I **sistemi sonar super direttivi** sono stati studiati per la sorveglianza dei porti navali al fine di scongiurare l'intrusione di semoventi ostili, sottomarini e di superficie.

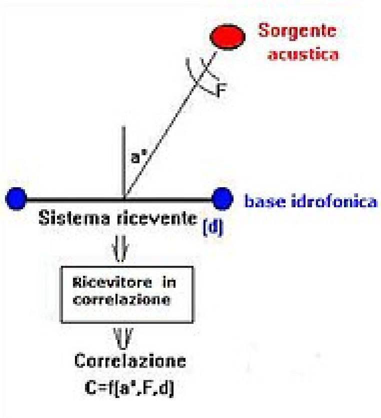
I sistemi super direttivi subacquei sono basi acustiche caratterizzate da una elevatissima **Risoluzione Angolare** che consente la scoperta della presenza contemporanea di bersagli, vicini tra loro, e molto lontani dalla base acustica di rilevamento.

L'alta risoluzione angolare s'identifica con direttività molto spinta della base idrofonica ; le basi in oggetto richiedono pertanto l'elaborazione dei segnali con ricevitori in correlazione e notevoli estensioni longitudinali.

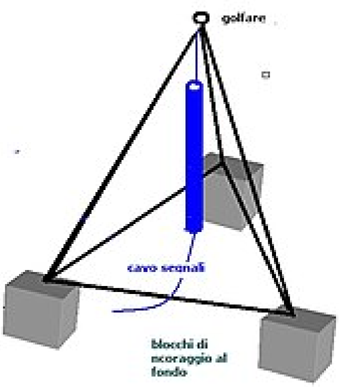
Per l'esplorazione contemporanea di tutto l'orizzonte subacqueo i sistemi super direttivi devono essere caratterizzati da strutture a fasci preformati.

Risoluzione angolare di una base idrofonica super direttiva

La funzione di correlazione $C(\tau) = C(a^\circ, F, d)$ che definisce la direttività in correlazione di una base idrofonica rettilinea, calcolata per due soli idrofoni, può essere rilevata con il sistema sperimentale mostrato nelle figure : a sinistra lo schema d'insieme della base acustica, a destra il sistema di ancoraggio di uno dei due idrofoni della base.



* Sistema sperimentale di misura.



Uno dei due ancoraggio sul fondo dell'idrofono (evidenziato in blu)

L'algoritmo che definisce l'andamento del segnale all'uscita del ricevitore in correlazione [1] è espresso da:

$$C(\tau) = \left[\frac{\sin(2\pi \cdot F_s \cdot \tau)}{(2\pi \cdot F_s \cdot \tau)}\right]$$

dove:

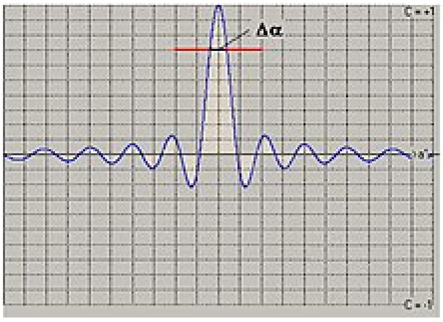
F_s = estremo superiore della banda $0 - F_s$ del ricevitore.

$\tau = d \cdot \sin(a^\circ)/c$

$d =$ lunghezza della base

$c = 1530m/Sec.$ velocità media del suono in mare

La $C(\tau)$ espressa dall'algoritmo può definire una curva di direttività della base in correlazione tracciata ad esempio, per generiche variabili, nel grafico:



Generica funzione di correlazione.

la larghezza del lobo principale $\Delta\alpha^\circ$ misurata a $-3dB$ sotto il picco massimo definisce il valore limite della risoluzione angolare.

La lunghezza e la frequenza di lavoro delle basi idrofoniche super direttive

Da dati sperimentali si è verificato che la lunghezza ottimale $[d]$, evidenziata in figura, non deve essere superiore a $1000m$.

Se l'ampiezza del sito da controllare è superiore a tale distanza devono essere utilizzati più sistemi direttivi.

Il campo delle frequenze di lavoro delle basi idrofoniche deve essere selezionato, sia in funzione delle portata di scoperta desiderate, sia dall'ampiezza voluta del $\Delta\alpha^\circ$.

Per il calcolo di $\Delta\alpha^\circ$ si deve procedere con la soluzione dell'equazione ottenuta uguagliando $C(\tau)$ al livello di $-3dB$ sotto il massimo: $C(\tau) = 0.707$, livello al quale deve corrispondere la larghezza $\Delta\alpha^\circ$ di $C(\tau)$.

Essendo la funzione $C(\tau)$ del tipo $\left[\frac{\sin(x)}{(x)}\right]$ si può scrivere l'equazione trascendente:

$$\left[\frac{\sin(x)}{(x)}\right] = 0.707$$

dove:

$$x = 2 \cdot \pi \cdot F_s \cdot \tau$$

La soluzione dell'equazione, per via analitica o tabellare, porta a:

$x = 1.4$, quindi

$x = 2 \cdot \pi \cdot F_s \cdot \tau$ = 1.4

essendo:

$\tau = (d/c) \cdot \sin(a^\circ)$ si ha:

$$2 \cdot \pi \cdot F_s \cdot (d/c) \cdot \sin(a^\circ) = 1.4$$

Quest'ultima equazione risolta in a° come funzione della distanza d e della frequenza F_s, per $c = 1530mSec$, porta alla seguente espressione di $\Delta\alpha^\circ$; in gradi sessagesimali misurata a $-3dB$ sotto al massimo:

$\Delta\alpha^\circ = 2 \cdot a^\circ$ = $2 \cdot \text{arcsin}[341/(F_s \cdot d)] \cdot (180^\circ/\pi)$

Come si vede dall'espressione ottenuta il $\Delta\alpha^\circ$ è tanto più piccolo quanto è elevato il valore della distanza d e/o della frequenza F_s; si avrà quindi la **Risoluzione Angolare** migliore per valori elevati delle variabili d e/o F_s.

Elaborazioni numeriche e grafiche introduttive

L'impiego dell'algoritmo:

$$\Delta\alpha^\circ = 2 \cdot \arcsin[341/(F_s \cdot d)] \cdot (180^\circ/\pi)$$

consente lo sviluppo di esempi numerici e grafici.

Esempio numerico e convalida grafica

Dati i seguenti valori delle variabili:

$$F_s = 1000 Hz$$

$$d = 100 m$$

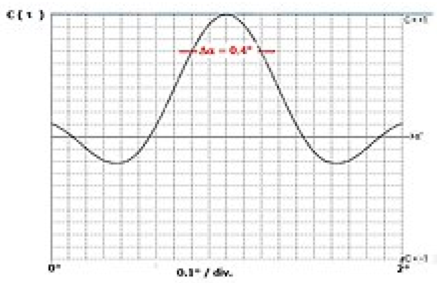
si calcoli il valore di $\Delta\alpha^\circ$

$$\Delta\alpha^\circ = 2 \cdot \arcsin[341/(1000 \cdot 100)] \cdot (180^\circ/\pi) = 0.39^\circ$$

Con le variabili dichiarate in precedenza si traccia, per la verifica dei calcoli, il grafico della:

$$C(\tau) = \left[\frac{\sin\left(2\pi \cdot F_s \cdot \tau\right)}{\left(2\pi \cdot F_s \cdot \tau\right)}\right]$$

dove $\tau = d \cdot \sin(a^\circ)/c$

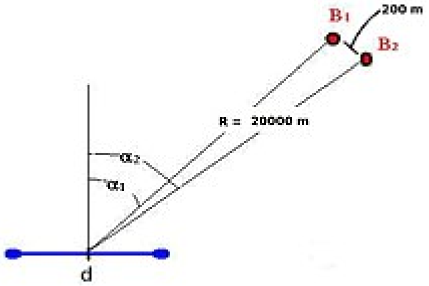


$C(\tau)$ direttività in correlazione

La curva mostra la direttività in correlazione della base idrofonica che a $-3dB$ sotto il massimo presenta un valore $\Delta\alpha \approx 0.4^\circ$ contro gli 0.39° calcolati per via numerica, la verifica dei calcoli è positiva. [2].

La soluzione del problema relativo alla determinazione della distanza d di una base super direttiva

L'esempio di calcolo si riferisce alla situazione operativa riportata in figura:



geometria per rilevamento di base super direttiva

dove è tracciata una possibile condizione geometrica che vede due bersagli B_1 e B_2, affiancati tra loro ad una distanza di $200m$ e distanti dalla base idrofonica di $20000m$.

I bersagli dovrebbero essere rilevabili angolarmente dalla base super direttiva secondo gli angoli [3]:

$\alpha_1 = 38^\circ$ per B_1

$\alpha_2 = 38.57^\circ$ per B_2

con una differenza angolare $\delta = 0.57^\circ$; il valore del $\Delta\alpha$ richiesto è pertanto: $\Delta\alpha = 0.57^\circ$ la lunghezza minima d che consente la discriminazione angolare richiesta si ottiene risolvendo in d l'equazione:

$\Delta\alpha^\circ$ = $2 \cdot \arcsin[341/(F_s \cdot d)] \cdot (180^\circ/\pi)$

$d = (341/F_s)/[\mathrm{sen}(\Delta\alpha^\circ \cdot \pi/360)]$

$d = (341/1000)/[\mathrm{sen}(0.57 \cdot \pi/360)]$ = $68m$

Verifica grafica del processo di calcolo della distanza d

La verifica della correttezza del calcolo si ha tracciando le due curve di direttività secondo la funzione:

$$C(\tau) = \left[\frac{\sin\left(2\pi \cdot F_s \cdot \tau\right)}{\left(2\pi \cdot F_s \cdot \tau\right)}\right]$$

dove:

per la prima curva:

$F_s = 1000Hz$

$\tau = d \cdot \sin(a^\circ)/c$

$d = 68m$

a° variabile da 37° a 39°

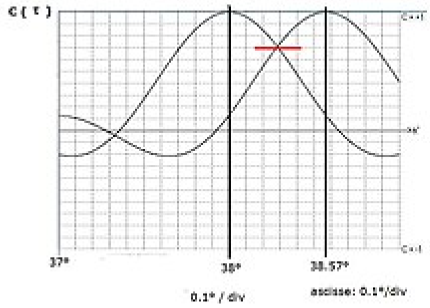
per la seconda curva:

$F_s = 1000 Hz$

$\tau = d \cdot \sin(a^\circ + 0.57^\circ)/c$

$d = 68 m$

a° variabile da 37° a 39°



I due lobi di direttività in correlazione

L'intersezione delle curve, indicata con tratto rosso, a livello $-3 dB$ rispetto ai massimi, rispettivamente per $a_1 = 38^\circ$ e $a_2 = 38.57^\circ$, conferma la validità del processo numerico che ha risolto il problema del calcolo della distanza d da assegnare alla coppia d'idrofoni che formano la base di scoperta.

Algoritmo per ricezione in correlazione nella banda $F_1 - F_2$

Se i segnali ricevuti dalla base idrofonica sono definiti in bande di frequenze comprese tra F_1 e F_2 l'algoritmo in correlazione $C(\tau) = C(a^\circ, Fs, d)$, visto all'inizio, diventa $C(\tau) = C(a^\circ, F_1, F_2, d)$; la sua espressione esplicita è:

$$C(\tau) = \left[\frac{\sin\left(2\pi \cdot DF \cdot \tau\right)}{\left(2\pi \cdot DF \cdot \tau\right)} \cos\left(2\pi \cdot F_o \cdot \tau\right)\right]$$ [4]

dove:

$\tau = d \cdot \sin(a^\circ)/c$

DF = metà della larghezza di banda del ricevitore che definisce i segnali; $DF = [F_2 - F_1]/2$

F_o = frequenza media della banda: $F_0 = [F_1 + F_2]/2$

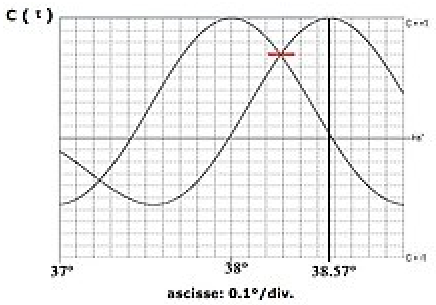
Data la complessità della funzione la soluzione del problema relativo alla determinazione della distanza d di una base super direttiva non può essere affrontato con metodi semplici, una possibile soluzione è fattibile con routine di calcolo di tipo iterativo che consentono di ottenere la soluzione dopo un ragionevole numero di tentativi.

Un esempio di calcolo della distanza d, tramite processo iterativo sviluppato con grafico, per segnali in banda $F_1 - F_2$ è mostrato in figura secondo i dati:

$F_1 = 1000Hz$, $F_2 = 4000Hz$

per le direzioni: $38°$ e $38.57°$

Il valore della distanza è stato valutato in : $d = 15m$



I due lobi di direttività in correlazione in banda $F_1 F_2$

Il valore calcolato del d mostra come, variando la banda di frequenze del ricevitore, si possa ridurre la lunghezza della base a parità di ampiezza del $\Delta\alpha°$.

Note

1. ^ Correlazione analogica per segnali idrofonici in banda $0 - F_s$
2. ^ La differenza tra i due valori dipende dalla difficoltà di rilevare con precisione il valore del $\Delta\alpha°$ sul grafico
3. ^ L'apiezza dell'angolo $\alpha_1 = 38°$ è stata assunta casualmente, l'angolo α_2 è invece una conseguenza di α_1 e della distanza tra la base idrofonica e i bersagli ($20000m$) e della distanza tra i due semoventi ($200m$) secondo l'espressione: α_2 = $\alpha_1 + \arcsin(200m/20000m)$ = $38° + 0.57°$ = $38.57°$
4. ^ Algoritmo di correlazione analogica nella banda di frequenze comprese tra $F_1 - F_2$

Bibliografia

- J. Faran Jr e Robert Hills Jr, *Correlators for signal reception*, in Office of Naval Research (contract n5 ori-76 project order x technical memorandum no. 27), Cambridge, Massachusetts, Acoustics Research Laboratory Division of Applied Science Harvard University, 1952.

- P. Mozzanti, *Il monitoraggio degli spostamenti con Interferometria SAR Terrestre,* GEOmedia n°1-2012
- C. Del Turco, *La correlazione* , Collana scientifica ed. Moderna La Spezia,1993