

Utilizzazione dei cavi sottomarini nell'osservazione dei processi geofisici d'interesse per la difesa civile ed il controllo ambientale.

Premessa

L'utilizzazione di grandi infrastrutture per supporto ad attività tecnico-scientifiche è una procedura consolidata nel tempo: si pensi agli osservatori astronomici e, più di recente, astrofisici (radiotelescopi), alle stazioni spaziali¹, ma anche alle piattaforme ed ai natanti di superficie e profondità (ad esempio il batiscafo) di osservazione marina.

In alcuni settori le osservazioni disponibili sono ancora enormemente inadeguate rispetto alle esigenze conoscitive e/o applicative. Questo è il caso delle osservazioni marine soprattutto, ma non solo, per esigenze di **attività in tempo reale (monitoraggio a scopo decisionale/previsionistico)**. I limiti sono dettati dai costi, ma anche dall'impegno richiesto², oltre che da problematiche di riservatezza, sicurezza, cooperazione di più soggetti pubblici e privati.

In tempi recenti, la possibilità di **utilizzare infrastrutture (private o pubbliche, civili o militari) in maniera non invasiva** - non disturbando, cioè, le funzioni basilari (private o pubbliche) che giustificano l'investimento sull'infrastruttura – si è andata imponendo allo studio-analisi di operatori sia scientifici che tecnologici.

In generale, comunque, l'esigenza di **sfruttare** il più possibile **collettivamente** gli investimenti infrastrutturali (di importi spesso assai rilevanti) si va imponendo, se non altro per esigenze economiche: esempi paradigmatici sono continuamente proposti in molti contesti di ricerca e ricerca-sviluppo, ma anche di vita quotidiana (ospedali, mobilità, ecc.).

In questo quadro di sviluppo generale si colloca l'attività descritta in questa relazione.

Introduzione

Come descritto nella successiva Sezione 1, **l'insieme dei “segnali” osservabili** nel mare e nei suoi contorni (fondali, coste) è **molto vasto**: dalla scala centimetrica delle onde capillari (tensione superficiale) e dei *ripples* nei fondali sabbiosi, alle scale di centinaia di chilometri delle onde lunghe mareali, attraverso un continuo di processi dinamici (fluidodinamica, fluidodinamica geofisica, *loose boundary hydrodynamics*, ecc.) fortemente nonlineari, quindi “complessi”. Per trovare la giusta strada in tanta complicatezza e complessità è indispensabile definire nitidamente il target osservativo e non perderlo mai di vista onde non produrre sforzi dispersivi e, a volte, fuorvianti. L'analisi qui prospettata è stata motivata da intendimenti:

- di servizio nel quadro del rischio ambientale allo scopo di complementare ed ampliare le funzioni dei dispositivi osservativi convenzionali (boe GPS, mareografi e boe ondamiche, osservazioni dallo spazio, ecc.);

¹ Con i possibili problemi creati da **situazioni critiche di politica internazionale.** ²

Sia come **entità** che come **continuità**.

- di **utilizzazione-valorizzazione dei cavi sottomarini come grandi infrastrutture** che possono migliorare la copertura spazio-temporale e, eventualmente, le prestazioni di allarme (tempi di anticipazione, precisione nella localizzazione) rispetto a fenomeni potenzialmente catastrofici (terremoti, maremoti, tempeste di vento, ecc.).

Onde inquadrare adeguatamente tali motivazioni, è utile soffermarsi sul fatto che **gli attuali sistemi di servizio vanno migliorati (vedasi Appendice 2)**.

Il lavoro qui proposto è articolato come segue:

- nella Sezione 1 è delineata la natura della problematica osservativa in relazione alle caratteristiche dei processi da osservare, la capacità degli strumenti osservativi, gli obiettivi operativi preposti;
- nella Sezione 2 viene descritta l'operatività dei cavi sottomarini;
- nella Sezione 3 viene sintetizzata l'attività di valutazione e pianificazione nazionale.

1. I "segnali" da osservare

Come già accennato nell'introduzione, la gamma di moti dell'acqua marina e dei suoi contorni coerenti (terra solida), incoerenti ("loose boundaries" come fondali e coste sabbiose) ed aeriformi (atmosfera) è estremamente vasta e complessa (in vista dell'essenziale non linearità dei processi dinamici coinvolti). Alcune schematizzazioni "classiche" ancora dettano criteri "convenzionali" (mare profondo, *shallow waters*, ...), ma l'articolarsi delle finalità operative² e degli strumenti osservativi (remote sensing, droni, profilatori aerei, marini, ecc.) e modellistici (supercalcolo, ensemble models, ecc.) rende sempre più sfumati i contorni dei vari "settori": in un tempo (non lontanissimo) un oceanografo del mare profondo lavorava in un mondo tutto suo (alcune descrizioni di osservazioni marine nella corrente del Golfo e tramite batiscafi assurgono al ruolo di "letteratura" evocando scenari da romanzo di Hemingway). Attualmente la dimensione "esplorativo - avventurosa" è limitata e per ottenere risultati rilevanti bisogna:

- conoscere bene il **quadro complessivo** in cui l'attività intrapresa si deve collocare;
- avere chiara idea degli obiettivi perseguiti nella loro natura fenomenologico-osservativa;
- saper tracciare percorsi **ragionevoli** ("poniamoci problemi che possiamo risolvere") che permettano di conseguire i migliori risultati **conseguibili**.

Un obiettivo osservativo prioritario nel contesto della nostra attività conoscitiva è costituito dai moti marini coinvolti nei processi di tsunami: si tratta di dinamiche ben schematizzabili come inviscide (attrito interno ed esterno trascurabile), barotropiche (moto verticalmente coerente), influenzate dalla rotazione terrestre (effetti Coriolis). Le velocità di flusso dell'acqua sono modeste (nel corpo complessivo verticale dell'ordine del centimetro al secondo in orizzontale), ma le onde sono tendenzialmente non dispersive (velocità di fase = velocità di gruppo e le scale spazio-temporali sono grandi, molto maggiori della profondità del fluido): **queste condizioni di coerenza spazio-temporale possono garantire un'adeguata osservabilità attraverso lo stress integrale prodotto sui cavi sottomarini**.

Altri tipi di moto che potrebbero garantire un adeguato livello di osservabilità sono le mareggiate, le correnti verticali (usualmente associate a formazione di acque profonde), le onde interne.

² Nella meteorologia, ad esempio, le strutture aeroportuali sono molto evolute dall'assistenza al volo all'assistenza al turismo.

L'osservabilità dei processi considerati, tuttavia, non può essere completamente determinata in sede di analisi dinamica (fenomenologica e/o modellistica) dei processi, ma deve essere oggettivamente dimostrata in campo, dove la sovrapposizione di processi diversi può creare notevoli difficoltà.

2. I cavi sottomarini

La rete mondiale di cavi sottomarini per le telecomunicazioni si estende per oltre un milione di chilometri e trasporta il 99% del traffico Internet intercontinentale. Data la considerevole estensione di tali cavi, si sta pensando da tempo di utilizzare queste infrastrutture sottomarine anche per il monitoraggio dell'ambiente marino.

Dopo una breve esposizione delle caratteristiche dei sistemi di trasmissione che caratterizzano i cavi sottomarini per telecomunicazioni, si illustreranno i diversi approcci che si stanno seguendo per la loro utilizzazione per il monitoraggio dell'ambiente marino.

2.1 Principali caratteristiche dei cavi sottomarini.

I cavi sottomarini per telecomunicazioni hanno una lunga storia che è iniziata con la posa dei primi cavi telegrafici intorno al 1850, è proseguita con lo sviluppo dei cavi coassiali analogici (1950) e con la transizione ai cavi coassiali con sistemi numerici (1980), fino agli attuali cavi con fibre ottiche (1988).

Un collegamento in cavo sottomarino tra due stazioni terminali è costituito essenzialmente da quattro componenti fondamentali.

I cavi che contengono all'interno un numero limitato di fibre ottiche (solo di recente si è arrivati ad una ventina) e sono protetti all'esterno con o senza un'armatura di fili di acciaio a seconda della profondità di posa.

I ripetitori sommersi posti lungo il cavo a distanza di 80-100 km l'uno dall'altro, che costituiscono l'elemento più critico soprattutto per gli stringenti obiettivi di affidabilità da rispettare.

Le stazioni terminali dove sono allocati i terminali del sistema che comprendono gli apparati terminali di linea, gli apparati per la tele-alimentazione e quelli per la telesorveglianza dei ripetitori sommersi. Le scatole di derivazione sommerse consentono l'estrazione/reintroduzione di segnali di telecomunicazioni lungo il cavo in modo da raggiungere, attraverso una struttura ad albero all'interno del collegamento, anche le stazioni terminali intermedie.

La lunghezza dei collegamenti va da qualche decina/centinaio di km per i collegamenti con/e tra le isole fino agli oltre 10.000 km dei collegamenti transoceanici.

Come si è detto, l'elemento critico di questi sistemi è il ripetitore sommerso per il quale le Raccomandazioni ITU-T prescrivono un obiettivo di elevatissima affidabilità: un collegamento sottomarino, qualunque sia il numero di ripetitori intermedi, può presentare, al massimo, 3 guasti nei 25 anni di vita economica prevista. Un obiettivo così severo è legato al fatto che ogni guasto comporta un costo elevato per la sua riparazione. Sono necessari, infatti, l'intervento di una nave appositamente attrezzata, le operazioni di recupero del cavo dal fondale, la sua riparazione e il ripristino del servizio. Ma questo non è ancora sufficiente, perché l'entità e l'importanza del traffico di telecomunicazioni svolto richiede anche una struttura della rete a maglia tra le stazioni terminali, atta ad assicurare, in caso di guasti/interruzioni su un cavo, il re-instradamento immediato del traffico su altri cavi.

2.2 Tecnologie per l'utilizzo dei cavi sottomarini come strumenti osservativi

Gli oceani e i mari occupano il 71% della superficie del pianeta, ma, nonostante ciò, si conosce molto poco di quanto accade in essi e nei loro fondali, stante la difficoltà di studiare queste aree molto estese e difficilmente raggiungibili.

La conseguenza è che terremoti e tsunami che si verificano in mare procurano ricorrentemente gravi devastazioni e molte vittime nelle zone costiere colpite. Inoltre, non c'è una raccolta significativa di dati sull'evoluzione dell'ambiente marino (variazioni di temperatura, modifiche delle correnti marine, etc.).

A fronte di questa situazione che vede un grandissimo numero di cavi sottomarini in esercizio e un elevato numero di pose di nuovi cavi, è in corso, da alcuni anni, un'attività di studio e di sperimentazione volta ad accertare come i cavi sottomarini possano essere utilizzati per il controllo dell'ambiente marino.

Nel seguito vengono brevemente descritte le metodologie che al momento sembrano essere le più promettenti di risultati.

2.2.1 – Utilizzo dei cavi ottici sottomarini attualmente in esercizio

I metodi attualmente allo studio sono essenzialmente tre:

- Metodo DAS (Distributed Acoustic Sensors): la tecnica è basata sull'impiego di un laser, posto al terminale di un cavo ottico sottomarino, che invia sulla fibra ottica un segnale che si propaga lungo la fibra e riflette una parte della sua potenza (effetto backscattering) in corrispondenza delle modifiche di posizione della fibra dovute ad eventi esterni (ad esempio maremoti). I limiti di questo metodo sono essenzialmente due: le modifiche di cui sopra sono apprezzabili solo fino a una distanza di circa 50 km dal terminale di misura posto sulla terraferma e per il suo impiego è necessaria la disponibilità di una fibra del cavo, che non può quindi essere usata per le telecomunicazioni.
- Metodo SOP (State Of Polarization) basato sulle variazioni dello stato di polarizzazione: il segnale che trasporta i servizi di telecomunicazioni su una coppia di fibre di un cavo ottico viene, nei sistemi di ultima generazione, modulato in fase. Al terminale in ricezione è possibile rilevare, oltre alle modifiche di polarizzazione legate ai servizi di telecomunicazione trasmessi, anche quelle che sono determinate da terremoti marini e dalle variazioni di pressione delle onde marine. Il primo punto di forza di questa tecnologia è che il reperimento dei dati per il controllo dell'ambiente marino può essere fatto senza l'impiego di fibre dedicate. Il secondo punto di forza è che si possono raccogliere in modo continuo e in tempo reale informazioni su quanto accade nell'ambiente marino lungo tutta la lunghezza del cavo (anche migliaia di chilometri).
- Metodo Interferometrico basato sul collegare, al terminale trasmittente di una fibra, un laser ad altissima stabilità e nel rilevare, al terminale ricevente, le variazioni del tempo di propagazione introdotte lungo il cavo da onde sismiche e da vibrazioni. Analogamente al metodo SOP, questo metodo può essere impiegato su cavi di grande lunghezza, ma richiede la disponibilità di una frazione, anche se molto limitata, della banda di frequenza utilizzata per le telecomunicazioni.

2.2.2 – Utilizzo dei cavi sottomarini di posa futura

I metodi attualmente previsti sono essenzialmente i seguenti due.

- Sistemi SMART [Scientific Monitoring And Reliable Telecommunications submarine cable systems] Questa soluzione prevede di utilizzare cavi sottomarini di nuova generazione atti a trasportare sia i segnali di telecomunicazioni sia i dati per il controllo dell'ambiente marino. Per raggiungere questo ultimo obiettivo sono integrati nei ripetitori sommersi sensori di pressione, temperatura e movimento del fondale.

Un primo impianto dimostrativo con obiettivi essenzialmente di sperimentazione è in corso di realizzazione al largo delle coste della Sicilia nell'ambito del progetto InSEA finanziato dal MiUR e coordinato dall'INGV.

L'ITU-T ha iniziato lo scorso anno il lavoro di standardizzazione di questi cavi e prevede di completarli nel 2024. È quindi necessario aspettare ancora qualche anno per l'inizio della loro utilizzazione e almeno 5-10 anni per una loro significativa diffusione.

- Sistemi DSSSC [Dedicated Scientific Sensing Submarine Cables systems]

Questi cavi sottomarini, come dice la sigla che li caratterizza, sono interamente dedicati allo studio dell'ambiente marino. Alcune prime applicazioni di questa tipologia di cavi sono state fatte, ma una loro diffusione è prevista solo tra qualche anno perché, anche per questa tipologia di cavi, l'ITU-T ha iniziato lo scorso anno il lavoro di standardizzazione e prevede di completarlo nel 2024.

3. Attività svolte Italia

Nell'ambito di quanto esposto nei punti precedenti si è avviata in Italia, circa due anni fa, un'attività di valutazione e pianificazione di possibili attività in ambito nazionale.

Queste attività sono svolte nell'ambito di un Tavolo Tecnico composto da rappresentanti di MISE, ISPRA e INGV.

Tuttavia, come si è detto, l'impiego pratico di questi cavi richiederà ancora diversi anni; quindi, si sono studiate le possibilità offerte dall'utilizzazione dei cavi attualmente in servizio.

3.1 - Sperimentazione con il metodo SOP

Si sono tenute alcune riunioni con tecnici che hanno partecipato alla sperimentazione della tecnica SOP sul cavo sottomarino Curie (Los Angeles – Valparaíso) di oltre 10.000 km, ottenendo informazioni sulla applicabilità del metodo ad un cavo posato nel Mediterraneo e quindi in condizioni diverse.

3.2 - Sperimentazione con il metodo interferometrico.

Si sono tenute riunioni con esperti, che hanno già condotto una sperimentazione del metodo interferometrico su cavi terrestri e su un cavo sottomarino di lunghezza limitata senza ripetitori sommersi. Anche in questo caso l'obiettivo era quello di ottenere informazioni sulla applicabilità del metodo su cavi di grande lunghezza e con molti ripetitori sommersi in una situazione come quella che si verifica nel Mediterraneo.

Conclusioni

L'analisi effettuata, anche attraverso numerose consultazioni nazionali ed internazionali, ha permesso di valutare le conoscenze recentemente acquisite in materia di utilizzazione dei cavi sottomarini a scopo di

monitoraggio ambientale (particolarmente il cavo Curie nell'Oceano Pacifico). È stato necessario coinvolgere risorse esperte e consulenti esterni e con il loro contributo costruire un approccio in grado di garantirne un'impostazione di base per ulteriori progetti dello stesso tipo.

I sistemi SOP, che al momento prospettano le maggiori potenzialità di sviluppo applicativo estensivo, possono essere sperimentati e poi ingegnerizzati attraverso investimenti sostenibili, in quanto in grado di attivare un processo innovativo per la produzione di nuovi dati reali anche geofisici, utile per valutare aspetti del cambiamento globale del pianeta mare.

Il ruolo potenziale di Ispra in questo progetto sarebbe quello di testare la capacità degli attuali cavi per TLC in esercizio attraverso la sperimentazione delle tecniche citate in ambito mediterraneo e quindi di affrontare adeguatamente le domande dei geofisici. Purtroppo, fino ad ora, non è stato ancora possibile accedere alle informazioni sulla polarizzazione in ingresso ed in uscita di un cavo, nel caso SOP.

Appendice 1

MATRICE DECISIONALE

<https://www.ingv.it/cat/it/1-allerta-tsunami/procedure-d-allertamento/matrice-decisionale>

Profondità	Magnitudo (M)	Localizzazione Epicentro	Potenziale di creare uno tsunami	Distanza delle coste dall'epicentro e livello di allerta		
				Meno di 100km dall'epicentro	Tra 100 e 400km dall'epicentro	Oltre i 400km dall'epicentro
Meno di 100km	5.5 ≤ M ≤ 6.0	In mare o nell'entroterra (distanza dalla costa ≤ 100 km)	Nulla	INFORMATION (ALLERTA VERDE)		
	6.0 ≤ M ≤ 6.5	Nell'entroterra (distanza 40km ≤ distanza epicentro ≤ 100km dalla costa)	Nulla	INFORMATION (ALLERTA VERDE)		
		In mare o nell'entroterra (distanza epicentro ≤ 40 km dalla costa)	Possibile debole tsunami locale se epicentro è distante ≤ 100km dalla costa	ADVISORY LOCALE (ALLERTA ARANCIO)	INFORMATION DI BACINO (ALLERTA VERDE)	
	6.5 ≤ M ≤ 7.0	In mare o nell'entroterra (distanza epicentro ≤ 100 km dalla costa)	Possibile tsunami distruttivo locale se 100km ≤ distanza epicentro ≤ 400km dalla costa	WATCH LOCALE (ALLERTA ROSSO)	ADVISORY REGIONALE (ALLERTA ARANCIO)	INFORMATION DI BACINO (ALLERTA VERDE)
	Tra 7.0 e 7.5		Possibile tsunami distruttivo regionale se distanza epicentro ≤ 400 km dalla costa	WATCH REGIONALE (ALLERTA ROSSO)		ADVISORY DI BACINO (ALLERTA ARANCIO)
	Più di 7.5		Possibile tsunami distruttivo per l'intero bacino se distanza epicentro ≤ 400 km dalla costa	WATCH DI BACINO (ALLERTA ROSSO)		
Più di 100km	Oltre 5.5	In mare o nell'entroterra (distanza epicentro ≤ 100 km dalla costa)	Nulla	INFORMATION (ALLERTA VERDE)		
				Locale	Regionale	Di Bacino

<https://he.net/3d-map/> (visualizza il sistema globale cavi sottomarini)

Tabella grandezze di interesse

Velocità	Onde P solide	Onde S solide	Onde P acqua	Onde S acqua	Tsunami (*)	suono in aria	Atleta	Luce cavo
Km/sec	5.5	3.0	1.5	Non si propagano	0.1	0.34	0.01	300.000

(*) profondità 1 Km

Appendice 2

Gli attuali sistemi di servizio si basano, generalmente, su una matrice decisionale del tipo mostrato nell'Appendice 1 e prevedono che il livello di allerta venga emesso entro 14 minuti dal tempo di origine del terremoto per tsunami. I dati prodotti sono:

- informazioni sul terremoto (ora, luogo e magnitudo del terremoto) che hanno determinato il livello di allarme tsunami;
- ora di arrivo dello tsunami, in base alla posizione del terremoto e all'ora di origine;
- rapporti dai mareografi sull'ampiezza dello tsunami mentre si propagava.

Prevedibilmente, questa pratica, rappresenta un primo sistema di allertamento ma ha portato a molti falsi allarmi e evacuazioni non necessarie. Ad esempio: “Nel 1986, un allarme tsunami per le Hawaii ha portato all'evacuazione di Waikiki, al licenziamento di tutti i dipendenti statali e alla conseguente congestione del traffico che ha creato una situazione in cui le auto erano bloccate nelle zone di evacuazione. Lo tsunami è arrivato in tempo, ma solo come onde non alluvionali. Il falso allarme del 1986 frustrò gli imprenditori, fece infuriare il pubblico ed etichettò il centro di allarme NOAA come inetto. Lo Stato delle Hawaii ha stimato che questo falso allarme è costato circa \$ 41 milioni (US \$) e ha portato alla perdita di credibilità per i prodotti di allarme tsunami, che sono stati scollegati dal rischio di inondazioni”. ESTRATTO DA: Bernard E, Titov V. 2015 Evolution of tsunami warning systems and products. Phil. Trans. R. Soc. A 373: 20140371. <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2014.0371>- Article in Philosophical Transactions of the Royal Society of London · January 2015

I sistemi TLC in esercizio sono potenzialmente utilizzabili e disponibili per migliorare il sistema osservativo su scala globale oggi esistente. Tali sistemi TLC sono severamente gestiti per assicurarne la durabilità e il servizio nel lungo periodo, pertanto ogni integrazione strutturale viene percepita come invasiva e va, anch'essa, eventualmente programmata nel lungo periodo;

La tecnica SOP è potenzialmente sviluppabile in un sistema TLC a zero impatto invasivo. In prospettiva il potenziale uso di sistemi SOP potrà migliorare i servizi di difesa globali collegati e migliorare la matrice decisionale con la seguente informazione (*): (*) stima dell'energia dello tsunami

L'utilizzazione “integrale” dei cavi sottomarini (per esempio attraverso i metodi SOP) tende a privilegiare la scelta di osservabili di grande estensione spaziale e/o energia che garantiscano un rilevante azione integrale sul cavo stesso (terremoti, tsunami, mareggiate).

Il quadro è comunque evolutivo in vista del continuo sviluppo e dell'innovazione delle tecnologie di comunicazione. Sono previsti nuovi sistemi di futura posa come i cavi smart

L'ITU-T ha iniziato lo scorso anno il lavoro di standardizzazione di questi cavi e prevede di completarli nel 2024. È quindi necessario aspettare ancora qualche anno per l'inizio della loro utilizzazione e almeno 5-10 anni per una loro significativa diffusione e standardizzazione.

Autori: Giovanni Arena, Primo tecnologo ISPRA, Gastone Bonaventura, Associato ISPRA, Antonio Speranza, Associato ISPRA