

## Piattaforme di simulazione e sperimentazione per acustica subacquea

### Reti di sensori: progressi e sfide

28

HANJIANG LUO , Zibo Vocational Institute, Shenzhen University  
 KAISHUN WU e RUKHSANA RUBY , Università di Shenzhen  
 FENG HONG e ZHONGWEN GUO , Ocean University of China  
 LIONEL M. NI , Università di Macao

L'oceano e l'acqua coprono fondamentalmente le parti principali del nostro pianeta. Per ottenere la migliore utilizzazione del sottostante risorse su queste parti della Terra, le persone hanno fatto alcuni progressi nella ricerca. In particolare, il la ricerca sulle reti di sensori acustici wireless subacquei (UWA-SN) ha fatto grandi progressi. Però, l'ampia diffusione degli UWA-SN è tutt'altro che una realtà per diversi motivi. Un motivo importante è quello lo spiegamento offshore e gli esperimenti sul campo di applicazioni oceaniche sono sia costosi che manodopera intensivo. Altre alternative per raggiungere questo obiettivo sono condurre simulazioni o sperimentazioni che può ridurre i costi e accelerare le attività di ricerca e i loro risultati. Tuttavia, la progettazione efficiente e piattaforme affidabili di simulazione e sperimentazione si sono dimostrate più impegnative oltre il aspettativa. In questo articolo, esploriamo le principali tecniche (inclusi i loro pro e contro) e i componenti sviluppare piattaforme di simulazione e sperimentazione e fornire un rapporto completo di indagine in questo settore. Classifichiamo piattaforme di simulazione e sperimentazione sulla base di alcuni criteri tipici e quindi forniamo utili linee guida per i ricercatori sulla scelta di piattaforme adeguate in base alle loro esigenze. Infine, noi affrontare alcune questioni aperte e non risolte in questo contesto e fornire alcuni suggerimenti sulla ricerca futura.

Concetti CCS: **I Organizzazione dei sistemi informatici** → **Sistemi embedded e cyber-fisici** ; Sensore reti; Sistemi in tempo reale; **I Reti** → Simulazioni di rete; Sperimentazione in rete ;  
 Parole chiave e frasi aggiuntive: reti di sensori acustici subacquei, esperimenti, simulatori, banchi di prova

#### Formato di riferimento ACM:

Hanjiang Luo, Kaishun Wu, Rukhsana Ruby, Feng Hong, Zhongwen Guo e Lionel M. Ni. 2017. Simulazione e piattaforme di sperimentazione per reti di sensori acustici subacquei: progressi e sfide. ACM Comput. Surv. 50, 2, articolo 28 (maggio 2017), 44 pagine.  
 DOI: <http://dx.doi.org/10.1145/3040990>

## 1. INTRODUZIONE

A differenza delle reti di sensori wireless terrestri (WSN), i sensori acustici wireless subacquei Le reti sor (UWA-SN) hanno molte caratteristiche uniche [2 , 78, 108, 114, 122].

Questa ricerca è stata in parte supportata dalle sovvenzioni China NSFC 61472259,61379127,61379128, Shenzhen Science and Technology Foundation (n. KQCX20150324160536457), Guangdong Talent Project 2014TQ01X238, 2015TX01X111 and GDUPS (2015), the Project of Shandong Province Higher Educational Programma di scienza e tecnologia n. J11LG88, borsa di studio FDCT di Macao 149/2016 / A e Università di Macao Concedi SRG2015-00050-FST.

Indirizzi degli autori: H. Luo, Zibo Vocational Institute, Shenzhen University, Liantong Rd, Zibo, ShanDong, 255314, Cina; e-mail: [luo.wireless@gmail.com](mailto:luo.wireless@gmail.com); K. Wu (autore corrispondente) e R. Ruby, Shenzhen University, 3688 Nanshan Ave, Nanshan, Shenzhen, Guangdong, 518060, Cina; e-mail: {wu, ruby}@szu.edu.cn; Z. Guo e F. Hong, Ocean University of China, 238 Songling Rd, Laoshan, Qingdao, 266100, Cina; email: {guozhw, hongfeng}@ouc.edu.cn; LM Ni, Università di Macao, Avenida da Universidade, Taipa, Macao, Cina; e-mail: [ni@umac.mo](mailto:ni@umac.mo).

Viene concesso il permesso di fare copie digitali o cartacee di parte o tutto questo lavoro per uso personale o in classe gratuitamente a condizione che le copie non siano fatte o distribuite a scopo di lucro o vantaggio commerciale e ciò le copie mostrano questo avviso sulla prima pagina o schermata iniziale di un display insieme alla citazione completa. Copyright per

i componenti di questo lavoro di proprietà di altri che non ACM devono essere rispettati. È consentito l'estrazione con credito. Copiare in altro modo, ripubblicare, pubblicare sui server, ridistribuire agli elenchi o utilizzare qualsiasi componente di questo il lavoro in altre opere richiede previa autorizzazione specifica e / o un compenso. Le autorizzazioni possono essere richieste da Publications Dept., ACM, Inc., 2 Penn Plaza, Suite 701, New York, NY 10121-0701 USA, fax +1 (212) 869-0481 o [permissions@acm.org](mailto:permissions@acm.org).  
 c c 2017 ACM 0360-0300 / 2017/05-ART28 \$ 15,00  
 DOI: <http://dx.doi.org/10.1145/3040990>

ACM Computing Surveys, vol. 50, n. 2, articolo 28, Data di pubblicazione: maggio 2017.

## Pagina 2

28: 2

H. Luo et al.

Di conseguenza, ni coinvolte negli UWA-SN sono da allora un argomento di ricerca attivo. Nel 2000 [22, 35], ci sono ancora molte sfide in quest'area che devono essere risolte prima della diffusione di tali reti. Una di queste sfide sta nello sviluppo mentre si prendono in considerazione piattaforme di simulazione o sperimentazione nuove e ben progettate componenti software e hardware adeguati ed economici, strumenti di simulazione, protocollo framework, sensori e così via [67, 82]. Piattaforme di sperimentazione in particolare sono più cruciali durante la ricerca sugli UWA-SN. Questo perché per condotta facendo simulazioni, emulazioni o sperimentazioni con queste piattaforme, i ricercatori possono farlo convalidare, eseguire il debug e testare i protocolli subacquei a basso costo e possono abbreviare l'estensione periodo di turnaround della progettazione del protocollo allo stesso tempo. Fino ad ora, i ricercatori hanno ha sviluppato molte piattaforme di sperimentazione per WSN terrestri. Tuttavia, le entità in Gli UWA-SN comunicano su canali acustici variabili temporalmente e spazialmente hanno caratteristiche totalmente differenti rispetto alla comunicazione radio terrestre canali in termini di perdita di percorso, interferenza multipath, ritardo di propagazione, Doppler diffusione, rumore e così via [2, 45]. Per piattaforme di sperimentazione sviluppate per Le WSN terrestri non possono essere utili direttamente per gli UWA-SN.

Progettare strumenti di simulazione adeguati e banchi di prova reali per UWA-SN, ricercatori hanno ha contrastato più sfide di quanto si aspettassero all'inizio. In primo luogo, il tempo di modellazione canali acustici subacquei variabili e selettivi in frequenza rappresentano precisamente una sfida [105], il che rende ancora più difficile progettare simulazioni accurate e affidabili strumenti o banchi di prova sperimentali. Per affrontare la comunicazione subacquea in continua evoluzione canali, i modem acustici sono una parte critica degli UWA-SN poiché vengono utilizzati in progettare e implementare protocolli autoadattativi in base al tempo ambienti per migliorare l'accuratezza, la flessibilità e l'efficienza della sperimentazione. Secondo, è molto costoso creare banchi di prova sperimentali per gli UWA-SN rispetto a quello per le WSN terrestri in termini di costi di distribuzione, hardware e manutenzione. Terzo, a causa delle difficoltà e dei minori sforzi compiuti in questa direzione della ricerca, ci sono solo a numero limitato di banchi di prova sperimentali pratici sviluppati per valutare la comunicazione protocolli di rete e di rete. Quarto, valutare e confrontare le prestazioni di diverse piattaforme di simulazione o sperimentazione in scenari del mondo reale lo sono effettivamente non solo difficile ma anche un problema aperto.

Anche se la ricerca sulla costruzione di piattaforme di simulazione e sperimentazione lo è difficile, le potenziali applicazioni emergenti e i crescenti interessi di ricerca hanno ha motivato i ricercatori a progettare e sviluppare nuove simulazioni convenienti e di facile utilizzo strumenti e banchi di prova sperimentali a livello di campo. Di conseguenza, questi progressi incoraggiano rapida progressione dell'età negli UWA-SN. Nel corso degli anni, molte piattaforme di simulazione e Sono stati sviluppati banchi di prova a livello di campo che utilizzano componenti basati su software o componenti di sperimentazione basati su hardware più sofisticati. La ricerca comunità di ricerca si è anche impegnata molto per ridurre il divario tra le simulazioni implementazioni basate e reali sul campo per facilitare la transizione dal livello di laboratorio simulazione ed emulazione alla sperimentazione reale a livello di campo.

In generale, per simulare, valutare, convalidare o testare protocolli subacquei, i ricercatori attualmente si basano su tre tecniche, ovvero simulazione basata su software, basata su hardware simulazione ed esperimenti reali a livello di campo utilizzando banchi di prova [128]. Al fine di ridurre il

costo, un livello fisico modellato matematicamente viene tipicamente utilizzato nelle simulazioni basate su software. La simulazione basata su hardware è anche chiamata emulazione, in cui il livello fisico e i modelli sono sostituiti da veri e propri modem acustici subacquei. Valutazione delle prestazioni utilizzando la simulazione basata su software o la simulazione basata su hardware sono molto meno costosi rispetto a quella con veri banchi di prova sperimentali a livello di campo. Il motivo è quello valutare le prestazioni di alcuni sistemi tramite la simulazione è più conveniente, in quanto

Una piattaforma di sperimentazione è spesso denominata banco di prova in questo articolo.

ACM Computing Surveys, vol. 50, n. 2, articolo 28, Data di pubblicazione: maggio 2017.

## Pagina 3

Piattaforme di simulazione e sperimentazione per reti di sensori acustici subacquei

28: 3

consente ai ricercatori di progettare diversi scenari di sistema variando le topologie di rete, modelli di traffico, propagazione dei canali e così via. Inoltre, può essere condotta la simulazione ripetutamente per reti su larga scala a costi relativamente bassi.

Tuttavia, le tecniche di simulazione sia basate su software che su hardware non possono essere sostituite da veri banchi di prova sperimentali a livello di campo, poiché queste tecniche hanno le loro limitazioni. Ad esempio, gli strumenti di simulazione di solito prendono un sottoinsieme di ambiente reale variabili che portano a un modello approssimativamente semplificato per canali o ambientale dinamica. Inoltre, queste tecniche a volte prendono le funzionalità hardware in account, che compromette in modo significativo le prestazioni del sistema [ 86 ]. Dall'altra mano, gli esperimenti reali a livello di campo vengono generalmente condotti in ambienti reali utilizzando nodi di sensori reali per testare o verificare i protocolli progettati. Approssimativamente, tali esperimenti possono essere condotti su piccola scala (ad esempio, in una piscina d'acqua) o in scenari del mondo reale mediante distribuzione i banchi di prova in un lago, un fiume o nell'oceano per un lungo periodo di tempo in un grande scala. Sebbene ogni tecnica abbia i suoi pro e contro, i ricercatori potrebbero aver bisogno di tutto queste diverse tecniche (p. es., simulazione, emulazione e esperimento a livello di campo reale) durante le diverse fasi di progettazione prima di distribuire un'applicazione per real underwater reti di sensori.

Diversi articoli del sondaggio riassumono come la comunicazione e il tempo tecniche di sincronizzazione [22, 46–48], cor e dinamica dei um controllo degli ac (AC), instradamento, [24, 92], impl izzazi tura e test di reti di sensori acustici subacquei . 44, 1 hanno fornito una panoramica di alcune tecniche chiave in questo conte : te di comunicazione subacquea punto-punto e la rete protocolli di lavoro. In [105], gli autori hanno presentato una panoramica di tipo tutorial sul canale modelli di propagazione e loro caratteristiche statistiche di tali reti. L'articolo [44] ha riassunto le principali sfide e approcci nella progettazione delle applicazioni di UWA-SN. Gli autori hanno anche discusso di alcuni problemi e componenti aggiuntivi di tali reti, come hardware, strumenti di simulazione, dinamiche dell'ambiente sottomarino ronnments, sviluppo di banchi di prova sperimentali e così via. Recentemente, un articolo [ 24 ] che ha fornito una panoramica delle attuali attività di ricerca in corso negli UWA-SN e ha riassunto lo sviluppo graduale dei protocolli fisici, MAC e di routing di tali reti. Sebbene questi articoli di indagine abbiano fornito preziosi consigli e suggerimenti su simulatori e banchi di prova, in realtà non si sono concentrati sui banchi di prova sottomarini e, di conseguenza, la discussione di questi articoli di indagine non era completa.

Fino ad ora, alcuni ricercatori hanno condotto sondaggi solo : ti di simulazione e banchi di prova sviluppati per WSN terrestri [49, 52, 70]. Ad es ], gli autori ha presentato un'indagine completa sui banchi di prova e sugli st mentali sviluppati per WSNs e poi hanno fornito una discussione approfondita sulle questioni attuali e future coinvolti in questa direzione della ricerca. Alcuni articoli di sondaggi basati sul confronto per Anche gli UWA-SN sono usciti di recente. Ad esempio, in [ 102 ], quattro simulazioni basate su ns-2 gli strumenti vengono studiati e confr nini di proprietà differenti. TRAMONTO e DESERTO sono confrontati in [89]. In [126], SU iLinux vengono valutati e confrontati basato su diversi criteri di prestazione.

Sebbene la suddetta letteratura abbia contribuito alla ricerca sperimentale problemi degli strumenti e dei testbeds corrispondenti negli UWA-SN, una revisione completa su Mancano ancora piattaforme di simulazione subacquea e banchi di prova sperimentali a livello di campo. Pertanto, in questo articolo, selezioniamo 17 tipiche piattaforme di simulazione e sperimentazione che può condurre simulazioni, emulazioni o persino test sperimentali reali a livello di campo per i ricercatori, come mostrato nella Tabella I , e mirano a presentare un'indagine sullo stato di piattaforme di testbed all'avanguardia sviluppate dal 2004. La motivazione di questo articolo è facilitare la ricerca negli UWA-SN e assistere i ricercatori nella progettazione di questo tipo di piattaforme. Più specificamente, il contributo di questo articolo di indagine è duplice. Primo, questo

ACM Computing Surveys, vol. 50, n. 2, articolo 28, Data di pubblicazione: maggio 2017.

Pagina 4

28: 4

H. Luo et al.

Tabella I. Piattaforme di simulazione e sperimentazione selezionate

piattaforma	Anno di pubblicazione	Istituzione	Laboratorio
Seaweb	1995/2004	US Navy e università	L'Ufficio Navale
Aqua-Lab	2007	Università del Connecticut	Ricerca Sensore subacqueo
SUPERIORE	2007	Università Nazionale del CES	Network Lab Sistemi e reti
Aqua-Sim	2009/2015	Università del Connecticut	Laboratorio di ricerca (SysNet) Sensore subacqueo
UANT	2009	Università della California, Los Angeles	Network Lab Collegato in rete e integrato
Aqua-Net / Mate	2009/2013	Università del Connecticut	Laboratorio di sistemi Sensore subacqueo
UW-Buffalo	2012	Università di New York a Buffalo	Network Lab Reti wireless e
DESERTO	2012	Università di Padova	Laboratorio di sistemi integrati
TRAMONTO	2012/2013	Sapienza Università di Roma	Laboratorio del progetto NAUTILUS
SeaLinx	2013	Università del Connecticut	UWSN Group Senses Lab Sensore subacqueo
UnetStack	2014	Ricerca acustica dell'Università nazionale di Singapore	Network Lab
Ocean-TUNE (UCONN)	2014	Università del Connecticut	Laboratorio Sensore subacqueo
Ocean-TUNE (UW)	2014	Università di Washington	Network Lab Fondamenti di
ALBA (LOON)	2014	Scienza e tecnologia della NATO	Laboratorio di rete Centro marittimo
SUNRISE (Porto)	2014	Università di Porto	Organizzazione Ricerca e
SeaNet	2015	Northeastern University, Boston Department of Electrical	Sperimentazione Sistemi subacquei e
Ocean-TUNE (WaterCom) 2015		University of University of California, Los Angeles	Laboratorio tecnologico e ingegneria informatica
			Collegato in rete e integrato
			Laboratorio di sistemi

l'articolo presenta un'indagine sulle piattaforme di simulazione e sperimentazione subacquea e identifica le sfide, le metriche e le tendenze future della ricerca, che aiuteranno i ricercatori a progettare banchi di prova più nuovi e pratici. In secondo luogo, riassumiamo 17 diverse piattaforme in termini di componenti, funzionalità, caratteristiche e limitazioni, nonché fornitura linee guida e raccomandazioni specifiche che aiuteranno i ricercatori a scegliere adatto piattaforme di ricerca secondo le loro specifiche esigenze.

Per illustrare i progressi nella ricerca sul banco di prova subacqueo, in questo articolo, noi generalmente classificare i banchi di prova selezionati in tre gruppi (p. es., esperimenti a livello di laboratorio banchi di prova tal, banchi di prova sperimentali a breve termine e sperimentali a livello di campo a lungo termine testbeds) in base alla scala di distribuzione, al costo e alle caratteristiche del testbed, come mostrato nella tabella II . I banchi di prova sperimentali a livello di laboratorio (ad esempio, Aqua-Lab, UPPER (Underwater

Platform to Promote Experimental Research); SeaNet, UANT (Underwater Acoustic Network), Aqua-Sim e Università di Washington (UW) Buffalo) principalmente concentrarsi su esperimenti e test a livello di laboratorio. I loro costi di implementazione sono relativamente bassi e può condurre esperimenti su piccola scala. Sono adatti per test in fase iniziale e per i principianti per acquisire familiarità con gli ambienti di comunicazione subacquea. Il banchi di prova sperimentali a breve termine (ad esempio, Aqua-Net, SeaLinx, UnetStack, DESERT e SUNSET) può effettivamente condurre esperimenti sia di laboratorio che di campo. Tuttavia, com abbinato a quei banchi di prova progettati e implementati specificamente per esperimenti a termine, questo gruppo di banchi di prova viene utilizzato principalmente per esperimenti a breve termine o test. Hanno un costo medio-alto e la scala di distribuzione è compresa tra la media troppo grande. La maggior parte di essi supporta la transizione senza interruzioni tra simulazione, emulazione o

ACM Computing Surveys, vol. 50, n. 2, articolo 28, Data di pubblicazione: maggio 2017.

Tabella II. Classificazione delle piattaforme di simulazione e sperimentazione

Categorizzazione	Caratteristiche principali	Banchi di prova
Banchi di prova sperimentali a livello di laboratorio	A basso costo	Aqua-Lab
	Piccola scala	SUPERIORE
	Test nella fase iniziale	SeaNet
	Adatto ai principianti	UANT
		Aqua-Sim
		UW-Buffalo
Banchi di prova sperimentali a breve termine	Costo medio alto	Aqua-Net / Mate
	Scala medio-grande	SeaLinx
	Test a breve termine	UnetStack
	Supporto per la transizione senza interruzioni	DESERTO
		TRAMONTO
Banchi di prova sperimentali a lungo termine a livello di campo	Costo elevato e larga scala	Seaweb
	Test sul campo a lungo termine	Ocean-TUNE (UCONN,
	Banchi di prova eterogenei	UW, WaterCom)
	Accesso e controllo remoti	ALBA (LOON, Porto)

anche veri test sul campo. I banchi di prova sperimentali a lungo termine a livello di campo (ad esempio, Seaweb, Ocean-TUNE e SUNRISE (Sunrise)) si concentrano principalmente sul reale livello di campo a lungo termine implementazione su larga scala con costi elevati. Sono generalmente dotati di eterogeneità componenti nuovi, come nodi statici sottomarini, veicoli subacquei autonomi (AUV), veicoli subacquei senza pilota (UUV) o nodi di superficie. Supportano anche accesso remoto e funzione di controllo, poiché questi banchi di prova sono solitamente distribuiti lontano dal riva nell'oceano.

Il resto dell'articolo è organizzato come segue. Nella sezione 2, i componenti principali di simulazioni e piattaforme di sperimentazione. Spieghiamo in modo elaborat le metriche del progetto del banco di prova nella sezione 3 . Nella Sezione 4, 5 e Sezi 6, noi discutere banchi di prova sperimentali a livello di laboratorio, banchi di prova \_ imentali a l \_ termine e termine testbeds sperimentali a livello di campo, rispettivamente, e presentano un confronto dettagliato discussione di ogni tipo. I consigli e le raccomandazioni sulla scelta di simulazione e le piattaforme di sperimentazione sono offerte nella Sezione 7 . Infine, la sezione 8 conclude il articolo con alcune indicazioni sulla ricerca futura.

2. COMPONENTI DELLE PIATTAFORME DI SIMULAZIONE E SPERIMENTAZIONE

Le piattaforme di simulazione e sperimentazione sono solitamente composte da software-componenti basati, modem subacquei, nodi di sensori statici o mobili e interfacce utente facce [22] . Tra i componenti basati su software, gli strumenti di simulazione, uno stack di protocollo, e un sistema operativo (OS) vengono utilizzati per controllare l'intero sistema. L'acustica i modem si occupano della trasmissione dei dati nei banchi di prova. Di solito ce ne sono molti

nodi di sensori statici o mobili nei banchi di prova per rilevare o raccogliere dati da applicazioni specifiche plicature. D'altra parte, le interfacce utente sono sviluppate per i ricercatori comunicare o passare comandi ai banchi di prova durante la simulazione, emulazione o test a livello di campo. In questa sezione vengono illustrati i componenti principali di piattaforme di simulazione, sul campo e di sperimentazione a livello di laboratorio.

### 2.1. Componenti basati su software

Tra i componenti basati su software, gli strumenti di simulazione, il protocollo subacqueo stack, sistema operativo e simulatori di canale sono notevoli e importanti. Gli strumenti di simulazione includere software di simulazione commerciale personalizzato scritto da ricercatori o altri software di rete open source gratuito. Fino ad ora, i ricercatori ne hanno sviluppato noto software di rete, come OPNET [77, 120], Omnet ++ [13, 76] e

ACM Computing Surveys, vol. 50, n. 2, articolo 28, Data di pubblicazione: maggio 2017.

## Pagina 6

28: 6

H. Luo et al.

ns-2 [73], che sono adatti per simulare / emulare reti di sensori sottomarini. Tra questi, ns-2 è il simulatore di eventi discreti open source più affidabile e noto, che fornisce un ampio volume di protocolli, reti e modelli di applicazioni a più di 600 istituzioni sparse in oltre 50 paesi in tutto il mondo. Ns2-Miracle è l'ex-versione tesa di ns-2 che ha nuove librerie per supportare lo scambio di messaggi cross-layer strutture e consente a più protocolli di esistere nello stesso livello di protocollo [11]. Di Più cosa importante, utilizza il software di ray-tracing Bellhop [94] nel livello fisico per promuovere vide canali acustici quei più realistici per World Ocean Simulation System (WOSS) [17, 41] i simulatori di reti commerciali, i ricercatori hanno scritto molti software di : one personalizzati che utilizzano linguaggi C e C ++ [16 ].Linux è il sistema operativo tipico, distribuito sull'hardware di banchi di prova e nodi sensori [71].

Poiché la radio definita dal software (SDR) ha la capacità di sostituire quella convenzionale componenti hardware da quelli software, presenta molti vantaggi per gli UWA-SN [29, 54, 72]. Ad esempio, per affrontare il duro canale di comunicazione sottomarino, è desiderabile in grado di progettare modem software-defined (SDM) utilizzando SDR, che è adattivo con l'estensione cambiare le tecniche di comunicazione a causa degli ambienti complessi e variabili [20, 32]. La radio GNU (Gnu's Not Unix) è una delle architetture SDR più popolari, ovvero di solito utilizzato per progettare schemi di modulazione avanzati durante la costruzione di un prototipo iniziale di alcuni sistemi. La radio GNU fornisce molti blocchi separati per costruire rapidamente prototipi, come i blocchi per condurre l'elaborazione del segnale e così via. Questi blocchi sono collegati logicamente tra loro per eseguire funzioni specifiche una dopo l'altra, che sono i sostituzione di componenti hardware reali nella fase di progettazione dei primi prototipi [40].

### 2.2. Modem acustici subacquei

I modem acustici subacquei sono parti essenziali della simulazione e della sperimentazione piattaforme di tazione. Un confronto più ato tra diverse acustiche subacquee modem è fornito in [24, 33]. In questa s descriviamo brevemente alcuni commerciali modem, modem orientati alla ricerca e S ].

Alcuni modem acustici commerciali standard sono disponibili per i ricercatori e i più noti modem acustici subacquei cor li includono Lin est [57], Teledyne [109], EvoLogics [36], Aqua SPCComm [: Fritech [112], ogic [30], AppliedOceanSystems [6] e sti modem ntiscono principali fidabilità comunicazione con un tasso di errore di bit bass : le applicazioni sia in profondità che in profondità acqua quando la velocità dati è inferiore a 10 Kbps. La distanza di comunicazione può essere da da diverse centinaia di metri a diversi chilometri e la massima potenza di trasmissione può essere fino a 60W. I modem commerciali si basano principalmente su affidabili point-to-point a lungo comunicazione a distanza, e quindi questi consentono a malapena ai ricercatori di mettere a punto l'hardware parametri durante il test di nuovi protocolli e applicazioni [104].

Per soddisfare i requisiti della comunità di ricerca, è necessario configurare un modem urabile durante la valutazione delle prestazioni di diverse applicazioni subacquee, protocolli

e algoritmi. Ad esempio, i ricercatori dovrebbero avere la flessibilità di riprogrammare completamente il modem (ad esempio, selezionare la modalità di modulazione) con protocollo di rete autoadattativo [14, 55]. Sono stati sviluppati diversi modem orientati alla ricerca nella comunità, come la WHOI (Woods Hole Oceanographic Institution) Micro-Modem, rModem [118] e così via. Il micro-modem WHOI è uno dei più modem ben noti, ed è stato progettato inizialmente per piccoli dispositivi autonomi a basso costo veicolati acquatici, come REMUS [97]. Tuttavia, nella fase successiva, apparecchiature di navigazione così come la possibilità di scegliere modalità di comunicazione ad alta velocità dati coerenti in fase e potenza di trasmissione sono stati aggiunti. La velocità dati delle modalità di comunicazione può variare da 80 bps a 5400 bps e il consumo energetico può variare da 8 W a 48 W [39].

rModem è anche un modem riconfigurabile, progettato per semplicità cross-layer per studi di sperimentazione basati sull'ottimizzazione [9, 104]. Il suo software è programmabile sul campo.

ACM Computing Surveys, vol. 50, n. 2, articolo 28, Data di pubblicazione: maggio 2017.

## Pagina 7

Piattaforme di simulazione e sperimentazione per reti di sensori acustici subacquei

28: 7

Fig. 1. La struttura di un nodo sensore subacqueo.

consente ai ricercatori di scegliere la frequenza portante dalla gamma [1–100] kHz. Con Casella degli strumenti Simulink [104], i ricercatori possono raggiungere l'hardware del modem per gestire la trasmissione dei dati missione o eventi che registrano le attività correlate [9]. rModem può funzionare con un omnidirezionale trasduttore Teledyne direzionale (es. AT-408) e consente ingressi multipli-uscite multiple trasmissioni utilizzando i suoi quattro canali di ingresso e uscita configurabili [9]. Sebbene rModem è riconfigurabile, gli stack di protocollo e il suo strumento Simulink devono essere eseguiti su un personal computer (PC), che potrebbe comprometterne le prestazioni.

Le funzionalità dei modem basati su hardware possono essere tutte sostituite da quelle basate su software implementazione negli SDM, come rilevazione del segnale, correzione degli errori, modulazione e demodulazione e così via [20, 37]. Inoltre, l'SDM, è più conveniente colorare e selezionare in modo identico tecniche di comunicazione adeguate in conformità con le condizioni ambientali oceanici per ottenere prestazioni ottimali [31, 71, 95].

### 2.3. Sensori statici e mobili

Al fine di creare un vero banco di prova a livello di campo, possono essere utilizzati sia nodi di sensori statici che mobili. È necessario per facilitare il networking ibrido [59, 62]. In genere, i sensori vengono distribuiti sulla superficie dell'oceano, all'interno dell'oceano o vicino al fondo [61, 63, 64, 122]. Il diagramma della struttura di un tipico nodo di sensori acustici subacquei statici è mostrata nella Figura 1, che include un'unità di elaborazione centrale (CPU) per controllare l'intero nodo, un trasduttore e un file modulo di modulazione / demodulazione per ricevere o inviare messaggi, un fascio di sensori a rilevare gli ambienti circostanti, un modulo di alimentazione e un modulo di archiviazione dati.

I nodi di sensori mobili sono le parti essenziali delle piattaforme di sperimentazione a livello di campo. Esempi tipici di tali nodi sono i nodi di superficie libera [53], AUV o UUV [65], o alianti subacquei [101]. Un AUV può muoversi silenziosamente e continuamente per mesi sott'acqua secondo la sua configurazione, equipaggiata con la sua propria batteria ricaricabile alimentata [4, 60, 78]. La velocità di un AUV di classe REMUS è di circa 1.5 m/s, che consuma circa 15 W di potenza. Tuttavia, quando il file di dati è pieno, il consumo energetico raggiunge circa 110 W, la velocità di viaggio può raggiungere fino a 2.9 m/s [106]. Gli alianti subacquei sono un altro tipo di nodi alla deriva liberi che possono liberamente



vagano attraverso l'oceano con un consumo di energia ridotto [ 101] .

### 3. CRITERI DI PROGETTAZIONE DELLE PIATTAFORME DI SIMULAZIONE E SPERIMENTAZIONE

Per qualsiasi applicazione, durante la progettazione di uno strumento di simulazione o di una piattaforma di sperimentazione, i ricercatori affrontano molte sfide. La sfida principale è affrontare lo sbalzo canali di comunicazione subacquea variabili temporalmente e spazialmente e da fornire piattaforme autoadattative in tempo reale basate su condizioni ambientali variabili e requisiti applicativi ferenti. Un'altra sfida è progettare un completamente configurabile e un banco di prova flessibile che consente ai ricercatori di programmare o configurare hardware o software parametri di ware per testare diversi nuovi protocolli e algoritmi in modo efficiente e con precisione. Altre sfide includono la sincronizzazione dell'ora e la temporizzazione degli eventi; canale precisione; integrazione di simulazione, emulazione, test a livello di campo con transizione; costo ed efficienza energetica; accesso remoto e strutture di controllo del banco di prova; e

ACM Computing Surveys, vol. 50, n. 2, articolo 28, Data di pubblicazione: maggio 2017.

## Pagina 8

28: 8

H. Luo et al.

presto. Con l'intenzione di superare le suddette sfide, pensiamo che i seguenti criteri dovrebbero essere presi in considerazione durante la progettazione di una simulazione strumento o una piattaforma di sperimentazione.

- *Riconfigurabilità e supporto per la progettazione cross-layer*: un tipico banco di prova dovrebbe avere un file architettura flessibile e dovrebbe essere configurabile a diversi livelli di protocollo. Questo feature consente ai ricercatori di programmare i componenti hardware e software di banco di prova regolando i parametri che coprono un'ampia gamma di scenari e condizioni delle applicazioni. Fondamentalmente, il successo nella costruzione di un banco di prova è notevolmente pendenti da queste caratteristiche. Anche l'autoadattabilità è una metrica importante fornisce testbeds per avere una sorta di intelligenza nel rispondere all'evento correlato ambienti dinamici. Dall'altra il canale di comunicazione acustica sott'acqua è altamente dinamico, e quindi la sua capacità e la risultante con il ritardo di comunicazione è dipendente dalla posizione o variante spaziale e / o temporale o può anche essere esplosivo per natura. Sviluppare protocolli e algoritmi ottimizzati con altamente canali acustici subacquei dinamici e in continua evoluzione, i banchi di prova dovrebbero fornire un meccanismo che consente ai ricercatori di scambiare informazioni sul protocollo cross-layer. Se le informazioni sul livello inferiore (ad es. Collegamento o livello fisico) sono disponibili per il livello superiore livelli (ad esempio, MAC, routing, trasporto o anche il livello dell'applicazione), quindi questo consente ricercatori per riconfigurare e controllare i banchi di prova in modo adattivo per verificare il prestazioni di protocolli e applicazioni di nuova concezione.
- *Efficienza e precisione*: l'efficienza e l'accuratezza di qualsiasi test arbitrario o esperimento dipende in gran parte dall'architettura della simulazione corrispondente tor / testbed, il suo utilizzo della memoria, il consumo energetico e così via. Tra questi, banco di prova architettura, accuratezza del canale simulato / emulato e sincronizzazione temporale sono i fattori più importanti. Un accurato canale simulato / emulato garantisce che gli strumenti di simulazione o banchi di prova hanno modelli di propagazione acustica accurati che può catturare i comportamenti di veri canali acustici subacquei. Di conseguenza, i corrispondenti simulatori / banchi di prova possono generare risultati di valutazione ragionevoli confronto con scenari applicativi realistici. La sincronizzazione dell'ora è fondamentale base per applicazioni in rete di sensori distribuiti in tempo reale e quindi simulazione strumenti e banchi di prova dovrebbero garantire il verificarsi di tutti gli eventi in modo tempestivo.
- *Supporto per transizioni senza interruzioni*: simulazione, emulazione e test a livello di campo hanno difficoltà ruoli ferenti nel ciclo di vita dello sviluppo di applicazioni. Integrazione della simulazione, l'emulazione, o test a livello di campo (SEFT), e la loro transizione senza interruzioni sono importanti per qualsiasi strumento arbitrario o banco di prova. È naturale che i ricercatori eliminino gli errori comuni nella progettazione di protocolli attraverso la simulazione preliminare senza coinvolgere alcun underwa-



ter hardware. Quindi, le stesse funzionalità verificate nella fase precedente vengono emulate su modem acustici reali o sensori subacquei per eseguire il debug degli errori relativi all'hardware subacqueo. L'ultimo passaggio consiste nell'implementare protocolli o applicazioni su banchi di prova a livello di campo nell'oceano per test e verifiche a lungo termine. quindi, il banco di prova che integra simulazione, emulazione e test a livello di campo facilitando notevolmente lo sviluppo di applicazioni. Per questo tipo di banchi di prova, transizione senza soluzione di continuità tra diverse fasi dello sviluppo senza lo scambio di informazioni fuorvianti è importante. L'efficienza del banco di prova dipende ulteriormente da come è il codice effettivo scritto per implementare diverse fasi di un test o di un esperimento.

- *Supporto modem*: il modem acustico subacqueo è un componente importante dei banchi di prova.

I banchi di prova dovrebbero supportare sott'acqua commerciali e orientati alla ricerca modem acustici ed è meglio supportare diversi tipi di modem. Una riconfigurazione urabile modem consente ai testbeds di modificare la propria configurazione ogni volta che è necessario in modo flessibile, il che è vantaggioso sia nella progettazione che nella gestione degli strati incrociati problemi di autoadattamento ambientale.

ACM Computing Surveys, vol. 50, n. 2, articolo 28, Data di pubblicazione: maggio 2017.

## Pagina 9

Piattaforme di simulazione e sperimentazione per reti di sensori acustici subacquei

28: 9

- *Accessibilità gratuita delle risorse*: banchi di prova liberamente accessibili consentono un gruppo più ampio di i ricercatori possono accedervi gratuitamente e incoraggiare la collaborazione sott'acqua ricerca. Per ottenere il vantaggio da questi banchi di prova ad accesso aperto, strumenti di simulazione o componenti software dovrebbero essere scaricabili da Internet così i ricercatori può condurre in modo indipendente simulazioni basate su software puro. Per quanto riguarda il laboratorio ad accesso aperto o banchi di prova a livello di campo, la totalità o le parti dei banchi di prova dovrebbero essere accessibili a ricercatori ordinari per condurre a distanza esperimenti reali a livello di campo.
- *Accessibilità remota*: i banchi di prova a livello di campo sono normalmente distribuiti nell'oceano e quindi la struttura di accesso remoto offre grande comodità ai ricercatori mentre condurre esperimenti tramite Internet o tecnologia basata su cloud in qualsiasi momento. Ricercatori dovrebbe essere in grado di accedere, controllare e riconfigurare sia il software che l'hardware componenti dei banchi di prova da remoto. Compiti tipici che i ricercatori svolgono frequentemente sono la configurazione dei parametri hardware o di rete, la selezione della modalità funzionale, il sensore inizializzazione dei nodi e così via. Altre attività includono il caricamento orientato all'esperimento attività, download di risultati sperimentali e così via.
- *Costo di implementazione*: a seconda dei diversi obiettivi di test e dei requisiti sperimentali, i ricercatori possono organizzare esperimenti su piccola, media o grande scala. Questo perché se i ricercatori implementano sempre esperimenti su larga scala, indipendentemente dal requisito, comporterà spese enormi per loro. Per ottenere la diversità negli esperimenti a livello di campo, il banco di prova dovrebbe essere distribuito in diverse posizioni geografiche associate a ambienti diversi. Per soddisfare i requisiti di diversità di un banco di prova ibrido, dovrebbero esserci nodi di sensori sia statici che mobili, come AUV, UUV o anche alianti subacquei.

#### 4. PANORAMICA DELLE PIATTAFORME DI SPERIMENTAZIONE A LIVELLO DI LABORATORIO E LORO CONFRONTO

Le piattaforme di sperimentazione a livello di laboratorio includono Aqua-Lab, UPPER, SeaNet, UANT, Aqua-Sim e UW-Buffalo. In questa sezione, descriviamo brevemente ciascun banco di prova che include descrizione funzionale, caratteristiche principali, limitazioni e così via. Quindi, forniamo uno studio comparativo tra loro basato sui criteri di progettazione sopra citati.

##### 4.1. L'elenco dei banchi di prova sperimentali a livello di laboratorio

4.1.1. Aqua-Lab. L'Aqua-Lab (2007) è un banco di prova a basso costo dotato di reale modem, ed è stato sviluppato dall'Università del Connecticut nel 2007 [ 79] . Come mostrato in Figura 2 , il banco di prova è composto da laptop, modem WHOI, un mixer, un serbatoio dell'acqua, un altoparlante subacqueo e un idrofono. I laptop controllano i modem acustici

inviando comandi tramite le porte seriali. Quindi, questi modem guidano il altoparlante ad acqua e idrofono per comunicazione acustica sott'acqua. Utilizzando un insieme di interfacce di programmazione di applicazioni software (API) che i ricercatori possono controllare e riconfigurare i modem per sviluppare nuove applicazioni o protocolli. Fornisce anche un emulatore basato sul linguaggio C, e quindi i ricercatori possono emulare la topologia di rete, ritardo di propagazione e attenuazione per valutare gli algoritmi e i protocolli desiderati in modo completo. Aqua-Lab ha anche un mixer audio per emulare complessi canali di comunicazione acustica subacquea.

*Caratteristiche e limitazioni:* dotato di veri modem WHOI, Aqua-Lab fornisce ambienti configurabili a basso costo. È adatto ai principianti per creare il proprio banco di prova a livello di laboratorio. All'inizio, li aiuta a familiarizzare con semplici concetto di comunicazione acustica derwater. Tuttavia, manca di fornire servizi per sviluppo successivo e non può condurre simulazioni o esperimenti complessi. Un'altra limitazione è che non può emulare trasmissioni di dati simultanee tra solo due modem.

ACM Computing Surveys, vol. 50, n. 2, articolo 28, Data di pubblicazione: maggio 2017.

---

## Pagina 10

28:10

H. Luo et al.

Fig. 2. Una configurazione di esempio di Aqua-Lab.

Fig. 3. Un esempio di configurazione di UPPER.

4.1.2. SUPER-PPER (2012) è un fai-da-te a bassissimo costo (circa \$ 25- \$ 60) banco di prova [12]. Per abbassare il costo del banco di prova, i fondatori di questo banco di prova utilizzano un file idrofono più economico che è collegato a una scheda audio, in cui implementano un modem basato su software che utilizza la radio GNU. Pertanto, la modulazione e la demodulazione dei dati, compreso il blocco di elaborazione del segnale, sono implementati da GNU radio, e quindi riduce significativamente i costi. La struttura del banco di prova è illustrata nella Figura 3 e composto da due parti principali: uno strato di spessore e uno strato fisico. Lo strato di spessore fornisce API per stabilire la comunicazione tra utenti remoti e il modem software per lo scopo della trasmissione di dati o toni, trasmettendo comandi di configurazione al modem software e così via. Allo stesso tempo, gestisce le congestioni di comunicazione tra lo strato di spessore e l'idrofono. Esistono due versioni di UPPER: v1 e v2, rispettivamente con portate di comunicazione di 6–10 m e 30–60 m [12].

*Caratteristiche e limitazioni:* UPPER è un prodotto conveniente ispirato al fai da te (fai da te) banco di prova e consente ai principianti di creare facilmente ambienti di prova sottomarini nel loro formato laboratorio. Di conseguenza, è adatto per i primi esperimenti subacquei, i test iniziali e la validazione dei protocolli e delle applicazioni progettate. La limitazione è che il file

ACM Computing Surveys, vol. 50, n. 2, articolo 28, Data di pubblicazione: maggio 2017.

## Pagina 11

Piattaforme di simulazione e sperimentazione per reti di sensori acustici subacquei

28:11

Fig. 4. L'architettura di UANT.

Il banco di prova supporta un raggio di comunicazione limitato, che è inferiore a 60 m a causa del costo vincoli. Per lo stesso motivo, non è adatto per la simulazione su larga scala e manca un accurato modello di canale sottomarino nella simulazione.

4.1.3. SeaNet. SeaNet (2015) è stato sviluppato dalla Northeastern University nel 2015 e è un framework di rete definito dal software a basso costo e completamente riconfigurabile basato su mezzi di comunicazione acustica [28]. Sfruttando le funzionalità di SDR (ad esempio, modulare architettura basata, design flessibile, ecc.), fornisce stack di protocolli completamente riconfigurabili (ad esempio, livelli fisici, collegamento dati, rete e applicazioni). Inoltre, supporta progettazione cross-layer e fornisce funzionalità di adattamento in tempo reale a entrambe le comunicazioni e protocolli di rete basati sul cambiamento delle condizioni ambientali e applicative. Ad esempio, il livello fisico fornisce un meccanismo di adattamento al protocollo progettisti nella scelta della velocità di codifica della correzione degli errori in avanti e degli schemi di modulazione attraverso alcuni algoritmi decisionali definiti dall'utente. Il prototipo preliminare di SeaNet è realizzato utilizzando hardware commerciale a basso costo, e quindi costa poco.

*Caratteristiche e limitazioni:* SeaNet è un sottomarino a basso costo, completamente riconfigurabile banco di prova per gli UWA-SN di prossima generazione, sviluppato sulla base di SDR. La limitazione è che supporta solo la costruzione di prototipi preliminari, come

sperimentazioni in un piccolo serbatoio d'acqua. Pertanto, è necessario un ulteriore miglioramento per esperimenti più completi.

4.1.4. UANT. UANT (2009) è progettato per fornire un approccio flessibile nella modifica parametri di sistema senza coinvolgere componenti hardware specializzati [71, 110]. Con la radio GNU e un noto strumento di simulazione TOSSIM (TinyOS Simulator) [40, 110], UANT fornisce livelli configurabili fisici, MAC e applicativi. Di conseguenza, i ricercatori possono implementare o confrontare rapidamente i loro schemi proposti (ad esempio, protocolli, schemi di modulazione del livello fisico) con quello in esecuzione su un PC dotato di Linux OS o TinyOS. L'architettura di esempio di UANT è mostrata nella Figura 4. Include il ricetrasmittitore periferico radio software universale [113], che è collegato a un trasduttore hardware, la radio GNU, il simulatore TOSSIM basato su TinyOS e un file Applicazione basata su TinyOS o Linux. La radio GNU fornisce un fisico configurabile strato per UANT. Quando i ricercatori devono progettare nuovi schemi di modulazione avanzati, utilizzano la vasta libreria di schemi di modulazione e blocchi di elaborazione del segnale offerto dalla radio GNU per la prototipazione rapida senza coinvolgere alcun hardware specializzato.

UANT fornisce anche un livello applicativo riconfigurabile distribuendo TinyOS o Linux OS. UANT esegue le applicazioni TinyOS su un PC dotato di TOSSIM. Poiché TinyOS è un noto sistema operativo open source progettato appositamente per sensori con limiti di energia

ACM Computing Surveys, vol. 50, n. 2, articolo 28, Data di pubblicazione: maggio 2017.

## Pagina 12

28:12

H. Luo et al.

Fig. 5. L'architettura di Aqua-Sim.

reti, UANT lo utilizza nella costruzione di veri ambienti sottomarini. Per emulare il file ambiente esatto, UANT modifica il file di configurazione di TinyOS per soddisfare le specifiche requisiti di diverse applicazioni subacquee. Pertanto, i programmi implementati per la simulazione può essere trasferito a quello da dispiegare nel vero sensore subacqueo ambienti di rete con poco sforzo a causa dell'utilizzo dello stesso sistema operativo. Per più complessi applicazioni, UANT si basa su un protocollo Linux TCP / IP (Transmission Control Protocol / Internet Protocollo) incorporando schede Ethernet virtuali che assegnano IP (protocollo Internet col) si rivolge ai nodi dotati di TinyOS. Pertanto, quando le applicazioni sono in la modalità di esecuzione, i nodi possono comunicare tra loro tramite i loro indirizzi IP tramite protocolli TCP / IP. Un altro vantaggio del protocollo TCP / IP è che i ricercatori può configurare MAC o livello fisico per studiare le prestazioni di applicazioni specifiche.

*Caratteristiche e limitazioni:* UANT è probabilmente il primo banco di prova che fornisce riconfigurazione flessibilità di urazione per gli strati inferiori e superiori della comunicazione subacquea

stack di protocolli (ad esempio, livelli fisici, MAC e applicazioni). UANT si adatta ben noto strumenti open source, come la radio GNU definita dal software, TinyOS e il sistema operativo Linux per vide la flessibilità di progettazione cross-layer ai ricercatori. UANT è anche un end-to-end completo piattaforma di prova subacquea basata su rete. Inoltre, con TinyOS, i programmi implementato per la simulazione può essere trasferito a reti di sensori subacquei reali con poco sforzo. La limitazione è che è difficile eseguire la radio GNU su sensori incorporati sors, e non è banale modificare e testare l'originale TinyOS e TOSSIM reti di sensori terrestri per comunicazioni subacquee. TinyOS ha anche un file rigido interfaccia che effettua lo scambio dell'intero strato fisico nella radio GNU con se stessa molto impegnativo [ 28] .

4.1.5. Aqua-Sim. Aqua-Sim (2009-2015) è sviluppato sulla parte superiore del famoso simulatore ns-2 [73] , e forse il primo strumento completo di simulazione a livello di pacchetto per sott'acqua reti. La sua versione iniziale è stata sviluppata nel 2009 [121] , e il canale e fisico i modelli a strati sono stati migliorati rispettivamente nel 2013 e nel 2014 [ 127, 1: 201 3 [ 74] ] è stata introdotta come versione estesa di ns-2 [66]. In [121], come illustra Figura 5 , Aqua-Sim include protocolli di rete sottomarini aggiuntivi e può evolve indipendentemente dal vecchio pacchetto di simulazione ns-2. Inoltre, analogamente a ns-2, Aqua-Sim segue lo stile di design orientato agli oggetti, e quindi funzionale aggiuntivo o moduli di protocollo possono essere introdotti come nuovi oggetti.

ACM Computing Surveys, vol. 50, n. 2, articolo 28, Data di pubblicazione: maggio 2017.

## Pagina 13

Piattaforme di simulazione e sperimentazione per reti di sensori acustici subacquei

28:13

Fig. 6. Il diagramma di flusso del modello PE.

Poiché la versione iniziale di Aqua-Sim utilizzava un modello di canale acustico di base, il i ricercatori hanno scoperto che le prestazioni complessive peggiori dei precedenti tutti gli esperimenti a livello di campo è dovuto al lungo preambolo del periodo di trasmissione dei dati e alla bassa trasmissione Vota. Pertanto, in [127] , il modello di canale di Aqua-Sim è migliorato considerando vari fattori (ad esempio, fattori fisici, dinamiche ambientali) congiuntamente presi in considerazione. Questa versione di Aqua-Sim risponde ai fattori fisici e agli effetti dell'ambiente oceanico ronments tenendo in considerazione la rifrazione dei segnali acustici. La rifrazione di segnali acustici in tali ambienti possono verificarsi a causa di vari tipi di sedimenti sul fondo del mare, come sabbia, limo, argilla, la profondità della colonna d'acqua e il rumore generato dagli effetti del vento e delle onde. Integra anche un'attenuazione in acque poco profonde modello, vale a dire Rogers Model [ 100] , che considera il tipo di sedimento per fare il casi coinvolti con perdite di trasmissione più realistiche. Inoltre, due pratici sistemi i parametri che derivano dall'uso degli attuali modem acustici commerciali sono anche preso in considerazione.

In [128] , sulla base del lavoro di cui sopra, gli autori hanno ulteriormente migliorato l'accettazione cura della simulazione integrando il modello dell'equazione parabolica (PE) nel file strato fisico come alternativa al modello basato sui raggi. Un tipo di modello PE, ovvero per il simulatore viene selezionata l' equazione parabolica di Monterey-Miami (MMPE) [103] ] catturare la propagazione del segnale acustico che varia con la dinamica del mare superficie. Tuttavia, quando i modelli PE sono integrati con il livello fisico, non solo comporta costi di calcolo elevati, ma richiede anche molto tempo per completare una simulazione

compito. Pertanto, la maggior parte dei modelli PE (ad esempio, MMPE) non possono essere integrati direttamente in Aqua-Sim. Per risolvere questo problema, come mostrato in Figura 6, il modello MMPE ha bisogno da eseguire inizialmente, quindi il suo output può essere elaborato utilizzando MATLAB per produrre un file tabella di ricerca. Questa tabella viene utilizzata per migliorare la precisione della simulazione fornendo precisione informazioni sulla propagazione del canale.

*Caratteristiche e limitazioni:* Aqua-Sim è uno dei pochi strumenti di simulazione open source rilasciato per uso pubblico e può essere scaricato da Internet. Inoltre lo è una piattaforma di simulazione a livello di pacchetto e fornisce abbondanti reti sottomarine tocols per i ricercatori. Fornisce inoltre una struttura tridimensionale dell'ambiente da implementare nella simulazione. Anche se ci vogliono i modelli Rogers e PE per migliorare l'accuratezza del canale simulato, questi modelli possono essere più sensibili in profondità acqua. Un altro limite è che i modelli PE generalmente incorrono in costi computazionali elevati rispetto alla maggior parte dei modelli di ray-tracing sebbene i modelli PE abbiano una migliore predizione sulla perdita di trasmissione multipath utilizzando Aqua-Sim. Tuttavia, dovrebbe supportare modelli di ray-tracing per fornire canali di simulazione più accurati.

4.1.6. UW-Buffer. UW-Buffer (2012) è progettato per fornire un riconfigurabile condiviso piattaforma di rete subacquea basata sul modem Telesonar Benthos (SM-75). In ordine per far fronte al mutevole ambiente di comunicazione subacquea, adotta progettazione cross-layer scambiando le informazioni tra gli strati superiori e il collegamento o livello fisico [55]. Il modem commerciale Telesonar Benthos (SM-75) no

ACM Computing Surveys, vol. 50, n. 2, articolo 28, Data di pubblicazione: maggio 2017.

## Pagina 14

28:14

H. Luo et al.

Fig. 7. L'architettura software di UW-Buffer.

fornire un'interfaccia ai ricercatori per implementare il MAC e il networking auto-progettati protocolli. La ragione di ciò è che i blocchi di codice originali di questi protocolli lo sono incorporato nel DSP (Digital Signal Processing) del modem, e quindi i ricercatori non sono autorizzati a modificarli o riconfigurarli. UW-Buffer modifica l'implementazione di il modem integrandolo con un processore Gumstix, che è un piccolo ben noto scheda di sistema programmabile di dimensioni paragonabili a un bastoncino di gomma [42]. Di conseguenza, ciò consente alla comunità di ricerca di condurre esperimenti di networking avanzati come necessario.

Come mostrato nella Figura 7, sfruttando l'API di rete, Modem Management Il protocollo (MMP) è stato sviluppato nel modem Teledyne Benthos. Il protocollo nativo strati di questo modem vengono bypassati completamente spostando le sue responsabilità originali

al processore Gumstix. Con MMP, il modem può essere controllato o riconfigurato da scambiando continuamente messaggi tra il processore Gumstix e il modem mantenendo intatta l'implementazione originale dei livelli fisici e di collegamento dati.

Per facilitare la progettazione cross-layer, un nuovo modulo chiamato cross-layer controller (XLC)

è stato progettato per controllare e regolare lo scambio di informazioni tra diversi livelli di protocollo. XLC richiede l'assistenza di MMP per ottenere le informazioni di livelli fisici e Logical Link Control monitorando lo stato del modem.

Tipicamente, viene monitorato un insieme di parametri relativi allo stato fisico del modem, archiviato e aggiornato in XLC. Allo stesso modo, il collegamento e le informazioni sul livello di rete, come l'affidabilità del collegamento, la contesa del canale, la latenza del percorso e così via vengono archiviati e aggiornati in XLC per la progettazione cross-layer. Il banco di prova include modem SM-975 e SM-75 di Marchio Telesonar Benthos, e si integra con un emulatore subacqueo per simulare diversi canali sottomarini per scenari di esperimenti completi. Ha anche un file Stack di protocollo compatibile con IP per l'accesso a Internet subacqueo [ 107 ] .

*Caratteristiche e limitazioni:* UW-Bufferlo modifica il Telesonar Benthos commerciale (SM-75) per fornire una piattaforma riconfigurabile cross-layer abilitata alla progettazione. Con API e il modulo XLC, i ricercatori possono utilizzare le informazioni di basso livello dal link o livello fisico per progettare protocolli ottimizzati cross-layer al livello superiore (ad esempio, MAC, rete o anche il livello dell'applicazione). Inoltre, è compatibile con IP stack di protocollo (ad esempio, IPv4 e IPv6) per facilitare l'accesso a Internet. La limitazione è che il suo emulatore di canale non è paragonabile ai canali subacquei reali e potrebbe necessitare di un modello acustico subacqueo basato sul ray-tracing per migliorare la precisione del canale.

ACM Computing Surveys, vol. 50, n. 2, articolo 28, Data di pubblicazione: maggio 2017.

## Pagina 15

Piattaforme di simulazione e sperimentazione per reti di sensori acustici subacquei

28:15

Tabella III. Caratteristiche principali dei banchi di prova sperimentali a livello di laboratorio

Banco di prova	Software o Hardware	Modem Supporto	Canale Adattabilità	Costo	Strato incrociato Supporto
Aqua-Lab	Scritto in C	CHI? IO Micro-Modem	Basso	Basso	-
SUPERIORE	GNU Radio	A basso costo Idrofono	-	Ultra Basso	-
SeaNet	C ++ con Teensyduino	Teledyne RESON TC4013	Alto	Basso	Alto tra quattro Livelli diversi
UANT	TOSSIM su TinyOS	A basso costo Trasduttore	medio	medio	In alto tra Tre diversi Strati
Aqua-Sim ns-2		Benthos Acustico Modem	Medio con Modelli Rogers	medio	-
UW- Bufferlo	Gumstix su Linux	Telesonar Benthos SM-75	Medio con Canale Emulatore	medio	Medio con a Strato incrociato Modulo di controllo

Inoltre, la sua capacità in termini di simulazione su larga scala è più debole di quella del famoso simulatore ns-2 o TOSSIM.

### 4.2. Confronto tra banchi di prova a livello di laboratorio

Nella Tabella III, confrontiamo diversi banchi di prova sperimentali a livello di laboratorio in termini di un insieme di caratteristiche, come componente hardware o software, modem supportato, adattamento del canale capacità, costo e flessibilità di progettazione a più livelli. Di seguito, forniamo un più elaborate uno studio comparativo tra questi banchi di prova basato sul suddetto prominente e criteri di progettazione pertinenti.

**Riconfigurabilità e supporto di progettazione cross-layer:** opzione di riconfigurabilità pro



offre ai ricercatori la flessibilità di adottare il supporto dell'interazione cross-layer durante la progettazione esperimenti o per modificare la configurazione del banco di prova in conformità con dinamica orientata all'applicazione o ambientale. Sia Aqua-Lab che UW-Buffer hanno architettura flessibile e sono dotati di modem riconfigurabili. Aqua-Lab provides API per configurare i modem WHOI per varie opzioni, come l'impostazione di diversi parametri funzionali o selezionando diverse modalità funzionali, e così via, mentre UW-Buffer fornisce flessibilità di riconfigurazione del suo modem Teledyne Benthos. Il L'opzione flessibilità di riconfigurazione di SeaNet è dovuta alla sua architettura basata su SDR. Sopra d'altra parte, anche l'architettura flessibile di UPPER e UANT si basa su SDR e Radio GNU. Fondamentalmente, UPPER adotta la radio SDR e GNU per fornire la modalità acustica caratteristiche di modulazione e demodulazione nella comunicazione e consente anche ai ricercatori per configurare modalità di modulazione, frequenza e velocità dati. UANT utilizza la radio GNU per fornire un livello fisico configurabile, in cui il bit rate di trasmissione e il centro frequenza sono facilmente configurabili. Poiché i dispositivi incorporati non sono adatti per la radio GNU a causa della loro complessità computazionale, un PC viene tipicamente utilizzato per eseguire la radio GNU.

UW-Buffer, UANT e SeaNet supportano anche la progettazione cross-layer. UW-Buffer lo è dotato di un modulo XLC, che effettua le connessioni tra il livello fisico e strati superiori. Di conseguenza, i ricercatori possono implementare programmi ottimizzati su più livelli tocol tramite lo stack di protocollo definito dal software in esecuzione su una scheda Gumstix. Croce sontuosa Il supporto della progettazione a strati su più livelli aiuta ulteriormente i ricercatori a capire il fattori che influenzano facilmente e rapidamente le funzionalità delle loro applicazioni. Come supporto piattaforma plement di rModem (che fornisce solo l'opzione di riconfigurazione a livello di pro tocol layers), UANT è probabilmente la prima piattaforma sottomarina a fornire la riconfigurazione

ACM Computing Surveys, vol. 50, n. 2, articolo 28, Data di pubblicazione: maggio 2017.

## Pagina 16

28:16

H. Luo et al.

flessibilità a tre diversi livelli, come rete, MAC e livelli fisici. SeaNet fornisce un supporto di progettazione cross-layer ancora più flessibile attraverso i quattro livelli. Questi quattro livelli sono fisici, collegamento dati, rete e livelli applicazione.

**Efficienza e precisione:** per migliorare la capacità di adattamento del canale di diverse applicazioni cationi nella simulazione, sia UW-Buffer che Aqua-Sim forniscono emulatori di canale. Il l'emulatore in UW-Buffer è sviluppato sulla base del modem Teledyne (SM-75) e su di esso consente ai ricercatori di condurre esperimenti centrati sul laboratorio su piccola scala. Aqua-Sim integra i modelli Rogers e PE e fornisce un'acustica subacquea più accurata canali per migliorare l'accuratezza della simulazione a livello granulare. Aqua-Sim è anche il prima piattaforma open source completa di simulazione di rete subacquea a livello di pacchetto. Tutti e due Aqu-Sim e UANT sono sviluppati sulla base di una potente e nota simulazione open source lators, mentre altri usano la propria implementazione proprietaria usando C, C++ o altro linguaggi di programmazione. Aqua-Sim è sviluppato sulla parte superiore di ns-2, ma non viene applicato sul pacchetto wireless esistente ns-2. Invece, un nuovo pacchetto di simulazione è stato parallelo con il pacchetto wireless della Carnegie Mellon University (CMU) è progettato, e quindi ha la capacità di evolversi in modo indipendente. UANT utilizza TOSSIM di TinyOS nella simulazione per facilitare il suo reale dispiegamento subacqueo e migliorare l'efficienza. Un difetto di UANT è che TOSSIM e TinyOS sono stati originariamente sviluppati con IEEE 802.15.4 standard per le WSN terrestri. Di conseguenza, sono necessari più supporti in TOSSIM portare servizi di riconfigurazione e adattamento se viene utilizzato per gli UWA-SN.

**Supporto per la transizione senza interruzioni:** sebbene siano adatti sei banchi di prova in questo gruppo esperimenti sul campo, il loro obiettivo principale è solo la valutazione sperimentale a livello di laboratorio e sviluppo. Aqua-Lab si concentra principalmente sull'emulazione utilizzando il suo emulatore e modem WHOI figurabili per valutare i protocolli in un ambiente più vicino alla realtà. Con l'emulatore di Aqua-Lab, i ricercatori possono impostare la topologia di rete, la propagazione ritardo, e così via, secondo la loro preferenza. Sebbene UPPER possa essere usato per condurre esperimenti in un lago, è adatto per esperimenti di primo livello nell'ambiente di laboratorio

a causa dei suoi vincoli di costo. SeaNet è adatto anche per costruire prototipi di test di primo livello e può rapidamente utilizzare componenti hardware personalizzati e soprattutto per verificare i protocolli in diversi livelli, come fisico, collegamento dati, reti e livelli di applicazione. UANT è un framework basato su TOSSIM sebbene non utilizzi TOSSIM esclusivamente come file strumento di simulazione. Tuttavia, TinyOS è un sistema operativo incorporato per i nodi dei sensori e quindi i ricercatori possono trasferire i blocchi di codice verificati per la simulazione alla rete reale environments con poco sforzo. Aqua-Sim, che beneficia del potente simulatore ns-2, è dotato di numerosi protocolli e supporta il virtuale tridimensionale ambienti nella distribuzione. Tuttavia, attualmente, Aqua-Sim si concentra principalmente solo su simulazione ed emulazione.

**Supporto modem:** il modem svolge un ruolo importante nell'emulazione del protocollo, verifica zione e test. Aqua-Lab, SeaNet, UW-Buffalo e Aqua-Sim sono tutti dotati di modem subacquei commerciali reali. Come mostrato nella Tabella III, Aqua-Lab supporta WHOI Micro-Modem, SeaNet supporta Teledyne RESON TC4013, UW-Buffalo supporta Telesonar Benthos SM-75 e Aqua-Sim supportano i modem Benthos Acoustic. Dall'altra mano, UPPER e UANT sono dotati di idrofono a basso costo e trasduttori come la sostituzione di un modem.

**Accessibilità gratuita delle risorse:** tra i sei banchi di prova, attualmente, solo Aqua-Sim fornisce un pacchetto software open source per la comunità di ricerca e un nuovo la versione (2.0) di Aqua-Sim è stata rilasciata di recente [125]. Inoltre, l'implementazione di tutti questi sei banchi di prova non sono molto più sofisticati, e quindi ricercatori può facilmente emulare ambienti di test subacquei simili o diversi con l'aiuto di letteratura pubblicata.

**Accessibilità remota:** poiché i banchi di prova sperimentali a livello di laboratorio vengono utilizzati principalmente in lab, l'accesso e il controllo remoto non sono una metrica importante per questo gruppo di banchi di prova.

ACM Computing Surveys, vol. 50, n. 2, articolo 28, Data di pubblicazione: maggio 2017.

## Pagina 17

Piattaforme di simulazione e sperimentazione per reti di sensori acustici subacquei

28:17

Tuttavia, alcuni banchi di prova hanno funzionalità di accesso remoto. La funzione di accesso remoto la qualità di UPPER si ottiene tramite Remote Procedure Call, che richiede l'estensione API in lo strato di spessore. UW-Buffalo ha uno stack di protocollo compatibile con IP che fornirà facile l'accesso a Internet sott'acqua in futuro.

**Costo di distribuzione:** poiché tutti questi banchi di prova vengono distribuiti nell'ambiente di laboratorio, i loro costi di implementazione sono relativamente bassi. Tra questi, il costo di implementazione di entrambi Aqua-Lab e UPPER sono i più bassi. Sebbene Aqua-Lab appartenga alla prima versione di banchi di prova di simulazione, fornisce una piattaforma configurabile a basso costo con modem WHOI. Pertanto, è adatto per i nuovi ricercatori creare fiducia e valutare la propria protocolli progettati nelle prime fasi del processo di progettazione. Analogamente ad Aqua-Lab, UPPER si concentra sulla riduzione dei costi per consentire a più ricercatori di accedervi. Anche se potrebbe non esserlo adatto per distribuire SUPERIORE in mare o oceano su una vasta porzione di area a causa di alta costo, si ritiene economicamente fattibile valutare i protocolli progettati al fase iniziale prima dei test o degli esperimenti reali sul campo. SeaNet è anche costruito con costi contenuti componenti hardware commerciali per ridurre i costi di implementazione.

### 5. PANORAMICA DELLE PIATTAFORME DI SPERIMENTAZIONE A BREVE TERMINE E LORO CONFRONTO

Fino ad ora, i banchi di prova che rientrano in questa categoria sono Aqua-Net / Mate, SeaLinx, Un-etStack, DESERT e SUNSET. In questa sezione, descriviamo brevemente ciascuno di essi e quindi presentiamo uno studio comparativo tra loro basato sul progetto di cui sopra criteri.

#### 5.1. L'elenco dei banchi di prova sperimentali a breve termine

5.1.1. Aqua-Net / Mate. Aqua-Net (2009) e Aqua-Net Mate (2013) sono stati sviluppati University of Connecticut nel 2009 e nel 2013, rispettivamente [83, 124]. Diverso dal prominente simulatore ns-2 o TOSSIM, Aqua-Net è stato sviluppato da zero, e

supporta la progettazione cross-layer. Poiché l'originale Aqua-Net è stato progettato per un sistema reale senza le funzionalità di simulazione, è stato esteso per fornire tali funzionalità ed è stato chiamato Aqua-Net Mate [124]. L'efficienza della programmazione degli eventi di Aqua-Net Mate è uguale a quello di Aqua-Net grazie al suo meccanismo di pianificazione in tempo reale, e i ricercatori possono passare facilmente dalla simulazione al test sperimentale come richiesto. Aqua-Net può essere eseguito sulla parte superiore di un sistema operativo Linux incorporato, in cui utilizza Micro-Modem come dispositivo di comunicazione e Gumstix come controller. Aqua-Net è stato testato (un esperimento chiamato Aqua-TUNE [81]) in un lago nel 2011 e nel Oceano Atlantico nel 2013 [80].

L'architettura di Aqua-Net è rappresentata nella Figura 8. Diversi tipi di modem in il livello fisico sono supportati per implementare reti sottomarine con il mondo reale scenari tramite un wrapper. Il wrapper è sviluppato in conformità con il National Marine Electronics Association per la comunicazione seriale per fornire istruzioni collegare dispositivi subacquei con dispositivi non marini. L'interfaccia socket è per ricercatori per creare protocolli o riutilizzare l'implementazione esistente per nuove applicazioni. Per implementare la progettazione cross-layer, le informazioni dei diversi layer vengono memorizzate in un file database di sistema. Quindi, tramite l'interfaccia a più livelli, le informazioni vengono utilizzate da tutti strati per migliorare le prestazioni della rete. Come illustrato nella Figura 9, tre strati sono aggiunti in Aqua-Net Mate, che sono Adapter, Virtual Modem e Virtual Channel. Il Virtual Modem viene utilizzato per emulare il modem reale, che è collegato ad Aqua-Net tramite un Adattatore. Il canale virtuale è il canale di comunicazione tra diversi virtuali Modem.

Una versione di Aqua-Net, sviluppata su Linux, è stata testata in un lago (Mansfield Hollow Lake) nel 2011, che si chiama Aqua-TUNE [81]. L'esperienza dispiegata Aqua-TUNE ha utilizzato quattro nodi. Ogni nodo, accompagnato da una boa galleggiante, è dotato di modem acustici sia radio che subacquei per superficie e subacquei

ACM Computing Surveys, vol. 50, n. 2, articolo 28, Data di pubblicazione: maggio 2017.

Fig. 8. L'architettura Aqua-Net.

Fig. 9. L'architettura di Aqua-Net Mate.

comunicazioni. Inoltre, il nodo aveva anche la funzione GPS (Global Positioning System) cerca di ottenere le informazioni sulla posizione istantanea. Con Aqua-TUNE, i ricercatori può mettere a punto alcune caratteristiche o funzionalità, come la localizzazione dei nodi, la sincronizzazione dell'ora zione, potenza di trasmissione del nodo, protocolli di rete e così via, per verificarne la progettazione protocolli. Nel 2013, Aqua-Net è stato testato nell'Oceano Atlantico [80]. Quel livello di campo l'esperimento aveva 11 nodi dispiegati su un'area di mare aperto di 10 km. L'obiettivo dell'ex-lo scopo era identificare, studiare e analizzare vari fattori che influenzano le prestazioni dei protocolli di rete.

*Caratteristiche e limitazioni:* Aqua-Net è stato sviluppato da zero e, di conseguenza di conseguenza, è più facile per i ricercatori adattare i protocolli di rete sottomarina più facilmente ily. Rispetto ad altri strumenti di simulazione, come ns-2, Aqua-Net è associato a un file ingombro ridotto, che alla fine gioverà alle reti di sensori incorporati. Una mancanza L'ing di Aqua-Net è che consente un solo protocollo in un modem che risulta inefficiente utilizzo delle risorse.

5.1.2. SeaLinx. SeaLinx (2013) deriva da Aqua-Net e dal framework esteso dopo aver superato alcuni inconvenienti di Aqua-Net [56]. Con la capacità di ottimizzare il cross-design a strati, SeaLinx fornisce una soluzione migliore. Come mostrato nella Figura 10, SeaLinx

ACM Computing Surveys, vol. 50, n. 2, articolo 28, Data di pubblicazione: maggio 2017.

## Pagina 19

Fig. 10. L'architettura di SeaLinx.

include tre parti, che sono il modulo del protocollo, SeaLinx Core e il driver del modem. Tale architettura rende SeaLinx uno strumento cooperativo piuttosto che uno strumento monolitico. In un tipico stack di protocollo, ogni livello di protocollo può comunicare solo con il suo livello adiacente direttamente, come gli strati sopra o sotto di esso. Al contrario, in SeaLinx, ogni strato può comunicare direttamente con qualsiasi altro livello dello stack di protocollo tramite SeaLinx Core.

In AquaNet, ogni modem può gestire un solo protocollo, il che risulta inefficiente utilizzo delle risorse. Pertanto, in SeaLinx, ogni singolo protocollo è gestito da un file processo individuale. In questo modo, ogni protocollo può essere modificato o riavviato indipendentemente. Se un protocollo non funziona correttamente, ha un effetto minimo sul resto processi nello stack di protocollo. Inoltre, il codice di simulazione si blocca in SeaLinx può essere utilizzato anche per esperimenti a livello di campo senza alcuna modifica. Basato su SeaLinx, in [51], un vero test a livello del mare con il multiplexing a divisione di frequenza ortogonale (OFDM) modem basato.

*Caratteristiche e limitazioni:* poiché Sealinx funziona su sistemi in tempo reale, la pianificazione degli eventi in questo strumento è quasi preciso e accurato. Inoltre, l'architettura operativa tura è distribuita per natura, e quindi è possibile utilizzare i blocchi di codice per la simulazione per l'emulazione senza alcuna modifica. Supporta anche multi-processo e multi-thread applicazioni. Pertanto, incorre in una maggiore precisione nella temporizzazione, che è adatta per il test protocolli time-sensitive. Il limite è che i test condotti su questo possono risentire dalla perdita di efficienza a causa delle operazioni in tempo reale.

5.1.3. UnetStack. UnetStack (2014) è un nuovo tipo di banco di prova di rete sottomarina, che si basa sul framework degli agenti Fjage [21]. La caratteristica più evidente di questo Il banco di prova è che non si basa sul tradizionale stack di protocollo basato su livelli. Invece, UnetStack è costituito da molti agenti software e costruisce un'architettura orientata ai servizi. Questi agenti possono condividere informazioni e comunicare tra loro e quindi l'ottimizzazione cross-layer è ottenuta più facilmente rispetto al tradizionale architettura stratificata. Inoltre, UnetStack accetta Java Virtual Machine (JVM) come file parte del suo componente e supporta sia simulazioni di eventi discreti che in tempo reale operazioni. Pertanto, con l'aiuto di JVM, una volta che i protocolli e le applicazioni sono sviluppati e testati tramite simulazione su UnetStack, i blocchi di codice di simulazione possono essere utilizzato in qualsiasi modem conforme a UnetStack per ulteriori esperienze a livello di campo menti. Di conseguenza, i ricercatori possono evitare il fastidio di scrivere codice separatamente per simulazione ed esperimenti sul campo. Fino ad ora, UnetStack supporta diversi tipi di file

ACM Computing Surveys, vol. 50, n. 2, articolo 28, Data di pubblicazione: maggio 2017.

Fig. 12. L'architettura di UnetSim basato su UnetStack.

modem, come Subnero, Evologics e ARL UNET-II [23] . UnetStack supporta anche SDM e [20] hanno fornito un'implementazione di un modem OFDM per UnetStack.

L'architettura di UnetStack è mostrata nella Figura 11 , che include UnetStack agenti, un framework di agenti fJage, Java VM e un modem. Gli agenti in pila fornire funzionalità ben definite simili ai livelli della rete tradizionale stack di protocollo. In genere, gli agenti comunicano tra loro tramite diversi tipi di messaggi, come richiesta, risposta e notifiche. Oltre a questi di basso livello comunicazioni agente-agente, UnetStack supporta anche comunicazioni di alto livello con monitorare o controllare altri agenti. Oltre alla comunicazione agente-agente basata su messaggi, UnetStack supporta anche il servizio di trasmissione di messaggi, tramite il quale una serie di sottoscrizioni gli agenti ricevono messaggi di un determinato argomento a cui sono iscritti. Notare che il servizio- l'architettura ad agenti orientati è altamente estensibile e quindi consente ai ricercatori di farlo sviluppare, testare e aggiungere nuove funzionalità a un processo che non era supportato in architettura di rete tradizionale basata su livelli. La figura 12 mostra l'architettura di UnetSim, in cui i nodi interagiscono tra loro tramite agenti fisici distribuiti su di essi. I ricercatori possono accedere allo stack del protocollo direttamente o in remoto tramite un file

ACM Computing Surveys, vol. 50, n. 2, articolo 28, Data di pubblicazione: maggio 2017.

---

## Pagina 21

Fig. 13. L'architettura del DESERTO.

open source fJage agent framework con comandi basati su testo e può utilizzare il real modem hardware tramite l'agente fisico (driver) quando è in modalità di simulazione.

*Funzionalità e limitazioni:* l'architettura basata su agenti e orientata ai servizi di UnetStack facilita il supporto rapido e flessibile della progettazione cross-layer per le applicazioni, simulazione, test a livello di campo e distribuzione. Inoltre, poiché UnetStack ha un file Componente JVM, i blocchi di codice binario compilati scritti per la simulazione possono essere direttamente trasferiti a modem compatibili con UnetStack per ulteriori esperimenti a livello di campo.

5.1.4. DESERTO. DESERT (2012) è un programma di simulazione, emulazione ed esperimento open source strumento mentale, basato su ns-2 e ns2-Miracle, ed è stato sviluppato presso l'Università di Padova [15, 68]. ns2-Miracle è la versione estesa di ns-2 che aggiunge molte nuove librerie per migliorare il meccanismo di scambio di informazioni per la progettazione cross-layer e l'ottimizzazione [75]. In ns2-Miracle, più moduli possono coesistere contemporaneamente nello stesso spazio con poca interazione. Inoltre, la sua architettura altamente modulare consente ai ricercatori di riutilizzare molti blocchi di codice scritti per ns-2 con solo piccole modifiche. Sfrutta ulteriormente la proprietà di modularità per ottimizzare la progettazione del sistema durante la presa di decisioni trasversali in piena considerazione.

L'architettura di DESERT è illustrata nella Figura 13. Fornisce il livello fisico dell'interfaccia tra il simulatore e i modem hardware reali (ad esempio, Micro-Modem, Evologics). I moduli di mobilità implementano quattro diversi bidimensionali (2D) o Modelli di mobilità 3D per simulare il movimento del robot subacqueo. Analogamente al vero hardware, l'architettura di ns2-Miracle è logica, e quindi fornisce validi risultati durante la valutazione delle prestazioni di applicazioni progettate dall'utente e dai colleghi. Inoltre, ns2-Miracle migliora la precisione della simulazione collegandosi da solo a specifici strumenti del modello di canale sottomarino (ad esempio, WOSS) [41]. ns2-Miracle può anche integrare modem hardware reali al processo di simulazione per creare un'immagine più realistica dell'ambiente durante lo sviluppo di protocolli e applicazioni ad alte prestazioni.

DESERT supporta sia l'emulazione che le impostazioni del banco di prova. Nell'impostazione di emulazione, come mostrato nella Figura 14, più modem acustici sono collegati a un singolo PC o laptop, che esegue un unico processo ns2-Miracle per controllare tutti i modem e i loro connessi trasduttori acustici. L'altro è l'impostazione del banco di prova, come illustrato nella Figura 15, in cui le istanze uniche di ns2-Miracle o dispositivi correlati si occupano di ciascuno dei modem. RECORDS (Remote Control Framework for Underwater Networks) consente DESERT di essere controllato a distanza in prove reali a livello di campo [111], che è stato

ACM Computing Surveys, vol. 50, n. 2, articolo 28, Data di pubblicazione: maggio 2017.





Fig. 15. Un esempio di impostazione del banco di prova di DESERT.

sperimentato con successo nel Centro per la ricerca e la sperimentazione marittima (CMRE) [ 67] .

*Caratteristiche e limitazioni:* DESERT è sviluppato su ns-2 e ns2-Miracle e può integrare simulazione, emulazione e test a livello di campo in modo trasparente. È anche un framework scaricabile open source da Internet. Con un semplice archetto tecture, sebbene DESERT fornisca flessibilità di transizione senza interruzioni tra la simulazione, emulazione e test a livello di campo, ha limitazioni, come risorse ed energia elevate consumo.

5.1.5. TRAMONTO. SUNSET (2012) è anche una piattaforma open source sviluppata da ns-2 e ns2-Miracle. Analogamente a DESERT, fornisce servizi simili, come supporto di transizione senza interruzioni tra simulazione, emulazione e test a livello di campo mentre

ACM Computing Surveys, vol. 50, n. 2, articolo 28, Data di pubblicazione: maggio 2017.



Fig. 16. Una configurazione di esempio di SUNSET in modalità di simulazione.

valutare le prestazioni di nuove applicazioni e protocolli [ 84] . Ad esempio, i ricercatori possono prima utilizzare la modalità di simulazione di SUNSET per implementare, valutare e migliorare le applicazioni e i protocolli progettati. Quindi, come richiesto, possono utilizzare l'estensione blocchi di codice di simulazione per l'emulazione o il test in mare. Quando i ricercatori passano da simulazione in emulazione o test in mare, non è necessario modificare i blocchi di codice scritti per implementare in modo significativo le applicazioni e i protocolli progettati. Attualmente, diversi modem acustici sono utilizzati per SUNSET, incluso il modem Teledyne Benthos, Kongsberg, Evologics e Micro-Modem. Oltre a ciò, anche SUNSET si integra vari veicoli mobili di superficie o subacquei (AUV o veicoli di superficie autonomi (ASVs)) e diversi nodi per misurare la temperatura, CO<sub>2</sub> o altri fisici o proprietà ambientali dell'oceano. Supporta anche protocolli ottimizzati a più livelli o progettazione di applicazioni.

SUNSET ha rilasciato la versione 1.0 e la versione 2.0 per la comunità di ricerca nel 2012 e 2013, rispettivamente. L'ultima versione di SUNSET fornisce meccanismi di controllo o riconfigurare il banco di prova da remoto con l'aiuto della comunicazione acustica subacquea supporto di trasmissione e modulo del conducente del sedile posteriore [88] . Con SUNSET, molti esperimenti lo hanno fatto stato condotto collocando i suoi componenti in tre diversi paesi [ 25] . Tale dispiegamento è stato possibile con SUNSET grazie alla sua gestione cooperativa e remota strutture. SUNSET è stato ampiamente valutato tramite più di 15 test ed esperimenti. Viene scelto come banco di prova standard per il progetto SUNRISE dell'UE-7 ° PQ, che è un file Progettazione acqueo basato sull'Internet delle cose distribuito in Europa e Nord America [ 5, 1

La Figura 16 mostra i blocchi funzionali di SUNSET è mostrato nelle Figure 16 e 17 per il rispettivamente la modalità di simulazione e la modalità di emulazione. Ci sono tre moduli principali in SUNSET, che sono i moduli principali, protocolli di rete e componenti di emulazione [86] . Nella Figura 17, i moduli, inclusi driver dell'applicazione, convertitore di pacchetti, generico driver, driver modem e scheduler in tempo reale multi-thread, lo sono aggiunto. Il driver dell'applicazione consente una facile integrazione con qualsiasi dispositivo esterno per i dati scambio o interazione fornendo metodi per impostare / ottenere parametri da / verso l'esterno dispositivi o per eseguire le azioni desiderate. I dispositivi esterni in genere includono il rilevamento reale piattaforme e veicoli automatici subacquei, come AUV / ASV. Il convertitore di pacchetti è utilizzato per ridurre il più possibile la dimensione dell'intestazione del pacchetto prima di trasmettere al file

ACM Computing Surveys, vol. 50, n. 2, articolo 28, Data di pubblicazione: maggio 2017.

dispositivi reali. Questo perché nella simulazione, un pacchetto include alcuni ridondanti intestazione per contenere informazioni aggiuntive, utili per il debug o statistiche scopi. Il driver generico è responsabile dell'assistenza nell'interazione tra il vero modem hardware e il simulatore ns-2. SUNSET supporta un multi-thread tecnica di pianificazione in tempo reale. Ciò consente alcuni programmi arbitrari (gestendo uno protocollo di rete) per avere più thread, in cui è associato il thread principale con il programma principale e il thread secondario potrebbero essere le connessioni che fanno da ponte comunicazione con dispositivi esterni. A causa del meccanismo di pianificazione in tempo reale, SUNSET è trasparente tra lo stack del protocollo e l'hardware esterno.

*Caratteristiche e limitazioni:* SUNSET supporta la simulazione, l'emulazione e il livello di campo test in modo trasparente tramite il riutilizzo del codice in larga misura. È stato selezionato come banco di prova standard in SUNRISE, che è stato ampiamente sperimentato per un periodo di quattro anni. È anche una piattaforma open source, l'ultima versione della quale può essere scaricato da Internet. Anche se SUNSET ha la capacità di simulare il reale scenari di lunga durata (in tempo reale) in un breve periodo di tempo, può essere difficile identificare la sincronizzazione dell'ora e i problemi relativi alla precisione come tutti gli eventi vengono eseguiti in un singolo thread in sequenza anche con il suo scheduler in tempo reale. Essere ancora causa del meccanismo di schedulazione in tempo reale, nella simulazione, SUNSET può raggiungere maggiore precisione nella pianificazione degli eventi evitando la sovrapposizione di eventi con ciascuno altro.

## 5.2. Confronto tra piattaforme di sperimentazione a breve termine

Come mostrato nella Tabella IV, scegliamo componenti software, componenti hardware, modem con porting, adattabilità del canale, costo e capacità di transizione senza interruzioni come caratteristica è pronto a fare un breve studio comparativo tra diversi esperimenti a breve termine banchi di prova. In questa sezione, presentiamo ulteriormente uno studio comparativo dettagliato tra di loro basato sul set di funzionalità di cui sopra, che è il seguente.

**Riconfigurabilità e supporto per la progettazione cross-layer:** tutti e cinque i testbeds forniscono a opzione di riconfigurabilità sfruttando le loro diverse architetture. Ogni banco di prova con la sua architettura distinta ha i suoi pro e contro. Aqua-Net e SeaLinx sono i piattaforme in cui lo stack di protocolli è basato su livelli. Tuttavia, il loro protocollo si accumula sono costruiti da zero, e quindi è più facile progettare un nuovo protocollo (che sarà

ACM Computing Surveys, vol. 50, n. 2, articolo 28, Data di pubblicazione: maggio 2017.

Tabella IV. Caratteristiche principali dei banchi di prova sperimentali a breve termine

Banco di prova	Software o Hardware	Modem Supporto	Canale Adattabilità	Costo	Perfetta Supporto per la transizione
<b>Aqua-Net / Mate</b>	Gumstix su Linux	CHI? IO Micro-modem, Teledyne Modem Benthos	Medio con canale virtuale	Medio Basso	
<b>SeaLinx</b>	Estensione di Aqua-Net	CHI? IO Micro-modem, Teledyne Modem Benthos	medio	Medio Medio	
<b>UnetStack</b>	Basato su agente architettura	ARL UNET-II, Subnero, Evologics modem	medio	Medio Alto dalla simulazione ai test sul campo	
<b>DESERTO</b>	Ns-2 e ns2-Miracle	CHI? IO Micro-modem, EvoLogics S2C	Alto con canale strumento di modellazione WOSS	Alto	Alto con la simulazione, emulazione e test a livello di campo

TRAMONTO	Ns-2 e	CHI? IO,	Alto con	Alto	Alto con la simulazione, emulazione e test a livello di campo
	ns2-Miracle	Evologico, Kongsberg e Teledyne Modem Benthos	Basato su WOSS BELLHOP Ray tracciante e URICK		

essere aggiunto allo stack esistente) che è particolarmente adatto per gli UWA-SN. DESERTO e SUNSET sono stati sviluppati sopra ns-2 e ns2-Miracle. UnetStack fornisce un file opzione di riconfigurabilità testbed tramite la sua architettura flessibile basata su agenti e modem UNET-2 utilizzabile. L'architettura basata su agenti è flessibile, il che ci consente di farlo condividere le informazioni e promuovere l'interazione tra diversi agenti. Di conseguenza, lo è più facile implementare nuovi protocolli e applicazioni che ci richiedono di adottare livelli incrociati informazioni in piena considerazione. Il framework flessibile è anche estensibile aggiungendo nuovi agenti secondo necessità. In aggiunta a ciò, UNET-2 è un SDM flessibile e adattivo secondo le operazioni di UnetStack. Tramite firmware nel modem, i ricercatori sono in grado di configurare il modem al volo secondo le loro richieste applicazioni progettate.

L'ottimizzazione cross-layer è supportata anche in tutti e cinque i banchi di prova di questo gruppo. Sebbene lo stack di protocolli di Aqua-Net è basato su un'architettura a strati, ha un nucleo modulo per lo scambio di messaggi tra diversi livelli, che fornisce la flessibilità nell'ottimizzazione cross-layer. SeaLinx è la versione migliorata di Aqua-Net in formato termini di progettazione cross-layer. A differenza dell'utilizzo del socket Unix in Aqua-Net, SeaLinx ha un modulo Core (funge da server) per gestire tutte le comunicazioni rilevanti per ottimizzazione dei livelli. SeaLinx può anche eseguire più moduli di protocollo in parallelo nello stesso livello. D'altra parte, UnetStack ha un'architettura orientata ai servizi, che consente agli agenti di condividere le informazioni come richiesto. Di conseguenza, a causa dei vantaggi nell'interazione cross-layer, l'ottimizzazione cross-layer si ottiene di più facilmente paragonabile ad altre piattaforme dotate di un protocollo tradizionale basato su livelli pila. Sia SUNSET che DESERT sono sviluppati sulla parte superiore dell'originale ns2-Miracle to fornire supporto per la progettazione a più livelli. Ns2-Miracle è un framework basato su moduli, dove diversi moduli sono sviluppati per gestire diversi protocolli in diversi livelli (ad es. PHY (Physical Layer), MAC, routing, trasporto, protocolli a livello di applicazione e così via).

Gli algoritmi di ottimizzazione cross-layer sono impiegati nei moduli plug-in e a Node Core è sviluppato per fungere da ponte tra diversi moduli e i plug-in lo sono utilizzato per facilitare la progettazione a strati incrociati.

ACM Computing Surveys, vol. 50, n. 2, articolo 28, Data di pubblicazione: maggio 2017.

## Pagina 26

28:26

H. Luo et al.

**Efficienza e accuratezza:** cinque banchi di prova in questo gruppo adottano approcci diversi a ottenere efficienza e accuratezza mentre vengono condotti esperimenti / simulazioni su di essi. In Aqua-Net e SeaLinx, ogni modulo di protocollo può essere eseguito come un processo indipendente. A Allo stesso tempo, possono comunicare tra loro. Poiché tutti gli eventi sono in programma dal sistema incorporato in una scala in tempo reale, le loro impronte sono più piccole e le Il controllo dell'esecuzione degli eventi sultante è migliore. UnetStack supporta sia eventi discreti che modalità di funzionamento in tempo reale, quindi è possibile copiare il codice di simulazione binario compilato qualsiasi modem conforme a UnetStack (ad esempio UNET-II) per ulteriori test sul campo o in laboratorio senza richiedere alcuna compilazione incrociata aggiuntiva. Sia DESERT che SUNSET lo sono estesi da ns-2, e quindi sono anche vincolati con caratteri ad eventi discreti teristica. Ad esempio, entrambe le piattaforme hanno un processo principale a thread singolo e l'estensione gli eventi vengono eseguiti in sequenza programmata da un rigoroso pianificatore di eventi che è sensibile tivo a eventi a tempo limitato. Diversi meccanismi di pianificazione degli eventi hanno differenti prestazioni di simulazione. Ad esempio, SUNSET potrebbe sovraperformare SeaLinx per periodi più brevi durata simulazione / sperimentazione; tuttavia, SeaLinx garantisce una migliore precisione in

termini di temporizzazione degli eventi poiché SeaLinx pianifica eventi da più thread. Sebbene DESERT e SUNSET hanno un'elevata compatibilità, l'architettura di sistema di DESERT lo è più semplice, che può essere appreso e utilizzato più facilmente dagli utenti. DESERT ne ha un altro vantaggio significativo, che è che più istanze di protocollo possono essere eseguite simultaneamente in ogni strato. Al contrario, in SUNSET, gli eventi devono svolgersi uno dopo l'altro sequenzialmente, il che è sfavorevole, soprattutto quando un evento coinvolge operazioni di I / O (In / Out) azioni. DESERT ha la capacità di adattarsi al variare del canale mentre segue le linee guida di WOSS. SUNSET ha la stessa capacità anche se ne approfitta del ray tracer BELLHOP basato su WOSS e URICK (Urick). Tra tutti i banchi di prova in questo gruppo, SeaLinx è scelto come piattaforma standard in Ocean-TUNE, mentre SUNSET viene scelto per il progetto del banco di prova a livello di campo SUNRISE.

**Supporto per la transizione senza interruzioni:** la versione originale di Aqua-Net non supporta modalità di simulazione e Aqua-Net Mate ha sviluppato un nuovo modulo di simulazione per fornire funzionalità di simulazione insieme alle strutture di sperimentazione. SeaLinx ha un file driver modem speciale che facilita la comunicazione tra due diversi tipi di file modelli con un livello fisico distinto apportando modifiche marginali o trascurabili nel file moduli del suo stack di protocollo. UnetStack consente ai ricercatori di valutare entrambi i protocolli nella simulazione e nelle prove in mare in modo continuo. Poiché UnetStack supporta sia la simulazione ad eventi discreti che le modalità di sperimentazione in tempo reale, con l'aiuto di JVM, ci consente di trasferire l'intero codice di simulazione binaria compilato a qualsiasi file Modem conforme a UnetStack per esperimenti a livello di campo senza la necessità di compilazione incrociata nazionale. Sia DESERT che SUNSET supportano la simulazione, l'emulazione, e modalità di sperimentazione a livello di campo e consentono agli utenti di transitare senza problemi da simulation ai test in mare. Quando i ricercatori usano DESERT per passare dalla simulazione modalità alla modalità di emulazione, non hanno bisogno di alcun modulo aggiuntivo per questa transizione. Pertanto, non solo riduce il tempo di simulazione / sperimentazione, ma aiuta anche i ricercatori nell'evitare ulteriori errori associati alla riscrittura del codice. comunque, il metodo di conversione dei pacchetti in DESERT non è così conveniente, il che potrebbe essere un aumento overhead di conversione dei pacchetti [85]. Inoltre, è sottolineato in [89] che esperimenti condotte via DESERT sono meno flessibili e inefficienti rispetto a quelle via SUNSET. Il motivo alla base di questo potrebbe essere che DESERT utilizza un evento in tempo reale ns-2 scheduler che gestisce l'interazione tra più thread in modo inefficiente. Perciò, porta a un maggiore utilizzo della CPU, memoria e consumo energetico.

**Supporto modem:** attualmente, Aqua-net e SeaLinx supportano il micro-modem WHOI, Modem Teledyne Benthos. Inoltre, UnetStack supporta ARL UNET-II, Subnero, ed Evologics e DESERT supporta WHOI Micro-Modem ed Evologics S2C. Sopra D'altra parte, SUNSET supporta cinque diversi modem acustici commerciali, come

ACM Computing Surveys, vol. 50, n. 2, articolo 28, Data di pubblicazione: maggio 2017.

## Pagina 27

Piattaforme di simulazione e sperimentazione per reti di sensori acustici subacquei

28:27

come micro-modem WHOI FSK (Frequency Shift Keying) e PSK (Phase-shift Keying), Modem Evologic, Kongsberg e Teledyne Benthos.

**Accessibilità gratuita delle risorse:** come mostrato nella Tabella VI, UnetStack, DESERT, e SUNSET forniscono componenti software scaricabili gratuitamente alla comunità di ricerca. Si noti che tutti e tre i banchi di prova hanno rilasciato nuove versioni di componenti software recentemente dopo le loro versioni iniziali.

**Accessibilità remota:** SeaLinx, UnetStack, DESERT e SUNSET hanno tutti anismi che consentono agli utenti di accedere e controllare i banchi di prova da remoto. SeaLinx si integra un modulo, ovvero Acoustic Remote Control (ARC), per accedere e controllare da remoto la rete nodi di lavoro. ARC viene eseguito come modulo a livello di applicazione in modo permanente sui nodi di rete, e consente ai ricercatori di configurare i parametri di rete e monitorare lo stato della rete tramite comunicazione acustica da remoto. UnetStack dispone di un agente di accesso remoto per offrono accesso remoto e funzionalità di controllo (ad es. impostazione o acquisizione di parametri, file trasferimento o altre operazioni remote). SUNSET sfrutta a distanza un guidatore del sedile posteriore

controllare diversi componenti hardware del banco di prova (ad esempio, nodi statici e mobili) tramite mezzi di comunicazione acustica. Le tipiche funzionalità di controllo remoto includono il protocollo selezione dello stack, regolazione dei parametri di rete, avvio e conclusione degli esperimenti, e così via. DESERT è dotato di RECORD software open source per fornire ri-mote riconfigurazione e strutture di controllo per reti multi-hop. A differenza del sedile posteriore driver in SUNSET, RECORDS può essere facilmente e comodamente trasferito a embedded sistemi senza ulteriore compilazione incrociata.

**Costo di distribuzione:** rispetto ai banchi di prova a livello di laboratorio, i banchi di prova in questo gruppo hanno costo di implementazione relativamente più elevato. Aqua-Net, SeaLinx e UnetStack hanno un mezzo costo di implementazione. Sebbene DESERT e SUNSET supportino la simulazione, l'emulazione e operazioni di sperimentazione a livello di campo in modo senza soluzione di continuità, impostando tale integrato gli ambienti di test di solito comportano costi di implementazione complessivi.

## 6. PANORAMICA DELLE PIATTAFORME DI SPERIMENTAZIONE A LIVELLO DI CAMPO A LUNGO TERMINE E IL LORO CONFRONTO

I banchi di prova in questo gruppo includono Seaweb, Ocean-TUNE e SUNRISE. Dal momento che entrambi Ocean-TUNE e SUNRISE sono in fase di sviluppo, selezioniamo University of Connecticut (UCONN), UW e WaterCom come rappresentanti di Ocean-TUNE e di Littoral Ocean Observatory Network (LOON) e banchi di prova di Porto come rappresentanti chiede ad SUNRISE di discutere il loro processo di sviluppo graduale e il progresso. Poi, più avanti in questa sezione, forniamo uno studio comparativo tra tre a lungo termine a livello di campo banchi di prova sperimentali basati su alcuni criteri prestabiliti.

### 6.1. L'elenco delle piattaforme di sperimentazione a livello di campo a lungo termine

6.1.1. Seaweb. Seaweb (1995-2004) è il più noto banco di prova a livello di campo, che è progettato principalmente per le applicazioni militari della US Navy [ 99] . Oltre 50 esperienze sono state condotte su Seaweb in diverse aree per diversi obiettivi [ 98, 99] . Seaweb porta le reti wireless sottomarine alla realtà. La rete include statico nodi di sensori acustici subacquei, AUV o UUV, sottomarini sottomarini e nodi master telligent in boe con varie interfacce per centri di comando presidiati. La rete facilita i ricercatori a coordinare le risorse appropriate per realizzare-ingaggio di una missione pre-specificata in un ambiente oceanico arbitrario tramite comandi, controllo, comunicazione e navigazione.

Nel 2001, 14 nodi sono stati distribuiti su una topologia a griglia sott'acqua per testare Seaweb il Loma Shelf vicino a San Diego (CA). La rete includeva 10 telesonar subacquei nodi peater, due nodi gateway boa Racom e due nodi sensori sperimentali di de-sistemi distribuiti autonomi utilizzabili. Un sottomarino manovrò se stesso intorno al rete e ha inviato la prima e-mail wireless subacquea riuscita a un centro di comando.

ACM Computing Surveys, vol. 50, n. 2, articolo 28, Data di pubblicazione: maggio 2017.

Fig. 18. Un esempio di configurazione sperimentale utilizzando Seaweb nel 2003.

Nel 2003, come mostrato nella Figura 18, è stato condotto un esperimento nel Golfo orientale di Messico. Il sistema schierato consisteva in sei nodi ripetitori fissi, tre alianti AUV nodi, due nodi gateway della boa Racom e un centro di comando di bordo. L'esperienza ha principalmente testato i nodi sensori mobili subacquei di Seaweb. Con il schierato Seaweb, i ricercatori potrebbero monitorare le posizioni dei nodi in movimento continuamente e potrebbe assistere i nodi mobili nella navigazione sott'acqua. Inoltre, gli AUV lo sono si sono rivelati anche eccellenti gateway mobili senza l'operatore vulnerabile ormeggiato gateway.

Nel 2004, un altro esperimento è stato condotto su Seaweb nelle acque profonde del menzola tinental. Il sistema implementato con 40 nodi di inoltro ha seguito una topologia a griglia, che copriva una vasta area per fornire connessioni wireless a veicoli in movimento subacqueo. Le reti di griglia sono state quindi collegate a diverse boe Racom, che sono state dispiegate sulla superficie del mare. Con queste boe di superficie, le reti sottomarine sono state alleate collegato a un centro di comunicazione di comando che si trova a bordo di una nave. Il l'esperimento ha anche rivelato che Seaweb potrebbe affrontare bene il maltempo nell'oceano con elevata affidabilità in quanto aveva superato con successo due uragani.

*Caratteristiche e limitazioni:* Seaweb è il primo livello di campo off-shore multi-hop su larga scala banco di prova sperimentale nel mondo e su cui sono stati condotti oltre cinquanta esperimenti questo nel corso dei decenni. Gli esperimenti di successo condotti tramite questo banco di prova hanno ha fortemente ispirato e incoraggiato la comunità di ricerca subacquea in tutto il mondo e migliorato lo sviluppo di UWA-SN. Una limitazione è che è vincolata con applicazioni marittime, ed è disponibile solo per una comunità selezionata e non è aperto al pubblico.

6.1.2. Ocean-TUNE. Ocean-TUNE è una raccolta di quattro banchi di prova posizionati ad est e il lato ovest degli Stati Uniti e delle coste del Golfo (ad esempio, Long Island Sound (CT), Santa Monica Bay (CA), Hood Canal (WA) e Galveston Bay (TX)), che copre grandi dimensioni aree delle coste degli Stati Uniti per fornire diversi banchi di prova per l'accesso del pubblico [ 27 ]. Il De- le aree di impiego per questa piattaforma di sperimentazione sono scelte in base alla geografia e diversità ambientale. È stato finanziato dalla National Science Foundation (NSF) Computing Research Infrastructure (CRI) del 2012 ed è stato sviluppato da quattro istituzioni negli Stati Uniti, UCONN, UW, University of California Los Angeles (UCLA), e la Texas A&M University (TAMU). Tra i singoli banchi di prova di Ocean-TUNE, in questo articolo, presentiamo principalmente Ocean-TUNE UCONN, sviluppato presso UCONN; Ocean-TUNE UW, sviluppato presso l'UW; e WaterCom, sviluppato presso l'UCLA.

UCONN è un banco di prova ad accesso aperto che fornisce accesso remoto, riconfigurazione e strutture di controllo [82]. UCONN utilizza i moduli del protocollo SeaLinx da eseguire su embedded

ACM Computing Surveys, vol. 50, n. 2, articolo 28, Data di pubblicazione: maggio 2017.



Fig. 19. L'architettura del banco di prova UW.

Linux. I nodi del sensore di UCONN sono distribuiti sulla superficie del mare e sul fondo di l'oceano; diversi alianti subacquei agiscono come nodi mobili nel sistema. La superficie node è ospitato su una boa e da allora funge da gateway trasparente con Internet ha un indirizzo IP univoco accessibile tramite un computer onshore. Il sur- i nodi frontali sono inoltre dotati di tre tipi di modem (ad esempio, RF (radiofrequenza) Modem CDMA (Code Division Multiple Access), Teledyne Benthos e OFDM), quindi possono comunicare e controllare i nodi dispiegati sul fondo del mare tramite acustica Mezzi di comunicazione. Inoltre, UCONN fornisce un'opzione altamente riconfigurabile ai ricercatori. Con l'interfaccia utente grafica e i moduli ARC, i ricercatori possono controllare o riprogrammare la rete di sensori. Ad esempio, possono fermarsi a distanza oppure riavviare gli esperimenti in corso o persino modificare i parametri dell'applicazione secondo necessità. Inoltre, il banco di prova dispone di un modulo AMC (Adaptive Modulation and Coding) con canali di comunicazione molto diversi. Questo modulo consente inoltre a un nodo di mit dati con diverse quantità di potenza di trasmissione durante lo studio e la convalida protocolli e applicazioni.

Il banco di prova UW è stato sviluppato da UW ed è installato a Hood Canal [ 51] . Il sistema l'architettura di questo banco di prova è illustrata nella Figura 19 . Un nodo dotato di routing impianti sono installati nella boa Hoodsport per la comunicazione 3G / 4G basata su RF con a stazione base sulla riva. I dati ricevuti dalla stazione base dal banco di prova sono trasferito su un server dell'università tramite Internet. Il banco di prova utilizza Linux Sistema operativo insieme a un processore Gumstix. Un modem acustico OFDM con un massimo di dati tasso di circa 9Kbps, è anche la parte del banco di prova [123] . Per evitare interferenze da rumore ambientale e onde, il modem è posizionato da 1 a 2 m sotto la superficie del mare.

WaterCom è stato sviluppato da UCLA e mira ad essere un banco di prova multi-livello che ha la capacità di condurre esperimenti su piccola, media e larga scala separati piuttosto [69] . La suite di sperimentazione su piccola scala è una piattaforma di test di laboratorio forma, che enfatizza la comunicazione a corto raggio associata a una forte riflessione

ACM Computing Surveys, vol. 50, n. 2, articolo 28, Data di pubblicazione: maggio 2017.

Fig. 20. L'architettura di SUNRISE GATE.

ed effetti del segnale multipath. La suite sperimentale di media scala serve a creare un ambiente di sperimentazione trollabile per reti estese (che includono mobile sensori) per valutare il rilevamento del traffico o altri scopi. La sperimentazione su larga scala supporta la sperimentazione in acque libere offshore. Inoltre, WaterCom supporta ambienti di test online basati su cloud che possono essere raggiunti in qualsiasi momento da remoto. Con il suo webserver e il job scheduler, i ricercatori possono configurare l'hardware o la rete parametri, avviare e coordinare diversi compiti rilevanti per gli esperimenti, e poi ottenere i risultati del test dal banco di prova tramite Internet. WaterCom consente anche esterni simulatori da integrare con se stesso.

*Caratteristiche e limitazioni:* i suddetti quattro banchi di prova di Ocean-TUNE erano distribuiti in quattro diversi siti lungo la costa degli Stati Uniti. La sperimentazione i siti erano diversi in termini di tempo e geografia. Inoltre, Ocean-TUNE è stato il primo banco di prova ad accesso aperto su larga scala altamente riconfigurabile negli Stati Uniti potrebbe essere controllato tramite Internet per facilitare gli esperimenti subacquei a distanza. It è stato anche il primo banco di prova a implementare e testare la comunicazione subacquea ad alta velocità media utilizzando modem OFDM multicarrier riconfigurabili. Per quanto riguarda le limitazioni, lì non erano sufficienti i nodi di sensori mobili integrati in Ocean-TUNE. Inoltre, di più sono necessari esperimenti per verificare le sue suite di sperimentazione a tre livelli.

6.1.3. ALBA. La piattaforma SUNRISE è finanziata dall'Unione Europea attraverso un progetto UE-7 ° PQ e l'Organizzazione del Trattato del Nord Atlantico (NATO) CMRE Science e Organizzazione tecnologica. Questa piattaforma mira a creare un Internet subacqueo distribuendo una serie di banchi di prova in luoghi diversi per immersioni subacquee a lungo termine ricerca scientifica [67]. Il personale del gruppo di ricerca proveniva dalle università, aziende e laboratori di ricerca, come l'Università degli Studi di Roma La Sapienza, Università di Twente, University at Buffalo, EvoLogics e SUASIS. I banchi di prova si trovano in il mare, i canali e i laghi nell'area mediterranea e nelle parti centrali dell'Europa. Questi I banchi di prova supportano varie applicazioni, che vanno dal monitoraggio portuale e marino protezione dei beni per il salvataggio marittimo o strutture di ricerca. Anche SUNRISE è accessibile ai ricercatori tramite Internet. Come mostrato nella Figura 20, i componenti del banco di prova da diversi siti sono collegati a SUNRISE GATE (Gate) tramite gateway e plug-in. Di conseguenza, i ricercatori di tutto il mondo hanno accesso alle risorse di diversi banchi di prova e può condurre esperimenti via Internet [87]. Attualmente, l'Università di Roma La Sapienza si concentra sulla ricerca relativa al MAC sottomarino e al routing

ACM Computing Surveys, vol. 50, n. 2, articolo 28, Data di pubblicazione: maggio 2017.

Fig. 21. L'architettura del banco di prova LOON.

protocolli. L'Università di Porto sta cercando di implementare una subacquea tollerante ai ritardi Rete. Uno standard di protocollo del livello fisico JANUS (Janus) è in fase di sviluppo da parte di Teledyne Benthos. Poiché SUNRISE è in fase di sviluppo, selezioniamo LOON [5] e il testbed Porto [67] per descrivere le caratteristiche e le strutture del SUNRISE piattaforma.

LOON è il primo banco di prova del progetto SUNRISE, sviluppato da CMRE, ed è stato sviluppato sulla base di un concetto modulare unificato, e quindi qualsiasi apparecchiatura alimentata da 24V può essere collegato ad esso tramite un protocollo TCP / IP. Ancora più importante, il banco di prova ha una funzione di accessibilità remota che consente a scienziati e ingegneri di tutto il mondo utilizzare in modo collaborativo il banco di prova ai fini della ricerca scientifica dopo aver autorizzazione e autenticazione da CMRE. La struttura del banco di prova è raffigurata nella Figura 21. M1, M2, M3 e M4 sono nodi del treppiede che formano una rete a stella con l'estensione centro di controllo M3, che è collegato a una stazione base on-shore tramite Ethernet. Questi i nodi del treppiede sono dotati di modem acustici commerciali, come WHOI, Evologics, e Teledyne Benthos. Inoltre, un array di idrofoni tetraedrici è collegato al riva tramite fibra ottica. Una catena di termistori viene distribuita per monitorare la temperatura del oceano e un Profiler di corrente Doppler acustico viene distribuito verso l'alto dal fondo dell'oceano per misurare gli spettri delle onde oceaniche.

Il banco di prova Porto è stato sviluppato presso l'Università di Porto ed è destinato alla collaborazione test e valutazione di protocolli di rete sottomarina utilizzando superficie e sott'acqua AUV, boe ormeggiate e sensori subacquei. Con il server OpenVPN centralizzato di il progetto SUNRISE, gli utenti possono modificare i parametri operativi e controllare i nodi del banco di prova per valutare i protocolli MAC, routing e cross-layer; gestire la localizzazione e problemi di sincronizzazione dell'ora; raccogliere dati dall'ambiente; e così via. Il tasto componenti del banco di prova sono AUV, schemi di localizzazione acustica, ASV, a distanza veicolo azionato (ROV), un gateway Manta, una stazione di controllo a terra, boe e sensori ormeggiati e una toolchain software chiamata DUNE (Dune Uniform Navigation Ambiente).

*Caratteristiche e limitazioni:* SUNRISE fornisce servizi di accesso aperto ai ricercatori e ingegneri in tutto il mondo dopo aver ottenuto l'autorizzazione da CMRE. Il banco di prova supporta anche protocolli di rete con tolleranza alle interruzioni (DTN) oltre ad altri standard protocolli [90]. Inoltre, le reti ibride possono essere implementate su SUNRISE, specialmente per le applicazioni delle reti di sensori mobili.

ACM Computing Surveys, vol. 50, n. 2, articolo 28, Data di pubblicazione: maggio 2017.

Tabella V. Caratteristiche principali dei banchi di prova sperimentali a livello di campo a lungo termine

Banco di prova	Primario Testbed Suites	Distribuzione Siti	Nodo Tipi	Sistema Tipi	Numero di Prove in mare	Sponsor
Seaweb	Banchi di prova principalmente distribuito in navi	Pacifico e Atlantico Oceani, Mediterraneo e Mar Baltico, Fiordi norvegesi, e anche sotto il	Boe, AUV, Alianti, sott'acqua nodi	Mobile reti e griglia topologia	50+	Seaweb

Ocean-TUNE	UCONN, UW, WaterCom e TAMU	Piattaforma di ghiaccio artico Suono di Long Island (CT), Hood Canal (WA), Santa Monica Bay (CA) e Baia di Galveston (TX)	Nodi di superficie, nodi inferiori, e nodi mobili	Mobile e ibrido reti	10+	NSF-CRI
ALBA	LOON e Porto	Oceano Atlantico, Mar Mediterraneo, Mar Nero e laghi e canali in Europa	ASV, AUV, ROVS e sott'acqua nodi statici	Mobile, DTN e ibrido reti	10+	EU-FP7

## 6.2. Confronto tra piattaforme di sperimentazione a livello di campo a lungo termine

Come mostrato nella Tabella [V](#), scegliamo suite di testbed, siti di distribuzione, tipi di nodi, supportati tipi di banco di prova, durata della prova in mare e sponsor come elenco di criteri per studio parativo tra diversi banchi di prova sperimentali a lungo termine a livello di campo. Basato su alcuni criteri più pre-specificati, di seguito, esaminiamo ulteriormente le diverse proprietà di questi banchi di prova sperimentali a livello di campo a lungo termine.

**Riconfigurabilità e supporto di progettazione cross-layer:** Seaweb può essere rapidamente utilizzato prendendo componenti da una varietà di piattaforme. Ha la capacità di autorizzare automaticamente si auto-configura in una rete ottimale. Si ricostruisce secondo alle diverse configurazioni di sensori subacquei e modem Seaweb, che è una nozione della sua maggiore capacità di adattarsi a diversi ambienti. Entrambi Ocean TUNE e SUNRISE consentono la riconfigurazione e il supporto della progettazione cross-layer, sebbene la loro principale enfasi è sui test sul campo. UCONN fornisce una riconfigurabilità opzione per ricercatori e ingegneri tramite un'acustica subacquea OFDM riconfigurabile modem. Adotta anche un modulo AMC per gestire le variazioni temporali e spaziali canali. Sia UCONN che UW adottano moduli di protocollo forniti da SeaLinx e quindi forniscono servizi di progettazione cross-layer. SUNRISE ha un plug-in, chiamato SUNRISE2SUNSET, per connettere SUNSET con se stesso ai fini della riconfigurazione. Con SUNRISE2SUNSET, i ricercatori possono riconfigurare i nodi eterogenei, misurare o impostare diversi parametri di rete o configurare impostazioni sperimentali. Inoltre, tramite SUNRISE2SUNSET, i ricercatori sono in grado di accedere, monitorare, controllare e configurare il file risorse di banchi di prova per implementare e testare protocolli cross-layer.

**Efficienza e precisione:** Seaweb è il primo banco di prova a livello di campo a lungo termine per Strate l'efficienza e l'accuratezza delle reti acustiche subacquee dopo con successo conducendo più di 50 prove in mare in acque poco profonde e in acque profonde di Oceani Pacifico e Atlantico, Mar Mediterraneo e Baltico, fiordi norvegesi e anche sotto la piattaforma di ghiaccio artica. Sia Ocean-TUNE che SUNRISE hanno meccanismi per farlo migliorare l'efficienza e la precisione complessive degli esperimenti distribuiti. Ocean-TUNE dispone di quattro banchi di prova distribuiti in diverse località che si estendono sulla costa degli Stati Uniti di fornire 24 / accesso 7 tramite Internet in modo efficiente. In UCONN, l'AMC Il modulo fornisce cinque diverse modalità associate a diversi livelli di potenza di trasmissione e velocità dei dati, e così i ricercatori hanno la flessibilità di selezionare diverse modalità in cordance con condizioni di canale variabili, che essenzialmente migliora l'efficienza di gli esperimenti. Per un motivo simile, SUNRISE ha un GATE per accedere, monitorare e

ACM Computing Surveys, vol. 50, n. 2, articolo 28, Data di pubblicazione: maggio 2017.

riconfigurare banchi di prova. Per migliorare ulteriormente l'efficienza e la precisione del banco di prova, come una parte standard, SUNSET è integrato con SUNRISE. Con una combinazione definita dal software munication stack, i ricercatori hanno la possibilità di selezionare diverse modalità di lavoro e configurare o ottimizzare i parametri del protocollo in fase di esecuzione per ottenere prestazioni ottimizzate di applicazioni al variare delle condizioni e degli ambienti del canale acustico.

**Supporto per la transizione senza interruzioni:** banchi di prova sperimentali a livello di campo a lungo termine concentrarsi principalmente sulla convalida e sui test reali a livello di campo. Tuttavia, Ocean-TUNE prende

SeaLinx come framework di protocollo e SUNRISE ha SUNSET come plug-in standard di conseguenza, entrambi questi banchi di prova possono adottare la transizione senza interruzioni strutture dalle loro piattaforme dipendenti / connesse.

**Supporto modem:** Seaweb supporta principalmente firmware limitato alla Marina che funziona su un modem commerciale Benthos, come il telesonar ATM885. D'altra parte, Ocean-TUNE attualmente supporta due tipi di modem acustici: il modem AquaSeNT OFDM e il modem Benthos ATM-885. Inoltre, il micro-modem WHOI, Teledyne Ben- i modem della serie ATM 900 ed Evologics sono generalmente utilizzati da SUNRISE.

**Accessibilità gratuita delle risorse:** Seaweb è principalmente per applicazioni marine, e non è aperto al pubblico. Sia Ocean-TUNE che SUNRISE hanno accesso aperto strutture per ricercatori. Dopo la registrazione, i ricercatori possono utilizzare WaterCom per condurre esperimenti impostando diversi parametri sperimentali tramite un modulo di invio web. Una volta terminato l'esperimento, i risultati dell'esperimento vengono inviati ai ricercatori tramite un'e-mail. LOON fornisce anche servizi di accesso aperto remoto ai ricercatori per condurre esperimenti una volta che sono autorizzati ad accedere al banco di prova da CMRE.

**Accessibilità remota:** i banchi di prova a livello di campo vengono solitamente distribuiti nell'oceano e quindi l'accessibilità remota è una caratteristica importante, specialmente per i banchi di prova aperti all'accesso del pubblico tramite Internet. Seaweb fornisce servizi di controllo remoto al banco di prova nodi tramite collegamenti acustici subacquei da navi o collegamenti basati su RF dal controllo centro situato sulla riva. Sia Ocean-TUNE che SUNRISE dispongono di strutture per utenti per accedervi e controllarli da remoto. UCONN ha un modulo ARC e un file modulo di trasferimento per gestire il controllo remoto e le attività di monitoraggio. Queste attività includono riconfigurazione della rete, trasferimento dei dati raccolti, riconfigurazione del modem acustico, riprogrammazione nodi di programmazione, avvio o conclusione di esperimenti, selezione di parametri di protocollo, e così via. UW ha anche uno scheduler basato sul web per gestire gli esperimenti sul banco di prova da remoto. Con un webserver basato su cloud, WaterCom può essere raggiunto in qualsiasi momento dai ricercatori per controllare il banco di prova (ad esempio, per impostare i parametri di rete, per programmare gli esperimenti correlati attività e per acquisire risultati e informazioni sullo stato). SUNRISE ha un web unificato in terface GATE e una shell di controllo per consentire ai ricercatori di accedere, controllare, riconfigurare i banchi di prova, ed eseguire esperimenti in remoto dopo aver ottenuto l'autenticazione da SUNRISE GATE.

**Costo di implementazione:** i banchi di prova sperimentali a livello di campo a lungo termine sono piattaforme sive rispetto ad altre piattaforme a causa degli alti canoni di noleggio di barche, alto offshore costi di implementazione, nonché costosi componenti hardware subacquei, statici e sensori mobili e così via. Seaweb appartiene alla prima generazione di grandi dimensioni a lungo termine banchi di prova sperimentali a livello di campo in scala (dal 1995) e più di 50 esperimenti sono stati condotti su di esso. Con Seaweb, molti ricercatori hanno acquisito esperienza pratica rienze con la comunicazione digitale subacquea. Sebbene sia limitato ai militari applicazioni, Seaweb ha dato alla comunità di ricerca subacquea enormi confidenze dence e ha notevolmente migliorato la ricerca e lo sviluppo negli UWA-SN. Noi consideriamo sia Ocean-TUNE che SUNRISE come seconda generazione di livello di campo a lungo termine banchi di prova ancora in fase di sviluppo. Questi banchi di prova mirano effettivamente a esplorare il reti di sensori acustici subacquei di nuova generazione con strutture ad accesso aperto per comunità di ricerca derwater. Ocean-TUNE è il primo subacqueo aperto su larga scala banco di prova di rete negli Stati Uniti, mentre SUNRISE è il più grande accesso aperto subacqueo banco di prova per l'Unione europea.

ACM Computing Surveys, vol. 50, n. 2, articolo 28, Data di pubblicazione: maggio 2017.

Tabella VI. I siti di download degli strumenti di simulazione open source

Strumento di simulazione	Scarica sito
Aqua-Sim	<a href="http://obinet.engr.uconn.edu/wiki/index.php/Aqua-sim">http://obinet.engr.uconn.edu/wiki/index.php/Aqua-sim</a>
UnetStack	<a href="http://www.unetstack.net/doc/html/downloads.html">http://www.unetstack.net/doc/html/downloads.html</a>
DESERTO	<a href="http://nautilus.dei.unipd.it/desert-underwater">http://nautilus.dei.unipd.it/desert-underwater</a>
TRAMONTO	<a href="http://svnreti.di.uniroma1.it/SUNSET/">http://svnreti.di.uniroma1.it/SUNSET/</a>

## 7. RACCOMANDAZIONI PER LA SCELTA DELLE PIATTAFORME DI SIMULAZIONE E SPERIMENTAZIONE

Come accennato in precedenza, per valutare, convalidare o testare protocolli e applicazioni subacquee, i ricercatori potrebbero aver bisogno di un livello di laboratorio o di campo, a breve termine o anche a lungo termine piattaforme di sperimentazione nelle diverse fasi del processo di sviluppo. Dal punto di vista degli utenti, possono considerare molti criteri diversi durante la scelta di un adatto piattaforma. Inoltre, ogni piattaforma ha i suoi pro e contro, e quindi è difficile compito di prendere questa decisione. In questa sezione, forniamo le linee guida in termini di metriche per aiutare i ricercatori a selezionare gli strumenti di simulazione e i banchi di prova desiderati.

- *Accessibilità gratuita delle risorse*: lo sviluppo iniziale di UWA-SN è di solito legato alle applicazioni marittime, e quindi gran parte della sperimentazione subacquea le piattaforme non sono aperte al pubblico. Come sviluppo per applicazioni commerciali aumenta, i ricercatori preferiscono scegliere strumenti di simulazione open source e liberamente banchi prova accessibili. Tra le 17 piattaforme di simulazione e sperimentazione, le attuali attualmente solo 4 di loro sono disponibili tramite Internet e 1 fornisce un banco di prova a livello di campo aprire una struttura di accesso remoto tramite Internet. I quattro strumenti di simulazione open source sono Aqua-Sim, UnetStack, DESERT e SUNSET e il web scaricabile gratuitamente siti per loro sono mostrati nella Tabella VI. Dopo il rilascio iniziale, sono uscite nuove versioni che ha aggiunto nuove funzionalità e componenti. Ad esempio, le ultime versioni di SUNSET, DESERT e UnetStack sono rispettivamente 10, 2.1.2 e 1.3. Per quanto riguarda il lungo termine banchi di prova sperimentali a livello di campo, attualmente solo LOON in SUNRISE fornisce un file aprire la struttura di accesso remoto ai ricercatori. Un obiettivo cruciale di SUNRISE è quello di condividere i suoi componenti del banco di prova con scienziati e ricercatori in tutto il mondo e incoraggiare la ricerca collaborativa sugli UWA-SN. Per avere accesso a LOON, i ricercatori ho solo bisogno di ottenere il certificato di autorizzazione da CMRE.
- *Costo e scalabilità complessivi*: quando i ricercatori impostano il proprio test subacqueo vironment o selezionare la piattaforma di sperimentazione, preferiscono scegliere quella più economica. In generale, i banchi di prova a livello di laboratorio, come Aqua-Lab, UPPER, SeaNet, UANT, Aqua-Sim e UW-Buffalo sono piattaforme di sperimentazione a basso costo e possono ospitare esperimenti su piccola scala. Poiché Aqu-lab, UPPER e SeaNet utilizzano prodotti commerciali più economici componenti ciali a un prezzo relativamente basso, i ricercatori possono apprendere l'architettura di quelle piattaforme facilmente per impostare il proprio semplice ambiente di test subacqueo. Per i principianti, un semplice banco di prova a livello di laboratorio può essere più che sufficiente, ed è il uno più economico. Tuttavia, utilizzando piattaforme di sperimentazione a breve termine, si può simulazione di condotti, emulazione e test a livello di campo. Aqua-Net, SeaLinx, UnetStack, DESERT e SUNSET sono in questo gruppo. Con gli strumenti di simulazione in queste piattaforme forme, i ricercatori possono implementare esperimenti su scala medio-grande in un relativamente a basso costo. La sperimentazione sul campo a lungo termine è l'approccio più costoso per verifica e test del protocollo. È possibile eseguire test, emulazione e simulazione a livello di laboratorio aiutare i ricercatori nel processo di progettazione di applicazioni / protocolli. Tuttavia, poiché sotto le applicazioni per l'acqua alla fine verranno distribuite nell'oceano, dobbiamo ancora testare e verificare i protocolli subacquei in queste costose sperimentazioni a livello di campo piattaforme prima della distribuzione nel mondo reale. Ocean-TUNE e SUNRISE sono a lungo termine banchi di prova a livello di campo e WaterCom in Ocean-TUNE cerca di fornire un multi-livello piattaforma di test, che include suite di test su piccola, media e grande scala.

ACM Computing Surveys, vol. 50, n. 2, articolo 28, Data di pubblicazione: maggio 2017.

- *Riconfigurabilità e supporto di progettazione cross-layer*: fornisce un testbed riconfigurabile flessibilità ai ricercatori nella selezione delle modalità funzionali o nella regolazione dei parametri di componenti hardware e software. Di conseguenza, possono programmare il banco di prova come necessario per scoprire i fattori che hanno grande influenza su applicazioni specifiche.

Il supporto per la progettazione su più livelli è un'altra importante struttura per la progettazione dei ricercatori protocolli ottimizzati condividendo le informazioni su diversi livelli. Questa struttura aiuta sostanzialmente i ricercatori a gestire canali sottomarini con varianti spazio-temporali rendendo disponibili le informazioni degli strati inferiori agli strati superiori. UANT, UW-Forniscono Buffalo, SeaNet, Aqua-Net, SeaLinx, UnetStack, DESERT e SUNSET questa struttura adottando approcci diversi o utilizzando hardware o software diversi componenti di articoli. UANT utilizza la radio GNU per riconfigurare tre livelli di protocollo in stack, come livelli fisici, MAC e di rete. UW-Buffalo esegue cross-layer progettare collegando un modulo controller cross-layer e un motore Teledyne riconfigurabile dem. Pertanto, il design ottimizzato può essere verificato con veri modem subacquei. Utilizzando SDR, SeaNet fornisce una struttura di riconfigurazione completa su quattro livelli, come come livelli fisici, di collegamento dati, di rete e applicativi. Aqua-Net ha uno strato incrociato modulo di interfaccia e SeaLinx ha SeaLinx Core per facilitare questa funzione. UnetStack utilizza un meccanismo di condivisione delle informazioni basato su agenti per fornire una progettazione cross-layer supporto. Infine, ns2-Miracle fornisce una struttura di progettazione cross-layer a entrambi SUNSET e DESERTO.

- *Adattabilità con canali dinamici e supporto modem:* molte simulazioni ed ex-le piattaforme di perimentazione adottano complessi modelli di canali sottomarini per gestire i cambiamenti nel problema dell'adattabilità e migliorare l'accuratezza della simulazione o degli esperimenti. Aqua-Sim integra i modelli Rogers e PE sensibili alle acque poco profonde. Sia SUNSET che DESERT migliorano l'adattabilità del canale implementando un Bel-modello di software lop ray-tracing con WOSS. UCONN adotta uno schema AMC per sintonizzarsi parametri di comunicazione in base al cambio di canale. Utilizzando soft-stack di comunicazione definito da ware, SUNRISE può adattarsi con canali dinamici in un file modo migliore. Più specificamente, questo stack di comunicazione consente ai ricercatori di selezionare diverse modalità funzionali, configurare o regolare i parametri del protocollo, e così via, per sincronizzare le prestazioni delle applicazioni distribuite. Un vero modem acustico subacqueo può migliorare le prestazioni dell'emulazione del testbed ed è fondamentale per i testbed supportare diversi tipi di modem compatibili con comunicazioni diverse media. Ad esempio, SUNSET supporta cinque diversi modem commerciali. Eccetto per UPPER e UANT, tutti gli altri testbeds supportano modem commerciali o sperimentali.
- *Supporto per la transizione senza interruzioni e periodo di risposta :* i banchi di prova che supportano SEFT facilitare la progettazione di qualsiasi nuovo protocollo o applicazione e può abbreviare il complesso periodo di turnaround di progettazione. Inoltre, la transizione senza soluzione di continuità tra simulazione, emulazione e test a livello di campo consentono ai ricercatori di riutilizzare il codice e accelera il processo di progettazione generale e migliorare l'efficienza della progettazione. La transizione senza soluzione di continuità lo implica non ci sono incongruenze tra simulazione, emulazione e test a livello di campo in il primo passo. In secondo luogo, è possibile riutilizzare quantità significative di codice e ciò comporta mal sforzo durante l'esportazione del codice dalla simulazione all'emulazione e al test a livello di campo, tuttavia, con approcci diversi. UnetStack, DESERT e SUNSET supportano SEFT e transizione senza soluzione di continuità. Sia SUNSET che DESERT sono sviluppati su ttop di ns-2 e ns2-Miracle, che sono principalmente simulatori di eventi discreti. Pertanto, mentre trasferimento dalla simulazione basata su eventi discreti all'emulazione distribuita in tempo reale su queste piattaforme, la transizione potrebbe richiedere modifiche significative nel codice e nella progettazione ciò potrebbe causare ulteriori problemi. Ad esempio, se le informazioni sulla rete globale centralizzata mation viene utilizzata nella simulazione di determinate applicazioni, mentre si esegue l'emulazione di la stessa applicazione, è necessario prestare particolare attenzione quando il codice viene trasferito dallo scopo della simulazione all'emulazione. Ad esempio, è difficile da identificare

ACM Computing Surveys, vol. 50, n. 2, articolo 28, Data di pubblicazione: maggio 2017.

problemi relativi alla temporizzazione degli eventi nella simulazione e così via durante l'esportazione del codice scritto per la simulazione all'emulazione, molti problemi relativi alla coerenza possono accadere in questo contesto. UnetStack ha un'architettura basata su agenti e supporta



simulazione in tempo reale. Pertanto, gli stessi blocchi di codice binario compilato utilizzati per la simulazione può essere implementata direttamente su modem subacquei compatibili con UnetStack senza compilazione incrociata a scopo di emulazione o test a livello di campo.

- *Accessibilità remota:* una funzione di controllo e accesso remoto è importante, in particolare per UIOT (Underwater Internet of Things). UW-Buffalo, UnetStack, DESERT e SUNSET sono banchi di prova controllabili e riconfigurabili da remoto. UW-Buffalo ha un'estensione Stack di protocollo compatibile con IP per facilitare l'accesso a Internet sott'acqua. UnetStack ha un'architettura flessibile basata su agenti e il suo agente di accesso remoto con un'interfaccia TCP / IP fornisce accesso remoto e servizi di controllo, che includono query o impostazioni parametri, trasferimento di file ed esecuzione di script in remoto e così via. DESERT utilizza RECORDS per controllare e riprogrammare a distanza l'intera rete multi-hop. RECORDS è un software open source che può essere scaricato da Internet, e può essere esportato facilmente e comodamente su sistemi embedded senza cross-compilazione. SUNSET utilizza un guidatore sul sedile posteriore per controllare a distanza l'hardware in banchi di prova che includono nodi statici e mobili (ad esempio, AUV e ASV). Sul retro seat driver, i ricercatori possono modificare, attivare o configurare da remoto la topologia della rete nodi del sensore, avviare o terminare esperimenti, modificare i parametri dell'esperimento o persino passare da un test all'altro in modo facile e veloce.
- Ocean-TUNE e SUNRISE supportano un comodo accesso remoto e controllo fa-capacità per esperimenti sul campo. UCONN ha un modulo ARC per fornire remoto capacità di controllo e monitoraggio che include un nodo di riprogrammazione e un avvio o interrompere il programma e che può regolare i parametri del protocollo, il trasferimento di file e così via. WaterCom supporta i nodi di sperimentazione basati su cloud, che sono online in qualsiasi momento. I ricercatori possono connettersi a un server web basato su cloud per inviare informazioni relative agli esperimenti attività, impostare i parametri di rete, attendere l'esecuzione e ottenere risultati e informazioni sullo stato. SUNRISE fornisce un'interfaccia web unificata, ovvero GATE, per ricercatori di accedere, controllare, riconfigurare banchi di prova ed eseguire esperimenti in remoto. Fornisce inoltre una shell di controllo per gli utenti avanzati per accedere efficacemente al basso livello, funzionalità complesse e migliorate dopo l'autenticazione da SUNRISE CANCELLO.

- *Facilità di utilizzo e ciclo di apprendimento:* la simulazione e i banchi di prova a livello di campo dovrebbero avere un breve ciclo di apprendimento. Una curva di apprendimento ripida implica che i ricercatori abbiano bisogno di un file notevole quantità di tempo e impegno per acquisire familiarità con i banchi di prova. Durante la scelta banchi di prova, i ricercatori preferiscono curve di apprendimento più brevi, quindi devono dedicare meno tempo sulla loro padronanza e può accelerare lo sviluppo di applicazioni. Le caratteristiche di la curva di apprendimento dipende anche dal background e dalle conoscenze dei ricercatori. In altre parole, lo stesso strumento può produrre diversi tipi di curve di apprendimento per diversi ricercatori. Sia DESERT che SUNSET sono estesi dal ben noto simulatore open source ns-2, che ha una comunità e utenti molto numerosi. Perciò, i ricercatori che hanno familiarità con ns-2 non devono imparare un nuovo framework software nel caso in cui scelgono di utilizzare DESERT o SUNSET. La facilità d'uso è un altro criterio importante, che implica il grado di comfort complessivo relativo al utilizzo del banco di prova. Per migliorare la facilità d'uso, i banchi di prova dovrebbero essere facili da usare interfacce in modo che i ricercatori possano utilizzarle in modo conveniente.

## 8. ULTERIORI DISCUSSIONI E RICERCHE FUTURE

Negli ultimi anni, sebbene abbiamo assistito a significativi progressi nello sviluppo di simulazioni piattaforme di ricerca e sperimentazione per risolvere i problemi di ricerca emergenti in UWA-SN, ci sono ancora molte questioni e sfide importanti che devono essere affrontate

ACM Computing Surveys, vol. 50, n. 2, articolo 28, Data di pubblicazione: maggio 2017.

### 8.1. Equilibrio tra simulazione e test a livello di campo

Per valutare protocolli o algoritmi durante lo sviluppo di applicazioni reali per UWA-SN, è conveniente identificare prima i potenziali problemi nella fase di simulazione dispiegamento costoso a livello di campo. Pertanto, determinare un modo per ridurre il divario tra simulazione ed esperimenti reali a livello di campo e per il trasporto senza soluzione di continuità codice di simulazione per dispositivi reali sul campo senza riscrivere molto codice sta diventando un file argomento di ricerca interessante. Di conseguenza, la funzionalità che integra la simulazione e esperimenti a livello di campo insieme e consente la transizione senza soluzione di continuità dalla simulazione e l'emulazione al test sul campo, diventa anche una metrica importante della progettazione del banco di prova. Inoltre, è desiderabile non dover cambiare i blocchi di codice durante il trasferimento dalla simulazione agli esperimenti a livello di campo. Un altro problema importante relativo al trasformazione senza soluzione di continuità è quello di sviluppare un'accurata propagazione acustica sottomarina modello [ 105] che può essere utilizzato nelle piattaforme di simulazione per simulare diversi scenari e ambienti accuratamente prima dei test reali a livello di campo. Inoltre, a perfezionare i risultati della simulazione per futuri test a livello di campo potrebbe richiedere il tracciamento del file ambienti reali dei siti di distribuzione nella simulazione.

### 8.2. Confronto tra piattaforme di simulazione e sperimentazione

Con lo sviluppo di sempre più piattaforme di simulazione e sperimentazione, più studi basati sul confronto su alcuni criteri uniformi e la guida corrispondente-sono necessarie linee per i ricercatori. Questo perché ogni piattaforma ha i suoi pro e contro, e il protocollo o il processo di valutazione dell'applicazione ne è direttamente influenzato. La ricerca è stata condotta di recente in questo contesto. Ad esempio, il confronto-studi basati tra SUNSET e SeaLinx e SUNSET con DESERT, affrontati diverse metriche delle prestazioni, come l'accuratezza della simulazione, l'efficienza energetica, sovraccarico di memoria e così via. Tuttavia, questi studi sono lunghi dall'essere sufficienti. Oltretutto le metriche di cui sopra, potrebbero includere altre metriche per studi basati sul confronto accessibilità gratuita delle risorse, scalabilità, costi di implementazione, transi-dalla simulazione al test sul campo, adattabilità del canale, capacità di riconfigurazione, facilità d'uso e così via. Si noti che, a causa della natura diversificata e complessa delle dif-piattaforme di sperimentazione ferenti, trovando tra loro una strategia di confronto unificata in modo efficiente ed equo è ancora un problema aperto [ 126] .

### 8.3. Simulazione e sperimentazione ottimizzate

Una delle sfide nella progettazione e nel test di applicazioni o protocolli subacquei è trattare con veloci canali acustici subacquei con varianti spazio-temporali [10 , 96, 105]. Un metodo promettente e accattivante per ottimizzare la valut applicazioni subacquee zioni e protocolli in modo efficiente è AMC [116 , 119]. Un al è la progettazione cross-layer che utilizza le informazioni di diversi livelli di protoc la valutazione processo di diverse applicazioni [91 , 93, 115]. Affron ite e spazialmente variando i canali sottomarini, SDR è recentemente em iale tecnologia progettare ambienti testbed intelligenti e autoadattativi. Di conseguenza, trovare un file modo per sfruttare i vantaggi della tecnologia acustica subacquea definita dal software da Anche la combinazione di SDM e struttura di progettazione cross-layer è un interessante argomento di ricerca.

### 8.4. Accesso remoto e strutture di controllo

È molto costoso impostare e mantenere la simulazione e la sperimentazione a livello di campo piattaforme dispiegate nell'oceano. Per ridurre il costo di valutazione di qualsiasi nuova applicazione o protocollo, è meglio distribuire piattaforme di sperimentazione su piccola, media e grande scala

ACM Computing Surveys, vol. 50, n. 2, articolo 28, Data di pubblicazione: maggio 2017.

dovrebbe essere accessibile in remoto tramite Internet in modo che tutte le risorse nei banchi di prova, come sensori statici di superficie, sensori subacquei, sensori mobili, AUV, ASV e ROV, sono disponibili per gli utenti tramite un'interfaccia unificata e standard. Ancora più importante, questi componenti software e hardware dovrebbero essere riconfigurabili in remoto così i ricercatori può prenotarli e utilizzarli per condurre ricerche senza interruzioni tramite simulazione, emulazione e test in mare.

### 8.5. Progettazione specifica del banco di prova

Attualmente, la maggior parte dei suddetti banchi di prova sono destinati a test e valutazioni generali di protocolli di comunicazione subacquea. Proponiamo di progettare banchi di prova più specifici ottenere per ricerche specifiche (ad esempio, ricerca sulla durata della rete e diverse applicazioni, riutilizzo di canali spaziali subacquei, reti di sensori mobili o anche di nuova generazione UWA-SN). Questi banchi di prova possono adattarsi a specifici requisiti di ricerca da raggiungere i massimi risultati. Per migliorare ulteriormente lo sviluppo dell'UWA-SN, molti ricercatori hanno studiato alcuni nuovi paradigmi specialmente per gli UWA-SN di prossima generazione [3, 4]. Ad esempio, poiché le reti di comunicazione sottomarine esistenti richiedono a loro volta un'architettura inflessibile basata su hardware, in [3], gli autori hanno proposto un software-defined paradigma di rete, SoftWater, che è un'architettura di rete virtualizzabile con un elevato utilizzo delle risorse di rete e caratteristiche di flessibilità. Basato su questi paradigmi proposti, più banchi di prova dovrebbero essere sviluppati per facilitare lo sviluppo delle reti di sensori subacquei di nuova generazione.

### 8.6. Design intelligente del banco di prova

Fino ad ora, i banchi di prova delle reti di sensori acustici subacquei non sono stati abbastanza intelligenti per condurre in modo intelligente simulazioni ed esperimenti sofisticati. Per acquisire le prestazioni ottimizzate, il design cross-layer è il meccanismo più utile. Come sensore e i nodi stanno diventando più potenti con capacità computazionali più grandi, il progresso. Recentemente, le tecnologie di intelligenza artificiale (AI) hanno creato nuove opportunità per i progressi negli UWA-SN per renderli più intelligenti nel prossimo futuro [38, 50]. Ad esempio, protocolli o algoritmi più orientati all'apprendimento automatico (ad esempio, reinforcement learning) sono stati progettati per aumentare la rete in tempo reale, autoadattabilità con gli ambienti oceanici difficili, nonché per massimizzare l'utilizzo della rete risorse. Per far fronte a questa tendenza di ricerca, dobbiamo creare e progettare il supporto AI piattaforme di simulazione e sperimentazione. Ad esempio, possiamo progettare un apprendimento profondo-piattaforme basate che supportano l'addestramento preliminare per i nodi di sensori subacquei con automatiche caratteristiche estratte dall'area oceanica mirata per aumentare l'intelligenza dei nodi in termini di adattabilità ambientale.

## 9. CONCLUSIONE

In questo articolo, presentiamo un sondaggio sugli strumenti di simulazione subacquea e sperimentali banchi di prova. Per prima cosa classifichiamo 17 simulazioni tipiche e piattaforme sperimentali in tre gruppi, quindi introdurre i componenti principali di queste piattaforme. Per soddisfare l'obiettivo principale di questa indagine, discutiamo l'architettura, le caratteristiche e le limitazioni di ogni piattaforma separatamente per ogni gruppo. All'interno dello stesso gruppo, forniamo inoltre uno studio comparativo tra le piattaforme selezionate. Sulla base dello studio comparativo, presentiamo alcuni consigli per i ricercatori sulla scelta di piattaforme adatte alla loro applicazione. Alla fine di questo sondaggio, sulla base dell'andamento della ricerca e dei nostri risultati, forniamo alcune indicazioni sulla ricerca futura in questo contesto. Crediamo che SDR sta diventando una tecnologia emergente che ha molti potenziali vantaggi da affrontare canali di comunicazione subacquea varianti spazio-temporali e nella progettazione completa banchi di prova riconfigurabili, flessibili e autoadattativi per gli UWA-SN di prossima generazione.

ACM Computing Surveys, vol. 50, n. 2, articolo 28, Data di pubblicazione: maggio 2017.

È necessario impegnarsi maggiormente nella ricerca sulla progettazione di standard open source condivisi piattaforme, che possono essere raggiunte da qualsiasi parte del mondo comodamente tramite l'Internet. Tali piattaforme consentiranno ai ricercatori di riconfigurare le proprie risorse e di eseguire esperimenti a distanza con risultati affidabili a costi relativamente bassi. Inoltre, crediamo che aumenteranno gli sforzi di ricerca sulle piattaforme di simulazione e sperimentazione lo sviluppo degli UWA-SN.

## RICONOSCIMENTI

Ringraziamo i revisori e gli editori per i loro preziosi consigli e per i commenti dettagliati.

## RIFERIMENTI

- [1] Niaz Ahmed, Waqas bin Abbas e Affan A. Syed. 2012. Una piattaforma subacquea economica e flessibile per promuovere esperimenti nella ricerca UWSN. In *Atti della 7a Conferenza Internazionale ACM su reti e sistemi sottomarini*. ACM, 1–4.
- [2] Ian F. Akyildiz, Dario Pompili e Tommaso Melodia. 2005. Reti di sensori acustici subacquei: Sfide della ricerca. *Rete ad hoc* 3, 3 (2005), 257–279.
- [3] Ian F. Akyildiz, Pu Wang e Shih-Chun Lin. 2016. SoftWater: rete definita dal software per sistemi di comunicazione subacquea di nuova generazione. *Rete ad hoc* 46 (2016), 1–11.
- [4] Ben Allen, Tom Austin, Ned Forrester, Rob Goldsborough, Amy Kukulya, Greg Packard, Mike Purcell, e Roger Stokey. 2006. Dimostrazioni di docking autonomo con tecnologia REMUS avanzata. *OCEANS 2006* (2006), 1–6.
- [5] Joao Alves, John Potter, Piero Guerrini, Giovanni Zappa e Kevin LePage. 2014. The LOON nel 2014: Descrizione del banco di prova. In *Underwater Communications and Networking (UComms)*, 2014. IEEE, 1–4.
- [6] AppliedOceanSystems. 2016. Modem acustico sottomarino wireless SAM1. (2016). Estratto da <http://www.applied-ocean.com>.
- [7] AquaSeNT. 2016. Wi-Fi acustico sottomarino AquaSeNT. Estratto da <http://www.aquasent.com>.
- [8] Muhammad Ayaz, Imran Baig, Azween Abdullah e Ibrahima Faye. 2011. Un sondaggio sul routing tecniche nelle reti di sensori wireless subacquei. *J. Netw. Comput. Appl.* 34, 6 (2011), 1908–1927.
- [9] Mehmet Aydinlik, A. Turan Ozdemir e Milica Stajanovic. 2008. Un'implementazione del livello fisico su modem acustico subacqueo riconfigurabile. In *OCEANS 2008*. IEEE, 1–4.
- [10] Mohsen Badiy, Yongke Mu, Jeffrey Simmen, Steve E. Forsythe e altri. 2000. Variabilità del segnale in canali sonori in acque poco profonde. *IEEE J. Ocean. Eng.* 25, 4 (2000), 492–500.
- [11] Nicola Baldo, Federico Maguolo, Marco Miozzo, Michele Rossi e Michele Zorzi. 2007. ns2-MIRACOLO: Un framework modulare per supporto multi-tecnologia e cross-layer nel simulatore di rete 2. In *Proceedings della seconda conferenza internazionale sulle metodologie e gli strumenti di valutazione delle prestazioni*. 16.
- [12] Waqas Bin Abbas, Niaz Ahmed, Chaudhry Usama e Affan A. Syed. 2015. Progettazione e valutazione di una piattaforma subacquea a basso costo, ispirata al fai da te, per promuovere la ricerca sperimentale in UWSN. *Ad hoc Netw.* 34 (2015), 239–251.
- [13] Brian Borowski e Dan Duchamp. 2010. Strato fisico acustico subacqueo basato su misurazioni simulazione. In *Atti di MTS / IEEE OCEANS'10*.
- [14] Henrique Cabral. 2014. Modem acustico per comunicazioni subacquee. Tesi di master. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portogallo.
- [15] Filippo Campagnaro, Roberto Francescon, Federico Guerra, Federico Favaro, Paolo Casari, Roee Diamant e Michele Zorzi. 2016. The DESERT underwater framework v2: funzionalità migliorate e strumenti di estensione. In *Proceedings of the 2016 IEEE 3rd Underwater Communications and Networking Conferenza (UComms)*. IEEE, 1–5.
- [16] Edward A. Carlson, Pierre-Philippe Beaujean e Edgar An. 2004. Simulazione della comunicazione durante più operazioni AUV. Nel *2004 IEEE / OES Autonomous Underwater Vehicles*. IEEE, 76–82.
- [17] Paolo Casari, Cristiano Tapparello, Federico Guerra, Federico Favaro, Ivano Calabrese, Giovanni Toso, Saiful Azad, Riccardo Masiero e Michele Zorzi. 2014. Suite open source per il networking subacqueo: WOSS e DESERT sott'acqua. *IEEE Netw.* 28, 5 (2014), 38–46.
- [18] Vijay Chandrasekhar, Winston KG Seah, Yoo Sang Choo e How Voon Ee. 2006. Localizzazione in reti di sensori subacquei: sondaggi e sfide. In *Atti del 1° ACM Internazionale Workshop on Underwater Networks (UUNet'06)*. 33–40.

ACM Computing Surveys, vol. 50, n. 2, articolo 28, Data di pubblicazione: maggio 2017.

- [19] Keyu Chen, Maode Ma, En Cheng, Fei Yuan e Wei Su. 2014. Un'indagine sui protocolli MAC per reti di sensori wireless subacquee. *IEEE Commun. Surv. Tutor.* 16, 3 (2014), 1433–1447.
- [20] Mandar Chitre, Rohit Bhatnagar, Manu Ignatius e Shailabh Suman. 2014b. Segnale in banda base elaborazione con UnetStack. In *Underwater Communications and Networking (UComms), 2014*. IEEE, 1–4.
- [21] Mandar Chitre, Rohit Bhatnagar e Wee-Seng Soh. 2014a. UnetStack: un software basato su agenti stack e simulatore per reti subacquee. *A Oceans-St. John's, 2014*. IEEE, 1–10.
- [22] Mandar Chitre, Shiraz Shahabudeen e Milica Stojanovic. 2008. Comunicazione acustica subacquea: cazioni e collegamento in rete: progressi recenti e sfide future. *Mar. Technol. Soc. J.* 42, 1 (2008), 103–116.
- [23] Mandar Chitre, Iulian Topor e Teong-Beng Koay. 2012. Il modem UNET-2 Uno strumento estensibile per ricerca di reti subacquee. In *OCEANS, 2012-Yeosu*. IEEE, 1–7.
- [24] Salvador Climent, Antonio Sanchez, Juan Vicente Capella, Nirvana Meratnia e Juan Jose Serrano. 2014. Reti di sensori wireless acustici subacquei: progressi e tendenze future nel campo fisico, MAC e strati di instradamento. *Sensors* 14, 1 (2014), 795–833.
- [25] Nuno A. Cruz, Bruno M. Ferreira, Oleksiy Kebkal, Anibal C. Matos, Chiara Petrioli, Roberto Petroccia, e Daniele Spaccini. 2013. Ricerca di reti acustiche subacquee abilitanti la cooperativa funzionamento di più veicoli eterogenei. *Mar. Technol. Soc. J.* 47, 2 (2013), 43–58.
- [26] Jun-Hong Cui, J. Kong, M. Gerla e S. Zhou. 2006. Le sfide della creazione di dispositivi mobili scalabili reti di sensori wireless subacquee per applicazioni acquatiche. *IEEE Netw.* 20, 3 (2006), 12.
- [27] Jun-Hong Cui, Shengli Zhou, Zhijie Shi, James O'Donnell, Zheng Peng, Mario Gerla, Burkard Baschek, Sumit Roy, Payman Arabshahi e Xi Zhang. 2012. Ocean-TUNE: un banco di prova oceanico comunitario per reti wireless subacquee. In *Atti della 7a Conferenza Internazionale ACM sulla subacquea Reti e sistemi*. ACM, 17.
- [28] Emre Can Demircan, Bharatwaj G. Shankar, G. Enrico Santagati e Tommaso Melodia. 2015. SEANet: Una struttura di rete acustica definita dal software per reti subacquee riconfigurabili. Nel *WUUNET'15*.
- [29] Emre Can Demircan, George Sklivanitis, G. Enrico Santagati, Tommaso Melodia e Stella N. Batalama. 2014. Progettazione di un modem acustico subacqueo definito da software con fisica in tempo reale capacità di adattamento dei livelli. In *Atti della Conferenza internazionale sulle reti subacquee E sistemi*. ACM, 25.
- [30] Develogic. 2016. Develogic Soluzione sottomarina integrata. Estratto da <http://www.develogic.de>.
- [31] Henry Dol, Paolo Casari e Timo van der Zwan. 2014. Modem ad architettura aperta definiti dal software: Revisione storica e approccio NILUS. In *comunicazioni e reti subacquee (UComms), 2014*. IEEE, 1–5.
- [32] Henry Dol, Paolo Casari, Timo van der Zwan e Roald Otnes. 2017. Software-defined underwater modem acustici: rassegna storica e approccio NILUS. *Giornale IEEE di ingegneria oceanica* (2017), 1–16. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/JOE.2016.2598412>, in attesa di pubblicazione.
- [33] Katherine Domrese, Andrew Szajna, Shengli Zhou e Jun-Hong Cui. 2014. Confronto del funzione di portata di tre tipi di modem acustici subacquei. In *Atti del 2014 IEEE 11th International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems (MASS)*. IEEE, 743–748.
- [34] DSPComm 2016. Modem wireless AquaCommUnderwater. Estratto da <http://www.dspcomm.com>.
- [35] Melike Erol-Kantarci, Hussein T. Mouftah e Sema Oktug. 2011. Una rassegna di architetture e tecniche di localizzazione per reti di sensori acustici subacquei. *IEEE Commun. Surv. Tutor.* 13, 3 (2011), 487–502.
- [36] EvoLogics 2016. EvoLogicsUnderwater Acoustic Modems. (2016). Estratto da <http://www.evologics.de>.
- [37] Ruolin Fan, Li Wei, Pengyuan Du, Ciarán Mc Goldrick e Mario Gerla. 2016. A controllo SDN banco di prova per MAC e routing subacqueo. In *IEEE Military Communications Conference (MILCOM 2016-2016)*. IEEE, 1071–1076.
- [38] Eric L. Ferguson, Rishi Ramakrishnan, Stefan B. Williams e Craig T. Jin. 2016. Apprendimento profondo approccio al monitoraggio passivo dell'ambiente acustico sottomarino. *J. Acoust. Soc. Am.* 140, 4 (2016), 3351–3351.
- [39] Eric Gallimore, Jim Partan, Ian Vaughn, Sandipa Singh, Jon Shusta e Lee Freitag. 2010. Il WHOI micromodem-2: un sistema scalabile per comunicazioni acustiche e networking. In *OCEANS 2010*. IEEE, 1–7.
- [40] GNUradio 2016. E. Blossom Exploring GNU Radio. (2016). Estratto da <http://www.gnu.org/software/gnuradio>.

ACM Computing Surveys, vol. 50, n. 2, articolo 28, Data di pubblicazione: maggio 2017.

- [41] Federico Guerra, Paolo Casari e Michele Zorzi. 2009. Sistema di simulazione oceanica mondiale (WOSS): A strumento di simulazione per reti sottomarine con modellazione realistica della propagazione. In *Atti del 4 ° seminario internazionale ACM sulle reti sottomarine* . ACM, 4.
- [42] GumstixDeveloperCenter 2016. Gumstix Developer Center. Estratto da <http://www.gumstix.org>.
- [43] Guangjie Han, Chenyu Zhang, Lei Shu, Ning Sun e Qingwu Li. 2013. Un sondaggio sulla distribuzione algoritmi in reti di sensori acustici subacquei. *Int. J. Distrib. Sens. New.* 9, 12 (2013), 314049.
- [44] John Heidemann, Milica Stojanovic e Michele Zorzi. 2012. Reti di sensori subacquei: applicazione zioni, progressi e sfide. *Philos. Trans. Roy. Soc. A* 370, 1958 (2012), 158–175.
- [45] John Heidemann, Wei Ye, Jack Wills, Affan Syed e Yuan Li. 2006. Sfide della ricerca e applicazioni cationi per il collegamento in rete di sensori subacquei. In *Proceedings of IEEE Wireless Communications e Networking Conference 2006 (WCNC 2'06)* , Vol. 1. IEEE, 228-235.
- [46] Feng Hong, Bozhen Yang, Yuliang Zhang, Ming Xu, Yuan Feng e Zhongwen Guo. 2014. Time sincronizzazione per reti di sensori subacquei basate sulla fusione di beacon multi-sorgente. In *Procedimento della 20a conferenza internazionale IEEE sui sistemi paralleli e distribuiti (ICPADS) del 2014* . IEEE, 218–224.
- [47] Feng Hong, Yu-liang Zhang, Bo-zhen Yang, Ying Guo e uo. 2013. Revisione sulla sincronizzazione dell'ora tecniche in reti di sensori acustici subacquei [J]. *Acta Electron. Sinica* 5 (2013), 020.
- [48] Lu Hong, Feng Hong, Bozhen Yang e Zhongwen Guo. 2013. ROSS: pianificazione del sonno orientata al ricevitore per reti di sensori subacquei. In *Atti dell'ottava conferenza internazionale ACM su Reti e sistemi sottomarini* . ACM, 4.
- [49] Jens Horneber e Anton Hergenröder. 2014. Un'indagine su banchi di prova e ambienti di sperimentazione per reti di sensori wireless. *IEEE Commun. Surv. Tutor* 16, 4 (2014), 1820-1838.
- [50] Tiansi Hu e Yunsu Fei. 2010. QELAR: un protocollo di routing adattivo basato sull'apprendimento automatico per reti di sensori subacquei efficienti dal punto di vista energetico e di durata estesa *IEEE Trans. Mobile Comput.* 9, 6 (2010), 796–809.
- [51] Shae Hurst, Xinyu Xie, Shwan Ashrafi, Sumit Roy e Payman Arabshahi. 2014. Puget sound under-rete idrica TestBed. A *Oceans-St. John's, 2014* . IEEE, 1–5.
- [52] Muhammad Imran, Abas Md Said e Halabi Hasbullah. 2010. Una rassegna di simulatori, emulatori e banchi di prova per reti di sensori wireless. In *Atti del Simposio Internazionale 2010 in Tecnologia dell'informazione (ITSim)* , vol. 2. IEEE, 897–902.
- [53] Jules Jaffe e Curt Schurgers. 2006. Reti di sensori di navigazione subacquea autonoma e libera esploratori. In *Proceedings of the 1st ACM International Workshop on Underwater Networks* . ACM, 93–96.
- [54] Emma Jones. 2007. L'applicazione di tecniche radio software alla comunicazione acustica subacquea zioni. In *OCEANS 2007-Europe* . IEEE, 1–6.
- [55] Hovannes Kulhandjian, L. Kuo, Tommaso Melodia, Dimitris A. Pados, Dale Green e Teledyne Benthos. 2012. Verso la valutazione sperimentale di sistemi in rete sottomarini definiti da software. *Proc. IEEE UComms* (2012), 1–9.
- [56] Son N. Le, Zheng Peng, Jun-Hong Cui, Hao Zhou e Janny Liao. 2013. Sealinx: una multiistanza architettura dello stack di protocollo per reti subacquee. In *Atti dell'8 ° ACM International Conferenza su reti e sistemi sottomarini* . ACM, 46.
- [57] LinkQuest 2016. LinkQuestUnderwater Acoustic Modem. Estratto da [www.link-quest.com](http://www.link-quest.com).
- [58] Lanbo Liu, Shengli Zhou e Jun-Hong Cui. 2008. Prospettive e problemi della comunicazione wireless per reti di sensori subacquei. *Wireless Commun. Mobile Comput.* 8, 8 (2008), 977–994.
- [59] Hanjiang Luo, Yuejiao Gong, Lionel Ni e altri. 2016. Localizzazione per il galleggiamento limitato alla deriva reti di sensori oceanici. *IEEE Trans. Veicoli. Technol.* 65, 12 (2016), 9968–9981.
- [60] Hanjiang Luo, Zhongwen Guo, Wei Dong, Feng Hong e Yiyang Zhao. 2010. LDB: localizzazione con fari direzionali per reti di sensori acustici subacquei 3D sparsi. *J. Netw.* 5, 1 (2010), 28–38.
- [61] Hanjiang Luo, Zhongwen Guo, Kaishun Wu, Feng Hong e Yuan Feng. 2009. Energia equilibrata strategie per massimizzare la durata di reti di sensori acustici subacquei poco dispiegati. *Sensori* 9, 9 (2009), 6626–6651.
- [62] Hanjiang Luo, Kaishun Wu, Zhongwen Guo, Lin Gu e Lionel M Ni. 2012. Rilevamento della nave con reti di sensori wireless. *IEEE Trans. Parallel Distrib. Syst.* 23, 7 (2012), 1336–1343.
- [63] Hanjiang Luo, Kaishun Wu, Zhongwen Guo, Lin Gu, Zhong Yang e Lionel M Ni. 2011. Sid: nave rilevamento delle intrusioni con reti di sensori wireless. In *Atti del 2011 31 ° Internazionale Conferenza sui sistemi di calcolo distribuito (ICDCS)* . IEEE, 879-888.
- [64] Hanjiang Luo, Kaishun Wu, Jiang Xiao e Zhongwen Guo. 2014. LDSN: Schema di localizzazione per reti di sensori marittimi a doppia testa. In *Atti della 20a Conferenza Internazionale IEEE su Sistemi paralleli e distribuiti (ICPADS)* . IEEE, 233-240.

ACM Computing Surveys, vol. 50, n. 2, articolo 28, Data di pubblicazione: maggio 2017.



- [65] Hanjiang Luo, Yiyang Zhao, Zhongwen Guo, Siyuan Liu, Pengpeng Chen e LM Ni. 2008. UDB: Utilizzo di beacon direzionali per la localizzazione in reti di sensori subacquei. In *Atti del 14 IEEE International Conference on Parallel and Distributed Systems, 2008 (ICPADS'08)*. 551–558.
- [66] Robert Martin, Yibo Zhu, Lina Pu, Fei Dou, Zheng Peng, Jun-Hong Cui e Sanguthevar Rajasekaran. 2015. Aqua-sim next generation: un simulatore basato su NS-3 per rete di sensori sottomarini. In *Proceedings of the 10th International Conference on Underwater Networks & Systems*. ACM, 18.
- [67] Ricardo Martins, Joao Borges de Sousa, Renato Caldas, Chiara Petrioli e John Potter. 2014. SUN-Progetto RISE: banco di prova dell'università di Porto. In *Underwater Communications and Networking (UComms), 2014*. IEEE, 1–5.
- [68] Riccardo Masiero, Saiful Azad, Federico Favaro, Matteo Petrani, Giovanni Toso, Federico Guerra, Paolo Casari e Michele Zorzi. 2012. DESERT underwater: un framework basato su miracoli NS per DSign, simulare, emulare e realizzare banchi di prova per protocolli di rete sottomarina. In *OCEANS 2012*. IEEE, 1–10.
- [69] Ciarán Mc Goldrick, Mark Matney, Enrique Segura, Youngtae Noh e Mario Gerla. 2015. WaterCom: Una piattaforma di test di comunicazioni subacquee multilivello e multiuso. In *WUWNET'15*.
- [70] Bartosz Musznicki e Piotr Zwierzykowski. 2012. Rilievo di simulatori per reti di sensori wireless. *Int. J. Grid Distrib. Comput.* 5, 3 (2012), 23–50.
- [71] Youngtae Noh, Dustin Torres e Mario Gerla. 2015. Rete acustica subacquea definita da software-piattaforma e le sue applicazioni. *Rete ad hoc* (2015).
- [72] Nusrat Newsheen, Craig Benson e Michael Frater. 2010. Una velocità di trasmissione dati elevata, definita dal software modem acustico ad acqua. In *OCEANS 2010*. IEEE, 1–5.
- [73] Ns-2. 2016. Ns-2. Estratto da <http://www.isi.edu/nsnam/ns>.
- [74] Ns-3. 2016. Ns-3. Estratto da <http://www.nsnam.org>.
- [75] Ns2-Miracle. 2016. NS-MiracleThe Network Simulator: NS-Miracle. Estratto da <http://dgt.dei.unipd.it/download>.
- [76] OMNet 2016. Sito della comunità OMNetOMNeT ++. Estratto da <http://www.omnetpp.org>.
- [77] OPNET 2014. OPNET OPNET Technologies. Estratto da <http://www.opnet.com>.
- [78] Jim Partan, Jim Kurose e Brian Neil Levine. 2006. Una rassegna di questioni pratiche in subacquea reti. In *Atti di ACM WUWNet'06*. 17–24.
- [79] Zheng Peng, Jun-Hong Cui, Bing Wang, Keenan Ball e Lee Freitag. 2007. Una rete sottomarina banco di prova: progettazione, implementazione e misurazione. In *Atti del 2° Workshop su Underwater Networks*. ACM, 65–72.
- [80] Zheng Peng, Son Le, Michael Zuba, Haining Mo, Hao Zhou, Jun-Hong Cui, Shengli Zhou, Zaihan Jiang e Jeffrey A Schindall. 2013. Esperienza di test sul campo di una rete wireless subacquea in oceano Atlantico. In *Proceedings of the 2013 MTS / IEEE OCEANS*. IEEE, 1–10.
- [81] Zheng Peng, Son Le, Michael Zuba, Haining Mo, Yibo Zhu, Lina Pu, Jun Liu e Jun-Hong Cui. 2011. Aqua-TUNE: un banco di prova per reti subacquee. In *Proceedings of the IEEE OCEANS, 2011*. IEEE, 1–9.
- [82] Zheng Peng, Li Wei, Zigeng Wang, Lei Want, Michael Zuba, Jun-Hong Cui, Shengli Zhou, Zhijie Shi, e James O'Donnell. 2014. Ocean-TUNE UCONN testbed: un incubatore tecnologico per la subacquea comunicazione e networking. In *Underwater Communications and Networking (UComms), 2014*. IEEE, 1–4.
- [83] Zheng Peng, Zhong Zhou, Jun-Hong Cui e Zhijie Jerry Shi. 2009. Aqua-Net: un sensore subacqueo architettura di rete sor: progettazione, implementazione e test iniziale. In *MTS / IEEE Biloxi-Marine Tecnologia per il nostro futuro: sfide globali e locali (OCEANS 2009)*. IEEE, 1–8.
- [84] Chiara Petrioli e Roberto Petrocchia. 2012. SUNSET: simulazione, emulazione e test di vita reale di reti di sensori wireless subacquee. *Atti di IEEE UComms 2012* (2012), 12–14.
- [85] Chiara Petrioli, Roberto Petrocchia, John R. Potter e Daniele Spaccini. 2015. Il telaio SUNSET-lavorare per la simulazione, l'emulazione e il test in mare di reti di sensori wireless sottomarini. *Ad hoc Netw.* 34 (2015), 224–238.
- [86] Chiara Petrioli, Roberto Petrocchia e Daniele Spaccini. 2013. SUNSET versione 2.0: Frame migliorato lavorare per la simulazione, l'emulazione e il test di vita reale di reti di sensori wireless sottomarini. In *Procedimenti dell'8a Conferenza Internazionale ACM sulle reti e sui sistemi subacquei*. ACM, 43 anni.
- [87] Chiara Petrioli, Roberto Petrocchia, Daniele Spaccini, A. Vitaletti, Tommaso Arzilli, Davide Lamanna, Alessandro Galizia ed Enrico Renzi. 2014. The SUNRISE GATE: Accesso alla federazione SUNRISE di strutture per testare soluzioni per l'internet delle cose sottomarine. Nelle *comunicazioni subacquee e Networking (UComms), 2014*. IEEE, 1–4.



- [88] Roberto Petroccia e Daniele Spaccini. 2013a. Un guidatore sul sedile posteriore per il controllo remoto degli esperimenti in reti di sensori acustici subacquei. In *Proceedings of the 2013 MTS / IEEE OCEANS*. IEEE, 1–9.
- [89] Roberto Petroccia e Daniele Spaccini. 2013b. Confronto tra i framework SUNSET e DESERT per esperimenti sul campo in reti acustiche subacquee. In *Atti del 2013 MTS / IEEE OCEANS*. IEEE, 1–10.
- [90] José Pinto, Paulo S. Dias, Ricardo Martins, Joao Fortuna, Eduardo Marques e Joao Sousa. 2013. La toolchain LSTS per i sistemi di veicoli in rete. In *Proceedings of the 2013 MTS / IEEE OCEANS*. IEEE, 1–9.
- [91] Dario Pompili e Ian F. Akyildiz. 2008. Una soluzione di comunicazione cross-layer per applicazioni multimediali in reti di sensori acustici subacquei. In *Atti della 5a Conferenza Internazionale IEEE su sistemi mobili ad hoc e sensori (MASS'08)*. IEEE, 275–284.
- [92] Dario Pompili e Ian F. Akyildiz. 2009. Panoramica dei protocolli di rete per il wireless subacqueo comunicazioni. *IEEE Commun. Mag.* 47, 1 (2009), 97–102.
- [93] Dario Pompili e Ian F. Akyildiz. 2010. Un protocollo multistrato multimediale per l'acustica subacquea reti di sensori. *IEEE Trans. Wireless Commun.* 9, 9 (2010), 2924–2933.
- [94] Michael B. Porter. 2011. Manuale del fattorino e guida per l'utente: bozza preliminare. Calore, luce e Sound Research, Inc., La Jolla, CA, USA, Tech. Rep (2011).
- [95] John Potter, Joao Alves, Thomas Furfaro, Arjan Vermeij, Nicolas Jourden, Giovanni Zappa, Alessandro Berni e Diego Merani. 2014. Sviluppo di modem ad architettura aperta definita da software presso CMRE. Nel *Underwater Communications and Networking (UComms), 2014*. IEEE, 1–4.
- [96] Parastoo Qarabaqi e Milica Stojanovic. 2013. Caratterizzazione statistica ed efficacia computazionale modellazione ciente di una classe di canali di comunicazione acustica sottomarini. *IEEE J. Ocean. Eng.* 38, 4 (2013), 701–717.
- [97] REMUS 2016. REMUS AUV Woods Hole Oceanographic Institution. Estratto da <http://www.whoi.edu/osl/remus-auv>.
- [98] Joseph Rice, Bob Creber, Chris Fletcher, Paul Baxley, Ken Rogers, Keyko McDonald, Dave Rees, Michael Wolf, Steve Merriam, Rami Mehio, et al. 2000. Evoluzione dell'acustica subacquea della ragnatela networking. In *Oceans 2000 MTS / IEEE Conference and Exhibition*, Vol. 3. IEEE, 2007–2017.
- [99] Joe Rice e Dale Green. 2008. Comunicazioni e reti acustiche subacquee per la marina americana programma seaweb. In *Atti della seconda conferenza internazionale sulle tecnologie dei sensori e Applicazioni (SENSORCOMM'08)*. IEEE, 715–722.
- [100] PH Rogers. 1981. *Previsione a bordo della perdita di propagazione in acque poco profonde*. Rapporto tecnico. DTIC Documento.
- [101] Daniel L. Rudnick, Russ E. Davis, Charles C. Eriksen, David M. Fratantoni e Mary Jane Perry. 2004. Alianti subacquei per la ricerca oceanica. *Mar. Technol. Soc. J.* 38, 2 (2004), 73–84.
- [102] Sumi A. Samad, SK Shenoy, G. Santhosh Kumar e PRS Pillai. 2011. Un'indagine di modellazione e strumenti di simulazione per reti di sensori acustici subacquei. *Int. J. Res. Rev. Comput. Sci.* 2 (2011), 40–47.
- [103] J. Senne, A. Song, M. Badiy e KB Smith. 2012. Modellazione di equazioni paraboliche di alta frequenza trasmissione acustica con una superficie del mare in evoluzione. *J. Acoust. Soc. Am.* 132, 3 (2012), 1311–1318.
- [104] Ethem Mutlu Sözer e Milica Stojanovic. 2006. Modem acustico riconfigurabile per subacqueo reti di sensori. In *Proceedings of the 1st ACM International Workshop on Underwater Networks*. ACM, 101–104.
- [105] Milica Stojanovic e James Preisig. 2009. Canali di comunicazione acustica subacquea: Propagazione modelli e caratterizzazione statistica. *IEEE Commun. Mag.* 47, 1 (2009), 84–89.
- [106] Roger P. Stokey, Alexander Roup, Chris von Alt, Ben Allen, Ned Forrester, Tom Austin, Rob Goldsborough, Mike Purcell, Fred Jaffre, Greg Packard e altri. 2005. Sviluppo di REMUS 600 veicolo subacqueo autonomo. In *Atti di MTS / IEEE (OCEANS'05)*. 1301–1304.
- [107] Yifan Sun e Tommaso Melodia. 2013. Internet sott'acqua: uno stack di protocolli compatibile con IP per modem sottomarini commerciali. In *Proceedings of the 8th ACM International Conference on Underwater Reti e sistemi*. ACM, 37.
- [108] Hwee-Pink Tan, Roe Diamant, Winston KG Seah e Marc Waldmeyer. 2011. Un sondaggio sulla tecnologia niques e sfide nella localizzazione subacquea. *Ocean Eng.* 38, 14 (2011), 1663–1676.
- [109] Teledyne 2016. Modem Teledyne-BenthosAcoustic. Estratto da <https://teledynebenthos.com>.
- [110] Dustin Torres, Jonathan Friedman, Thomas Schmid e Mani B. Srivastava. 2009. Software-defined piattaforma di rete acustica subacquea. In *Atti del 4 ° Workshop Internazionale ACM su UnderWater Networks*. ACM, 7.

28:44

H. Luo et al.

- [111] Giovanni Toso, Ivano Calabrese, Paolo Casari e Michele Zorzi. 2014. RECORDS: un telecomando framework per reti sottomarine. Negli *Atti della 13a edizione 2014 ad hoc del Mediterraneo Workshop sul networking (MED-HOC-NET)*. IEEE, 111–118.
- [112] Tritech 2016. TritechMicon Data Modem. Estratto da <http://www.tritech.co.uk>.
- [113] USRP 2016. Brochure USRP. Estratto da <http://www.ettus.com>.
- [114] Iuliu Vasilescu, Keith Kotay, Daniela Rus, Matthew Dunbabin e Peter Corke. 2005. Raccolta dati, archiviazione e recupero con una rete di sensori sottomarini. In *Atti della 3a Internazionale Conferenza sui sistemi di sensori in rete integrati*. ACM, 154–165.
- [115] Mehmet Vuran e Ian F. Akyildiz. 2008. Ottimizzazione delle dimensioni dei pacchetti cross-layer per wireless terrestre, reti di sensori sottomarini e sotterranei. In *Atti della 27a Conferenza IEEE su Computer Communications (INFOCOM 2008)*. IEEE.
- [116] Lei Wan, Hao Zhou, Xiaoka Xu, Yi Huang, Shengli Zhou, Zhijie Shi e Jun-Hong Cui. 2013. Field prove di modulazione adattativa e codifica per OFDM acustico subacqueo. In *Atti dell'8 ACM International Conference on Underwater Networks and Systems*. ACM, 35.
- [117] Yu Wang, Yingjian Liu e Zhongwen Guo. 2012. Reti di sensori oceanici tridimensionali: un'indagine. *J. Ocean Univ. Mento*. 11, 4 (2012), 436–450.
- [118] WHOI 2016. WHOI Woods Hole Oceanographic Institution. Estratto da <http://acomms.whoi.edu/micro-modem>.
- [119] Lingjuan Wu, Jennifer Trezzo, Diba Mirza, Paul Roberts, Jules Jaffe, Yangyuan Wang e Ryan Kastner. 2012. Progettazione di un modem acustico adattivo per reti di sensori sottomarini. *IEEE Embed. Syst. Lett.* 4, 1 (2012), 1–4.
- [120] Geoffrey Xie, John Gibson e Leopoldo Diaz-Gonzalez. 2006. Incorporazione di elementi acustici realistici modelli di agazione nella simulazione di reti acustiche sottomarine: un approccio statistico. In *OCEANS 2006*. IEEE, 1–9.
- [121] Peng Xie, Zhong Zhou, Zheng Peng, Hai Yan, Tiansi Hu, Jun-Hong Cui, Zhijie Shi, Yunsu Fei, e Shengli Zhou. 2009. Aqua-Sim: un simulatore basato su NS-2 per reti di sensori sottomarini. Nel *MTS / IEEE Biloxi-Marine Technology for Our Future: Global and Local Challenges (OCEANS 2009)*. IEEE, 1–7.
- [122] Guo Zhong-Wen, Luo Han-Jiang, Hong Feng, Yang Meng e Ni Ming-Xuan. 2010. Progressi attuali e problemi di ricerca nelle reti di sensori subacquei. *J. Comput. Res. Dev.* 47, 3 (2010), 377–389.
- [123] Shengli Zhou, Baosheng Li, Peter Willett, Milica Stojanovic e Lee Freitag. 2010. Apparato, sistemi e metodi per comunicazioni acustiche subacquee avanzate basate su più portanti. Brevetto n. 7,859,944.
- [124] Yibo Zhu, Son Le, Lina Pu, Xiaoyan Lu, Zheng Peng, Jun-Hong Cui e Michael Zuba. 2013a. Aqua-net mate: un simulatore di modem / canale virtuale in tempo reale per aqua-net. In *OCEANS-Bergen, 2013 MTS / IEEE*. IEEE, 1–6.
- [125] Yibo Zhu, Xiaoyan Lu, Lina Pu, Yishan Su, Robert Martin, Micheal Zuba, Zheng Peng e Jun-Hong Cui. 2013b. Aqua-Sim: un simulatore basato su NS-2 per reti di sensori sottomarini. In *Atti dell'ottava conferenza internazionale ACM sulle reti e i sistemi subacquei*. ACM.
- [126] Yibo Zhu, Lina Pu, Zigeng Wang, Xiaoyan Lu, Rashad Martin, Yu Luo, Zheng Peng e Jun-Hong Cui. 2014. Stack di protocollo di rete acustica subacquea: basato su simulatore vs basato su sistema operativo. A *Oceans-St. John's, 2014*. IEEE, 1–7.
- [127] Michael Zuba, Zaihan Jiang, TC Yang, Yishan Su e J. Cui. 2013. Un framework di canali avanzato per migliori simulazioni di reti acustiche subacquee. In *Atti di IEEE / MTS OCEANS San Diego*.
- [128] Michael Zuba, Aijun Song e Jun-Hong Cui. 2014. Esplorazione di modelli di equazioni paraboliche per miglioramenti simulazioni di reti subacquee. In *Underwater Communications and Networking (UComms), 2014*. IEEE, 1–5.

Ricevuto giugno 2016; rivisto gennaio 2017; accettato gennaio 2017