

Sensori ed emettitori acustici

2.1) Note sullo sviluppo tecnologico.

Nei paragrafi precedenti abbiamo visto che gli idrofoni sono il polo fondamentale della struttura dei sistemi di localizzazione, infatti il primo "sonar" che fu costruito aveva come unico componente un idrofono rudimentale che consentiva l'ascolto diretto dei rumori subacquei così come mostrato in Fig. 2.1.

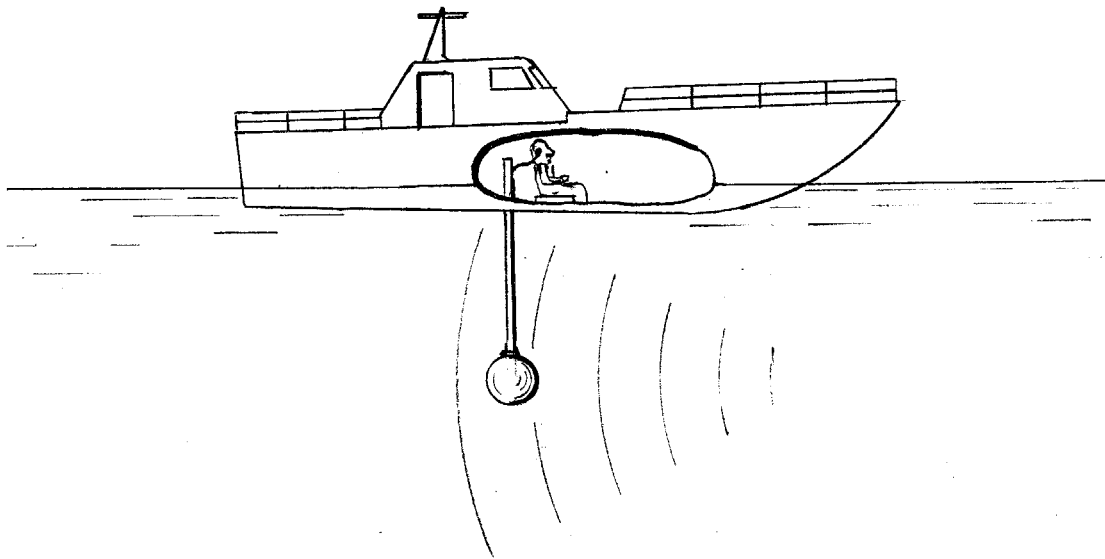


fig. 2.1 Primordi del sonar - scoperta diretta dei bersagli attivi

Tutto il sistema era formato da una sfera cava di gomma collegata ad un tubo di metallo che terminava con un leggero condotto di gomma da applicare all'orecchio dell'operatore.

La sfera di gomma veniva immersa in mare alla profondità di qualche metro, le onde sonore che ne colpivano la superficie provocavano delle vibrazioni che si tramettevano direttamente all'aria in essa contenuta e di qui, tramite il tubo metallico ed il condotto di gomma, venivano convogliate all'orecchio dell'ascoltatore.

Questo era a quel tempo il sonar di “scoperta”, quello di “localizzazione” invece utilizzava due idrofoni, analoghi a quello descritto, montati su di un supporto che veniva ruotato dall’operatore, vedi Fig. 2.2.

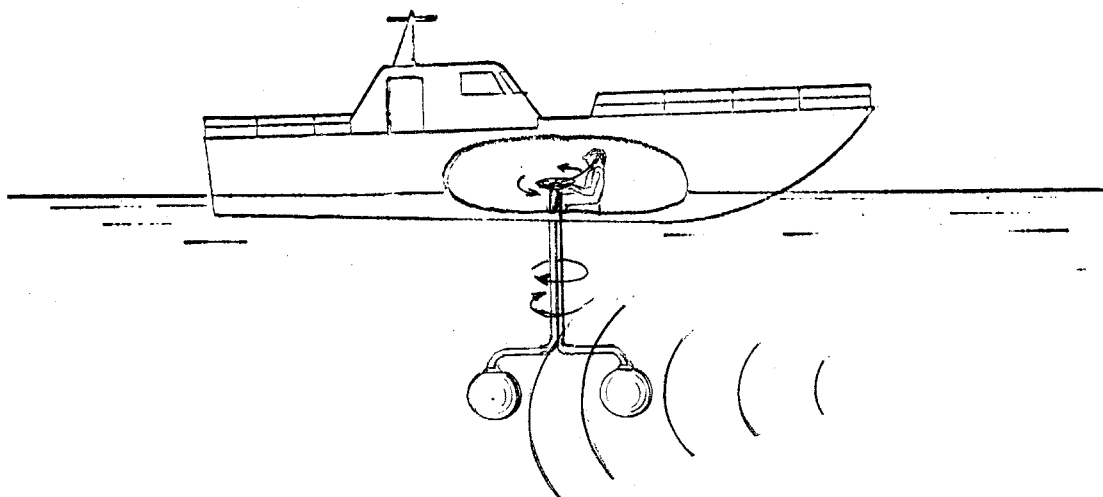


fig. 2.2 *Primordi del sonar - Localizzazione dei bersagli attivi*

L'ascolto avveniva in modo stereofonico, con un idrofono per ciascun orecchio, e si puntava il bersaglio ruotando manualmente il supporto, così come nell'ascoltare un rumore in aria ruotiamo il capo per individuarne la direzione di provenienza.

Questi sistemi che sembrerebbero collocabili nella preistoria della tecnica erano impiegati, all'inizio della seconda guerra mondiale, da piccole unità di superficie per la localizzazione dei sommergibili.

Lo sviluppo di nuove tecnologie si ebbe negli anni del conflitto; in tale periodo vennero realizzati, adattando all'ambiente subacqueo i microfoni del telefono Bell, i primi idrofoni capaci di trasformare le pressioni acustiche ricevute in corrispondenti tensioni elettriche.

Successivamente, attraverso molteplici esperienze, si è giunti alla realizzazione degli idrofoni moderni che sfruttano il fenomeno della piezoelettricità di particolari materiali ceramici.

La piezoelettricità è la proprietà di certi materiali di generare tensioni elettriche in seguito a sollecitazioni meccaniche e, viceversa, di generare vibrazioni meccaniche in seguito a sollecitazioni elettriche. Gli idrofoni costruiti su questo principio possono pertanto funzionare indifferente-

mente, sia come captatori di onde acustiche, che come emettitori di energia in mare. Con idrofoni aventi strutture adatte all'emissione di molta energia acustica, si ricevono normalmente i rumori irradiati dai bersagli, ma non sempre con idrofoni progettati come ricevitori è possibile emettere molta energia.

Questo fatto impone, a volte, l'impiego di due basi distinte nel progetto di un sonar, la base idrofonica ricevente, con caratteristiche ottimali in un certo campo di frequenze e la base degli emettitori, dimensionata in base alla frequenza di lavoro e alla potenza acustica da trasferire in acqua.

Lo sviluppo degli idrofoni piezoelettrici si deve al progresso dell'elettronica che ha reso possibile la realizzazione di amplificatori molto sensibili, con bassi rumori di fondo, tali da consentire l'utilizzazione delle piccole tensioni elettriche generate dalle onde acustiche provenienti dai bersagli. Oggi, in tutte le applicazioni per i sonar, sono utilizzati gli idrofoni piezoelettrici con struttura ceramica. Essi hanno ottime caratteristiche di sensibilità acustica e di robustezza meccanica, inoltre sono costruibili nelle forme più svariate per adattarli meglio alle esigenze di progetto delle basi idrofoniche.

2.2) Gli idrofoni piezoelettrici ceramici.

Per illustrare la struttura di questi elementi consideriamo una delle forme più semplici, quale ad esempio l'idrofono a dischetto (vedi fig. 2.3).

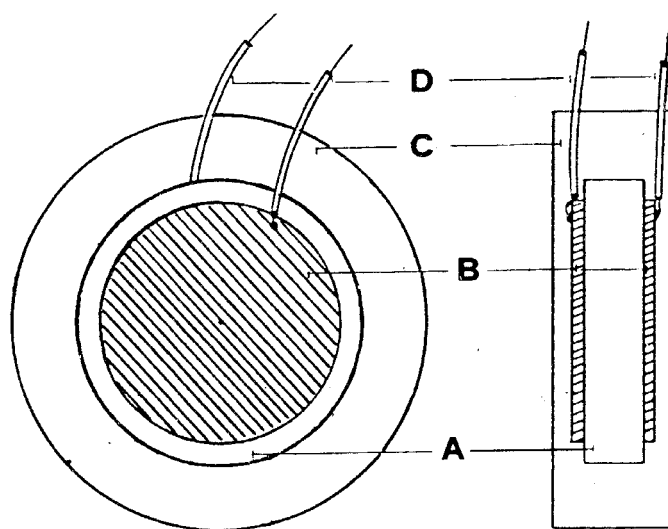


fig. 2.3 Idrofono a dischetto

Esso è formato da un piccolo disco di ceramica piezoelettrica, indicato in figura con la lettera A); le facce del disco sono parzialmente coperte con sottili strati di argento detti armature B); esse sono collegate separatamente a due sottili conduttori D) ai capi dei quali si preleva la tensione generata dall'effetto piezoelettrico.

Il dischetto è affogato in un corpo di plastica C) allo scopo di isolare elettricamente le due armature quando l'idrofono viene immerso nell'acqua; la plastica è di un tipo speciale che assicura, da un lato, un ottimo isolamento elettrico e, dall'altro, una buona conduzione delle onde acustiche che si devono propagare dall'acqua, tramite la plastica, al disco di ceramica. Quando l'idrofono è immerso, le onde acustiche, attraverso la plastica, fanno vibrare il dischetto di ceramica; la vibrazione provoca la formazione di cariche elettriche che vengono raccolte dalle due armature e inviate all'esterno dai conduttori, si ha così ai loro capi una debole tensione elettrica proporzionale al livello della pressione incidente e alla sensibilità dell'idrofono.

Questo tipo di idrofono riceve bene le onde acustiche dalle due facce, per direzioni provenienti dallo spazio intorno all'asse perpendicolare ad esse. Gli elementi sensibili di gran parte degli idrofonici impiegati nei sonar, hanno strutture elettriche simili a quella ora mostrata, differiscono invece per le forme geometriche e le parti meccaniche ad essi collegate per ottenere particolari caratteristiche acustiche.

Le forme geometriche più comuni degli idrofonici sono mostrate in Fig. 2.4. In essa vediamo il cilindro cavo, in cui le armature sono depositate l'una sulla superficie esterna del cilindro e l'altra sulla superficie interna. Questo idrofono, usato molto frequentemente nei sonar, è adatto a ricevere le onde acustiche su tutta la superficie esterna del cilindro, mentre è meno sensibile ad esse sull'asse longitudinale.

Il prisma retto, in cui le armature sono depositate su due superfici parallele, può ricevere le onde acustiche nelle direzioni intorno alla perpendicolare ad esse.

Gli idrofonici che sono stati mostrati vengono montati con coperture di plastica speciale che hanno le stesse funzioni descritte in precedenza; essi, generalmente, sono sistemati a gruppi per ottenere le desiderate caratteristiche di sensibilità e di "direttività".

La caratteristica di direttività di un sistema acustico indica come varia la sensibilità di ricezione o di emissione con il variare della direzione. Se la sensibilità è elevata in una direzione e diminuisce molto rapidamente con

il variare di essa si dice che il sistema ha una buona direttività, cioè presenta una direzione preferenziale.

Se un gruppo di idrofoni ha una direzione preferenziale d'ascolto, confacente alle necessità del sonar, il disturbo dell'ambiente subacqueo sarà captato soltanto in questa direzione e non in tutte le altre come avverrebbe se il sistema non avesse una buona "direttività": ciò migliora la ricezione del rumore irradiato dai bersagli che si trovano nel settore a cavallo della direzione preferenziale.

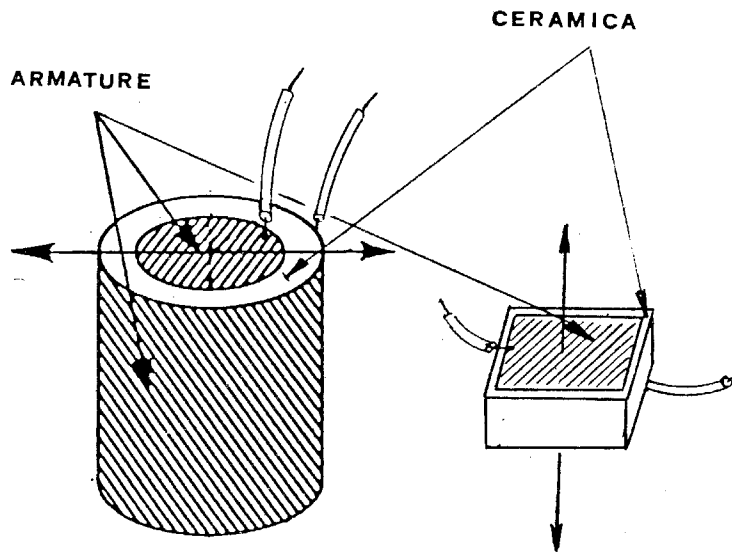


fig. 2.4 Elementi idrofonici

2.3) Emittitori elettroacustici.

Gli idrofoni descritti nel paragrafo precedente, data la reversibilità del fenomeno piezoelettrico, se opportunamente eccitati con tensioni elettriche oscillanti, entrano in vibrazione emettendo onde acustiche nell'acqua in cui sono immersi.

L'emissione dell'energia avviene, nel caso del cilindro cavo, quasi in tutto lo spazio circostante, a causa delle vibrazioni radiali di esso.

Questo tipo di funzionamento non si adatta alla realizzazione delle basi di emittitori elettroacustici dei sonar. Vediamone la ragione considerando ad esempio la base idrofonica ricevente di Fig. 1.7. Essa è formata con idrofoni del tipo a cilindro come quelli precedentemente descritti; supponiamo ora di impiegarla per emettere energia acustica verso una direzione stabilita (vedi paragrafo 1.7.2.2), eccitando gli idrofoni prospicienti ad essa con impulsi di tensione oscillante. Le onde acustiche emesse dagli idro-

foni verrebbero irradiate tanto all'esterno della base, come è desiderabile perchè si propaghino nella direzione voluta, quanto all'interno, disperdendosi con un notevole spreco di energia.

Per evitare tali perdite è necessario impiegare idrofoni in grado di emettere onde acustiche soltanto da un lato, per montarli poi sulla base in modo che l'emissione sia diretta all'esterno di essa.

Per costruire idrofoni di questo tipo è necessario adottare una particolare tecnica che ora indicheremo.

L'elemento base per la costruzione è sempre il cilindro cavo di ceramica piezoelettrica; esso però ha le armature che sono depositate sulle corone circolari che fanno da basi al cilindro, invece che sulle superfici esterna e interna di esso come nel caso in precedenza esaminato. La Fig. 2.5 mostra questa nuova struttura.

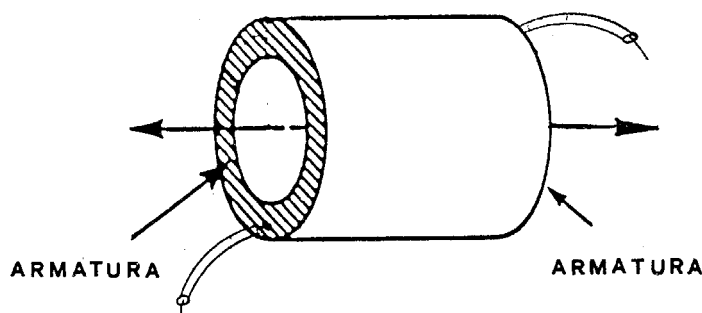


fig. 2.5 Elemento di idrofono cilindrico con armature sulle basi.

Con tale disposizione l'idrofono, eccitato elettricamente, entra in vibrazione secondo l'asse longitudinale del cilindro.

Se fissiamo rigidamente alle basi del cilindro due masse metalliche, una molto più pesante dell'altra, come mostrato in Fig. 2.6, la vibrazione del cilindro si trasferisce alla massa più leggera, mentre viene smorzata dalla massa più pesante che ha maggior inerzia.

L'idrofono così costituito emette energia acustica soltanto dal lato della massa più leggera; esso viene montato in un involucro stagno, per isolare le armature dal contatto con l'acqua; la massa che vibra costituisce la chiusura dell'involucro.

Le basi di emettitori dei sonar sono composte da centinaia di questi idrofoni montati in modo che le masse vibranti formino un mosaico su tutta la loro superficie laterale.

Una base con queste caratteristiche può funzionare anche come sistema di

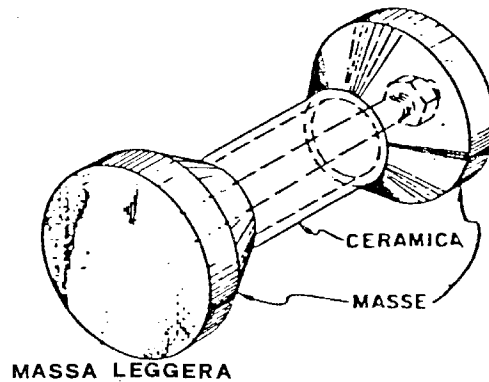


fig. 2.6 *Idrofono con masse*

ricezione, similmente alla base idrofonica di Fig. 1.7, ma essendo dimensionata per la frequenza di trasmissione stabilita dalle specifiche del sonar non è adatta a ricevere frequenze acustiche molto diverse da quella di progetto, pertanto, se il sonar deve ricevere i rumori irradiati dai bersagli in un ampio spettro di frequenze, si deve ricorrere all'impiego di due basi distinte.

2.4) Le caratteristiche di direttività degli idrofoni.

Nel paragrafo 2.2 abbiamo introdotto il concetto di "direttività", vediamo come esso si adatti a definire le caratteristiche degli idrofoni.

Si usa rappresentare le caratteristiche di direttività con diagrammi che sono molto perspicui all'osservatore; essi sono tracciati sul supporto grafico riportato in Fig. 2.7 (diagramma in coordinate polari).

Il supporto è formato da dieci cerchi concentrici equidistanti, secati da trentasei raggi, ciascuno disegnato ogni dieci gradi. Cerchiamo di chiarire come si utilizza il supporto per tracciare la caratteristica di direttività di un idrofono: se la sua capacità di ricevere il suono (sensibilità), ad esempio nel piano orizzontale, varia con la direzione di provenienza, basterà tracciare un punto per ogni raggio rappresentativo della direzione sul cerchio rappresentativo del livello della tensione generata in quella direzione; si raccorderanno poi i punti, vedi Fig. 2.8, in modo da ottenere un tracciato continuo. Il grafico ottenuto sarà la rappresentazione polare del comportamento della sensibilità dell'idrofono con il variare della direzione di provenienza del suono, cioè la caratteristica di direttività rilevata sul piano orizzontale. La parte del diagramma centrata sulla direzione di massima

sensibilità è chiamata lobo principale, le altre parti sono dette lobi secondari.

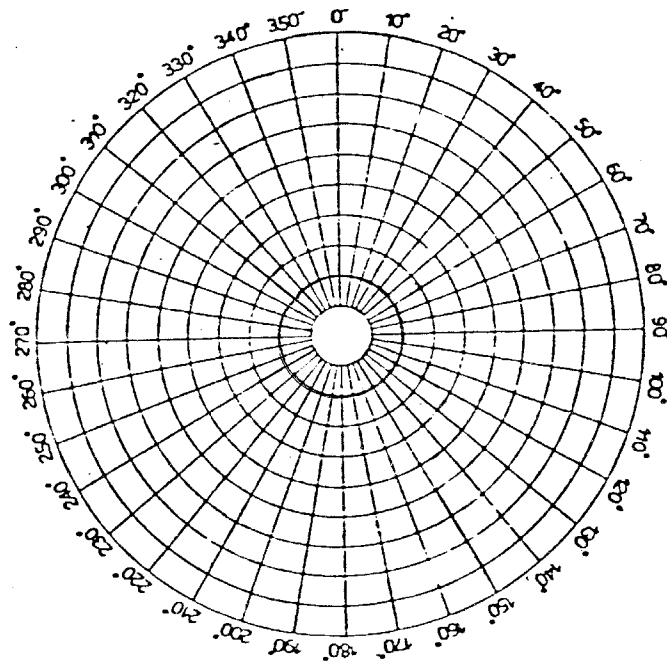


fig. 2.7 Tracciato di supporto per diagramma polare

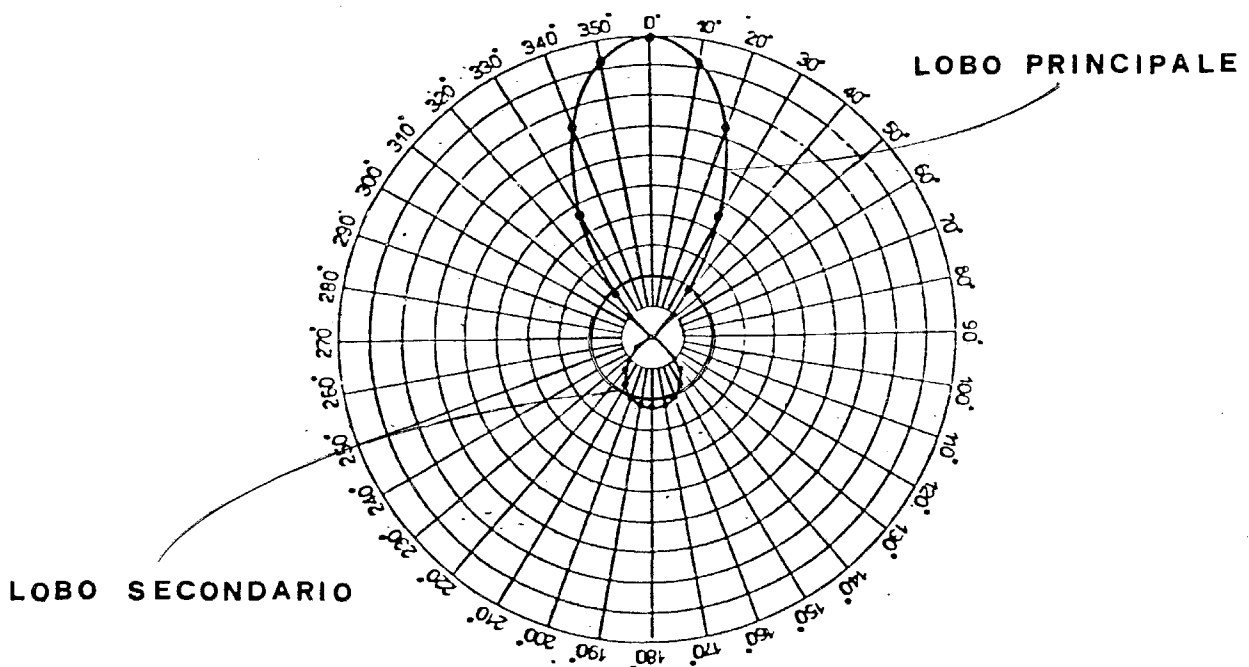


fig. 2.8. Caratteristica di direttività generica

Con una rapida occhiata ad un grafico di questo tipo si inquadra un fenomeno fondamentale nel funzionamento del sonar, che interessa, non soltanto gli idrofoni, ma anche, come vedremo, le basi di idrofoni e di emettitori.

Come esempio di ciò che è stato detto esaminiamo le caratteristiche di direttività dell'idrofono cilindrico cavo.

Nella Fig. 2.9/a è mostrata la caratteristica di direttività nel piano orizzontale: essa è rappresentata da un cerchio dato che l'idrofono riceve ugualmente il suono in tutte le direzioni del piano (vedi Fig. 2.9/b).

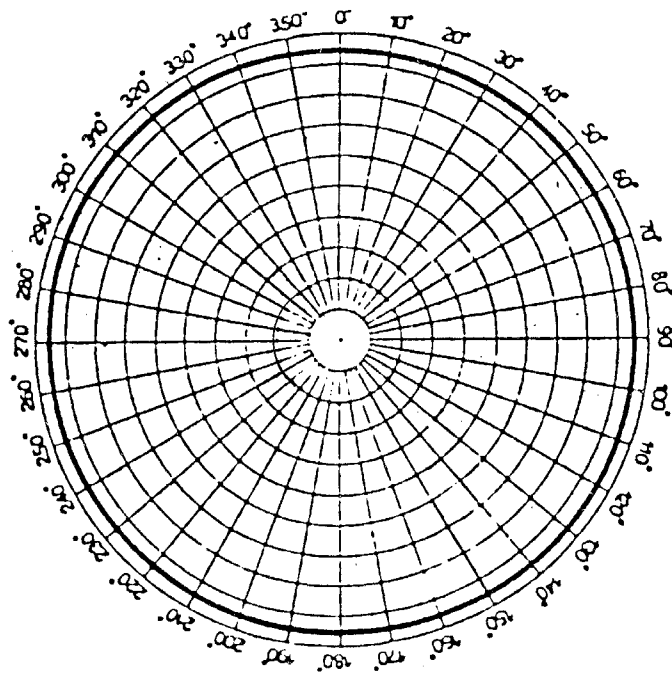


fig. 2.9/a Caratteristica di direttività orizzontale del cilindro cavo

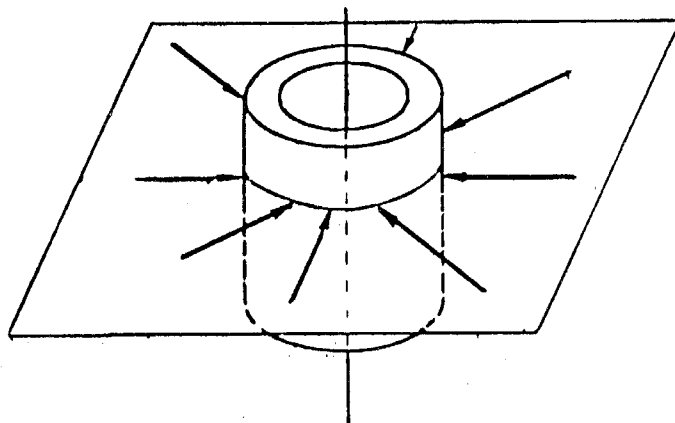


fig. 2.9./b Idrofono cilindrico cavo eccitato sulla superficie laterale

Nella Fig. 2.10/a ne è mostrata la caratteristica di direttività nel piano verticale; essa è rappresentata da una curva ad otto che indica le massime sensibilità nelle direzioni normali all'asse longitudinale e le minime nelle direzioni dell'asse, ciò è in linea con il comportamento dell'idrofono che capta poca energia acustica sull'asse longitudinale e massima energia sul corpo del cilindro (vedi Fig. 2.10/b).

È importante notare che la larghezza α dei lobi di direttività diventa tanto più piccola quanto più sono elevate le dimensioni longitudinali del cilindro.

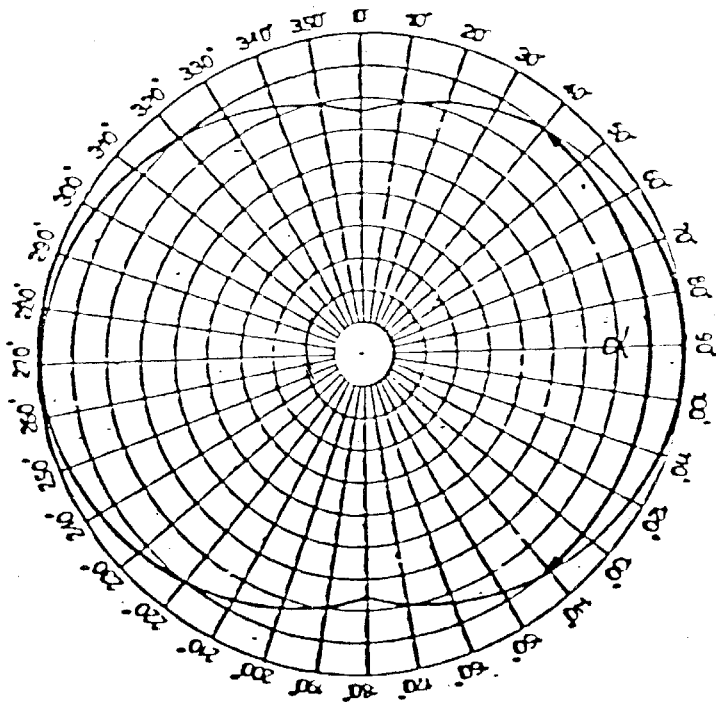


Fig. 2.10/a Caratteristica di direttività verticale del cilindro cavo

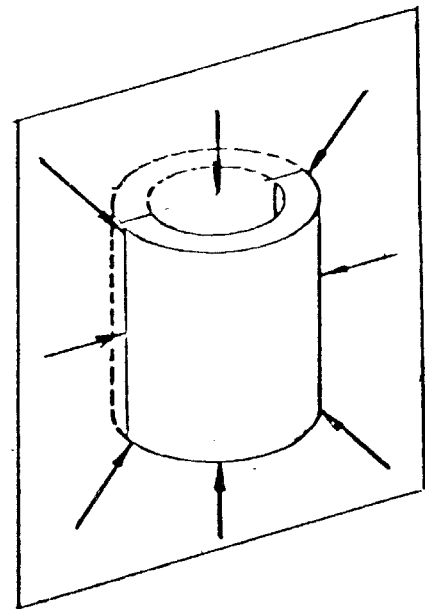


Fig. 2.10/b Idrofono cilindrico cavo eccitato secondo l'asse verticale

2.5) Dipendenza delle caratteristiche degli idrofoni dalla frequenza.

Le due caratteristiche degli idrofoni e degli emettitori acustici, sensibilità e direttività, sono influenzate dalla frequenza di lavoro.

La sensibilità in ricezione o quella in trasmissione variano al variare della

frequenza in dipendenza delle dimensioni e della struttura degli elementi. Gli idrofoni, che non hanno masse accessorie nella struttura, come il cilindro cavo ricevente, possono essere progettati per funzionare in un ampio campo di frequenze che va da poche decine a diverse migliaia di Hertz. Gli idrofoni aventi le masse accessorie, come il cilindro cavo emittente, possono essere progettati per funzionare in bande di frequenze relativamente strette.

I grafici che indicano come varia la sensibilità di un elemento, similmente alle curve che caratterizzano un amplificatore musicale ad alta fedeltà, sono chiamate curve di risposta; esse sono riportate in un sistema di assi cartesiani in cui sull'asse delle ascisse è rappresentata la frequenza e sull'asse delle ordinate la sensibilità che si associa a ciascun valore di frequenza.

In Fig. 2.11/a e 2.11/b sono tracciate le curve di risposta di due ipotetici idrofoni dei tipi ora menzionati.

SENSIBILITA

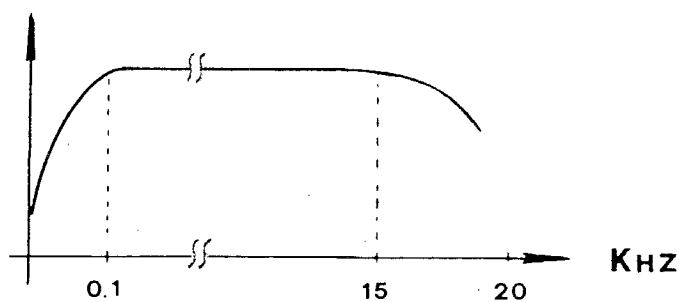


fig. 2.11/a
Curva di risposta
idrofono cilindrico

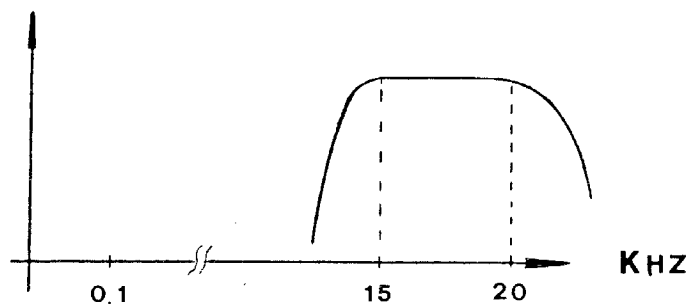


fig. 2.11/b
Curva di risposta
idrofono con masse

Dalle curve si osserva che questi idrofoni si possono impiegare nel tratto di sensibilità uniforme tra 100 e 15.000 Hertz nel caso di Fig. 2.11/a e nella banda di frequenze comprese da 15.000 a 20.000 Hertz nel caso di Fig. 2.11/b.

La scelta delle frequenze di lavoro e quindi del tipo di idrofoni è legata alle specifiche operative del sonar: se esso è progettato per la localizzazione di bersagli nel campo delle basse frequenze, la base idrofonica è formata da elementi che hanno una curva di risposta simile a quella di Fig. 2.11/a, se invece esso è progettato per la localizzazione di bersagli in un campo di frequenze ristretto, la base idrofonica è formata da elementi che hanno una curva di risposta simile a quella di Fig. 2.11/b.

Così come la sensibilità anche la caratteristica di direttività varia con il variare della frequenza di lavoro.

A parità di dimensioni la caratteristica di direttività diventa più stretta con l'aumentare della frequenza di lavoro; questo fenomeno è mostrato nelle Fig. 2.12/a e 2.12/b. In esse si nota che per la frequenza più alta Fig. 2.12/a il diagramma occupa un settore angolare più piccolo di quello occupato dal diagramma relativo alla frequenza bassa Fig. 2.12/b.

Dato che una buona direttività degli idrofoni è fattore positivo per il sonar, una volta fissate le frequenze di lavoro, per ragioni operative, per ottenere

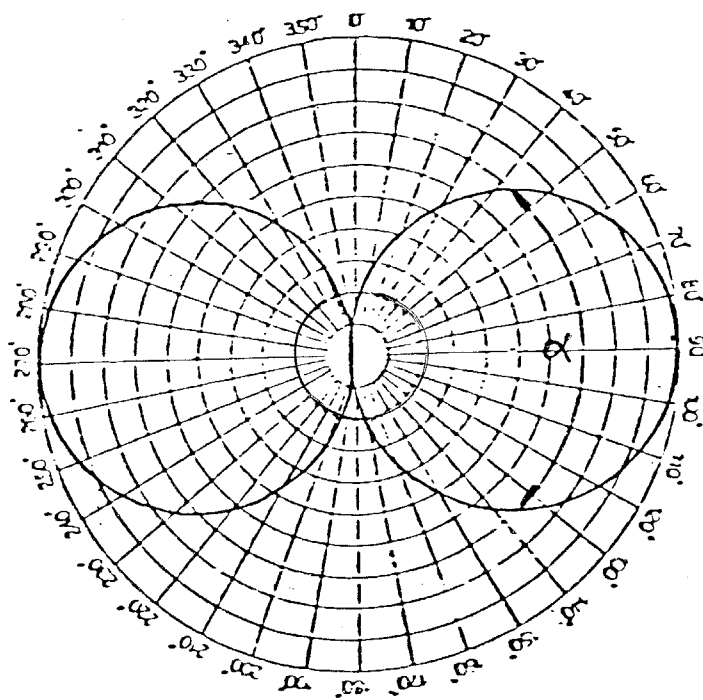


fig. 2.12/a *Caratteristica di direttività media*

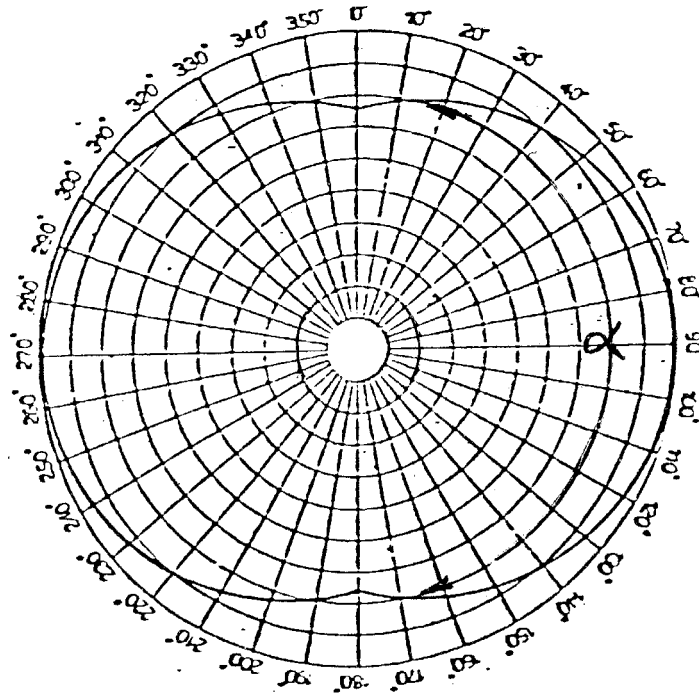


fig. 2.12/b Caratteristica di direttività larga

la direttività voluta non resta che aumentare le dimensioni degli elementi; essi però, per ragioni di carattere costruttivo, non possono avere dimensioni che superano certi limiti, perciò per ottenere il raggiungimento dell'obiettivo si raggruppano più elementi allineandoli in un unico supporto che è l'equivalente di un unico idrofono avente la lunghezza desiderata (vedi Fig. 2.13). Di ciò tratteremo diffusamente più avanti.

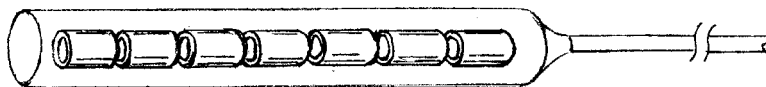


fig. 2.13 Idrofono composto da elementi cilindrici

2.6) La stazione lacuale per il collaudo degli idrofoni.

Gli idrofoni e gli emettitori acustici, una volta costruiti, necessitano di accurati collaudi nell'ambiente subacqueo nel quale sono destinati a funzio-

nare; per far ciò sono sorte le stazioni lacuali di misura. Con esse si sopprime alla necessità delle prove in mare che sono di difficile conduzione a causa del movimento ondoso e dei disturbi provocati dal traffico marittimo.

I piccoli laghi, se sufficientemente profondi, si prestano bene alla collocazione di stazioni galleggianti di misura: in essi il moto ondoso è praticamente inesistente ed il rumore ambiente è limitato a quello di natura biologica.

Le stazioni galleggianti sono attrezzate con strumenti elettronici in grado di misurare e registrare graficamente le piccole tensioni elettriche generate dagli idrofoni in prova, inoltre dispongono fuori bordo, dei supporti meccanici per immergere e posizionare tanto gli idrofoni da collaudare, quanto quelli che servono come campioni di misura.

Una possibile disposizione di tale attrezzatura è mostrata in Fig. 2.14, in essa si osserva:

- a) Un idrofono ricevente in fase di collaudo.
- b) Un emettitore di prova che genera onde acustiche per l'esecuzione delle misure.
- c) L'idrofono campione con il quale si controlla con precisione il livello della pressione incidente sull'idrofono in fase di collaudo.
- d) Un emettitore da collaudare, che, al momento opportuno, verrà calato in acqua al posto dell'emettitore b) e la cui pressione sarà controllata dall'idrofono campione.

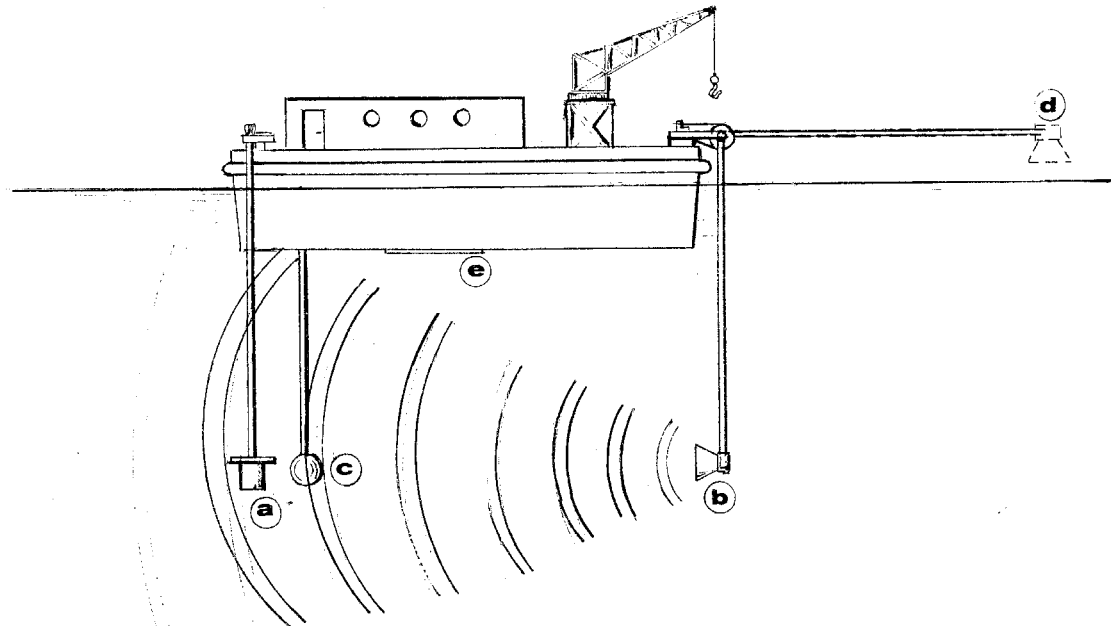


fig. 2.14 Stazione lacuale per misure acustiche

e) Pozzo per il collaudo delle basi idrofoniche.

Le tensioni elettriche generate dagli idrofoni in prova e dal campione sono applicate a speciali amplificatori che ne elevano l'ampiezza per consentire la misura e la successiva visualizzazione per il controllo accurato di tutte le caratteristiche degli elementi da collaudare.

Le procedure di misura degli idrofoni sono ostacolate dalle riflessioni che le onde acustiche emesse subiscono dalle sponde e dal fondo del lago, dalla superficie dell'acqua e dalla piattaforma galleggiante che alloggia la stazione. Questo fenomeno, che in mare aperto è meno sentito, dipende dalla relativa vicinanza degli idrofoni a tutto quello che li circonda.

Esso provoca il sovrapporsi delle onde acustiche dirette con quelle riflesse, sì da alterare i livelli di pressione ricevuta, che in tal modo non sono più rappresentativi delle caratteristiche degli idrofoni sotto controllo.

Per superare questa difficoltà le misure vengono condotte con una tecnica particolare: l'energia sonora, necessaria per il collaudo di un idrofono ricevente e per il collaudo di un emettitore, viene emessa ad impulsi molto corti, in modo che nel riceverli, si possa, visualizzandoli su di un oscilloscopio, stabilire qual è l'impulso proveniente per via diretta dall'emettitore e quali sono invece quelli dovuti all'eco dei dintorni. L'impulso diretto, vedi Fig. 2.15, è il primo a giungere all'idrofono ricevente e su di esso si eseguono le misure che interessano, gli impulsi successivi, che hanno livelli acustici alterati dalle riflessioni, non vengono considerati.

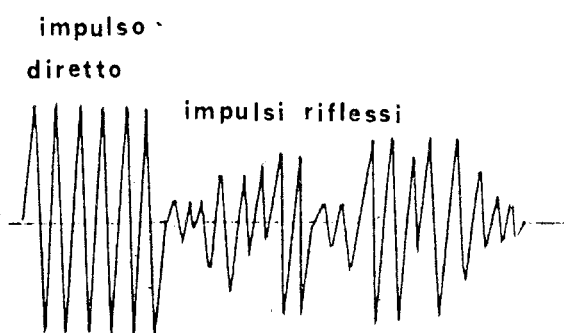


fig. 2.15 Impulso alterato da riflessioni

Nelle stazioni lacuali, seguendo sempre la tecnica delle misure con impulsi acustici, si collaudano anche le basi idrofoniche e le basi di emettitori prima della loro installazione a bordo dei sommergibili.

Questi collaudi sono molto laboriosi sia per le misure da eseguire che per i notevoli ingombri che devono essere spostati. Le stazioni dispongono di appositi pozzi (vedi Fig. 2.14) nella parte centrale della piattaforma galleggiante, nei quali vengono immerse, con adatti sostegni, le basi che devono essere provate.