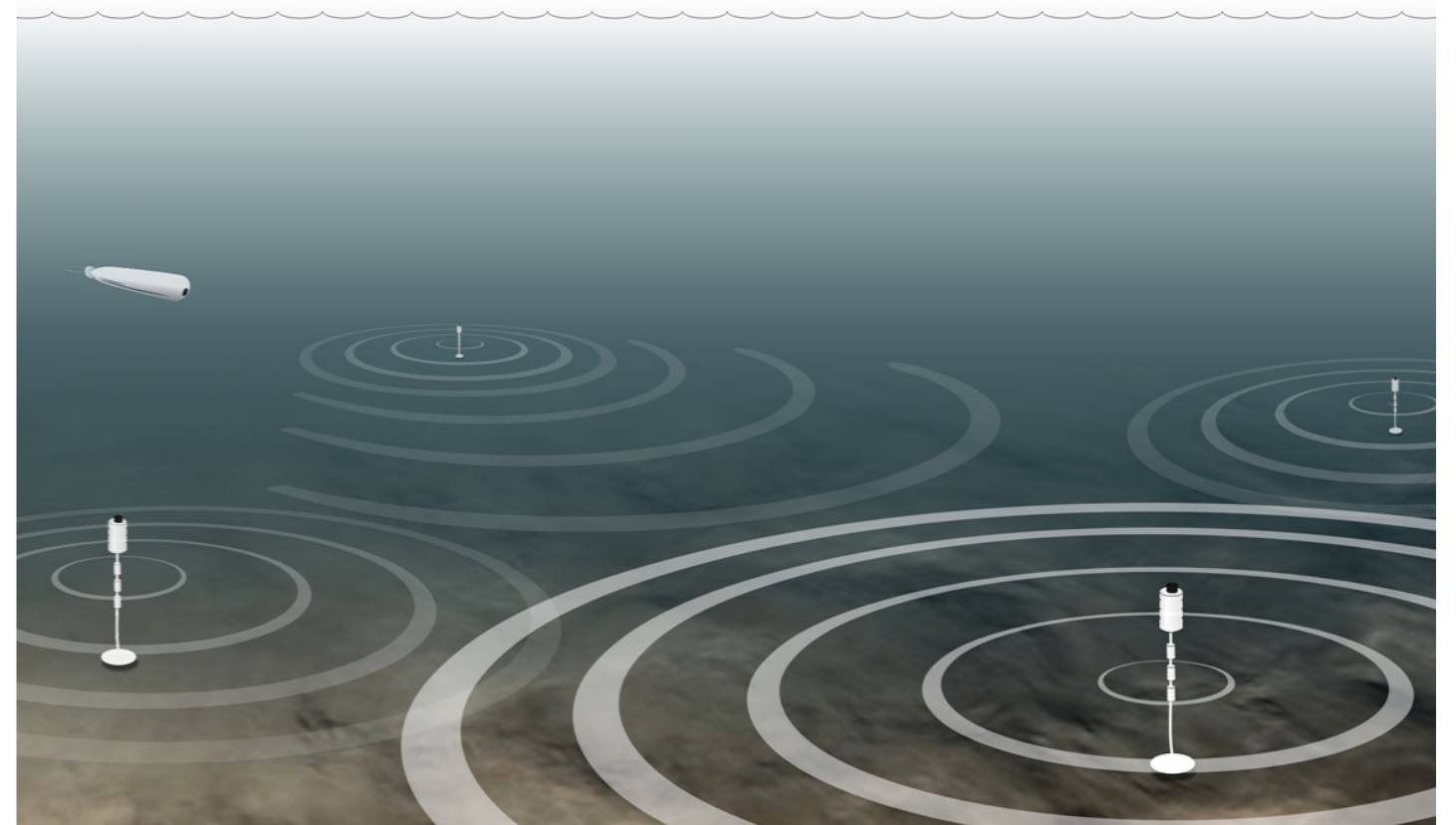


TOMMY ÖBERG, STEFAN PETROVIC



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.

Tommy Öberg, Stefan Petrovic

Trådlösa nätverk för undervattensövervakning

Statusrapport för första året, 2008

Titel	Trådlösa nätverk för undervattensövervakning
Title	Wireless networks for under water surveillance
Rapportnr/Report no	FOI-R--2671--SE
Rapporttyp Report Type	Användarrapport User report
Sidor/Pages	17 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	E20680
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 det inledande arbetet i projektet: trådlösa nätverk för undervattensövervakning. Projektet ingår i FOI:s strategiska forskningskärnor. Syftet är att undersöka hur ett enkelt utläggbart trådlöst sensornätverk för övervakning av vattenvolymer kan utformas. Sensornätverket placeras på botten och kommunikation med omvärlden sker med akustisk undervattenskommunikation, utrustningen avses vara batteridrivna. Fokus i forskningen ligger på signalbehandlingen där distribuerad detektion är ett huvudområde. En simuleringsmodell av nätverket som innefattar detektion och kommunikationens begränsningar har gjorts. Den distribuerade detektionen bygger i sin nuvarande form på att noderna delger varandra sina mätningar varefter beslut fattas i vardera nod och därefter görs en omröstning. Om alternativet att ett intrång pågår vinner, larmas övervakningscentralen, därefter återgår noderna till spanningsmod. Som ett exempel har metoden använts för att detektera dykare. De akustiska särdragen för andningsljuden har använts i nätverket och resultaten är goda. Arbetet fortsätter även under 2009.

Nyckelord: sensornätverk, detektion, undervattensövervakning, undervattenskommunikation

Summary

In this user report, the initial work in the project: wireless networks for underwater surveillance, is described. The project is a part of the Swedish Defence Research Institute's strategic research kernels. The aim is to investigate how a easily deployable wireless network for surveillance of water volumes can be implemented. The sensor network can be placed at the sea floor and communication with the world around is done by acoustic underwater communication, the equipment is intended to be battery powered. The focus in the research is at the signal processing where distributed detection is a main area. A simulation model of the network including detection and the limitations of the communication has been developed. The distributed detection is in its present state built on the sharing of measurements amongst the nodes, thereafter a decision is taken by voting. If the alternative that an intrusion is going on wins, an alarm is sent to the command centre, afterwards the nodes return to surveillance mode. As an example has the method been applied to detect scuba divers. The acoustic features for the breathing sounds have been used in the network and the results are good. The work will continue during 2009.

Keywords: sensor network, detection, underwater surveillance, underwater communication

Innehållsförteckning

1	Inledning	7
2	Bakgrund	8
3	Nätverk	8
3.1.1	Central beslutsnod	8
3.1.2	Decentraliserat beslut utan återkoppling	10
3.1.3	Decentraliserat beslut med återkoppling	11
4	Särdrag	11
5	Resultat	13
6	Fortsättning	15
7	Appendix	16
7.1	Gruppbeslut.....	16
7.2	Klasser av sensornoder	16
8	Referenser	17

1 Inledning

Trådlösa nätverk för undervattensövervakning är ett projekt som ingår i FOI:s strategiska forskningskärnor. Det går ut på att utnyttja FOI:s kunskap inom undervattensspaning och undervattenskommunikation, samt utöka den med vetenskapsområdet distribuerad detektion, för att svara upp mot behoven av snabbt och billigt utläggbara system för övervakning av vattenvolymer som behöver skyddas mot angrepp, såsom tex. hamninlopp. Ett system där alla sensorer är sammanbundna med trådar är naturligtvis en komplikation vid utläggningen. Samma gäller för ett nätverk som är i behov av radiobojar vid ytan som lätt upptäcks eller påseglas. Marinen har självfallet ett intresse av enkla och billiga system för övervakning, vilket ger trådlösa system en fördel. Akustisk undervattenskommunikation är idag en mogen teknik. Det finns också en stor civil potential alltifrån att övervaka kemiska utsläpp till fiskbestånd mm. Vi syftar alltså till att göra ett nätverk som slår larm om något händer. Beslut hur man därefter agerar fattas på vanligt sätt och har inget att göra med det sensornätverk som avses här. Det strategiska projektet är tvåårigt, varav ett års arbete nu har gjorts. Tanken är att om resultatet blir att denna teknik förefaller lovande skall ett vanligt forskningsprojekt, som kan resultera i en demonstrator, startas.

Varför är distribuerad detektion av intresse? Förhållanden i ett trådlöst nätverk är sådant att flera sensorer, av lika eller olika typ, behövs för att säkert detektera signaler som är vaga och obestämda. Eftersom vatten erbjuder en överföringskanal med begränsad informationshastighet och för att tillåta att sensorer bortfaller behövs ett decentraliserat beslutsfattande, dvs. varje sensornod fattar ett preliminärt beslut, kommunicerar med de andra för att därefter fatta ett gemensamt beslut, dvs. konsensus uppnås. Någon enskild centralnod som är nödvändig för nätverkets funktion finns inte, tex. där ett vanligt centralt beslut skulle ha fattats.

Arbetet har bedrivits inom två delområden. Det första är distribuerad detektion som är användbart då flera kommunicerande sensorer uppfattar någonting. Detta är aktivt forskningsområde vilket bla. visas av antalet publikationer i ämnet på: 11:th International Conference on Information Fusion, i Köln 2008, vilket besöktes av en av projektdeltagarna, en översikt ges i ref. [1, 8]. Området är teoretisk komplicerat varför hjälpen från inst. för matematisk statistik vid Stockholm universitet har varit av stor betydelse. Det andra delområdet har varit att finna särdrag för klassificering, i detta fallet endast detektion, av någon typisk undervattensverksamhet som kan vara av intresse. Här har samarbetet med FoT-projektet "UV-sensorsystem för kontroll av etablerade operationsområden" varit av stort värde, bla. genom att ställa data från experiment till förfogande.

I denna rapport beskrivs det första årets arbete på distribuerad detektion. Arbetsfältet är nytt men bygger på att tidigare kunskaper utvidgas. Det första året har inneburit att beslutsalgoritmer för distribuerade nätverk har studerats och att en simuleringsmodell som simulerar ett nätverk vars uppgift är att detektera dykare har byggts upp i MATLAB. De signaler som har använts är upptagningar av verkliga dykare. För den mer teoretiskt intresserade finns rapporten FOI-R—2672—SE.

2 Bakgrund

Behoven inom dagens försvar övergår från tunga fasta installationer till snabbt utläggbara eller mobila system som kan läggas ut inom ett område som det strategiska läget för tillfället kräver. Således skall man via dykare, eller från en undervattensfarkost, ett fartyg eller ett flygplan snabbt kunna sprida ut noder som lägger sig på botten och själva upprättar ett nätverk, samt har energi nog för att kunna fungera upp till några veckor. Nätverket skall autonomt kunna upptäcka passager av intressanta mål i området, tex. ubåtar eller andra uv-farkoster, och överföra målinformation till en ledningscentral. En fördel med ett autonomt nätverk är att inte behöva binda upp analysresurser, tex. personal, i närområdet utan all processering och analys av rådata sker i sensornoderna. Ett autonomt nätverk möjliggör även dolt uppträdande vid utläggningen som kan ske med hjälp av en AUV (Autonomous Underwater Vehicle). Eftersom utläggning och efterföljande spaning samt rapportering från noderna kan ske utan att egen personal måste närvara i spaningsområdet, utsätts ingen för någon risk. Fördelarna med nätverk på botten jämfört med tex. radiobojar vid ytan är att övervakning kan ske dolt plus att sensorerna ligger mer skyddade från påsegling och bekämpning.

Ett möjligt spaningsscenario skulle kunna vara att en nod uppfattar en signal den inte kan klassificera. Den kan då kommunicera på ett dolt sätt med de närliggande noderna för att fråga om de har upptäckt något. Att redan i nuvarande läge rapportera in till någon övervakningscentral är ogörligt beroende på tidsfördröjningen för ljud i vatten samt att högre sändningseffekt erfordras på grund av längre avstånd och därmed följande röjningsrisk. Processeringen sker alltså lokalt bland ett fåtal noder. Om inget beslut ändå kan fattas om signalens ursprung kan en av noderna bestämma sig för att till exempel skicka ut ett ping vars eko kan uppfattas av flera noder och vi har därmed en multistatisk sonar. Om målet slutligen klassificeras som fientlig verksamhet skall resultatet snabbt och säkert meddelas till övervakningscentralen. Noderna övergår då till att förmedla meddelandet. Detta sker med akustisk kommunikation endera direkt från den nod som upptäckt ljudet eller via flera hopp där noderna då fungerar som reläer och förmedlar meddelandet till centralen. Man kan också tänka sig att man utanför det känsliga området använder radio.

3 Nätverk

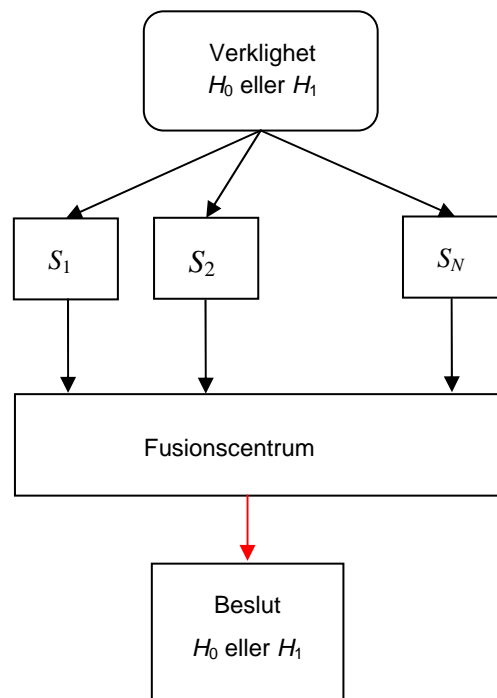
Nätverket består av ett antal spaningsnoder där varje nod också är en kommunikationslänk. Noderna arbetar för det mesta i spaningsläge, när något inträffar påbörjas kommunikation för att avgöra om något verkligt mål har påträffats, hypotes H_1 , eller ej mål, hypotes H_0 . Resultatet rapporteras till ledningscentralen och därefter återgår noderna till spaningsläget.

3.1.1 Central beslutsnod

Nätverken kan vara uppbyggda på olika sätt. En indelningsgrund är nätverk med resp. utan central beslutsnod. Antag ett nätverk där vi har stor tillgång på energi, batterikapacitet, i noderna och stor bandbredd i kommunikationsnätverket, tex. ett antal sensorer förenade med tråd. Då är det effektivaste att

noderna inte kommunicerar med varandra utan till en central beslutsnod direkt. Någon reduktion av data behöver inte göras utan sensornoderna skickar all data till beslutsnoden, som då har full kännedom om allt som uppfångats, se fig. 1. Den kan då fatta sitt beslut på så mycket data som möjligt. Inget beslut fattas i sensornoderna. Ett exempel på ett enkelt nätverk av denna typ är en hydrofonkedja som gör klassificering.

I en förenkling av det centraliserade nätverket, kan man göra en rudimentär signalbehandling och införa censur, dvs. selektera data så man inte skickar onödigt data, se tex. [3, 7]. Men fortfarande skickar noderna data till fusionscentrat där beslutet fattas.



Figur 1 Distribuerade sensornoder S_1 - S_N fångar upp signaler från verkligheten, dvs. omgivningen. Nodernas preliminära beslut skickas till fusionscentrat där ett slutligt beslut om ingen aktivitet, H_0 , eller aktivitet, H_1 , och i så fall skickas ett larm till ledningscentralen

I verkligheten gäller inte de optimala förhållanden som beskrivits. I stället gäller:

- Begränsad batterikapacitet, dvs. vi vill inte sända meddelanden alltför ofta.
- Begränsad bandbredd, dvs. vi kan bara överföra en begränsad mängd information vid varje tillfälle.
- Begränsad tillgänglighet, dvs. i undervattensnät kan vissa noder inte nå ibland.
- Trasiga noder.

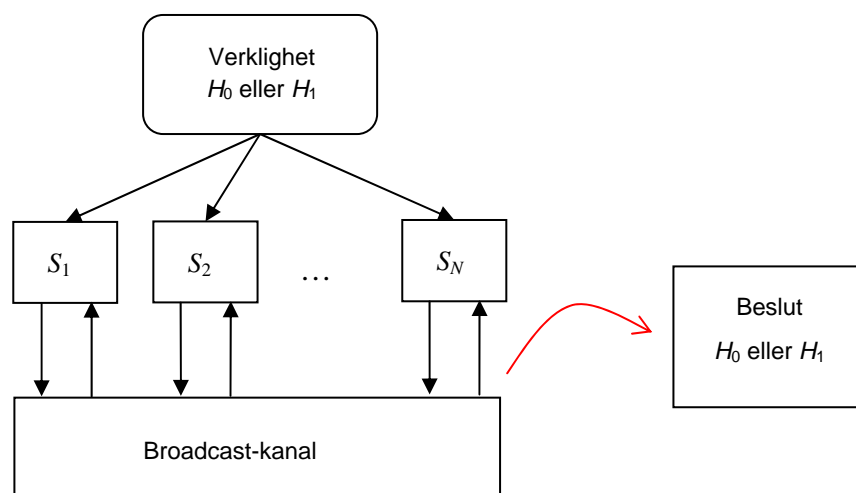
- I undervattensnät har vi lång fördröjning mellan noderna och måste därför göra en del databehandling lokalt.

Den begränsade batterikapaciteten gör att vi inte vill sända onödigt ofta, onödigt länge eller med onödigt hög uteffekt. Den begränsade bandbredden gör att vi inte kan sända hur komplicerade data som helst, dvs. en datareduktion måste till. Vi vill inte ha en speciell nod som beslutsnod. Om denna inte är tillgänglig brakar hela nätverket samman. Ovanstående mycket viktiga skäl gör att vi inte kan eller bör implementera ett nät som är idealt ur beslutssynpunkt. Den begränsade batterienergin gör också att noderna inte får sända alltför ofta. Onödig sändning måste därför förhindras med någon form av "censur", dvs. noderna skall ha en funktion som gör att de inte sänder rappakalja. Till detta är det också viktigt med ett nätverksprotokoll som är energibesparande.

Det nät som har simulerats under 2008 har endast akustiska sensornoder. Dessa är tänkta att kunna ligga sovande och har en uppvakning om något inträffar, ett ljud eller aktivitet från nätverket.

3.1.2 Decentraliserat beslut utan återkoppling

När något inträffar registreras den omgivande akustiska verksamheten och det görs en signalbehandling, vars resultat sprids till omgivande noder, ref. [4, 5]. Varje nod tar alltså emot data från de andra noderna och fattar tillsammans med sitt eget data ett preliminärt beslut om H_0 eller H_1 . Detta ligger till grund för en omröstning bland de beslutsfärdiga noderna, dvs. de som ligger så till att de skulle ha kunnat uppfatta något av aktiviteten. Om tillräckligt många röstar för H_1 skickas meddelande om detta till ledningscentralen. Man har visat att med ett sådant nät kan man nöja sig med mycket enkla meddelanden, tex. binärt, om antalet noder är tillräckligt stort. Vi har alltså ett decentraliserat nätverk där besluten fattas bland de noder som kan uppfatta aktiviteten.



Figur 2 Nätverk av den typ som studeras i detta projekt. Ett fullt distribuerat nätverk, utan central beslutsnod, där preliminära beslut flyter fram och tillbaka över en "Broadcast-kanal", dvs. en kanal som alla noder kan lyssna på. Beslut fattas när tillräckligt många noder, i vissa fall alla, är överens och larm skickas om valet faller på H_1 .

3.1.3 Decentraliserat beslut med återkoppling

I det nätverk som beskrivits i avsnitt 3.1.2 går dataflödet i en riktning. Man skulle också kunna tänka sig att varje nod omprövar sitt beslut med ledning av de andra nodernas beslut, se fig. 2. I en variant, som inte behandlas i detta projekt, kan man i stället återkoppla beslutet från någon centralnod. I vårt projekt vill vi vara utan centralnod, därför tar noderna en mätning och meddelar sina beslut till alla andra, ref. [2, 10]. När noderna har mottagit varandras beslut görs ett förnyat beslut, detta innebär en återkoppling av besluten. Eventuellt tas en ny mätning på omgivningen. Det nya beslutet distribueras ut bland noderna och en ny omprövning görs i varje nod. Detta fortgår tills konsensus har uppnåtts, vilket alltid görs efter tillräckligt många iterationer. På så sätt skulle man kunna få ett nät som har större detekterings sannolikhet men samtidigt med en viss risk att ett ”rykte sprider” sig i nätverket som därmed gör en felaktig detektion. Kan man hantera detta problem är beslutsalgoritmer med återkoppling mycket intressanta.

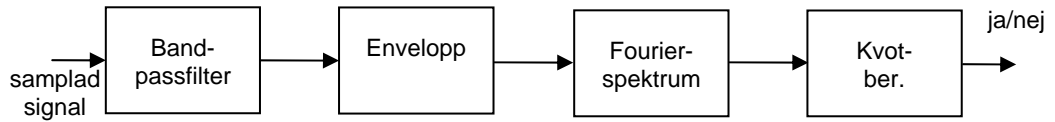
4 Särdrag

Nätverket kan användas för detektion av många olika företeelser, såsom kemiska eller biologiska inom miljöövervakning eller ubåtar, ytfartyg, dykare mm. i säkerhetssammanhang. Vi har valt att studera en företeelse där vi har gott om experimentella data att arbeta med och det är dykare. Dessa är en stor risk för fartyg som ligger ankrade och för kustnära installationer. Den idag dominerande tekniken för att detektera små undervattensmål är aktiva sonarer. Metoden fungerar inte alltid på grund av störningar i miljön. Vi har i detta projekt ännu bara studerat passiv detektering. Fördelen är att vi inte behöver sprida ut något ljud i vattenvolymen. En aktiv sändning kan göras när något misstänkt behöver studeras närmare och då kan sensornätet med fördel användas som en multistatisk sonar. En annan möjlighet att passivt detektera dykare är elektromagnetiskt. Det är naturligtvis också möjligt att utrusta nätverket med elektromagnetiska sensorer, vilket skulle stärka detekteringsmöjligheten, men det är inget som har använts vid våra försök.

Att göra en bra algoritm för klassificering bygger på att finna lämpliga särdrag för det man söker efter. Det kan vara en speciell egenskap i utseendet på signalen när föremålet passerar en elektromagnetisk sensor eller någon speciell egenskap hos det ljud som uppstår när föremålet passerar en hydrofon, eller i bästa fall båda. Särdragen spänner upp ett beslutsrum, inte nödvändigtvis linjärt, och med många oberoende och relevanta särdragsvektorer kommer det att vara lättare att separera det sökta föremålet från omgivningen. Ju fler särdrag vi har desto lättare blir det alltså att urskilja det föremål vi söker, men desto mer komplexa beräkningar, dvs. större krav på datorn och mer effektförbrukning. En lagom kompromiss måste således finnas.

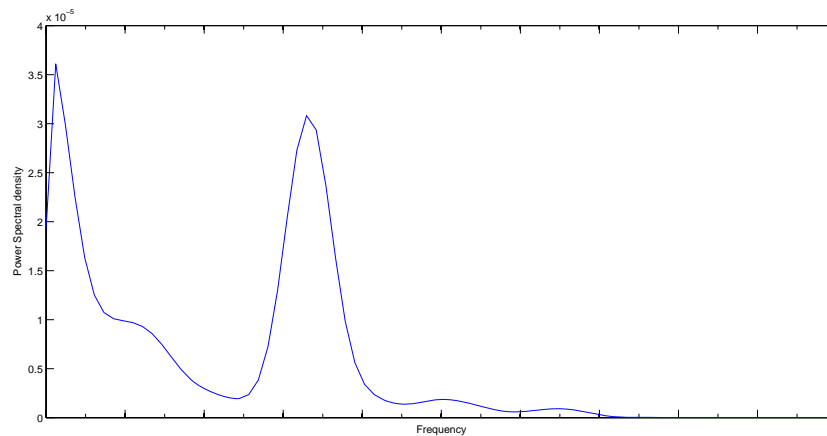
Ett särdrag för dykare kan vara deras andningsljud, ref. [9]. Det är lätt att tänka sig att andningsljudet utgör en högfrekvent signal, ungefär som ett periodiskt

återkommande brus. Detta brus bandpassfiltreras för att eliminera så mycket som möjligt av de störande omgivningssignalerna. Sedan beräknas absolutbeloppet av signalen, dvs. enveloppen. Därefter plottas signalens spektrum och en topp i spektrat framträder vid andningsfrekvensen (jfr. DEMON).



Figur 3. Blockschema på signalbehandlingen för att beräkna det särdrag som används för dykardetektering.

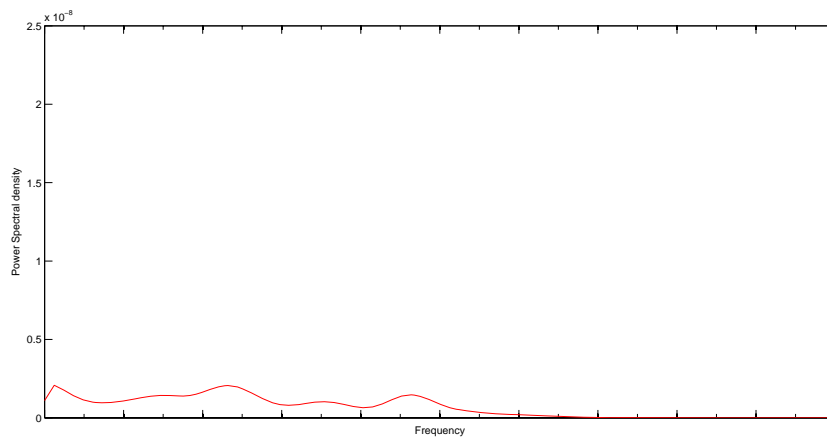
I fig. 4 visas spektrum för enveloppen¹ av den mottagna dykarsignalen. Som framgår finns en tydlig topp i spektrum vid den frekvens som motsvarar andningsfrekvensen.



Figur 4. Spektrum för signalenveloppen med dykare närvarande. Den starka toppen kommer från periodiciteten i dykarens andning.

I fig. 5 visas en hydrofonsignal som har behandlats på samma sätt men där det endast finns bakgrundsbrus. Skillnaden är stor på det som visas i figurerna 4 och 5, varför det är lätt urskilja andningssignalen mot bakgrunden. Den signal som visas här är upptagen under ganska tysta förhållanden och signal-till-brusförhållandet är alltså stort och problemet bör därför vara lätt. Experiment med tillagt brus visar att detektionen är tillförlitlig även när så mycket brus har lagts till att det med örat är svårt att upptäcka dykarljuden.

¹ Ungefär lika med signalens kontur.



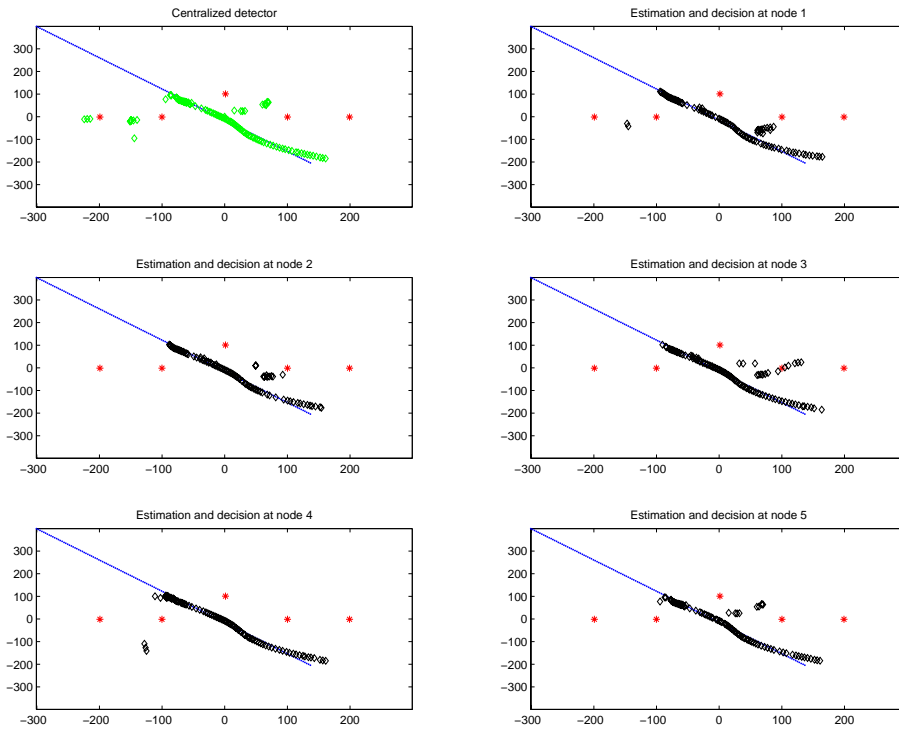
Figur 5. Spektrum för signalenvelopen utan dykare närvarande. Som framgår är skillnaden markant. I detta fall har omgivningens ljudnivå varit mycket låg varför detta kan ses som ett bästa fall. I tex. en hamn kommer störningsnivån att vara väsentligt större.

5 Resultat

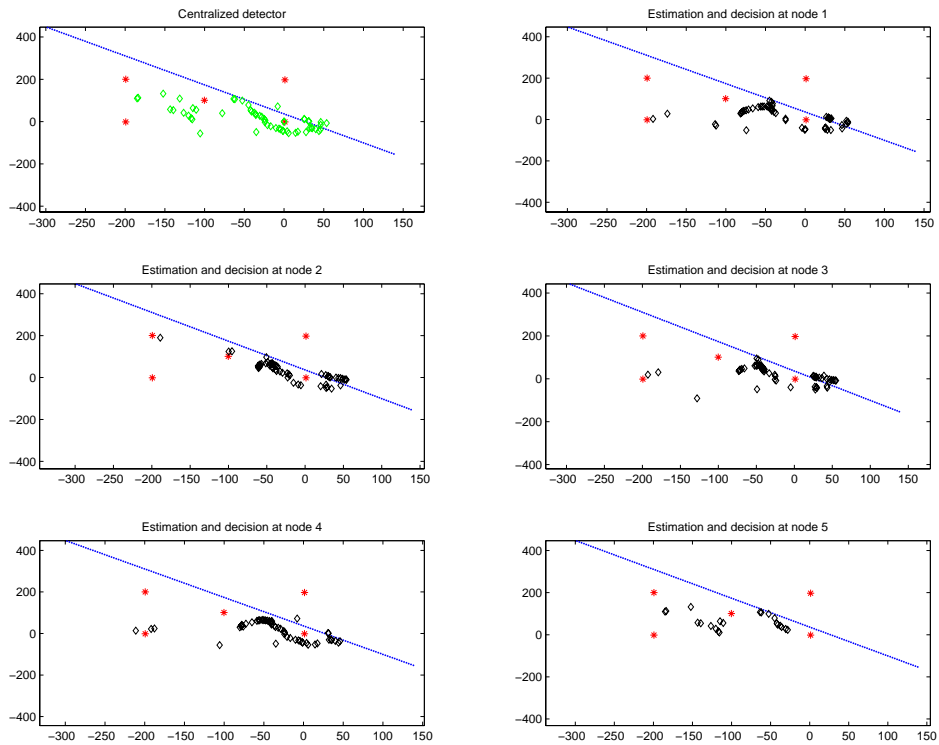
En simuleringsmodell av ett nätverk med decentraliserade beslutsalgoritmer har byggts upp i Matlab. Simuleringen innefattar:

- Simulerade signaler och brus kan tillsättas (vi arbetar på att lägga in de verkliga dykarsignalerna men har ännu inte haft tid att göra detta färdigt).
- Signalen antas svag och uppfattas endast av ett fåtal noder i nätverket.
- Kommunikationens ofullkomligheter, såsom begränsad bandbredd och slumpmässiga avbrott i kontakten mellan noder finns med i modellen.
- Skattning av sannolikhetskvoter.
- Villkor för larm. Just nu anses ett larm godkänt om en tillräckligt stor andel av de beslutsfärdiga noderna röstar för H_1 .
- Presentation av resultat. ROC kurvor kan fås som funktion av olika parametrar men också en grafik där de noder som röstar för H_1 indikeras tillsammans med det skattade målspelet.

Bland de resultat som är möjliga att få visar ett spår av detektioner för ett inträngande föremål, fig. 6 och 7. Föremålet har rört sig längs den blå linjen från vänster mot höger. Nätverket har bestått av fem noder som arrangerats som visas av de röda punkterna. Varje detektion har ritats in som en romb i figuren. Den centraliserade detektorn, längst upp till vänster, skall ge det bästa resultatet men som framgår är det endast marginellt bättre. I de övriga diagrammen visas besluten i varje nod. Dessa beslut har fattats med stöd av de omgivande detektorerna.



Figur 6. Visar en inkrättare som kommer in mot en nästan rak sensorkedja. Inkrättaren är i det här fallet ljudlig så det är inte svårt att hitta vederbörande och följa banan genom detektorkedjan.



Figur 7. I detta fall har sensornätets konfiguration ändrats till att vara en rektangel med en sensor i mitten. Källans ljudstyrka är också c:a 15 dB svagare än i föregående exempel, vilket visar sig i färre detektioner och större varians vid skatningen av spåret.

6 Fortsättning

Det arbete som har beskrivits här är resultatet av första årets arbete som har gett oss god insikt i tekniken. Det är ännu för tidigt att avgöra om metoden är lovande. Metoderna har potential att förbättras. Under nästa år kommer vi att därför både bredda och fördjupa analysen, tex kommer vi också att arbeta med andra sensorer och andra mål. Nya algoritmer tex. de med återkoppling kommer förmodligen att simuleras. Metoder för censur av data kommer att studeras närmare för att möjliggöra implementering av strömsnål utrustning. Ev. kommer något enkelt försök att kunna göras tillsammans med uv-komm-projektet. Om detta blir verklighet beror på vilken utrustning vi ev. kan få tillgång till från intressenter utanför FOI. För att sensornätverken skall vara effektiva krävs att noderna kan positioneras. Det bästa är att de positionerar sig själva under etableringsfasen av kommunikationsnätverket. En mindre tid kommer att ägnas åt problemet under 2009. Ett mycket intressant område som vi dessvärre troligtvis inte kommer att ha möjlighet att studera, men där decentraliserade beslut skulle komma till stor nytta, är att nätverket beslutar att sända ut ett ping och multistatisk mottagning, för att öka säkerheten om ev. aktivitet. Positionering är ett annat viktigt område som förmodligen inte kommer att behandlas på djupet. Det beror på hur resurserna räcker till. Dessa områden får i så fall studeras i ev. efterföljande FoT projekt.

7 Appendix

7.1 Gruppbeslut

Ett centralt område för decentraliserad detektion är team decision. För att underlätta tänkandet och för att formulera modeller kan nedanstående fem punkter vara av nytta. Beslut tagna i grupp, team decision, kan formaliseras och ha följande ingredienser, ref. [6]:

- En vektor med slumpvariabler, ξ , som beskriver all osäkerhet i problemet, tex slumpartade störningar: $\xi = [\xi_1, \dots, \xi_M]$
- En mängd med observationer $\mathbf{X}_n = [X_{1,n}, \dots, X_{L,n}]$ som relaterar sig till slumpvariablerna genom funktionen $X_{l,n} = \eta_l(\xi)$.
- En uppsättning beslutsvariabler, en per sensornod, $\mathbf{U}_n = [U_{1,n}, \dots, U_{L,n}]$.
- Strategi eller beslutsregel, ϕ , vilket ger beslutet: $U_{l,n} = \phi_{l,n}(X_{l,n}, \mathbf{U}_{n-1})$
- En förlustfunktion som anger vad som är viktigt i problemet och som därmed kommer att styra utseendet av beslutsreglerna: $Loss = L(\mathbf{U}_n, \xi)$. En typisk förlustfunktion som är optimal vid normalfördelad störning är den kvadratiska. I ett mer renodlat fall väger den tex. kostnaden av att missa en detektion mot kostnaden av falskt larm.

7.2 Klasser av sensornoder

Antag att sensor l tar sampel $X_{l,n}$ vid tidpunkten n och har beslutsregel ϕ_l och fattar det lokala beslutet $U_{l,n}$. Följande klasser av sensornoder är typiska med ökande komplexitet och effektivitet (där vi i detta projekt syftar till att uppnå den sista):

- Ingen återkoppling, inget lokalt minne:
 $U_{l,n} = \phi_{l,n}(X_{l,n})$. Mycket enkel nod som bara fattar ett beslut och skyfflar iväg detta.
- Ingen återkoppling men fullt lokalt minne:
 $U_{l,n} = \phi_{l,n}(X_{l,[1,\dots,n]})$. Lite mer avancerad nod, kommer ihåg sina tidigare mätningar och använder dem som stöd vid beslutsfattandet.
- Ingen återkoppling, begränsat lokalt minne:
 $U_{l,n} = \phi_{l,n}(X_{l,n}, U_{1,n-1}, \dots, U_{L,n-1})$. Nu måste vi också ha kommunikation mellan noderna eftersom de andra nodernas beslut används vid det lokala beslutet. Notera att här har varje nod två mängder av observationer X och U .
- Återkoppling med fullt lokalt minne och iteration i :
 $U_{l,n}^{(i)} = \phi_{l,n}(X_{l,[1,\dots,n]}, U_{1,[1,\dots,n-1]}^{(i)}, \dots, U_{L,[1,\dots,n-1]}^{(i)})$. Innan beslut fattas på varje ny insignal itereras en koncensus fram bland noderna.

8 Referenser

- [1] Akyildiz, I. F.; Pompili, D.; Melodia. T.; “Challenges for Efficient Communication in Underwater Acoustic Sensor Networks”; In Proceedings of the 2008 11th International Conference on Information Fusion, Cologne, Germany, June, 30 - July, 03 2008.
- [2] Swaszek, P.F.; Willett, P.; “Parley as an approach to distributed detection” Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on, Volume 31, Jan. 1995 Page(s):447 - 457
- [3] Appadwedula, S.; Veeravalli, V.V.; Jones, D.L.; “Decentralized Detection With Censoring Sensors” Signal Processing, IEEE Transactions on [see also Acoustics, Speech, and Signal Processing, IEEE Transactions on] Volume 56, Issue 4, April 2008 Page(s):1362 – 1373
- [4] V. Borkar and P. Varaiya. Asymptotic agreement in distributed estimation. IEEE Transactions on Automatic Control, 27(3):650 - 655, 1982.
- [5] Chamberland, J.-F.; Veeravalli, V.V.; “Decentralized detection in sensor networks“ Signal Processing, IEEE Transactions on [see also Acoustics, Speech, and Signal Processing, IEEE Transactions on] Volume 51, Issue 2, Feb. 2003 Page(s):407 – 416
- [6] Yu-Chi Ho; “Team decision theory and information structures” Proceedings of the IEEE Volume 68, Issue 6, June 1980 Page(s):644 – 654
- Tsitsiklis, J. N.; “Decentralized Detection” Advances in Statistical Signal Processing, Vol. 2, pp. 297-344.
- [7] Appadwedula, S.; Veeravalli, V.V.; Jones, D.L.; “Energy-efficient detection in sensor networks” Selected Areas in Communications, IEEE Journal on Volume 23, April 2005 Page(s):693 - 702
- [8] Chamberland, J.-F. och Veeravalli, V. V.; ”Wireless Sensors in Distributed Detection Applications”; IEEE Signal Processing Magazine, May 2007.
- [9] Stolkin, R.; Sutin, A.; Radhakrishnan, S.; Bruno, M.; Fullerton, B.; Ekimov, A.; och Raftery, M.; “Feature based passive acoustic detection of underwater threats” Proc. SPIE Vol. 6204, 620408 (May. 12, 2006)
- [10] Srinivasan, R.; “Distributed detection with decision feedback”, IEE Proceedings, part F, Dec. 1990, pp. 427-432.