

ERLAND SANGFELT, TOMMY ÖBERG



FOI är en huvudsakligen uppdragsfinansierad myndighet under Försvarsdepartementet. Kärnverksamheten är forskning, metod- och teknikutveckling till nytta för försvar och säkerhet. Organisationen har cirka 1250 anställda varav ungefär 900 är forskare. Detta gör organisationen till Sveriges största forskningsinstitut. FOI ger kunderna tillgång till ledande expertis inom ett stort antal tillämpningsområden såsom säkerhetspolitiska studier och analyser inom försvar och säkerhet, bedömning av olika typer av hot, system för ledning och hantering av kriser, skydd mot och hantering av farliga ämnen, IT-säkerhet och nya sensorers möjligheter.

Erland Sangfelt, Tommy Öberg

Undervattenskommunikation 2006. Operativ och teknisk anpassning.

Utgivare FOI - Totalförsvarets forskningsinstitut Systemteknik 164 90 Stockholm	Rapportnummer, ISRN FOI-R--2143--SE	Klassificering Användarrapport
	Forskningsområde 4. Ledning, informationsteknik och sensorer	
	Månad, år December 2006	Projektnummer E6059
	Delområde 43 Undervattenssensorer	
	Delområde 2	
Författare/redaktör Erland Sangfelt Tommy Öberg	Projektledare Erland Sangfelt	
	Godkänd av	
	Uppdragsgivare/kundbeteckning HKV	
	Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig Erland Sangfelt, Tommy Öberg	
Rapportens titel Undervattenskommunikation 2006. Operativ och teknisk anpassning.		
Sammanfattning <p>2006 års forskningsresultat från projekt "Kommunikationslänk under vatten" rapporteras översiktligt. En beskrivning av demonstrationer i fält av en högpresterande kommunikationslänk ingår. Projektets, samt föregångarens, alla utgivna rapporter och publikationer rörande akustiska, elektromagnetiska och optiska kommunikationsmetoder 2000 – 2006 sammanställs i en lista.</p> <p>Systemförslag till kommunikationsmodem på några olika nivåer av sofistikeringsgrad ges, tillsammans med en prestandabedömning och taktiska aspekter på deras användning. Utgående från marina förbands uppgifter både nationellt och internationellt diskuteras nio olika situationer eller visioner för operativ användning av akustisk undervattenskommunikation. I alla av fallen är undervattenslänken antingen nödvändig, eller så ger den ett mervärde.</p> <p>En viktig sammanfattning av forskningen är att den modernaste kommunikationstekniken tillåter tal, data och text att överföras som en realtidsström över avstånd på 80 – 100 km i ljudkanal och med goda sändare. Vi har själva demonstrerat detta på avstånd upp till 60 km med en relativt enkel sändare. På små avstånd mindre än 1 km, eller vertikalt, bör realtidsströmmande video (64 kbps) klaras av.</p>		
Nyckelord Undervattenskommunikation, iterativ utjämning, turbokod, UUV, ubåt, nätverk		
Övriga bibliografiska uppgifter	Språk Svenska	
ISSN 1650-1942	Antal sidor: 28 s.	
Distribution enligt missiv	Pris: Enligt prislista	

Issuing organization FOI – Swedish Defence Research Agency Systems Technology SE-164 90 Stockholm	Report number, ISRN FOI-R--2143--SE	Report type User report
	Programme Areas 4. C4ISTAR	
	Month year December 2006	Project no. E6059
	Subcategories 43 Underwater Surveillance, Target acquisition and Reconnaissance	
	Subcategories 2	
Author/s (editor/s) Erland Sangfelt Tommy Öberg	Project manager	
	Approved by	
	Sponsoring agency	
	Scientifically and technically responsible	
Report title (In translation) Underwater communication 2006. Operative and technical aspects.		
Abstract <p>A progress report for 2006 concerning our research on underwater communications is given. We shortly describe field demonstrations of a high performance acoustic link. All our published reports on electromagnetic, acoustical, and optical methods for underwater communication are given from 2000 – 2006.</p> <p>Proposals of modern design for acoustical communications are presented together with an estimated degree of performance and tactical use. Starting from our naval forces tasks in both national and international operations, we formulate and discuss briefly nine different situations or visions for operative use of acoustical underwater communication. In all of them, the underwater link is either necessary or gives added value.</p> <p>An important conclusion of our research is that the modern communication techniques allow for streaming transmission of speech, data, and text over ranges of 80 – 100 km in a sound channel and if a fairly potent transducer is used. We already demonstrated this for ranges up to 60 km using a less powerful transducer. At short range less than a km, or using a vertical uplink, streaming video (64 kbps) should be possible.</p>		
Keywords Underwatercommunication, iterative equalization, turbo code, UUV, sub, network		
Further bibliographic information	Language Swedish	
ISSN 1650-1942	Pages 28 p.	
	Price acc. to pricelist	

Innehåll

1	INLEDNING OCH BAKGRUND	2
1.1	BAKGRUND	2
1.2	VERKSAMHET OCH RESULTAT UNDER 2006	3
2	ITERATIV KANALSKATTNING OCH -UTJÄMNING	3
2.1	”HELLRE UNGEFÄR RÄTT ÄN EXAKT FEL”	4
2.1.1	<i>Utjämnaren</i>	4
2.1.2	<i>Turbokodning</i>	8
2.1.3	<i>Iterativ utjämning</i>	9
3	MIMO-METODEN	9
4	FÖRBEREDELSE	10
5	DEMONSTRATIONS DAG OCH FÄLTFÖRSÖK	10
6	AKUSTISK SMYGGKommunikation MED ”RAKE-MOTTAGARE”	14
7	NÅGRA RESULTAT	14
7.1	RAPPORTSAMMANSTÄLLNING 2000 – 2006.	16
8	ANPASSNING TEKNISKT OCH OPERATIVT	18
8.1	FÖRKORTNINGAR	18
8.2	UBÅTS-, YTSTRIDS- OCH MINKRIGSFÖRETAG	19
8.2.1	<i>Uv-komm från moderplattform till UUV</i>	20
8.2.2	<i>Uv-komm från ledningsplattform till ubåt vid IRS</i>	20
8.2.3	<i>Uv-komm till ubåt eller UUV vid skydd</i>	21
8.2.4	<i>Uv-komm mellan ubåt och ytfartyg under ubåtsjakt</i>	21
8.2.5	<i>Uv-komm mellan uv-system och ytboj</i>	21
8.2.6	<i>Uv-komm till och mellan samverkande UUV</i>	22
8.2.7	<i>Uv-komm till och inom sensornätverk</i>	22
8.2.8	<i>Uv-komm till minor</i>	22
8.2.9	<i>Uv-komm i SF</i>	23
8.3	TEKNISKA/TAKTISKA ASPEKTER PÅ UV-KOMM	23
8.3.1	<i>Utveckling och forskning</i>	23
8.3.2	<i>Undervattenskanalen</i>	24
8.3.3	<i>Systemförslag och prestanda</i>	24
8.4	SAMMANFATTNING AV MÖJLIGA PRESTANDA	27
8.5	SAMMANFATTNING: NÅGRA TAKTISKA ELLER OPERATIVA ASPEKTER	27
8.6	EN REKOMMENDATION	28
9	REFERENSER	28

1 INLEDNING OCH BAKGRUND

Vi rapporterar kortfattat 2006 års verksamhet och forskningsresultat i projektet Kommunikationslänk under vatten (kap.2-7). I kap.7 sammanställs en lista över rapporter och publikationer från detta projekt, samt dess föregångare, som utgivits under perioden 2000-2006. Vi beskriver sedan några situationer eller mikrosценарier för operativ användning av undervattenskommunikation (uv-komm) i kap.8. Där beskrivs även hur metoderna kan anpassas tekniskt/taktiskt.

1.1 Bakgrund

Enligt målsättningen för projektet skall vi utveckla och anpassa metoder för uv-komm, främst akustiska, samt sträva efter optimal datatakt och räckvidd (se kap.2-7). Forskningen skall även besvara hur metoderna kan anpassas tekniskt/taktiskt/operativt för både fasta och rörliga system (se kap.8). Slutleveransen 2006 är att ha demonstrerat högpresterande dataöverföring i sjöförsök.

Drivkrafterna bakom projektet är flera:

- 1) att ge FM och FMV en utvecklad kompetens inom uv-komm som kan bidra med expertråd vid specifikationsarbete och anskaffning,
- 2) att ge FM och FMV tillgång till utprovade lösningar vid realiseringen av ett nätverksbaserat försvar där samverkan med undervattenssystem skall ske,
- 3) att bidra till en ökning av samarbetet mellan FOI, svensk försvarsindustri och utländsk försvarsforskning/industri inom undervattensområdet.

De kunskaper som byggts upp under tidigare år i projektet har omsatts i stöd till FMV och FM vid dels specifikationen av ett prototypmodem, UCOMS, för uv-komm mellan ubåt och fartyg, dels till studierna "Viking Communication Study"¹ och Sambandssystem ubåt²

Vi har även kunnat utföra en studie inom projektet Informationskrigföring vid FOI rörande störning av uv-komm³ med hjälp av de metoder vi tagit fram. Denna har rönt intresse utomlands, bl.a. presenterades studien som ett inbjudet föredrag vid en konferens i Singapore i April 2005.

Kunskaperna har även använts till att formulera och förankra ett internationellt samarbete rörande akustisk smygkommunikation till obemannade farkoster mellan sju länder, ursprungligen inom ramen för WEAG⁴, men där FMV står som huvudkontraktör idag. Projektets benämning är UCAC, vilket står för "UUV Covert Acoustic Communications". I det projektet har vår projektgrupp vid FOI bl.a. ansvar för att leda utvecklingen av nya kommunikationsalgoritmer, främst i samarbete med TNO i Holland, som senare skall demonstreras på UUV. SAAB Underwater Systems AB står för projektets övergripande projektledning och Sverige är således ledande nation. Vårt FoT-projekt Kommunikationslänk under vattnet skall årligen kunna bidra med 10 % av dess årsbudget till arbetet i UCAC.

Under tidigare år var projektet bredare upplagt än idag, förutom akustiska metoder utvecklade vi metoder för elektromagnetisk uv-komm och retrokommunikation med laser. Den elektromagnetiska kommunikationsmetoden kom att hemligstämplas, och beskrivs i motsvarande slutrapport⁵. Den laserbaserade metoden baserades på ett koncept med ytboj med optisk retrokommunikation för den del av bojen som kommunicerar i luft. Forskningen kring det laserbaserade konceptet samt övrig forskning på elektromagnetiska och akustiska metoder har rapporterats i ett 30-tal rapporter, vilka listas i kap.7.

Projektets bredd var bra i början och gav viktiga kunskaper om vad olika tekniker förmår, men allteftersom har behovet av en fokusering på akustisk uv-komm ökat. Anledningen till detta är dels att akustiken är den i särklass mest användbara under vattnet, dels är undervattensmiljön mycket svår och det krävs mycket arbete för att få fram metoder med i sammanhanget höga prestanda. I enlighet med detta krymptes verksamheten kring optisk retrokommunikation kraftigt under 2005 för att helt upphöra under 2006. Verksamheten har istället fortsatt inom ramen för projektet Retrokommunikation i taktiska tillämpningar, FoT 5.

1.2 Verksamhet och resultat under 2006

Årets forskning har således fokuserat på akustisk kommunikation. Verksamheten kan beskrivas med följande lista:

- Vidareutveckling av iterativ utjämning och -kanalskattning (avsnitt 2).
- Vidareutveckling av MIMO (Multiple Input Multiple Output) – metoden (avsnitt 3)
- Förberedelser för demonstrationsdag och fältförsök (avsnitt 4)
- Demonstrationsdag och fältförsök (avsnitt 5)
- Studie: Invisning av Antitorpedtorped med akustisk kommunikation. Hemlig rapport.
- Utveckling av RAKE-mottagare för smygkommunikation (som stöd till UCAC, kap.6)
- Kunddag: Avrapportering av projektet till kund (kort om i kap.7).
- Teknisk och operativ anpassning av uv-komm (kap.8).

Fältförsöken under 2005 och 2006 blev framgångsrika och bildar tillsammans underlaget till vår demonstration av en högpresterande kommunikationslänk. Vi konstaterar att ingen hittills i öppen litteratur rapporterat om lika goda resultat som vi har uppnått med vår nya metod (iterativ utjämning och -kanalskattning). Ett exempel är att vi överfört 2600 informationsbitar per sekund felfritt från 60 km avstånd. Den ”råa” dataakten, inklusive felrättande kod, var 8000 bps.

Några fler resultat, delvis från tidigare år, sammanställs i kap.7. Den nya metoden förklaras i nästa kapitel (kap.2).

2 ITERATIV KANALSKATTNING OCH -UTJÄMNING

Tidigare i projektet har vi studerat och testat en modern standardmetod för kanalutjämning, en sk beslutsåterkopplad utjämnare (eng. decision feedback equaliser, DFE). Den kan sägas fungera tämligen väl då SNR (efter eng. *signal to noise ratio*) är högt och kanalens efterklangstid inte är stor. Metoden är adaptiv och kan följa med i kanalens tidsvariabilitet. Synkroniseringen sker även den med standardmetoder av typen fas-låsta slingor (eng. phase-locked loops, PLL), vilket tycks fungera väl då SNR är högt. De resultat vi erhöll i fältförsök var i sig imponerande (se kap.7) och hävdar sig väl i en internationell jämförelse, men de erhöles vid mycket goda ljudutbredningsförhållanden med tämligen begränsad efterklang i kanalen och vi kan inte alltid räkna med detta (som vi skall se i kap.5).

Vi har nu därför gått vidare mot nya, mer avancerade metoder som är avsevärt mer robusta i att de är avsedda för att klara mycket lägre SNR än DFE-metoden. Den grundläggande idén med vår nya metod beskrivs förenklat i nästa avsnitt, vilket kan läsas av den intresserade men kan hoppas över utan att fortsättningen blir lidande.

2.1 ”Hellre ungefär rätt än exakt fel”

Den teknik vår kommunikationslösning bygger på är hämtad från den allra senaste utvecklingen inom telekommunikation. Något system där de senaste rönen utnyttjas i så stor utsträckning som i vårt är, så vitt vi känner till, inte realiserat i någon annan länk för undervattenskommunikation. Det finns därför skäl att närmare beskriva de centrala idéerna i systemet. Att tillgodogöra sig metoden i sina detaljer är tidsödande även för experter inom området. Nedan görs en mycket förenklad beskrivning, gjord för tekniskt intresserade läsare som inte är experter inom telekommunikation. Beskrivningen görs i möjligaste mån utan matematik.

Alternativa kommunikationslösningar har varit möjliga men de val som gjorts bygger på att kommunikation skall vara möjlig även under svåra ljudutbredningsförhållanden samtidigt som kommunikationspunkterna är i relativ rörelse. Metoden kan sägas stå på tre ben. Det första är en adaptiv utjämnare, det andra en felkorrigerande kod och slutligen en iterativ utjämning, dvs. utjämningen görs om och om igen med färre överföringsfel för varje runda.

2.1.1 Utjämnaren

De flesta läsare bedöms ha hört en signal som har transporterats i vatten och vet att signalen ackompanjeras av ett rejält eko, eller efterklang. Liknande, fast kortare, eko kan höras i ljud som har utbredd sig långa vägar i en skog eller en katedral. Trots att örat har god förmåga att uppfatta information även i ljud med eko så ser vi människor till, när vi talar, att ljudet är uppfattbart genom att tala långsammare. Detta kan man också göra inom telekommunikationen men resultatet blir en förbindelse med låg överföringstakt. Icke desto mindre har denna väg valts i många äldre lösningar för uv-komm. Den vägen är inte så intressant för oss då undervattenmiljöns långa eko ger mycket låg dataakt. Vi har i stället använt oss av en utjämnare. Den har till uppgift att eliminera, eller utjämna, undervattenmiljöns menliga inverkan på den överförda signalen.

Antag att en sändare, dvs. undervattenshögtalare, skickar ut ett ljud i form av en mycket kort puls. Pulsen breder ut sig i alla riktningar, stöter på olika föremål (grund, vattenyta, botten etc.) eller avböjs på grund av ljudhastighetsvariationer i vattnet och når mottagaren längs flera vägar med olika fördröjning. Resultatet blir ett eko som innebär att mottagaren ser den utsända pulsen som flera pulser med olika styrka och ankomsttid, se fig. 1.

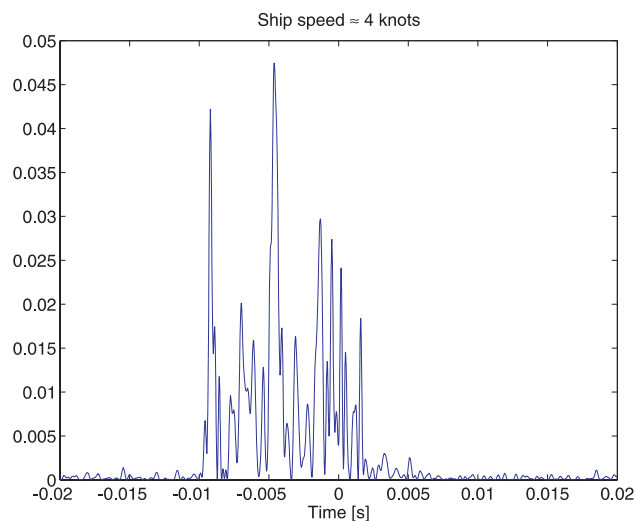


Fig. 1. Ett för år 2005 typiskt impulssvar uppmätt utanför Gotland på c:a 20 km. avstånd

Med den datatakt vi önskar använda motsvarar impulssvarets längd c:a 20 datasymboler. Det innebär att om vi vill avkoda en bestämd symbol så kommer den att störas av 19 andra symboler. I de värsta fall vi har noterat har impulssvaren varit flera 100 symboler långa. Även detta måste kunna hanteras av kommunikationssystemet, vilket sätter mycket höga krav jämfört med dataöverföring per radio. Antag att den utsända impulsen har uppfångats av mottagaren tillsammans med det brus och buller som normalt finns i vattnet. I mottagaren samplas signalen med ett tidsintervall som motsvarar en datasymbol, se röda punkter i fig. 2.

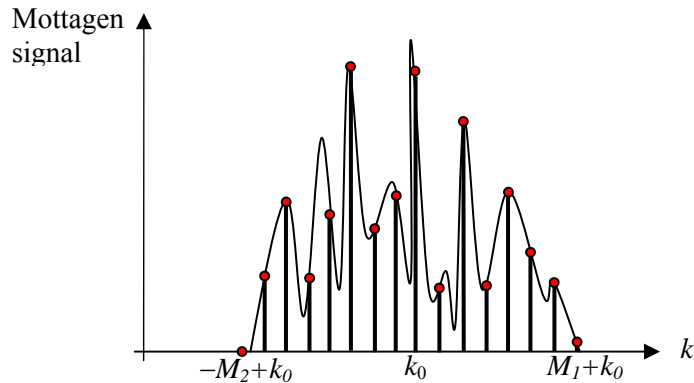


Fig. 2. Den mottagna impulsen samplas. k är ett tidsindex och M_1+M_2 är impulssvarets längd.

Det bästa vi kan göra för att få en så stor relation mellan önskad signal (impulsen) och störningen (brus och buller) är att multiplicera varje sampel med signalnivån i just det aktuella samplet och sedan addera samman alla sampel till ett enda. Vi får då ett sampel med bästa möjliga signal-till-brusnivåförhållande. Detta är en välkänd metod bland statistiker där man vet att data skall vägas i relation till sin tillförlitlighet innan man bildar ett medelvärde. Inom telekommunikation kallas metoden för "maximal ratio combining". Ett blockschema av operationen visas i fig. 3. Samma filter representeras i fig. 5 av blocket **a**.

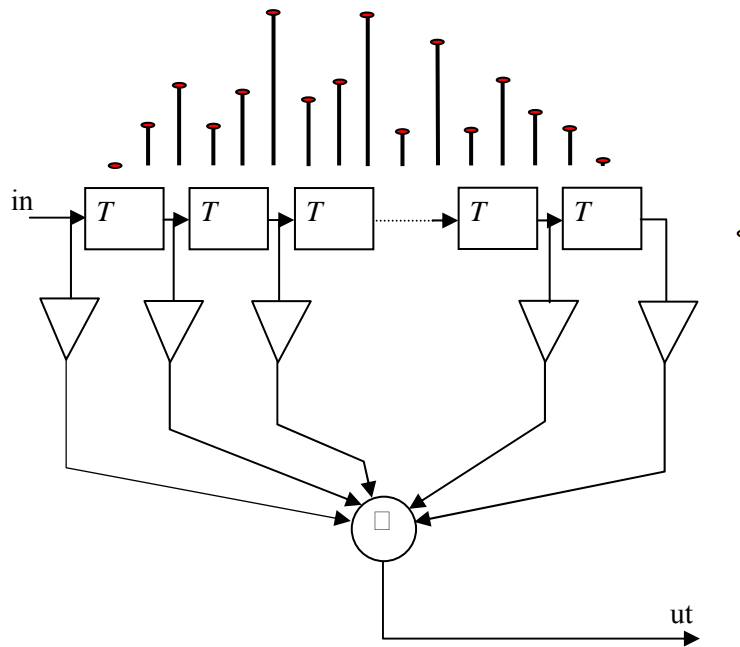


Fig. 3. Blockschema av den vägda medelvärdesbildningen. Lådorna T motsvarar minnesceller i datorn där resp. sampel lagras. Varje triangel representerar en multiplikation, eller viktning av samplen. Helheten utgör ett digitalt filter. Efter summeringen fås ett sampel med stort värde.

Utbredningsvägarnas styrka varierar men har vi många så är sannolikheten stor att åtminstone någon av dem släpper igenom signalen väl, vi får diversitet eller en mångfald av möjligheter. Många oberoende vägar är alltså en fördel.

Så länge vi har skickat ut en enstaka impuls är allt gott och väl. Skickar vi ut flera i en takt som är högre än den tid det tar för ekot att klinga ut så kommer impulserna att överlappa och vi kan inte längre urskilja enskilda impulser, se fig. 4, vi har fått inter-symbol-interferens, sk. ISI.

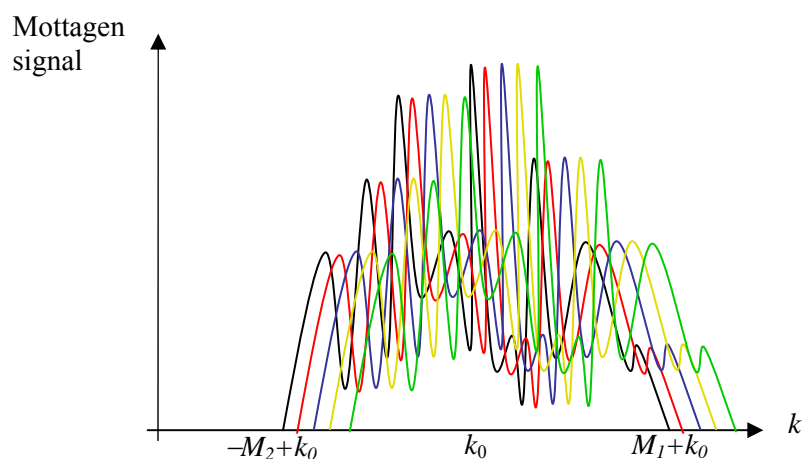


Fig. 4. I figuren har fem identiska pulser (symboler) sänts ut. Dessa kommer att överlappa varandra vid mottagaren. Varje färg motsvarar en impuls.

Låt oss säga att vi vill avkoda den svarta impulsen i fig. 4. Det bästa vi kan göra då är att helt enkelt subtrahera de övriga. Detta kan vi naturligtvis göra om vi exakt känner formen på den utsända impulsen och impulssvaret. Impulserna representerar i kommunikationsfallet de datasymboler som utsänts. Datasymbolerna är okända för mottagaren, annars skulle dataöverföringen inte behöva utföras. Vi är heller inte medvetna om impulssvarets utseende som ändras under överföringens gång. Mottagaren måste därför ha någon form av processorer som beräknar de okända faktorerna. I den processor som visas i fig. 5 beräknas ett antagande om vilka datasymboler som har mottagits. Resultatet utgör utsignal och återkoppling till ingången via filtret \mathbf{u} , vars impulssvar är lika med kanalens impulssvar. I en annan processor, som inte finns med i fig. 5, skattas kanalen och beräknas optimala värden för filterkoefficienterna \mathbf{a} och \mathbf{u} .

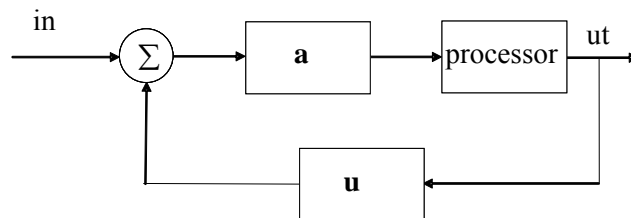


Fig. 5. Subtraktion av de övriga impulserna, symbolerna, genom återkoppling via en processor som har räknat ut symbolernas utseende. Lådorna \mathbf{a} och \mathbf{u} består av likadana filterstrukturer som i fig. 3. Summeringen kan också sättas efter filtret \mathbf{a} , vilket är typiskt för DFE:n, men då ändras värdena på filterkoefficienterna \mathbf{u} .

Att helt exakt bestämma de okända faktorerna går inte, utjämnarens egenskaper bestäms därför mycket av hur processorn utformas. De enklaste och äldsta typerna av processorer är en limiter (ser endast till tecknet hos den mottagna signalen), som bestämmer om den mottagna symbolen var $+1$ eller -1 , och en algoritm, som bestämmer kanalens impulssvar. Denna typ av utjämnare kallas "Decision Feedback Equaliser", DFE, och var länge den bästa utjämnaren som kunde realiseras. Nackdelen med denna är att vid låga signal-till-brusförhållanden eller långa impulssvar så väljer ofta limitern fel symbol och orsakar därmed många fel i rad genom att felet återkopplas. Ett annat problem är att impulssvaret måste vara starkt i början för att sedan avklinga. Denna typ av impulssvar är vanliga vid radioöverföring men sällan inom akustik under vatten. Om impulssvaret börjar svagt och ökar kan den del av impulssvaret som ligger före dess starka del inte subtraheras eftersom något beslut om symbol ännu inte har kunnat fattas. Risken att limitern fattar fel beslut är mycket stor om limitern skall tvingas fatta beslut på den svaga delen av impulssvaret, därför väntar man till den starka delen. Den del som inte subtraheras kommer att fungera som en störning.

Vår utjämnare är linjär därför att den utgör ett linjärt filter och inget "hårt" beslut om $+1$ eller -1 tas. I stället matas ett "mjukt" värde tillbaka och subtraheras. Värdets storlek är proportionellt mot sannolikheten att den mottagna symbolen är en $+1$ eller -1 :a. Stor osäkerhet ger ett litet värde, t.o.m. noll om total osäkerhet råder. Risken att ett felaktigt beslut skall orsaka följdfel minskar då avsevärt. Man kan se det så att DFE:n är väldigt självsäker och tar beslut även på dåliga grunder, medan den mjuka utjämnaren är lite mer tveksam. Antagandet görs dessutom på mycket säkrare grund än i DFE:n eftersom den felkorrigerande koden används vid bestämningen. Beräkningen sker blockvis, därför kan samtliga störande symboler inom ett block subtraheras vid den första iterationen. Vi lider då inte under kravet på att impulssvaret skall ha ett visst utseende. Kanalen

bestäms med hjälp av en mista kvadratmetod. I detta avseende är skillnaden i princip inte så stor jämfört med DFE:n men eftersom kunskapen om symbolerna är så mycket tillförlitligare blir också kanalskattningen bättre (därav titeln på avsnitt 2.1). Sammantaget har alltså vår utjämnare mycket större kapacitet att hantera långa impulssvar och lågt signal-till-brusförhållande än vad tex. DFE:n har.

2.1.2 Turbokodning

I den med felkorrigerande koder är att man lägger till extra symboler som ordnas så att man inte utnyttjar alla möjliga kombinationer av symboler. De kombinationer man inte utnyttjar skapar ett utrymme för att korrigera de fel som uppstått under överföringen, förutsatt att de inte är för många. I stort sett vilken felkorrigerande kodning som helst har kunnat användas i vårt system. Den kodning vi har valt kallas Turbokodning och är en mycket effektiv felkorrigerande kodningsmetod och har fått sitt namn av att den, likt motorvärldens motsvarighet (avgaser driver en turbin som ökar trycket i bränsleinsprutningen), kopplar tillbaka utsignalen till ingången som får driva successiva avkodningar, dvs. en iterativ avkodning.

Antag att vi har mottagit en symbolsekvens, y_1 till y_8 . Varje mottagen symbol innehåller den utsända symbolen, x_k , plus de brus och störningar, n_k , som uppfångats av hydrofonen, dvs. $y_k = x_k + n_k$.

y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6	y_7	y_8
-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Fig. 6. Mottagen datasekvens.

Eftersom vi har en felkorrigerande kod kommer symbolerna att vara beroende av varandra. Beroendet är komplicerat och ligger i kodens struktur som kan liknas med en spalje. Antag för enkelhets skull att symbolen x_1 ingår i x_5 och x_6 genom relationerna $x_5 = x_1 + x_2$ och $x_6 = x_1 + x_3$. Vi kan då lösa ut x_1 och genom de mottagna symbolerna få tre oberoende skattningar av x_1 :

$$\hat{x}_1 = y_1$$

$$\hat{x}_1 = y_5 - y_2$$

$$\hat{x}_1 = y_6 - y_3$$

På grund av störningarna kommer nu dessa skattningar att ge ett värde som på olika sätt avviker från det sanna x_1 . Värdena på n_1, n_2, n_3 osv. som ingår i y_k är olika och slumpmässiga. Tar man då ett medelvärde av skattningarna fås en bättre skattning av x_1 än en enstaka mätning gjord på bara y_1 . Men som framgår kan x_1 också stötta skattningen av x_2, x_3, x_5 och x_6 . Då vi nu har fått ett bättre värde på x_1 utnyttjar vi det till att förbättra skattningen på dessa. Då kan vi återigen göra en bättre skattning av x_1 osv. Så håller vi på tills vi kramat ut all möjlighet till förbättring.

Turbokodningen använder dubbla koder där informationsströmmen in till den ena kodaren stuvats om, jämför att vaska en kortlek, så att dataströmmarna ut från varje kodare är tillsynes oberoende av varandra. Vi har också två avkodare i mottagaren, en för vardera koden. Dessa stöttar varandra så till vida att den ena avkodaren meddelar den andra avkodaren att den aktuella symbolen är +1 eller -1 med en viss sannolikhet, kallas för a priori information. Avkodare två utnyttjar den informationen som en del i sin beräkning av den aktuella symbolen.

2.1.3 Iterativ utjämning

Vid en iteration upprepar man samma beräkningar på en viss datamängd och tar små steg mot det slutliga resultatet. Givet att konvergens är möjlig att uppnå får man på så sätt successivt säkrare skattning av de utsända symbolerna. När resultatet inte längre ändras mellan iterationerna anses att man har fått så bra avkodning som är möjlig att uppnå och iterationen stannas.

Efter varje runda i turboavkodaren levereras ett väntevärde, \bar{x}_k , på varje symbol i den sekvens som skall avkodas. Dessa värden används då till att subtrahera ISI (se avsnitt 2.1.1) från den aktuella symbolen på det sätt som beskrivits tidigare. Eftersom vi nu har en bättre skattning av de utsända symbolerna blir vår skattning av x_k bättre. Notera dock att a-priorikunskapen om den aktuella symbolen måste subtraheras då vi annars skulle göra den nya mätningen baserad på föregående. Till slut skulle då avkodarens egen bild av omvärlden dominera över mätningen av den mottagna signalen, dvs. verkligheten, och det är något vi inte önskar oss. Systemets struktur visas i fig. 7.

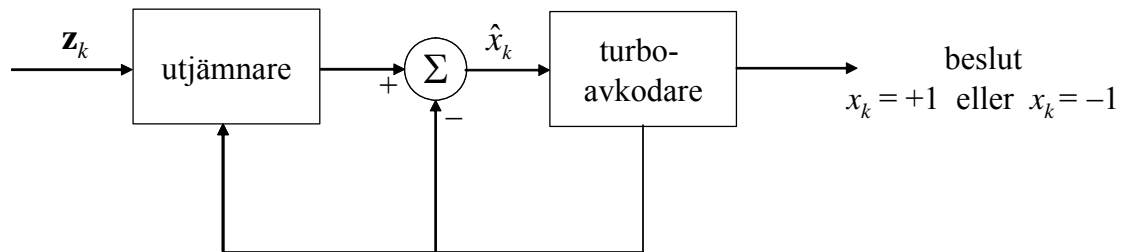


Fig. 7. Mottagarens uppbyggnad med turboavkodare och utjämnare. Genom återkopplingen strömmar de sannolikheter som har beräknats i turboavkodaren.

En ny avkodning görs i turboavkodaren och på grund av att de skattade värdena från utjämnaren nu bör vara bättre än i föregående iteration kommer turbokodaren att avkoda med säkrare värden än tidigare och sannolikheterna för värdet hos varje symbol växer succesivt mot 100%. Väntevärdet för varje symbol kommer då att hamna mycket nära plus eller minus ett och avkodningen är färdig.

3 MIMO-METODEN

Nästa generations trådlösa mobiltelefoni och radio ställer stora krav på robusthet och datatakter i en tidsvariabel flervägsutbredningsmiljö. Detta har drivit forskningen inom telekom mot användning av system med flera sändare och mottagare. Denna teknik kan öka möjliga datatakter på ett effektivt sätt, alternativt möjliggöra robustare överföring av data vid lägre SNR. Vår metod bygger på att kombinera Alamouti-kodade sändsignaler⁶ med iterativ kanalskattning och iterativ utjämning⁷. Metoden beskrivs även i konferensbidraget nr 2 i resultatrapporteringen från 2006 (kap.7). Några preliminära resultat från en analys av data från 2005 års fältförsök ges i konferensbidraget. Det visade sig att fädningarna i de skattade impulssvaren var för små för den diversitet som erbjuds av MIMO skulle förbättra resultaten nämnvärt, jämfört med metoden i kap.2.

Vi bedömer att MIMO-metoden behöver utvärderas mer på experimentella data innan vi vet om dess ökade komplexitet betalar sig.

4 FÖRBEREDELSE

Liksom vid 2005 års försök med kommunikation vid Fårö⁸, inhyrdes två sändare (från FMV RAMSE-system) med tillhörande förstärkare och signalkort av FMV och Amlab Elektronik i Järfälla. Hydrofonkedjan för mottagning samt datainsamlingsutrustning från 2005 iordningställdes. Kabellängden till hydrofonkedjan är 2 km och tillåter mottagning från land vid Digershuvud på Fårö. Utrustningen utprovades och kalibrerades i FOI:s vattentank innan försöken. Dessutom utvecklades mjukvara till den kommande demonstrationen och testades i tanken. Mjukvaran omfattade talkodning på en fristående dator, kodning och signalgenerering till en ljudfil på annan PC, samt nätverksuppkoppling dem emellan och RAMSE-datorn som styr den slutgiltiga utsändningen av ljudfilerna. Mottagningsenheten omfattade förutom hydrofonkedja och datainsamlingen, en PC för avkodning och en GPS-dator som skulle monitorera sändbåtens position på en kartbild under demonstrationen.

Som ett ytterligare prov av utrustningen utfördes ett endags fältförsök i Djupviken i Berga strax efter midsommar. Huvudsyftet var dock att testa kommunikationsmodemet som skulle användas vid demonstrationen efter sommaren. Testerna visade på enkla vågutbrednings-förhållanden och kommunikationsutrustningen fungerade som den skulle. Text, data och bild överfördes utan problem.

Under fältförsöket denna gång kunde inte HMS Fårösund användas eftersom hon skulle ligga i docka för ommålning under tiden för fältförsöken. Istället fick vi tillgång till HMS Furusund som kom att tjänstgöra som sändfartyg utanför Fårö under vecka 37.

5 DEMONSTRATIONSDAG OCH FÄLTFÖRSÖK

Demonstrationen utfördes under en dag vecka 37, 2006 nordväst om Fårö, se fig. 10. Resten av veckan ägnades åt förövningar och fältförsök. Det visade sig, trots stora likheter med förra årets försök på samma plats och med snarlika ljudhastighetsprofiler, att ljudkanalens efterklang, eller impulssvar, ibland var tiotals gånger längre än 2005, se fig. 8. Även vid alla de andra tillfällena och platserna i Östersjön där vi mätt har vi fått efterklangstider som överensstämde med försöken på Fårö 2005, inte med årets. Vi hade baserat kommunikationsalgoritmerna på vår tidigare erfarenhet och designat dem därefter. Detta innebar att vi fick försöka representera den långa efterklangen på ett otillfredsställande sätt med alltför korta filter, se fig.3, vilket av och till ledde till problem med att felfritt avkoda data.

Trots detta kunde vi under demo-dagen sända tal felfritt från 15 km avstånd, samt avkoda korta textmeddelanden och enkla bilder på avstånd mellan 3 och 30 km. Inbjudna gäster från FMV fick dessutom en genomgång av kommunikationssystemet och projektets forskning.

I fig.9 visas ett exempel på kommunikationssignal i tid-frekvens (lofar). Man ser tydligt att efterklangen ligger kvar många sekunder, samt att reflexer av signalen kommer in i mottagaren 2 respektive 7 sekunder efter själva signalen. Man ser även smalbandiga signaler som härrör från en tonstege som vi skickade ut 10 sek innan kommunikationen startade. Tonerna ligger kvar och ringer upp mot 1 min efter att de upphört. Vi hade dem för att meddela operatören vid mottagningen att kommunikationssändning var att vänta. Med de stora avstånd vi sände från, fungerade inte alltid radiosambandet, tonstegen i vattnet var ett säkrare sätt att meddela sig på! Dock hade vi inte räknat med att de skulle ligga kvar och störa mottagningen av kommunikationssignalerna, i fig.9 ser man tydligt att en av tonerna ligger i kommunikationsbandet.

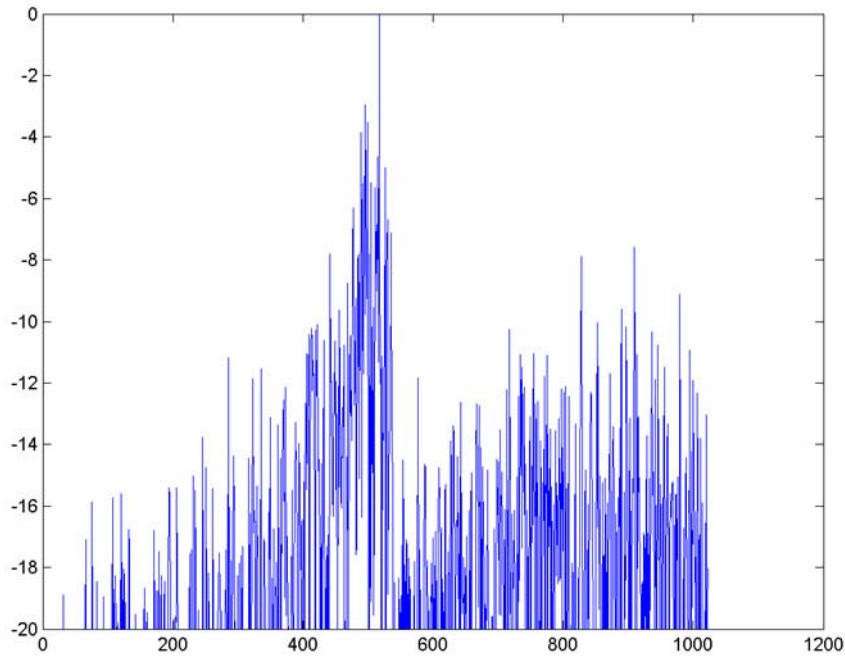


Fig. 8. Uppmätt impulssvar NV Fårö 2006, avstånd 30 km. Observera dB-skalan för magnituderna. Tidsskillnaderna längs horisontella axeln anges i symboler, 1 symb är 0,25 ms. Detta impulssvar är således 250 ms, jämför med det i fig.1 som är 20 ms!

Under såväl demo-dag som fältförsök bogserades de båda sändarna i 3-4 knops fart för att Dopplereffekterna skulle bli signifikanta. Ett stort antal signaler med olika modulationsformat och datatakter sändes. Mycket av all data som samlades in kommer att analyseras och ligga till grund för förbättringar av algoritmerna. Vi räknar med att kunna göra detta under 2007.

En uppenbar förbättring blir att utöka de möjliga filterlängderna så att längre impulssvar (efterklang) kan hanteras. En annan uppgift är att utöka metoden till att kunna processera fler hydrofoner samtidigt, vilket troligen leder till felfri avkodning även i fall med extremt lång efterklang.

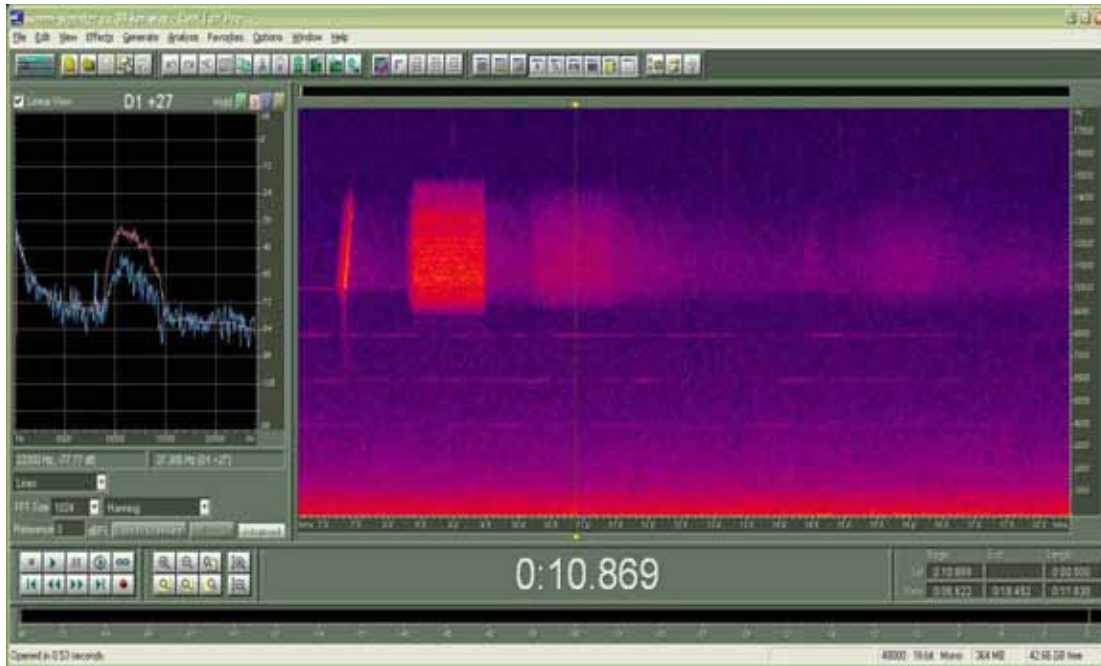
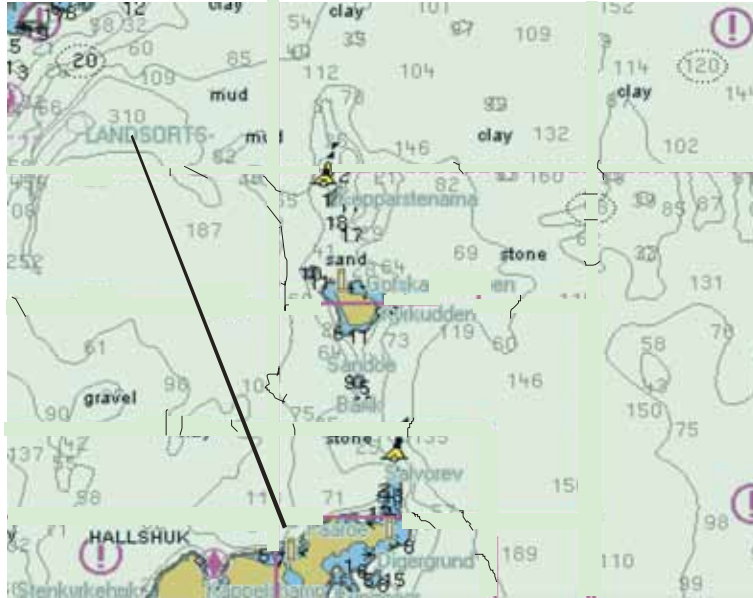


Fig. 9. Exempel på lång efterklang vid Fårö 2006. Till höger ser vi kommunikationssignalens frekvens (4 kHz bandbredd kring centrumfrekvensen 12 kHz, vertikal led) som funktion av tiden (horisontell led). Signalen, den längre av de två starka, utgörs av ett SMS-meddelande några sekunder långt. Den föregås av en infångningssignal som används för att väcka systemet och kommer att utgöra en bekväm startpunkt för signalbehandlingen. Resten, som ligger kvar synbart under c:a 10 sek utgörs av efterklang. I den syns tydligt en tämligen stark upprepning av signalen, vilket troligen är en reflex mot Fårö. Till vänster i bilden ser vi spektrum taget under signalen (i rött) och under reflexen (blått).

Under försöken både 2005 och 2006 skedde sändningen kontinuerligt under gång i 3,5 - 4 knops fart, samt stillastående vid vissa punkter. Mätavstånden varierade mellan 20 – 80 km. Området visas i fig. 10. En mängd olika signaler sändes ut under dagarna och vi har mycket material att bearbeta framöver. Vi vill här framhålla de mycket tillmötesgående och skickliga besättningarna på HMS Fårösund (2005) och på HMS Furusund (2006) vars hjälp visade sig helt avgörande för de goda resultaten från mätveckorna. Dessa försök blir en viktig grund inför nästa års vidareutveckling av metoderna och modemspekifikation.



Figur 10: Platsen för fältförsöket NV Fårö under vecka 35, 2005 och vecka 37, 2006. Mottagningsstationen förlades till en strand på västra delen av Fårö. Löporna gick för det mesta utmed den heldragna linjen. Det största sändavståndet var 80 km 2005 och 60 km 2006.

De tydliga reflexerna i efterklangen (fig.9) kan förklaras av reflexer mot Fårö. I fig. 11 ser vi ett exempel på den mycket branta uppgrundningen nära land. I stort sett är det en vägg 20 – 30 m hög som ljudet kan reflekteras mot. Det märkliga är, trots likheter beträffande ljudhastighetsprofiler, mätbanor och mottagarens plats, att impulssvaren och efterklangen blev så mycket längre 2006 jämfört med 2005. Förhoppningsvis kan vi få en ökad förståelse för detta genom att modellera vågutbredningen på platsen.

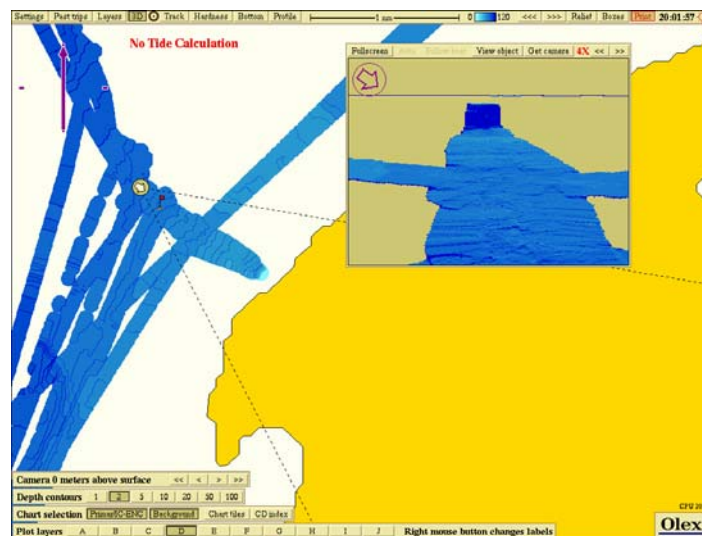


Fig. 11. Resultat från ekolodning. Den insprängda bilden visar ”utsikten” från mottagaren in mot land. Nära stranden reser sig en vägg som skulle kunna ge starka reflexer.

6 AKUSTISK SMYGGKommunikation med ”RAKE-MOTTAGARE”.

För att åstadkomma svårupptäckt kommunikation skall mottagaren kunna avkoda meddelandet vid minsta möjliga signal/brusförhållande, SNR, dvs. så svag signal som möjligt. Detta kräver att vi har en effektiv felrättande kod som klarar lågt SNR eftersom bitfelen i allmänhet ökar ju lägre SNR man har. Därtill måste meddelandets energi tunnast ut genom att sprida det över en större bandbredd och på så sätt få meddelandet att gömmas i bruset. Vi har tidigare utvecklat och testat en metod som tillgodoser båda kraven. Den bygger på att vi utnyttjar s.k. Turbo-kodning (se avsnitt 2.1.2) av meddelandet samt använder spektrum-spridning med hjälp av en spridande slumpsekvens som multipliceras med meddelandet, s.k. DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum). Sammantaget visar sig detta mycket effektivt för att sänka nödvändigt SNR vid felfri avkodning.

Signalen kommer in till mottagaren längs många olika vägar och med olika tidsfördröjning. För att ta vara på all infallande energi måste de olika ankomsterna justeras i tid och fas. Detta görs av en sk. Rake-mottagare. Man kommer då att kunna kommunicera vid lägst möjliga sändareffekt och därigenom få en signal som inte hörs vida omkring. Arbetet med en Rake-mottagare har påbörjats. Rake-mottagaren är till sin funktion mycket lik en adaptiv utjämnare och arbetet kan därför dra nytta av vårt tidigare arbete med adaptiv utjämning. Den felkorrigering koden i den utsända signalen utnyttjas för kanalskattningen. Vår implementering av Rake-mottagare arbetar med rekursiv avkodning och får därmed mycket goda prestanda. Filter- och kanalskattningdelen i mottagaren har implementerats och testats i Matlab kod men det återstår att infoga den i befintlig turbokodningsmiljö.

Denna del av projektet utgjorde stöd till UCAC, se avsnitt 1.1.

7 NÅGRA RESULTAT

I följande tabell sammanfattas tidigare resultat och jämförs med några resultat vi har analyserat fram under 2006 (försedda med asterisk i tabellen), baserat på en analys av 2005 års fältförsöksdata. Man skall då även notera att de tidigare resultaten åstadkoms för mycket enklare utbredningskanal än vad vår nya iterativa metod klarade. I själva verket lyckas vi inte, trots omfattande försök, att avkoda meddelandena med DFE-metoden utan stora bitfel på större avstånd än 20 km. Fältförsöken från 2006 kommer att visa på ännu större skillnader till vår nya metods fördel, med tanke på de mycket långa impulssvaren från detta år.

Tabell över försök med uv-komm.

Resultaten med asterisk erhöles under analys år 2006.

Metod	Bitar per sekund	Avstånd (km)	Antal hydrofoner.	Plats
DFE-QPSK	8000*	20	1	NV Fårö 2005*
DFE-QPSK	4000	38	2	O Gotland 2002
OFDM-8PSK	4413	1	1	Skärgård 2003
DSSS (-6 dB)	8 och 66	4	1	Skärgård 2003
Turbo-utjämnning QPSK	8000* (kodade bitar)	60	1	NV Fårö 2005*

Man bör således observera att vår nya iterativa utjämnare klarade 60 km, vilket inte DFE:n gjorde. Förutom dessa exempel, kan nämnas att text, tal och bild kunnat överföras felfritt på avstånd mellan 3 och 30 km under demodagen 2006. Den använda talkodaren datareducerade talet tillräckligt, utan någon större kvalitetsförsämring, för att det skulle kunna sändas i realtid i vattnet. Vi använde härvid 2600 bps. Som jämförelse kan nämnas att mobiltelefonisystemet GSM använder 13000 bps.

Inför demonstrationsdagen utvidgades utrustningen och metoderna till att omfatta ett gränssnitt mellan användaren och sändaren som medgav en automatisk omvandling av inläst tal från mikrofon, text eller bild från PC till kodade, digitala kommunikationssignaler. Den vågform som sedan sändes ut i vattnet innehöll dessutom ett filhuvud med information för mottagaren som tillät oss att avkoda ett på förhand okänt meddelande. Detta innebar en teknisk anpassning av vad som snarast var ett forskningsverktyg till något mer användarvänligt. En viktig läxa vi lärde vid demonstrationen var att filhuvudet måste skyddas extra noga av en felrättande kod, snarast bättre än felrättningen för själva meddelandet. Det minsta bitfel i filhuvudet omöjliggör nämligen avkodning av det efterföljande meddelandet (som kan tåla ett eller några bitfel utan att informationen blir meningslös).

Hittills har vi inte använt någon direktivitetsvinst, varken i sändare eller i mottagare. Inte heller har vi utnyttjat den diversitetsvinst som finns att hämta om fler än en hydrofon används i mottagaren. Således finns en stor utvecklingspotential för metoderna, som redan visat sig vara i paritet med eller bättre än andra som rapporterats i öppen litteratur. Denna potential skulle kunna realiseras i vissa av de befintliga uv-systemen, t.ex. ubåt, där sonarer med direktivitet finns att tillgå.

Följande fyra rapporter, förutom denna, skrevs under året om akustisk kommunikation:

1. E. Sangfelt, "Underwater networks for Naval Warfare", Paper in Proc. SSC'06 – the Fourth International Workshop on Scientific use of Submarine Cables and Related Technologies, Dublin, Ireland, February 8 – 10, 2006.
2. T. Öberg, M. Lundberg, B. Nilsson, N. Olofsson, and E. Sangfelt, "Iterative equalisation methods for underwater communication", paper in Proceedings in MTS IEEE 2006 Oceans, Boston, September 18-21, 2006.
3. M. Lundberg and T. Öberg, "Iterative reception for Acoustic Underwater MIMO Communications", paper in Proceedings in MTS IEEE 2006 Oceans, Boston, September 18-21, 2006.
4. E. Sangfelt, "Akustisk kommunikation till Antitorpedtorped", FOI-RH—05573—SE, September 2006. Underlagsrapport

I slutet av September genomfördes en kunddag där vi berättade om de viktigaste forskningsinsatserna och resultaten under projektets hela period 2000 – 2006. Vi redovisade även demonstrationsdagen på Fårö med hjälp av ljud och bild. Vi gav även ut en CD med en stor del av projektets rapporter och publikationer under 2000-2006. Här nedan är en fullständig sammanställning:

7.1 Rapportsammanställning 2000 – 2006.

Akustisk undervattenskommunikation

- Sangfelt, B.Nilsson, T.Öberg, "Impulse response measurements for long range underwater acoustic communication channels", November 2000, FOA-RH—00-00558-409. User Report.
- Signal processing for acoustic communications in underwater channels using quadrature amplitude modulation, B.Nilsson, N.Olofsson, E. Sangfelt, T.Öberg, November 2002, FOI-R—0736—SE. Teknisk Rapport.
- B.Nilsson, T. Öberg, N. Olofsson, E. Sangfelt, "Signal processing for acoustic communications in underwater channels using quadrature amplitude modulation", Paper in Proceedings of Underwater Defence Technology in Europe, June 2003, Malmö.
- B. Nilsson, N. Olofsson, E. Sangfelt, T. Öberg, "Acoustic underwater communication methods for high data rate and for low SNR", FOI-R—1070-SE, Nov 2003. Technical report.
- Utvärdering av OFDM för hydroakustisk kommunikation, examensarbete Lars Jansson, FOI/KTH 2003.
- E. Sangfelt, "Acoustic underwater digital communication". E. Sangfelt, Militärteknisk tidskrift, The Swedish Journal of Defence, nr 2, 2004, pp 6 – 11, Artikel.
- E. Sangfelt, N. Olofsson, B. Nilsson, T. Öberg, "Acoustic Communications in Shallow Water", Paper in Proc. UDT Europe 2004, Nice, France, June 2004. Även som rapport FOI-S—1551—SE Konferens.

- T. Öberg, "MIMO-system i akustisk undervattenskommunikation", FOI-R—1388—SE, December 2004. Vetenskaplig rapport.
- T. Öberg, N.Olofsson, B. Nilsson, E.Sangfelt, "Work in progress – underwater acoustic communication", December 2004, FOI-R—1455—SE. Technical report.
- R. Lennartsson, M. Lundberg, B. Nilsson, N. Olofsson, E. Sangfelt, T. Öberg, "Progress report on iterative equalization methods for underwater communication", FOI MEMO-1391. June 2005.
- P. Söderberg m.fl., "Genomfört fältförsök inom project Kommunikaitonslänk under vatten", FOI MEMO – 1468, Oktober 2005.
- M. Lundberg, B. Nilsson, N. Olofsson, E. Sangfelt, T. Öberg, "Iterative Equalization and Soft Iterative Channel Estimation for Underwater Communications", November 2005, FOI-R—1783—SE. Scientific report.
- E. Sangfelt m.fl. "Kommunikationslänk under vatten. Forskning och verksamhet under 2005", FOI MEMO 05-1541, December 2005.
- E. Sangfelt, "Underwater networks for Naval Warfare", Paper in Proc. SSC'06 – the Fourth International Workshop on Scientific use of Submarine Cables and Related Technologies, Dublin, Ireland, February 8 – 10, 2006.
- M. Lundberg, T. Öberg, "Iterative Reception for Acoustic Underwater MIMO Communications", paper in Proceedings in MTS IEEE 2006 Oceans, Boston, September 18-21, 2006.
- T. Öberg, B. Nilsson, N. Olofsson, M. Lundberg, E. Sangfelt, "Underwater communication link with iterative equalization", paper in Proceedings in MTS IEEE 2006 Oceans, Boston, September 18-21, 2006.
- Erland Sangfelt, "Akustisk kommunikation till Antitorpedtorped", September 2006, FOI-RH--0573—SE. Underlagsrapport.

Elektromagnetisk undervattenskommunikation

- E.Sangfelt, B.Nilsson, T.Öberg, "Measurements of electromagnetic underwater channel properties", December 2000. FOA-RH—00-00570-409. User report.
- Coding and signal processing of an underwater electromagnetic communication system, P. Karlsson, M.Petren. September 2001. FOI-R—0197—SE. Teknisk rapport.
- Coding and signal processing of an underwater acoustic communication system, P.Karlsson, M.Petren. October 2001, FOI-R—0234—SE. Teknisk rapport.
- B. Nilsson, T.Öberg, L.Crona, N.Olofsson, E.Sangfelt, "Utvärdering av ett system för elektromagnetisk undervattenskommunikation", Juni 2003. FOI-RH—0211—SE. Användarrapport.

Retro-kommunikation med laser

- L.Sjöqvist, F.Kullander, M.Lindgren, O.Steinvall, ”Optisk kommunikation i undervattenstillämpningar”, Mars 2001, FOI-R--0111—SE. User Report.
- J. Ögren, F. Kullander, L. Sjöqvist, ”Retrocommunication with Ferroelectric Crystal Modulators – Preliminary Results”, FOI-R—0325—SE. Technical report, December 2001.
- J.Ögren, A.Olsson, S.Zyra, ”Utvärdering av vätskekristallmodulatorer och retroreflektorer för laserkommunikation”, Januari 2003. FOI-R—0794—SE. Underlagsrapport.
- F. Kullander et al.,”Laser communication with underwater systems using modulated retro-reflectors”, In: Proceedings of Underwater Defence Technology in Europe, June 2003, Malmö, paper 113.
- F. Kullander, A. Olsson, E. Sangfelt, L. Sjöqvist, S. Zyra, J. Ögren, “Free space optical communication with UW systems using modulated retro-reflectors”, FOI-R—0951-SE, Sept 2003. User report.
- J. Ögren, C. Vahlberg, “Utveckling av nya vätskekristallmodulatorer – bestämning av optiska och elektriska egenskaper”, FOI-R—1486—SE, December 2004. Teknisk rapport.
- System trials with modulated retro-reflective optical communication links, Kullander F., Sakari P., Sjöqvist L., Öhgren J. (2005). In: Proceedings of Unmanned/Unattended Sensors and Sensor Networks II, Bruges, Sept 2005. SPIE vol 5986, pp 12/1-12

8 ANPASSNING TEKNISKT OCH OPERATIVT

Det är vår avsikt att under de närmaste åren framöver bygga några modem för uv-komm där de nya metoderna ingår, ev. i samarbete med industri. De kommer att utgöra en experimentell resurs för att bidra till utvecklingen av ett nätverksbaserat undervattenssystem. De blir nödvändiga för att effektivt kunna pröva och utvärdera nätverksprotokoll för undervattenstillämpningen, dessa finns inte idag även om speciellt USA för närvarande bedriver forskning kring undervattensnätverk⁹.

Utformningen av modemerna beträffande frekvensområde, uteffekt, direktivitet m.m., kommer delvis att styras av budget och delvis av tillämpningarna. Dessa kommer i sin tur att styras av de uppgifter och scenarier som styr marina förband i framtiden och där vi ser behov av uv-komm.

I fortsättningen beskrivs några uppgifter och verksamheter inom förbanden där uv-komm behövs eller bedöms ge mervärde.

8.1 Förkortningar

SIMO – Single Input Multiple Output, d.v.s en sändare/ flera mottagare.

SISO – Single Input Single Output, d.v.s en sändare/ en mottagare

UCOMS – Prototyp av digitalt modem för undervattenskommunikation.

NBF – NätverksBaserat Försvar

UUV – Unmanned Underwater Vehicle

USV – Unmanned Surface Vehicle
TTS – Taktisk typsituation
IRS – Intelligence, Reconnaissance, Surveillance d.v.s. Underrättelser, Spaning och Övervakning
LPI – Low Probability of Intercept, d.v.s. smygsamband
QPSK – modulationsformat med 2 bitar per symbol
8PSK – modulationsformat med 3 bitar per symbol
16QAM – modulationsformat med 4 bitar per symbol
FSK – Frekvenshoppande signal av robust art vid låg dataakt
CAS – Cylindrical Array System, cirkelarray av hydrofoner föröver på ubåten
FAS – Flank Array System, linjearray av hydrofoner på ubåtens sida.

8.2 Ubåts-, ytstrids- och minkrigsföretag

Uppgifterna för våra ubåtar kommer att gälla, och gäller redan nu, för både nationella och internationella operationer. De s.k. företagstyper som är aktuella är ²

- Underrättelser (Intelligence) I
- Spaning (Reconnaissance) R
- Övervakning (Surveillance) S
- Special (Special force) SF
- Ubåtsjakt (Anti Submarine Warfare) ASW
- Anfall eller ytattack (Anti Surface Warfare) ASuW
- Minering (Mine Warfare) M

De två sista, ASuW och M, är sprungna ur det numera nedprioriterade invasionsförsvaret. Fokus idag ligger snarast på de andra uppgifterna.

För ytstridsförbanden gäller liknande uppgifter, men ibland med delvis olika innebörd. Till de uppgifter som är listade ovan kommer Eskort (E) och luftförsvaret AAW (Anti Air Warfare).

Även minkrigsförbanden kommer att verka både nationellt och i internationella operationer. Bland uppgifterna märks ¹⁰:

- I ett tidigt skede och framskjutet bidra till att etablera och utöva kontroll i ett område.
- Bidra till upprättande av restriktionsområden för att hindra olika parter från att genomföra viss verksamhet, t.ex. smuggling.
- Bidra till upprättande av buffertzoner i ett havsområde
- Bidra till egen operativ rörelsefrihet samt kunna hantera undervattensshot
- Medverka i skyddet av sjötransporter genom att hantera undervattensshot

Exempelvis innebär den näst sista punkten att en minröjningsfunktion används, medan den andra punkten i listan kan innebära att ett område mineras. Visionen för framtidens ¹⁰ mineringsfunktion innebär att gränserna mellan konventionella minor och torpeder suddas ut, ett vapen kan mycket väl bäras av en autonom undervattensfarkost med avsevärd egen spaningskapacitet. En torped kan avfyra från ett bottenhabitat och väckningen/invisningen kan ske från utlagda sensorsystem långt bort. De framtida koncepten för minkrigsfunktionen bygger på både UUV, ”Unmanned Underwater Vehicles”, med spanings- och kommunikationsförmåga och nätverk av kommunicerande sensor-system. Detta ligger i linje med USA visioner ^{9,11} om framtida uv-vapen och ASW i besvärliga områden som ”littorals” eller ”extreme littorals”, d.v.s. kustnära och grunda vatten.

Den beskrivna utvecklingen ligger även i linje med visionerna för TMS-projektet i Sverige och Finland.

Gemensamt för de marina förbanden är att de skall kunna samverka med varandra, s.k. ”joint operations”, och dessutom i de flesta av de ovan nämnda företagen eller uppgifterna. Detta innebär att de skall kunna verka i ett nätverksbaserat försvar, vilket också tydligt markeras i underliggande studier. De skall dessutom kunna operera tillsammans med andra länders styrkor, s.k. ”combined operations”. Sammantaget ställer detta stora krav på sambanden. Helt klart behövs nya typer av kommunikationslänkar eller uppgraderingar av äldre utrustning, vilket bl.a. framkommer i t.ex. studierna ^{1,2,10}. Tydligt är också behovet av att kunna anskaffa standardlänkar av NATO-typ för att fullt ut kunna verka ”combined”.

De marina förmågorna styrs av kravet på att ha en utvecklad insatsförmåga i den littorala zonen, d.v.s. kustnära och grunda vatten, såväl nationellt som internationellt. En målsättning är att fullt ut kunna integrera sjö- och amfibiestridskrafter med mark- och flygstridskrafter i internationella insatser. Som ett stöd för utvecklingen används de taktiska typsituationerna (TTS 1-5) ¹². De flesta av dem leder till krav på förbättrade kommunikationssystem. En ökad förmåga till informationsöverföring är därför en prioriterad utvecklingsåtgärd för våra marina insatsstyrkor ¹³.

Vi ger några exempel på situationer eller mikrosценарier, som skulle kunna passa in i någon av TTS1-5, utom TTS4 som rör Afrikas inland, där undervattenskommunikation behövs eller ger mervärde

8.2.1 Uv-komm från moderplattform till UUV.

Det generiska exemplet är här att man vill befinna sig ”stand-off”, d.v.s. långt från riskområdet, med en moderplattform och låta en obemannad undervattensfarkost ombesörja t.ex. kartering, miljödatainhämtning och minspaning. Moderplattformen kan vara positionerad utanför territorialgränsen till landet man opererar mot. Detta scenario är en av drivkrafterna bakom projektet UCAC, där smygkommunikation till UUV över stora avstånd skall demonstreras år 2008. Behovet av att kunna sända order till UUV eller erhålla statusbesked från UUV finns alltid som ett minimikrav, och ett trådlöst akustiskt samband är mycket praktiskt. I detta fall krävs tämligen lågfrekvent sändning för att ljudet inte skall dämpas för mycket av den frekvensberoende absorptionen. För att kunna kommunicera med låg risk behövs en hygglig bandbredd, så att signalenergin kan tunnans ut över bandbredden och därmed bli svårupptäckt. En dylik operation kommer troligen att ske inom ramen för en internationell insats långt hemifrån.

8.2.2 Uv-komm från ledningsplattform till ubåt vid IRS

Ett annat exempel skulle kunna vara att ett land (land A) bedriver underrättelseverksamhet eller annan verksamhet med ubåt på ett annat lands (land B) territorialvatten. Vi har själva varit utsatta för detta. Exempel från senare tid är Nord- och Sydkorea. Istället för land A är det idag snarast troligare att en internationell insatsstyrka, med ledningscentral (”task force command”) ombord på något fartyg, bedriver ett IRS-företag mot något annat land. Från ytfartyg på internationellt vatten sänder ledningscentralen information, tex sjölägesbilden, till ubåten för att ge den bättre underlag för sitt agerande. Denna omnisändning till ubåten röjer inte dess läge. Kommunikationen, som i fallet med UUV, måste vara akustisk för att kunna nå ubåten på dess spaningsdjup. Man bör observera att detta scenario kräver uv-komm över stora avstånd. Det bör även observeras att sändningen kan väcka misstanke om att ubåt finns i området, varför det normala kravet om att uppträda strategiskt dolt ² under t.ex. en I-operation övergår till ett krav på att vara taktiskt dolt ². Sändningen kan vara av karaktären smyg eller inte. Om vi antar att land B

misstänker främmande undervattensverksamhet och påbörjar ubåtsjakt kan det vara än mer angeläget för ledningscentralen att bistå sin ubåt med information.

8.2.3 Uv-komm till ubåt eller UUV vid skydd

Ett tredje exempel är UUV som här fungerar som förlängd spaningsarm till ytfartyg, som närmar sig fientligt eller riskfyllt område. UUV kan operera framskjutet på avsevärt avstånd från fartyget och behöver kunna sända information till eller ta emot styrkommandon från moderfartyget.

Det är även tänkbart att egen ubåt bidrar till ett ”yttre försvar” eller framskjutet skydd i samband med att fartyg eskorterar en konvoj. Kommandocentralen kan finnas ombord på något av fartygen och behov av kontakt med ubåten kan bli aktuell, eventuellt för att ge order till ubåten. Order kan ges via ett system för uv-komm som liknar det befintliga Deep Sirén från Skottland¹⁴. Detta signalerar enkla meddelanden/ordergivning om 1 – 2 bps från en släpfisk på optimalt djup och kan nå en ubåt på upp till 200 km avstånd ute på havet. Systemet bygger på robust FSK kring 1 kHz bärvåg och är enkelriktat till ubåt.

8.2.4 Uv-komm mellan ubåt och ytfartyg under ubåtsjakt

Vår egen ubåt är på spaningsdjup och får passiv sonarkontakt med främmande ubåt. Denna kan utgöra en risk för vår insatsstyrka och vår ytenhet skall visas in av ubåten och sedan företa åtgärder mot den främmande ubåten.

Ubåten meddelar sig till ytenheten via akustisk smyggkommunikation. Detta medger att ubåten kan upprätthålla en obruten spaning/sonarkontakt och samtidig trådlös samverkan med ytenheten. Det troliga är att akustisk smyggkommunikation används för att inte alarmera den främmande ubåten. Utan denna direktlänk till ytan måste vår egen ubåt släppa målkontakten och gå upp till ytan för att visa in, varvid målet troligen tappas. Efter invisning via den akustiska länken kan vår ubåt avlägsna sig och följa händelseförloppet från säker plats.

För övningsändamål vore ett akustiskt samband värdefullt att ha, ubåten behöver inte avbryta manövrar eller spaning, utvärdering och omändring kan ske ”on-the-fly”. Ny taktik där samverkan mellan ubåt och andra enheter/sensorsystem sker skulle dessutom kunna prövas och utvecklas.

Fördelen med ett akustiskt samband är att ubåten kan nås på operativt djup utan risk för att den röjer sig. Ubåten kan således ”ringas upp” när behov uppstår, vilket kan utgöra en viktig förmåga i NBF.

8.2.5 Uv-komm mellan uv-system och ytboj

Det är troligt att vi kommer att ha någon typ av boj eller USV med akustisk samband i vattnet och RF/SAT i luft i framtiden. Sådana bojar existerar redan och används t.ex. för oceanografiska observationer¹⁶ långt ute till havs dit kabeldragning är alltför dyrt. En sådan boj eller USV skulle kunna fungera som relä för kommunikation mellan ubåt och andra enheter i ett operationsområde och på så sätt förenkla användning av akustisk uv-komm, d.v.s. alla enheter behöver inte akustiska modem. Ett fartyg kan t.ex. kommunicera i luft till bojen som sedan reläer meddelandet vidare. Ett exempel på USV kunde vara att förse vårt befintliga system SAM (trådlöst styrt minsvep) med ett akustiskt modem. En boj eller USV av detta slag kommer att kunna utgöra en s.k. gateway mellan t.ex. stomnätet i NBF och ett uv-system.

8.2.6 Uv-komm till och mellan samverkande UUV

Minjakt och hamnförsvar med UUV har studerats en tid inom NATO. Man har konstaterat att en autonom UUV ger mervärde i dessa uppgifter¹⁵. Man konstaterar också att det behövs en uv-kommlänk till UUV för att man skall kunna växelverka med den under uppdraget. Man vill även få fler autonoma UUV att samverka för att få bättre yttäckning, vilket kräver ett akustiskt samband mellan UUV:erna. NATO avser dessutom pröva UUV i rollen ASW och som spaningsplattform med passiva sensorer ombord, exempelvis en mindre TAS. En del av forskningen kommer att bedrivas vid NURC i Italien. Denna utveckling kommer också att kräva akustiska samband som medger att en målkontakt kan meddelas till moderplattform eller insatsstyrkan överlag. Denna forskning är tämligen visionär och de taktiska/operativa vinster som kan åstadkommas behöver belysas mer.

8.2.7 Uv-komm till och inom sensornätverk

Det finns redan idag utlagda sensornätverk med kommunicerande noder under vattnet^{9,16,17,18} varav ”Sea Web”¹⁸ utanför Rhode Island i USA är ett exempel. Det används bl.a. för insamling av oceanografiska parametrar och överför dessa via ytboj till laboratorier som efterfrågar data. Denna typ av nätverk torde kunna användas för spaning och kanske även för vapeninsats i framtiden. Dessa nätverk blir snabbt utläggbara och självupprättande. Den senaste satsningen som tydligt inriktas mot ASW och framtida uv-vapen¹¹ i ”The littorals” kallas PLUSnet⁹.

I vårt fall tänker vi oss att nätverken kan bidra till skydd av eget basområde eller skyddsområde, framskjuten spaning/övervakning och ett anfallsföretag både på och under ytan. Nätverken skulle kunna upptäcka och följa motståndarens enheter, exempelvis ubåtar. Även andra undervattensshot skulle kunna upptäckas. Nätverket skulle kunna utnyttjas för invisning och insats med precisionsvapen mot hotet – vapenbärande undervattensfarkoster eller avancerade torpeder kan styras in mot ubåtarna under samverkan med nätverken.

Ett sensornätverk kan mycket väl bestå av såväl utlagda sensorer som av rörliga farkoster, UUV eller t.o.m. ubåt.

Både ubåt och fartyg skall kunna kommunicera med nätverket. Ett specialfall av detta är akustisk kommunikation mellan ubåt och utlagd RDS (Rapidly Deployable System) som kan vara en avancerad hydrofonarray. USA, Canada och England har redan RDS med akustiska modem för kommunikation med ubåt och fartyg.

8.2.8 Uv-komm till minor

För att skydda ett område eller för att förhindra eller försvåra motståndarens rörelser kan mineringar bli aktuella. Vi har intresse av att kunna kontrollera minorerna genom att stänga av eller slå på minutlösningen. Detta kan vara speciellt viktigt vid en internationell insats där kraven på precision är större än under invasionsförsvarets tid. Då kunde man utgå från att allt okänt tonnage som kom mot Sverige var fientligt och skulle bekämpas. Nu måste vi ha säkrat identiteten hos det fartyg som skall stoppas. Eventuellt skall graderad verkan användas vilket ökar kravet på precisionen i bekämpningen. Om vi trådlöst och på avstånd kan aktivera/deaktivera eller utlösa minor, det kan också vara en torpedmina i bottenhabitat, ökar vår möjlighet till precision och

graderad verkan. Utan svarsmodem i minorna får vi inget kvitto, men det torde gå att uppnå hög säkerhet med akustisk kommunikation – åtminstone till förankrade minor. Om vi, t.ex. för att undvika röjning av våra minor, inte lyckas deaktivera precis alla minor i fältet kanske detta inte har någon stor betydelse. Huvudsaken är att kommunikationen har låg felsannolikhet och stor robusthet. Kommunikationsavståndet skulle kunna vara tämligen stort, upp mot 50 km är tänkbart.

Skall man vara helt säker på minans status behövs kvittering. En möjlighet är att installera ett mycket enkelt modem i våra nyare minor där multisensorer med bl.a. hydrofon redan finns. Modemet skall kunna svara på ett akustiskt tillrop från ett fartyg eller ubåt i närheten, d.v.s. kvittera att den aktiverats eller deaktiverats. På så sätt skulle vi ha full kontroll över minorna och kunna passera själva utan risk. Detta skulle kunna få stort värde i områdesbevakning som t.ex. utanför inloppet till en hamn där vi själva vill kunna passera men inte släppa in någon annan.

8.2.9 Uv-komm i Specialföretag

För att utveckla förmågan inom ett SF-företag bedöms akustisk kommunikation mellan ubåt och dykare behövas. Denna sambandslänk måste medge dold sändning. Kravet finns dokumenterat i en sambandsstudie² men behöver studeras och utvecklas ytterligare.

8.3 Tekniska/taktiska aspekter på uv-komm

Vi beskriver kort trenderna av idag och ger exempel på modemutformning och möjliga prestanda.

8.3.1 Utveckling och forskning

Akustisk undervattenskommunikation är under utveckling både civilt och militärt i ett flertal länder. Forskningen under 90-talet har medgett ett språng i utvecklingen mot högre datatakt och större säkerhet i överföringen. Detta har sporrat utvecklingen ytterligare och idag ser vi en intensiv verksamhet på forskningssidan. Nya s.k. Turbo- och SIMO/ MIMO-metoder utforskas och kommer att utvärderas de närmaste åren, bl.a. av oss och forskningsgrupper i USA. Vi bedömer att de kommer att öka robustheten och tillgängligheten hos länken betydligt. I framförallt USA bedrivs f.n. intensiv forskning kring nätverkskommunikation under vattnet, moderna utgörs typiskt av UUV:er, bojar och sensorsystem på botten. Huvudproblemet är att få fram effektiva nätverksprotokoll för mobila nätverk under vattnet. Protokollen styr bl.a. hur datatrafiken dirigeras på ett energisparande sätt och ombesörjer att nätverket fungerar vid bortfall av någon nod. Mycket av drivkrafterna bakom forskningen kring undervattenskommunikation i nätverk är civila, nya stora projekt med observatorier på havsbottnarna kräver trådlös undervattenskommunikation mellan både fasta och rörliga sensorsystem¹⁹.

Ytterst få digitala och moderna modem för militär undervattenskommunikation finns dock i bruk idag. Sverige har installerat ett prototypsystem, kallat UCOMS, på en ubåt och ett ytfartyg för prov och utvärdering i samarbete med L3/ELAC i Tyskland, och QinetiQ i England. Australien utvärderar i sjöförsök NBF-problematik med ett LPI-system NAS-HAIL²⁰ för kommunikation mellan ubåt, fartyg och undervattenssensorer. Systemet provas f.n. i USA tillsammans med ett amerikanskt akustiskt modem kallat Digital ACOMMS²⁰. England har utvecklat digitala modem för kommunikation mellan utlagda sensorarrayer, ubåt och UUV, kallat Proteus²⁰. Man testar även i England de nämnda systemen. Även Kanada provar akustiska modem för uv-komm med RDS, detta görs i samarbete med USA. Alla dessa modem har vissa begränsningar emedan de bygger på forskning initierad tio år tillbaka. Idag ser vi möjlighet till förbättringar av tekniken, t.ex. med våra metoder som beskrevs i kap.2.

8.3.2 Undervattenskanalen

Den akustiska kommunikationskanalen under vattnet är frekvensbegränsad till några kHz på stora avstånd (100 km i Östersjön), men en bandbredd på några 10-tal kHz kan användas på nära håll. Detta beror på den salthaltsberoende frekvensabsorptionen som ökar med ökad frekvens och avstånd. Vi kan grovt räkna med att Östersjön medger den dubbla bandbredden och därmed dubbla datatakten jämfört med saltare hav som Atlanten, givet samma avstånd.

Den akustiska undervattenskanalen erbjuder liknande problem som de HF-radiokommunikationer, d.v.s. en tidsvariabel flervägsutbredning och avsevärd Dopplerspridning. Ofta är dock undervattenskanalen mycket svårare, speciellt blir tidsspridningen från flervägsutbredningen jämförelsevis mycket större. Med avancerad kodning och signalbehandling kan dock dessa svårigheter bemästras i båda fallen. Datatakterna som kan åstadkommas med akustik och dagens HF-samband är jämförbara. Möjliga avstånd med akustisk kommunikation i Östersjön är jämförbara med de som gäller för HF (kortvågsradio) ytvåg. Under gynnsamma förhållanden bör upp mot 10 kbit/sek i Östersjön kunna nås på 80 – 100 km avstånd med akustisk länk, Närmare angivelser av system och prestanda anges nedan.

8.3.3 Systemförslag och prestanda

Nedan presenteras några förslag på tekniska lösningar som anpassats till olika tillämpningar. Angivna prestanda gäller för sändare och mottagare på samma djup i Östersjön, i ljudkanal. Dessa förhållanden gäller i stort sett från maj – okt/nov. Ljudkanalen finns i regel i områden med över 45 m djup, d.v.s. en stor del av Östersjön. Under övriga delen av året gäller snarast isoveli och kommunikationsavstånden förkortas något. Vid kommunikation i Atlanten, eller andra salta hav, halveras datatakten grov sett, men avstånden bibehålls om ljudkanal kan utnyttjas. På grundare vatten med nedåtböjande ljudhastighetsprofil avgör snarast botten beskaffenhet vilka avstånd som är möjliga, en fast botten som reflekterar ljud är gynnsam, medan dy eller lös lera kan förkorta avstånden betydligt. I grunda vatten kommer även sjöstillståndet att påverka signalen på ett signifikant sätt.

Vi anger fyra nivåer, i ordning efter minskad komplexitet och kostnad för att realisera och integrera systemen ombord.

1) Modem - framtid

Med ett mycket avancerat kommunikationssystem som bygger på SIMO med en kraftfull sändare och flera mottagarhydrofoner i varje modem bör följande kunna klaras av:

- a) Under gynnsamma förhållanden (ljudkanal) bör upp mot 9 kbit/sek (infobitar) i Östersjön kunna nås på 80 – 100 km avstånd. Denna långhållsvariant sänder i bandet 1-7 kHz i Östersjön. Sändarens källstyrka bör ligga kring 195 dB rel $1\mu Pa$, med en jämn spektrumnivå över större delen av frekvensbandet. Mottagaren utgörs av en hydrofonarray som kan vara tämligen enkel, fyra hydrofoner i vertikal led är utgångspunkten. Hydrofonavståndet behöver utredas, preliminära erfarenheter antyder dock att det inte är så känsligt, utan kan anpassas till dimensionerna givet av plattformen. Datatakten 9 kbit/sek erhålls med modulationsformatet 8PSK, eventuellt skulle 16QAM kunna användas och då erhålls 12 kbit/sek. QPSK ingår för svårare förhållanden och skulle ändå ge 6 kbit/sek. Turbokodning (där varannan bit antagits vara felrättande och inte informationsbärande) och Turboutjämning ingår för robust funktion. Modemet skulle

- även kunna förses med en smygmod för LPI-kommunikation. Efter projektet UCAC :s genomförande och slutdemonstration kommer metoder och algoritmer för en smygmod att finnas tillgängliga. Preliminärt bedöms denna mod vara effektiv upp till 100 - 200 bit/sek. Ett exempel på sändaren i detta modem är den som används i projektet UCAC.
- b) På kortare avstånd, upp mot 10 km, bör 40 kbit/sek (infobitar) kunna nås under gynnsamma förhållanden i Östersjön. Denna variant av SIMO-systemet skulle således kunna användas för en relativt effektiv bildöverföring. I frekvensbandet 20-40 kHz. Mottagaren antas fortfarande bestå av en tämligen enkel vertikal hydrofonarray. Modulationsexempel i detta fall är 16QAM. Även här ingår Turbokodning och Turboutjämning för robust funktion. Smygvarianten bedöms vara effektiv upp till 400 – 800 bit/sek.

Vi bedömer att både modemen a) och b) kan realiseras senast 2010. Hur dessa två systemexempel kan integreras ombord på en ubåt eller ett fartyg har inte utretts i detalj. De får ses som exempel på vad ”state-of-the-art” kan erbjuda år 2010 om placering av sändare och mottagare på plattformen kan lösas.

Modemen skulle även kunna byggas som sammanhållna moduler för användning från drivande eller långsamt gående fartyg, eller som våtdel i ytboj där luftdelen kunde utgöras av en RF/SAT-länk. Modemen skulle även kunna utformas så att integration på en större AUV, t.ex. AUV62F eller norska Hugin, vore möjlig.

Modemen a) och b) bidrar till att lösa sambandsproblemet mellan ubåt i uläge, större UUV, och fartyg, åtminstone korvett, minfartyg och patrullbåt. Vid radiotystnad kan det gå att använda sambandet under vattnet, speciellt smygmoden, för att meddela sig mellan fartygen.

För att etablera och utöva kontroll över ett område kan det vara aktuellt att lägga ut ett antal sensorsystem eller ett nätverk av sensorer, i syfte att övervaka, spana, inhämta underrättelseinformation och ge målinvisning. Vid en internationell insats kommer sensornätverket i regel inte att kunna förses med kabelförbindelser för strömförsörjning eller dataöverföring, detta blir alltför kostsamt, tidsödande och komplicerat. Istället får trådlösa akustiska samband användas, eller någon form av telemetribojar. Det är tänkbart att modemen a) och b) skulle kunna användas här. Det högfrekventa modem b) kan användas inom en lokal grupp av sensorer där kravet på datatakt kan vara stort men inte kommunikationsavstånd. Mellan grupperna som kan befinna sig långt från varandra kan modem a) användas. Speciellt skulle ytfartygen, ubåt och UUV försedda med något av modemen då kunna växelverka med sensornätverket. Modemen måste anpassas till batteridrift.

För att utveckla minkrigsfunktionen eller bevakning av ett begränsat område kan vi tänka oss att införa enklare modem, som i exempel 4) här nedan.

2) SISO – utnyttjande av CAS/TAS – ”Närtid”

Med ett ur integrationssynvinkel något enklare system bestående av en lågfrekvent sändare i frekvensbandet 1-7 kHz och mottagning i CAS eller TAS bör vi kunna åstadkomma:

- a) Under gynnsamma förhållanden (ljudkanal) klaras 3 kbit/sek (infobitar) på 60 - 100 km med modulationsformatet QPSK. Eventuellt skulle 8PSK, kanske även 16QAM, klaras av tack vare direktivitetsvinsten vi får från CAS. Datatakten skulle med 8 PSK bli 4.5 kbit/sek (infobitar). I systemet ingår naturligtvis olika modulationsformat för större flexibilitet i användningen. Turbokodning/utjämning ingår för robust funktion. Skall den angivna bandbredden klaras måste en viss förbättring av dagens lågfrekventa svängare

införas. På avstånd upp mot 10 km bör detta system klara ca 6 kbit/sek (infobitar) med modulationsformatet 16QAM. Om sändaren hade haft större bandbredd kunde avsevärt högre dataakter åstadkommas på korta avstånd. Mottagning på fartyg skulle kunna ske i TAS efter korvett, alternativt någon enklare typ av hydrofonarray applicerad på korvettens VDS. Sändaren skulle kunna hängas ned från fartyg och vara t.ex. av den typ som kommer att användas vid slutdemonstrationen år 2008 i det internationella samarbetsprojektet UCAC. Denna sändare har en användbar bandbredd i frekvensbandet 1,5 – 7 kHz. I smygmod erhålles dataakter i storleksordningen 100 infobit/sek.

Det är fördelaktigt att i vissa lägen bara använda modemmet för mottagning i CAS (eller FAS) vilket erbjuder riskfri mottagning av tämligen höga dataakter på stora avstånd, trots att ubåten befinner sig på spaningsdjup. Detta skulle kunna vara ett alternativ till VLF-antenn som bogseras på visst djup. I ett känsligt läge behöver man kanske inte svara omedelbart. Detta skulle kunna vara ett första utvecklingssteg, att prova mottagning i CAS/FAS från sändning långt bort, innan beslut om dyrbar integration av sändutrustning ombord på ubåten tas.

Eftersom vi endast behöver ta fram och installera en sändare, mottagaren finns ju redan i form av CAS eller TAS, borde detta system bli billigare än Alternativ 1. En nackdel är att användningen inte blir lika generell.

Om vi betraktar marinens befintliga sonarer från hur de skulle kunna användas för att kommunicera under vattnet finner vi följande:

Sonaren på helikopter (sonar 204/214, VDS), sonar ST240 (VDS) på patrullbåt, sonar 184 (VDS) på korvett har alla en sändmod nära 24 kHz. Detta är även en frekvens som är tänkt för spaningssonaren i SUBAC, avsett för ubåt. Med tiden blir några sonarer ovan utfasade. Istället blir korvett Visbys VDS sonar av intresse. Tyvärr tycks denna sonar inte ha frekvenser som stämmer med den nämnda på 24 kHz. Således, från frekvensperspektivet skulle några fartyg (men tyvärr inte Visby), helikopter och ubåt kunna kopplas ihop till ett nätverk för uv-komm. Den höga bärvågsfrekvensen om 24 kHz ger korta räckvidder, speciellt i salta hav. Det är dessutom inte undersökt om sonarerna kan modifieras för kommunikation.

Med tanke på de antydda begränsningarna i befintliga sonarer finns anledning att beakta möjligheterna att välja frekvensområden i framtiden så att de klarar kommunikation sinsemellan och spaning samtidigt.

3) UCOMS – ett modem av idag

UCOMS är ett modernt digitalt modem som installerats som prototyp på en ubåt och ett yfartyg under våren 2006 och utprovats i sjöförsök (med blandade resultat). Önskvärt vore att göra nya försök men detta tycks nu dröja, troligen mer än ett år innan en ubåt finns tillgänglig. Efter de första proverna skulle en utvärderingsfas ha vidtagit under ca 1 år, hur det blir med detta är kanske inte är klart. Erfarenheterna från en längre prov- och utvärderingsfas, samt kunskaperna från FOI forskningsprojekt, skulle kunna ligga till grund för en modifiering/förbättring av mjukvaran och kommunikationsalgoritmerna. Det nya systemet skulle kunna specificeras fr.o.m 2007. Om sedan ett modifierat UCOMS tas fram för installation ombord våra ubåtar och korvetter, borde möjligheten till integration med aktiv spaningssonar ses över, se avsnitt 8.6.

UCOMS höga bärvågsfrekvenser begränsar dock kommunikationsavstånden. Tar ubåten mot sändning från 100 km avstånd kan vi knappast räkna med att sända akustiskt tillbaka via

UCOMS. En grov uppskattning av högsta möjliga kommunikationsavstånd för UCOMS mellan två enheter på samma djup i ljudkanalen i Östersjön är ca 60 – 80 km, medan kommunikation mellan en ubåt belägen under termoklinen och ett ytfartyg troligen är begränsad till 15 km avstånd. I Atlanten minskas avstånden kraftigt vid UCOMS relativt höga bärvågsfrekvens 12 kHz.

4) Enklare modem för utveckling av nätverk

Det finns relativt billiga men effektiva sändare i mellanfrekvensområdet, exempelvis 6 – 15 kHz. Ett modem baserat på en sådan sändare kunde förses med en mottagande enkelhydrofon och skulle kunna bli tämligen effektivt i all sin enkelhet.

8.4 Sammanfattning av möjliga prestanda

De datatakt akustiska höghastighetsmodem erbjuder på sikt klarar tal, data och text som en realtidsström över stora avstånd (80 – 100 km) där dock gångtiden i vattnet innebär en fördröjning på upp mot 1 min. Detta modem förutsätter hög uteffekt om minst 195 dB rel $1\mu Pa$ samt en array i mottagaren. Bilder av enkelt slag kan överföras som en realtidsström på kortare håll upp mot 10 km. Realtidsströmmande video (64 kbit/sek) kommer troligen endast att klaras på korta horisontella avstånd eller vertikalt från botten till yta. Om vi kan acceptera fördröjningar mätt i minuter kan naturligtvis även korta och datakomprimerade videosnuttar överföras akustiskt via buffring och uppspelning off-line.

Akustisk smygkommunikation kräver att meddelandets datatakt reduceras kraftigt, gentemot höghastighetskommunikation. Detta beror på att bandbredden i kanalen är begränsad på stora avstånd och att vi då bara får god signalbehandlingsvinst om ett smalbandigt meddelande sprids över det tillgängliga frekvensbandet. Vi bedömer att några 100 bit/sek kommer att kunna överföras med LPI-egenskap på 80 - 100 km avstånd under goda kanalförhållanden i Östersjön. I Atlanten begränsas antingen avståndet eller datatakten grovt sett med en faktor 2, jämfört med Östersjön. Detta innebär att endast enklare meddelanden som bekräftelser, order, statusmeddelanden eller målfaktorer (tid, position, kurs, fart o.dy.) kan utväxlas i LPI-mod utan någon nämnvärd fördröjning jämfört med gångtiden i vattnet.

De ovan nämnda prestandasiffrorna förutsätter en kraftfull sändare. Om vi sänker kravet på stora avstånd, går det att använda batteridrift. Man kan ändå få modem som överför flera kbps över flera km i ett nätverk.

8.5 Sammanfattning: Några taktiska eller operativa aspekter

Fördelen med ett akustiskt samband är att ubåten kan nås på operativt djup utan risk för att den röjer sig. Ubåten kan således ”ringas upp” när behov uppstår, vilket kan utgöra en viktig förmåga i NBF. Ubåten kan även meddela sig till ytenhet eller andra sensorsystem under ytan via akustisk kommunikation. Sammantaget medger detta möjlighet att upprätthålla en obruten spaning/sonarkontakt och samtidig trådlös samverkan med andra enheter, t.ex. under ett ASW-företag. Det akustiska sambandet medger i LPI-mod att operationen är dold och man undviker behovet att släpa någon form av antenn efter ubåten.

Det är troligt att vi kommer att behöva någon typ av boj eller USV med akustiskt samband i vattnet och RF/SAT i luft i framtiden. En sådan skulle kunna fungera som relä för kommunikation mellan ubåt och andra enheter i ett operationsområde och på så sätt förenkla

användning av akustisk undervattenskommunikation, d.v.s. alla enheter behöver inte akustiska modem.

För övningsändamål vore ett akustiskt samband värdefullt att ha, ubåten behöver inte avbryta manövrar eller spaning, utvärdering och omändring kan ske ”on-the-fly”. Ny taktik där samverkan mellan ubåt och andra enheter/sensorsystem sker skulle dessutom kunna prövas och utvecklas.

Utvecklingen av UUV för operativa uppgifter kommer att kräva akustiska länkar, speciellt om man vill ha samverkande UUV. Framtida uv-vapen som TMS eller intelligenta minor med kommunikationsmöjlighet, kan komma att kräva akustiska kommunikationslänkar vid dold användning. Detta gäller även snabbt utlagda sensornätverk vid t.ex. en internationell insats. Special force operations kommer att gynnas av tillgång till akustiska länkar.

8.6 En rekommendation

Integration av kommunikationssystem och spaningssonarer, både passiva och aktiva, vore viktig att åstadkomma, dels för att spara utrymme, dels för att inte öka signaturen och dels av kostnadsskäl. Det är t.o.m. möjligt att aktiv sonarspaning skulle kunna förbättras om den var implementerad som en sändmod i kommunikationssystemet.

9 REFERENSER

¹ Viking Communication Study Final Report, by FOFT, Danmark, FOI, Sverige och FFI, Norge. DDRE Report no I-11/2003

² Slutrapport studie SJÖ 040441S sambandssystem ubåt, H/S 21 120:30001, 2004.

³ E. Sangfelt, D. Öberg, T. Öberg ”Avsiktlig störning av uv-komm – En förstudie”, Användarrapport FOI – R – 1266 –SE, Juni 2004.

⁴ Project ERG No1, RTP 110.060, UUV Covert Acoustic Communications, 2004.

⁵ B. Nilsson, T. Öberg, L. Crona, E. Sangfelt, “Utvärdering av ett system för elektromagnetisk undervattenskommunikation”, Juni 2003. FOI-RH—211—SE. Användarrapport.

⁶ S. Alamouti, ”A simple transmit diversity technique for wireless communications”, IEEE J. on Selected Areas in Communications, vol. 16, no 8. October 1998.

⁷ R. Lennartsson m.fl., “Progress report on iterative equalization methods for underwater communication”, FOI MEMO-1391. June 2005.

⁸ E. Sangfelt m.fl., “Kommunikationslänk under vatten. Forskning och verksamhet under 2005”, FOI MEMO 05-1541. December 2005.

⁹ M. Grund, L. Freitag, J. Preisig, K. Ball, ”The PLUSNet underwater communications system: Acoustic telemetry for undersea surveillance”, Proc. IEEE Oceans, Boston, September 2006.

¹⁰ Slutrapport “Minkrigssystemet 2015”, MTK00159S9, 2002-12-10, MTK bet. 19 448:61472.

-
- ¹¹ “An assessment of Undersea Weapons Science and Technology”, Committee for undersea weapons science and technology, National Academy Press, Washington, D.C. 2000.
- ¹² Slutrapport 2004 SJÖ 040401S Huvudstudie – Den maritima arenan, 2004-12-15, HKV 21120:78893.
- ¹³ Marininspektörens förslag till utveckling av marina stidskrafter, Missiv 2006-11-06, HKV 09 13 100.75811, Förslag till utveckling av marina stridskrafter, Bilaga 1, 2006-11-13, HKV 09 100.75811.
- ¹⁴ SIGNAL (2000), AFCEA International Journal, Decemebr 2000. Se även www.deepsiren.com.
- ¹⁵ NATO Workshop on “Techniques and Technologies for Unmanned Autonomous Underwater Vehicles – A dual Use View”, RTO Workshop SCI – 182 / RWS – 016. Eckernförde, Germany, October 18-19, 2006.
- ¹⁶ L. Freitag, M. Stojanovic, M. Grund, S. Singh, ” Acoustic Communications for Regional Undersea Observatories”, in Proc. Oceanology International, London, U.K., March 2002. Se även referenser på hemsidan <http://www.mit.edu/people/millitsa/publications.html>. Se flera referenser i artikeln.
- ¹⁷ D. Frye et.al., ”An Acoustically-Linked Deep-Ocean Observatory”, paper in Proceedings in MTS IEEE 2006 Oceans, Boston, September 18-21, 2006.
- ¹⁸ J. Proakis et.al. “Shallow water acoustic networks”, IEEE Communications Magazine, nov. 2001, pp.114-119.
- ¹⁹ Ett stort antal referenser hittas på Internet, sök via google på Neptune. En bra sökadress annars är www.neptune.washington.edu
- ²⁰ Jane’s Defence Weekly, JDW, 28 September 2005.