på varje facett för beräkna det av objektet spridda elektriska fältet.

Ett annat bidrag till signaturen är *bakgrundsklottret*, dvs. bakgrundens reflektion av radarstrålningen. För att undvika stora beräkningsproblem, är det relativt vanligt att man istället för fasettering använder statistiska modeller för att ta hänsyn till detta bidrag. I kapitel 5 ges en introduktion till sjöklotter och sjöklottermodellering.

Den tredje komponenten består i radarstrålningens *interaktion mellan bakgrund och objekt*. I det marina fallet handlar det alltså om radarstrålningens spridning från fartyget till det omgivande vattnet och tillbaka till radarn och vice versa. Man har kunnat påvisa, både via mätningar och beräkningar, att denna växelverkan kan ge ett signifikant bidrag till den totala radarsignaturen.



Figur 2. Schematisk bild över de tre spridningsbidragen till ett fartygs radarsignatur.

Rent teoretiskt är en dock en utmaning att koppla en statistisk modell (bakgrunden) med en deterministisk modell (fasetteringen av objektet). En teknisk möjlighet är att även beskriva bakgrunden med en deterministisk modell (fasettering). Denna möjlighet är dock i praktiken begränsad. För att en vågta ska vara realistisk i radarsammanhang behöver den modelleras med mycket små facetter, samtidigt som man ofta behöver utföra spridningsberäkningarna på stora scener, se diskussion i avsnitt 4.3. Detta leder i nuläget tyvärr till orimligt stora och långa beräkningar. Möjligen kan man tänka sig att sådana beräkningar kommer att bli genomförbara i framtiden i och med allt bättre datorer.

På grund av dessa svårigheter lämnas interaktionsbidraget ofta därhän. FOI har under ett antal år studerat möjligheten att hitta praktiskt användbara metoder, som tar hänsyn till alla spridningsbidragen på ett fysikaliskt tillfredsställande sätt för realistiska objekt i en realistisk omgivning.

4 Modellering och signaturberäkningar av sjöytor

Även om möjligheterna att använda deterministiska vågytor till ”skarpa” fartygssignaturberäkningar visat sig vara begränsade, så är det ändå av stort värde att ha kunskap om vågor och vågytor, samt att kunna generera syntetiska vågytor för olika sjöstillstånd. Det här kapitlet sammanfattar arbetet som tidigare redovisats i Ref. [2]. Syftet med att kunna framställa modellerade ytor var till en början, att dessa skulle kunna användas vid beräkning av sjöklotterbidraget. Inom projektet utvecklades därför programvara, med vilken facetterade sjöytor för olika vindhastigheter kan generas, se Ref. [2], [3] och [4]. Denna har sedan kommit till stor nytta både för beräkningar av sjöklotter samt senare även vid kvalitativa studier av vågornas inverkan på radarsignaturen för objekt i sjöytan, se kapitel 8. Av de arbetsområden som beskrivs i den här rapporten, kom arbetet med sjöytemodellering kronologiskt sett först. Det utgör i princip projektets start för arbetet rörande radarmål i sjöbakgrund.

4.1 Matematisk modell

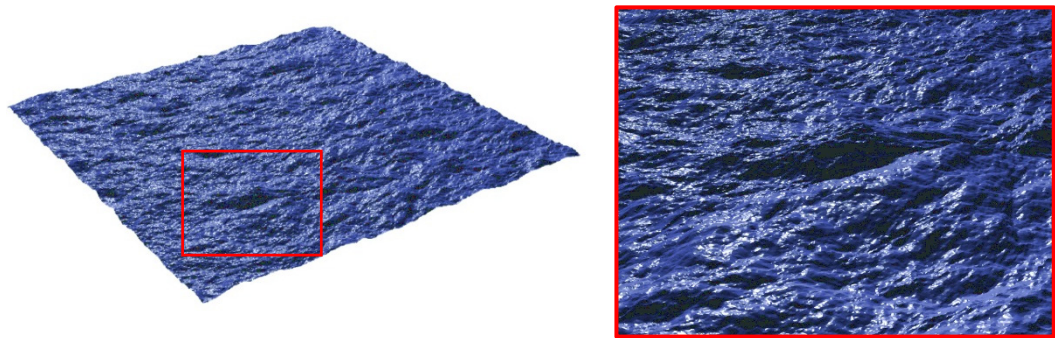
Modellering av havsvågor är en utav många delar inom det breda forskningsområdet fysikalisk oceanografi [5]. Modellerna används bland annat för att göra prognoser och för att studera olika typer av processer. Ett helt annat område som under de senaste 15–25 åren varit drivande inom modellering av vattenytor är film- och datorspelsindustrin. Här är syftet att ta fram våg- och vattenmodeller för naturogen animering. Den metodik som använts för vattenytemodelleringen vid FOI utgår delvis ifrån dessa [6]. En viktig notering är att modellerna måste anpassas för att kunna tillämpas i radarområdet – det är inte tillräckligt att en havsyta ser bra ut rent visuellt.

Om man tittar ut över havet, ser ytan ofta ut att vara sammansatt av slumpmässiga vågor med olika längd och höjd. Det är inte praktiskt möjligt att hålla reda på varje individuell våg – och även om man kunde det så skulle det inte vara speciellt meningsfullt. Man är istället intresserad av att beskriva de viktiga egenskaperna för givna förhållanden. Det är därför vanligt att använda statistiska modeller vid modellering av havsytor. Ett område med vågor, ett s.k. våghöjdsfält, beskrivs matematiskt som en *summa av många* olika långa vågor, superposition. Det faktum att våghöjdsfältet kan beskrivas med hjälp av superposition medför också beräkningstekniska fördelar genom att man kan använda Fast Fourier Transforms (FFT), en snabb beräkningsmetod. För att beskriva ett våghöjdsfält används ofta s.k. vågspektrum. Ett vågspektrum är en sannolikhetsfördelning som uttrycker hur våghöjden (eller vågenergin) är fördelad på olika vattenvåglängder (eller frekvenser). Kort sagt kan man alltså utifrån ett vågspektrum utläsa vilka vattenvåglängder som är vanligare än andra för givna parametrar så som vindhastighet, vattendjup m.m. Det finns många olika vågspektrum, ofta med liknande form och empiriska, dvs. de är baserade på mätningar av våghöjd ute till havs. I FOI:s arbete se Ref. [2] har tre av de genom åren mest använda vågspektrumen studerats: Phillips, Pierson-Moskowitz och JONSWAP spektrumen. Dessa gäller för djuphavstillstånd. Värt att notera är att vågspektrum för Östersjön troligen skiljer sig från vågspektrum för världshaven.

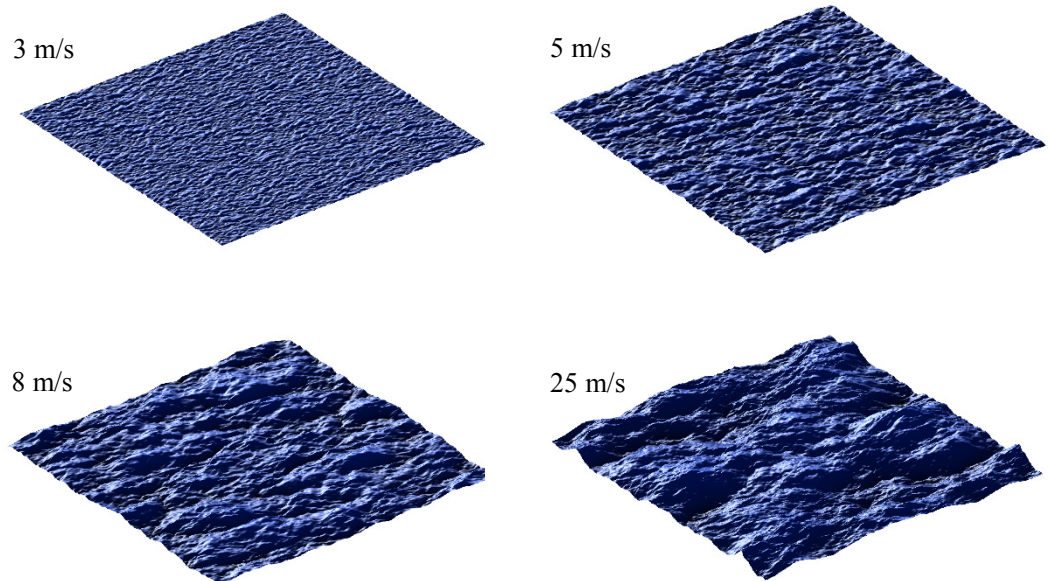
4.2 Metodik

Inom projektet utvecklades ett program för generering av syntetiska sjöytor. Metodiken som ligger till grund för detta [6], utgår från att ett beräkningsnät med lämplig täthet, svarande mot ett område man vill modellera, exempelvis 100 m x 100 m. För varje position, $\mathbf{r}=(x,y)$, i rutnätet och för varje tidpunkt, t , vill man beräkna en våghöjd, h , dvs. $h = h(\mathbf{r},t)$. Med utgångspunkt i Navier-Stokes ekvationer för vätskors rörelse i kombination med konservering av massa och en rad andra antaganden, kan man erhålla uttryck för just

våghöjden som funktion av horisontell position på en yta och av tid. Våghöjderna, som egentligen beräknas i det så kallade vågvektorrummet eller frekvensrummet med hjälp av Fouriertransformer, beskrivs med de vågspektrum (sannolikhetsfördelningar) som nämnts ovan. När våghöjderna har beräknats för varje punkt i beräkningsnätet, irregulariseras detta för att undvika beräkningsartefakter som annars kan uppkomma i efterföljande radarberäkningar. Den modell av en vattenyta som man nu har, kan slutligen facetteras för att användas i t.ex. radarberäkningar. I Figur 3 och Figur 4 nedan visas exempel på syntetiska vattenytor som genererats på det här sättet.



Figur 3. Exempel på renderad vattenyta med JONSWAP spektrum. Till vänster: yta 100 m x 100 m stor. Till höger: förstoring av ungefärligt markerat område i den vänstra bilden.



Figur 4. Exempel på renderade vågytor med modifierat Phillipsspektrum, 100 m x 100 m, för vindhastigheterna 3 m/s (överst till vänster), 5 m/s (överst till höger), 8 m/s (nederst till vänster) samt 25 m/s (nederst till höger).

4.3 Radarsignaturberäkningar av sjöytor – slutsatser

En syntetisk vattenyta kan alltså genereras enligt avsnitt 4.2. Tillämpningar inom radarområdet medför dock vissa aspekter att ta hänsyn till. Här kommenteras några viktiga slutsatser ifrån arbetet rörande deterministiska radarsignaturberäkningar av genererade sjöytor.

- **Beräkningsnätets upplösning**
För att kunna utföra radarsignaturberäkningar på en modellerad sjöyta behöver ett beräkningsnät genereras. Beräkningsnätet måste ge en representativ bild av ytan, vilket medför att nätets nödvändiga upplösning beror av vilket sjötillstånd och vilken typ av vågor som skall studeras. Exempelvis krävs ett fint beräkningsnät då små s.k. Braggvågor är inkluderade (se vidare nedan). Även radarvåglängden har betydelse för val av upplösning. Generellt gäller att ju finare beräkningsnät, desto längre blir beräkningstiden för radarsignaturberäkningarna. Det finns alltså en praktisk begränsning i hur noggrant sjön kan modelleras.
- **Scenstorlek**
För många tillämpningar krävs att en geometriskt sett stor scen modelleras och används i radarsignaturberäkningarna. Om man exempelvis är intresserad av att beräkna radarsignaturen för ett fartyg i en realistisk omgivning, behöver både fartyget och en stor omgivande vattenyta modelleras och fasetteras. Även beräkningar av sjöklotter – dvs. spridningen från enbart sjöytan – fordrar en stor yta. Sådana storlekskrav, speciellt i kombination med krav på fin upplösning (små fasetter), medför ofta orimligt långa beräkningstider.
- **Braggvågor**
Det är allmänt känt att de små centimeterstora Braggvågorna (även kallat ”rippel”), har stor inverkan på radarreturen från en sjöyta. Braggvågor bildas vid mycket låga vindstyrkor och finns nästan alltid, utom vid stiltje. Vid kraftig vind och höga vågor ligger Braggvågorna överlagrade på de större vågorna. Se vidare kapitel 5 för diskussion om vågor. Metodiken bakom modellering av vattenytor som har beskrivits kort i föregående avsnitt gäller *inte* för dessa korta vågor. En modell som både tar hänsyn till de stora vågorna beräknade via vågspektrum enligt ovan, och till de små men viktiga Braggvågorna, behövs för radarsignaturberäkningar. Detta är inte trivialt, både utveckling och modifieringar krävs.
- **Kanteffekter**
Ytterligare något som bör beaktas vid användning av fasetterade vattenytor, är att den modellerade ytan inte är oändlig utan är begränsad, den har en kant. Detta är förstås inte realistiskt och det finns en risk att spridning från kanterna, samt från de vågor som ligger närmast kanterna, kan ge ett stort bidrag till den totala radarspridningen från den modellerade ytan. Detta gäller framförallt vid flacka belysningsvinklar.

Som nämndes i början av kapitlet var det *initiala* syftet med att ta fram modellerade ytor, att dessa skulle kunna användas vid beräkning av sjöklotterbidraget. Under arbetets gång har både kända och tidigare okända svårigheter identifierats. Det bedöms dock vara av värde att kunna generera ytor för olika sjötillstånd och att använda dem i vissa beräkningar av radarspridning. Medvetenhet om begränsningarna och försiktighet i hur beräkningsresultat används är mycket viktigt.

Sjöytor som har renderats med FOI:s program, har använts för beräkningar av radarspridning med beräkningsverktyget SE-Workbench [7], se beskrivning i avsnitt 8.2. Resultaten från beräkningar av sjöklotter har jämförts med beräkningar från empiriska metoder (se kapitel 5) med gott resultat. De modellerade ytorna har även använts vid kvalitativa studier av vågornas inverkan på radarsignaturen för objekt i sjöytan, se kapitel 8.

En annan aspekt är vikten av att validera modeller mot mätningar. Detta är ett omfattande och utmanade arbete, och skulle kunna tänkas ske bl.a. genom internationella samarbeten. Det finns ett brett intresse av att kunna modellera, och att validera modellering, av både sjöklotter och fartygssignaturer. FOI deltar för närvarande i NATO-grupp SET-203 "Ship Radar Signature Management", vars målsättning är att utreda vilka krav som ska ställas på ett s.k. *Signature Management System* (SMS), vad gäller indata samt detaljeringsnivå. SMS är avsett som ett ombordsystem för att i realtid eller nära realtid, kunna avgöra upptäcktsavstånd för egna och andras fartyg. FOI har tidigare deltagit i de s.k. NEMO-försöken med radarmätsystemet ARKEN. Mätningar av både fartygssignaturer och radar-motmedel genomfördes [8]. NEMO är en återkommande, stor NATO-mätkampanj med fokus på test och värdering av motmedel och signaturer.

5 Sjöklotter och sjöklottermodellering

I det här kapitlet ges en introduktion till radarsjöklotter och radarsjöklottermodellering som bakgrund till sjöklotterberäkningar. Sjöklotterberäkningar har dels genomförts inom FoT-projekt Signaturmodellering med den metodik för rendering av syntetiska sjöytor som redovisas i kapitel 4, och även inom FMV-projekt Viktor under 2015 med hjälp av empiriska metoder, se avsnitt 5.3 nedan samt Ref. [9]. Modellering och beräkning av radarsjöklotter är av stor betydelse inom bland annat värdering av telekrigåtgärder. Som exempel kan nämnas ett scenario då en radarmålsökare i en robot ska värdera radarspridning från ett fartyg med störning av sjöklotter och möjligen även ifrån motmedel.

Det finns en uppsjö av litteratur inom området, för en mer utförlig dokumentation se exempelvis Ref. [10] och [11]. Då arbetet som presenteras här enbart involverar radar-frekvenser, används i fortsättningen oftast benämningen sjöklotter.

5.1 Sjöklotter och dess uppkomst

Den oönskade¹ radarreturen från en sjöyta kallas radarsjöklotter. Spridning av radarstrålningen beror på en mängd olika faktorer, som exempel kan nämnas vattenvågmönster, radarfrekvens, polarisation och radarns position i förhållande till sjöytan. Vågornas utseende och hastighet beror i sin tur på bland annat vindhastighet, vattendjup samt på hur länge och över hur stort utrymme vågorna har vuxit till (s.k. fetch).

Olika slags vattenvågor har olika inverkan på radarspridningen. Några olika vågor som ofta nämns i radarklottesammanhang kan kort beskrivas enligt följande:

- Gravitationsvågor: Vågor vars utbredningshastighet styrs primärt av gravitationen. Vattenvågor av längd som är större ca 5 cm betraktas gravitationsvågor.
- Vindvågor: Vågor orsakade av direkt vind. Vindvågor är en typ av gravitationsvågor.
- Krusningar: Små vindvågor som orsakas även av mycket svag vind. Krusningarna är av radarvåglängdsstorlek, mindre än ca 2.5 cm, och anses av många ge betydande bidrag till klottret. Krusningarna kallas även Braggvågor eftersom de orsakar så kallad Braggspredning². Braggvågorna är överlagrade på vindvågorna.
- Dyningar: Vindvågor kallas dyningar efter att det slutat blåsa. Dyningar kan röra sig över stora områden och blir därför avrundade/långa. De anses ge signifikant lägre bidrag till klottret än krusningarna.
- Svallvågor: Vågor som uppstår efter ett objekt som rör sig på ytan.

Figur 5 visar några av dessa vågor.

¹ Det finns givetvis fall då radarspridningen från en sjöyta är en *önskad* mottagen signal, t.ex. för satellitburen SAR (*Synthetic Aperture Radar*) vid oceanografiska studier.

² Braggspredning kan sägas vara konstruktiv och destruktiv interferens av reflexer från geometriska strukturer (här de små vattenvågorna) av ungefär samma storlek som ljusvåglängden (här radarvåglängder).



Figur 5. Exempel på vågor i Östersjön.

Sjöklotter har studerats ingående ända sedan andra världskriget. Många olika typer av system utsätts för sjöklotter, både civila och militära, exempelvis sjöfartsövervaknings-system, marina spaningsradarsystem – både flyg- och fartygsburna – samt sjörobotsystem. Egenskaperna hos sjöklottret kan variera mycket mellan dessa olika radartillämpningar. Det är många gånger önskvärt att kunna förstå och förutsäga karaktäristiken, helst för varje enskilt radarsystem. Modellering och simulering är ett sätt att försöka åstadkomma det.

5.2 Sjöklottermodellering

Modellering och simulering av radarsjöklotter används inom både design, utveckling och test av radarsystem. De kan även användas som underlag till kravspecifikation vid upphandling av radarsystem. Representationen av klotteregenskaper kan användas som input till utveckling av detektionsprocesser och vid värdering. Omfattande forskning och diskussioner pågår inom modellering och simulering av sjöklotter.

Värt att notera är att man ibland skiljer på *sjöklottermodellering* och *sjöklotterssimulering*. Skillnaden är subjektiv, men vanligt är att beskriva sjöklottermodellering som modellering av radarstrålningens spridning av sjöytan, medan sjöklotterssimulering fokuserar mer på simulering av sjöklottrets inverkan i ett radarsystem, innefattandes radaregenskaper så som integrationstid och vågformer. Nedanstående handlar om sjöklottermodellering.

Idealt sett bör en noggrann modell av sjöklotter innefatta både temporal och rumslig karaktäristik. Amplituden för klotterreturen från en viss plats varierar med tiden. För en viss tidpunkt varierar också amplituden beroende på platsen det härrör ifrån. Ofta används statistiska fördelningar för att beskriva dessa egenskaper. Sjöklottrets spektrala egenskaper härrör ifrån sjöytans rörelse. Vanligen nämns tre processer: spridning från krusningar, spridning från vågtoppar precis före de bryts (*burst scattering*) och spridning från grova vågor när de bryts (*whitecap scattering*). Detta illustreras i Dopplerspektrum. Att modellera alla egenskaper hos sjöklotter är mycket komplext. Genom åren har många olika, mer eller mindre väletablerade, modeller presenterats. De kan mycket grovt delas in i empiriska och teoretiska modeller, alternativt i statistiska modeller och elektro-magnetiska modeller. För en överblick över området se t.ex. Ref. [10] och [11].

5.2.1 Reflektivitet

Den vanligast förekommande beskrivningen av storleken av sjöklotter är dess medelreflektivitet, σ^0 , även kallad specifik radarmålarea eller normerad radarmålarea. Medelreflektiviteten, kort ”reflektiviteten”, definieras som radarmålarean per areaenhet för en lokalt horisontell belyst yta, med enhet m^2/m^2 eller $\text{dB m}^2/\text{m}^2$. Det numeriska värdet är

en funktion av många parametrar så som sjöstillstånd, bestrykningsvinkel³, polarisation, radarfrekvens, utbredningsförhållanden och vindriktning relativt radarn. Generellt kan sägas att σ^0 ökar med ökande vindstyrka (eller sjöstillstånd). Likaså ökar σ^0 med ökande bestrykningsvinkel. För en mer ingående diskussion reflektivitetens beroende av bestrykningsvinkeln, se bl.a. Ref. [9].

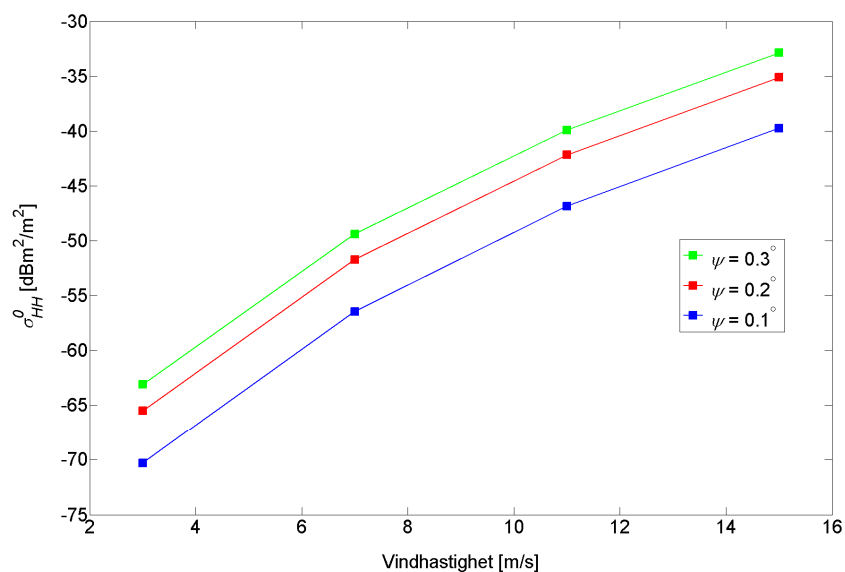
Reflektivitet är ett mycket använt begrepp både inom modellering och inom mätningar av sjöklotter. Hundratals mätkampanjer har genomförts, både till havs och med hjälp av vågtankar, för att bestämma reflektiviteten experimentellt. En sammanställning i form av sju tabeller, av en omfattande mängd data från sådana mätningar ingår i 1991 års upplaga av boken Radar Design Principles av Nathanson *et al.* [12]. Sammanställningen utgör förmodligen är den mest kompletta databasen över sjöklotterreflektivitet som finns tillgänglig. Tabellerna är ovärderliga referensdata och används ofta som bas för radar-specifikationer och prestandauppskattningar.

Specifika radartillämpningar involverar dock ofta parametrar som inte finns med i tabellerna. Det är då smidigt att använda empiriska modeller. Empiriska modeller medger beräkningar över ett kontinuum av parametervärden, samtidigt som de är validerade av experimentella data. Exempel på kända empiriska sjöklottermodeller för beräkning av reflektivitet är GIT-modellen, Hybrid-modellen, TCL-modellen och NRL-modellen. För korta beskrivningar av dessa se t.ex. Ref. [9].

5.3 Sjöklotterberäkningar med empiriska metoder

Inom FMV-projekt Viktor under 2015, studerades några olika empiriska sjöklottermodeller och beräkningar av reflektivitet genomfördes, se Ref. [9]. Syftet var då användning och implementation i en generisk telekrigssimuleringsmodell. De mängdsimuleringar av telekrigåtgärder som är nödvändiga, medför begränsningar i godtagbara exekveringstider. Detta ställer i sin tur krav på smidig modellering och beräkning av sjöklottret, i nivå med övrig delfunktionalitet inom simuleringsmodellen. En deterministisk spridningsberäkning av en syntetisk sjöyta som beskrivits i avsnitt 4.3 var alltså inte lämplig just här. Istället användes en empirisk modell. Figur 6 visar exempel på resultat från reflektivitetsberäkningarna med NRL-modellen.

³ Bestrykningsvinkeln (eng. "grazing angle"), definieras som vinkeln mellan infallande "radarstråle" och havsyttans tangent.



Figur 6. Beräknad reflektivitet, σ_{HH}^0 [dBm²/m²], som funktion av vindhastighet för tre olika bestrykningsvinklar, ψ , vid frekvensen 9.5 GHz, HH-polarisation.

Den kända karaktärstiken för sjöklottrets beroende av både bestrykningsvinkel och vindhastighet ses i Figur 6; ju flackare vinkel (dvs. lägre ψ), desto mer radarstrålning reflekteras bort (lägre reflektivitet), samt ju högre vågor desto mer sjöklottar (högre reflektivitet).

6 Inverkan av kölvatten på havsyntans klotter i radarbilder

FOI har även studerat modellering av hur kölvatten inverkar på sjöklotter i SAR-bilder (*Synthetic Aperture Radar*). Ett fartyg i rörelse orsakar ett kölvatten, en vak, som starkt påverkar havsyntans krusningar eller Braggvågor. Modulationen av Braggvågorna och dess ändring av havsyntans reflektivitet kan beräknas om havsyntans vattenströmmar är kända. Detta arbete är redovisat i Ref. [13].

Radarspridningen från kölvatten är även intressant att studera i samband med icke bildalstrande radarsystem. Värt att notera, speciellt i samband med lågsignaturfartyg, är att kölvatten kan ha stor radarsignatur. Radarspridning från kölvatten är ett område av intresse för mer forskning.

7 Litteraturöversikt: sjö/fartyg-interaktion

Som ett led i projektets arbete för att öka kompetensen inom modellering av marina radarsignaturer, gjordes en avgränsad översikt av litteraturen. Denna genomfördes i huvudsak under 2012, efter det inledande arbetet med sjöytemodellering och beräkningar av sjöklotter via egengenererade sjöytor, se kapitel 4. Erfarenheten från dessa arbeten var ju, att även om de syntetiska sjöytorna kan användas i flera radarberäkningstillämpningar, så medför de begränsningar (avsnitt 4.3). Alternativa modeller behövs.

Litteraturöversikten hade initialt två syften. Dels att försöka få en uppfattning om det finns lämpliga modeller som tar hänsyn både till stora och små vågor, dels till en allmän omvärldsbevakning av området. Efterhand kom litteraturöversikten att inriktas mer direkt mot modellering av radarsignaturen av fartyg i sjöbakgrund.

Det är inte lätt att dra några generella slutsatser ifrån denna första litteraturöversikt. Forskningsresultaten som presenteras är på mycket varierande nivå avseende såväl beräkningsmodeller som scenariomodeller. Det är till exempel relativt vanligt med tvådimensionella objekt på en endimensionell yta. Det är inte säkert att sådana resultat gäller även för verkliga scenarier. En del artiklar syftar till grundläggande förståelse av viktiga spridningsmekanismer, medan andra redovisar nya numeriska metoder för att beräkna spridningen. Speciellt kan nämnas två omfattande forskningsstudier som har genomförts av Burkholder *et al.* vid Ohio State University på uppdrag av Office of Naval Research, US. [14] och [15].

Några slutsatser ifrån litteraturöversikten redovisas i korthet nedan.

- Högre vindhastigheter ger i allmänhet lägre målareor eftersom 90°-hornreflektoreffekten (nära räta vinklar vid t.ex. skrov/vattenyta) bryts upp.
- För låga vindhastigheter och flacka vinklar är målareans tidsvariation relativt liten (relativt koherent) eftersom fältet är koherent [14]. Variationen i målarea härrör då i huvudsak från målets rörelse upp och ner på de långa vattenvågorna.
- För HH⁴-polarisation, flacka vinklar och skrovlig yta (*rough surface*) tenderer målarean att konvergera mot målarean vid en platt yta [14].
- Vid vertikal (V-) polarisation och flacka vinklar är radarspridningen från vattenytor annorlunda än för horisontell polarisation p.g.a. inverkan av Brewstervinkeln⁵. Det kan därför vara komplicerat att studera V-polarisation i samband med flacka vinklar.
- Det är modelleringsmässigt mer utmanande att studera vertikal polarisation eftersom vattenytan inte kan modelleras noggrant som en perfekt ledare (*Perfect Electrical Conductor*, PEC), som för horisontell polarisation [14].
- För VV-polarisation, flacka vinklar och skrovlig yta (*rough surface*) konvergerar målarean *inte* mot målarean vid en platt yta som för HH-polarisation [14].
- Modellering av sfärisk jord kan kraftigt minska målarean jämfört med en platt jord [14].
- Skrovliga ytor introducerar en betydande korspolarisationskomponent till målarean [14] och [16]. Det kan därför vara viktigt att den fysikaliska modellen medger korspolarisationseffekter.
- Medvetenhet om polarisationseffekter i samband med flacka vinklar är viktigt.

⁴ HH anger utsänt horisontell polarisation och mottagit horisontell polarisation (horisontell likapolarisation).

⁵ Brewstervinkeln, även kallad polarisationsvinkeln, är den infallsvinkel som karakteriseras av att allt reflekterat ljus är helt polariserat.

- Vid högre vindhastigheter och därmed högre våghöjder, ökar korspolarisationsnivåerna. De kan i vissa fall vara jämförbara med likapolarisation [14].
- Det är viktigt att ta hänsyn till variation i målarea p.g.a. fartygets rullning på vågorna. För flacka vinklar kan denna effekt vara större än inverkan av den skrovliga ytan [14] och [17].
- En del senare artiklar innefattar vågbrytning (*breaking waves*) och bogvågor från fartyg. Vågbrytning kan vara viktigt att inkludera framförallt för HH-polarisation och flacka vinklar.
- Numeriska modeller av mål och sjöyta begränsas ofta av befintliga beräkningsresurser. Det är inte praktiskt möjligt att tillämpa dessa modeller på ett realistiska stora 3D-fartyg och radarfrekvenser. Modellerna används ofta för att studera fenomenologin med syfte att få tillräckligt med kunskap för att utveckla mer lämpliga metoder. I och med den snabba datorutvecklingen ökar naturligtvis möjligheterna.
- Högfrekvens (HF)-/stråloptikmetoder kan vara bra för att studera multipel-reflektioner från ytan till målet och vice versa. Dessa metoder blir dock mycket beräkningskrävande (se även diskussion i avsnitt 4.3) p.g.a. det stora antalet strålar som krävs. HF-metoder kan vidare vara olämpliga vid flacka vinklar eftersom vågorna skuggar målet; om inte diffraktionseffekter innefattas, blir spridningsmekanismer ofysikaliska [14].

Sammanfattningsvis kan sägas att modellering och beräkningar av radarsignatur för fartyg i sjöbakgrund är ett mycket stort och aktivt forskningsområde. Det finns inte resurser att bevaka allt detta. Det är dessutom troligt att långt ifrån all forskning inom området redovisas i öppen litteratur. Den huvudsakliga slutsatsen från litteraturoversikten var därför att arbetet bör avgränsas kraftigt. Arbetet föreslogs att inriktas mot studier av radarsignaturen för fartyg i sjöbakgrund för:

- Mycket flacka infallsvinklar
- HH-polarisation

Anledningen till detta val är framförallt tillämpningen inom sjörobotscenarier då flacka vinklar och HH-polarisation är vanligt förekommande, enkelt illustrerat i Figur 2, kapitel 3. Man undviker även svårigheter som uppstår vid vertikal polarisation.

Eftersom litteraturoversikten huvudsakligen genomfördes under 2012, är en uppdaterad litteraturoversikt inom området nödvändig.

8 Inverkan av bakgrundsmodell, sjötilstånd samt fartygsroll

Som diskuterats tidigare i rapporten beror ett fartygs radarsignatur bland annat av hur radarstrålningen sprids av omgivande vatten. Även fartygets interaktion med sjöytan i form av multipelreflektioner har inverkan på radarmålarean. Då ett fartyg rör sig i vågorna varierar dessutom dess geometriska area i riktning mot en radar på grund av dess rörelse i höjdlid, samt roll och stamp. Detta påverkar naturligtvis också radarsignaturen.

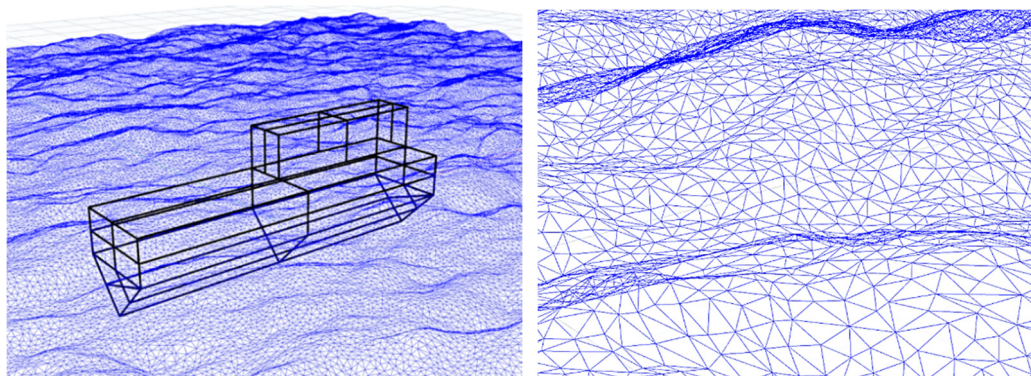
I det här kapitlet presenteras tre arbeten rörande fartygssignatur. Alla med syftet att studera sjöbakgrundens inverkan på radarsignaturen för ett fartyg och hur detta kan modelleras. Frågeställningarna som undersöktes var:

- Hur varierar den beräknade radarmålarean för ett modellerat fartyg beroende på hur bakgrunden modelleras?
- Hur varierar den beräknade radarmålarean för ett modellerat fartyg beroende på sjötilstånd?
- Hur varierar den beräknade radarmålarean för ett modellerat fartyg beroende på dess roll?

I samtliga fall handlar det alltså om *kvalitativa* studier. Syftet har inte varit att beräkna radarmålarean för ett specifikt fartyg – som är det som är det långsiktiga målet med verksamheten. Beräkningsresultat redovisas nedan. Arbetena leder till ökad förståelse för hur radarmålarean bör eller inte bör beräknas, samt ger upphov till nya frågeställningar. Detta är inledande arbeten, mycket återstår. Nedan används förkortningen RCS (*Radar Cross Section*) för radarmålarea.

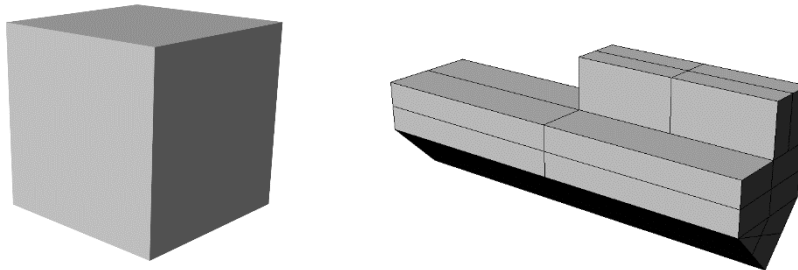
8.1 Modeller

De modellerade sjöytor som har använts beräkningarna, har genererats med FOI:s utvecklade programkod (se kapitel 4). Ett antal vågytor har genererats för olika vindhastigheter (och därmed olika sjötilstånd). Exempel visas i Figur 3 samt i Figur 7 nedan. Samtliga ytor är genererade utifrån ett modifierat Phillips-spektrum (se Ref. [2]). För storlek och upplösning se respektive rubrik nedan. I vissa beräkningar har en helt platt begränsad yta använts, i vissa fall har en oändlig spegelblank yta modellerats. Då ej annat anges, har materialegenskaper för perfekt ledande material ansatts. För vissa tidigare beräkningar användes även materialparametrar för vatten. Storleksmässigt bör vågytorna vara så små som möjligt av beräkningstekniska skäl (se avsnitt 4.3), men ändå tillräckligt stora för att rymma en rimlig vågstruktur.



Figur 7. Exempel på modellerat generiskt fartyg i modellerad vågyta till vänster. Beräkningsnätet uppförstorat till höger.

Eftersom syftet med beräkningarna var att få en kvalitativ uppfattning om bakgrundens inverkan, är det viktigt att studera ett enkelt objekt så att inte en specifik geometri leder till felaktiga slutsatser. Objektet måste vara lagom stort, det måste passa in i den modellerade vågytan (som begränsas enligt diskussionen ovan) och ha relativt mycket bakgrund i form av vågor runt omkring. Hur stort sådant område som egentligen är nödvändigt, har inte utretts här. I arbete a) valdes en generisk fartygsmodell. Denna är 16 m lång, 6 m hög och 4 m bred. I arbete b) och c) valdes en helt renodlad geometri i form av en kub med sida 16 m, återigen för att så tydligt som möjligt ge insikt frågeställningen. Figur 8 visar dessa båda modellobjekt.



Figur 8. Enkla geometriska objekt (i olika skala) för radarmålareberäkningar: kub (vänster), generisk fartygsmodell (höger).

8.2 Beräkningsmetod

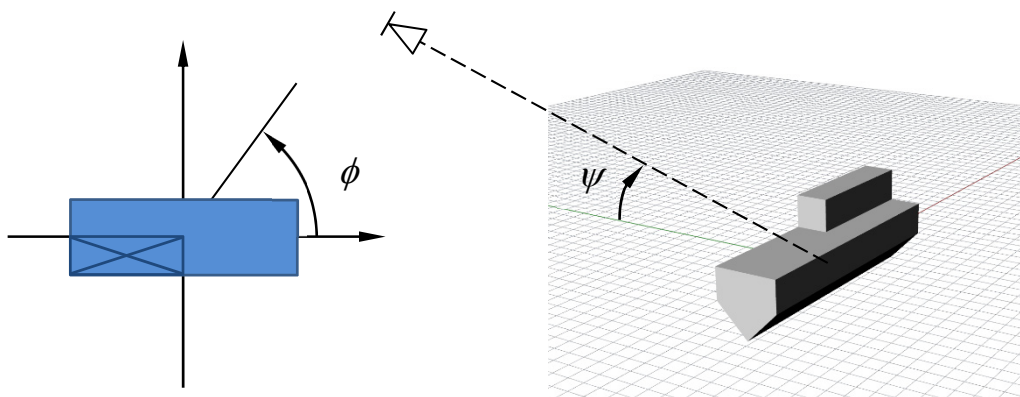
De elektromagnetiska beräkningarna har utförts med beräkningsverktyget SE-Workbench: SE-RAY-EM [7]. Den fysikaliska modellen i SE-RAY-EM utgörs av geometrisk optik (GO), även kallad ray-tracing, i kombination med fysikalisk optik (PO). Kortfattat kan sägas att GO behandlar hur strålar faller in och reflekteras rent geometriskt i plana ytor, medan PO inkluderar till viss del även interferens-, diffraktions- och polarisationseffekter. Vid beräkningarna har uteslutande elektriskt fält varit en planvåg med horisontell (H-) polarisation och ibland även vertikal (V-) polarisation. Om inget annat anges har upp till sex GO-studsar, och för vardera av dessa en PO-stud, tagits med i beräkningen. Detta bedöms som tillräckligt för att få ett noggrant beräknat spritt fält enligt SE-RAY-EM:s metodik, men en noggrann studie om hur antalet studsar som tas med i beräkningen (GO/PO) inverkar på resultatet har inte rymts inom det här arbetet. Samtliga beräkningar har gjorts för frekvensen 10 GHz då den bedöms vara intressant i sammanhanget. En frekvens kan anses tillräcklig för just dessa kvalitativa studier.

8.3 Inverkan av bakgrundsmodell

I det här avsnittet redovisas delar av det första arbetet med att undersöka hur den beräknade radarmålarean för ett modellerat fartyg eller ett generiskt objekt beror på bakgrunden. Arbetet genomfördes alltså ganska långt tidigare än de båda arbeten som presenteras nedan, ungefär i samband med litteraturöversikten och i huvudsak innan beslut om avgränsningen mot horisontell polarisation och mycket flacka vinklar.

De resultat som presenteras här är beräkningar av RCS HH⁶-polarisation, som funktion av azimutvinkel, $\phi = 0 - 360^\circ$ med steg om 2° , runt det generiska fartyget, för bestrykningsvinkeln, $\psi = 5^\circ$. Se Figur 9 för definition av vinklar.

⁶ HH anger uteslutande horisontell polarisation och mottagit horisontell polarisation.

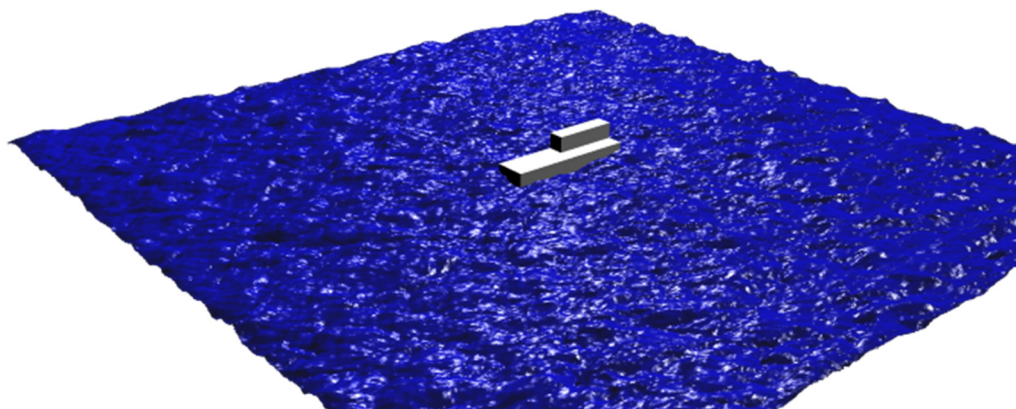


Figur 9. Fartyget i origo, till vänster vy rakt uppifrån med definition av azimutvinkel, ϕ , och till höger av bestrykningsvinkel, ψ , med indikation av radarns orientering relativt fartyget.

De bakgrunder som jämfördes är:

- Objektet i frirymd
- PEC-plan (perfekt ledande material, *Perfect Electric Conductor*) 100 m x 100 m
- Oändligt stort ledande plan, s.k. ”speglad scen”
- Vattenplan 100 m x 100 m, dielektriska parametrar för vatten⁷
- Vattenvågyta 100 m x 100 m, modifierat Phillips-spektrum, vindhastighet 3 m/s, dielektriska parametrar för vatten⁵, upplösning 512 x 512 (minsta våglängd 10 cm).

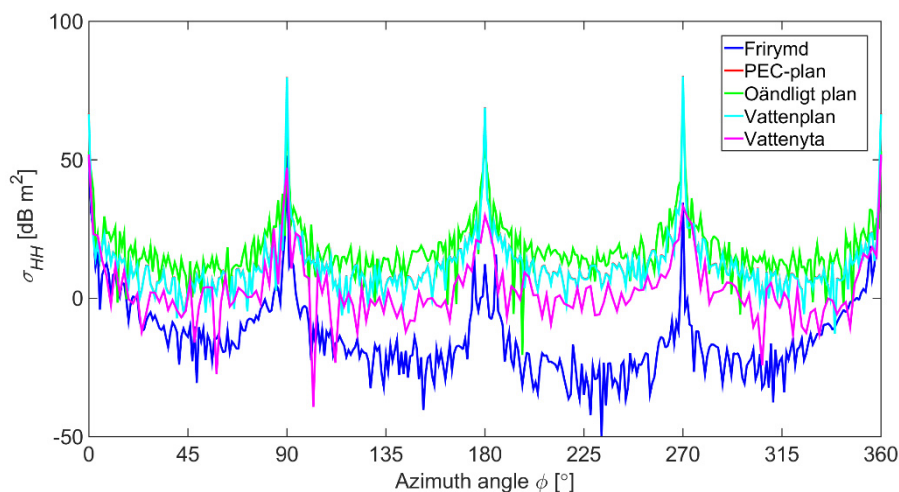
De fall som gäller ”plan” avser alltså en helt platt yta utan vågstuktur. Objektet placerades mitt på respektive yta, enligt exemplet i Figur 10.



Figur 10. Modellerad scen med fartyg i vågyta (vindhastighet 3 m/s).

⁷ Dielektriska parametrar för vatten vid 10 GHz, salthalt 35 PSU (*Practical Salinity Unit*) och temperatur 0° C: $\epsilon = 42 - i42$, $\sigma = 2.80$ S/m, se Ref. [18] och [19].

Resultaten från beräkningarna av radarmålarean för HH-polarisation vid 10 GHz som funktion av azimutvinkeln visas i Figur 11.



Figur 11. RCS HH-polarisation, som funktion av azimutvinkel, ϕ , runt det generiska fartyget i olika bakgrunder (se figur för färgindikation), för bestrykningsvinkeln, $\psi = 5^\circ$, vid 10 GHz.

Oavsett bakgrund gäller att målarean är som störst vid 0° , 90° , 180° och 270° , då stora släta ytor visas mot radarn i nära rätta vinklar. Lägst är målarean vid 45° , 135° , 225° , och 315° , då radarstrålningen till stor del reflekteras bort från radarn.

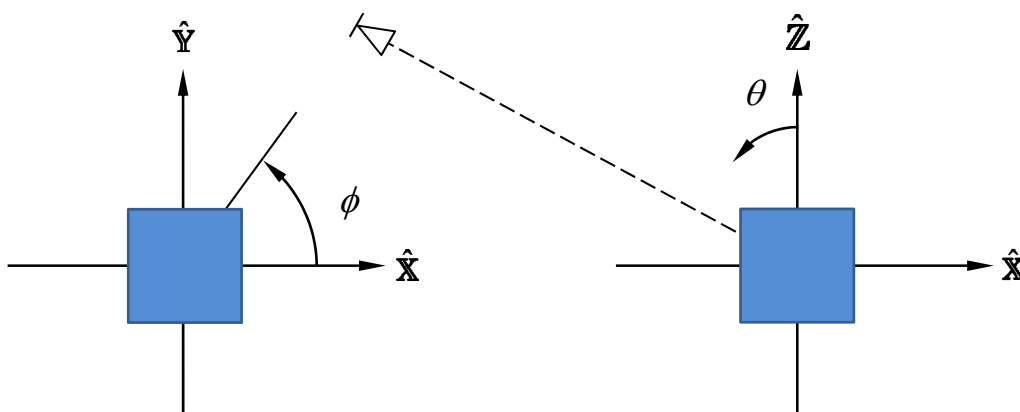
Resultaten i Figur 11 visar att målarean är lägst för frirymdsfallet (blå) och högst då bakgrunden motsvarar ett oändligt stort perfekt ledande plan (grön), eller som det modelleras, en perfekt spegelbild. Vidare är målarean i fallet PEC-plan (röd) och vattenplan (turkos) mycket lika (den röda linjen döljs nästan helt av den turkosa). Detta är naturligt då vatten (och speciellt saltvatten) är en god ledare. Båda dessa är av begränsad storlek (100 m x 100 m), varvid mindre radarstrålning reflekteras tillbaka jämfört med ett oändligt plan (grön). Slutligen ses att fallet med vattenytan med vågor (magenta) ger målarean något lägre än för den släta vattenytan eller PEC-planet. Detta beror på att vågytan sprider radarstrålningen mer diffust, åt fler håll, än en perfekt slät yta.

Sammanfattningsvis kan sägas, att beräkningen av det generiska fartyget i frirymd underskattar målarean i vissa fall kraftigt jämfört med fartyget på en vågyta, samtidigt som beräkningen med speglad scen överskattar målarean jämfört med motsvarande för vågytan. Det är alltså viktigt att fartygets växelverkan med vågytan modelleras på ett korrekt sätt.

8.4 Inverkan av sjöstillstånd

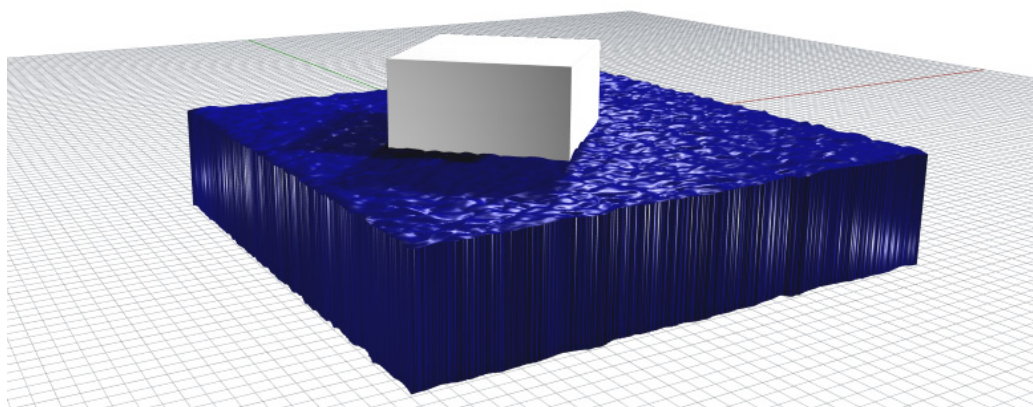
Som en fortsättning på den första studien av bakgrundens inverkan, genomfördes under 2015 RCS-beräkningar för att studera inverkan av olika sjöstillstånd (eller vindhastighet), och därmed olika höga vågor, för flacka belysningsvinklar. Eftersom objektets egen geometri är ointressant i sammanhanget, valdes en så enkel geometri som möjligt, en kub med sida 16 m.

Radarmålareans variation med azimutvinkel, $\phi = 0 - 90^\circ$ runt objektet, för mycket flack bestrykningsvinkel, $\psi = 1^\circ$, har beräknats vid 10 GHz för både HH- och VV-polarisation. Vinkeln ψ är definierad på samma sätt som för det generiska fartyget. För definition av azimutvinkeln ϕ och även rollvinkeln θ (används i avsnitt 8.5) se Figur 12 nedan.



Figur 12. Kuben i origo. Till vänster vy rakt uppifrån med definition av azimutvinkel, ϕ , och till höger definition av rollvinkel, θ , med indikation av radarns position relativt denna.

För att minska eventuell inverkan av kanteffekter roterades objektet 45° relativt ytan, se Figur 13. Vågytor av storlek 50 m x 50 m, upplösning 512 x 512 (minsta våglängd 20 cm), har genererats med FOI:s kod med modifierat Phillips-spektrum och vindhastigheter 3, 5 respektive 10 m/s. Eftersom bestrykningsvinkeln är mycket flack, har en icke-reflekterande ”skyddande kant” satts runt hela ytan för att undvika belysning av vågytans undersida.

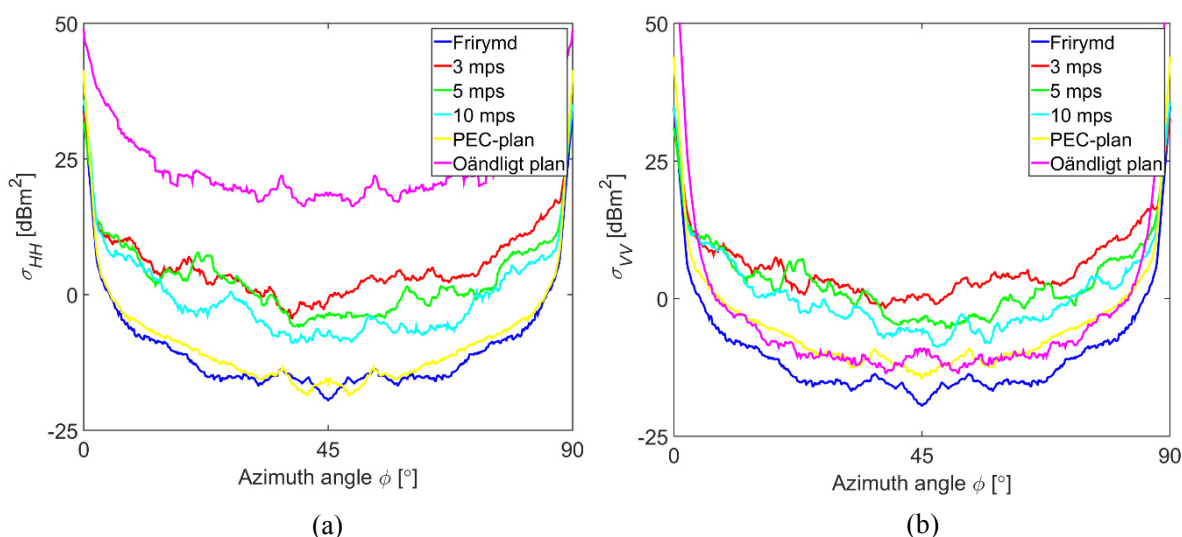


Figur 13. Modellerad scen med objekt i vågyta med kant (vindhastighet 3 m/s).

De bakgrunder som jämförts är:

- Objektet i frirymd
- PEC-plan (perfekt ledande material, *Perfect Electric Conductor*) 50 m x 50 m
- Oändligt stort ledande plan, s.k. ”speglad scen”
- Metallisk vågyta 50 m x 50 m, vindhastighet 3 m/s
- Metallisk vågyta 50 m x 50 m, vindhastighet 5 m/s
- Metallisk vågyta 50 m x 50 m, vindhastighet 10 m/s

I Figur 14 visas den beräknade målarean (flytande medelvärde över $21 \times 0.2^\circ$), HH-respektive VV-polarisation vid 10 GHz, som funktion av azimutvinkel.



Figur 14. RCS HH-polarisation (a) och VV-polarisation (b), som funktion av azimutvinkel, ϕ , för kub i olika bakgrunder (se figur för färgindikation), för bestrykningsvinkeln, $\psi = 1^\circ$, vid 10 GHz.

Oavsett bakgrund gäller att målarean är som lägst vid $\phi=45^\circ$ då radarstrålningen till stor del reflekteras bort från radarn av kubens stora platta sidoytor. Återigen är det frirymds-fallet (blå) som ger lägst målarea utav de olika omgivningarna.

Vid jämförelse av de olika bakgrunderna för fallet med horisontell polarisation, se Figur 14 (a), ger det begränsade PEC-planet (gul) lägst målarea, medan det oändligt stora ledande planet/spegling (magenta) ger i särklass högst målarea. För kub i de olika vågytorna gäller att ju mindre vågor (lägre vindhastighet) desto större blir målarean, dvs. fallet 3 m/s (röd) ger högst målarea medan 10 m/s (turkos) ger lägst målarea. Detta kan förklaras med att ju högre vågor desto mer sprids strålningen åt olika håll, och därmed en mindre del tillbaka till radarn.

De beräknade målareorna för V-polarisation, se Figur 14 (b), är mycket lika motsvarande för H-polarisation. Vindhastigheten, eller sjötillståndet, har samma inverkan på RCS-karaktäristiken. Man kan dock notera den stora skillnaden för fallet oändligt ledande plan (magenta). För V-polarisation ger detta fall en markant lägre målarea än för H-polarisation. Detta härrör troligen från hur det oändligt stora ledande planet (perfekt spegelyta) modelleras rent elektromagnetiskt. Detta behöver undersökas vidare.

Sammanfattningsvis kan sägas, att beräkningen av objektet i frirymd underskattar målarean jämfört med objektet på en vågyta. En tydlig inverkan av sjötillståndet på radarsignaturen av objektet ses. Ju högre sjötillstånd desto lägre blir målarean. Fallet oändligt stort ledande plan ger olika resultat beroende på polarisation. Det är värt att notera att olika våghöjd medför att olika stor del av objektet har direkt *line of sight* till radarn. Delar av objektet skuggas av vågorna. Vidare bidrar returen från olika stora vågor olika mycket till den totala radarsignaturen.

8.5 Inverkan av fartygsroll och bakgrund

Ett fartygs rullning på vågorna har stor inverkan på radarmålarean eftersom varierande geometrisk yta visas upp mot radarn. Denna effekt kan ibland vara stor och viktig att ta hänsyn till. Interaktionen med vattnet påverkas. FOI har inlett studier rörande hur inverkan av fartygsrollen ser ut beroende på hur bakgrunden modelleras. Av samma skäl som ovan studeras en kub.

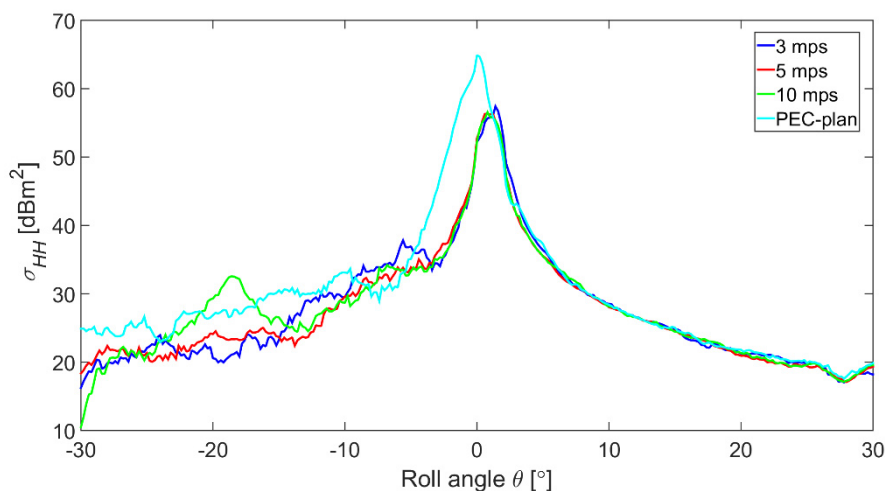
Radarmålareans variation med rollvinkel, $\theta = -30^\circ - 30^\circ$ runt objektet, för bestrykningsvinkeln, $\psi = 1^\circ$, har beräknats vid 10 GHz för både HH- och VV-polarisation.

Rollvinkeln definieras i Figur 12. Negativ rollvinkel indikerar att objektet lutar *från* radarn. Även här har objektet roterats 45° relativt ytan för att minska eventuell inverkan av kanteffekter och samma icke-reflekterande ”skyddande kant” har satts runt hela ytan, se Figur 13.

De bakgrunder som jämförts är:

- PEC-plan (perfekt ledande material, *Perfect Electric Conductor*) 50 m x 50 m
- Metallisk vågyta 50 m x 50 m, vindhastighet 3 m/s
- Metallisk vågyta 50 m x 50 m, vindhastighet 5 m/s
- Metallisk vågyta 50 m x 50 m, vindhastighet 10 m/s

I Figur 15 visas den beräknade målarean (flytande medelvärde över $11 \times 0.2^\circ$) för HH-polarisation vid 10 GHz som funktion av rollvinkel.



Figur 15. RCS HH-polarisation som funktion av rollvinkel, θ , för kub i olika bakgrunder (se figur för färgindikation), för bestrykningsvinkeln, $\psi = 1^\circ$, vid 10 GHz.

Oavsett bakgrund gäller att målarean är störst kring $\theta = 0^\circ$ då kubens stora sidoyta ger en stark retur.

För positiva rollvinklar, dvs. då kuben lutar mot radarn, är målareorna för de olika bakgrunderna mycket lika. Bakgrunderna har samma inverkan på målarean, returen från kuben själv verkar dominera. För negativa rollvinklar, dvs. då kuben lutar från radarn, har bakgrunderna större inverkan på målareans rollvinkelberoende. PEC-planet (turkos) ger generellt en högre målarea än de andra bakgrunderna, speciellt strax innan $\theta = 0^\circ$. För vågytan för 10 m/s (grön) ses en ökning kring $\theta = 20^\circ$ vilket troligen beror på reflexer från en speciell vågstruktur.

Det är svårt att dra några generella slutsatser. Om ett begränsat PEC-plan används som bakgrund erhålls, särskilt för små rollvinklar, en något högre målarea jämfört med om vågytor används. Det är alltså viktigt att ta hänsyn till vattenytans vågstruktur i beräkningen av RCS vid små rollvinklar. Ytterligare studier är nödvändiga.

9 Slutsatser

Modellering och beräkningar av radarsignatur för fartyg i sjöbakgrund är ett stort och komplext forskningsområde. FOI:s kompetens inom området utvecklas både genom egen forskning och omvärldsbevakning. Signaturer är ett integritetskritiskt område; förutom den uppenbara nyttan med förmåga till egen signaturmodellering och signaturberäkningar, är det egna arbetet nödvändigt för att kunna förstå och följa utvecklingen internationellt. Många länder bedriver omfattande forskning inom området. Troligen publiceras endast en del av forskningen öppet. Kontinuerlig följning av vetenskaplig litteratur, deltagande i internationella konferenser och samarbeten såsom NATO-grupper är av stor betydelse.

Under de senaste åren har FOI utökat kompetensen inom såväl modellering av sjöytor och beräkningar av sjöklotter, som inom modellering och beräkning av radarsignatur för fartyg. Egen programvara har utvecklats för generering av syntetiska sjöytor vid olika vindhastigheter. Dessa fasetterade vågytor innebär vissa begränsningar; små vattenvågor är inte inkluderade och noggrann modellering av stora marina scener leder tyvärr ofta till orimligt stora beräkningar. Förmågan att generera syntetiska sjöytor har, trots detta, visat sig vara mycket användbar. Kunskap om modellering och beräkning av sjöytor och sjöklotter kommer till nytta i tillämpningar inom bland annat värdering av telekrig.

FOI:s studier har lett till ökad förståelse för hur radarsignaturen för fartyg inverkas av bakgrundsmodell, sjötillstånd samt fartygsroll. Bakgrunden har stor inverkan på målarean; beräkning av objektet i frirymd underskattar målarean jämfört med objektet på en vågyta. För flacka belysningsvinklar och HH-polarisation, kan en vågyta möjligen approximeras med en platt yta. Detta fungerar troligen inte för VV-polarisation. Modellering vid flacka vinklar och vertikal polarisation är komplicerat.

Sjötillstånd (alt. våghöjd eller vindhastighet) har en tydlig inverkan på radarsignaturen för ett målobjekt. Ju högre sjötillstånd desto lägre blir målarean. Korspolarisationsnivåer ökar med våghöjden. Dessa effekter kan vara viktiga att ta hänsyn till.

Ett fartygs rörelse i vågorna har stor inverkan på radarmålarean. Rörelsen i höjdlid, roll och stamp (*pitch*), samt skuggning av vågor och överbrytande sjö medför att den geometriska yta som visas upp mot radarn varierar. Denna inverkan på signaturen är olika stor beroende på belysningsvinkel. Även lågsignaturfartyg kan uppvisa stora målareor på grund av rörelsen på vågorna.

Slutligen kan konstateras att fortsatt forskning inom området är nödvändig för att på ett rigoröst och samtidigt praktiskt genomförbart sätt, kunna modellera och beräkna radarsignatur för fartyg i sjöbakgrund. I kapitel 10 ges förslag på fortsatt arbete.

10 Förslag till framtida arbete

För att ytterligare öka kompetensen inom området och därmed förmågan att beräkna marina radarsignaturer föreslås följande framtida arbete:

- Uppdatering av litteraturstudien: Detta ger insikt i lämplig inriktning av arbetet samt ökad kunskap om viktiga spridningsmekanismer och nya beräkningsmetoder.
- Deltagande i lämpliga konferenser för informationsinhämtning.
- Deltagande i internationella samarbeten. Vi får på så sätt tillgång till andra nationers kompetens, erfarenhet och resultat.
- Validering av beräkningar mot mätningar. Detta kan t.ex. ske genom internationella samarbeten.
- Mätningar av vågstatistik för Östersjön. Tillgängliga vågspektrum gäller för världshaven; givet en vindhastighet/sjötillstånd kan våghöjder, våglängder m.m. antas se annorlunda ut Östersjön.
- Undersöka möjligheter att integrera statistiska bakgrundsmodeller med deterministiska objektmodeller. Detta innebär en stor utmaning, men en kombinerad modellering skulle underlätta betydligt vid beräkningar av marina radarsignaturer.
- Studera inverkan på radarreturen av s.k. *sea spray* bakom fartyg. Stora mängder vatten som stänker upp bakom fartyg både reflekterar och absorberar radarstrålning.
- Studera hur inverkan av atmosfärsutbredning kan inkluderas i modelleringen.
- Studier rörande sjöbakgrundens inverkan på radarssignaturen specifikt för lågsignaturfartyg (kontra konventionella fartyg).
- Modellering av spridningscentra, s.k. *hot spots* på fartyg. Skillnaderna i den geometriska utformningen av konventionella fartyg med många kant- och hörnstrukturer kontra lågsignaturfartyg med stora släta ytor, medför att fördelningen av radarreflektorer kan skilja kraftigt mellan de två fallen. Detta är viktigt att ta hänsyn till vid modellering av radarsignaturen. Skillnaden medför även att interaktionen mellan fartyg och sjöbakgrund blir olika (se ovan).
- Modellering och beräkning av radarspridning från kölvatten. Kölvatten kan ha en signifikant radarsignatur.
- Studier och validering av förenklade modeller som används för korrektion av ett fartygs frirymdsmålarea till att inkludera även interaktionen med sjöytan.

Listan visar exempel på angelägna områden för fortsatt arbete. Det är viktigt att få en god uppfattning om storleksordningar för olika faktorerers inverkan, vilka bidrag till den totala radarsignaturen som är viktiga att ta hänsyn till och i vilka sammanhang och situationer dessa är viktiga.

11 Referenser

- [1] J. Fagerström, Å. Andersson, S. Björkert, M. Gustafsson, M. Herberthson, R. Lindell, N. Karlsson, N. Wellander, E. Zdansky, A. Örbom, "Plattformssignaturer. Slutrapport 2013," FOI-rapport FOI-R--3766—SE, Linköping, 2013.
- [2] Å. Andersson och J. Rahm, "Sjöytemodellering – statusrapportering," FOI Memo 3685, Linköping, 2011.
- [3] S. Nilsson, J. Rahm, M. Gustafsson, M. Herberthson, M. Karlsson, E. Zdansky, och A. Örbom, "Modellering av mål och bakgrund inom radarområdet," FOI-rapport FOI-R--2359--SE, Linköping, 2007.
- [4] O. Outtier, "Simulating Water Waves for Radar Calculations," FOI-R--2593--SE, Linköping, 2008.
- [5] R. H. Stewart, "Ocean Waves," in *Introduction to Physical Oceanography*. Texas A&M University, 2008. [E-book] Tillgänglig: http://oceanworld.tamu.edu/home/course_book.htm. [2 Oct. 2015].
- [6] J. Tessendorf, "Simulating Ocean Water," [SIGGRAPH Conference Course Notes]. Tillgänglig: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.131.5567&rep=rep1&type=pdf>. [2 Oct. 2015].
- [7] OKTAL Synthetic Environment, SE-Workbench: SE-RAY-EM. Frankrike, 2010. [Software] Tillgänglig: <http://www.oktal-se.fr> [2 Oct. 2015].
- [8] M. Wilow, "NEMO 2013. NATO AWWCG 2013 TRIALS," FOI-rapport FOI-RH--1461—SE, Linköping, 2013.
- [9] Å. Andersson, "Introduktion till radarsjöklotter samt beräkningar av reflektivitet med NRL-modellen," FOI Memo 5356, Linköping, 2015.
- [10] K.D. Ward, R.J. Tough, and S. Watts, *Sea Clutter: Scattering, the K Distribution and Radar Performance*. London: The Institution of Engineering and Technology, 2006.
- [11] M.W. Long, *Radar Reflectivity of Land and Sea*. Artech House 2001.
- [12] F.E. Nathanson, J.P. Reilly, and M. Cohen, *Radar Design Principles* (2nd ed.). New York: McGraw-Hill, 1991.
- [13] N. Wellander, "Radar Imaging of Ocean Surfaces," FOI-rapport FOI-D--0486--SE, Linköping, 2012.
- [14] R. J. Burkholder, P. Janpugdee, and D. Çolak, "Development of Computational Tools for Predicting the Radar Scattering from Targets on a Rough Sea Surface," Tech. Rep. 735231-3, ElectroScience Lab, The Ohio State University, 2001.
- [15] R. J. Burkholder and K. Jamil, "Simulation of Electromagnetic Scattering Experiments in the NSWC Carderock MASK Facility," Tech. Rep. 742962-1, ElectroScience Lab, The Ohio State University, 2003.
- [16] D. Çolak, R. J. Burkholder, E. H. Newman, "Multiple sweep method of moments analysis of electromagnetic scattering from 3D targets on ocean-like rough surfaces," *Microwave and Optical Technology Letters*, Vol. 49, Is. 1, pp. 241–247, 2007.

- [17] K. Jamil, and R.J. Burkholder, "Radar Scattering From a Rolling Target Floating on a Time-Evolving Rough Sea Surface," IEEE Trans. on Geosci. and Remote Sensing, Vol. 44 , Is. 11, pp. 3300-3337, 2006.
- [18] T. Meissner and F. Wentz, "The complex dielectric constant of pure and sea water from microwave satellite observations," IEEE Trans. Geosci. and Remote Sensing, Vol. 42, No. 9, pp. 1836-1849, 2004.
- [19] W. Ellison, A. Balana, G. Delbos, K. Lamkaouchi, L. Eymard, C. Guillou and C. Prigent, "New permittivity measurements of seawater," Radio Science, Vol.33, No.3, pp. 639-648, 1998.

FOI är en huvudsakligen uppdragsfinansierad myndighet under Försvarsdepartementet. Kärnverksamheten är forskning, metod- och teknikutveckling till nytta för försvar och säkerhet. Organisationen har cirka 1000 anställda varav ungefär 800 är forskare. Detta gör organisationen till Sveriges största forskningsinstitut. FOI ger kunderna tillgång till ledande expertis inom ett stort antal tillämpningsområden såsom säkerhetspolitiska studier och analyser inom försvar och säkerhet, bedömning av olika typer av hot, system för ledning och hantering av kriser, skydd mot och hantering av farliga ämnen, IT-säkerhet och nya sensorers möjligheter.



FOI
Totalförsvarets forskningsinstitut
164 90 Stockholm

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

www.foi.se