



Kommunikationsnätverk med rörliga noder

Läget i projektet 2008

TOMMY ÖBERG, ERLAND SANGFELT, JAN NILSSON



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



FOI
Totalförsvarets forskningsinstitut
Försvars- och säkerhetssystem
164 90 Stockholm

Tel: 08-55 50 30 00
Fax: 08-55 50 31 00
www.foi.se

FOI-R--2669--SE Användarrapport
ISSN 1650-1942 December 2008

Försvars- och säkerhetssystem

Tommy Öberg, Erland Sangfelt, Jan Nilsson

Kommunikationsnätverk med rörliga noder

Läget i projektet 2008

Titel	Kommunikationsnätverk med rörliga noder; läget i projektet 2008
Title	Communication network with mobile nodes; the project state 2008
Rapportnr/Report no	FOI-R--2669--SE
Rapporttyp Report Type	Användarrapport User report
Sidor/Pages	21 p
Månad/Month	Dec
Utgivningsår/Year	2008
ISSN	ISSN 1650-1942
Kund/Customer	FM
Forskningsområde Programme area	4. Sensorer och signaturanpassning 4. Sensors and Low Observables
Delområde Subcategory	43 UV-teknik – sensorer 43 Underwater Technology - Surveillance, Target acquisition and Reconnaissance
Projektnr/Project no	E20604
Godkänd av/Approved by	
FOI, Totalförsvarets Forskningsinstitut	FOI, Swedish Defence Research Agency
Avdelningen för Försvars- och säkerhetssystem	Defence & Security, Systems and Technology
164 90 Stockholm	SE-164 90 Stockholm

Sammanfattning

I denna användarrapport beskrivs verksamheten under 2008 i projektet: kommunikationsnätverk med rörliga noder och en liten överblick av läget inom uv-kommunikation i världen ges. Både civila och militära behov driver på utvecklingen. De militära tillämpningarna är kommunikation med ubåt, kommunikation till och från AUV och sensornätverk under vatten. Tex. minskar antalet fartygsbaserade ubåtsjaktsenheter och ersätts med AUV:er och trådlösa sensorer. I rapporten behandlas de tre uv-kommunikationsförsök som har gjorts under året: Gotland, Horsfjärden och Bergen, det sista gjordes i UCAC:s regi. Bland resultaten kan nämnas att vi överfört 10 kb/s över 40km och smygkommunikation över 50km. Långtidsförsöket har visat att en undervattenslänk över 3 km är tämligen pålitlig. Arbetet med utveckling av kommunikationslänken har främst berört kanalskattning och utjämnare, vilket rapporteras i korthet. Ny kanalskattning och fasföljning har avsevärt förbättrat mottagaren. Ett ny och bättre modulationsform för smygkommunikation presenteras. En simuleringsstudie av ett nätverket har gjorts, vilken visar nätets effektivitet i olika varianter, en sammanfattning av studien ges. Ett resonemang om framtiden inom uv-komm. ges sist i rapporten.

Nyckelord: undervattenskommunikation, sonarsignalbehandling, nätverk

Summary

In this user report, the activities during 2008 in the project: “communication networks with mobile nodes” and a small survey of the state in the uw-communications are given. Both civilian and military needs are pushing the development forward. The military applications are communication to a submarine, communication to and from an AUV, and sensor networks under water. For example, the number of ship based units for anti submarine warfare is decreasing and a change towards the use of AUV:s and wireless sensors is going on. In the report, the three uw-communications experiments, that has been done during the year, at Gotland, Horsfjärden and Bergen, are discussed. The last one was done within in the UCAC framework. Some results to mention are the transmission of 10 kb/s over 40 km and stealth communication over 50km. The long-term experiment shows that an underwater link over 3 km is rather reliable. The work with the development of the communication link has mostly been directed to channel estimation and equalizer, which is reported in short. New channel estimation and phase tracking have considerably improved the receiver. A new and better modulation scheme for stealth communication is presented. A simulation study of the network’s efficiency in different variants has been done and a summary of the study is given. A discussion about the future in the uw-com. is given in the report.

Keywords: underwater communication, sonar signal processing, network

Innehållsförteckning

1	Inledning	7
2	Utblick	7
2.1.1	Civila drivkrafter	7
2.1.2	Militära drivkrafter	8
3	Fältförsök	9
3.1	Demonstration i UCAC.....	9
3.2	Gotland.....	10
3.2.1	Beskrivning	10
3.2.2	Resultat.....	11
3.3	Horsfjärden.....	13
3.3.1	Beskrivning	13
3.3.2	Resultat.....	14
4	Länkforskning	15
4.1	Kanalskattning.....	15
4.2	Utjämnare.....	15
4.3	Smygkommunikation.....	16
5	Nätverk	17
6	Avslutning	19
6.1	Läget 2009	19
6.1.1	Länken	19
6.1.2	Nätverk.....	19
6.1.3	Samarbeten	20
6.2	Bortom 2009.....	20
6.2.1	Några förslag inför fortsättningen	21

1 Inledning

Projektet ”kommunikationsnätverk med mobila noder” ingår i den verksamhet som på FOI kallas uv-komm. Förutom de olika FoT-projekten har också det internationella UCAC projektet ingått inom uv-komm-ramen. Kommunikationen har under åren också berört EM och laser men har på senare år fokuserats till akustisk kommunikation som bedöms vara det mest generellt användbara. Från att ha varit lågpresterande har den akustiska uv-komm-länken blivit alltmer högpresterande och överträffar nu i många fall datatakten hos de telefonmodem vi använde till datorerna för 10-15 år sedan. Med en fortsatt forskning kommer prestanda att förbättras ännu mer i synnerhet vad beträffar robusthet, jfr. utvecklingen av mobiltelefonin, men det troliga är ändå att vi beträffande datatakt och räckvidd inte kommer att uppleva några hisnande förbättringar jämfört med de resultat som redovisas i denna rapport.

Uv-komm står år 2009 vid en punkt då det definitivt är dags att påbörja teknikutveckling av första generationens produkter där uv-komm ingår, tex.:

- o kommunikation mellan ytfartyg eller bas och ubåt
- o kommunikation till och från AUV
- o snabbt utläggbara trådlösa sensornätverk för undervattensövervakning

Bland övriga tillämpningar kan nämnas: navigation och positionering och trådlös reglering av undervattenssystem, t.ex. minor

Kommunikationsmetoderna bör optimeras för sina respektive applikationer och vi bör fortsätta att lära oss hantera den komplexa överföringskanal som undervattensmiljön erbjuder. Genom bättre synkroniseringsmetoder, bättre kodning, bättre antennteknik mm. finns möjlighet att ta fram metoder som erbjuder längre räckvidder, robustare (tex. för snabba båtar) och högre datatakt. Framtida undervattensmodem kommer att vara mjukvarubaserade, jfr. mjukvaruradio och ”software sonar”. Utvecklingen kommer att fortsätta, det är därför viktigt att nya kommunikationsalgoritmer kan implementeras i modemerna.

I avsnitten 3, 4 och 5 beskrivs det arbete som har gjorts under 2008 inom de uv-komm-relaterade projekten. Rapporten inleds i avsnitt 2 med en kort utblick på vad som görs utomlands. För den läsare som vill fördjupa sig de tekniska detaljerna rekommenderar vi den tekniska rapporten: FOI-R—2670—SE.

2 Utblick

Utveckling av system för undervattenskommunikation drivs både av civila och militära krafter:

2.1.1 Civila drivkrafter

De civila behoven finns inom off-shore, övervakning av installationer som ex.vis. vågkraftverk, oceanografiska och meteorologiska nätverk för övervakning och forskning kring undervattensmiljön, samt dykarkommunikation.

Ett gemensamt behov är att slippa kablar eftersom de måste tillses, repareras eller ersättas ibland. I våra egna vatten önskar tex SMHI ersätta kablar från mätutrustning på botten med trådlösa system, eftersom de nu kabelbundna mätstationerna alltför ofta trålas upp av misstag. Reparationskostnaderna blir stora, inte minst pga. av fartygshyror som alltid tillkommer. I vissa fall är det helt nödvändigt att ha trådlös kommunikation med undervattenssystemen, framför allt gäller detta autonoma undervattensfarkoster (AUV) som t.ex. norska Hugin.

2.1.2 Militära drivkrafter

De militära intresset har, förutom behovet av ubåtskommunikation, länge kretsat kring AUV-tillämpningarna. Även här måste styrkommandon och navigationsdata kunna överföras till farkosten och denna bör kunna svara eller lämna spaningsinformation under sitt uppdrag. Framför allt gäller detta användning av AUV inom botten- och miljökartering, minjakt och i sensor-nätverk för spaning och övervakning där AUV:n ingår som rörlig nod. Idag resonerar t.ex. NATO om, och prövar, hur multistatiska sensornätverk med AUV, försedda med TAS (Towed Array Sensor), skall utformas för att utgöra en kraftfull resurs för ASW (Anti Submarine Warfare) och flera teknikdemonstratorer har byggts [Seaweb] eller kommer att byggas [UDT08¹]. Ett viktigt incitament för denna utveckling är att antalet ASW-plattformar har minskat markant under senare år, samtidigt som kraven på att kunna verka och bedriva ASW i alla världens kustnära områden snarast har ökats. Man ser behov av att relativt snabbt kunna lägga ut självupprättande sensornätverk med syften som tex ISTAR (Intelligence, Surveillance, Target Acquisition, and Reconnaissance) som ett komplement till, och minskad risk för, plattformsbunden verksamhet. I viss mån har även s.k. "combined operations", där flera länder bistår med sensornoder och plattformar som måste kunna fungera tillsammans, inspirerat nätverkstanken. Det krav på interoperabilitet som detta medför är en ledstjärna. Tanken på en standard för akustisk uv-komm, utöver den NATO-standard som finns för hydrotelefoni mellan ubåtar, har initierat ett NATO-projekt (JANUS) för ändamålet vid NURC. Ett annat exempel på nätverkskommunikation är Australiens HAIL-system (Hydro Acoustic Information Link) där en ubåt skall kommunicera med utlagda sensorer, AUV eller ytfartyg. De ingående modemerna har låg datatakt, 6 bps, men sägs fungera robust vid besvärliga förhållanden och har låg upptäcktssannolikhet. HAIL har även testats mot Seaweb som utgjorde länk mellan en AUV och en ubåt. HAIL – systemet används även som navigationshjälpmedel för AUV:n genom att ytbojar med GPS-funktion kan ge en AUV uppdaterade lägeskoordinater.

¹ R. Been, D. T. Hughes, A. Vermeij; "Heterogenous Underwater Networks for ASW: Technology and Techniques"; In Proceedings of UDT Europe 2008, Glasgow, June 2008.

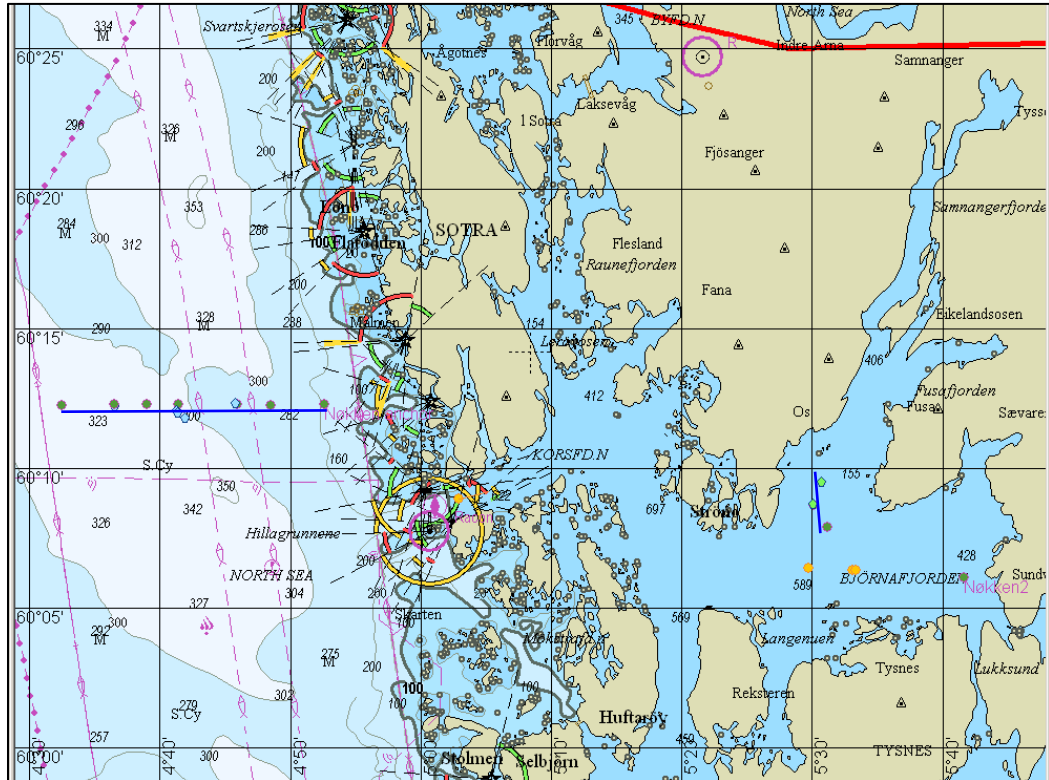
3 Fältförsök

3.1 Demonstration i UCAC

Under 2008 fortsatte vårt arbete inom samarbetsprojektet UCAC (UUV Covert Acoustic Communications) med den avslutande demonstrationen utanför Bergen i Norge den 1-5 september, samt analyser och avrapportering från arbetet. Vi påvisade tvåvägs-kommunikation i realtid mellan ett moderfartyg med nedhängt modem och undervattensfarkosten Hugin på 20 km i Nordsjön. I Björnafjord visade vi att kommunikationen, när sändaren drevs på minimal nivå för lyckad avkodning, inte kunde upptäckas av varken en fiktiv intercept med tillgång till modemets hydrofon eller sonobojar i området. UCAC har avslutats i dagarna, men modem, data, modeller och kommunikationsmetoder finns kvar för projektets medlemmar att använda (Sve, No, Da, Fi, Ty, NL och It). Till detta kommer naturligtvis det mycket starkt förankrade nätverk av personer och institut/industri som utvecklats under projektiden.



Figur 1. UCAC-modemet integrerat ombord på Hugin, till vänster, moderfartygets modem till höger.

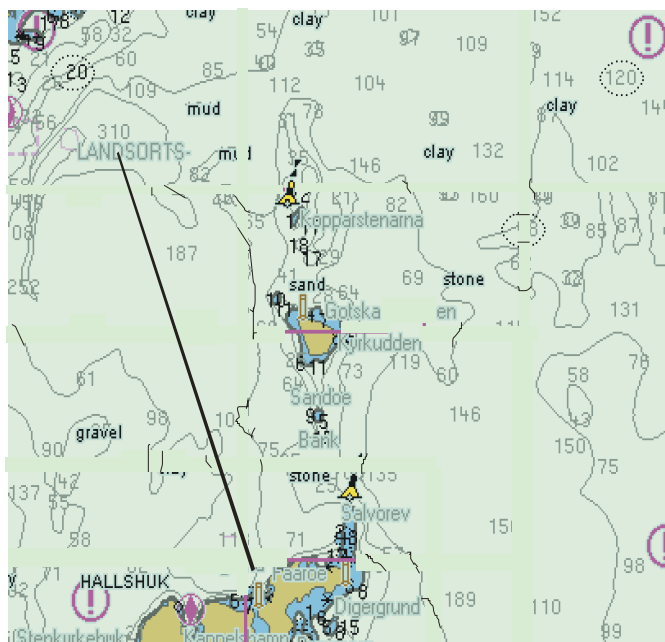


Figur 2. Operationsområden längs de blå linjerna i Nordsjön och Björnafjord under demonstrationen 1-5 september 2008 av smygkommunikation.

3.2 Gotland

3.2.1 Beskrivning

Vi har tidigare gjort två försök i farvattnen NNV om Gotland. För att kunna, i någon mån, jämföra med tidigare försök gjordes ytterligare ett liknande försök under september 2008. Denna gång hade vi modifierat signalerna och dessutom utvidgades försöket med sändning från en fast nod till båten som drog ett hydrofonpar. Avsikten var att stifta bekantskap med de bullerproblem som uppstår dels pga. av fartygets framdrivningssystem och dels pga. vattnets strömning runt hydrofonen. Kommunikationslänkens ena ände var belägen vid c:a två km. utanför stranden vid Digerhuvud på Fårö och den andra på fartyget HMS Fårösund.



Figur 3. Hydrofonkedjans läge var vid Digerhuvud, i kartans nedre del. HMS Fårösund körde sedan i nordlig riktning längs den inritade linjen.

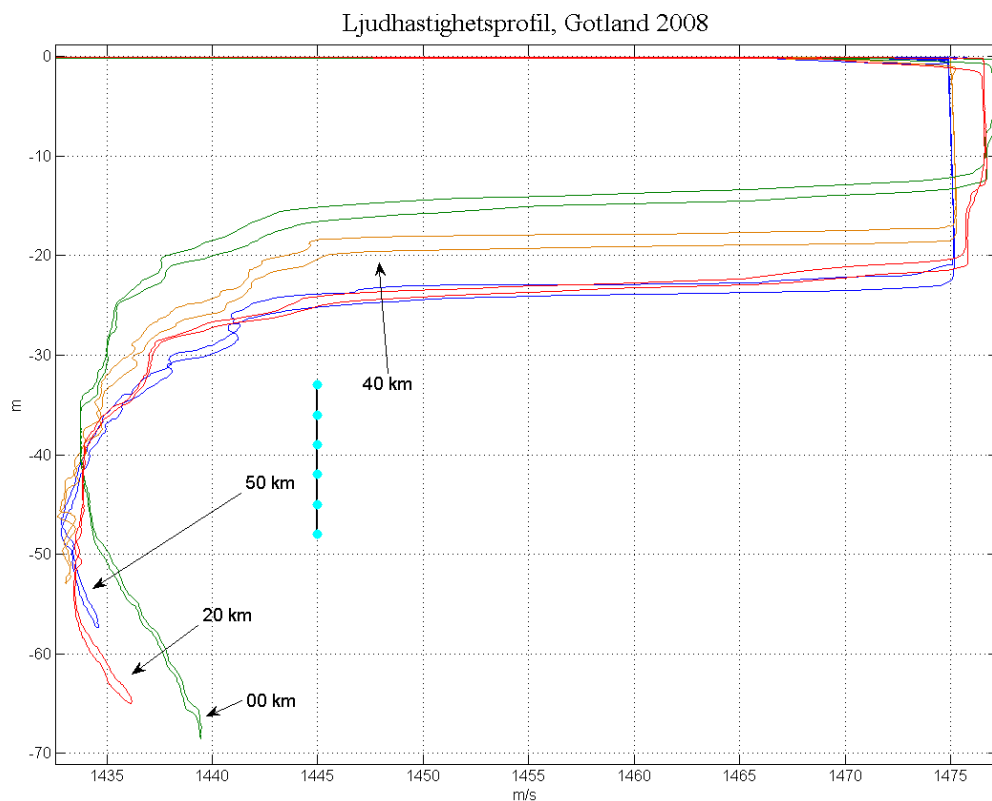
Försöket gick till så att fartyget körde med kursen 342° från mottagarar-antennens position, 20-50 km ut, och stannade vid vissa överenskomna punkter, där signal överfördes främst från fartyget men även från land. Under transporten mellan punkterna gjordes också försök med sändning i båda riktningarna. Vid varje överföringstillfälle sändes olika typer av signaler, dels sådana som optimerats för hög datatakt och dels sådana som optimerats för robusthet. En hotande kuling gjorde att försöket fick göras på kortare tid än beräknat varför de riktigt långväga mätningarna, 60-100 km, inte hann göras. Under natten då mätningarna gjordes rådde sjötilstånd 7.

3.2.2 Resultat

Alla upptagna mätningar har ännu inte analyserats, mer kommer att göras under 2009. De resultat som visas i tabellen nedan är med stillastående fartyg och för de signaler som har optimerats för hög datatakt med en bandbredd på 6 kHz. Mittfrekvensen var 10 kHz och källans ljudstyrka var c:a 180 dB rel. 1μP@1m. I tabellen nedan beskrivs mottagningens resultat för olika datatakter och avstånd.

datatakt	20 km	40 km
4 kb/s	Detta klaras utan problem med ett fåtal iterationer och med en hydrofon, stabil och säker mottagning utan fel.	Detta klaras utan problem med en hydrofon.
8 kb/s	Med minst två hydrofoner fås en stabil och säker mottagning. Även en hydrofon med dubbel samplingstakt, noll fel för det mesta.	Med tre hydrofoner fås noll fel i avkodningen.
10 kb/s	Kräver minst två hydrofoner för noll fel. Med tre hydrofoner fås en stabil och säker mottagning.	Här krävs 4 hydrofoner och en maximal filterlängd på 80+80 tappar för noll fel.

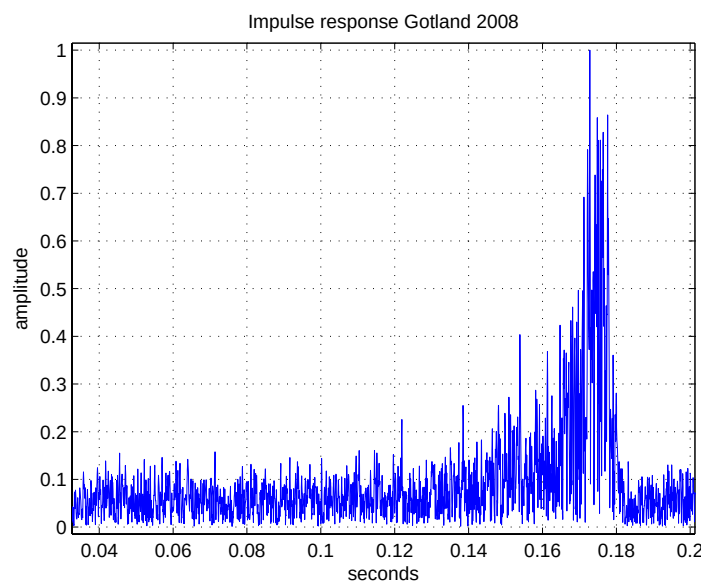
I fig. 4 visas ljudhastighetsprofilen tagen på olika avstånd från hydrofonkedjan vid Fårö. Som framgår har vi inte en ljudkanal som avgränsas med skarpa hastighetsgränser både upp- och nerifrån utan har en mjukare avböjning ned mot botten. Hydrofonkedjans läge i vattenvolymen har indikerats med de blå punkterna.



Figur 4. Ljudhastighetsprofil uppmätt vid gotlandsförsöket 2008 på olika avstånd från hydrofonkedjan. Hydrofonelementens läge i vattnet ges av de blå punkterna. Avståndet mellan elementen, 3 m, var vald för att ge oberoende kanaler.

Vid 20 km var hydrofon nr. 4, uppifrån räknat, svagast SNR=16,3 dB och nr 1 starkast SNR=21,7 dB. SNR vid 40 km var c:a 10 dB lägre. Om vi tar hänsyn till att vi har en absorption av 0,3 dB/km i Östersjön motsvarar skillnaden i de mottagna ljudnivåerna, vid 20 resp. 40 km, att spridningsförlusten är proportionell mot $1/(\text{avstånd})^{1,36}$, vilket ganska väl motsvarar cylindrisk utbredning.

En viktig begränsande faktor för kommunikationen är impulssvarets längd. Detta kan variera mycket beroende på skiktningar i vattnet. Årets impulssvar är c:a 40 ms långt, motsvarande 240 symboler, vilket är ganska typiskt för Östersjön. Ett långt impulssvar innebär, å ena sidan, svårigheter på så sätt att fler av de överförda symbolerna kommer att överlappa och därmed måste mottagaren ha längre filter, vilket förlänger beräkningarna i datorn. Långa impulssvar har, å andra sidan, också en positiv inverkan såtillvida att det innebär att signalen har tagit många vägar till mottagaren och sannolikheten ökar att åtminstone någon av dem skall vara bra, man säger att vi har en rik kanal.

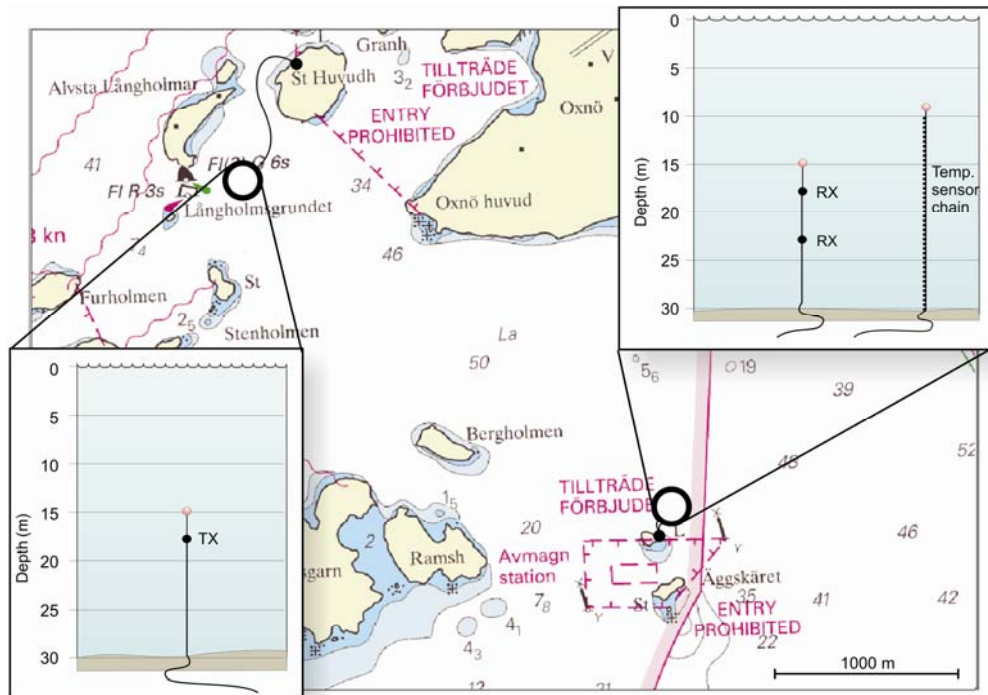


Figur 5. Exempel på impulssvar uppmätt vid gotlandsförsöket 2008. Signalen utbreder sig längs flera vägar med olika tidsfördröjning. En impuls kommer därför att bredda ut sig och komma som en serie pulser, vilket visas i impulssvaret.

3.3 Horsfjärden

3.3.1 Beskrivning

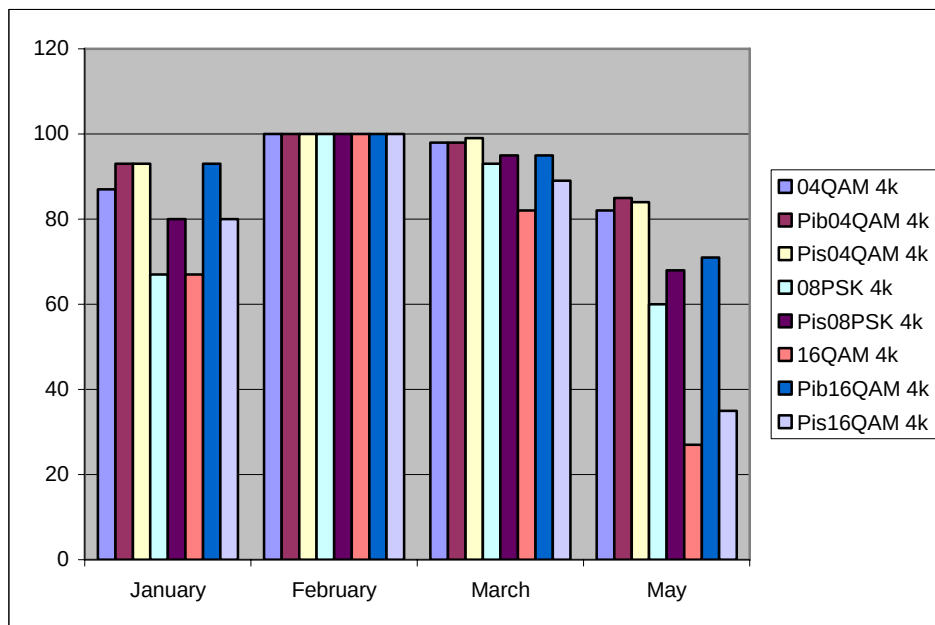
För att utröna pålitligheten hos en akustisk undervattenslänk anordnades en mätsträcka mellan Huvudholmen och Äggskär utanför Berga, se fig. 6. Avståndet mellan sändare, Tx, och mottagare, Rx, är 3 km. Mittfrekvensen för de sända signalerna var 17 kHz och ljudstyrkan c:a 175 dB rel. 1 μ P@1m.



Figur 6. Placering av sändare, Tx, och mottagare, Rx, för långtidsförsöket.

Sändar- och mottagardatorerna har mobil internetanslutning och kan därför manövreras från godtycklig plats via internet. Vid varje hel timme sänds ett paket med kommunikationssignaler som registreras på en hårddisk vid mottagarsidan. Hårddisken vittjas vid besök på ön och analyseras på kontoret.

3.3.2 Resultat



Figur 7. Procent lyckade överföringar på kanal 1 vid bandbredden 4kHz. De olika färgerna motsvarar signaltyper med skilda datatakt och robusthet.

Ett exempel på de resultat som har uppnåtts visas i fig. 7. Där anges hur stor andel av de överförda signalpaketen som har kunnat avkodas korrekt. Som framgår är resultatet aldrig sämre än 80% för 4QAM. (De resterande 20%:en kan man lösa så att sändaren väntar sig ett kvitto på korrekt mottagen signal, annars görs en omsändning, sk. ARQ).

Vi har under fyra månader, januari, februari, mars och maj 2008 fått tillräckligt mycket data för att, med någon säkerhet, göra statistik över avkodningen. Övriga tider under året har datorsystemen delvis varit ur funktion. Resultaten hade sannolikt blivit ännu bättre om dataöverföringen skulle ha begränsats enbart av brister i kommunikationstekniken. Den gamla avkodaren har använts under försöket. Skälet till att den nya avkodaren inte har använts är att vi har tagit den avkodare som fanns tillgänglig vid årets början och velat använda denna hela året, eftersom det är kanalens variationer som skall återspeglas i statistiken och inte avkodarens utveckling under året. Därför måste vi påpeka att resultaten med säkerhet blir bättre om den avkodare som utvecklats under 2008 skulle ha använts. Trots dessa omständigheter kan man säga överföringskanalen har varit stabil, de allra flesta meddelanden har gått fram utan fel. När överföringen har misslyckats visar det sig ofta bero på buller från något fartyg som har passerat eller legat stilla i närheten av mottagaren.

4 Länkforskning

4.1 Kanalskattning

Kanalskattaren är oumbärlig för systemets funktion. Dess uppgift är att anpassa mottagaren till den kommunikationskanal som gäller för tillfället. Förändringarna i kanalen sker på sekundbasis och måste därför ständigt mätas av mottagaren. En ny kanalskattningsmetod som tar hänsyn till befintlig a priori kunskap om signal och kanal har implementerats. Beträffande signalen vet vi att symbolamplituden ligger inom ett bestämt spann och beträffande kanalen vet vi formen på varje enskild topp i impulssvaret, se fig. 6, och att topparna kan ha olika dopplerförskjutning. Kännedomen om signalens amplitudintervall har provats i mottagaren, men den olika dopplerförskjutningen har ännu inte provats. Resultatet, så långt, är att vid enkla kanaler fås fler iterationer, detta är naturligt eftersom skattarens frihetsgrader har begränsats. Vid svåra kanaler, där vi tidigare inte kunde avkoda alls kan vi nu uppnå noll fel i överföringen, vilket ju är en avgörande fördel.

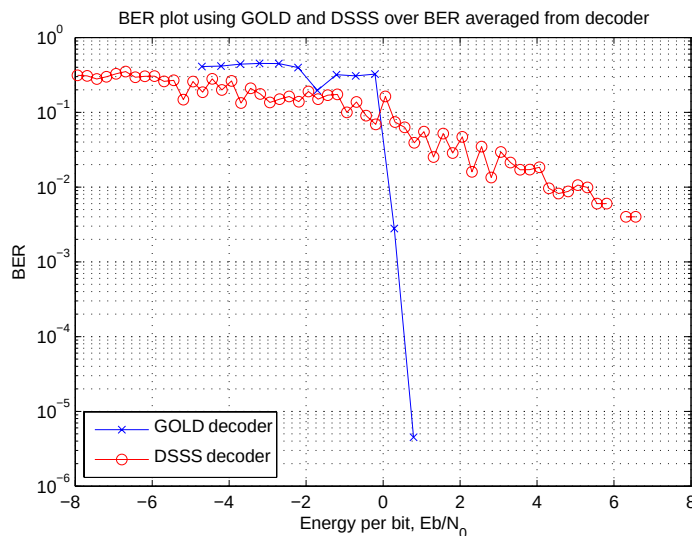
4.2 Utjämnare

Den gamla utjämnaren var instabil och hade en del oförklarliga egenskaper. En ny utjämnare som dessutom möjliggör mottagning med flera hydrofoner, "fractionally spaced" och faskorrigerings har implementerats. Detta innebär att vi kan använda en hydrofonkedja vid mottagning, vilket gör att kanalens diversitet kan utnyttjas med resultatet att mycket säkrare mottagning kan erhållas. Fractionally spaced innebär att man samplar den mottagna signalen med högre frekvens. Detta ger effekten att man vid få hydrofoner i princip kan skaffa sig

mer diversitet, vilket förbättrar mottagningen. Kanalskattaren bör ha lång tidskonstant för att inte störas av brus men då hinner den å andra sidan inte justera fasen på den mottagna signalen tillräckligt fort. Lösningen är att ha en separat fasjustering som byggts samman med den iterativa processen, vilket också har förbättrat mottagaren. Sammantaget har dessa förbättringar plus några till, av vilka inte alla har prövats ännu, gett oss en mycket bättre och stabilare mottagare. Dock till priset av något ökad komplexitet. En av uppgifterna år 2009 är att minska komplexiteten i beräkningarna, vilket bör kunna avsevärt reducera denna kostnad.

4.3 Smygkommunikation

UCAC-projektet gav oss en god insikt i problematiken att framställa smygsignaler. Med smygsignaler menas att man kommunicerar med mycket lågt signal-till-brusförhållande så att en spanare måste befinna sig mycket nära källan, jämfört med den avsedde mottagaren, för att kunna upptäcka signalen. Sedan vårt deltagande i UCAC-projektets utvärdering, har vi utvecklat både mottagare och signaler så den metod vi nu använder är konkurrenskraftigare än tidigare, se fig 8 för en jämförelse.



Figur 8. Felsannolikheten för den smygsignal som användes vid UCAC:s utvärdering (röd kurva) och den nya smygsignalen (blå kurva). Som framgår ger den nya signalen låg felsannolikhet (BER) vid lägre signal-till-brusförhållanden, jfr. tex. nödvändigt E_b/N_0 för $BER=10^{-2}$. Den nya signalen ger därför god kommunikation vid ännu lägre ljudnivå än DSSS.

Den nya metoden bygger på att modulationssignalen får en högre dimensionalitet, med hjälp av sk. Gold-sekvenser. Det kan jämföras med felkorrigering kodning som också bygger på att signalens dimensionalitet är hög.

5 Nätverk

Att konstruera trådlösa akustiska undervattensnätverk är utmanade då undervattenskanalen karakteriseras av låga datatakt, långa fördröjningar, energibegränsningar och flervägsutbredning. Dessa begränsningar, speciellt de två första gör det viktigt att försöka utnyttja nätverksresurserna så effektivt som möjligt. En generell och flexibel design av nätverket skulle förstås vara önskvärd då samma lösning skulle kunna användas i många olika scenarier. Tyvärr är teknikerna inte mogna för att klara av att inom rimlig tid kunna adaptera en sådan generell design till en effektiv nätverkslösning för ett givet scenario med de begränsade kanalresurserna som finns tillgängliga. Dessutom skulle en sådan flexibel design bli komplex och mindre lämplig att implementera på små och energibegränsade sensorer. I nuläget, och förmodligen för lång tid framöver, är det istället viktigt att noggrant skräddarsy protokollösningen till det speciella scenariot för att kunna erhålla så mycket nätverkskapacitet som är möjligt.

Speciellt är det Medium Access Control (MAC) protokollet, som styr när och vem som får sända, viktigt att beakta i designen. Allmänt brukar MAC-protokoll delas in i två klasser, konflikthanterande och konfliktfria protokoll. I första fallet tävlar en nod om att få använda kanalen och om en konflikt uppstår används olika mekanismer för att lösa upp konflikten. Denna typ av protokoll används ofta för kommersiella trådlösa kommunikation såsom WLAN. För undervattensscenarier med stora avstånd mellan noderna är emellertid huvuddelen av dessa protokoll olämpliga. Det beror på att det tar för lång tid att avgöra om kanalen är tillgänglig och om kollisioner inträffat på grund av de långa utbredningstiderna. Metoderna som används för att tillfälligt reservera kanalen, för undvikande av kollisioner, blir också ineffektiva.



Figur 9. Vision av ett undervattensnätverk som kommunicerar med en passerande AUV.

Låt oss nu istället fokusera på den andra konfliktfria klassen av MAC-protokoll, och speciellt protokoll baserade på "Time Division Multiple Access"

(TDMA). I den enklaste typen av TDMA-protokoll skapas ett schema som indelas i tidsluckor där varje nod tilldelas en egen lucka att sända i. Notera också att nya scheman normalt behöver genereras när situationerna i nätet såsom topologi eller trafikflöden ändras. Hur som helst, en fördel med TDMA är att en nod vet när den kan sända och att paket med stor sannolikhet kommer fram eftersom inga kollisioner sker. När schemat väl är tillgängligt behöver ingen tid användas till att reservera kanalen, eller lösa upp konflikter. Problemet är istället att generera scheman och distribuera dessa till noderna så alla noder har samma scheman. Hur väl en TDMA-lösning skulle fungera i ett undervattensnät blir därför väldigt beroende av hur svårt det är att generera och distribuera TDMA-scheman.

I projektet har vi inriktat oss på att studera ett trådlöst sensornätverk för passiv såväl som aktiv övervakning under vatten. Det specifika scenariot som behandlats består av 8 sensornoder varav en utav noderna fungerar som en accesspunkt för kommunikation med en kommandocentral. Eventuellt kan det också tillkomma en rörlig nod, en AUV, som vill kunna kommunicera med nätverket. Nätet är relativt statiskt över tiden. Vad som kan hända är att utbredningsförhållandena förändras så mycket att nättopologin ändras eller att någon utav noderna fallerar. Trafik flyter regelbundet från sensorerna in till accesspunkten och omvänt, men dessa trafikflöden kan dock ändras över tiden.

Att scenariot är relativt statiskt och att accesspunkten har en bra uppfattning om nättopologi och trafikmönster gör TDMA attraktivt. Vi har därför undersökt och föreslagit en TDMA-lösning. Med den föreslagna metoden genereras ett TDMA-schema i accesspunkten som sedan skickas ut till noderna i nätet. Schemat har en väl definierad struktur som gör att det kan automatgenereras utifrån topologi och trafikmodell. Det gör att ett nytt schema kan distribueras om trafikmodellen ändras. Det ska tilläggas att schemat trots allt innehåller viss overhead, orsakad av skyddsavstånd mellan ramarna, på grund av den långa akustiska fördröjningen. I fall där flera hopp krävs för att kommunicera mellan en nod och accesspunkten blir denna overhead större än då alla noder kan kommunicera direkt med accesspunkten.

För att underlätta igångsättandet och drift av nätverket är det bra om själva nätstyrningen kan självkonfigureras. Till viss del kan det åstadkommas i den föreslagna nätverkslösningen som kortfattat kan beskrivas på följande sätt. I samband med att noderna utplaceras väljs och driftsätts en av noderna som accesspunkt. Denna nod bygger sedan upp en topologitabell över nätverket, tex genom att sända ut testsignaler bland noderna. Baserat på topologitabell och trafikmodell genererar sedan accesspunkten de nödvändiga vägvalstabellerna samt gällande TDMA-schema som skickas ut till de övriga noderna. Om trafikmodellen ändras skickas ett nytt TDMA-schema ut. Om en rörlig nod (AUV) tillkommer behövs däremot någon form av dynamisk vägvalsfunktionalitet läggas till. Nätverket är nu operabelt och är så åtminstone tills något väsentligt förändras såsom topologi på grund av att en nod fallerar. Ett problem är att det kan ta tid att upptäcka att en nod fallerar och sedan behöver en ny topologitabell genereras och skickas ut. Speciellt allvarligt blir det när det är accesspunkten som fallerar och en ny sådan måste väljas. Hur man automatiskt väljer en ny accesspunkt är inte uppenbart och är en frågeställning som skulle behöva undersökas närmare.

6 Avslutning

6.1 Läget 2009

6.1.1 Länken

Det arbete som pågått vid FOI och som kan samlas under rubriken undervattenskommunikation har nått resultat som är bland de bästa i världen. Undervattenskommunikationen har nu nått en mognad som gör att den kan exploateras industriellt. Vi har idag nått sådana resultat att vi kan uppnå bättre presteras än vad som för tillfället är kommersiellt tillgängligt.

En sammanfattning av de resultat som uppnåtts inom de projekt som berör akustisk uv-komm. redovisas i tabellen nedan.

Metod	Informationstakt bitar per sekund	Avstånd (km)	Antal hydrofoner	Anm.
<i>Smyg</i> Tex. från ubåt till bas, AUV eller ytfartyg	4 och 75	50	1	Bornholm SNR = -15 dB @ 4 bps $f_c=3,5$ kHz SNR = -7 dB @ 75 bps $f_c=3,5$ kHz
<i>Långdistans</i> Tex. till och från ubåt	2700	60	1	NV Gotland Turbo utj. $f_c=2$ kHz
	10000	40	4	NV Gotland Turbo utj. $f_c=10$ kHz
<i>Medelavstånd</i> Tex. till och från AUV	10000	20	2	
<i>Kort avstånd</i> Tex. batteridrivna sensornoder	8000	1,5	1	Stockholms skärgård $f_c=17$ kHz Låg effekt 2W

Resultaten i tabellen har demonstrerats vid olika försök. En bedömning är att fortsatt forskning kommer att innebära en fortsatt utveckling mot högre data-hastigheter och längre räckvidder. Tex. borde det vara möjligt att uppnå 2700 bitar/sek på 100 km. med en sändare på ett lägre frekvensområde än vad som nu har testats. Läger man därtill en viss lobförstärkning hos en u-båt förefaller bedömningen tämligen säker.

Vi anser att tiden är mogen för en industriell satsning, både för att nyttiggöra de goda resultat som har uppnåtts.

6.1.2 Nätverk

Ett kommunikationssystem består av flera länkar och dessa måste knytas samman till ett fungerande nätverk. Vi har till dags dato studerat undervattens-nätverk teoretiskt och med simuleringar, men ett försök med ett litet nätverk planeras under 2009. Nätverket är centralt vid övervakning av havsområden (med möjlighet till snabb utläggning i nya områden) och för att vidarebefordra akustisk information långa vägar. När det gäller nätverk för övervakning är det

också viktigt att påpeka att vi har påbörjat framtagning av algoritmer för distribuerad detektion av undervattensverksamhet med hjälp av akustiska kommunikationsnät.

6.1.3 *Samarbeten*

Den omvärld som uv-komm-projekten arbetar i beskrivs av våra samarbeten:

- o Vi har deltagit i projektet UCAC, ett samarbete mellan sju länders försvarsforskning och industri. I samarbetet har vi bidragit till att framtagning av modem med smygkommunikation, större fältförsök med mängder av registrerade data, samt modeller för den akustiska kommunikationskanalen.
- o Vi deltar i ett europeiskt forskningsprojekt UAN, Underwater Acoustic Networks, där både industri och universitet är med. Projektet har både en civil och militär inriktning. I detta samarbete ingår också Kongsberg, som vi redan fått kontakt med inom UCAC och som är en viktig del i vårt kontaktnät.
- o Vi har tillsammans med FFI, No formulerat ett nytt EDA-projekt, RACUN, rörande akustiska undervattensnätverk med rent militär inriktning. Slutlig demonstration skall ligga nära ett operativt koncept. Industri, forskningsinstitut och UoH från No, Ty, NL, Fr och It kommer att delta och man har uttryckt en stark önskan om att Sve skall ansluta sig.
- o Vi har påbörjat diskussioner med Saab Underwater Systems ang. implementering av uv-modem. Detta arbete bör vara klart under år 2009.
- o UCAC har gett oss goda kontakter med Patria i Finland, vilket resulterar i att vi får tillgång till en sändare för frekvensområdet 1-20kHz.

Dessa samarbeten ökar våra möjligheter att göra försök i internationella vatten (exempelvis Medelhavet) vilket ger viktig miljökunskap. Vi får också tillfälle att studera andra länders CONOPS (Concepts of Operations). Vidare ger test av utrustning på olika typer av AUV viktig erfarenhet om integration och interoperabilitet. Vi får kunskaper som skulle ha varit kostsamma att ta fram själva.

6.2 **Bortom 2009**

Trådlös undervattenskommunikation kommer med all säkerhet att spela en avgörande roll inom framtidens undervattensverksamhet (jfr. hur nödvändig mobiltelefonitekniken har blivit idag). Ett generellt problem för uv-komm är att det inte finns något etablerat system eller internationell standard att peka på. Det behövs därför ett standardiseringsarbete och Sverige skulle kunna spela en ledande roll där. Tidiga försök med uv-komm har visat på svårigheter att få till fungerande länkar. Forskning och utveckling av modem och nätverk är ett aktivt område. Många länders marin vill delta i denna forskning, speciellt som den relativt nyligen börjat erbjuda användbara resultat. Det verkar som om man inte vill stå utanför, alla räknar med att det kommer att bli viktigt. Civilt är området redan viktigt och de civila applikationerna är snarast de som driver

utvecklingen. Man kan jämföra med utvecklingen inom AUV-tekniken, där civila behov har drivit fram fungerande systemlösningar. Skall man satsa på AUV måste man också satsa på uv-komm. En AUV har svårt att fungera operativt och hanteringsmässigt utan akustiska modem. Tex. har Hugin idag tre olika akustiska modem men man vill gärna ha modem med bättre kommunikationsegenskaper. NGU/A26 är tänkt att kunna operera med UUV, vissa är trådlösa och för dessa kommer uv-komm att behövas – man kan säga att många AUV applikationer går hand i hand med undervattenskommunikation.

6.2.1 Några förslag inför fortsättningen

Först och främst föreslår vi en fortsatt satsning inom FoT vilket utgör en bas för förslagen nedan:

- o Test av integrerad akustisk kommunikation:
 - o Prov och försök med ubåt med mottagning i CAS/FAS av sändning från fartyg.
 - o Tillsammans med industrin framtagning av programmerbara modem som kan installeras på AUV, tex. Sapphires, Gateway-boj, sensornod.
 - o Prov och försök med uv-komm. från ubåt i synnerhet smygkommunikation.
- o Utveckla interoperabilitet:
 - o Följa projektet Janus, ett koncept som är nära operativt, för undervattensnätverk.
 - o Delta i internationella samarbeten som Racun
- o Undersöka hur uv-komm kan ingå som en operativ del i marinens verksamhet:
 - o Prov och försök tillsammans med förband.
 - o Framtagning av scenarios där uv-komm kan spela en viktig roll.