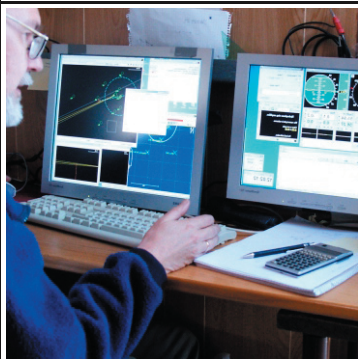
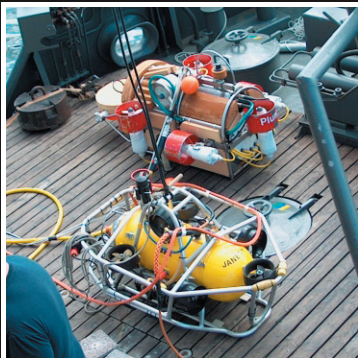


UV-minspaning och -röjning - slutrapport

Ilkka Karasalo
Peter Lindqvist
Per Morén
Andreas Olsson
Örjan Staaf
Paul Ström
Per Söderberg



UV-minspaning och -röjning

Slutrapport

Ilkka Karasalo
Peter Lindqvist
Per Morén
Andreas Olsson
Örjan Staaf
Paul Ström
Per Söderberg

Utgivare Totalförsvarets Forskningsinstitut - FOI Systemteknik 172 90 Stockholm	Rapportnummer, ISRN FOI-R--1451--SE	Klassificering Användarrapport
	Forskningsområde 4. Ledning, informationsteknik och sensorer	
	Månad, år December 2004	Projektnummer E6052, E6826
	Delområde 43 Undervattenssensorer	
	Delområde 2	
Författare/redaktör Ilkka Karasalo Peter Lindqvist Per Morén Andreas Olsson Örjan Staaf Paul Ström Per Söderberg	Projektledare Örjan Staaf	
	Godkänd av Monica Dahlén	
	Uppdragsgivare/kundbeteckning Försvarsmakten	
	Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig Eva Dalberg	
Rapportens titel UV-minspaning och -röjning, slutrapport		
Sammanfattning Projektet <i>UV-minspaning och -röjning</i> har genomförts under tiden 2002-2004. I projektet har fyra teknikområden behandlats: hydroakustiska, elektromagnetiska och optiska metoder för minsökning samt metoder för minförföring. Inom det hydroakustiska området har ny utrustning och nya beräkningsalgoritmer för minklassificering utvecklats. Utrustning och beräkningsmetoder har demonstrerats i ett fältförsök på Möja Söderfjärd där en delvis begravd låda utgjorde mätobjekt. Inom den elektromagnetiska delen, som innefattar bevakning av området för metall- och mindetektorer, har en utredning avseende aktiva elektromagnetiska metoder för mindetektion gjorts. Den optiska delen avser minspaning och -sökning med hjälp av olika lasertekniker där lasern används som ljuskälla för dels flygburen laser, dels i olika typer av undervattenskameror. Slutligen innehåller rapporten ett avsnitt om minförföring där syftet är att genom beräkningar och försök utveckla tekniken med riktad sprängverkan (RSV) för att destruera sjöminor.		
Nyckelord Sjöminor, sjömindetektion, sonar, akustiska spridningsmodeller, metalldetektor, lidar, minförföring		
Övriga bibliografiska uppgifter	Språk Svenska	
ISSN 1650-1942	Antal sidor 19	
Distribution enligt missiv	Pris: enligt prislista	

Issuing organization FOI - Swedish Defence Research Agency Systems Technology SE-172 90 Stockholm Sweden	Report number, ISRN FOI-R--1451--SE	Report type User report
	Research area code 4. C4ISR	
	Month year December 2004	Project number E6052, E6826
	Subcategories 43 Underwater Sensors	
	Subcategories 2	
Author/s (editor/s) Ilkka Karasalo Peter Lindqvist Per Morén Andreas Olsson Örjan Staaf Paul Ström Per Söderberg	Project manager Örjan Staaf	
	Approved by Monica Dahlén	
	Sponsoring agency Swedish Armed Forces	
	Scientifically and technically responsible Eva Dalberg	
Report title (in translation) Seamine detection and disposal, final report		
Abstract The project Seamine detection and disposal has been carried out during the years 2002-2004. Four different technical areas were treated: hydroacoustical, electromagnetical and optical methods of mine detection and methods of mine disposal. Within hydroacoustics, new equipment and new computer based algorithms for mine classification are developed. The equipment and the algorithms were demonstrated in a sea trial at the bay of Möja Söderfjärd where a partly buried box constituted the target. The electromagnetic part of the project, including a survey of the area of metal and mine detectors, produced an investigation concerning active electromagnetic methods for seamine detection. The optic area concerns seamine detection with different types of laser techniques where a laser is used as a light source for airborne or underwater detection systems. Finally the activity in the seamine disposal area is reported, where the disposal technique for seamines with shaped charges is developed through calculations and trials		
Keywords Seamines, seamine detection, sonar, acoustic scattering models, metal detector, lidar, mine disposal		
Further bibliographic information	Language Swedish	
ISSN 1650-1942	Pages 19	
	Price acc. to pricelist	

Innehållsförteckning

1. UVminspaning och röjning	5
1.1 Uppgift för projektet	5
1.2 Resultat	5
1.3 Rekommendationer	7
1.4 Referenser	7
2. Hydroakustiska metoder	8
2.1 Försök	8
2.2 Instrumentutveckling.....	8
2.3 Objektklassificering med bistatisk spridning	9
2.4 Slutsatser	12
2.5 Referenser	12
3. Aktiva elektromagnetiska metoder	13
3.1 Referenser	13
4. Optiska metoder	14
4.1 Flyg- och helikopterburna system.....	14
4.2 Undervattenssystem	14
4.3 Referenser	16
5. Minförförstöring	17
5.1 Beräkningar och försök	17
5.2 Slutsatser	18
5.3 Referenser	18
6. Produktionslista	19

1. UV-minspaning och -röjning

Kapitel 1 är en sammanfattande version av rapporten där resultat av arbetet inom projektet UV-minspaning och -röjning redovisas. Kapitel 2-5 behandlar varje teknikområde separat. Där beskrivs hur projektet genomförts. Rapporten avslutas med kapitel 6 som är en lista över det material som publicerats under projektiden och där delresultat finns redovisade. Varje kapitel avslutas med referenslista.

Dagens tillvägagångssätt vid minjakt är att från minröjningsfartyg med hjälp av olika typer av sonarer avsöka botten och lokalisera förankrade minor och bottenminor. Sonarerna kan vara skrofasta eller vara monterade på en s.k. släpfisk som bogseras efter fartyget. Sonarerna arbetar vid höga frekvenser, typiskt över 100 kHz, för att få hög upplösning. Genom den höga upplösningen kan objekt på botten och i vattenvolymen kännas igen genom att målektot mer eller mindre återspeglar objektets form. På så sätt klassificeras objekt i en femgradig skala från att vara mina till att vara icke-mina. Identifiering av objekt sker sedan med hjälp av en TV-kamera som monterats på en fjärrstyrd undervattensfarkost, ROV (från engelskans Remotely Operated Vehicle), som dirigeras till platsen för ekot. Alternativt kan röjdykare gå ner och identifiera objektet. Sprängning av en mina sker därefter genom att undervattensfarkosten placerar en minförstöringsladdning intill minan eller att en sådan laddning läggs ut av röjdykare [1].

1.1. Uppgift för projektet

Målet är att våra marina enheter ska få en förbättrad minjaksförmåga i såväl svenska som utländska vatten. Därvid beaktas särskilt tekniker som innefattar fjärrstyrda och rörliga plattformar.

Utifrån detta scenario syftar projektet till att förbättra förmågan att detektera och klassificera minor med låg signatur och minor som är begravda i botten-sediment samt att hitta metoder för att säkert förstöra minor genom sprängning.

Projektet UV-minspaning och -röjning är delvis en fortsättning på det tidigare projektet, Framtida minskydd och minröjning [2-4], som avslutades år 2001. De delar som valts ut för detta projekt är den forskning som har till uppgift att säkert lokalisera och klassificera signaturanpassade och begravda minor.

Inom andra FOI-projekt finns forskningsområden som är tillämpliga på minjaksförmågan. I projektet Spaningssystem för marina mål [5-7] behandlas aktiv syntetapertursonar samt mastlidar och i Sapphires-projektet finns delar tillämpliga på minsökning [8].

Arbetet inom projektet, liksom denna rapport, har delats in i fyra olika teknikdelar. En hydroakustisk del som innefattar uppbyggnad av experimentutrustning och utveckling av beräkningsalgoritmer för klassificering av begravda objekt. I denna del av projektet har även ett EU-projekt benämnt SITAR, Seafloor Imaging and Toxicity: Assessment of Risks caused by buried waste, ingått. SITAR är en del av EUs femte ramprogram och syftar till att utveckla nya metoder och ny teknologi för att hantera giftigt avfall som tippats i havet, speciellt avfall som med tiden begravts i botten-sediment. Vår del i detta projekt har varit att utveckla akustiska metoder och tekniker för att lokalisera och klassificera objekt som döljs i bottenavlagringar [9].

Ett annat teknikområde som ingått i projektet är en elektromagnetisk del som innefattar bevakning av området för metall- och mindetektorer samt en utredning avseende aktiva elektromagnetiska metoder för mindetektion [10].

Det tredje området som studerats är en optisk del som avser minspaning och -sökning med hjälp av olika lasertekniker. Laser används som ljuskälla för dels flygburen laser för bottenkartering och minspaning, dels i olika typer av undervattenskameror för minsökning vilka är monterade på undervattensfarkoster [11].

Slutligen har projektet behandlat minförstöring där syftet har varit att genom beräkningar och försök utveckla tekniken med riktad sprängverkan, RSV, för att destruera sjöminor [12].

1.2. Resultat Hydroakustik

Den hydroakustiska delen av projektet har resursmässigt varit den avgjort största. Den innefattar dels utveckling av ny experimentell utrustning för akustisk lokalisering och klassificering av objekt på och under havsbotten. Utrustningen innefattar en ROV med en parametrisk, bottenpenetrerande sonar samt för bistatiska mätningar även en på botten placerad, vertikal hydrofonkedja.

För ROV:ns positionering i vattenvolymen och dess orientering relativt målet har styr- och riktprogram utvecklats så att den parametriska sonarns lob är noggrant och stabilt riktbar mot ett valt objekt på sjöbotten för insamling av data, monostatiskt eller bistatiskt.

Vidare har omfattande arbete lagts ner på utveckling och implementering av en s.k. inversionsmetod för bestämning av fysikaliska parametrar (såsom läge, orientering, form, täthet, ljudhastighet, skalstruktur) hos

de inmätta objekten genom analys av insamlade akustiska data. Två huvudkomponenter hos sådana metoder är dels en s.k. framåtmodell som beräknar de i mottagaren förväntade signalerna för en spridare med kända parametrar, dels en parametersökmetod som anpassar spridarparametrarna så att skillnaden mellan modellerade och uppmätta signaler minimeras. Skillnadsmåttet definieras av en kostnadsfunktion, en s.k. fitness function, och parametersökmetoden utnyttjar en algoritm för global ickelinjär optimering för att minimera kostnadsfunktionen. Framåtmodellens syfte har varit att simulera verkliga försök och att från simulerade data testa olika algoritmer för bestämning av objektparametrar; bl.a. nämnda parametersökningsmetod.

Systemet som helhet har demonstrerats vid ett fältförsök på Möja Söderfjärd i Stockholms skärgård under tiden sept-okt 2003 med understöd av HMS Fårösund från 4.minkrigsflottiljen i Berga och i samarbete med svenska och utländska forskare inom SITAR-projektet. Möja Söderfjärd var strax efter andra världskriget avstjälpningsplats för militär ammunition av olika slag varför ett stort antal mätobjekt stod till vårt förfogande. Speciellt gjordes mätningar på en i botten sedimentet till hälften nedsjunken låda som lokaliserats med undervattenskamera.

De viktigaste slutsatserna från fältförsöket på Möja Söderfjärd och den ovan redovisade dataanalysen är: (i) Experimentuppställningen, med sändaren monterad på en ROV utrustad med ett akustiskt positioneringssystem, medger inspelning av långa mätserier med fix sändar- och mottagargeometri. Denna stabilitet möjliggör en effektiv reduktion av slumpmässiga mätfel genom medelvärdesbildning. (ii) Akustisk inversion baserad på bistatiska spridningsdata är ett användbart sätt att klassificera objekt på eller under havsbotten. (iii) Sådan inversion, baserad på en förenklad, stegvis applicerad parametersökningsmetod har visat sig förbättra överensstämmelsen mellan experimentella data och modellprediktioner signifikant, jämfört med att använda bästa tillgängliga 'förhandsgissningar' av parametervärdena direkt utan inversion. Ytterligare förbättringar av dataanpassningen bör kunna uppnås genom att ersätta den stegvisa sökningen med mera sofistikerade algoritmer.

För detaljer kring sjöförsöket på Möja Söderfjärd samt utvecklingen av beräkningsalgoritmerna hänvisas till kapitel 2.

Elektromagnetik

Syftet med att följa utvecklingen av metall- och mindetektorer är att hitta metoder för minjakt som kompletterar de akustiska och i viss mån även de optiska. Även om utvecklingen av detektorer i huvudsak sker på

landsidan är skillnaderna i miljö inte så stora att förbättringar av detektorer för landminor inte kan tillämpas på sjöminor under vatten.

De elektromagnetiska metoderna för minsökning har begränsats till aktiva elektromagnetiska metoder som är avsevärt känsligare än de passiva. För aktiva metoder gäller dessutom att såväl metalliska som icke metalliska objekt kan detekteras. Huruvida objektet är begravt i botten sediment eller inte är av mindre vikt, metoden fungerar lika bra. För undervattensbruk finns ett flertal kommersiella system att tillgå. Två typer av aktiva sensorer har närmare studerats, de med elektroder och de med spolar [10]. Studien visar att aktiva system med spolar är effektivare än system med elektroder och att räckvidden mot minor med lätthet kan överstiga 20 m.

Ytterligare beskrivning av aktiva elektromagnetiska metoder ges i kapitel 3.

Optik

Syftet med att följa det optiska området är att kunna tillvarata eventuell utveckling av tekniker för minspaning och minsökning för att tidigt och på avstånd upptäcka fritt liggande objekt i vattenvolymen och på sjöbotten. Två systemområden har bevakats, flygburna system och undervattenssystem. Gemensamt för båda är att de använder laser med blågrönt ljus som ljuskälla.

De flygburna systemen har räckvidder som i allmänhet överskrider ett obeväpnat ögas med upp till 4 ggr, beroende på grumligheten i vattnet. De flygburna systemen är i första hand avsedda för bottenkartering och minsökning på små djup. Det ligger nära till hands att montera det flygburna systemet i en mast eller i fören på ett fartyg för spaning framåt mot objekt som flyter i eller strax under vattenytan som varningssystem, dvs. ett komplement till utkiken. Försök med mastlidar, som tekniskmässigt ligger närmast de flygburna systemen har, gjorts i ett annat projekt [7].

Undervattenssystemen, som alla är bildalstrande, har räckvidder som överskrider en konventionell videokamera med belysning med ca 2-4 ggr. I detta projekt har inledande försök gjorts med avståndsgrindad avbildning med undervattenskamera. En mina har avbildats på avståndet 5,5 m.

För mer information om optiska metoder hänvisas till kapitel 4.

Minförstöring

Tekniker för minförstöring har studerats. Syftet har varit:

- att hitta metoder för att spränga minor med en i förhållande till minans storlek liten laddning för att av

detonationens storlek vid minsprängningen kunna fastställa om både mina och laddning detonerat eller om bara minförstörelsladdningen detonerat

- att kunna förstöra begravnade minor
- att kunna förstöra minor med moderna, svår-detonerbara sprängämnen

I dessa studier har beräkningar av, mätningar på och provskjutningar med riktad sprängverkan genomförts. Av de hittills genomförda försöken har framkommit att minor med konventionella sprängämnen, såväl begravnade som ytliggande, är möjliga att förstöra med små RSV-laddningar [12]. Dock återstår att bringa svår-detonerbara sprängämnen för moderna minor till detonation eller deflagration.

Två tänkbara möjligheter står till buds som behöver undersökas närmare. Den ena är att utveckla RSV-tekniken, t.ex. genom införande av reaktivt material i inlägget. Den andra är att pröva andra tekniker, t.ex. utveckla en metod som möjliggör att en bulk-laddning kommer tillräckligt nära den laddning som skall förstöras.

Fördjupad beskrivning av minförstörelsförsöken finns i kapitel 5.

1.3. Rekommendationer

I projektet har utrustning och beräkningsalgoritmer utvecklats för klassificering av objekt på och under sjöbotten. För ett enklare handhavande skulle en vidareutveckling av utrustningen kunna bestå i en sammanbyggnad av ROV:n med den parametriska sonarn och den idag separata hydrofonkedjan till en enda enhet. T.ex. skulle ROV:n kunna förses med ett fast horisontellt anordnat antenspröt med hydrofoner. En del av mätgeometrin blir på så sätt fixerad i farkostens konstruktion. Styr- och riktegenskaper hos ROV:n bibehålls givetvis. Fortsatt utveckling av algoritmer skulle kunna innebära en ökning av beräkningshastigheten i riktning mot realtidstillämpningar. Detta sammantaget innebär ett nytt verktyg för hydroakustisk minsökning och -klassificering.

Aktiva elektromagnetiska sensorer med spolsystem har flera fördelar över de med elektroder inklusive längre räckvidd. Sådana sensorer skulle enskilt eller som komplement till ovan beskrivna hydroakustiska system innebära en förbättrad förmåga för objektklassificering, speciellt för begravnade objekt.

Olika optiska tekniker ger förbättrade möjligheter att se igenom grumligt vatten. En sådan teknik är undervattenskamera med s.k. avståndsg grindad avbildning som i Östersjön förväntas ha en räckvidd på ett tiotal meter.

Att för minförstörelse använda små laddningar med riktad sprängverkan har tidigare demonstrerats. Metoden är speciellt lämpad för begravnade minor, då sedimentla-

ger av större eller mindre tjocklek måste forceras innan verkan uppnås. För svår-detonerbara, s.k. lågkänsliga, explosivämnen har motsvarande små RSV-laddningar ej åstadkommit detonation hos mottagarladdningen utan endast påbörjad deflagration. Att använda reaktivt material i inlägget hos RSV-laddningar kan vara en tänkbar möjlighet för förstöring av begravnade minor.

1.4. Referenser

- [1] Ericsson, J. och Helmesson, P., Örlogsboken 2003, Försvarets bok- och blankettförråd, M7742-730002, Försvarsmakten, sid. 70-71, 2003
- [2] Karlsson, S. och Ström, P., Sprängprov med röjladdning mot sjunkbomb, FOA-R--00-01729-313--SE, December 2000
- [3] Karlsson, S. och Ström, P., Förstudie av adaptiv minröjningsladdning för undervattensbruk, FOI-RH--00761--SE, Januari 2002
- [4] Helte, A., Almström, H., Andersson G., Karlsson S. och Lundgren J., Utvärdering av experiment utförda på explosivämnet B2211D vid FOA, I: Energiekvationer för det inerta explosivämnet och restprodukterna, FOA-R--99-01142-310--SE, Maj 1999
- [5] Pihl, J., m.fl., Spaningssystem för marina mål – slutrapport, FOI-R--1459--SE, December 2004
- [6] Jönsson, M., Lägesrapport: Fältförsök med ny utrustning för Syntetisk Apertur-Sonar, FOI Memo 1005, September 2004
- [7] Olsson, A., Tulldahl, M., Pettersson, M., Target detection in shallow waters with top mounted lidar, FOI Memo 999, June 2004
- [8] Cederholm, A., Jönsson, M., Karasalo, I., Karlsson, P., Lindström, S., Pihl, J., Robinson, J., Parastates, E., Högupplösande sensor under vatten. Slutrapport etapp 1, FOI-RH--0358--SE, December 2004
- [9] Staaf, Ö., SITAR – Seafloor Imaging and Toxicity: Assessment of Risks caused by buried waste, Systems Technology Annual Report 2003, FOI-R--1245--SE, June 2004, pp. 20-21
- [10] Malmberg, J.-A. och Lindqvist, P., Aktiva elektromagnetiska metoder för minsökning i undervattensmiljö, FOI Memo 916, Juni 2004
- [11] Tulldahl, M., Bevakning av området lasersystem för sjöminspaning, FOI Memo 03-18, Januari 2003
- [12] Helte, A. och Ström, P., Röjning av undervattensladdningar med RSV, FOI-R--1342--SE, September 2004

2. Hydroakustiska metoder

Arbetet med att utveckla metoder för akustisk detektering och klassificering av begravningsobjekt har bedrivits som en del i ett EU-finansierat projekt för kartläggning av riskavfall på havsbotten. Projektet SITAR har haft som mål att utveckla akustiska metoder och instrumentering för kartläggning av små dumpade behållare, som ligger begravningsobjekt i botten-sedimenten.

För att demonstrera metoder för akustisk karakterisering och klassificering av begravningsobjekt har arbetet omfattat både utveckling av ROV-baserad mätteknik med parametrisk sändare och relaterade analysmetoder som bl.a. innefattar modeller för akustisk/elastodynamisk spridning från objekt med olika former och material.

Bottenpenetrerande ekolod av standardtyp som i dag rutinmässigt används för kartläggning av sediments-strukturer, har som regel inte tillräckligt bra upplösning för att detektera små begravningsobjekt. En parametrisk sonar med en väsentligt smalare lob ger en högre upplösning och därmed bättre förutsättning att detektera små begravningsobjekt.

Då den parametriska sonaren har betydligt smalare lob än en konventionell sonar innebär det att avsökningen blir mer tidsödande då den smala loben täcker en mindre del av botten. Därför har SITAR innefattat andra bottenpenetrerande tekniker som varit mera områdestäckande och som genomförts av deltagare utanför det här projektet. En sådan teknik är jämförbar med en traditionell sidspanande sonar, men bygger på ett system med bottenpenetrerande högupplösande parametrisk sonar i kombination med principen för syntetapertursonar, SAS, och har genomförts av forskare från Norge och Frankrike [1].

2.1. Försök

För att under realistiska förhållanden demonstrera de system och de metoder som utvecklats i SITAR genomfördes hösten 2003 ett fältförsök på Möja Söderfjärd i Stockholms skärgård. Försöksområdet har fram till mitten av 60-talet använts av Försvarsmakten som dumpningsplats för bl.a. ammunition. Flera mätsystem testades, bl.a. en prototyp av ovan nämnda bottenpenetrerande sidspanande sonar för detektion och lokalisering av objekt i sedimenten. På ett utvalt mål, en till större delen begravningslåda, figur 2.1, utförde FOI adaptiva spridningsmätningar med en parametrisk sonar monterad på en ROV som med hög precision kunde undersöka föremålet från flera olika vinklar. Tre olika sonarkonfigurationer med varierad geometri demonstrerades, figur 2.2. Dessa var:

- Vertikal monostatisk sonar för detaljerad kartläggning och lokalisering med hög precision av begravningsobjekt i ett begränsat sökområde
- Monostatisk sonar med olika infallsvinklar och riktningar mot ett lokaliserat begravningsobjekt
- Bistatisk sonar med olika infallsvinklar och riktningar för klassificering av ett lokaliserat objekt

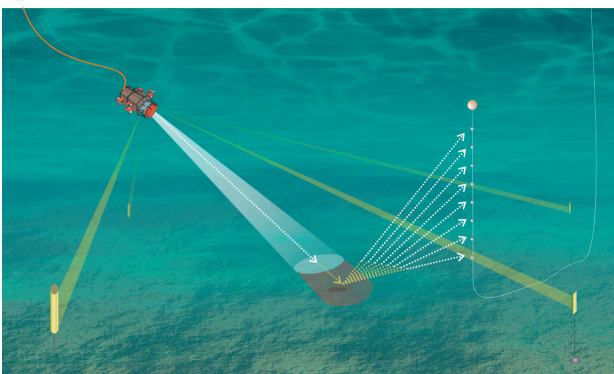
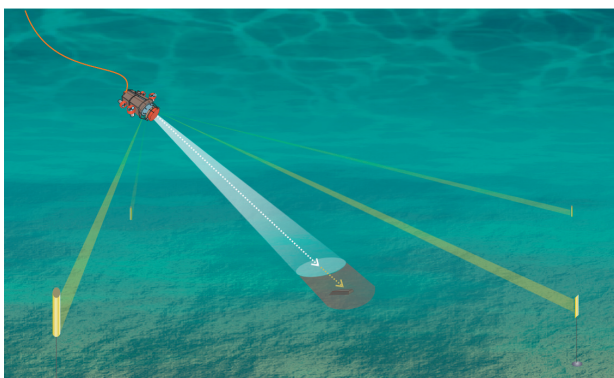
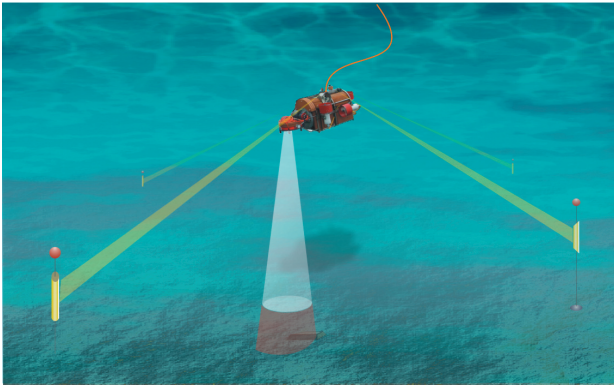


Figur 2.1. Mätningarna utfördes på en till större delen begravningslåda, ungefär 1,3 m lång och 0,3 m bred.

2.2. Instrumentutveckling

FOI:s egna, fjärrstyrda undervattensfarkost PLUMS (Plattform för UndervattensMätSystem), figur 2.3, har utvecklats ytterligare i projektets regi för att kunna svara mot de högt ställda kraven på manövrerbarhet och stabilitet som krävs för att klara uppgiften. Installation av ny kraftförsörjning, kabel och datakommunikation har också varit nödvändig. Ett helt nytt styrsystem med egenutvecklad programvara möjliggör att operatören enkelt kan styra PLUMS samtidigt som sonaren läses med önskad vinkel mot målets position, figur 2.4. Det är också möjligt att läsa sändloben på ett område eller föremål på eller i botten medan PLUMS kan röra sig i till exempel en cirkel.

PLUMS var utrustad med en bottenpenetrerande sonar av typen TOPAS 120, tillverkad av Simrad A/S, Norge. Runt sonaren var sex stycken kulhydrofoner monterade för de monostatiska mätningarna. Vid de bistatiska mätningarna användes en vertikal hydrofonkedja med 7 hydrofoner och med varierbar längd upp till 10 m.



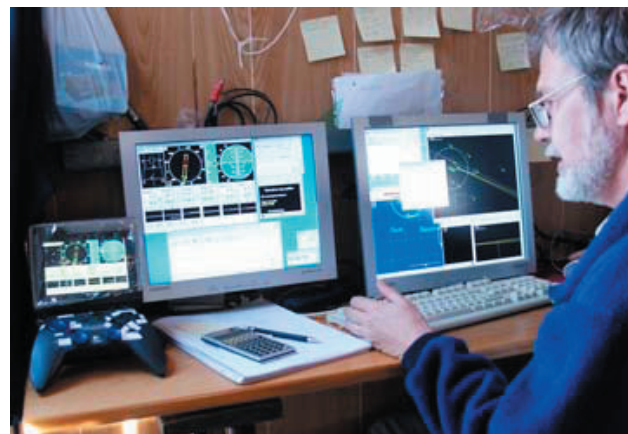
Figur 2.2. Tre olika konfigurationer för mätning med bottenpenetrerande sonar monterad på FOI:s ROV, PLUMS. I de två övre bilderna sitter sändare och mottagare intill varandra på plattformen (monostatisk mätning). I den undre bilden är sändare och mottagare, här en vertikal hydrofonkedja, placerade på vardera sidan om ett mål (bistatisk mätning). Positionering sker med ett s.k. långbassystem, där fyra transpondrar svarar på den signal som en transceiver monterad på PLUMS sänder ut.

2.3. Objektklassificering med bistatisk spridning

Nedan presenteras resultat från en analys av data från fältförsöket. Syftet var att utvärdera bistatisk teknik för



Figur 2.3. PLUMS utrustad med den parametriska sonaren TOPAS 120 (orange skiva) och hydrofonringen vid fältförsöket på Möja Söderfjärd.



Figur 2.4. Med hjälp av de FOI-utvecklade programmen körs PLUMS och TOPAS 120 med hydrofonring från operatörsplatsen.

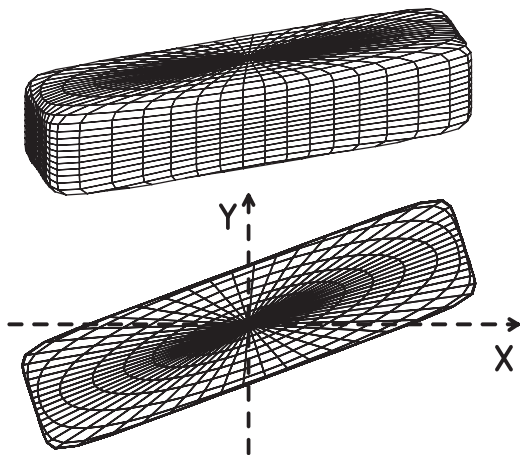
akustisk identifiering av objekt på eller under havsbotten. Vattendjupet vid försöksplatsen var nära 75 m och objektet var en låda med måtten ca 130 x 30 x 30 cm, enligt uppskattningar från en videofilm tagen med en ROV-buren kamera. Objektet insonifierades med pulståg och det reflekterade ljudet registrerades med en separat placerad vertikal hydrofonkedja, figur 2.2

I varje mätserie registrerades 80 - 100 pulser med källan stillastående ca 11-15 m över havsbotten. Den grundläggande idén i analysen är att identifiera objektet genom att anpassa sökta objektparametrar i en matematisk modell av experimentet så att skillnaden mellan experimentellt observerade och teoretiskt predikterade tidsserier minimeras.

TVå huvudkomponenter i sådana s.k. inversionstekniker är, som redan nämnts i kapitel 1, en framåtmodell, dvs. en numerisk metod för beräkning av simulerade mottagna signaler i en matematisk modell av experimentet, i vilket objektets parametrar är kända, samt en parametersökningsmetod, dvs. en numerisk metod för sökning av parameterkombinationer som minimerar en s.k. fitness-funktion, ett mått på skillnaden mellan de modellerade och de experimentellt observerade signalerna.

Numerisk modellering av bistatisk spridning

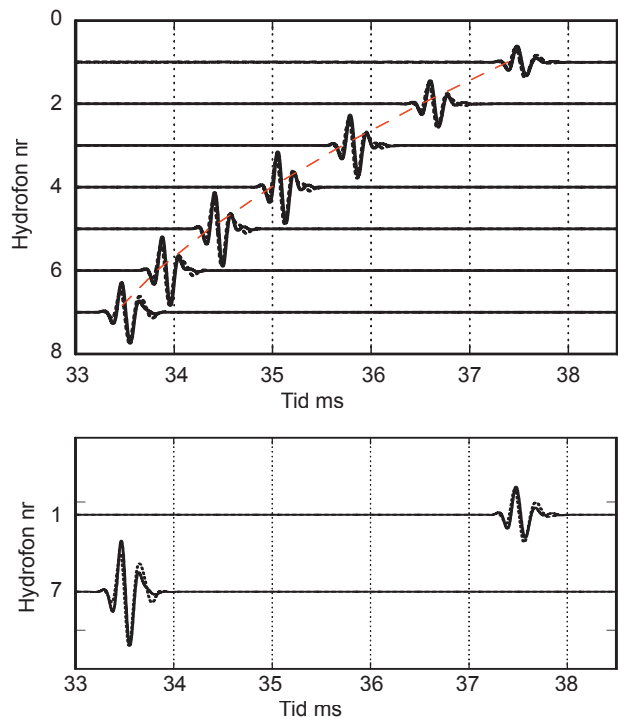
I dataanalysen har två metoder för numerisk modellering av bistatisk spridning använts. I båda modelleras miljön att vara avståndsoberoende, med homogen vattenvolym och skiktvis homogen havsbotten. Det undersökta objektet – spridaren – antas vara en ljudliknande akustiskt penetrerbar kropp av homogent fluidmaterial, figur 2.5.



Figur 2.5. Modell av spridaren och dess orientering i ett koordinatsystem med x-axeln riktad från sändaren mot mottagarkedjan.

Båda modellerna är formulerade i frekvensdomänen, och utnyttjar Fouriersyntes för simulering av transient spridning (pulsade sändarsignaler). Den ena, BIE-metoden [2-4], är baserad på en randintegralekvationsformulering av ekvationerna för det spridda fältet. Den andra, RK-metoden [5], är en mycket mindre beräkningskrävande approximativ spridningsmodell som utnyttjar akustisk strålgång och Kirchhoffs spridningsapproximation. RK-metoden användes som framåtmodell vid parametersökningen, medan den långsammare men noggranna BIE-metoden utnyttjades för kontroll av RK-metodens noggrannhet i utvalda testfall.

Figur 2.6 visar en sådan noggrannhetskontroll, i ett fall där spridaren i figur 2.5 är begravd 5 cm under havs-

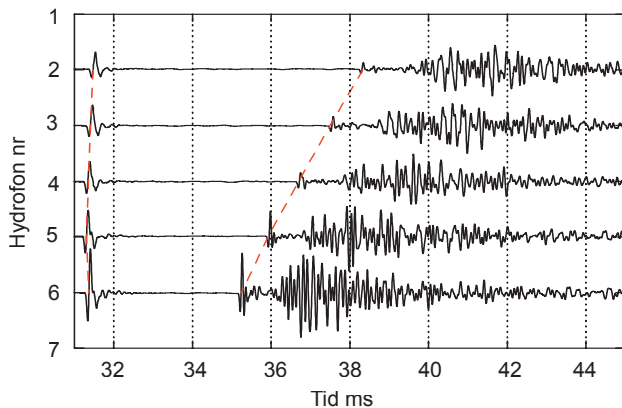


Figur 2.6. Simulerade ekon vid mottagarna från en begravd spridare, beräknade med BIE-metoden (heldragna kurvor) och med RK-metoden (prickade kurvor). Den övre figuren visar alla sju hydrofoner, den undre enbart sensor 1 och 7. Röd streckad kurva anger förväntad gångtid för respektive puls med hänsyn till experimentets geometri.

botten och där källsignalen är en 5 kHz Rickerpuls. De heldragna kurvorna är det simulerade ekot som funktion av tiden registrerat av mottagarna, beräknad med BIE-metoden, de prickade kurvorna är samma signaler beräknade med RK-metoden. RK-metodens noggrannhet för prediktion av ankomsttid, formen för de inledande delarna av ekot, och ekots maximala amplitud är tillfredsställande, medan amplituden för den senare ekohalvan är överskattad med mellan 1 % (hydrofon 7) och 55 % (hydrofon 2).

Figur 2.7 visar ekon från den halvbegravda lådan i figur 2.5, registrerade av mottagarna 2 till 6 i en av försökets mätserier, med sändaren fixerad i position och orientering. De visade kurvorna är medelvärden av seriens 84 ping. Signalerna i sensor 1 (överst i kedjan) och sensor 7 (underst) var oanvändbara och har därför utelämnats.

De mottagna signalerna i figur 2.7 består av direkt-pulsen, reflexen från lådan, ett ca 1 ms långt ekosvagt avsnitt och en ca 5 ms lång ostrukturerad efterklang. Det ekosvaga avsnittet indikerar att det översta sediment-skiktet är mycket mjukt, med liten akustisk kontrast mot vattnet. I inversionsanalysen har därför mediomodellen förenklats till att vara homogent vatten. Figur 2.8 visar en förstoring av tidsintervallet från 35 ms till 39 ms i



Figur 2.7. Medelvärden av 84 ping registrerade av mottagarna 2 till 6. De streckade transversella kurvorna visar ankomsttiderna för direktpulsen (genom sändarens sidolöber) och för det spekulärt reflekterade ekot från lådans ovansida.

figur 2.7, samt motsvarande modellerade signaler beräknade med RK-metoden med parametrar baserade på tillgänglig förhandsinformation, dvs. videofilmningen av lådan, figur 2.1.

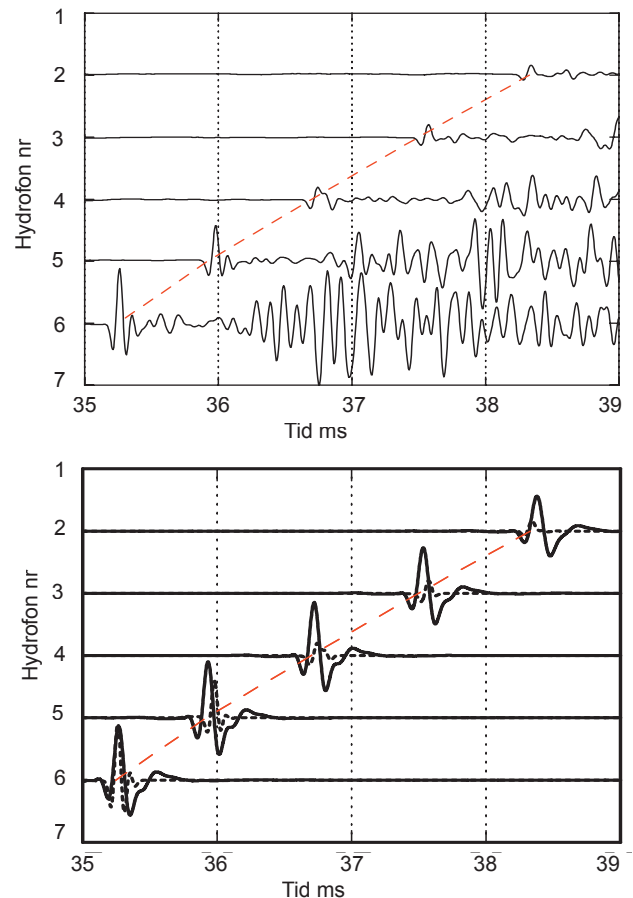
Överensstämmelsen mellan de observerade och de modellerade ankomsttiderna ses i figur 2.8 vara tillfredsställande god, medan skillnaden mellan amplituderna som funktion av mottagardjup är signifikant. Den modellerade amplituden är nära oberoende av mottagarens höjd över botten, medan den experimentella avtar kraftigt med ökande höjd.

Två metoder för sökning av modellparametrar har implementerats. Båda är s.k. hybridmetoder, dvs. de består av en initialfas i vilken en global minimeringsalgoritm används för att söka gynnsamma startvärden för en avslutande sökning av lokala minima. De globala sökalgoritmerna är Differential Evolution (DE) algoritmen [6], respektive en hierarkisk genetisk algoritm (GA) [7]. Båda algoritmerna är implementerade för exekvering i parallell mod på PC-kuster.

Nedan redovisas resultat från tillämpning av ovan beskrivna identifieringsteknik för bestämning av sju parametrar hos lådan: (i) Vridnings- och lutningsvinklarna för lådan, (ii) avstånds- och djupkoordinaterna för lådans centrum, och (iii) täthet och ljudhastighet för materialet inuti lådan.

Initialt gjordes några försök att bestämma alla eller flertalet av parametrarna samtidigt. I dessa försök visade sig emellertid konvergensen hos minimeringsalgoritmerna vara för långsam för att ge användbara resultat. I ett andra försök följdes därför det grovare, suboptimala, tillvägagångssättet att bestämma några få parametrar i taget. Parametrarna söktes i fyra steg:

- Lådans lutning i sidled och dess vridning i längdled
- Inre täthet och ljudhastighet



Figur 2.8. Till vänster visas avsnitt av experimentellt registrerade ekon från låda och botten och till höger simulerade ekon från låda i homogent vatten med RK-metoden, heldragna kurvor. Prickade kurvor i den högra grafen är avsnitt av lådekona från den till vänstra grafen. Streckad röd kurva markerar ankomsttiden för den spekulära reflexen från lådans utsida.

- Avstånd och djup
- Lådans lutning i längdled

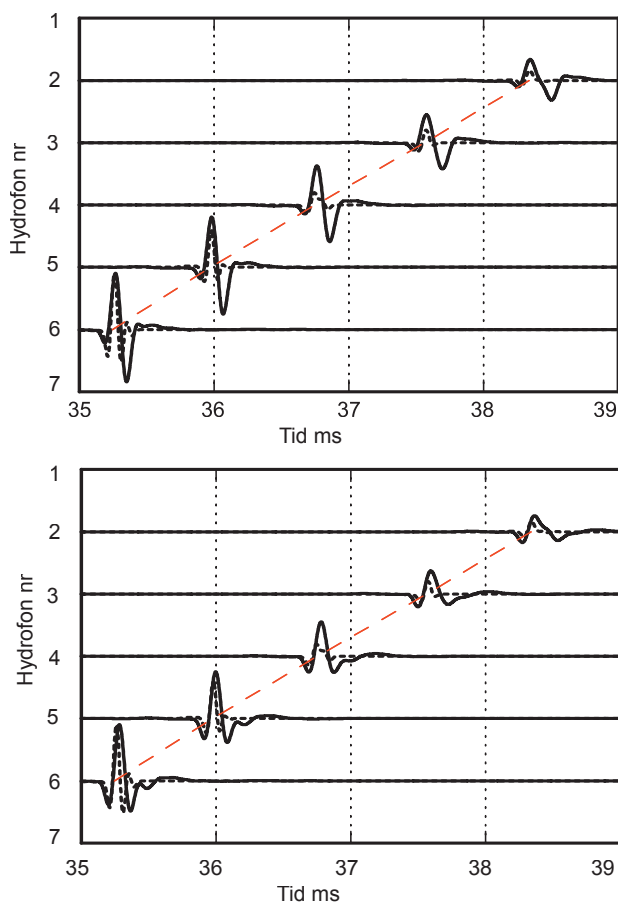
Värdena för de sökta parametrarna, före och efter inversionen, visas i tabell 1 nedan. Värdena före inversionen togs från geometrin för mätningen, från videofilmningen (figur 2.1) och de värden som gäller för trotyl.

Figur 2.9 visar de modellpredikterade mottagna signalerna erhållna med lådans parametrar valda enligt den högra kolumnen i tabell 2.1.

En jämförelse av figurerna 2.9 och 2.8 visar att parameterinversionen har förbättrat likheten mellan de modellerade och de experimentellt erhållna tidsserierna signifikant. Man ser särskilt att variationen av ekoamplituden med mottagardjup återges väl av modellerna efter inversionen. Denna förbättring illustrerar att fördelningen av den spridda ljudenergin är en känslig funktion av objektets orientering, och att orienteringen inte var noggrant känd initialt.

Tabell 2.1. Objektparametrar före och efter inversion. Vridningsvinkeln avser vinkeln mellan lådans längdaxel och det plan i vilket sändare, mål och mottagare ligger.

Parameter	Före inversion	Efter inversion
Avstånd sonar - låda (m)	24	23,95
Djup till låda (m)	74,85	74,85
Lutning i sidled (°)	0	0,9
Lutning i längdled (°)	0	4,8
Vridningsvinkel (°)	19	11,7
Täthet hos lådan (kg/m^3)	1630	1490
Ljudhastighet (m/s)	2680	2590



Figur 2.9 Mottagna ekon från lådan, mätdata (prickade) och modellerade med parametrar enligt högra kolumnen i tabell 1 (heldragna). Överst: RK-metoden. Underst: BIE-metoden.

2.4. Slutsatser

De viktigaste slutsatserna från fältförsöket och den ovan redovisade dataanalysen är

1. Experimentuppställningen, med sändaren monterad på en ROV utrustad med ett akustiskt positioneringssystem, möjliggör inspelning av långa mätserier med fix sändar- och mottagargeometri. Inverkan av slumpmässiga fel i sådana mätserier kan reduceras effektivt med enkel medelvärdebildning. Dominanta komponenter i de mottagna ekon överensstämmer väl med modellerade data.
2. Akustisk inversion baserad på bistatiska spridningsdata, med RK-metoden som en snabb framåtmodell i en algoritm för parametersökning, är en användbar metod för identifiering av objekt på eller i havsbottnen.
3. En förenklad stegvis parametersökmethode kan förbättra överensstämmelsen mellan experimentella data och modellprediktioner signifikant. Utveckling av mer sofistikerade sätt att detektera och hantera alla parametrarna samtidigt kan med fördel ingå i framtida dataanalyser med denna teknik.

2.5. Referenser

- [1] Zakharia, M., Chevriaux, Y., Doignon, G., Dybedal, J., Legallo, R., and Pollet, C., SITAR prototype, a parametric synthetic sidescan sonar, Proc. of the 7th European Conf. on Underwater Acoustics, ECUA 2004, Delft, The Netherlands, 5-8 July, p. 1121-1126, 2004
- [2] Karasalo I., Exact finite elements for wave-propagation in range-independent fluid-solid media. J. Sound Vib., p. 671-688, 1994
- [3] Karasalo I. and Mattsson J., Numerical modelling of acoustic scattering by smooth inclusions in a layered fluid-solid medium, High Frequency Acoustics in Shallow Water, SACLANTCEN Conference Proceedings Series CP-45, p. 283-290, 1997
- [4] Karasalo I., Transient scattering from an object buried in the seabed - Numerical predictions and experimental results. Proc. 3rd UK Conference on Boundary Integral Methods, Brighton, UK, p. 109-118, 2001
- [5] Skogqvist P., Karasalo I., A Fast Acoustic Scattering Method for Buried Objects, Proceedings of the Tenth International Congress on Sound and Vibrations, Stockholm, 2003
- [6] Storn P., Price K., Differential Evolution - A Simple and Efficient Adaptive Scheme for Global Optimization over Continuous Spaces, ICSI, TR-95-012, 1995
- [7] Cantú-Paz, E., A Survey of Parallel Genetic Algorithms, Calculateurs paralleles, Réseaux et System Repartis, Vol 10(2), p. 141-171, 1998

3. Aktiva elektromagnetiska metoder

Användningen av aktiva elektromagnetiska metoder för att leta minor på land har en lång tradition. Det är då främst olika typer av metalldetektorer för handhållet bruk. Genom smärre tekniska modifikationer av dessa metalldetektorer kan de med framgång även användas i en undervattensmiljö, fig. 3.1. Det finns ett flertal kommersiellt tillgängliga instrument för undervattensbruk av denna typ. De flesta av dessa är primärt framtagna för att leta efter borttappade föremål, skattsökning och liknande användningar, dvs. för att enkelt leta mindre metallföremål.



Figur 3.1. Dykare med handhållen metalldetektor typ Aquapulse 1B från Aquascan International Ltd.

Under våren 2004 gjordes en teoretisk-teknisk studie i form av en simulering av förutsättningarna att leta sjöminor med metoder för traditionella metalldetektorer med spolsystem jämfört med att använda elektroder [1]. Spolar och elektroder kan bägge fungera som sändare av ett elektromagnetiskt fält och som detektor av det mycket svaga återspridda fält som ett föremål med avvikande elektrisk ledningsförmåga ger upphov till. Då vatten är elektriskt ledande ger både bättre och sämre elektriskt ledande föremål upphov till ett återspritt fält. Om minan ligger på sjöbotten eller begravd i den är av mindre vikt.

Det som simulerades var kopplingen mellan detektionsavstånd och fysiskt viktiga parametrar som effekt, vikt och utsträckning. Däremot gjordes inga ansatser

att simulera inverkan av närvaron av många svagt spridande föremål, så som är fallet på en sjöbotten med en mängd stenar av varierande storlek.

Ett av huvudresultaten från denna studie var att spolar är effektivare som sändare och detektor än elektroder. Främst beror detta på att detektorn enkelt kan göras känsligare genom att den får fler varv, och därmed kan den utsända effekten reduceras. Detektionsavstånd (för minor) på upp till 10 m är möjliga med en sändareffekt under 1 W. Nödvändig effekt ökar dock snabbt med önskat detektionsavstånd. För 20 m detektionsavstånd krävs 10-100 W.

Den detekterade signalen varierar kraftigt med storleken på det återspridande föremålet men även med storleken på sändarspolen vid given effekt. För en given effekt fås maximal utsänt fält för en spoldiameter som är jämförbar med avståndet till föremålet.

Traditionella metalldetektorer har små sändarspolar, normalt ca 15-40 cm. För undervattensbruk, med instrument monterade på en ROV eller släpbar farkost, är det en fördel att öka spoldiametern. En diameter på 1-3 m bör inte utgöra någon praktisk begränsning. Några kommersiella metalldetektorer för undervattensbruk i denna storlek känner vi dock inte till.

Den praktiska begränsningen ligger troligen inte i tillgänglig effekt utan i hur väl spridda fält från den övriga omgivande miljön kan hanteras. Detta är ett problem som inte enkelt kan simuleras utan lämpar sig bättre att studeras genom praktiska försök. Därmed tillstöter även mekanisk stabilitet och rigiditet som en viktig prestandasättande parameter. Svaret på hur effektiv denna teknik är på att detektera minor kan endast besvaras genom prototypbygge i full skala. Av speciellt intresse är då förmågan att detektera moderna minor utan metallskal och minor med metallpulver i explosivämnet.

3.1. Referenser

[1] Malmberg, J.-A. och Lindqvist, P., Aktiva elektromagnetiska metoder för minsökning i undervattensmiljö, FOI Memo 916, Juni 2004

4. Optiska metoder

Lasersystemområdet har under projektets treårsperiod bevakats [1] internationellt med avseende på såväl flyg- som undervattenssystem.

4.1. Flyg- och helikopterburna system

Kända system som används operativt idag, eller är under utveckling, är Shoals från USA [2], Lads från Australien [3] samt Hawk Eye [4] som nu vidareutvecklas av det svenska företaget AHAB (Airborne Hydrography AB).

Shoals-systemet har även sålts till Japan. Dessa system används i första hand av respektive länders försvarsmakter eller sjöfartsmyndigheter för kartering. Systemen kan även användas för ubåtsdetektion. Det har även bildats privata bolag, som tillhandahåller mätjänster med flygburna laserskannrar [5].

Utöver skannande system, finns det även andra typer av flygburna pulssade lasersystem som kan användas för detektion av undervattensmål. Ett exempel är Magic Lantern, USA [6], som använder avståndsgrindad teknik och primärt är avsett för mindetektion.

4.2. Undervattenssystem

Samtliga nedan beskrivna system är bildalstrande och medger avsevärt större räckvidd än konventionell videokamera med belysning.

Laserlinjeskanner (LLS)

I ett linjeskannande system sveper en kontinuerlig eller pulssad laserstråle tvärs mot systemets rörelseriktning och en mottagare försedd med en fotodetektor betraktar de bestrålade ytelementen. Genom att laser och mottagare är väl separerade reduceras bakåtspridd ljus från partiklar i vattenvolymen. Mycket skarpa bilder kan uppnås inom 5-6 s.k. dämpningslängder. En dämpningslängd är den sträcka vid vilken laserenergin minskat till 37 % av den utsända.

Med ett linjeskannande system kan man få god bildkvalitet samt ett relativt stort avsökningsområde. Ett linjeskannande system kan skanna upp till 120° på 1 ms. En kontinuerlig laser används oftast även om en pulssad laser med hög pulsrepetitionsfrekvens är intressant för att ge upplösning även i djupled. Räckvidden med kontinuerlig laser bedöms för ett rimligt kompakt undervattenssystem som avsöker botten vara 6-12 m för inre skärgård, 10-20 m för yttre skärgård och 15-30 m

utomskärs. Om man kombinerar linjeskanning och en pulssad laser med tidsupplöst mottagning, kan räckvidden för detektion med pulssad synkronskanning öka till det dubbla, dvs. 10-12 dämpningslängder. Med ökade dämpningslängder minskar dock upplösningen på grund av spridningen i vattnet, vilket därmed minskar förmågan att skapa bilder som medger identifiering.

Fördelarna med linjeskannande system är:

- Stor svepbredd, upp till 120°
- Mycket detaljerade bilder
- Etablerad teknik
- Kan kompletteras med fluorescenskanal
- Enkel konstruktion med t.ex. en roterande skanner

Begränsningarna innefattar:

- Begränsat synfältsdjup (åtminstone för kontinuerlig laser)

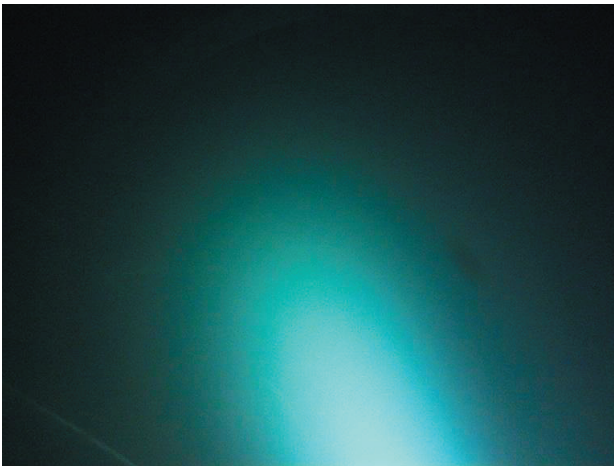
Avståndsgrindad avbildning (GV)

Avståndsgrindad avbildning, som på engelska kallas Gated Viewing eller Range Gating, avser en teknik där en kort laserpuls skickas mot objektet och kameraslutaren öppnas endast under den tid då det från objektet reflekterade ljuset beräknas nå kameran. Detta medför att kontrastminskning p.g.a. bakåtspridning reduceras väsentligt. Om störljus förekommer reduceras på samma sätt även mottagarens brusnivå. Man kan genom att titta inom flera olika tidsintervall skapa en 3D-bild av föremålet, eftersom en "skiva" i taget av objektet avbildas. Exempel på företag som tillverkar grindade kameror är Xybion, USA [7] och Turn, Ryssland [8]. System på forskningsnivå för undervattensavbildning utvecklas även i Kanada [9] och Danmark [10].

Fältförsök har genomförts med en ryskbyggd [8] avståndsgrindad kamera i samarbete med FMV. Funktionstest genomfördes under våren 2004 [11] och ytterligare test gjordes i slutet av november, bl.a. mot en attrapp av en s.k. Rocka, figur 4.1.

Streackamera

Den s.k. streackameratekniken är väl känd inom fysiken när det gäller att fånga mycket snabba ljusförlopp. Streackamera i kombination med laser för att få högupplösta avstånds- och intensitetsbilder är emellertid en ny och intressant teknik inte minst inom undervattens-tillämpningar. STIL (STreak Imaging Lidar) har använts både från flygburna och undervattensplattformar för att detektera, klassificera och identifiera undervattensob-



Figur 4.1 En Rocka avbildad med videokamera (t.v.) och avståndsg grindad kamera (t.h.) på avståndet 5,5 m. Attrappen är försedd med två vita, längsgående tejprensor. På bilden till höger syns även två repöglor som är förbundna med minattrappen.

jekt som minor. Denna sensortyp är under införande i två US Navy program, ALMDS och AQS 20-X [10].

Fördelarna med STIL-tekniken är:

- Ger högupplösta (ned till cm-nivå) reflektions- och avståndsbilder. Tekniken ger dessutom möjlighet till samtidig fluorescens och polarisationsdetektion, av värde inte minst i starkt grumliga vatten
- Ingen skanning behövs
- Goda möjligheter till signal- och bildbehandlingsförbättring

Begränsningar:

- Ny teknik som inte är helt utprovad för grumliga vatten
- Tekniken kräver högspänning på kameraröret (15 kV)
- Räckvidd är 2-5 m inomskärs, 5-10 m i yttre skärgård och 10-20 m i öppet hav
- För närvarande är tekniken relativt dyr jämfört med skannande och grindade system.

Exempel på teknologier för laserbaserade undervattenssystem sammanfattas i tabell 4.1.

Tabell 4.1. Exempel på teknologier för laserbaserade undervattenssystem

Systemprincip:	Skannande system	Grindad kamera	Streackamera
Funktionsbeskrivning:	Fungerar ungefär som en bordsskanner till personator. En smal laserstråle och mottagarsynfält skannas över sjöbotten och en bild generas. Systemen kan antingen använda pulsad eller kontinuerlig laser och kan medge tredimensionell avbildning.	En laserpuls sänds mot sjöbotten med en divergent strålform som belyser en yta på botten t ex 5 m x 5 m. Mottagaren är utrustad med tidsstyrd bildförstärkare som undertrycker laserljus som reflekteras från vattenvolymen.	En laserpuls sänds mot sjöbotten med en linjeformad strålform som belyser en yta på botten t ex 1 cm x 5 m. I mottagaren samlas ljuset in med hög avståndsupplösning. Genom plattformens framåtrörelse framställs en tredimensionell bild av botten.

4.3. Referenser

- [1] Tulldahl, M., Bevakning av området lasersystem för sjöminspaning, FOI Memo 03-18, Januari 2003
- [2] US Army, "SHOALS", <http://shoals.sam.usace.army.mil/>, 2004.
- [3] Sinclair, M. J., Stephenson, D. J., Barker, R. M., Alaska Peninsula Deployment of Laser Airborne Bathymetric System, 33rd Canadian Hydrographic Conference (CHC 2004)", <http://www.chc2004.com/chc2004/papers/stephenson.pdf>, 2004.
- [4] The United Kingdom Hydrographic Office, What's new, http://www.ukho.gov.uk/whats_new.html, 2004.
- [5] Fugro Pelagos, Airborne LIDAR Bathymetry Services, Fugro Pelagos, Inc., http://www.thales-geopacific.com/technology/lidar_brochure.pdf, 2004.
- [6] Society, American Helicopter, Mine-Hunting Knighthawk Delivered, <http://www.vtol.org/news/aug03-1.html>, 2003.
- [7] Klasén, L., Steinvall, O., Bolander, G., Elmqvist, M., Grindad avbildning - inledande prov vid långa avstånd, FOA-R--0302--SE, 2001
- [8] Turn Ltd., Turn, <http://www.turn.ru/>, 2004
- [9] Fournier, G. R., Bonnier, D., Forand, J. L., Pace, P. W., Range-gated underwater laser imaging system, Opt. Eng. 32, p. 2185-2190, 1993
- [10] Busck, J. Heiselberg, H., High accuracy 3D laser radar, In Defense & Security Symposium, G. W. Kamehman, ed., Proc. SPIE 5412: Laser Radar Technology and Applications IX, 2004
- [11] Epparn, C., Avståndsgrindad avbildning med undervattenskamera, Examensarbete LTU-EX--04/248--SE. Luleå Tekniska Universitet, Luleå, Sweden.

5. Minförstöring

5.1. Beräkningar och försök

Vid röjning av sjöminor används normalt i svenska marinen en bulkladdning på ca 5 kg, dvs. en laddning som är avsevärt mindre än minans huvudladdning. För att kunna placera ut bulkladdningen och bringa minan att detonera krävs att minan är synlig och åtkomlig. Laddningen är konstruerad att kunna transporteras till och anbringas vid minan med hjälp av en undervattensfarkost, ROV. Ett av skälen till att använda en förhållandevis liten bulkladdning är att det skall vara möjligt att enkelt kunna skilja på en detonation av enbart minförstörelsladdningen och en detonation av minan och därigenom få ett kvitto på resultatet. Små minförstörelsladdningar är därför intressanta även i fortsättningen.

Moderna minor och moderna sprängämnen har medfört att ytterligare krav behöver ställas på en framtida minförstörelsladdning. De önskvärda egenskaperna är att den ska fungera med vatten och bottenmaterial mellan laddning och mina och att den därefter ska kunna bringa sprängämnet i minan till åtminstone snabb deflagration, dvs. snabb förbränning, men helst till detonation.

För att klara dessa krav är de hittills använda, små bulkladdningarna ej användbara. Projektet har därför inriktats på att få fram en laddning med riktad sprängverkan (RSV). En sådan laddning konstrueras vanligen så att den genererar en metallstråle men kan också konstrueras så att större eller mindre metallfragment eller projektiler bildas. Strålen kännetecknas av hög hastighet och en liten diameter medan fragmenten har en lägre hastighet men större massa och diameter. RSV-laddningens storlek är fortfarande tänkt att vara liten i förhållande till en minas huvudladdning. Figur 5.1 visar experimentuppställningen vid ett undervattensprov.

Arbetet har inriktats så att man med ett relativt litet antal försök kopplade till beräkningar strävat efter att få fram en laddning, som är rimligt stor och har avsedd funktion. Det är känt att fragmentens förmåga att initiera ett sprängämne är beroende av hastigheten och diametern, men fragmentens massa är också betydelsefull [1]. Beräkningar [1-4] och ett antal försök [2, 4 och 5] har genomförts med avsikt att få fram en minförstörelsladdning med vilken man kan få svårinitierade laddningar att åtminstone deflagrera.

Minförstörelsladdningarna designades med hjälp av beräkningsverktyget LS-DYNA med utgångspunkt från krav på projektilhastighet, massa och form. Kraven utgår från det specifika sprängämnets detonationsegen-



Figur 5.1 Försöksrigg vid sjöförsök. Den övre grå cylindern är minförstörelsladdningen och den undre vita är mottagarladdning.

skaper. Ett sprängämnes karaktäristiska egenskaper får man genom speciella och omfattande experimentella studier. Viss experimentell verifiering har kunnat göras efter att ha röntgenfotograferat och studerat strålens form och hastighet hos RSV-laddningen.

Försöken genomfördes med RSV-laddningar med olika kaliber. De laddningar som använts är huvudsakligen befintliga RSV-laddningar, t.ex. Bantam och TOW, som modifierats på olika sätt. Givet målsättningen, som var att minst kunna starta en häftig deflagration, gjordes

modifieringen så att stålen gavs rätt diameter, hastighet, m.m., i förhållande till de krav som beräkningarna lett fram till.

Slutlig verifiering avsågs ske genom sprängprov mot ett extremt lågkänsligt sprängämne. Endast en mycket liten del av mottagarladdningens sprängämne antändes dock. Tänkbara orsaker kan vara att strålen fragmenterats och att mottagarladdningen inte var innesluten [5]. De erfarenheter som drogs vid det provet ledde fram till insikten att det var nödvändigt att öka minförstörelsladdningens diameter och eventuellt modifiera inläggets form.

Ett nytt prov med ökad kaliber, från 60 till 100 mm, genomfördes i november 2004. Genom mätning av reaktionshastigheten i mottagarladdningen av sprängämnet FOXIT konstaterades att man endast startat en deflagration. Detta bekräftar ytterligare de problem som man har med att initiera lågkänsliga sprängämnen med RSV. Figur 5.2 visar hur mätkroppar installerats i en mottagarladdning inför ett skjutförsök.

5.2. Slutsatser

Vid de experiment som genomförts under detta projekt har man kunnat konstatera att det är möjligt att förstöra minor och minladdningar med riktad sprängverkan. Dessa laddningar har också tillräcklig kapacitet att även kunna penetrera vatten och bottenmaterial.

Det har också konstaterats att moderna sprängämnen såsom PBX (Plastic Bounded Explosives) för undervattensbruk, som håller IM-kvalité (Insensitive Munition), kan vara extremt svåra att bringa till detonation med riktad sprängverkan.

För att kunna förstöra en mina innehållande ett IM-klassat sprängämne krävs att minförstörelsladdningen har förmåga att minst starta en kraftig reaktion inne i minladdningen.

Erfarenheterna från arbetet i detta projekt pekar på två realistiska möjligheter, som behöver undersökas närmare. Den ena är att utveckla RSV-tekniken t.ex. genom införande av reaktivt material i inlägget. Den andra är att pröva andra tekniker t.ex. utveckla en metod, som möjliggör att en bulk-laddning kommer tillräckligt nära den laddning som skall förstöras.

5.3. Referenser

- [1] Karlsson, S. och Ström, P., Sprängprov med röjladdning mot sjunkbomb, FOA-R--00-01729-313--SE, December 2000
- [2] Karlsson, S. och Ström, P., Förstudie av adaptiv minröjningsladdning för undervattensbruk, FOI-RH--00761--SE, Januari 2002
- [3] Helte, A., Almström, H., Andersson G., Karlsson S. och Lundgren J., Utvärdering av experiment utförda på explosivämnet B2211D vid FOA. I: Energiekvationer för det inerta explosivämnet och restprodukterna, FOA-R--99-01142-310--SE, Maj 1999
- [4] Almström, H., Lindersson, K. och Ström, P., Röjladdningsstudier, FOI-RH--0261--SE, December 2003
- [5] Helte, A. och Ström, P., Röjning av undervattensladdningar med RSV, FOI-R--1342--SE, September 2004



Fig. 5.2 Instrumenterad mottagarladdning av PBX FOXIT.

6. Produktionslista

Denna lista innefattar publikationer som producerats under projektiden januari 2002 till december 2004 och där ytterligare detaljerad information om projektet kan inhämtas. Publikationerna ligger i tidsordning.

Karasalo, I., *Simulated multi-aspect scattering from a buried object. Description of model cases*, FOI Memo 02-1293, February 2002

Davidsson, P. och Ståhlsten, T., *Protokoll från kontrollmätning av ROV kabel till Plums 02020*, FOI Memo 02-3056, Februari 2002

Ivansson, S., *Wave propagation through cylinders and spheres as computed by ordinary exponentials*, Journal of Sound and Vibration, Vol. 257(1), p. 189-201, 2002 (FOI-S--0680--SE, 2002)

Ivansson, S., *Spherical-Shell Scattering Computations by Ordinary Exponentials*, in Proc. of the 6th European Conference on Underwater Acoustics, ECUA'2002, 24-27 June 2002, Gdansk, Poland, p. 119-124, 2002

Ivansson, S., *Spherical-Shell Scattering Computations by Ordinary Exponentials*, Acta Acoustica united with Acoustics, Vol. 88, p. 634-637, 2002 (FOI-S--0681--SE, 2002)

Karasalo, I., and Skogqvist, P., *A fast ray-trace based scattering program*, FOI Memo 02-2450, September 2002

Tulldahl, H. M., *Bevakning av området lasersystem för sjöminspaning*, FOI Memo 03-18, Januari 2003

Skogqvist, P., and Karasalo, I., *Detection of Buried Objects by Inverse Scattering*, FOI Memo 03-1444, June 2003

Dobbins, P., Blondell, P., Pace, N., and Karasalo, I., *SITAR – localisation and imaging of seafloor targets with multiple aspect scattering*, Proc. of the 10th International Congress on Sound and Vibration, Stockholm, Sweden, 7-10 July, 2003 (FOI-S--0914--SE, June 2003)

Jonsson, P., Karasalo, I., Nilsson, A., Balk, L., and Caiti, A., *Underwater acoustic imaging for the assessment of seafloor waste: the SITAR project*, Proc. of the 10th International Congress on Sound and Vibration, Stockholm, 7-10 July, 2003 (FOI-S--0916--SE, June 2003)

Skogqvist, P., and Karasalo, I., *A fast acoustic scattering method for buried objects*, Proc. of the 10th International Congress on Sound and Vibration, Stockholm, Sweden, 7-10 July, 2003 (FOI-S--0918--SE, June 2003)

Morén, P., *SITAR – Main sea trial plan (WP-4), Sept. 22 – Oct. 12, 2003*, FOI Memo 03-686, September 2003

Morén, P., Jacobsen, N. och Söderberg, P., *Metoder för undersökning av objekt i bottensediment – fältförsök i Möja Söderfjärd*, FOI Memo 03-1444, December 2003

Almström, H., Lindersson, K. och Ström, P., *Röjladdningsstudier*, FOI-RH--0261--SE, December 2003

Staaf, Ö., *SITAR – Seafloor Imaging and Toxicity: Assessment of Risks caused by buried waste*, Systems Technology Annual Report 2003, FOI-R--1245--SE, p. 20-21, June 2004

Karasalo, I., and Skogqvist, P., *Acoustic scattering from submerged and buried objects*, Ch. 1 in the book "Acoustic Inversion Methods and Experiments for Assessment of the Shallow Water Environment", to be published by Kluwer Academic Publishers, The Netherlands. Presentation given at the 2nd Workshop on Experimental Acoustic Inversion Methods for Assessment of the Shallow Water Environment, Island of Ischia, Italy, 28-30 June 2004

Ivansson, S., and Karasalo, I., *Thin-shell approximations for computation of scattering from a fluid body with an elastic cover*, Proc. 7th European Conf. on Underwater Acoustics, ECUA 2004, Delft, The Netherlands, p. 437-442, 5-8 July 2004 (FOI-S--1594--SE, 2004)

Karasalo, I., and Skogqvist, P., *Transient scattering from submerged and buried objects*, Proc. 7th European Conf. on Underwater Acoustics, ECUA 2004, Delft, The Netherlands, p. 451-456, 5-8 July 2004 (FOI-S--1593--SE, 2004)

Malmberg, J.-A. och Lindqvist, P., *Aktiva elektromagnetiska metoder för minsökning i undervattensmiljöer*, FOI Memo 916, Juni 2004

Helte, A. och Ström, P., *Röjning av undervattensladdningar med RSV*, FOI-R--1342--SE, September 2004

Karasalo, I., and Skogqvist, P., *Inverse bistatic acoustic scattering for identification of buried objects*, FOI-R--1343--SE, September 2004