

Caratterizzazione remota del fondale marino tramite analisi e mosaicatura del *backscatter*

Giuseppe Masetti (*), Roberto Sacile (**), Andrea Trucco (***)

(*) Istituto Idrografico della Marina, Passo Osservatorio, 4, Genova, tel. 01024431, giuseppe.masetti@marina.difesa.it

(**) Università degli Studi di Genova - DIST, Via Opera Pia 13, Genova, tel. 0103532153, roberto.sacile@unige.it

(***) Università degli Studi di Genova - DIBE, Via Opera Pia 11A, Genova, tel. 0103532253, trucco@ieee.org

Riassunto

La mosaicatura e l'analisi angolare del *backscatter* permettono di caratterizzare in maniera adeguata un'area di fondale marino, estendendo i risultati di un numero limitato di prese di fondo. Entrambe le tecniche sono applicate con buoni esiti al *case-study* del relitto della VLCC Haven.

Abstract

Mosaicking and analysis of backscatter angular responses are adequate to characterize the seafloor, extending the results of a limited number of grabs. Both techniques have been applied with good outcome at the case-study of the shipwreck of the VLCC Haven wreck site.

Premessa

Un'onda acustica che si propaga in un mezzo come l'acqua del mare incontra una serie di ostacoli lungo la colonna d'acqua (ad esempio, *plankton*) e alle interfacce di confine (fondale e superficie marina). Tali collisioni fanno sì che parte dell'energia trasmessa torni al sistema che l'ha emessa e, nel caso di una configurazione monostatica, tale energia prende il nome di *backscatter*.

In funzione della tipologia di sistema acustico e delle finalità con cui viene impiegato, le componenti energetiche di cui è costituito possono essere correlate all'oggetto della ricerca o rappresentare una fonte di disturbo (riverberazione). Diventa, quindi, di fondamentale importanza conoscerne le caratteristiche e le proprietà al fine di favorire la ricezione degli echi utili alle proprie ricerche e di filtrare o, quantomeno, ridurre il disturbo ricevuto dal sistema acustico.

Nel presente lavoro si analizza la possibilità di impiegare il *backscatter* proveniente dal fondale – acquisito con un sistema acustico multifascio – per la caratterizzazione remota di un'area contraddistinta dalla presenza di un relitto di una nave moderna.

Backscatter, ruvidità superficiale e angolo di incidenza

Un'onda acustica che incontri un'interfaccia tra due mezzi produce, in funzione dell'angolo di incidenza, delle differenti impedenze acustiche in gioco e di altri importanti parametri, un insieme di onde rifratte nel mezzo successivo e di onde riflesse e diffuse nel mezzo di provenienza.

Il rapporto tra l'intensità acustica di ritorno dall'ostacolo in direzione della sorgente e l'intensità incidente sullo stesso prende il nome di *target strength* (**TS**). Tale rapporto è legato alla natura fisica dell'ostacolo, alla sua struttura (interna ed esterna) e alle caratteristiche del segnale incidente (angolo e frequenza).

Nel corso della propagazione, l'intensità dell'onda acustica trasmessa (*source level* da cui **SL**) è soggetta a perdite di trasmissione (*transmission loss*, **TL**) dovute allo *spreading* geometrico e all'assorbimento del mezzo ($TL = 20 \log R + \alpha R$, nel caso di propagazione sferica).

Nel caso specifico del fondale del mare, la *target strength* di cui sopra è determinata attraverso la *backscattering cross-section*, la quale può essere decomposta in due parti: la dimensione del fondale

effettivamente insonificato dal sistema acustico (A_s) e la corrispondente *backscattering strength* per unità di superficie (BS_s).

Il livello in decibel del segnale di *backscatter* (*echo level*, EL) può pertanto essere stimato con la seguente formula (che tiene conto delle perdite di trasmissione in andata e in ritorno):

$$EL = SL - 2TL + TS = SL - 2TL + 10 \log A_s + BS_s \quad [1]$$

Il processo di interazione è influenzato dalle caratteristiche locali del fondale che, in funzione della frequenza e dell'angolo dell'onda acustica incidente, può essere più o meno rappresentato come una superficie piana ideale. Le irregolarità della superficie diffondono l'energia acustica in tutte le direzioni: una parte, denominata coerente, viene riflessa senza alcuna deformazione – a parte le perdite per trasmissione – in una direzione speculare all'incidenza; mentre, la restante viene diffusa in tutto lo spazio, inclusa la direzione della sorgente (*backscatter*). Il rapporto tra le due suddette parti, speculare e diffusa, è funzione principalmente della ruvidità superficiale.

La ruvidità del fondale, in base all'origine geologica (roccia, fango, ...) o biologica (organismi viventi, conchiglie, ...), copre un'ampia scala di grandezze (da pochi millimetri ai metri). Possono inoltre sussistere diverse scale – ad esempio, *ripple* di alcuni centimetri presenti sulla topografia di un fondale sabbioso – che danno luogo contemporaneamente a differenti processi fisici.

Per quantificare la distribuzione delle ampiezze relative ad un fondale si può utilizzare, tramite la trasformata di Fourier, la distribuzione energetica (S_k) nelle differenti componenti armoniche, definite da un numero d'onda funzione della lunghezza λ dell'onda acustica ($k = 2\pi/\lambda$).

La parte diffusa del segnale acustico, oltre che dalla ruvidità superficiale, è fortemente influenzata dall'angolo di incidenza. Per angoli prossimi alla normale, l'onda incidente è riflessa dalle facce (*facet*) orientate in modo da riflettere l'eco specularmente. Questa modalità corrisponde al massimo di energia di *backscatter* misurata e prende il nome di *facet reflection*. Ad angoli di incidenza obliqui, il *backscatter* giunge invece come prodotto dei contributi di una serie di piccole sorgenti (*scatterer*), variamente distribuite in funzione della ruvidità locale. Tale processo avviene cosiddetto dominio di diffusione di Bragg (*Bragg scattering domain*).

Per realizzare un modello teorico relativo alla diffusione di un'onda acustica su una superficie ruvida si utilizza sovente una composizione dei due suddetti regimi – *facets reflection* e *Bragg scattering* – in funzione della ruvidità locale della superficie.

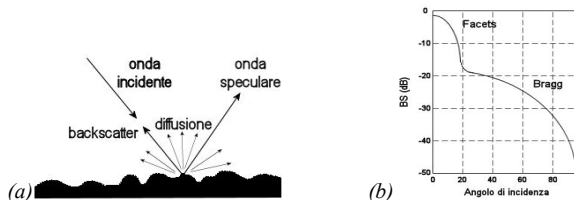


Figura 1 – (a) Riflessione (parte coerente) e diffusione dell'onda incidente una superficie ruvida;
(b) Esempio di andamento della *backscattering strength* su superficie ruvida in funzione dell'angolo di incidenza.

Risposta acustica del fondale marino

Il fondale agisce principalmente come una superficie ruvida che provoca la diffusione dell'onda acustica incidente. Dell'energia totale diffusa, il *backscatter* rappresenta il dato impiegato nei sistemi acustici di mappatura del fondale.

Una parte dell'energia incidente può penetrare nel fondale a causa del piccolo contrasto di impedenza tra acqua e sedimento. Nello specifico, ad alta frequenza, la penetrazione nel fondale è minima e l'interazione è di solito limitata alla superficie; con il diminuire della frequenza, i processi legati agli strati di sedimento e alle irregolarità in esso presenti diventano più importanti. Per studiare tali processi è necessario conoscere la velocità del suono nel sedimento e la sua densità.

Le eterogeneità possono essere di varia natura, ma le più diffuse sono costituite da bolle gassose

intrappolate nel sedimento. Volendo descrivere la risposta da esse fornita si deve far riferimento ad una distribuzione randomica di *scatterer* i cui contributi si sommano interferendo fra loro.

Per descrivere le tipologie di fondale esistono in letteratura diversi parametri. I più comuni legati alla durezza del sedimento sono: la dimensione media espressa in Phi (M_ϕ); la porosità (n); la densità di massa (ρ); la velocità relativa dell'onda compressionale (c_r) riferita alla velocità del suono in acqua; la velocità assoluta dell'onda compressionale (c); il coefficiente di riflessione alla normale (R_n); il coefficiente di assorbimento dell'onda compressionale (α); la velocità assoluta dell'onda di taglio (c_s); ecc. Mentre, relativamente alla ruvidità, si utilizzano l'intensità spettrale (Ω_b); la deviazione standard (h) lungo una distanza unitaria e la deviazione standard della pendenza (δ). Come è intuitivo supporre, esiste una correlazione tra i parametri di durezza del sedimento e quelli relativi alla ruvidità. Ad esempio, i parametri di ruvidità tendono a crescere con il valore dell'impedenza e, quindi, all'aumentare delle dimensioni granulometriche del sedimento.

Alle frequenze impiegate dai sistemi acustici di mappatura del fondale – da decine a centinaia di kHz – il *backscatter* proveniente dal fondale può essere suddiviso tra la parte di energia diffusa all'interfaccia (sia come *facets reflection* vicino al nadir, sia dagli *scatterer* legati alla ruvidità locale per i lobi laterali) e quella che penetra nel sedimento e viene riflessa dalle eterogeneità volumetriche in esso presenti. Quest'ultimo processo può anche risultare predominante ad angoli di incidenza obliqui.

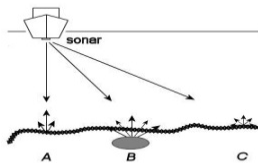


Figura 2 – Processi coinvolti nel backscatter: A) facets reflection, B) eterogeneità nel sedimento e C) scatterer.

MBES imaging e caratterizzazione remota

Il principio impiegato per l'*imaging* tramite un ecoscandaglio multifascio (*multibeam echo-sounder*, MBES) è, in linea di massima, lo stesso di un *sidescan sonar* (SSS): il segnale di *backscatter* è registrato in funzione del tempo e la sua intensità istantanea varia con la ruvidità e, quindi, con la natura del fondale insonificato. Tuttavia sussistono alcune differenze che rendono il processo più complesso. Con i dati MBES, il segnale di *backscatter* è disponibile soltanto dopo il *beamforming*. L'immagine acustica è ricavata sulla base del DTM del fondale basato sulle misure batimetriche, il punto centrale di ogni *beam* viene posizionato lungo lo *swath* ed i *pixel* dell'immagine acustica distribuiti attorno fino al confine con i *beam* adiacenti. Ne deriva una ridotta presenza di distorsioni geometriche rispetto al *SSS imaging* che utilizza la misura della sola distanza obliqua e ipotizza fondale piano. Tuttavia, a parità di frequenza, la qualità del *MBES imaging* è inferiore a quanto si ottiene con sistemi SSS. Ciò ha diverse cause: la risoluzione *along-track* è di solito più bassa; i diagrammi di direttività dei *beam*, sebbene migliorino il rapporto segnale-rumore, modulano l'ampiezza dei dati raccolti (senza correzioni, l'immagine risultante appare striata parallelamente alla direzione del battello); l'angolo di incidenza di un MBES, di solito a scafo, è meno inclinato di un SSS trainato a pochi metri dal fondale e ciò rende meno evidente il contrasto di intensità legato alla ruvidità. Ne consegue che per dati MBES si dovrebbe più propriamente parlare di misura della riflettività media. Poiché nella maggior parte delle applicazioni pratiche è richiesta una classificazione tra una decina di classi, tale obiettivo può essere raggiunto dall'analisi del *backscatter* misurato. Non è invece possibile ricavare direttamente le caratteristiche geologiche (granulometria, composizione mineralogica,..) o geotecniche (densità, modulo di compressione, ..) del sedimento. Inoltre, il *MBES imaging* può essere impiegato per costruire mappe acustiche di un'area utili a generalizzare i risultati ricavati da analisi geologiche su sottoaree, in base all'assunto che qualsiasi importante cambiamento nel sedimento sarebbe deducibile dal segnale acustico ricevuto.

È possibile provare anche ad estrarre alcune caratteristiche geologiche e geotecniche del sedimento comparandole con un modello. Tale approccio ha dei limiti di validità per le inevitabili ipotesi semplificative e la quantità di parametri da ricavare rispetto al relativamente piccolo numero di informazioni fornite dal *backscatter*. Sono in uso due approcci principali.

Il primo, di carattere squisitamente pragmatico, identifica dei parametri di classificazione tra i dati forniti dal sistema, anche se privi di significato fisico, purché dotati di sufficiente potere discriminatorio. Il sistema acustico viene calibrato in funzione di tali parametri, basandosi su un certo numero di configurazioni validate. Al manifestarsi di una nuova casistica, essa emerge comparandola con il *database* esistente. Sebbene questo approccio possa apparire restrittivo, la maggior parte delle applicazioni disponibili al momento è basata proprio su di esso.

Il secondo approccio, sicuramente più ambizioso, si prefigge di risolvere il problema inverso: estrarre le caratteristiche del sedimento dai dati acustici disponibili. Ciò implica notevoli sforzi di modellazione per correlare le informazioni acustiche osservate sperimentalmente e le caratteristiche geologiche, in particolare per fondali con caratteristiche complesse per la presenza di materiali porosi, di vegetazione, di sedimenti variamente stratificati, ecc. Ne consegue che tale approccio, teoricamente perseguibile, si scontra con l'elevato livello di condizionalità e con la difficoltà di effettuare le verifiche di corretto funzionamento, in particolare su alti fondali (Lurton, 2002).

Problematiche correlate alla mosaicatura del *backscatter*

Nella creazione di un mosaico di *backscatter* si incontrano due principali difficoltà: i MBES non registrano direttamente l'intensità assoluta di *backscatter*, ma dei valori relativi il cui calcolo non viene spesso chiaramente definito nella documentazione tecnica fornita dalla Casa costruttrice del sistema; la necessità di rimuovere l'effetto della diversa risposta angolare che ne fa variare l'intensità lungo lo *swath* in funzione dell'angolo di incidenza.

La rimozione delle variazioni di intensità del *backscatter*, legate alla diversa risposta angolare, è un'operazione fondamentale per creare dei mosaici che siano uniformi in aree di fondale omogeneo, cioè che non denotino una variazione angolare lungo lo *swath*. Tale risultato non è di semplice raggiungimento in quanto la risposta angolare è una caratteristica intrinseca del fondale marino. In altri termini, è necessario conoscere alcune informazioni sulla tipologia di fondale prima di assemblare il relativo mosaico di *backscatter*. Tale prerequisito non è propriamente pratico, poiché lo scopo principale legato alla creazione di mosaici acustici è proprio quello di ottenere delle indicazioni sulla natura del fondale.

Analisi della risposta angolare di *backscatter*

La variazione lungo lo *swath* dell'intensità di *backscatter* in relazione all'angolo di incidenza, uno dei due principali ostacoli alla corretta mosaicatura, rappresenta invece la principale fonte di informazione in numerosi metodi di caratterizzazione remota del fondale marino. Infatti, dall'analisi della risposta angolare di *backscatter*, è possibile ricavare importanti proprietà acustiche e fisiche come granulometria, impedenza (prodotto tra densità del sedimento e velocità del suono), assorbimento e ruvidità acustica dei sedimenti superficiali. In tale tecnica, il livello del segnale per un dato *beam*, talvolta mediato su una serie di impulsi successivi, viene corretto per alcuni termini dell'equazione del sonar (livello di trasmissione, perdite di propagazione, direttività dell'antenna in trasmissione ed in ricezione, ...) per ricavarne la *target strength*. Quest'ultima viene corretta per il *footprint* del fascio in funzione della geometria, dell'ampiezza del *beam* e della durata del segnale. Ciò comporta che l'*unit backscattering strength* ricavata – corretta di rifrazione per effetto del profilo di velocità del suono e della batimetria estratta dal DTM del fondale – sia funzione dell'angolo di effettiva incidenza sul fondo. Le risposte acustiche del fondale ottenute variano in funzione della *facies* sedimentaria. Tuttavia, l'informazione fornita è abbastanza grossolana in quanto è possibile incorrere in molte ambiguità dovute alla possibilità che differenti tipologie di fondale possano avere risposte acustiche similari ad angoli uguali. Inoltre, si incontrano altri due ostacoli: possedere misure accurate di intensità di *backscatter* e l'assunzione non sempre vera che il fondale sia uniforme lungo tutto lo *swath*.

Il case-study della VLCC Haven

Come *case-study* cui applicare la mosaicatura e l'analisi della risposta angolare di *backscatter* è stato scelto il tristemente famoso relitto della VLCC Haven, uno dei più grandi del Mediterraneo con i suoi 344 metri di lunghezza fuori tutto. Il corpo principale giace su un fondale fangoso a largo d'Arenzano (Genova) a circa 75 metri di profondità, mentre una parte della prora con il bulbo giace ad oltre 500 metri. L'affondamento, risalente al 14 aprile 1991, è dovuto ad un incendio che ha fatto seguito ad una violenta esplosione avvenuta all'altezza della cisterna prodiera della superpetroliera. Dopo l'affondamento, si è proceduto sia alla rimozione dei residui combustibili e semicombustibili sulle spiagge e sui fondali fino all'isobata dei dieci metri, sia alla loro aspirazione dalle cisterne e dai locali del relitto. A conclusione di un contenzioso durato circa otto anni, parte della somma risarcita è stata impiegata per effettuare interventi di bonifica del relitto e dei fondali circostanti che si sono conclusi il 12 giugno 2008 con esito positivo (Masetti, 2009).

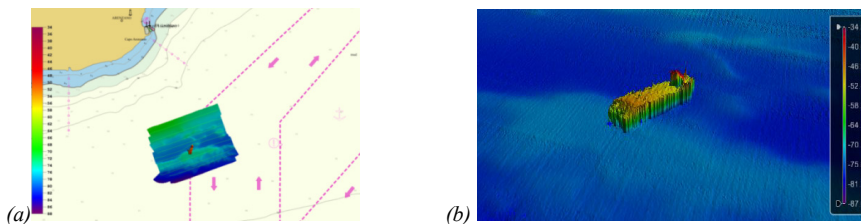


Figura 3 – (a) Mappatura batimetrica dell'area oggetto del case-study;
(b) Ricostruzione 3D del relitto.

Dal punto di vista della tutela ambientale, l'intervento di bonifica del relitto della Haven rappresenta un'importante esperienza pilota a livello internazionale sia per l'ubicazione dei depositi di idrocarburi da bonificare, sia per la posizione del relitto, adagiato su fondali poco profondi a poche miglia da una zona di litorale di interesse turistico. I dati acustici sono stati raccolti a mezzo del MBES Kongsberg Simrad EM300 in dotazione a Nave Aretusa, unità idrografica della Marina Militare italiana. Per creare mosaici ed analizzare le proprietà dei sedimenti dell'immagine acustica ottenuta è stato utilizzato il *tool* Mosaic Editor in dotazione al software Caris HIPS&SIPS 7. Il *workflow* ha previsto l'importazione delle linee di acquisizione e la relativa valorizzazione realizzata applicando le correzioni relative alla marea ed eliminando eventuali *spike* tramite gli *editor* relativi alla navigazione, al sensore di assetto e alla batimetria. Dopo la pulizia dei dati, operazione comune al *processing* batimetrico, sono stati applicati gli algoritmi di correzione del *backscatter* del *Geocoder engine* (Fonseca, 2005). Nello specifico, ai dati raccolti è stata applicata la *beam pattern correction* per rimuovere gli artefatti angolari causati dal trasduttore. Essa si basa su un *file* di *beam pattern* generato dall'utente per identificare e rimuovere tale effetto. Per ottenere un buon risultato, il *file* di *beam pattern* è stato creato in un'area piatta, omogenea e priva di *target*. Il *file* creato è stato applicato a tutti i dati del rilievo per correggerli uniformemente, ottenendo così un'immagine acustica migliore.

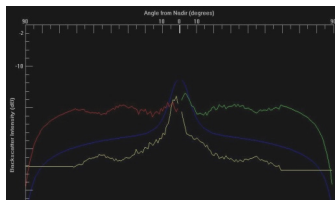


Figura 4 – *Beam pattern window*: in giallo la risposta reale del trasduttore, in blu la risposta da modello per frequenza e tipo di sedimento, in rosso e verde la correzione da applicare per rimuovere gli artefatti del trasduttore.

I dati di *imaging* così elaborati sono stati immagazzinati come Georeferenced Backscatter Raster (GeoBaR). Dai GeoBaR è stato creato un mosaico preliminare cui applicare le opportune modifiche per la realizzazione del prodotto finale.

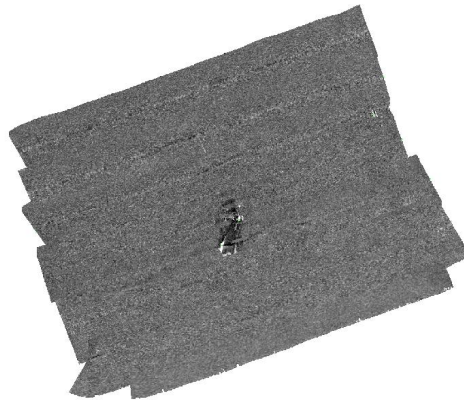


Figura 5 – Mosaico di backscatter dell'area adiacente al relitto della VLCC Haven.

L'analisi del mosaico ottenuto fa emergere l'uniformità della riflettività e, quindi, del sedimento del fondale oggetto del *case-study*. Inoltre, ai dati di *imaging* corretti è stata applicata l'analisi dei sedimenti. La bontà dei risultati dell'analisi e della mosaicatura del *backscatter* sono stati direttamente verificati tramite l'esecuzione di un numero limitato di campionamenti a mezzo benna del fondale.

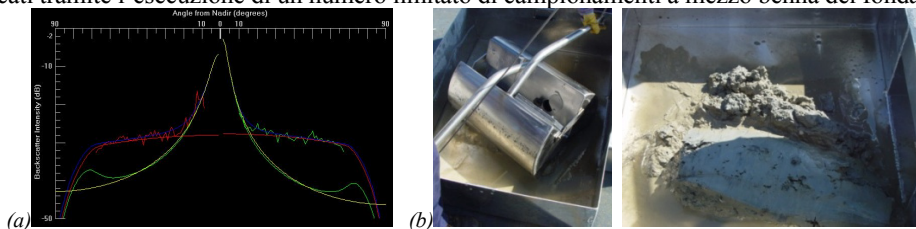


Figura 6 – (a) Sediment Analysis Window; la risposta reale di backscatter viene modellata (in blu) come risultato del backscatter di interfaccia (verde), di volume (rosso) e di Kirchoff (giallo); (b) Raccolta di campioni di fondo.

Conclusioni

I processi di mosaicatura e di analisi del *backscatter* applicati al fondale adiacente al relitto della VLCC Haven hanno permesso di caratterizzare l'area in maniera adeguata e di estendere i risultati di un numero ridotto di prese di fondo a gran parte del rilievo.

Tuttavia, la tecnica di mosaicatura impiegata, prevedendo la rimozione di informazioni correlate alla risposta angolare, ha ridotto le capacità di caratterizzazione quantitativa del fondale da applicare al mosaico ottenuto. D'altro canto, la sola analisi delle risposte angolari permette di caratterizzare il fondale marino, ma con una risoluzione spaziale limitata all'ampiezza dello *swath*. Una tecnica combinata permetterebbe di migliorare la risoluzione spaziale di quest'ultima e di creare dei mosaici maggiormente uniformi (Fonseca, 2007).

Bibliografia

- Fonseca L., Calder B. (2005), "Geocoder: An Efficient Backscatter Map Constructor", *Proceedings of the U.S. Hydrographic Conference 2005*, San Diego (CA)
- Fonseca L., Calder B. (2007), "Clustering Acoustic Backscatter in the Angular Response Space", *Proceedings of the U.S. Hydrographic Conference 2007*, Norfolk (VA)
- Lurton X. (2002), *An Introduction to Underwater Acoustics. Principles and Applications*, Springer-Praxis, Chichester (UK)
- Masetti G., Orsini F. (2009), "Environmental Risks Monitoring of Shipwrecks in Italian Seas", *International Hydrographic Review*, 11:52-60