

*Phil. Trans. R. Soc. A* (2012) **370**, 158–175

doi: 10.1098 / rsta.2011.0214

## Reti di sensori subacquei: applicazioni, progressi e sfide

B Y J OHN H EIDEMANN<sup>1</sup>, \*, M ILICA S TOJANOVIC<sup>2</sup> AND M ICHELE Z ORZI<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *Istituto di scienze dell'informazione, University of Southern California,*

*Marina del Rey, CA, USA*

<sup>2</sup> *Dipartimento di Ingegneria Elettrica e Informatica, Northeastern University,*

*Boston, MA, USA*

<sup>3</sup> *Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione, Università di Padova, Ferrara, Italia*

Questo documento esamina i principali approcci e sfide nella progettazione e implementazione di reti di sensori wireless subacquei. Riassumiamo le applicazioni chiave e i principali fenomeni legati alla propagazione acustica e discutere come influenzano la progettazione e il funzionamento di sistemi di comunicazione e protocolli di rete a vari strati. Forniamo anche una panoramica dell'hardware di comunicazione, banchi di prova e simulazione strumenti a disposizione della comunità di ricerca.

**Parole chiave:** comunicazione acustica subacquea; reti di sensori subacquei; acustico  
modem; alta latenza; efficienza energetica; progettazione del protocollo

### 1. Introduzione

La trasmissione di informazioni senza fili attraverso l'oceano è uno dei fattori abilitanti tecnologie per lo sviluppo di futuri sistemi di osservazione degli oceani e reti di sensori. Le applicazioni del rilevamento subacqueo vanno dall'industria petrolifera all'acquacoltura e includono il monitoraggio degli strumenti, il controllo dell'inquinamento e il clima registrazione, previsione di disturbi naturali, missioni di ricerca e rilevamento e studio della vita marina.

I sistemi di rilevamento wireless subacquei sono previsti per essere autonomi applicazioni e controllo di veicoli subacquei autonomi (AUV) e come oltre ai sistemi cablati. Ad esempio, sono in corso osservatori oceanici cablati costruito su cavi sottomarini per distribuire una vasta rete di sensori in fibra ottica (telecamere, sensori di onde e sismometri) che coprono migliaia di fondo oceanico [1]. Questi i cavi possono supportare punti di accesso alla comunicazione, proprio come una base cellulare le stazioni sono collegate alla rete telefonica, consentendo agli utenti di spostarsi e comunicare da luoghi dove i cavi non possono raggiungere. Un altro esempio è cablato sommergibili, noti anche come veicoli telecomandati (ROV). Questi veicoli, che possono pesare più di 10 tonnellate metriche, sono collegati alla nave madre da un cavo che può estendersi per diversi chilometri e fornire elevata potenza al

\* Autore per corrispondenza ([johnh@isi.edu](mailto:johnh@isi.edu)).

Un contributo di 11 al tema "Algoritmi e applicazioni di reti di sensori".

## Pagina 2

estremità remota, insieme a segnali di comunicazione ad alta velocità. Un esempio popolare di un tandem ROV / AUV è la coppia di veicoli Alvin / Jason schierati dal Woods Hole Oceanographic Institution (WHOI) nel 1985 per scoprire il Titanic. Come i veicoli sono stati anche determinanti nella scoperta di prese d'aria, sorgenti idro-termiche di acqua estremamente calda sul fondo dell'oceano profondo, che ha rivelato forme di vita diversa da tutte le altre precedentemente conosciute. Le prime prese d'aria sono state trovate in la fine degli anni '70 e se ne stanno ancora scoprendo di nuovi. L'importanza di tale scoperte è paragonabile solo alle missioni spaziali, e così è la tecnologia li sostiene.

Oggi sia la tecnologia dei veicoli che la tecnologia dei sensori sono mature abbastanza per motivare l'idea di reti di sensori subacquei. Per trasformare questa idea nella realtà, però, bisogna affrontare il problema della comunicazione. Sott'acqua i sistemi di comunicazione oggi utilizzano principalmente la tecnologia acustica. Complementare tecniche di comunicazione, come l'ottica [2, 3] e radiofrequenza [4], o anche la comunicazione elettrostatica [5], sono stati proposti per collegamenti a corto raggio (tipicamente 1–10 m), dove può essere la loro larghezza di banda molto elevata (MHz o più) sfruttato. Questi segnali si attenuano molto rapidamente, entro pochi metri (radio) o decine di metri (ottiche), che richiedono antenne ad alta potenza o grandi. Acustico le comunicazioni offrono portate più lunghe, ma sono vincolate da tre fattori: limitate e larghezza di banda dipendente dalla distanza, propagazione multipercorso variabile nel tempo e bassa velocità del suono [6, 7]. Insieme, questi vincoli si traducono in una comunicazione canale di scarsa qualità e alta latenza, combinando così gli aspetti peggiori di canali radio mobili e satellitari terrestri in un mezzo di comunicazione di estrema difficoltà.

Tra i primi sistemi acustici sottomarini c'era il comunicatore sottomarino sistema cationico sviluppato negli Stati Uniti intorno alla fine della seconda guerra mondiale. Utilizzava la modulazione analogica nella banda 8-11 kHz (ampiezza della banda laterale singola modulazione). Da allora la ricerca è avanzata, spingendo il rilevamento della modulazione digitale tecniche all'avanguardia delle moderne comunicazioni acustiche. In questo momento, in commercio sono disponibili diversi tipi di modem acustici, tipicamente offerti fino a pochi kilobit al secondo (kbps) su distanze fino a pochi chilometri. Sono state dimostrate velocità di trasmissione considerevolmente più elevate, ma questi risultati lo sono ancora nel dominio della ricerca sperimentale (ad es. [8, 9]).

Con i progressi nella tecnologia dei modem acustici, la ricerca è passata a l'area delle reti. Le principali sfide sono state identificate nell'ultimo decennio, puntando ancora una volta sulle differenze fondamentali tra acustico e radio propagazione. Ad esempio, i segnali acustici si propagano a 1500 ms<sup>-1</sup>, causando ritardi di propagazione fino a pochi secondi su pochi chilometri. Con un po' velocità dell'ordine di 1000 bps, i ritardi di propagazione non sono trascurabili rispetto alle tipiche durate dei pacchetti, una situazione molto diversa da quella che si trova nella radio reti basate. Inoltre, i modem acustici sono tipicamente limitati a half-duplex operazione. Questi vincoli implicano che la progettazione del protocollo attenta all'acustica può farlo fornire migliori efficienze rispetto all'applicazione diretta dei protocolli sviluppati per reti terrestri (ad es. 802.11 o protocollo di controllo della trasmissione (TCP)). Nel Inoltre, per le reti di sensori ancorati, l'efficienza energetica sarà altrettanto importante come nelle reti terrestri, poiché la batteria si ricarica centinaia di metri più in basso la superficie del mare è difficile e costosa. Infine, strumenti subacquei (sensori, robot, modem e batterie) non sono né economici né usa e getta. Questo fatto potrebbe essere la caratteristica più importante che (almeno per ora)

## Pagina 3

160

J. Heidemann et al.

distingue le reti di sensori sottomarini dalla loro controparte terrestre e cambia radicalmente molti paradigmi di progettazione della rete che altrimenti sarebbero presi per scontato.

Anche se oggi non esistono reti di sensori subacquei regolarmente funzionanti, il loro sviluppo è imminente. Applicazioni che motivano questi sviluppi sono considerati nel §2. I sistemi sottostanti includono flotte di *cooperazione* veicoli autonomi (in cui i veicoli hanno la capacità di rispondere a uno un altro, non solo ai comandi di supervisione di un'autorità centrale che equivale a "passare dalla missione A alla missione B") e dispiegabile a lungo termine reti di sensori montate sul fondo. Ricerca attiva che alimenta questo sviluppo è l'argomento principale del nostro articolo. In §3, descriviamo le questioni tecniche chiave e nuovi approcci di ricerca che derivano dalla revisione dei presupposti tradizionali e sfruttando l'ottimizzazione cross-layer sia tra strati adiacenti che in tutto l'intero stack di protocolli, dall'applicazione al collegamento fisico. Anche noi descrivere l'hardware attualmente disponibile e discutere gli strumenti per la modellazione e simulazione, così come banchi di prova.

## 2. Applicazioni di rilevamento subacqueo

La necessità di percepire il mondo sottomarino guida lo sviluppo della subacquea reti di sensori. Le applicazioni possono avere requisiti molto diversi: fisso o mobile, di breve o lunga durata, migliore sforzo o vita o morte; questi requisiti possono risultare in diversi modelli. Descriviamo quindi diversi tipi di distribuzioni, classi di applicazioni e diversi esempi specifici, attuali e speculativi.

### ( a ) Distribuzioni

La mobilità e la densità sono due parametri che variano a seconda del tipo di implementazioni di reti di sensori sottomarini. Qui ci concentriamo sul wireless reti sottomarine, anche se c'è un lavoro significativo in subacquea cablata osservatori, dalle reti militari del sistema di sorveglianza del suono negli anni '50, alla recente iniziativa Ocean Observatories [10].

La Figura 1 illustra diversi modi per distribuire una rete di sensori sottomarini. Le reti sottomarine sono spesso *statiche*: singoli nodi attaccati a banchine, a boe ancorate o al fondo marino (come nei sensori del fondo marino cablati o wireless in figura 1). In alternativa, le reti sottomarine *semimobili* possono essere sospese da boe schierate da una nave e utilizzate temporaneamente, ma poi lasciate all'interno posto per ore o giorni [12]. (I sensori ormeggiati nella figura 1 possono essere a breve termine distribuzioni.) Le topologie di queste reti sono statiche per lunghi periodi, consentendo l'ingegneria della topologia di rete per promuovere la connettività. Tuttavia, la connettività di rete può ancora cambiare a causa del movimento su piccola scala (come una boa precessi sul suo ancoraggio) o alla dinamica dell'acqua (come correnti, onde superficiali o altri effetti cambiano). Quando è alimentato a batteria, le distribuzioni statiche possono essere energia costretto.

Le reti sottomarine possono anche essere *mobili*, con sensori collegati agli AUV, alianti a bassa potenza o drifter non motorizzati. La mobilità è utile per massimizzare il sensore copertura con hardware limitato, ma solleva sfide per la localizzazione e mantenere una rete connessa. L'energia per le comunicazioni è abbondante AUV, ma è una preoccupazione per alianti o drifter.

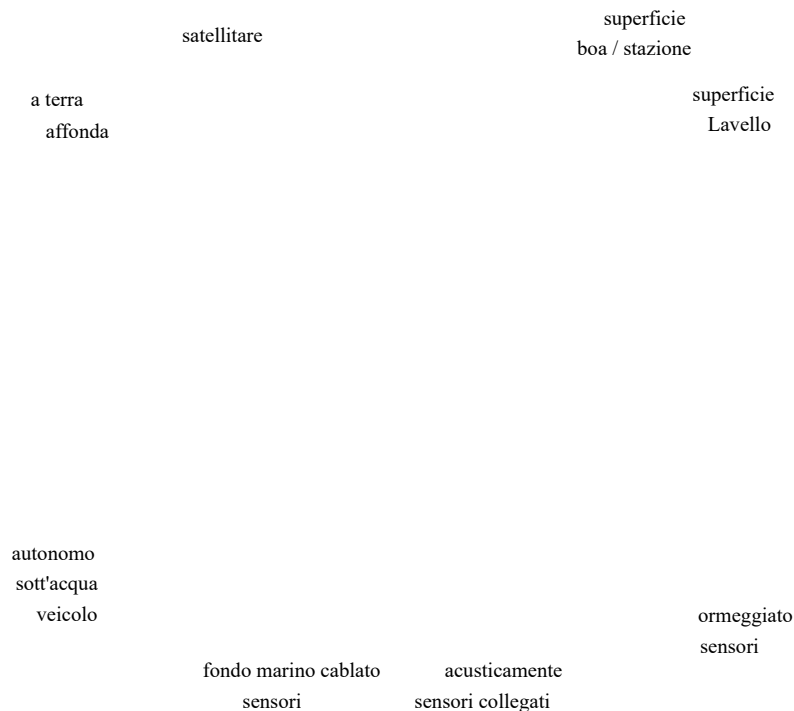


Figura 1. Le installazioni possono essere cablate, fisse e ormeggiate senza fili, mobili (su AUV) e possono diversi collegamenti con la riva. Adattato da Akyildiz *et al.* ([11], Figura. 1). (Versione online a colori.)

Come per le reti di sensori di superficie, densità di rete, copertura e numero di i nodi sono parametri correlati che caratterizzano una distribuzione. Sott'acqua le implementazioni fino ad oggi sono generalmente meno dense, hanno una portata e un impiego più lunghi un numero significativamente inferiore di nodi rispetto alle reti di sensori terrestri. Ad esempio, il file La distribuzione di Seaweb nel 2000 ha coinvolto 17 nodi distribuiti su un'area di 16 km<sup>2</sup>, con a mediana di cinque vicini per nodo [13].

Infine, come per le reti terrestri remote, la connettività a Internet è importante e può essere difficile. [La Figura 1](#) mostra diverse opzioni, tra cui cavi subacquee, wireless punto-punto e satellite.

#### ( b ) Domini dell'applicazione

Le applicazioni delle reti sottomarine rientrano in categorie simili a quelle di reti di sensori terrestri. *Le applicazioni scientifiche* osservano l'ambiente: da processi geologici sul fondo oceanico, alle caratteristiche dell'acqua (temperatura, salinità, livelli di ossigeno, contenuto di batteri e altri inquinanti, materia disciolta, ecc.) per contare o visualizzare la vita animale (microrganismi, pesci o mammiferi). *Le applicazioni industriali* monitorano e controllano le attività commerciali, come apparecchiature subacquee relative all'estrazione di petrolio o minerali, condotte sottomarine o pesca commerciale. Le applicazioni industriali spesso implicano il controllo e l'attivazione componenti pure. *Le applicazioni militari e di sicurezza nazionale* implicano la sicurezza o monitoraggio di impianti portuali o navi in porti stranieri, sminamento e comunicazione con sottomarini e subacquee.

*Phil. Trans. R. Soc. A* (2012)

Mentre le classi di applicazioni sono simili, le attività subacquee si tradizionalmente era molto più dispendioso in termini di risorse rispetto al rilevamento terrestre. Uno può acquistare stazioni meteorologiche per prodotti da \$ 100-1000, ma utilizzando a il sistema di rilevamento subacqueo di base oggi inizia dalla fascia alta e sale, semplicemente a causa dei costi di imballaggio e distribuzione. Pratica scientifica oggi spesso presuppone la raccolta del campione e la restituzione per analisi di laboratorio, in parte perché il costo per ottenere i dati in loco richiede la massimizzazione delle informazioni restituite. Ispirato alle reti di sensori terrestri a basso costo [14], diversi sforzi di ricerca (recensito al §3 f) oggi si stanno esplorando opzioni subacquee a basso costo, ma fisse i costi aumentano rapidamente per il rilevamento in acque più profonde.

Infine, le distribuzioni di rilevamento sott'acqua si verificano su periodi più brevi (diversi ore), piuttosto che da giorni a mesi o anni comuni nel rilevamento terrestre. I motivi principali sono i costi di implementazione associati a un'ampia area di interesse e limitazioni della batteria. Le distribuzioni subacquee possono essere più dure del rilevamento della superficie, con biofouling che richiede manutenzione periodica. AUV motorizzati o basati su alante può essere accoppiato a boe o schieramenti ancorati.

Le motivazioni per le reti di sensori subacquei sono simili a quelle per il terrestre sensornets: le comunicazioni wireless riducono i costi di implementazione; dati interattivi indica se il rilevamento è operativo o richiede azioni correttive durante collezione; e l'analisi dei dati durante la raccolta consente agli scienziati partecipanti di adattarsi rilevamento in risposta a osservazioni interessanti.

### ( c ) Esempi

Esistono molte implementazioni a breve termine o sperimentali di rilevamento subacqueo o networking; qui descriviamo solo alcuni esempi rappresentativi. Seaweb [13] è un primo esempio di una grande rete dispiegabile per potenziali applicazioni militari. Il suo obiettivo principale era studiare la tecnologia adatta alla comunicazione con e rilevamento di sottomarini. Gli schieramenti sono stati nelle aree oceaniche costiere per periodi di più giorni.

Massachusetts Institute of Technology (MIT) e Commonwealth australiano L'Organizzazione per la ricerca scientifica e industriale ha esplorato la raccolta di dati scientifici sia con nodi fissi che con veicoli robotici autonomi mobili. Le distribuzioni hanno sono stati relativamente brevi (giorni), in zone costiere molto vicine dell'Australia e del sud Pacifico [3].

In confronto, la Ocean Observatories Initiative sta esplorando su larga scala rilevamento subacqueo cablato [10]. In questa applicazione statica e scientifica, i cavi forniscono potere e comunicazioni per supportare osservazioni a lungo termine, ma richiedono significativi investimenti a lungo termine.

## 3. Comunicazioni subacquee e tecnologia di rete

In questa sezione, discutiamo una serie di questioni tecnologiche relative alla progettazione, analisi, implementazione e test di reti di sensori sottomarini. Cominciamo da lo strato fisico con le sfide della comunicazione acustica, quindi procedere comunicazioni e livelli di rete, seguita da una discussione sulle applicazioni, piattaforme hardware, banchi di prova e strumenti di simulazione.

*Phil. Trans. R. Soc. A (2012)*

Fuori dall'acqua, lo spettro elettromagnetico domina la comunicazione, da allora i metodi radio o ottici forniscono comunicazioni a lunga distanza (da metri a centinaia di chilometri) con larghezze di banda elevate (da kHz a decine di MHz), anche a bassa potenza. Al contrario, l'acqua assorbe e disperde quasi tutta l'elettricità frequenze magnetiche, rendendo le onde acustiche una scelta preferita per sott'acqua comunicazione oltre le decine di metri.

Propagazione delle onde acustiche nella gamma di frequenze di interesse per la comunicazione può essere descritta in più fasi. Attenuazione fondamentale descrive la perdita di potenza che subisce un tono alla frequenza  $f$  mentre viaggia da un luogo all'altro. La prima (fase di base) ne tiene conto perdita fondamentale che si verifica su una distanza di trasmissione  $d$ . La seconda fase tiene conto della perdita site-specific dovuta ai riflessi superficie-fondo e rifrazione che si verifica quando la velocità del suono cambia con la profondità e fornisce una maggiore previsione dettagliata del campo acustico attorno a un dato trasmettitore. Il terzo stage affronta i cambiamenti apparentemente casuali nella potenza ricevuta su larga scala (mediata su un intervallo di tempo locale) causati da variazioni lente nel mezzo di propagazione (es. maree). Questi fenomeni sono rilevanti per determinare la potenza di trasmissione necessaria per chiudere un dato collegamento. Un separato fase di modellazione è necessaria per affrontare le variazioni rapide e su piccola scala di *potenza del segnale istantanea*.

La Figura 2 illustra l'effetto combinato di attenuazione e rumore in acustica comunicazione tracciando la quantità  $[A(d, f) N(f)]^{-1}$  valutato utilizzando il basic (ideale) perdita di propagazione  $A(d, f)$  e una tipica densità spettrale di potenza  $N(f)$  di rumore di fondo, che decade a 18 dB per decennio [6, 7]. Questa caratteristica descrive il rapporto segnale / rumore (SNR) osservato in una stretta banda di frequenze intorno a  $f$ . La figura mostra chiaramente che le alte frequenze si attenuano rapidamente a lungo distanze, spingendo la maggior parte dei modem a raggio di chilometro a funzionare al di sotto di diverse decine di kHz e suggerisce l'esistenza di una frequenza ottimale per una data trasmissione gamma. Inoltre, mostra che la larghezza di banda disponibile (e quindi il file velocità dati utilizzabile) si riduce all'aumentare della distanza [7]. Il design di un grande Il sistema di scala inizia con la determinazione di questa frequenza e l'assegnazione di una certa larghezza di banda attorno ad esso.

La propagazione su più percorsi crea echi del segnale che arrivano con ritardi variabili. La diffusione del ritardo dipende dalla posizione del sistema e può variare da pochi millisecondi a diverse centinaia di millisecondi. In un sistema a banda larga, questo porta a una funzione di trasferimento del canale selettivo in frequenza come frequenza diversa i componenti possono presentare un'attenuazione sostanzialmente diversa. La risposta del canale e la potenza istantanea spesso mostra variazioni rapide su piccola scala, tipicamente causati dalla dispersione e dal rapido movimento della superficie del mare (onde) o del sistema stesso. Mentre variazioni su larga scala influenzano il controllo della potenza a il trasmettitore, variazioni su piccola scala influenzano la progettazione del segnale adattivo algoritmi di elaborazione al ricevitore.

Il movimento direzionale causa un'ulteriore variazione di tempo sotto forma di Doppler effetto. Una tipica velocità AUV è dell'ordine di pochi metri al secondo, mentre le piattaforme sospese liberamente possono andare alla deriva con correnti a velocità simili. Poiché il suono si propaga lentamente, il rapporto del relativo trasmettitore / ricevitore la velocità alla velocità del suono può arrivare fino allo 0,1%, un valore estremo

*Phil. Trans. R. Soc. A (2012)*

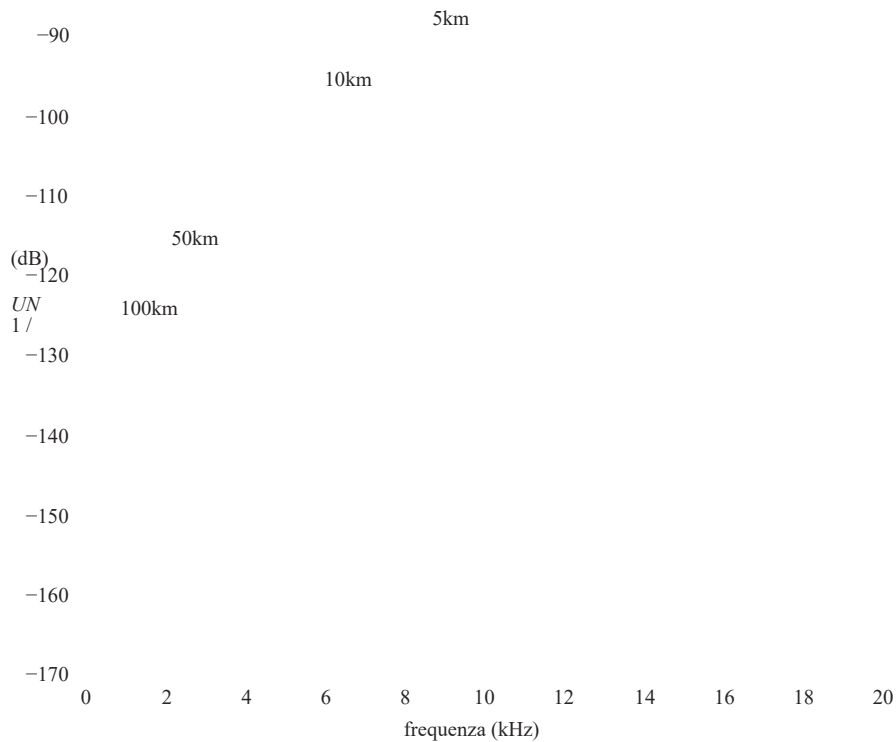


Figura 2. SNR a banda stretta in funzione della frequenza per distanze di trasmissione variabili. Suono l'assorbimento limita la gamma di frequenze utilizzabili e la rende dipendente dalla distanza di trasmissione. In un tipico sistema acustico, la larghezza di banda non è trascurabile rispetto alla frequenza centrale (es. 5 kHz centrato intorno a 10 kHz).

ciò implica la necessità di una sincronizzazione dedicata. Questa situazione è cruda contrasta con i sistemi radio, dove i valori corrispondenti sono ordini di grandezza più piccolo e in genere è necessario prendere solo lo spostamento della frequenza centrale in considerazione.

Per evitare la lunga diffusione del ritardo e la distorsione di fase variabile nel tempo, presto sistemi focalizzati sulla modulazione di frequenza (key shift keying) e non rilevamento (energia) coerente. Sebbene questi metodi non facciano un uso efficiente della larghezza di banda, sono preferiti per comunicazioni robuste a basse velocità di trasmissione (tipicamente dell'ordine di 100 bps su pochi chilometri) e vengono utilizzati in entrambi modem commerciali come la serie Telesonar prodotta da Teledyne-Benthos [15], e in prototipi di ricerca come il micro-modem sviluppato in il WHOI [16].

Lo sviluppo di metodi di comunicazione efficienti in termini di larghezza di banda che utilizzano ampiezza o modulazione di fase (modulazione di ampiezza in quadratura, sfasamento keying) ha acquisito slancio negli anni '90, dopo che è stato dimostrato che il rilevamento coerente fattibile su canali acustici [17]. La ricerca iniziale si è concentrata sull'equalizzazione adattativa

*Phil. Trans. R. Soc. A* (2012)

e sincronizzazione per sistemi a banda larga a portante singola, che porta al tempo reale implementazioni che oggi forniscono comunicazioni "ad alta velocità" a diversi kbps su diverse configurazioni di collegamento (orizzontale, verticale) e con AUV.

La ricerca sul livello fisico è estremamente attiva [18]. Vettore singolo la modulazione / rilevamento viene migliorata utilizzando potenti codifiche e turbo equalizzazione [9], mentre la modulazione / rilevazione multi-portante è considerata come un file alternativa [8, 19]. Entrambi i tipi di sistemi vengono estesi al multi-input



configurazioni multi-output che forniscono multiplexing spaziale (la capacità di inviare file flussi di dati paralleli da più trasmettitori) e velocità in bit di diverse decine di kbps sono stati dimostrati sperimentalmente.

Il rispetto degli aspetti *fisici* della propagazione acustica è fondamentale per il successo elaborazione del segnale; comprenderne le *implicazioni* è essenziale per una rete adeguata design. Come illustra la [figura 2](#), la larghezza di banda disponibile diminuisce con la distanza, e questo fatto costituisce un valido motivo per il multi-hopping, proprio come con la radio reti terrestri. In un ambiente acustico, dividendo un lungo collegamento in un numero di salti più brevi non solo consentirà la riduzione della potenza, ma consentirà anche il utilizzo di una maggiore larghezza di banda [\[7\]](#). Una larghezza di banda maggiore produce una velocità in bit maggiore e pacchetti più brevi, misurati in secondi per un numero fisso di bit per pacchetto. Mentre i bit più brevi implicano meno energia per bit, i pacchetti più brevi ne implicano meno possibilità di collisione su collegamenti con ritardi diversi e non trascurabili. Entrambi i fatti lo hanno fatto implicazioni benefiche sulle prestazioni della rete (e sulla durata), purché l'interferenza può essere gestita.

Queste caratteristiche dello strato fisico influenzano l'accesso medio e superiore progettazione del protocollo di livello. Ad esempio, può funzionare lo *stesso* protocollo di rete in modo diverso con un'allocazione di frequenza diversa, passando a una frequenza più alta regione causerà più attenuazione al segnale desiderato, ma l'interferenza si attenuerà anche di più, forse aumentando le prestazioni complessive. Anche, il ritardo di propagazione e la durata del pacchetto sono importanti, poiché un canale viene rilevato essere libero può comunque contenere pacchetti che interferiscono; la loro lunghezza influirà la probabilità di collisioni e l'efficienza della ritrasmissione (throughput). Infine, il controllo della potenza, insieme al routing intelligente, può esserci di grande aiuto limitare le interferenze [\[20\]](#).

#### ( b ) Controllo di accesso medio e condivisione delle risorse

I sistemi multiutente necessitano di un mezzo efficace per condividere la comunicazione risorse tra i nodi partecipanti. Nelle reti wireless, la frequenza lo spettro è intrinsecamente condiviso e le interferenze devono essere gestite adeguatamente. Sono state sviluppate diverse tecniche per fornire regole per consentire diverse stazioni per condividere efficacemente la risorsa e separare i segnali che coesistono in a mezzo comune.

Nel progettare schemi di condivisione delle risorse per le reti sottomarine, è necessario tenere presenti le caratteristiche peculiari del canale acustico. Più rilevante in questo contesto sono lunghi ritardi, attenuazione dipendente dalla frequenza e relativamente lunga portata dei segnali acustici. Inoltre, i vincoli di larghezza di banda acustica anche l'hardware (e il trasduttore in particolare) deve essere considerato.

I segnali possono essere separati in modo deterministico nel tempo (multiplo a divisione di tempo accesso; TDMA) o frequenza (FDMA). Nel primo caso, gli utenti accedono a turno il mezzo, in modo che i segnali non si sovrappongano nel tempo e quindi l'interferenza è

*Phil. Trans. R. Soc. A (2012)*

evitato. In FDMA, invece, la separazione del segnale è ottenuta nel dominio della frequenza; sebbene possano sovrapporsi nel tempo, i segnali occupano parti disgiunte dello spettro. Queste tecniche sono ampiamente utilizzate nella maggior parte dei sistemi di comunicazione e sono stati presi in considerazione anche per le reti sottomarine [\[21\]](#). Ad esempio, a causa per i limiti del modem acustico, FDMA è stato scelto per l'implementazione iniziale di SeaWeb [\[13\]](#), anche se l'uso di bande di protezione per i cavi di separazione dei canali a qualche inefficienza e questo tipo di allocazione del canale di frequenza ha ben poco flessibilità (ad esempio per adattarsi a velocità di trasmissione variabili). TDMA può essere di più flessibile, ma richiede la sincronizzazione tra tutti gli utenti per assicurarsi che accedano fasce orarie disgiunte. Molti schemi e protocolli si basano su tale base



struttura a divisione di tempo, che però necessita di un certo coordinamento e di qualche guardia volte per compensare le incongruenze nella gestione dei ritardi di propagazione.

Un'altra tecnica quasi deterministica per la separazione dei segnali è la divisione del codice accesso multiplo (CDMA), in cui i segnali che coesistono sia nel tempo che nella frequenza possono essere separati utilizzando codici appositamente progettati in combinazione con il segnale tecniche di lavorazione. Il prezzo da pagare in questo caso è un'espansione della larghezza di banda, particolarmente acuto con la larghezza di banda ridotta del canale acustico (20 kHz o meno per hardware tipico). Protocolli di accesso al supporto basati su CDMA con controllo dell'alimentazione sono stati proposti per reti subacquee [22], e hanno i vantaggi di non richiedere la sincronizzazione degli slot ed è robusto per la dissolvenza multi-path.

Sebbene queste tecniche deterministiche possano essere utilizzate direttamente in sistemi multiutente, i nodi di comunicazione dati in genere utilizzano protocolli basati su contese che prescrivono le regole con cui i nodi decidono quando trasmettere su un canale condiviso. Nel protocollo più semplice, ALOHA, i nodi trasmettono solo ogni volta che ne hanno bisogno (random access) e i terminali si ripristinano dagli errori dovuti alla sovrapposizione di segnali (chiamato *collisioni*) con ritrasmissione. Schemi più avanzati implementano il *carrier-sense accesso multiplo* (CSMA), un approccio di ascolto prima della trasmissione, con o senza meccanismi di prevenzione delle collisioni (CA), con l'obiettivo di evitare la trasmissione su un canale già occupato. Mentre CSMA / CA ha avuto molto successo in reti radio, le latenze riscontrate sott'acqua (fino a diversi secondi) renderlo molto inefficiente sott'acqua (anche peggio di ALOHA). In effetti, mentre ALOHA è raramente considerato nei sistemi radio a causa del suo scarso rendimento, lo è un potenziale candidato per reti subacquee se combinato con semplice CSMA Caratteristiche [23].

Due esempi di protocolli specificatamente progettati per reti subacquee seguendo l'approccio CSMA / CA sono presenti protocolli di prevenzione delle collisioni consapevoli della distanza (DACAP) [24] e tone-Lohi (T-Lohi) [25]. Il DACAP si basa su un'iniziale scambio di segnalazione per riservare il canale, diminuendo così il probabilità di collisione. T-Lohi sfrutta i toni CA, per cui i nodi che vogliono per trasmettere il segnale della loro intenzione inviando segnali a banda stretta e procedere con trasmissione dati se non si sentono i toni inviati da altri nodi, provvedendo segnalazione leggera a scapito di una maggiore sensibilità al terminale nascosto problema [25]. T-Lohi sfrutta anche un'elevata latenza acustica per contare i contendenti modi impossibili con le radio, consentendo una convergenza molto rapida [26].

Sebbene i protocolli non sincronizzati siano più semplici, il coordinamento esplicito può migliorare la performance al prezzo di acquisire e mantenere un riferimento temporale. Sebbene una lunga propagazione causi ancora inefficienza, la sincronizzazione lo consente protocolli per sfruttare il volume spazio-temporale, volutamente sovrapponendo i pacchetti nel tempo mentre rimangono distinti nello spazio [23]. La Figura 3 mostra un esempio di

*Phil. Trans. R. Soc. A* (2012)

## Pagina 10

*Reti di sensori subacquee*

167

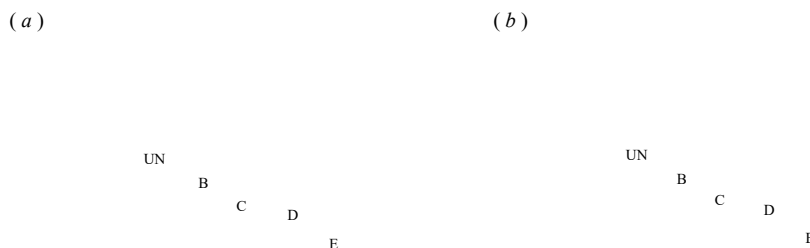


Figura 3. Illustrazione del volume spazio-temporale (adattato da ([23], Figura. 1)): lunghe latenze acustiche significa che i pacchetti da A ed E vengono ricevuti con successo in B e D nella parte ( a ), anche se essi vengono inviati contemporaneamente, mentre nella parte ( b ), i pacchetti entrano in collisione in B anche se vengono inviati in modo diverso volte. ( a ) stesso tempo di trasmissione, nessuna collisione; ( b ) tempo di trasmissione diverso ma collisione in B.

(Versione online a colori.)

questo principio, a differenza delle comunicazioni radio quasi istantanee, è lungo acusticamente latenze significano che i pacchetti simultanei possono essere ricevuti con successo ([figura 3a](#)) e i pacchetti inviati in momenti diversi possono entrare in conflitto ([figura 3b](#)). Anche se, nella maggior parte dei casi, è molto difficile far funzionare tali protocolli in reti di grandi dimensioni, locali la sincronizzazione può essere ottenuta e utilizzata per migliorare l'efficienza. Diversi protocolli sono stati proposti che assumano una struttura a fessura comune cui si accede dai vari nodi del sistema. I primi lavori hanno sfruttato questo effetto, utilizzando centralizzato pianificazione anziché accesso casuale per evitare completamente le collisioni, sebbene per topologie statiche e con segnalazioni aggiuntive [27]. Acquisizione del piano scanalato accesso multiplo (FAMA) [28] è un protocollo decentralizzato basato su CSMA che utilizza sincronizzazione per ridurre la probabilità di collisione, ma è anche soggetta a più a lungo ritardi dovuti ai tempi di guardia. I media delle reti acustiche wireless subacquee protocollo di accesso [29] è un altro protocollo di questo tipo progettato per ridurre al minimo l'energia consumo tramite modalità sleep e sincronizzazione locale.

Sono stati studiati anche diversi schemi ibridi, in cui due o più di le tecniche menzionate in precedenza sono combinate [30].

### (c) Il livello di rete, instradamento e trasporto

Nelle reti di grandi dimensioni, è improbabile che una qualsiasi coppia di nodi possa comunicare direttamente e operazione multi-hop, con cui sono abituati i nodi intermedi in genere viene utilizzato l'inoltro dei messaggi verso la destinazione finale. Inoltre, il funzionamento multi-hop è vantaggioso in considerazione della dipendenza dalla larghezza di banda come discusso nel §3 a.

In questo caso, i protocolli di routing vengono utilizzati per determinare una route variabile che a il pacchetto dovrebbe seguire una topologia. Mentre ci sono molti documenti in pubblicità instradamento ad hoc per reti radio wireless, progettazione di instradamento per reti subacquee è ancora attivamente studiato. I primi lavori sulle rotte subacquee lo includono di Pompili *et al.* [31], dove vengono proposti protocolli distribuiti sia per il ritardo applicazioni sensibili e insensibili al ritardo e consentono ai nodi di selezionare il successivo hop con l'obiettivo di ridurre al minimo il consumo di energia durante l'assunzione in considerazione delle caratteristiche specifiche di propagazione acustica nonché del Requisiti delle applicazioni. Un approccio geografico è proposto in Zorzi *et al.* [32],

*Phil. Trans. R. Soc. A* (2012)

dove un'analisi teorica ha dimostrato che è possibile identificare un ottimo avanzamento che i nodi dovrebbero cercare di raggiungere localmente per ridurre al minimo il consumo energetico totale del percorso. Uno schema simile, dove c'è anche il controllo della potenza incluso in un approccio cross-layer, è stato presentato in Montana *et al.* [20]. Altro approcci includono l'instradamento della pressione, in cui le decisioni si basano sulla profondità, che può essere facilmente determinato localmente per mezzo di un manometro [33].

In Nicopolitidis è stato proposto un approccio per la trasmissione di dati *et al.* [34], dove un sistema push adattivo per la diffusione dei dati in Le reti sottomarine si propongono e si dimostrano in grado di funzionare bene, nonostante le alte latenze che si trovano in questo ambiente.

La progettazione dei protocolli di trasporto nelle reti acustiche sottomarine è un altro problema critico. I protocolli come TCP sono progettati per latenze da basse a moderate, non le grandi frazioni di secondo che si incontrano comunemente nelle reti sottomarine, e la larghezza di banda limitata e l'elevata perdita suggeriscono che la ritrasmissione end-to-end lo farà prestazioni scadenti. Ad esempio, Xie & Cui [35] propone un nuovo protocollo di trasporto che impiega codici di cancellazione con dimensione del blocco variabile per trasmettere in modo affidabile segmentato blocchi di dati lungo percorsi multi-hop. Codifica di rete e correzione degli errori di inoltro

può anche essere impiegato per far fronte a perdite dovute a lunghi ritardi; la codifica beneficia di ottimizzazione della codifica e del feedback [36]. Approcci diversi come la tolleranza al ritardo networking [37] può essere una corrispondenza migliore per molte reti sottomarine, evitando ritrasmissione end-to-end e supporto molto scarso e spesso disconnesso reti.

Il lavoro su protocolli di diffusione dei dati di livello superiore sott'acqua è stato scarso, con ogni distribuzione in genere utilizzando una soluzione personalizzata. Un sistema è mostrato da Vasilescu *et al.* [3], proponendo sincronizzazione e raccolta dati, archiviazione e protocolli di recupero per il monitoraggio ambientale.

Infine, una questione importante è quella del controllo della topologia, dove dormono i nodi ridurre l'energia mantenendo la connettività di rete. Sebbene il coordinamento e meccanismi di schedulazione possono essere usati per questo scopo, un interessante l'osservazione è stata fatta in Harris *et al.* [38], dove è stato riconosciuto quello acustico i dispositivi, a differenza delle radio, possono effettivamente essere svegliati da un segnale acustico in arrivo senza hardware aggiuntivo. Con questa funzione è possibile riattivare i nodi richiesta e per ottenere un meccanismo di controllo della topologia virtualmente perfetto. Il sensore reti per la sperimentazione sismica sottomarina (SNUSE) il modem implementa tali un circuito di risveglio a bassa potenza, che è stato integrato nell'accesso ai media livello protocollo (MAC) [25] e il modem Benthos dispone anche di una modalità di attivazione.

#### ( d ) Servizi di rete

Tra i tanti servizi di rete possibili, *localizzazione e tempo sincronizzazione* hanno visto ricerche significative a causa della loro applicabilità a molti scenari. La localizzazione e la sincronizzazione dell'ora sono, in un certo senso, il doppio di l'un l'altro: la localizzazione spesso stima il tempo di volo della comunicazione, assumendo orologi precisi e la sincronizzazione dell'ora stima lo skew dell'orologio, modellando lentamente ritardi di comunicazione variabili. Sott'acqua, entrambi rappresentano la sfida di farcela con una lunga latenza di comunicazione e canali rumorosi e variabili nel tempo.

La sincronizzazione dell'ora nelle reti cablate risale all'ora della rete protocollo negli anni '90; reti di sensori wireless hanno richiesto una rinascita di ricerca un decennio dopo, con un'enfasi sul messaggio e sul risparmio energetico

*Phil. Trans. R. Soc. A* (2012)

tramite la sincronizzazione uno-a-molti o molti-a-molti [39] e l'integrazione con hardware per ridurre il jitter [40]. La sincronizzazione dell'ora subacquea è stata sviluppata queste idee, riviste per affrontare le sfide nella propagazione acustica lenta. Tempo-sincronizzazione per reti ad alta latenza [41] ha mostrato quella deriva dell'orologio durante la propagazione del messaggio domina l'errore per i canali acustici più lunghi di 500 m. Più recentemente, D-Sync ha incorporato la stima dello spostamento Doppler per tenere conto del errore dovuto alla mobilità dei nodi o alle correnti d'acqua [42].

Anche la localizzazione ha una storia nelle reti wireless cablate e radio, dove l'intervallo da nodo a nodo (basato sul tempo di volo delle comunicazioni) e la prossimità del faro (raggiungibilità per attenuazione) sono i due fondamentali metodi utilizzati per individuare i dispositivi. Come con la sincronizzazione dell'ora, la localizzazione i protocolli sono spesso a coppie o un beacon può trasmettere a molte potenzialità ricevitori. La propagazione acustica lenta *migliora la localizzazione*, poiché ogni microsecondo l'errore di temporizzazione corrisponde solo a un errore di posizione di 15 mm, tuttavia i limiti di larghezza rendono la riduzione del conteggio dei messaggi ancora più importante rispetto a reti radio.

Due sistemi di localizzazione subacquea specifici con validazione sperimentale sono una stima sufficiente della mappa della distanza (SDME [43]) e il sistema proposto di Webster *et al.* [44]. SDME sfrutta la localizzazione post-facto (analoga a post-sincronizzazione temporale di fatto della sincronizzazione della trasmissione di riferimento [39]) ridurre

i conteggi dei messaggi utilizzando uno schema altrimenti standard basato su tutte le coppie, basato, inter-stazione che va. Osservano una precisione di localizzazione di circa 1 metro a portata di 139 m. Il sistema di Webster *et al.* [44] utilizza un unico riferimento mobile faro (con posizione basata sul sistema di posizionamento globale) per localizzare un AUV in movimento. Il loro schema di localizzazione si basa sulla spazatura acustica tra i veicoli con orologi sincronizzati ad alta precisione, combinati con stime di posizione AUV da navigazione inerziale, post-facto combinato con un filtro Kalman esteso. Nel mare prove di rilevamento di un AUV a 4000 m di profondità, il loro schema stima la posizione con a deviazione standard di circa 10-14 m.

#### ( e ) Tecniche di rilevamento e applicazione

Mentre la copertura completa della tecnologia dei sensori utilizzata nelle applicazioni subacquee è al di fuori dello scopo di questo documento, riassumiamo brevemente alcune sfide in questa sezione.

Alcuni tipi di sensori subacquei sono facili ed economici, ma molti diventano rapidamente difficili e costosi, da pochi dollari a migliaia o più. I sensori economici includono il rilevamento della pressione, che può dare profondità approssimativa e foto-diodi e termistori che misurano l'ambiente luce e temperatura [45]. I sensori più specializzati includono i fluorometri stimare le concentrazioni di clorofilla [46] e dispositivi per misurare la CO<sub>2</sub> dell'acqua concentrazioni o torbidità e sonar per rilevare oggetti sott'acqua. Come sensori specializzati possono essere molto più costosi di sensori più semplici. La biologia tradizionale e l'oceanografia si basano su campioni prelevati l'ambiente e restituito al laboratorio per l'analisi. Come tradizionale la ricerca subacquea ha assunto personale in loco, il costo della restituzione del campione è relativamente piccolo rispetto al costo per portare lo scienziato sul sito. Con reti di sensori e AUV a basso costo, ci aspettiamo i costi di restituzione del campione rispetto al rilevamento *in situ* per forzare la revisione di queste ipotesi.

*Phil. Trans. R. Soc. A (2012)*

## Pagina 13

170

*J. Heidemann et al.*

Algoritmi per la gestione del rilevamento subacqueo, della fusione dei sensori e del coordinamento e il rilevamento adattivo stanno appena iniziando a svilupparsi. Sonar è stato utilizzato per da oltre 60 anni per l'elaborazione di singoli sensori e dati di array di sensori, e oggi, offline, la pianificazione pre-missione degli AUV è diventata routine. Come il maturazione sul campo, non vediamo l'ora di lavorare con il campionamento adattivo online comunicare AUV.

#### ( f ) Piattaforme hardware

Diverse piattaforme hardware per la comunicazione acustica sono state sviluppato negli anni, con successo sia commerciale, militare e di ricerca. Queste piattaforme sono essenziali per supportare i test e l'uso sul campo.

I modem Teledyne / Benthos sono dispositivi commerciali ampiamente utilizzati. Essi sono stati ampiamente utilizzati in SeaWeb [13], con modifiche supportate dal fornitore, ma il loro firmware non è accessibile agli utenti generici, limitandone l'uso per nuovo strato fisico e ricerca MAC. I modem Evologics S2C [47] Maggio forniscono una certa flessibilità aggiuntiva in quanto supportano la trasmissione di pacchetti brevi, che sono completamente personalizzabili dagli utenti e possono essere trasmessa istantaneamente senza alcuna regola del protocollo di accesso al supporto (questa funzione è supportato anche dal micro-modem WHOI, discusso in §3g). Usando tale pacchetti, c'è un po 'di spazio per implementare e testare i protocolli, anche se il livello di riprogrammabilità dei dispositivi commerciali rimane piuttosto limitato in

generale. Le velocità di trasmissione dati supportate da questi modem vanno da poche centinaia bps a pochi kbps in varie bande della gamma di frequenze delle decine di kHz, oltre distanze fino a poche decine di chilometri e con consumi di decine di watt.

I modem specifici per la ricerca offrono più possibilità, anche se mancano commerciali supporto. Il micro-modem WHOI [48] è probabilmente il dispositivo più utilizzato in questa categoria, con una velocità di trasmissione dati di 80 bps (non coerente) o di circa 5 kbps (coerente) con un raggio di pochi chilometri. Altri modem di ricerca si sono concentrati su semplici, progetti a basso costo, come il modem SNUSE presso l'Università del Sud California (USC) e un idrofono a basso costo presso l'Università della California, San Diego, USA, o su gate array riconfigurabile, spesso programmabile sul campo hardware per supportare comunicazioni o sperimentazioni a velocità più elevate, come in AquaNode al MIT (vedi [49] per un confronto). Una piattaforma definita dal software è stato proposto in [50]. Utilizzando strumenti ben testati dalla radio wireless (come GNU Radio e TinyOS) e adattandoli per funzionare con dispositivi acustici, questo La piattaforma fornisce un mezzo potente per testare i protocolli in una rete sottomarina e per configurarli in fase di esecuzione.

Diversi modem (inclusi Teledyne / Benthos, il modem SNUSE e altri) supportare una modalità di ricezione a bassa potenza, che in linea di principio potrebbe essere utilizzata per implementare modalità di attivazione per il controllo della topologia [38]. Tuttavia, l'integrazione di questo risveglio funzionalità con protocolli di livello superiore spesso dipende dal firmware o meno è accessibile.

Anche se non esiste un ambiente di sviluppo o un sistema operativo universale per la ricerca subacquea, le piattaforme sono generalmente abbastanza grandi rispetto a quelle tradizionali gli ambienti operativi dei sistemi embedded sono fattibili. Diversi gruppi utilizzare varianti incorporate di Linux, ad esempio.

*Phil. Trans. R. Soc. A (2012)*

### ( g ) Banche di prova

L'ampiezza dell'interesse per le reti sottomarine si è tradotta in molto di lavoro in laboratorio e simulazione, ma gli esperimenti sul campo rimangono difficili, e il costo e il tempo del noleggio di barche e del dispiegamento offshore sono elevati. Seaweb rappresenta una delle prime reti multi-hop, che distribuisce più di una dozzina di nodi al largo di San Diego nel 2000 [13]. Tuttavia, come altri test sul campo contemporanei, lo era disponibile solo per i suoi sviluppatori.

Più recentemente almeno due gruppi hanno esplorato un banco di prova che può essere condiviso da più progetti, o anche aperto per uso pubblico. USC ha prototipato un piccolo, banco di prova basato sul porto e lo ha reso disponibile ad altri gruppi [51]; WHOI ha prototipato un banco di prova utilizzabile in mare, basato su boe [12]. Accessibile a Internet, il Il banco di prova USC può essere utilizzato in qualsiasi momento e per lunghi periodi, ma è limitato a una posizione, mentre il banco di prova schierabile sull'oceano può essere portato in luoghi diversi e accessibile tramite wireless di superficie per implementazioni temporanee. Un obiettivo comune di questi progetti è mettere la sperimentazione a disposizione di un gruppo più ampio di utenti. Oltre a questi passaggi verso banche di prova condivisi, i gruppi dell'Università di Connecticut, l'Università Nazionale di Singapore e il Trattato del Nord Atlantico Organizzazione (NATO) Undersea Research Center (tra gli altri) hanno dispiegato banche di prova interni su scala medio-grande.

### ( h ) Simulatori e modelli

A differenza delle reti di sensori wireless a radiofrequenza, dove si trova la sperimentazione relativamente accessibile ed economico, l'hardware subacqueo è costoso (a nodo completo, a tenuta stagna può facilmente costare più di US \$ 1000) e costoso deploy (il test in una piscina pubblica può costare \$ 40 l'ora a causa dell'obbligo

presenza di un bagnino e spiegazioni in acque profonde possono facilmente costare decine di migliaia di dollari al giorno); quindi le alternative sono importanti. Altrettanto importante è la necessità di test rapidi, controllati e riproducibili su un'ampia gamma di condizioni. La simulazione e la modellazione sono ideali per affrontare entrambi questi problemi. Sfortunatamente, in molti casi, la precisione dei simulatori di rete in formato la modellazione del livello fisico e degli effetti di propagazione è scarsa, limitando il valore predittivo di tali strumenti.

Molti ricercatori sviluppano simulatori personalizzati per rispondere alla loro domanda specifica, e altri sviluppano estensioni personali a strumenti esistenti come la *rete simulatore* (ns-2, uno strumento popolare per gli studi di networking [52]). Tuttavia, la distribuzione e la generalità di questi strumenti è spesso minima, limitandone l'uso i loro autori.

Diversi sforzi recenti si sono avvicinati all'obiettivo di costruire sott'acqua strumenti di simulazione per la comunità di ricerca generale, particolarmente impegnata a catturare, in modo sufficientemente dettagliato, le proprietà chiave della propagazione acustica [53, 54]. Ad esempio, il World Ocean Simulation System (WOSS) [54] integra ns-2 con BELLHOP [55], un software di ray-tracing per la propagazione acustica in grado di prevedere la distribuzione del suono in un dato volume. Questo approccio combina un potente e uno strumento di simulazione di rete ampiamente accettato con un modello di propagazione acustica che è molto preciso nella gamma di frequenze delle decine di kHz, fornendo risultati che possono rappresentare scenari ragionevolmente realistici. Sebbene non sia un sostituto per sperimentazione, tali quadri di simulazione rappresentano uno strumento molto utile per indagini preliminari e per l'esplorazione rapida di un ampio spazio di progettazione.

*Phil. Trans. R. Soc. A* (2012)

## Pagina 15

172

*J. Heidemann et al.*

Un approccio complementare allo studio è anche quello di collegare un simulatore direttamente ai modem acustici (invece di simulare la propagazione e il file fisico layer), combinando simulazione e hardware per emulare un sistema completo.

Diversi strumenti di modellazione sofisticati (inclusi sia analitici che approcci computazionali, ad esempio ray tracing) sono stati sviluppati per studiare l'acustica propagazione. Tuttavia, nella maggior parte dei casi, la complessità di tali modelli li rende inadatto all'uso nell'analisi di sistemi e reti di comunicazione, dove le scale temporali coinvolte richiedono modelli di canale / errore leggeri e dove molti dettagli di livello inferiore possono avere un effetto minore sulle prestazioni complessive. Per questo motivo, attualmente c'è un forte interesse per lo sviluppo di modelli alternativi, progettati per essere utilizzati in sistemi analitici o di simulazione studi. Anche se questo è ancora un problema aperto, ci aspettiamo che i recenti interessi nei sistemi e nelle reti di comunicazione sottomarina alimenterà la ricerca in questo campo, consentendo di sviluppare strumenti di indagine entrambi accurati e utilizzabile.

### 4. Conclusioni e sfide future

Le applicazioni guidano lo sviluppo del rilevamento subacqueo e del networking. L'informatica, il rilevamento e le comunicazioni a basso costo hanno consentito il terrestre rete di sensori negli ultimi due decenni; ci aspettiamo che l'elaborazione a basso costo, combinato con tecnologia acustica avanzata, comunicazione e rilevamento, consentirà anche applicazioni di rilevamento subacqueo.

Sebbene la ricerca sulle reti di sensori subacquei sia notevolmente progredita in negli ultimi anni è chiaro che restano ancora da risolvere una serie di sfide. Con la raffica di nuovi approcci alla comunicazione, accesso al mezzo, networking e applicazioni, analisi, integrazione e test efficaci di queste idee sono



fondamentale: il campo deve sviluppare intuizioni fondamentali, oltre che comprendere cosa resiste nella pratica. Per questi motivi, riteniamo che lo sviluppo di sono assolutamente necessari nuovi modelli teorici (sia analitici che computazionali), e che è essenziale un maggiore uso di banchi di prova ed esperimenti sul campo; tale lavoro lo farà supportare un'analisi più accurata delle prestazioni e la caratterizzazione del sistema, che alimenterà la prossima generazione di comunicazioni e sensori subacquei.

Inoltre, l'integrazione e la verifica delle idee attuali metteranno in risalto le cuciture sono spesso nascosti in ricerche di laboratorio più mirate, come il costo totale del sistema, fabbisogno energetico e robustezza complessiva in diverse condizioni.

Inoltre, siamo incoraggiati da un ampliamento del campo da considerare diverse opzioni, che vanno da alte prestazioni (e costo) a basso costo (ma prestazioni inferiori), inclusi i dispositivi mobili (supportati dall'uomo o autonomi), configurazioni dispiegabili e fisse.

Il lavoro di JH è parzialmente supportato dalla National Science Foundation (NSF) con sovvenzioni CNS-0708946 (ORTUN) e CNS-0821750 (DATUNR). Il lavoro degli Stati membri è parzialmente sostenuto da sovvenzioni NSF-0831728 e ONR-N00014-09-1-0700. Il lavoro di MZ è parzialmente supportato dall'Europeo Commissione nell'ambito del 7 ° PQ (progetto CLAM, GA 258359), dell'Istituto Italiano di Tecnologia sotto il programma Project Seed (progetto NAUTILUS) e dall'US Office of Naval Research sotto concessione n. N000141010422. Le conclusioni di questo lavoro sono quelle degli autori e non lo fanno riflettono necessariamente le opinioni dei loro sostenitori.

*Phil. Trans. R. Soc. A* (2012)

## Riferimenti

- 1 Tunncliffe, V., Barnes, C. & Dewey, R. 2008 Grandi progressi negli osservatori oceanici cablati (VENERE e NETTUNO Canada) in contesti costieri e di acque profonde. In *IEEE / OES USA / UE-Baltic Int. Symp., Tallinn, Estonia, maggio 2008*, pagg. 1–7. IEEE.
- 2 Farr, N., Bowen, A., Ware, J., Pontbriand, C. & Tivey, M. 2010 Un integrato, subacqueo sistema di comunicazione ottico / acustico. In *IEEE Oceans Conf., Sydney, Australia, maggio 2010*, pagg. 1–6. IEEE.
- 3 Vasilescu, I., Kotay, K., Rus, D., Dunbabin, M. & Corke, P. 2005 Raccolta, archiviazione e recupero con una rete di sensori sottomarini. In *Proc. 3 ° ACM SenSys Conf., San Diego, CA, Novembre 2005*, pagg. 154–165. ACM.
- 4 Cella, UM, Johnstone, R. & Shuley, N. 2009 Comunicazione wireless a onde elettromagnetiche in ambiente costiero di acque poco profonde: analisi teoriche e risultati sperimentali. In *Proc. 4 ° ACM Int. Workshop on Underwater Networks ( WUWNet ), Berkeley, CA, novembre 2009*, pp. 9: 1–9: 8. ACM.
- 5 Friedman, J., Torres, D., Schmid, T., Dong, J. & Srivastava, MB 2010 A biomimetic quasi-canale fisico di campo elettrico statico per reti oceaniche sottomarine. In *Proc. 5 ° ACM Int. Workshop on Underwater Networks ( WUWNet ), Woods Hole, MA, settembre 2010*. ACM.
- 6 Urlick, R. 1983 *Principles of underwater sound*. New York, NY: McGraw-Hill.
- 7 Stojanovic, M. 2007 Sul rapporto tra capacità e distanza in un sott'acqua canale di comunicazione acustica. *ACM Mobile Comput. Commun. Apocalisse* **11**, 34–43. ([doi: 10.1145 / 1347364.1347373](https://doi.org/10.1145/1347364.1347373))
- 8 Carrascosa, PC & Stojanovic, M. 2010 Adaptive channel estimation and data detection for sistemi acustici subacquei MIMO OFDM. *IEEE J. Oceanic Eng.* **35**, 635–646. ([doi: 10.1109 / JOE.2010.2052326](https://doi.org/10.1109/JOE.2010.2052326))
- 9 Roy, S., Duman, T. & McDonald, V. 2009 Miglioramento del tasso di errore nel MIMO subacqueo comunicazioni utilizzando l'equalizzazione a risposta parziale sparsa. *IEEE J. Oceanic Eng.* **34**, 181–201. ([doi: 10.1109 / JOE.2009.2014658](https://doi.org/10.1109/JOE.2009.2014658))
- 10 Fairley, P. 2005 Nettuno in aumento. *IEEE Spectr.* **42**, 38–45. ([doi: 10.1109 / MSPEC.2005.1526903](https://doi.org/10.1109/MSPEC.2005.1526903))
- 11 Akyildiz, I., Pompili, D. & Melodia, T. 2005 Underwater acoustic sensor networks: research sfide. *Rete ad hoc* **3**, 257–279. ([doi: 10.1016 / j.adhoc.2005.01.004](https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2005.01.004))
- 12 Shusta, J. 2010 Architettura di rete acustica. In *Proc. 5 ° ACM Int. Workshop sull'acqua Networks ( WUWNet ), Woods Hole, MA, settembre 2010*. ACM.
- 13 Proakis, J., Sozer, E., Rice, J. & Stojanovic, M. 2001 Shallow water acoustic networks. In *IEEE Commun. Mag.* **39**, 114–119. ([doi: 10.1109 / 35.965368](https://doi.org/10.1109/35.965368))
- 14 Heidemann, J., Ye, W., Wills, J., Syed, A. & Li, Y. 2006 Sfide e applicazioni della ricerca



- per il collegamento in rete di sensori subacquei. In *Proc. Comunicazioni e reti wireless IEEE Conf., Las Vegas, NV, aprile 2006*, pagg. 228-235. IEEE.
- 15 Verde, D. 2010 Modem acustici, aiuti alla navigazione e reti per operazioni sottomarine. Nel *IEEE Oceans Conf., Sydney, Australia, maggio 2010*, pagg. 1-6. IEEE.
  - 16 Singh, S., Webster, S., Freitag, L., Whitcomb, L., Ball, K., Bailey, J. & Taylor, C. 2009 Acustica prestazioni di comunicazione del micro-modem WHOI nelle prove in mare del veicolo Nereus a 11000 m di profondità. In *IEEE Oceans Conf., Biloxi, MS, marzo 2009*, pagg. 1-6.
  - 17 Stojanovic, M., Catipovic, J. & Proakis, J. 1993 Combinazione multicanale adattiva e equalizzazione per comunicazioni acustiche subacquee. *J. Acoust. Soc. Am.* **94**, 1621-1631.
  - 18 Singer, A., Nelson, J. & Kozat, S. 2009 Elaborazione del segnale per acustica subacquea comunicazioni. *IEEE Commun. Mag.* **47**, 90-96. (doi: [10.1109 / MCOM.2009.4752683](https://doi.org/10.1109/MCOM.2009.4752683))
  - 19 Berger, C., Zhou, S., Preisig, J. & Willett, P. 2010 Stima del canale sparse per multicarrier comunicazione acustica subacquea: dai metodi subspaziali al rilevamento compresso. *IEEE Trans. Processo del segnale.* **58**, 1708-1721. (doi: [10.1109 / TSP.2009.2038424](https://doi.org/10.1109/TSP.2009.2038424))
  - 20 Montana, J., Stojanovic, M. & Zorzi, M. 2010 Sulla frequenza congiunta e sull'allocazione di potenza in a protocollo cross-layer per reti acustiche sottomarine. *IEEE J. Oceanic Eng.* **35**, 936-947.
  - 21 Sozer, EM, Stojanovic, M. & Proakis, JG 2000 Underwater acoustic networks. *IEEE J. Oceanic Eng.* **25**, 72-83. (doi: [10.1109 / 48.820738](https://doi.org/10.1109/48.820738))

*Phil. Trans. R. Soc. A* (2012)

## Pagina 17

174

J. Heidemann et al.

- 22 Pompili, D., Melodi, T. & Akyildiz, IF 2009 A CDMA-based medium access control for reti di sensori acustici subacquei. *IEEE Trans. Wireless Commun.* **8**, 1899-1909. (doi: [10.1109 / TWC.2009.080195](https://doi.org/10.1109/TWC.2009.080195))
- 23 Ahn, J., Syed, A., Krishnamachari, B. & Heidemann, J. 2011 Progettazione e analisi di un Protocollo ALOHA tollerante al ritardo di propagazione per reti sottomarine. *Rete ad hoc J.* **9**, 752-766. (doi: [10.1016 / j.adhoc.2010.09.007](https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2010.09.007))
- 24 Peleato, B. & Stojanovic, M. 2007 Protocollo di prevenzione delle collisioni con conoscenza della distanza per reti di sensori acustici subacquei ad hoc. *IEEE Commun. Lett.* **11**, 1025-1027. (doi: [10.1109 / LCOMM.2007.071160](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2007.071160))
- 25 Syed, A., Ye, W. & Heidemann, J. 2008 Confronto e valutazione del T-Lohi MAC per reti di sensori acustici subacquei. *IEEE J. Selected Areas Commun.* **26**, 1731-1743. (doi: [10.1109 / JSAC.2008.081212](https://doi.org/10.1109/JSAC.2008.081212))
- 26 Syed, AA & Heidemann, J. 2010 Analisi della contesa dei protocolli MAC che contano. In *Proc. 5 ° ACM Int. Workshop on Underwater Networks ( WUWNet )*, Woods Hole, MA, settembre 2010, pagine 2: 1-2: 8. ACM.
- 27 Badia, L., Mastrogiovanni, M., Petrioli, C., Stefanakos, S. & Zorzi, M. 2006 Un'ottimizzazione framework per la distribuzione del sensore congiunto, la pianificazione dei collegamenti e il percorso nel sensore subacqueo reti. In *Proc. 1 ° ACM Int. Workshop on Underwater Networks ( WUWNet )*, Los Angeles, CA, settembre 2006, pagg. 56-63. ACM.
- 28 Molins, M. & Stojanovic, M. 2006 Slotted FAMA: un protocollo MAC per l'acustica subacquea reti. In *Proc. IEEE Oceans Conf., Boston, MA, marzo 2006*, pagg. 1-7. IEEE.
- 29 Park, MK & Rodoplu, V. 2007 UWAN-MAC: un protocollo MAC ad alta efficienza energetica per reti di sensori wireless acustici subacquei. *IEEE J. Oceanic Eng.* **32**, 710-720. (doi: [10.1109 / JOE.2007.899277](https://doi.org/10.1109/JOE.2007.899277))
- 30 Kredo II. KB & Mohapatra, P. 2007 Un protocollo ibrido per il controllo degli accessi al mezzo subacqueo reti wireless. In *Proc. 2 ° ACM Int. workshop sulle reti sottomarine ( WUWNet )*, Montreal, QC, settembre 2007, pagg. 33-40. ACM.
- 31 Pompili, D., Melodia, T. & Akyildiz, IF 2006 Algoritmi di routing per ritardi insensibili e applicazioni sensibili al ritardo in reti di sensori subacquei. In *Proc. ACM Int. Conf. sul cellulare Computing and Networking, Los Angeles, CA, settembre 2006*, pagg. 298-309. ACM.
- 32 Zorzi, M., Casari, P., Baldo, N. & Harris III, AF 2008 Schemi di instradamento ad efficienza energetica per reti acustiche sottomarine. *IEEE J. Selected Areas Commun.* **26**, 1754-1766.
- 33 Lee, U., Wang, P., Noh, Y., Vieira, LFM, Gerla, M. & Cui, J.-H. 2010 Percorsi di pressione per reti di sensori subacquei. In *Proc. IEEE Infocom, San Diego, CA, marzo 2010*, pagg. 1-9. IEEE.
- 34 Nicopolitidis, P., Papadimitriou, G. & Pomportsis, A. 2010 Adaptive data trasmissione in reti wireless subacquee. *IEEE J. Oceanic Eng.* **35**, 623-634. (doi: [10.1109 / JOE.2010.2049674](https://doi.org/10.1109/JOE.2010.2049674))
- 35 Xie, P. & Cui, J.-H. 2007 Un protocollo di trasporto dati affidabile basato su FEC per la subacquea

- reti di sensori. In *Proc. 16° IEEE Int. Conf. sulle comunicazioni e le reti informatiche, Honolulu, HI, settembre 2007*, pagg. 747–753. IEEE.
- 36 Lucani, DE, Stojanovic, M. & Médard, M. 2009 Random linear network coding for time division duplex: quando smettere di parlare e iniziare ad ascoltare. In *Proc. IEEE Infocom, Rio de Janeiro, Brasile, aprile 2009*, pagg. 1800–1808. IEEE.
- 37 Fall, K. & Farrell, S. 2008 DTN: An architecture retrospective. *IEEE J. Aree selezionate Commun.* **26**, 828–837. (doi: [10.1109/JSAC.2008.080609](https://doi.org/10.1109/JSAC.2008.080609))
- 38 Harris III, AF, Stojanovic, M. & Zorzi, M. 2009 Risparmio energetico durante l'inattività attraverso modalità di risveglio in reti acustiche subacquee. *Rete ad hoc* **7**, 770–777. (doi: [10.1016/j.adhoc.2008.07.014](https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2008.07.014))
- 39 Elson, J., Girod, L. & Estrin, D. 2002 Sincronizzazione temporale di rete fine utilizzando il riferimento trasmissioni. In *Proc. 5° USENIX Symp. sulla progettazione e implementazione dei sistemi operativi, Boston, MA, dicembre 2002*, pagg. 147–163. USENIX.
- 40 Ganeriwal, S., Kumar, R. & Srivastava, MB 2003 Timing-sync protocol for sensor networks. In *Proc. 1a ACM SenSys Conf., Los Angeles, CA, novembre 2003*, pagg. 138–149. ACM.

*Phil. Trans. R. Soc. A* (2012)

## Pagina 18

### Reti di sensori subacquee

175

- 41 Syed, A. & Heidemann, J. 2006 Sincronizzazione temporale per reti acustiche ad alta latenza. Nel *Proc. IEEE Infocom, Barcellona, Spagna, aprile 2006*, pagg. 1–12. IEEE.
- 42 Lu, F., Mirza, D. & Schurgers, C. 2010 Sincronizzazione dell'ora basata su D-Sync Doppler per dispositivi mobili reti di sensori subacquee. In *Proc. 5° ACM Int. Workshop sulle reti sottomarine (WUWNet)*, Woods Hole, MA, settembre 2010, pagg. 3: 1–3: 8. ACM.
- 43 Mirza, D. & Schurgers, C. 2008 Gamma ad alta efficienza energetica per l'auto-localizzazione post-facto nelle reti subacquee mobili. *IEEE J. Selected Areas Commun.* **26**, 1697–1707. (doi: [10.1109/JSAC.2008.081209](https://doi.org/10.1109/JSAC.2008.081209))
- 44 Webster, SE, Eustice, RM, Singh, H. & Whitcomb, LL 2009 Preliminary deep water si traduce in una navigazione acustica unidirezionale del tempo di viaggio per veicoli subacquee. Nel *IEEE / RSJ Int. Conf. su Intelligent Robots and Systems (IROS)*, St. Louis, MO, ottobre 2009, pagg. 2053–2060. IEEE.
- 45 Bokser, V., Oberg, C., Sukhatme, GS & Requicha, AA 2004 Un piccolo robot sottomarino per esperimenti in reti di sensori sottomarini. In *Proc. 5° IFAC Symp. su Intelligent Autonomous Veicoli, Lisbona, Portogallo, luglio 2004*. Federazione internazionale del controllo automatico.
- 46 Sukhatme, GS, Dhariwal, A., Zhang, B., Oberg, C., Stauffer, B. & Caron, DA 2006 II progettazione e sviluppo di un sistema di osservazione microbica acquatica in rete robotica wireless. *Environ. Eng. Sci.* **24**, 205–215. (doi: [10.1089/ees.2006.0046](https://doi.org/10.1089/ees.2006.0046))
- 47 GmbH, E. 2011 Modem della serie Evologics S2C. Vedi <http://www.evologics.de/en/products/acustica/>.
- 48 Freitag, L., Grund, M., Singh, S., Partan, J., Koski, P. & Ball, K. 2005 II Micro-modem WHOI: un comunicazioni acustiche e navigazione sistema per più piattaforme. In *IEEE / MTS Oceans, Washington, DC, settembre 2005*. IEEE. (doi: [10.1109/OCEANS.2005.1639901](https://doi.org/10.1109/OCEANS.2005.1639901))
- 49 Casari, P. & Zorzi, M. 2011. Problemi di progettazione del protocollo nelle reti acustiche sottomarine. *Comp. Commun.* **34**, 2013–2025. (doi: [10.1016/j.comcom.2011.06.008](https://doi.org/10.1016/j.comcom.2011.06.008))
- 50 Torres, D., Friedman, J., Schmid, T. & Srivastava, MB 2009 Software-defined underwater piattaforma di networking acustico. In *Proc. 4° ACM Int. Workshop sulle reti sottomarine (WUWNet)*, Berkeley, CA, novembre 2009. ACM.
- 51 Goodney, A., Cho, Y., Heidemann, J. & Wroclawski, J. 2010 An underwater communication e rilevamento del banco di prova a Marina del Rey (poster abstract). In *Proc. 5° ACM Int. Workshop su Underwater Networks (WUWNet)*, Woods Hole, MA, settembre 2010. ACM.
- 52 Breslau, L. *et al.* 2000 Progressi nella simulazione di rete. *Comp.* **33**, 59–67. (doi: [10.1109/2.841785](https://doi.org/10.1109/2.841785)) (Una versione estesa è disponibile come USC CSD TR 99-702b.).
- 53 Xie, P., Zhou, Z., Zheng Peng, HY, Hu, T., Cui, J.-H., Shi, Z., Fei, Y. & Zhou, S. 2009 Aqua-Sim: un simulatore basato su NS-2 per reti di sensori sottomarini. In *IEEE / MTS Oceans, Biloxi, MS, marzo 2009*. IEEE.
- 54 Guerra, F., Casari, P. & Zorzi, M. 2009 World Ocean Simulation System (WOSS): a strumento di simulazione per reti sottomarine con modellazione realistica della propagazione. In *Proc. 4° ACM Int. Workshop on Underwater Networks (WUWNet)*, Berkeley, CA, novembre 2009, pp. 4: 1–4: 8. ACM.
- 55 Porter, M. 2010 BELLHOP Trave gaussiana / trave a elementi finiti cod. Vedi <http://oalib.hlsresearch.com/Rays/index.html>.

*Phil. Trans. R. Soc. A* (2012)