

Arbetslägesrapport 2025 för FoT-projektet Undervattenskommunikation 24-26

Detta är en milstolpe för 2025 som sammanfattar genomförd verksamhet inom FoT-projektet Undervattenskommunikation 24-26 (AT.9220541.10.5) inom FoT Undervattensteknik från oktober 2024 t.o.m. september 2025.

1 Inledning

Lägesrapporten redovisar genomförd verksamhet och framkomna resultat inom det treåriga (2024 - 2026) FoT-projektet Undervattenskommunikation. Rapporten omfattar perioden oktober 2024 t.o.m. september 2025. Projektet är en fortsättning på en rad tidigare projekt, där det långsiktiga syftet är att förbättra och utveckla metoder som erbjuder effektiva och robusta lösningar för både kommunikationslänkar och kommunikationsnätverk anpassade för de undervattensområden som den svenska marinen verkar inom [1].

Mycket av utvecklingen som sker inom marin spaning drivs av tankar rörande system i samverkan och system av system. En kritisk pusselbit för denna utveckling är förmågan till kommunikation mellan systemen, vilket gör undervattenskommunikation till en viktig beståndsdel av större satsningar.

Projektet är delaktigt i eller har gränssytor mot både nationella och internationella samarbeten. Internationellt finns för närvarande ett pågående samarbete: ”Distributed Underwater Sensor Networks 2” (DUSN2) med Norge och Kanada. Projektet deltar också i Nato-gruppen ”Research Task Group IST-216: Channel Modelling and Application for Secure Underwater Acoustic Communications Waveform Assessment and Standardization”. Ett samarbete med USA är under beredning: ”Undersea Array Signal Processing and Communication” (UASPC). En ansökan, ”Asterion”, inom EDF-utlysningen UWW-SACOM (”Secured and adaptive underwater communications for uncrewed underwater systems”) har under året blivit godtaget. Nationellt finns ett aktivt samarbete inom SMaRC ”Swedish Maritime Robotics Centre”, vars fortsättning ”SMaRC 2.0” inleddes 2024. Utöver detta pågår arbete med att förbättra de av FOI utvecklade kommunikationslösningar gällande länkar och nätverk som utvecklats inom tidigare projekt. Därtill stöds även materielutvecklingsprocessen.

Under året har arbete rörande undervattenskommunikation bedrivits inom tre olika områden:

- Utveckling av kommunikationslänkar.
- Utveckling av nätverksprotokoll.
- Utveckling av ett fristående undervattensmodem.

I följande kapitel sammanfattas utfört arbete inom dessa tre områden, samt internationella samarbeten.

Titel

Memo nummer

Arbetslägesrapport 2025 för FoT-projektet Undervattenskommunikation 24-26 FOI Memo 8987

2 Utveckling av kommunikationslänkar

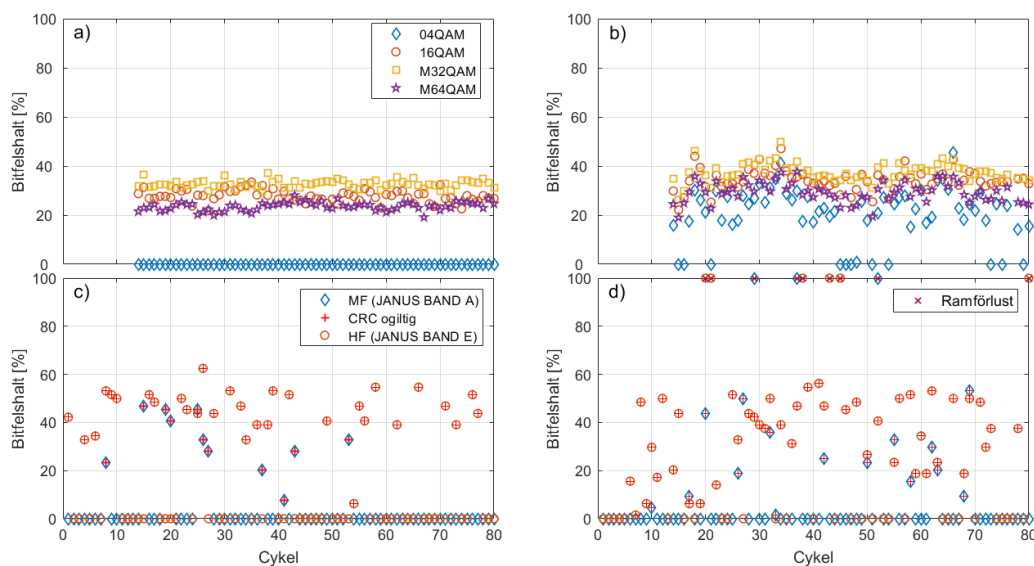
Utveckling av kommunikationslänkar innefattar arbete med kommunikationsmetoder mellan modem. Nedan presenteras arbeten där olika metoders prestanda jämförts samt en utvärdering av bitfelshalt från mätningar i fält och simulering baserat på kanalinspelningar från samma försök.

2.1 Prestandajämförelse mellan JANUS och Hermod

Under 2024 utförde Forsvarets forskningsinstitut (FFI) sjöförsök inom undervattenskommunikation i norska vatten och erbjöd medlemmarna i Nato RTG IST-216 att skicka ett antal vågformer för sändning. FOI skickade bland annat olika modulationer av FOI:s koherenta metod Hermod som har utvecklats internt under många år och bygger på enkelbärararkitektur där datapaketet är kodat med en klassisk parallell turbokod [2,3]. Modulationsschemat kan väljas fritt bland olika varianter av kvadratamplitudmodulation (eng. Quadrature Amplitude Modulation, QAM). Utöver detta delades det även en publik datadel där JANUS-paket inkluderades. JANUS är ett standardiserat kommunikationsprotokoll utvecklat av NATO Centre for Maritime Research and Experimentization (CMRE) där det fysiska lagret är baserat på frekvenshoppande binär frekvensskiftsnyckling (eng. Frequency-Hopping Binary Frequency-Shift-Keying, FH-BFSK) [4,5]. Detta avsnitt avser att presentera en jämförelse av prestanda mellan Hermod och JANUS baserat på dessa inspelningar.

Sjöförsöket innefattade två mottagarpunkter, R1 och R2, och tre frekvensband, LF, MF och HF. R1 var närmre sändaren jämfört med R2, men de absoluta avstånden är i skrivande stund okända. Data i R1 och R2 har båda klippts, i början av sändningen, när den första vågformen tas emot och är således inte synkade i tid från tidpunkten vid sändning. JANUS-paketet skickades i två olika frekvensband, MF och HF. Dessa överensstämmer med JANUS-banderna Band A (9,44–13,6 kHz) och Band E (24,75–31,25 kHz), vilka även går att finna i JANUS-standarden [5]. Hermod-paketet skickades i frekvensbandet 4–8 kHz. Totalt erhöles 67 sändningar av Hermod-paketet, och 80 sändningar av JANUS-paketet i respektive band.

Figur 1a visar bitfelshalten i procent för fyra olika modulationer med Hermod när avkodning gjorts på data mätt i R1. Endast 04QAM avkodades felritt, medan 16QAM, M32QAM och M64QAM hade bitfelshalter mellan 20–37% över samtliga sändningar. Kanalen vid R2 visade sig vara mer problematisk för Hermod, se figur 1b. Endast 11 av 67 sändningar med 04QAM avkodades felritt.



Figur 1. Bitfelshalt för Hermod och JANUS under sjöförsök 2024. Bitfelshalt för a-b) fyra olika modulationer av Hermod samt c-d) två olika band av JANUS där mottagarpunkten är a,c) R1 och b,d) R2. Rött plus indikerar inkorrekt avkodning sett till cyklisk redundanskontroll (CRC) och rött kryss indikerar att ramen inte detekterats.

Titel

Memo nummer

Arbetslägesrapport 2025 för FoT-projektet Undervattenskommunikation 24-26 FOI Memo 8987

I figur 1c-d visas en sammanställning av bitfelshalter för JANUS-paketen för de två olika banden och vid de två olika mottarpunkterna. Paketerna avkodas med generellt lägre bitfelshalt i Band A jämfört med Band E och likt Hermod avkodas fler sändningar felritt vid R1 jämfört med R2.

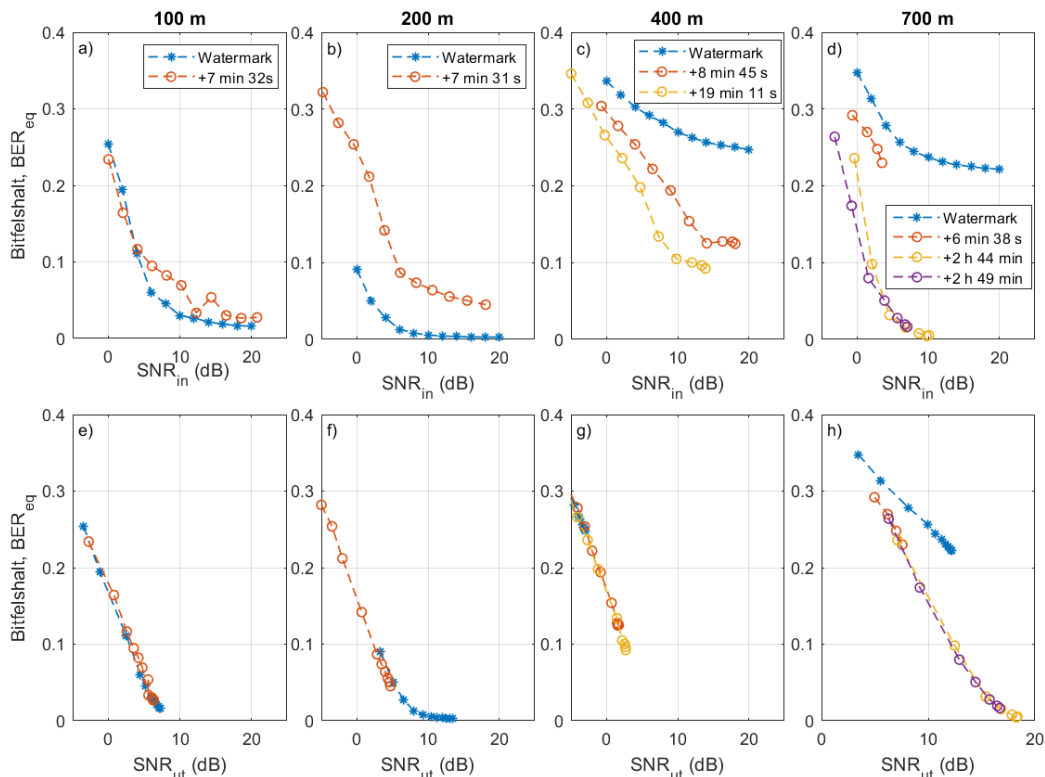
Avseende bitfelshalt efter avkodning presterar Hermod med 04QAM bättre än JANUS i mätningarna vid R1, medan JANUS fungerade bättre i alla övriga fall. Notera skillnaden i effektiv dataöverföringshastighet: ~ 1700 bits/s för Hermod 04QAM och $\sim 60\text{--}90$ bits/s för JANUS.

2.2 Jämförelse av bitfelshalt i mätning och simulering

Med det av FFI framtagna verktyget Watermark går det att simulera sändningar av signaler i inspelade kommunikationskanaler genom att använda impulssvaret från inspelningen [6]. Verktöget möjliggör att jämföra olika metoder och modulationer med samma tidsvarierande kanal. Det är dock inte givet att återspelningen av kanalen motsvarar exakt den kanal som var vid mättillfället, vilket kan resultera i att prestandamått baserat på den återspelade kanalen inte helt reflekterar hur det skulle bli i praktiken.

Paul van Walree m.fl. introducerade konceptet ”kanalåterspelningsfel” (eng. channel replay error, CRE) [7], vilket är ett värde som beror på skillnaden mellan den uppmätta och simulerade tidssignalen vid mottagaren. I praktiken är det endast probsignalen, den som utgör kanalinspelningen, som då kan jämföras mot den återspelade kanalen för att skatta CRE. Det går även att skatta måttet med syntetiska kanaler, vilket öppnar upp för skattning av CRE med godtyckliga signaler.

I denna studie har dock en enklare analys utförts, nämligen ifall trenden av bitfelshalt som funktion av signal-till-brus-förhållande (SNR) överensstämmer mellan simulerad och uppmätt data, se figur 2.



Figur 2. Analys av bitfelshalten för data simulerade i Watermark och från rådata. Bitfelshalten beräknades efter utjämnaren som funktion av SNR a)-d) före utjämnaren och e)-h) efter utjämnaren vid mätningar på olika avstånd: 100 m, 200 m, 400 m och 700 m. Blå streckad linje representerar bitfelshalten när kommunikationssignalen körs genom Watermarkkanalen. Två av sändningarna vid 700 m (+ 2 h 44 min samt +2 h 49 min) har samma tidsstämpel i dokumentationen. Tidsstämpeln för den senare har därför justerats med antagandet att den sändes direkt efter den föregående. Data kommer från hydrofon 2 i sjöförsöket UWB-14.

Titel

Memo nummer

Arbetslägesrapport 2025 för FoT-projektet Undervattenskommunikation 24-26 FOI Memo 8987

För att studera detta har kommunikationssignaler från ett sjöförsök från 2014 (UWB 2014) jämförts med samma kommunikationssignaler återspelade via Watermark. Utanför mätplats Djupviken användes en sändare och två mottagare på fyra olika avstånd för att skapa det dataset som studerats. Probsignalerna skickades under samma sjöförsök, men inte vid exakt samma tidpunkt som kommunikationssignalerna.

Bitfelshalten efter utjämnaren (BER_{eq}) studerades som funktion av SNR antingen före (SNR_{in}) eller efter (SNR_{ut}) utjämnaren för både simulerad (angivet som Watermark i teckenförklaringen) och uppmätt data. Tidsangivelsen i teckenförklaringen anger hur lång tid efter sändningen av probsignalen som den tillhörande kommunikationssignalen skickades. Som ses i figur 2 är det endast BER_{eq} som funktion av SNR_{ut} som ger en bra överensstämmelse. Kanalutjämnings prestanda är alltså en av de viktigaste egenskaperna för att skatta bitfelshalt med denna koherenta kommunikationsmetod. En intressant aspekt är SNR-försvagningen före och efter utjämnaren, vilket kan motivera till vidare analys för att avgöra ifall detta beror på skattningen av kanalens impulssvar eller av andra faktorer.

För de längre avstånden syns en större avvikelse mellan prestandamåttet vid kanalåterspelning och vid mätning, vilket kan indikera brister i kanalinspelningen i detta fall. Detta kan t.ex. bero på mätningens SNR samt val av problängd i förhållande till impulssvarets längd.

3 Utveckling av nätverksprotokoll

Utveckling av nätverksprotokoll innefattar arbete avseende hur enheter kommunicerar i ett nätverk. Nedan presenteras arbeten för att motverka många omsändningar p.g.a. kollisioner samt förbättringar av nätverksprotokollet Dflood.

3.1 CDMA-tester

Prestandan i ett nätverk av modem lider ofta av kollisioner, d.v.s. två modem kommunicerar så att deras signaler anländer samtidigt till ett annat modem. Det medför typiskt att ingen av signalerna går att avkoda korrekt, med omsändningar som följd vilket gör att datatakten genom nätverket faller. Ett sätt att förbättra datatakten beskrivs i en rapport som sammanställdes under 2025, där Code Division Multiple Access (CDMA) utnyttjades [8]. Här offras datatakt hos de enskilda länkarna mot högre robusthet vid kollisioner, vilket medför säkrare kommunikation och högre datatakt på nätverksnivå.

I studien simulerades prestanda vid några olika fall av kollisioner, dels helt överlappande respektive delvis överlappande signaler, och dels där den ena signalen är starkare än den andra. Även ljudutbredningskanalens inverkan simulerades med elva tidigare inspelade kanaler (s.k. Watermarkkanaler [6]), liksom med den grundläggande vitbruskanalen (vitt brus adderas till mottagna signaler). Kanalerna grupperades grovt efter svårighetgrad: en grupp med långsamt varierande kanaler och en med snabbt varierande egenskaper.

Med perfekt effekreglering i nätverket, d.v.s. där modemens sändeffekter regleras så att kolliderande signaler är lika starka i en mottagare, erhöles paketfelshalter i intervallet 0–5% över de långsamt varierande kanalerna. Motsvarande paketfelshalter över de besvärligare kanalerna var ca 20–60%, förutom i en kanal där paketfelshalten var hög även för en ensam signal. Då den ena signalen är starkare än den andra i en kollision, kan den ofta avkodas korrekt. Paketfelshalterna över de långsamt varierande kanalerna var maximalt 1%, och över de övriga 10–25%.

Att minst en (och oftast bara en) av signalerna kan avkodas, givet att kanalen tillåter avkodning, utgör en försämrad förutsättning för CDMA jämfört med radio, där målet i regel är att kunna avkoda båda paketen. Trots detta är CDMA baserat på de presenterade resultaten av fortsatt intresse för undervattensnätverk, då en kollisionfri väg genom nätverket kan uppstå via noder som är på korta avstånd från varandra.

Titel

Memo nummer

Arbetslägesrapport 2025 för FoT-projektet Undervattenskommunikation 24-26 FOI Memo 8987

Ett förslag till fortsatt arbete är att utveckla mottagaren så att den först avkodar den starkare signalen, och vid lyckat resultat använder vunnen information till att reducera effekten av den starkare signalen från summasignalen. Det skulle i ett andra skede öka SNR för den svagare signalen och därmed öka möjligheterna att även avkoda den korrekt.

3.2 Förbättring av Dflood

För att skapa nät med flerhoppförmåga behövs protokoll som dels avgör om en nod ska återutsända ett visst paket och dels avgör när i tiden detta ska ske. Ett vanligt protokoll för undervattensnoder, som hanterar båda dessa frågor, är Dflood [9].

Grundidén i Dflood är att alla paket ska flödas i nätet. Klassisk flödning, där alla noder återutsänder alla paket en gång, är dock kostsamt. För att reducera antalet upprepade utsändningar fördröjer därför Dflood alla noders potentiella återutsändning av mottagna paketet med en slumpmässig tid. Om en nod detekterar att en annan nod upprepar ett paket som ännu inte återutsänts av noden, ökas fördröjningen av nodens återutsändning av paketet. Om tillräckligt många andra noder har upprepat ett paket annulleras nodens återutsändning. Genom detta förfarande kan antalet återutsändningar reduceras samtidigt som risken för att flera noder simultant upprepar samma paket reduceras.

I sin nuvarande form beaktar inte Dflood tiden som modemmet kommer att vara upptaget med en sändning när sändningarna slumpas tidsmässigt. Så länge som modemets sändningstid är låg relativt den tidsmässiga spridning som Dflood introducerar är nuvarande lösning funktionell. Men för fallet där Dflood konfigureras att t.ex. använda en lägre tidsmässig spridning för att reducera fördröjningen eller om datamängden som ska överföras varierar stort, bedöms den nuvarande Dflood ha förbättringspotential. Ett arbete med att förbättra Dfloods hantering av modemets faktiska sändningstid har därför påbörjats.

4 Utveckling fristående modem

Utveckling av fristående modem innefattar arbete för att kunna använda kommunikationsmetoder i inbyggda, ofta batteridrivna, system. Nedan presenteras ett examensarbete där en specifik metod implementerats på ett batteridrivet system samt ett mer övergripande arbete där en kommunikationsarkitektur har tagits fram.

4.1 Examensarbete

Under 2025 har ett examensarbete utförts inom utvecklingen av ett fristående modem [10]. Detta är det fjärde examensarbetet inom FoT Undervattenskommunikation under de senaste tre åren. Tidigare har mottagarkomponenterna digitalisering, detektor och avkodare studerats, se figur 3a. Syftet med årets examensarbete var att översätta en synkroniseringsalgoritm från MATLAB till C, för att möjliggöra exekvering på en mikrokontroller. Den mikrokontroller som användes var STM32H7A3ZIQ. Koden översattes framgångsrikt vilket verifierades genom simuleringar i Watermark [6], där det bekräftades att C-versionen gav likvärdiga resultat som MATLAB-koden.

Vidare utvärderades algoritmens prestanda genom att analysera dess förmåga att avkoda meddelanden. Arbetet omfattade även implementering av gränssnitten mellan de fyra mottagarkomponenterna, se figur 3a. Det verifierades att implementationen av gränssnitten lyckats.

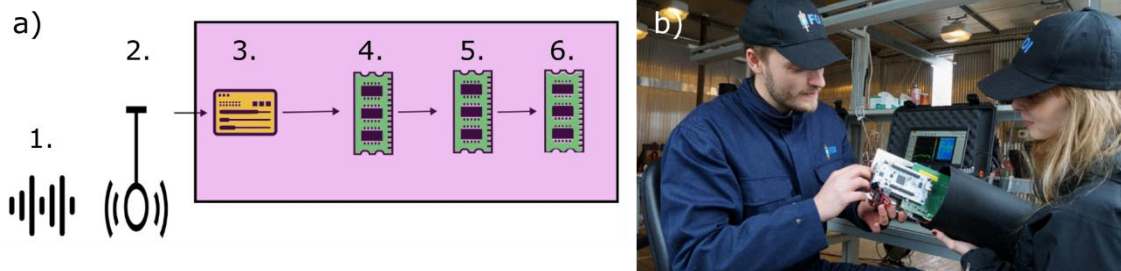
För att säkerställa systemets prestanda genomfördes mätningar i både tanklab och Djupviken, se figur 3b. Resultaten visade att systemet fungerar. Vidare har digitaliseringskortet uppdaterats med ett nytt filter och skadade komponenter har ersatts. Mjukvaran för digitaliseringskortet har uppdaterats och den kan nu sända vidare insamlad data till infångningskortet. Det finns nu två kompletta system, vilket möjliggör experiment där de två systemen kommunicerar med varandra.

Titel

Memo nummer

Arbetslägesrapport 2025 för FoT-projektet Undervattenskommunikation 24-26 FOI Memo 8987

Härnäst bör ett försök med kommunikation mellan modemerna på längre avstånd genomföras. En övergripande strömförbrukningsanalys bör också genomföras då modemerna ska drivas med batterier och kunna anslutas till de bottenplacerade sensorer, benämnda NILUS [11], som i nuvarande konfiguration använder kommersiella modem.



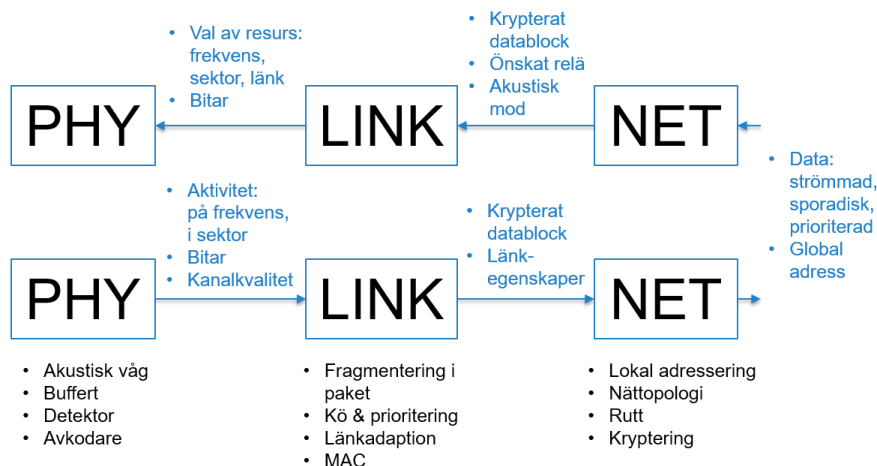
Figur 3. Arbete med det fristående modemerna. a) Visualisering av de olika mottagarkomponenterna: 1: akustisk puls, 2: hydrofon, 3: digitalisering, 4: detektor, 5: synkronisering och 6: avkodning. b) Arbete med montage av delsystemen i modemets undervattenskanister i Djupviken i maj 2025.

4.2 Kommunikationsarkitektur och ramverk

Under året har ett arbete påbörjats för att stärka FOI:s praktiska förmåga till akustisk undervattenskommunikation. Syftet med detta har varit att förbättra möjligheten till experimentell verksamhet, i synnerhet på nätverksnivå, stärka samarbetet inom gruppen mellan medarbetare som arbetar med länkar och nätverk, samt att underlätta framtida transferprojekt till försvarsmakten.

En viktig aspekt är synen på och hanteringen av *mjukvara*. FOI:s forskning inom akustiska länkar har historiskt stöttats av forskningskod i MATLAB, medan nätverksforskningen har haft en mer praktisk tillämpning i åtanke och skrivits i språket C++. Det finns ett behov av två mjukvaruspar: ett som riktar sig mot forskning på lägre TRL-nivå där det är viktigast att snabbt utvärdera en ny idé, och ett där en mer mogen idé integreras i ett större ramverk som kan användas i fält. I det senare fallet förbättras nyttjandet av personalresurser om gruppen förhåller sig till *ett* programmeringsspråk. Valet har landat på C++ eftersom FOI redan har bibliotek för att skapa och simulera undervattensnätverk. Utöver detta har språket en lång historia med god tillgänglighet av avancerade signalbehandlingsbibliotek och det lämpar sig för inbyggda system som kräver beräknings- och minneseffektiv implementation.

Ett led i detta arbete har varit att skapa en kommunikationsarkitektur (arbetsnamn FOI-ustack) där gruppen identifierar typiska moduler och definierar tydliga gränssnitt mellan dem, se figur 4. Behovet att definiera en egen arkitektur motiverades även av diskussionerna i IST-216.



Figur 4. Övergripande struktur av FOI-ustack.

Titel

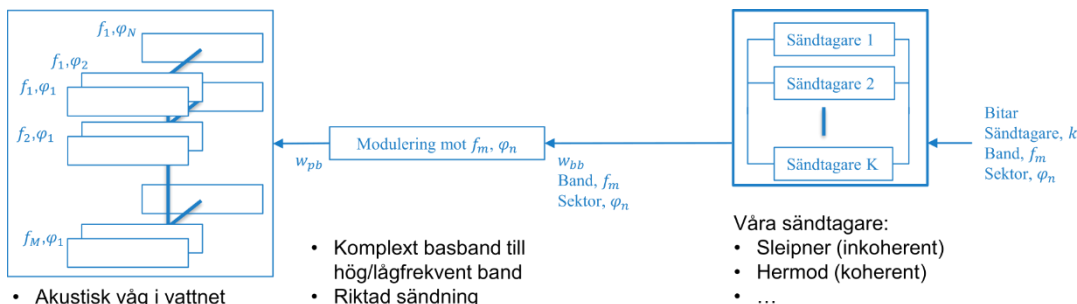
Memo nummer

Arbetslägesrapport 2025 för FoT-projektet Undervattenskommunikation 24-26 FOI Memo 8987

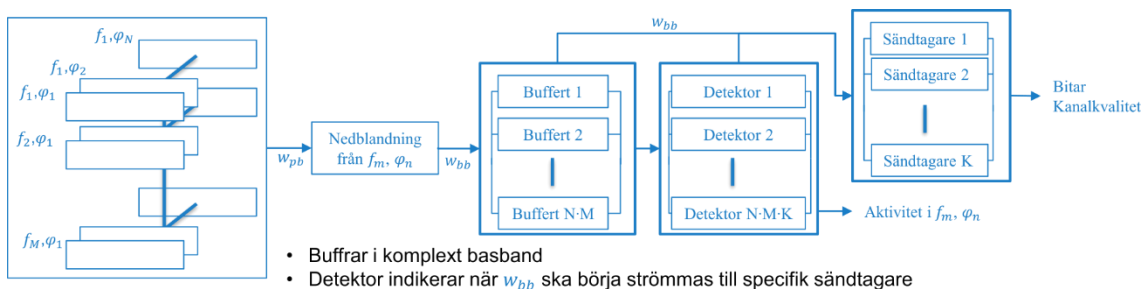
Den länkforskning som historiskt utförts på FOI ingår i vad som kallas för det fysiska lagret (PHY) inom nätverksterminologi. Detta lager expanderas enligt figur 5 och figur 6 för modemets inkommande och utgående signaler.

Den arkitektur som här beskrivits är tillräckligt allmän för att stötta de forskningsidéer som FOI är intresserat av att utvärdera i framtiden. Baserat på arkitekturen FOI-ustack har ett arbete påbörjats för att skapa ett enat ramverk i C++ (arbetsnamn FOI-unet) genom utförandet av följande arbetsuppgifter:

- Automatisk konvertering av FOI:s koherenta metod Hermod från MATLAB till C med verktyget MATLAB Coder.
- Implementera ickekoherent frekvensmodulering (arbetsnamn Sleipner), baserat på [12].
- Implementera ett gränssnitt mot kanalsimulatorens Watermark för att utvärdera implementationen av Hermod och Sleipner.
- Skapa ett gränssnitt mot de kommersiella Subnero-modem som används av FOI och integrera FOI:s existerande ramverk för lagren LINK och NET. Syftet är att på sikt också integrera dessa med en egen implementation av PHY.



Figur 5. Det fysiska lagrets (PHY) struktur vid sändning.



Figur 6. Det fysiska lagrets (PHY) struktur vid mottagning.

5 Internationella samarbeten

I detta kapitel sammanfattas arbeten inom de internationella samarbeten som projektet arbetar inom.

5.1 DUSN2

Inom DUSN2-samarbetet med DRDC (Kanada) och FFI (Norge) genomfördes 2024 ett försök i Portugal, Repmus 24 ("Robotic experimentation and prototyping using maritime uncrewed systems"), tillsammans med FoT Utläggbara UV-sensorsystem. Tyvärr hade DRDC inte möjlighet att delta vid försöket, men FOI deltog med en kommunikationsboj (gateway, GW) samt tre sensor-noder och FFI med en GW samt två noder. I det här avsnittet ges en översiktlig analys av kommunikationsprestandan under försöket i ett nätverk med fem stycken NILUS sensor-noder samt en GW. Analysen har delat in försöket i tre delperioder då FOI:s alla sensor-noder var i vattnet, se tabell 1. De

Titel

Memo nummer

Arbetslägesrapport 2025 för FoT-projektet Undervattenskommunikation 24-26 FOI Memo 8987

delar av försöket då våra sensornoder befann sig på land har uteslutits och utgör brytpunkterna mellan de perioder som analyserats. Analysen fokuserar på hur stor andel av paketen som kommit fram (Packet Delivery Ratio , PDR). Det var inte möjligt att analysera fördröjningar baserat på sensornodernas interna loggar då tidsstämpling av pakettmottagningar i GW inte var synkroniserad med bottenodernas tidsstämplar. Även andel mottagna paket från FFI:s två NILUS-noder, N2 och N14 redovisas.

Den första perioden av försöket är definierad som tiden från att alla noder lagts ut första gången till dess att bärgning av noder för batteribyte påbörjas. Perioden är 71,2 timmar lång vilket innebär att noderna i snitt har genererat ca 2 applikationspaket per timme och nod under perioden, vilket genererat drygt 12–13 sändningar per nod och timme i vattnet.

Tabell 1. Översiktlig nätverksstatistik från REPMUS 2024. Statistiken visar antal applikationspaket (#pkt), antal sändningar (#Tx) och andel av paketen som kommit fram till gateway (Packet Delivery Ratio , PDR). Tidsangivelserna avser period 1: mellan 11/9 9:34 och 14/9 8:50, period 2, mellan 15/9 10:24 och 18/9 8:40 och period 3: mellan 18/9 12:12 och 19/9 16:45. Tidszon: UTC.

	Period 1			Period 2			Period 3		
	#pkt	#TX	PDR	#pkt	#TX	PDR	#pkt	#TX	PDR
N10	163	938	0,87	149	931	0,95	89	489	0,96
N11	145	889	0,94	145	880	0,95	96	519	0,95
N12	140	874	0,88	121	890	0,91	69	481	0,97
GW	146	971	N/A	95	740	N/A	94	464	N/A
N14	70	522	0,94	177	932	0,73	90	456	0,74
N2	162	901	0,99	170	1014	0,9	87	539	0,92

Den andra perioden är definierad som tiden från att FOI:s noder lagts ut efter batteribyte till dess att GW-noden behövde servas. Den andra perioden var ca 70 timmar lång och antalet sändningar var i paritet med den första perioden.

Period 3 är definierad som tiden från att GW lagts ut efter service till dess att GW:s batteri tagit slut. Den tredje och sista perioden var ca 28,5 timmar lång och under denna period var antalet applikationspaket som genererades och antalet sändningar i vattnet som det ledde till något högre: i snitt ca 3 applikationspaket per nod och timme vilket genererat ca 17 sändningar i vattnet per nod och timme. Trots att trafiklasten i medel var högre under denna period var andelen paket som kom fram till GW något högre än föregående period.

Som sammanfattning noteras att de perioder då alla FOI:s noder var i vattnet förefaller nätverkskommunikationen ha varit mycket robust vilket resulterat i att ca 90–95% av paketen från FOI:s bottenoder kommit fram till GW. Jämfört med ett internt FOI-försök med endast tre noder [13] var antalet sändningar per paket i detta försök nästan dubbelt så många. Det är förväntat att antal sändningar per paket ökar med antalet noder i nätverket. Inför kommande försök bör det undersökas hur bättre tids-synkronisering av kommunikationsloggar i GW och bottenoder kan åstadkommas för att möjliggöra analys av nätverksfördröjningar.

Under 2026 planeras åter försök i Repmus med fokus på aktiv multistatisk spaning baserat på en separat sändare samt bottenplacerade sensornoder av NILUS-typ som mottagare och akustisk undervattenskommunikation dem emellan. I FoT-plan 25-27 står att det kan bli aktuellt att förlänga DUSN 2 med 1-2 år, men det bedöms fördelaktigare att i fortsättning bedriva detta samarbete inom TA-40 tillsammans med ytterligare samarbetspartners från Tyskland och Nederländerna. Hemställan gällande detta har skickats till FM i början av oktober.

Titel
Arbetslägesrapport 2025 för FoT-projektet Undervattenskommunikation 24-26

Memo nummer
FOI Memo 8987

5.2 IST-216

FOI deltar i en arbetsgrupp inom Nato, IST-216, som försöker definiera ett ramverk för att utvärdera prestandan hos akustisk undervattenskommunikation. Denna uppgift är tekniskt svår och metodiken är inte lika etablerad för utvärderingen av nätverk som för vågformer. Arbetet försåras även av en oenighet mellan forskare som arbetar med länkar och forskare som arbetar med nätverk, samt att flera aktörer förespråkar lösningar baserat på nationella intressen.

Gruppens tredje möte hölls i Hel, Polen, under våren 2025. FOI presenterade två förslag kring utvärdering baserad på empirisk data:

- En standardisering av insamlingsdata vid sjöförsök med undervattensnätverk, vilket skulle möjliggöra standardiserade nätverkssimulatorer på empirisk data.
- Tre länklagermodeller samt definitioner av vad dessa kallas beroende på hur de underliggande lagren (PHY-LINK) representeras i en nätverkssimulering (NET). Dessa definitioner möjliggör att beskriva vad som ska ingå i standarden för en länklagermodell.

Förslagen diskuterades inte tillräckligt på mötet i Hel och ett riktat möte hölls därför i september 2025. Förslagen bemöttes generellt positivt, med förbehåll att vissa detaljer kan behöva justeras. I förslaget om standardiserad insamlingsdata har FOI föreslagit att information om en rimlig kollisionsmodell måste ingå, vilket ansågs vara den viktigaste nya idén. FOI inväntar nu skriftliga kommentarer från samtliga parter så att en justerad version kan läggas på bordet för omröstning. Ett annat förslag som lagts i år är standardisering av länkmetriker, samt filformat för att spara dessa.

5.3 Asterion

”Adaptive and secure technology enabling reliable and integrated opto-acoustic underwater networks”, Asterion, är ett treårigt EDF-projekt inom säker undervattenskommunikation som startar 2026. Projektet leds av TNO, består av 24 partners från nio länder och är till del en fortsättning på EDA-projektet SALSA (2018-2022). Den totala budgeten är på 24 000 k€ varav FOI:s del är ca 840 k€. Projektet är ett forskningsprojekt som inom EDF innebär full kostnadstäckning från EDF. Projektet syftar till att utveckla säker undervattenskommunikation utifrån akustisk och optisk signalering. Arbetet i projektet är uppdelat i fyra huvuduppgifter: akustisk ”ryggrad” (eng. ”backbone”), akustiska och optiska länkar, säkerhet samt arkitektur, se nedan. Utöver dessa fyra huvuduppgifter deltar FOI i scenarioarbete samt en slutdemonstration där ett ”system av system” ska testas i Horten, Norge. FOI:s roll i slutdemonstrationen är att utarbeta scenariot samt utvärdera hur väl adaptionsalgoritmer fungerar under försöket.

Akustisk ryggrad

Arbetet inom denna uppgift bygger vidare på den kommunikationslösning som togs fram inom EDA-SALSA som är en adaptiv nätverkslösning med medellång räckvidd. Arbetet i denna del av projektet syftar till att förbättra adaptionsalgoritmer som togs fram i EDA-SALSA och utvärdera dessa med simuleringar. En stor del av FOI:s bidrag är inom detta arbetspaket.

Akustiska och optiska länkar

Inom denna uppgift bedrivs arbete kring andra länktekniker än de som användes i SALSA med fokus på robusta akustiska metoder för lång räckvidd, akustiska länkar med hög dataakt över begränsad räckvidd samt optiska länkar med mycket hög dataakt över kort räckvidd. FOI bidrar med robusta, ickekoherenta akustiska metoder och utvärdering av olika länkprotokoll, med hjälp av exempelvis Watermark.

Säkerhet

Inom denna uppgift studeras hur säkerhetslösningar på olika lager i kommunikationsstacken ska implementeras och hur säkerhetslösningar (krypton) behöver anpassas för att fungera över den begränsade undervattenskanalen. FOI arbetar inte med att ta fram säkerhetslösningar, men bidrar med att analysera hur de föreslagna lösningarna påverkar kommunikationsprestandan. FOI skall också bidra

Titel
Arbetslägesrapport 2025 för FoT-projektet Undervattenskommunikation 24-26

Memo nummer
FOI Memo 8987

med vilka krav FM kan komma att ställa för att kunna skicka sekretessklassificerad information i dessa nätverk. Här behövs samverkan med FM.

Arkitektur

I den sista huvuduppgiften ska en övergripande kommunikationsarkitektur utarbetas och metoder för val av kommunikationsmod (akustisk eller optisk, hög dataakt eller lång räckvidd), automatisk adaptation av kommunikationsparametrar samt integrering av säkerhetslösningar ska tas fram. FOI bidrar till att utvärdera hur multimodalitetsalgoritmen ska kopplas samman med de akustiska kommunikationsmodernerna samt hur den samverkar med applikationslagret.

5.4 UASPC

UASPC ("Undersea Array Signal Processing and Communication") är ett bilateralt samarbete med USA som är under beredning och innefattar dels signalbehandlingsutveckling avseende hydroakustiska antenner, dels utveckling av robusta och dopplerresistenta vågformer och kommunikationsmetoder. Nuvarande status är att Naval Research Laboratory (NRL) arbetar för att överlämna ett avtalsutkast till Navy International Programs Office (NIPO) som ska förhandla avtalet, likt förra årets arbetslägesrapport [1]. Då avtalet inte gått vidare från NRL är det i dagsläget troligt att samarbetet tidigast kan starta i slutet av 2026.

6 Referenser

1. M. Svedendahl, "Arbetslägesrapport 2024 för FoT-projektet Undervattenskommunikation 24-26", FOI Memo 8621, 2024.
2. I. Karasalo, T. Öberg, B. Nilsson, and S. Ivansson, "A single-carrier turbo-coded system for underwater communications". IEEE Journal of Oceanic Engineering, 38(4):666–677, 2013.
3. T. Öberg, B. Nilsson, N. Olofsson, M. L. Nordenvaad, and E. Sangfelt, "Underwater communication link with iterative equalization", In OCEANS 2006, pages 1–6, 2006.
4. J. Potter, J. Alves, D. Green, G. Zappa, I. Nissen, and K. McCoy, "The JANUS underwater communications standard", 2014 Underwater Communications and Networking (UComms), Sestri Levante, Italy, 2014.
5. NATO Standardization Office (NSO), "ANEP-87 Digital underwater signalling standard for network node discovery & interoperability", Edition A, Version 2, 27-02-2024.
6. P. van Walree, R. Otnes och T. Jensenrud, "The watermark manual and user's guide" Forsvarets Forskningsinstitut, Horten, Norway, FFI report 2016/01378, 2016.
7. P. van Walree, F. X. Socheleau, "Initial investigation of underwater acoustic channel replay errors", 2024 Seventh Underwater Communications and Networking Conference (UComms), 2024.
8. B. Nilsson, V. Lidström, "DS-CDMA för undervattensnätverk – inledande studie", Totalförsvarets forskningsinstitut FOI, FOI-D--1409--SE, 2025.
9. R. Otnes and S. Haavik, "Duplicate reduction with adaptive backoff for a flooding-based underwater network protocol", 2013 MTS/IEEE OCEANS - Bergen, Bergen, Norway, 2013.
10. V. Flodin, "Dolt samband under vattenytan : Synkroniseringens roll i mottagaren", FOI-S--7007--SE, 2025.
11. R. Otnes, "NILUS – An underwater acoustic sensor network demonstrator system," Proc. 10th Int. Mine Warfare Symp., Monterey, CA, USA, 2012.
12. V. Lidström, "On the Design of Noncoherent Acoustic Underwater Communication", PhD dissertation, KTH Royal Institute of Technology, 2023.
13. Andersson, M.H., Komulainen, A., Svedendahl, M., Trägårdh, M., Zetterberg, P., Petrović Wängerd, P. "Försöksrapport NILUS – April 2021 i Djupviken", FOI-DH--0420--SE, 2023.