SMART-PUFFIN: una metodologia a basso costo per il posizionamento di sorgenti sonore in ambiente subacqueo

Silvio Del Pizzo [1,4], Antonio Angrisano [2], Salvatore Gaglione [1,3], Bianca Naspi [1], Gabriele Portelli[3], Antonio Schiano Lo Moriello [4], Salvatore Troisi[1,3]

[1] Dipartimento di Scienze e Tecnologie, Università degli Studi di Napoli "Parthenope", Italia – <silvio.delpizzo, salvatore.gaglione,salvatore.troisi>@uniparthenope.it; bianca.naspi001@studenti.uniparthenope.it;
[2] Dipartimento di Ingegneria, Università degli Studi di Messina, Italia – antonio.angrisano@unime.it
[3] Dottorato di Ricerca Internazionale / Cattedra UNESCO in "Ambiente, Risorse e Sviluppo Sostenibile", Università degli Studi di Napoli "Parthenope", Italia – gabriele.portelli@phds.uniparthenope.it
[4] Dottorato di Ricerca Internazionale in "Information and Communication Technology and Engineering", Università degli Studi di Napoli "Parthenope", Italia – antonio.schianolomoriello@phds.uniparthenope.it

Abstract. Il contributo presenta i primi risultati del progetto SMART-PUFFIN sulla localizzazione di sorgenti acustiche subacquee mediante misure TDOA acquisite da una rete di idrofoni sincronizzati. La metodologia integra la stima dei ritardi di arrivo, l'analisi della geometria dei sensori tramite DOP e il pretrattamento dei segnali. Le prime prove su dati reali confermano la fattibilità dell'approccio con sensoristica low-cost e il ruolo della geometria nell'accuratezza del posizionamento.

Parole chiave: Posizionamento subacqueo, TDOA, Monitoraggio acustico.

1 Introduzione

Il monitoraggio degli ecosistemi marini è essenziale per la tutela della biodiversità e la gestione sostenibile delle risorse, soprattutto nelle Aree Marine Protette (AMP), dove occorre sorvegliare le attività antropiche [1]. I rilievi visivi, fotografici e subacquei forniscono informazioni dettagliate, ma la loro discontinuità limita l'osservazione di eventi occasionali. Tra questi rientrano il transito di mammiferi marini e la pesca illegale del dattero di mare (*Lithophaga lithophaga*), la cui raccolta comporta la distruzione del substrato roccioso, con gravi conseguenze per gli habitat e le comunità bentoniche [2]. Il monitoraggio acustico passivo consente di rilevare tali eventi attraverso i suoni che generano. Tuttavia, riconoscere la presenza di una sorgente non equivale a determinarne la posizione: quest'ultima richiede acquisizioni distribuite e specifiche procedure di elaborazione. Inoltre, i costi della strumentazione possono limitare l'estensione delle reti di osservazione, rendendo necessario lo sviluppo di soluzioni a basso costo [3].

In questo contesto si colloca il progetto SMART-PUFFIN (*Smart Positioning Underwater System for Environmental Field using Artificial Intelligence*), finalizzato a integrare idrofoni, ricevitori GNSS e algoritmi di analisi dei segnali per identificare e localizzare sorgenti sonore subacquee, sia cooperative che non cooperative. L'architettura originaria prevede boe equipaggiate con sistemi di acquisizione sincronizzati tramite riferimenti temporali GNSS e geolocalizzate mediante il *Precise Point Positioning* (PPP) [4]. La metodologia di posizionamento della sorgente si basa sulle differenze di tempo di arrivo TDOA (*Time Difference of Arrival*) di un medesimo segnale rilevato da diversi idrofoni. Note le coordinate dei sensori acustici e la velocità di propagazione del suono, i ritardi temporali consentono di determinare differenze di distanza e di stimare la posizione della sorgente [5]. L'approccio non richiede di conoscere l'istante di emissione, ma richiede acquisizioni temporalmente coerenti e una conoscenza adeguata della geometria di misura. L'impiego di componenti *low-cost* richiede attenzione alla stabilità della sincronizzazione, al campionamento e alla qualità delle registrazioni. Un ruolo centrale è attribuito alla geometria della rete, analizzata mediante la *Dilution of Precision* (DOP). Questo indicatore descrive come la disposizione relativa di sensori e sorgente condizioni la propagazione delle incertezze di misura nella soluzione di posizionamento [6]. Dopo le simulazioni numeriche, è stata condotta una prima validazione a Marina di Puolo mediante tre stazioni fisse di acquisizione sincronizzate. Le prove hanno fornito indicazioni preliminari sull'applicabilità del metodo a dati reali.

2 La metodologia

Il progetto SMART-PUFFIN è finalizzato alla realizzazione di un sistema di monitoraggio acustico basato su una rete di idrofoni. Nell'architettura prevista, ciascun nodo associa alle registrazioni acustiche informazioni spaziali e temporali, necessarie per confrontare i segnali acquisiti in punti diversi e ricostruire la posizione della sorgente [4]. La Figura 1 illustra schematicamente l'architettura del sistema proposto, evidenziando la disposizione dei sensori, l'integrazione delle informazioni GNSS e acustiche e il trasferimento dei dati al centro di elaborazione. Tutta la strumentazione impiegata durante la sperimentazione è costituita da dispositivi a *low-cost*, individuati con l'obiettivo di sviluppare un sistema di acquisizione facilmente replicabile.

Per affrontare separatamente le principali criticità, l'attività è stata articolata in tre sottoattività complementari: il posizionamento dei nodi mediante Precise Point Positioning (PPP), il riconoscimento dei suoni attraverso Intelligenza Artificiale (AI) e il posizionamento delle sorgenti mediante *Time Difference of Arrival* (TDOA). Questa organizzazione ha consentito di sviluppare e verificare le singole componenti prima della loro progressiva integrazione, distinguendo tra le problematiche di posizionamento satellitare, di interpretazione del segnale e di determinazione delle coordinate subacquee. La componente AI riguarda la classificazione degli eventi acustici e il riconoscimento delle tipologie di sorgenti presenti nelle registrazioni. Tale attività, sviluppata dall'Università di Salerno, è approfondita nel lavoro di Nappi, Narducci e Simone [7]. L'analisi degli algoritmi di classificazione e delle relative

prestazioni non rientra nel presente contributo, che si concentra sulle componenti di posizionamento PPP e TDOA.

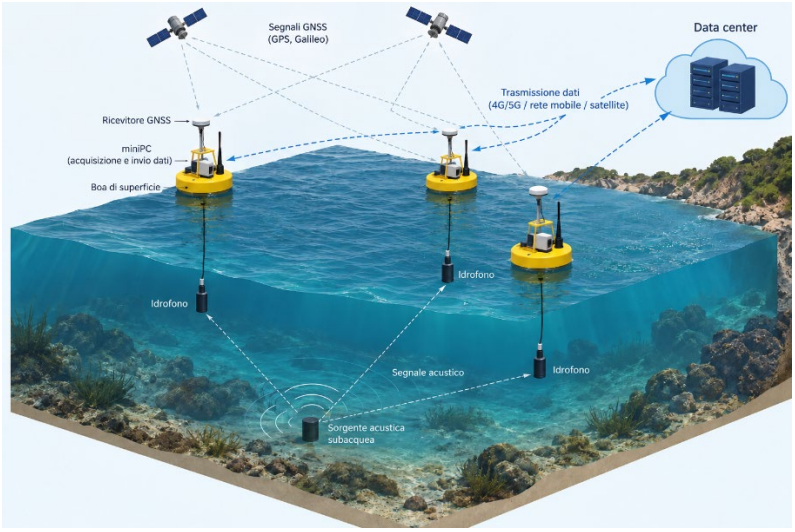

Fig. 1. Schema del sistema SMART-PUFFIN: tre boe equipaggiate con GNSS, miniPC e idrofoni sincronizzati che acquisiscono segnali acustici, che saranno successivamente elaborati mediante TDOA per stimare la posizione della sorgente subacquea.

2.1 Il PPP

La prima problematica affrontata riguarda la determinazione della posizione dei rilevatori acustici. Di conseguenza, la posizione di un generico ricevitore/mobile può essere determinata mediante una delle tecniche di posizionamento satellitare. Nella configurazione con piattaforme galleggianti, tali coordinate non possono essere considerate costanti, poiché il movimento delle boe ne modifica la posizione. Il PPP è stato quindi individuato come soluzione per il posizionamento delle piattaforme che ospitano i sensori acustici, senza richiedere una stazione di riferimento locale [8]. Il PPP risulta essere la tecnica più complessa dal punto di vista implementativo, ma consente di raggiungere accuratezze nell'ordine del centimetro sfruttando le misure di pseudorange e di fase. In passato, il PPP è stato impiegato utilizzando prodotti precisi forniti dall'International GNSS Service (IGS), rilasciati con una latenza di circa 14 giorni, il che costituiva uno dei punti deboli della tecnica. Negli ultimi decenni, la crescente esigenza di ottenere soluzioni di posizionamento sempre più accurate in tempo reale ha favorito lo sviluppo di servizi di correzione satellitare, come ad esempio: IGS RTS, Galileo HAS (High Accuracy Service), consentendo di migliorare le prestazioni delle tecniche di posizionamento e di raggiungere, in condizioni operative favorevoli, accuratezze dell'ordine dei centimetri o dei decimetri.

Per il conseguimento degli obiettivi del progetto, è stato sviluppato in ambiente MATLAB un *engine* di posizionamento PPP, progettato per elaborare sia le correzioni satellitari fornite in tempo reale dal servizio Galileo HAS, sia i prodotti precisi dell'IGS, utilizzati per le elaborazioni in post-processing. Questa duplice capacità consente di

valutare le prestazioni del sistema in scenari operativi diversi e di confrontare l'accuratezza delle soluzioni di posizionamento ottenute. Il PPP *engine* è stato sviluppato considerando il modello *Uncombined Undifferenced*, il quale risulta essere il più efficiente. Inoltre, il grande punto di forza di tale modello è che consente di effettuare il processamento delle misure senza ricorrere alla loro combinazione, poiché quest'ultima aumenta la rumorosità delle nuove osservabili. Pertanto le equazioni delle misure sono le seguenti:

$$\begin{aligned} \Delta\rho^s_{r,j} &= \rho^s_{0_r} + cdt^s_r + m^s_{wet}ZWD + \mu_j I^s_r + \epsilon^s_{r,j} \\ \lambda_j\Delta\varphi^s_{r,j} &= \rho^s_0 + cdt^s_r - m^s_{wet}ZWD - \mu_j I^s_r + \lambda_j N^s_j + \varepsilon^s_{r,j} \end{aligned} \quad (1)$$

Nelle (1) i pedici r, j indicano la dipendenza dal ricevitore e frequenza mentre l'apice s definisce la dipendenza dal satellite. Inoltre, $\Delta\rho$ e $\Delta\varphi$ sono le misure corrette, ovvero le misure effettuate dal ricevitore alle quali vengono sottratti i modelli correttivi degli altri errori, come ad esempio *Zenith HydrostaticDelay*, *Shapiro*, *Solid Tides*. Al secondo membro delle equazioni vengono riportati i termini incogniti del modello: ρ_0 distanza geometrica tra ricevitore e satellite; dt indica l'*offset* dell'orologio del ricevitore; ZWD è il contributo nella direzione zenitale della parte umida della troposfera al ritardo troposferico; I identifica il ritardo ionosferico e N individua l'ambiguità di fase espressa in cicli. Infine, λ rappresenta la lunghezza d'onda espressa in metri; c è la velocità della luce nel vuoto; m_{wet} rappresenta il coefficiente che mappa lo ZWD dalla direzione zenitale alla linea di vista ricevitore-satellite; ϵ, ε rappresentano errori non modellati. L'*engine* sviluppato implementa il Kalman filter per la stima delle precedenti incognite, che restituisce la soluzione float, ovvero le ambiguità dei satelliti vengono stimate come valori reali e non interi.

2.2 Il TDOA (Time Difference of Arrival)

La seconda componente trattata nel presente lavoro riguarda la stima della posizione della sorgente a partire dai ritardi con cui un medesimo evento acustico raggiunge i diversi idrofoni. L'approccio TDOA elimina dall'equazione di misura l'istante di emissione, che può essere sconosciuto, e risulta pertanto adatto anche a sorgenti non cooperanti. Restano invece necessarie la coerenza temporale delle acquisizioni e la conoscenza delle coordinate dei sensori [5]. L'applicazione di tale tecnica richiede un elevato grado di precisione nella sincronizzazione temporale dei ricevitori, al fine di garantire misure accurate degli istanti di arrivo del segnale e, conseguentemente, consentire la determinazione delle coordinate della sorgente di emissione.

Nello specifico, il segnale emesso da una sorgente acustica si propaga nell'acqua e raggiunge i diversi idrofoni in istanti differenti, in funzione delle distanze sorgente-idrofono (ricevitore). La misura delle differenze temporali consente di ricavare le differenze di distanza tra la sorgente acustica e i ricevitori. In particolare, assumendo che la velocità del suono sia costante, la differenza di distanza (Δd_{ij}) tra la sorgente e due idrofoni (*i,j*) è espressa dalla relazione (2)

$$\Delta d_{ij} = v\Delta t_{ij} \quad (2)$$

dove v è la velocità di propagazione del suono in acqua di mare, determinata secondo la formulazione semplificata di Mackenzie [9] per acque di mare poco profonde, e Δt_{ij} è la differenza di tempo di ricezione tra due stazioni.
Nel caso applicativo considerato, relativo ai primi metri della colonna d'acqua di un bacino costiero la velocità del suono dipende solo dalla temperatura. Dal punto di vista geometrico, ciascuna misura indipendente di differenza temporale definisce, in condizioni di velocità del suono costante, un luogo di punti a differenza di distanza costante: un'iperbole nel caso bidimensionale e un iperboloide nel caso tridimensionale. L'intersezione dei luoghi geometrici associati a più coppie di ricevitori consente di stimare la posizione della sorgente acustica. L'accuratezza del metodo richiede un'accurata sincronizzazione temporale tra gli idrofoni, poiché eventuali disallineamenti degli orologi si riflettono direttamente sulle differenze temporali misurate. Inoltre, la relazione tra ritardo temporale e differenza di distanza è esatta soltanto nel caso delle ipotesi assunte.

3 Sperimentazione e acquisizione dati

Le metodologie SMART-PUFFIN sono state validate con approcci differenziati: il PPP mediante osservazioni GNSS statiche in ambiente controllato e il TDOA dapprima in simulazione, attraverso analisi DOP, e successivamente su dati reali acquisiti durante una campagna sperimentale.

3.1 Sperimentazione del modulo PPP

La validazione del modulo PPP è stata condotta mediante dataset GNSS statici, utilizzando osservazioni multi-costellazione e multi-frequenza. Le elaborazioni hanno consentito di verificare progressivamente l'implementazione sviluppata in MATLAB e di confrontare le soluzioni ottenute con diversi prodotti di correzione. In particolare, sono state considerate sia i prodotti precisi da utilizzare in post-processing sia le correzioni fornite dal servizio HAS, maggiormente orientate a future applicazioni in tempo reale. Il confronto tra le diverse soluzioni ha permesso di valutare le prestazioni dell'*engine* PPP sviluppato e di verificarne la coerenza. Le prove hanno inoltre consentito di affinare progressivamente la procedura di stima, basata su un'inizializzazione mediante minimi quadrati pesati e su un successivo filtro di Kalman.

3.2 Sperimentazione del posizionamento TDOA

La validazione della metodologia TDOA è stata articolata in due fasi. Nella prima, gli algoritmi di localizzazione sono stati analizzati mediante simulazioni numeriche, considerando diverse configurazioni della rete di sensori. Parallelamente, è stato sviluppato un modulo per l'analisi della *Dilution of Precision* (DOP), utilizzato per valutare l'influenza della geometria degli idrofoni sulla precisione teorica della soluzione e per individuare le configurazioni più favorevoli al posizionamento.

La seconda fase ha riguardato la verifica sperimentale su dati reali. La campagna di misura è stata condotta presso Marina di Puolo mediante l'installazione di tre stazioni fisse di acquisizione sincronizzate, il posizionamento è avvenuto con misure GNSS in modalità N-RTK. All'interno dell'area delimitata dai sensori è stata utilizzata una sorgente acustica controllata, costituita da uno *shaker* subacqueo, mentre la posizione della sorgente è stata rilevata mediante GNSS in modalità N-RTK, così da disporre di un riferimento indipendente per la successiva valutazione del posizionamento TDOA. Le misure effettuate sono state condotte attraverso l'utilizzo di un sistema di acquisizione costituito da un idrofono ASF-1 MKII (Ambient), collegato a un registratore Zoom H5, utilizzato in questa configurazione come interfaccia audio. La sincronizzazione temporale dei segnali audio è stata garantita dall'utilizzo del segnale PPS (*Pulse-Per-Second*) fornito dal ricevitore GNSS u-blox C099 F9P.

4 Risultati

Al fine di validare l'*engine*-PPP sviluppato, si è deciso di elaborare i dati della stazione fissa ALIC00AUS, appartenente alla rete delle stazioni di controllo IGS, utilizzando sia i prodotti finali e precisi forniti dal centro di controllo IGS CODE sia il servizio real-time Galileo HAS. La decisione di processare i dati di una stazione di riferimento IGS è supportata dal fatto che tali stazioni operano in contesti e scenari tanto più simili alle operazioni in mare, dove gli effetti di *multipath* sono minimi o mitigabili. Gli errori sulle componenti ENU (*East-North-Up*), sono stati calcolati considerando come riferimento vero le coordinate della stazione riportate nel prodotto finale SINEX.

Tabella 1. Table captions should be placed above the tables.

Tipo di Prodotto	Media E [cm]	Media N [cm]	Media U [cm]	RMS E [cm]	RMS N [cm]	RMS U [cm]
Finals – IGS	0.04	-0.51	-1.48	0.65	0.7	3.06
HAS	-1.15	-0.34	0.37	5.53	4.58	15.91

In figura 2 viene riportato il confronto dell'andamento degli errori nelle componenti ENU ottenuti a valle del processamento con i prodotti finali IGS ed il servizio real-time Galileo HAS. Analizzando i valori numerici, riportati in Tabella 1, in termini di errori medi ed RMS, calcolati escludendo solo la prima ora di elaborazione per eliminare gli effetti della convergenza del filtro, si mostra che la soluzione con i prodotti IGS è a un livello di accuratezza centimetrica, confermando le aspettative e validando l'engine. Invece, i valori numerici riportati per Galileo HAS, evidenziano che risulta possibile determinare una soluzione PPP in real-time con un'accuratezza a livello decimetrico in verticale.

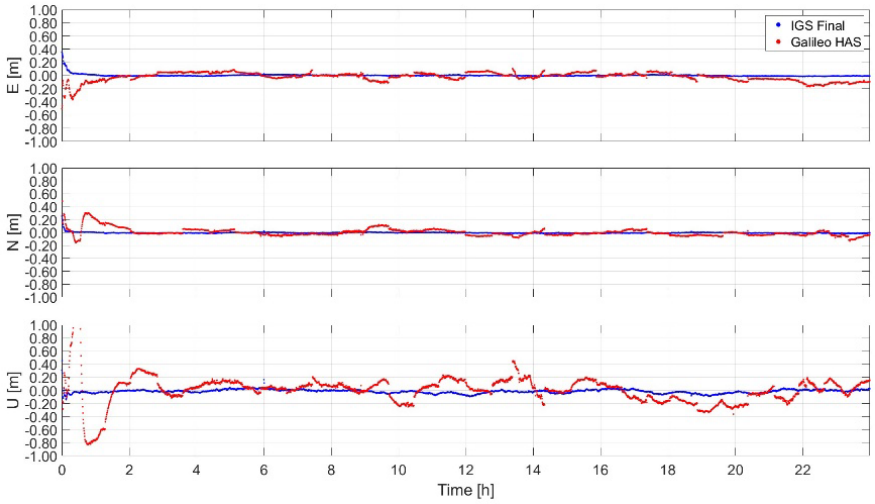

Fig.2. Confronto dell'andamento degli errori sulle componenti ENU tra le soluzioni ottenute con prodotti finali IGS e Galileo HAS

Per la componente TDOA, le prime verifiche sono state condotte in ambiente simulato. Particolare attenzione è stata dedicata alla geometria della rete di sensori attraverso lo sviluppo di un modulo per il calcolo della DOP. Le simulazioni hanno confermato che la configurazione spaziale degli idrofoni è un elemento determinante per la qualità della soluzione, consentendo di individuare in anticipo le geometrie più favorevoli e di supportare la pianificazione delle campagne sperimentali successive.

La successiva sperimentazione presso Marina di Puolo ha permesso di trasferire la metodologia dai dati simulati alle prime registrazioni acustiche reali. Le tre stazioni sincronizzate hanno consentito di acquisire lo stesso evento sonoro in punti diversi e di ricavare le corrispondenti differenze nei tempi di arrivo (Figura 3).

Contestualmente, la disponibilità delle coordinate N-RTK degli idrofoni e della posizione della sorgente acustica ha fornito il riferimento geometrico necessario per la verifica della procedura. I primi risultati hanno mostrato una differenza tra le misure GNSS-NRTK e quelle acustiche dell'ordine di 30 cm.



Fig.3. Campagna sperimentale a Marina di Puolo: generazione della sorgente Acustica (a sinistra) e disposizione delle tre stazioni di acquisizione (a destra)

5 Conclusioni

Il progetto SMART-PUFFIN ha consentito di sviluppare e validare le principali componenti di un sistema a basso costo per la localizzazione di sorgenti acustiche subacquee. Il modulo PPP ha mostrato risultati coerenti sia utilizzando prodotti precisi sia mediante correzioni Galileo HAS, confermando la possibilità di supportare la georeferenziazione dei nodi con strumentazione GNSS economica. er il posizionamento TDOA, le simulazioni e l'analisi DOP hanno evidenziato il ruolo determinante della geometria della rete di idrofoni, fornendo uno strumento utile per la pianificazione delle configurazioni sperimentali. La successiva campagna condotta a Marina di Puolo ha permesso di acquisire i primi dataset reali sincronizzati e di effettuare una prima validazione della catena di localizzazione in condizioni operative.I risultati ottenuti confermano quindi la fattibilità dell'approccio proposto e il potenziale dell'integrazione tra GNSS, acquisizione acustica e algoritmi TDOA. Ulteriori sviluppi saranno rivolti al miglioramento della sincronizzazione, alla caratterizzazione quantitativa dell'accuratezza e alla sperimentazione con configurazioni di sensori più estese e rappresentative delle condizioni operative reali.

Riferimenti bibliografici

1. Bianchi, C. N., et al. (2022). Biodiversity Monitoring in Mediterranean Marine Protected Areas: Scientific and Methodological Challenges. *Diversity*, 14(1), 43. DOI: 10.3390/d14010043.
2. Colletti, A., et al. (2020). The date mussel *Lithophaga lithophaga*: Biology, ecology and the multiple impacts of its illegal fishery. *Science of the Total Environment*, 744, 140866. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.140866.
3. De Marco, R., et al. (2023). The Development of a Low-Cost Hydrophone for Passive Acoustic Monitoring of Dolphin's Vocalizations. *Remote Sensing*, 15(7), 1946. DOI: 10.3390/rs15071946.
4. Del Pizzo, S., Angrisano, A., Narducci, F., Gioia, C., Simone, B., Troisi, S. (2024). Smart-Puffin Project Smart Positioning Underwater System for Environmental Field Using Artificial Intelligence. In *2024 IEEE International Workshop on Metrology for the Sea (MetroSea)*, pp. 564–569. DOI: 10.1109/MetroSea62823.2024.10765719.
5. Mensing, C., Plass, S. (2006). Positioning Algorithms for Cellular Networks Using TDOA. In *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, vol. 4, pp. 513–516. DOI: 10.1109/ICASSP.2006.1661018.
6. Zhang, F., Li, H., Ding, Y., Yang, S.-H., Yang, L. (2021). Dilution of precision for time difference of arrival with station deployment. *IET Signal Processing*, **15**(6), 353–364. DOI: 10.1049/sil2.12036
7. Nappi, M., Narducci, F., Simone, B. (2025). Underwater Sounds Classification for Effective Smart Marine Monitoring Systems. *IEEE Access*, **13**, 111237–111248. DOI: 10.1109/ACCESS.2025.3583359
8. Kouba, J., Héroux, P. (2001). Precise Point Positioning Using IGS Orbit and Clock Products. *GPS Solutions*, **5**(2), 12–28. DOI: 10.1007/PL00012883.
9. Mackenzie, K. V. (1981). Nine-term equation for sound speed in the oceans. Journal of the Acoustical Society of America, 70(3), 807–812. DOI: 10.1121/1.386920