

FALCON

STUDIO DI UN SISTEMA DI FASCI ACUSTICI PER LOCALIZZAZIONE A
COERENZA D'ONDA NATURALE

Cesare Del Turco

già Dirigente Alenia Elsag Sistemi Navali
Consulente per i sistemi di localizzazione subacquea

INDICE

- 1) INTRODUZIONE
 - 2) PRINCIPI GENERALI
 - 3) GEOMETRIE
 - 4) IL MECCANISMO PER LA FORMAZIONE DEL FASCIO SULL'ASSE
 - 5) I FASCI PER LE DIREZIONI PASSANTI PER LE COPPIE CONTIGUE DI IDROFONI
 - 6) I FASCI PER LE DIREZIONI PASSANTI PER IL CENTRO DEGLI IDROFONI
 - 7) LA SECONDA VARIABILE FONDAMENTALE
 - 8) LE FUNZIONI DI CORRELAZIONE ELEMENTARI
 - 9) CALCOLO DELLE FUNZIONI DI CORRELAZIONE COMPLESSIVE
 - 11) IL MODELLO NUMERICO CARATTERIZZANTE IL SISTEMA FALCON
 - 12) LA CARATTERISTICA FONDAMENTALE DELLE FUNZIONI DIGITALI
 - 7) TABELLA 1 - Valori degli argomenti per fasci centrati tra copie
 - 8) TABELLA 2 - Valori degli argomenti per fasci centrati su idrofono
 - 14) MATRICE DI CONVERSIONE
 - 3) Figura 1 (geometria circolare)
 - 4) Figura 2 (modello di correlazione analogico)
 - 5) Figura 3 (geometria dei fasci passanti tra coppie)
 - 5) Figura 4 (geometria dei fasci passanti su idrofono)
 - 6) Figura 5 (ritardo funzione di α)
 - 8) Figura 6 (curve di direttività del processo analogico)
 - 9) Figura 7 (modello di correlazione digitale)
 - 10) Figura 8 (curve di direttività del processo digitale)
 - 16) Figura 9 (curva caratteristica di $C_c = f(S/N)$)
- APPENDICE
- 17) A1 - VALUTAZIONI DEL RAPPORTO S_u/N_u ALL'USCITA DEL FALCON
 - 18) A2 - IL COMPORTAMENTO DEL FALCON CON SEGNALI MONOCROMATICI
 - 18) Figura 1/a (comparazione tra direttività con segnali monocromatici)

1) INTRODUZIONE

Il presente studio illustra un particolare sistema di fasci preformati utilizzabile nei sonar per la scoperta video di sorgenti di rumore idrofonico.

Il sistema denominato FALCON (Fasci Acustici per Localizzazione a Coerenza d'Onda Naturale) è applicabile ai sonar dotati di basi riceventi circolari e le sue peculiarità consistono nell'assenza totale, sia di conversione A/D, sia di sistemi di ritardo per la rimessa in coerenza dei segnali elettrici che concorrono alla composizione dei fasci video.

Con il FALCON si realizzano componenti di scoperta idrofonica molto economiche e compatte che si adattano con gran semplicità a basi circolari di varie dimensioni operanti in qualsiasi banda di frequenze; queste componenti possono essere utilizzate come sistemi ausiliari dei sonar operativi.

2) PRINCIPI GENERALI

Il progetto FALCON si basa su alcune osservazioni ed intuizioni qui di seguito esposte:

se un'onda acustica proveniente da una sorgente colpisce una base idrofonica circolare a n elementi, le tensioni presenti ai capi delle coppie degli nf trasduttori, simmetricamente disposti secondo la direzione della sorgente, sono portatrici delle informazioni relative al grado di coerenza esistente tra i sensori delle coppie stesse; tali informazioni sono evidentemente presenti anche negli nf segnali ottenuti dalla limitazione d'ampiezza delle menzionate tensioni.

Si dimostra che il numero Y a nf bit ottenuto componendo **sequenzialmente** i segni istantanei delle nf tensioni limitate esprime la somma dei valori di correlazione esistente tra le $nf/2$ coppie di trasduttori; Y rappresenta pertanto la direttività in correlazione del fascio acustico centrato a cavallo del gruppo di idrofoni.

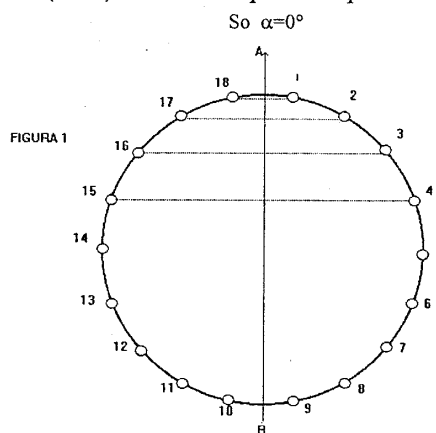
La dimostrazione di quanto affermato richiede un'analisi della filosofia FALCON secondo il seguente percorso: \rightarrow 1°) Esposizione dei principi di formazione fasci FALCON mediante modelli analogici, 2°) passaggio dai sistemi analogici ai modelli digitali, 3°) passaggio dai sistemi digitali alla formazione fasci mediante modelli numerici implementabili su personal computer per la valutazione del numero Y .

3) GEOMETRIE

Il sistema FALCON si avvale delle geometrie circolari delle basi idrofoniche così come mostrato in figura 1.

Nella figura sono indicate le coppie di sensori acustici che formano, a titolo di esempio, una base circolare costituita da 18 idrofoni; dal numero 1 al numero 9 sulla destra rispetto all'asse A-B della base, e dal numero 18 al numero 10 sulla sinistra rispetto all'asse AB.

In questa geometria l'asse AB è, per costruzione, angularmente equidistante dagli idrofoni delle coppie (1-18), (2-17), ..., (9-10); grazie a questa simmetria una sorgente idrofonica S_0 che fosse posta nella direzione dell'asse AB, verso il lato A colpirebbe con il proprio rumore, in modo coerente, le coppie di idrofoni (1-18), (2-17), (3-16), (4-15), ritenendo, ragionevolmente, che le altre coppie, dalla (5-14) alla (9-10) non siano più utili per la ricezione del suono nella direzione dell'asse sul lato A.



Da quest'osservazione si evince che computando le funzioni di correlazione analogica, indipendentemente, tra le tensioni idrofoniche delle singole coppie di sensori ciascuna funzione darà il massimo grado di correlazione quando la sorgente di rumore sarà disposta secondo la direzione individuata dall'asse della base.

4) IL MECCANISMO PER LA FORMAZIONE DEL FASCIO SULL'ASSE

Come anticipato alla fine del paragrafo 2) s'inizia il percorso per l'analisi della filosofia FALCON mediante modelli analogici di elaborazione dei segnali in correlazione, riportati, sia nel presente paragrafo, sia nei paragrafi 5), 6), 7), 8), 9).

Per la formazione del primo fascio direttivo FALCON, centrato sull'asse AB della base, si computano le funzioni di correlazione elementari $C_{x-y}(\alpha)$ tra i segnali idrofonici generati dalle coppie di idrofoni simmetrici:

La coppia (1-18) darà $C_{1-18}(\alpha)$

La coppia (2-17) darà $C_{2-17}(\alpha)$

La coppia (3-16) darà $C_{3-16}(\alpha)$

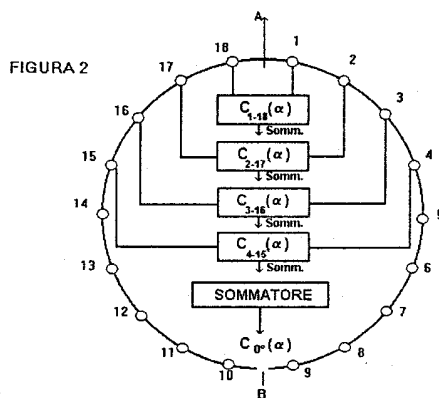
La coppia (4-15) darà $C_{4-15}(\alpha)$

Dove $C_{x-y}(\alpha)$ è l'espressione implicita della funzione di correlazione elementare ed α è l'angolo formato tra la posizione della sorgente S_0 e l'asse AB della base; in questo caso $\alpha=0^\circ$.

Come detto in precedenza ciascuna di queste funzioni fornirà il massimo grado di correlazione per sorgente idrofonica posta in direzione dell'asse della base; mentre il grado di correlazione di ciascuna funzione decrescerà nel caso che la sorgente si sposti a destra o a sinistra rispetto all'asse della base. E' naturale che questo primo risultato si ottenga senza impiegare unità di ritardo temporali dato che le tensioni idrofoniche, prese a coppie, sono naturalmente coerenti tra loro quando la sorgente è disposta sull'asse della base.

Proseguendo nella costruzione del fascio preformato sull'asse, sommiamo tra loro le quattro funzioni di correlazione elementari secondo lo schema convenzionale di figura 2; all'uscita del sommatore in c.c. otteniamo una curva di correlazione complessiva che rappresenta, come vedremo, la direttività $C_{0^\circ}(\alpha)$ della base verso il lato A. Anche quest'ultima operazione, essendo sviluppata con le tensioni continue dovute alle funzioni di correlazione elementari, non richiede ovviamente alcun ricorso ad unità di ritardo temporali, questa è una delle peculiarità del FALCON.

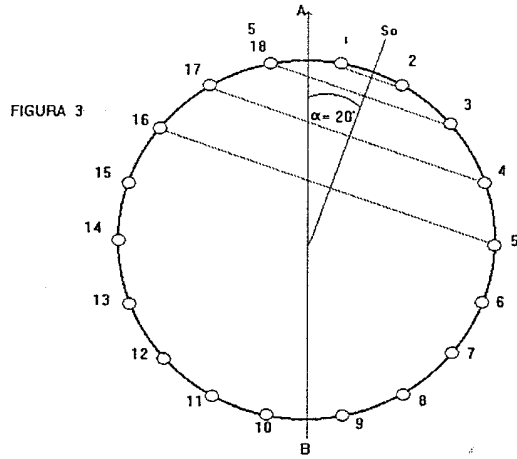
Tutti i circuiti di figura 2, presi a modello per la formazione del fascio, sono di tipo analogico.



E' utile osservare che le funzioni di correlazione elementari, scaturendo da coppie di idrofoni diversamente distanziati tra loro, hanno, per gli stessi valori di α , derivate diverse pur mostrando lo stesso andamento in dipendenza di α .

5) I FASCI PER LE DIREZIONI PASSANTI PER LE COPPIE CONTIGUE DI IDROFONI

Analogamente a come è stato impostato il fascio per la direzione sull'asse AB (per $\alpha = 0^\circ$) sono facilmente impostabili i fasci centrati sulle direzioni simmetriche alle coppie di idrofoni per gli angoli: $\alpha = 20^\circ$; $\alpha = 40^\circ$; $\alpha = 60^\circ$; , $\alpha = 340^\circ$, ciò è mostrato nella figura 3 per $\alpha = 20^\circ$.



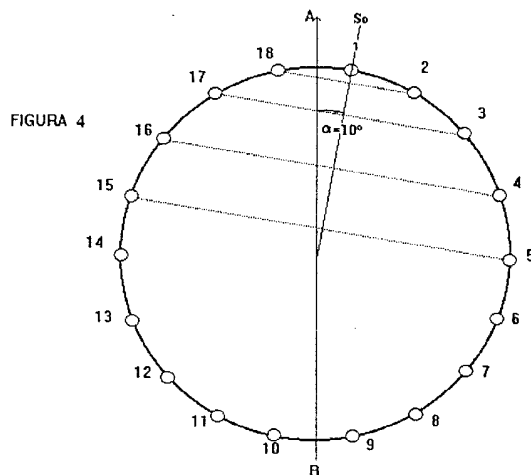
Se il fascio che si vuole realizzare è ora distante 20° dall'asse della base, sul lato A, si dovranno considerare coppie di idrofoni simmetriche a questa nuova direzione e precisamente:

(2-1), (3-18), (4-17), (5-16), per ottenere rispettivamente le funzioni di correlazione elementari $C_{2-1}(\alpha)$, $C_{3-18}(\alpha)$, $C_{4-17}(\alpha)$, $C_{5-16}(\alpha)$ che sommate tra loro, mediante un circuito identico a quello di figura 2, daranno la funzione di correlazione complessiva $C_{20^\circ}(\alpha)$ con il massimo per la sorgente disposta per $\alpha = 20^\circ$.

Data la simmetria della base la funzione di correlazione $C_{20^\circ}(\alpha)$ sarà identica alla funzione $C_0(\alpha)$ sull'asse. In modo analogo al fascio per la direzione 20° si ottengono tutti gli altri fasci per direzioni simmetriche alle coppie di idrofoni. Naturalmente per ogni nuova direzione è necessario computare quattro $C_{x-y}(\alpha)$ e sommarle tra loro per ottenere il fascio interessato.

6) I FASCI PER LE DIREZIONI PASSANTI PER IL CENTRO DEGLI IDROFONI

Per realizzare un maggior numero di fasci preformati FALCON, onde ottenere migliori condizioni di interpolazione spaziale, si possono sfruttare le coppie di idrofoni simmetriche rispetto ad un terzo elemento sensibile come indicato in figura 4, dove i fasci sono ora centrati sulle posizioni angolari degli idrofoni e le coppie che si andranno a correlare saranno, per la direzione $\alpha=10^\circ$ ad esempio, (2-18), (3-17), (4-16), (5-15).



Anche in questo caso per ogni fascio (10°, 30°, 50°, ecc.) si dovranno computare e sommare tra loro le funzioni di correlazione elementari per ottenere le $C_{10^\circ}(\alpha)$, $C_{30^\circ}(\alpha)$, $C_{50^\circ}(\alpha)$, ecc.

Le funzioni di correlazione complessive ottenute in questo modo hanno pendenze superiori rispetto alle precedenti, perché sono il risultato di somme di funzioni di correlazione elementari che scaturiscono da coppie di idrofoni maggiormente distanziati tra loro.

7) LA SECONDA VARIABILE FONDAMENTALE

Nelle espressioni delle funzioni di correlazione elementari e complessive, riportate in precedenza, è stata volutamente indicata una sola variabile, l'angolo α , al fine di rendere le espressioni stesse più semplici ed intuitive dato che è evidente come da questa variabile dipenda la coerenza delle tensioni idrofoniche delle singole coppie di sensori.

Le funzioni di correlazione dipendono però anche dalla banda di frequenze dei segnali idrofonici ricevuti, è quindi più corretto ed utile per gli sviluppi che andremo a proporre, indicare le funzioni di correlazione con le seguenti notazioni:

Funzioni di correlazione elementare $C_{x-y}(\alpha; F)$

Funzioni di correlazione complessive $C_{\alpha^\circ}(\alpha; F)$

8) LE FUNZIONI DI CORRELAZIONE ELEMENTARI

L'espressione esplicita della funzione di correlazione tra due segnali elettrici, definiti nella banda compresa tra 0 e F è data da:

$$C(\alpha; F) = \frac{\text{Sen}(2 \pi F r)}{(2 \pi F r)} \quad 1)$$

Dove r è il ritardo temporale di cui è affetto uno dei due segnali rispetto all'altro.

Nel nostro caso è necessario esprimere il ritardo temporale r in funzione dell'angolo α ; ciò si ottiene con l'ausilio della figura 5 nella quale sono disegnati una coppia generica x, y di idrofoni della base e la conseguente geometria dovuta all'inclinazione α della direzione della sorgente sonora S_0 rispetto all'asse AB.

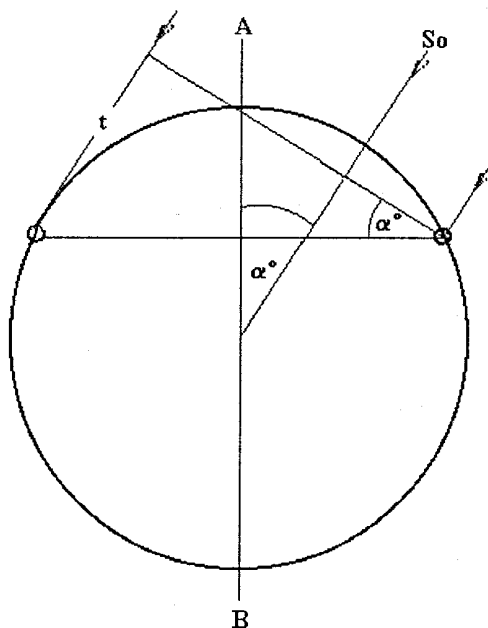


FIGURA 5

Dalla figura si ha $t = xy \text{ Sen } \alpha$ e per conseguenza :

$$r = \frac{xy \text{ Sen } \alpha}{c}$$

dove con la lettera c s'indica la velocità media del suono nell'acqua (1530 m/Sec.)

La 1) può pertanto essere scritta in funzione di α come segue:

$$C_{x-y}(\alpha ; F) = \frac{\text{Sen} \left(\frac{2 \pi F xy \text{ Sen } \alpha}{c} \right)}{\left(\frac{2 \pi F xy \text{ Sen } \alpha}{c} \right)} \quad 2)$$

9) CALCOLO DELLE FUNZIONI DI CORRELAZIONE COMPLESSIVE

Le funzioni di correlazione complessive FALCON sono indicate con $C_{\alpha=\eta}(\alpha;F)$ dove η è la direzione del fascio; per il calcolo di queste relative a due fasci adiacenti, ad esempio $\alpha = 0^\circ$ e $\alpha = 10^\circ$, quali quelle in uscita dal sommatore di figura 2, s'ipotizza, come modello, una struttura con le seguenti caratteristiche:

- *base ricevente circolare del diametro di 1 metro
- *numero dei sensori idrofonici della base $n = 18$
- *banda delle frequenze di ricezione da 0 a 6000 Hz.
- *composizione di $m = 36$ fasci, un fascio ogni 10° .
- *numero dei sensori idrofonici per fascio $nf = 8$

Per ottenere le funzioni volute si utilizza, in 4 impostazioni diverse, la formula 2) nella quale s'inseriscono, sia le distanze xy tra gli idrofoni interessati, sia la banda di lavoro in una sommatoria di 4 funzioni elementari come di seguito indicato:

$$C_{0^\circ}(\alpha ; F) = C_{1-18}(\alpha;F) + C_{2-17}(\alpha;F) + C_{3-16}(\alpha;F) + C_{4-15}(\alpha;F)$$

$$C_{10^\circ}(\alpha ; F) = C_{2-18}(\alpha;F) + C_{3-17}(\alpha;F) + C_{4-16}(\alpha;F) + C_{5-15}(\alpha;F)$$

Si calcolano i valori dei 4 argomenti $\left(\frac{2 \pi F xy \text{ Sen } \alpha}{c} \right)$

in dipendenza dei 4 valori di xy, di $F= 6000$ Hz e di $c=1530$; i risultati sono riportati per il fascio a 0° e per il fascio a 10° rispettivamente nella tabella 1 e nella tabella 2

TABELLA 1

Funzione elementare	Coppie idrofoni	Segmento xy	Lunghezza xy	Argomento
$C_{1-18}(\alpha;F)$	(1- 18)	1-18	0.173	$4.262 \text{ Sen } \alpha$
$C_{2-17}(\alpha;F)$	(2 - 17)	2-17	0.500	$12.319 \text{ Sen } \alpha$
$C_{3-16}(\alpha;F)$	(3 -16)	3-16	0.766	$18.874 \text{ Sen } \alpha$
$C_{4-15}(\alpha;F)$	(4 -15)	4-15	0.939	$23.137 \text{ Sen } \alpha$

TABELLA 2

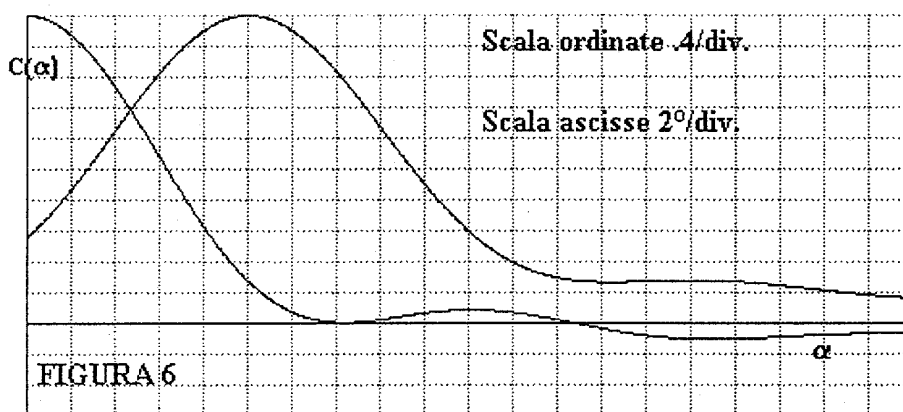
Funzione elementare	Coppie idrofoni	Segmento xy	Lunghezza xy	Argomento
C2-18(α ;F)	(2- 18)	2-18	0.342	8.426 Sen α
C3-17(α ;F)	(3 - 17)	3-17	0.642	15.818 Sen α
C4-16(α ;F)	(4 -16)	4-16	0.866	21.338 Sen α
C5-15(α ;F)	(5 -15)	5-15	0.984	24.245 Sen α

Con i dati delle tabelle s'impostano infine le funzioni di calcolo complessive :

$$C_{0^\circ}(\alpha ;F) = [\text{Sen} (4.227 \text{ Sen } \alpha) / (4.227 \text{ Sen } \alpha)] + [\text{Sen} (12.217 \text{ Sen } \alpha) / (12.217 \text{ Sen } \alpha)] + \\ + [\text{Sen} (18.716 \text{ Sen } \alpha) / (18.716 \text{ Sen } \alpha)] + [\text{Sen} (22.944 \text{ Sen } \alpha) / (22.944 \text{ Sen } \alpha)]$$

$$C_{10^\circ}(\alpha ;F) = [\text{Sen} (8.426 \text{ Sen } \alpha) / (8.426 \text{ Sen } \alpha)] + [\text{Sen} (15.818 \text{ Sen } \alpha) / (15.818 \text{ Sen } \alpha)] + \\ + [\text{Sen} (21.338 \text{ Sen } \alpha) / (21.338 \text{ Sen } \alpha)] + [\text{Sen} (24.245 \text{ Sen } \alpha) / (24.245 \text{ Sen } \alpha)]$$

I risultati dei calcoli di $C_{0^\circ}(\alpha ;F)$ e $C_{10^\circ}(\alpha ;F)$ per α variabile da 0 a 40° sono mostrati nel grafico di figura 6,



Le curve presentano le seguenti caratteristiche:

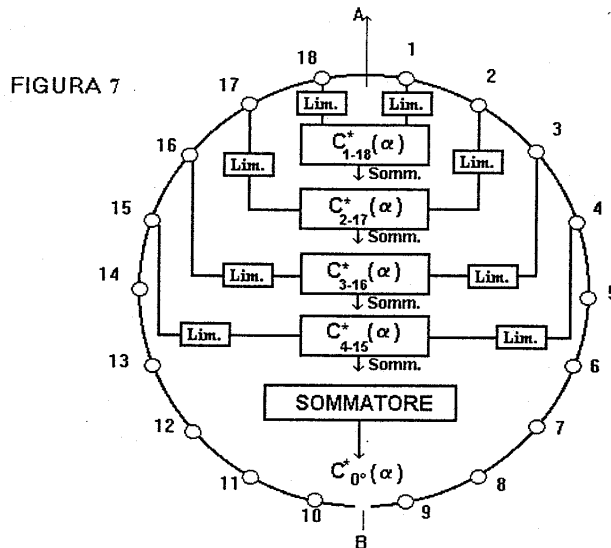
- *Il massimo nelle direzioni al centro dei fasci è rispettivamente per $\alpha = 0^\circ$ e $\alpha = 10^\circ$.
- *Le ampiezze massime sono uguali a 4 dato che ciascuna funzione elementare ha ampiezza 1.
- *Le due curve, in conformità al numero dei fasci previsti, uno ogni 10° , si sovrappongono ad una larghezza dei lobi di circa 5° , ad un'ampiezza di circa -3 dB.
- *I rapporti tra lobi principali e lobi secondari sono superiori a 13 dB.
- *La regolarità dei grafici ha il profilo classico delle direttività della base.

Dall'esame condotto mediante l'impiego del modello di trattamento segnali di tipo analogico, si ha la conferma della validità del processo di formazione fasci del sistema FALCON; è necessario ora verificare il sistema mediante il modello di trattamento digitale.

10) LE FUNZIONI DI CORRELAZIONE PER SEGNALI LIMITATI D'AMPIEZZA

Come anticipato alla fine del paragrafo 2) il percorso per l'analisi della filosofia FALCON procede mediante modelli digitali a logica sparsa.

Un modello di formazione fascio in correlazione digitale FALCON è riportato nella figura 7, la struttura è simile a quella già mostrata in figura 2 ma tutti i blocchi, ad esclusione del sommatore, sono diversi; ciascun sensore che partecipa alla formazione del fascio è seguito da un blocco di limitazione d'ampiezza, i correlatori digitali sono distinti con il simbolo $C^*_{xy}(\alpha)$ che li differenzia



formalmente dai correlatori analogici distinti dal simbolo $C_{xy}(\alpha)$.

La funzione di correlazione digitale elementare, per segnali in banda di frequenza 0-F, è espressa da:

$$C^*_{x-y}(\alpha; F) = (2/\pi) \text{Arcsen} \left[\left(\frac{1}{1 + (1/K)} \right) \frac{\text{Sen} \left(\frac{2 \pi F_{xy} \text{Sen} \alpha}{c} \right)}{\left(\frac{2 \pi F_{xy} \text{Sen} \alpha}{c} \right)} \right] \quad 3)$$

dove $K = (S/N)^2$ e S/N è il rapporto segnale disturbo all'ingresso del correlatore elementare.

Nella formula 3) si è voluto evidenziare il rapporto tra il segnale S ed il disturbo N allo scopo di poter mostrare come la 3), pur vistosamente diversa dalla 2), può assumere nel pratico impiego la stessa legge di variazione della 2); ciò consente di confrontare le curve di direttività del fascio ottenuto con modello analogico, con le curve del fascio ottenuto con modello digitale.

E' opportuno ricordare che la correlazione tra due segnali limitati in ampiezza si ottiene, semplicemente, mediante il computo della xor tra loro e la successiva integrazione del risultato dell'operazione logica.

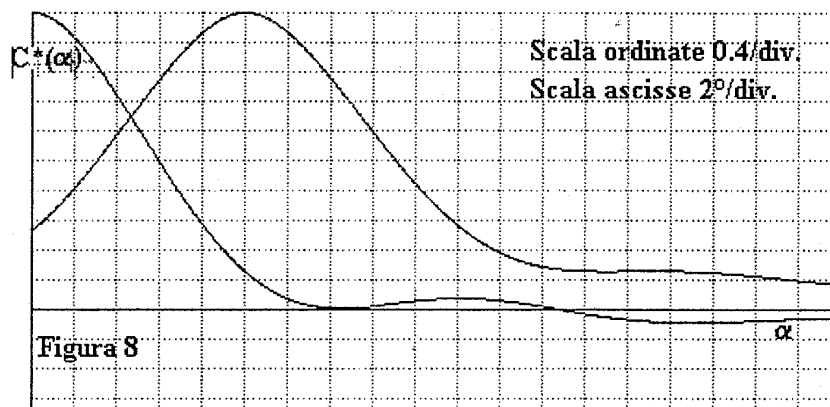
Similmente alla costruzione delle funzioni di correlazione complessiva per i fasci analogici le funzioni complessive digitali $C^*_{\alpha=\eta}(\alpha;F)$ sono date dalla somma di 4 termini del tipo 3) ; si ha infatti:

$$C^{*0^\circ}(\alpha;F) = 1.695 [C^{*1-18}(\alpha;F) + C^{*2-17}(\alpha;F) + C^{*3-16}(\alpha;F) + C^{*4-15}(\alpha;F)]$$

$$C^{*10^\circ}(\alpha;F) = 1.695 [C^{*2-18}(\alpha;F) + C^{*3-17}(\alpha;F) + C^{*4-16}(\alpha;F) + C^{*5-15}(\alpha;F)]$$

Il calcolo delle funzioni $C^{*0^\circ}(\alpha;F)$ e $C^{*10^\circ}(\alpha;F)$ si sviluppa, sia utilizzando le tabelle 1 e 2 dato che gli argomenti delle $C^{*x-y}(\alpha;F)$ sono uguali agli argomenti delle $C_{x-y}(\alpha;F)$, sia introducendo un valore adatto di S/N; dato che nella quasi totalità dei casi di pratico impiego il valore di S/N è inferiore a 2 si assume $S/N=2$; la presenza del rapporto S/N richiede la normalizzazione della $C^{*x-y}(\alpha;F)$ che nel nostro caso impone un coefficiente pari a 1.695.

I risultati dei calcoli di $C^{*0^\circ}(\alpha;F)$ e $C^{*10^\circ}(\alpha;F)$ per α variabile da 0 a 40°, sono mostrati nel grafico di figura 8.



Le curve presentano le seguenti caratteristiche:

- *Il massimo nelle direzioni al centro dei fasci è rispettivamente per $\alpha = 0^\circ$ e $\alpha = 10^\circ$.
- *Le ampiezze massime sono uguali a 4 dato che ciascuna funzione elementare ha ampiezza 1.
- *Le due curve, in conformità al numero dei fasci previsti, uno ogni 10° , si sovrappongono ad una larghezza dei lobi di circa 5° , ad un livello di poco inferiore a -3 dB..
- *I rapporti tra lobi principali e lobi secondari sono superiori a 13 dB.
- *La regolarità dei grafici ha il profilo classico delle direttività della base.
- *I profili sono praticamente sovrapponibili a quelli delle direttività ottenute con trattamento analogico mostrate in figura 6.

Dall'esame condotto mediante l'impiego del modello di trattamento segnali di tipo digitale, si ha sia la seconda conferma della validità del processo di formazione fasci del sistema FALCON, sia la dimostrazione di un'altra sua peculiarità: il sistema non richiede conversione A/D per i segnali della base. Procediamo ora alla dimostrazione finale: il passaggio dai sistemi digitali alla formazione fasci mediante il modello numerico per la valutazione del numero Y di cui si è accennato nei principi generali.

11) IL MODELLO NUMERICO CARATTERIZZANTE IL SISTEMA FALCON

In questo paragrafo è illustrato, finalmente, il modello numerico che caratterizza il sistema a fasci preformati FALCON; si dimostra, infatti, che il numero Y a nf bit, ottenuto componendo **sequenzialmente** i segni istantanei delle nf tensioni limitate, esprime la somma dei valori di correlazione esistente tra le $nf/2$ coppie di trasduttori; Y rappresenta pertanto la direttività in correlazione del fascio acustico centrato a cavallo di un gruppo d'idrofoni, cioè la funzione di correlazione numerica complessiva, che indicheremo con $C_{c\alpha=\eta}(\alpha;F)$, dove η è la direzione del fascio.

Occorre fare riferimento al modello trattato nel paragrafo 10), in cui il gruppo dei segnali degli 8 sensori della base ($nf = 8$), dopo la limitazione d'ampiezza, è correlato con logica digitale sparsa; questa logica riceve dal gruppo di limitazione 8 segnali clippati che, istante dopo istante, se disposti **sequenzialmente**, possono assumere, in dipendenza del grado di correlazione, configurazioni caratteristiche, alcune delle quali sono di seguito mostrate. Ad esempio, per la struttura geometrica di figura 1 (fascio per 0°); si avrà:

coppie --> (1 - 18), (2 - 17), (3 - 16), (4 - 15)

*coppie idrofoni secondo la disposizione sulla base --> 4 3 2 1 18 17 16 15

*livelli all'uscita dei limitatori di coppia

in un'ipotesi di piena correlazione -----> 1 0 0 1 1 0 0 1

*coincidono i segni delle coppie 1-18; 2-17; 3-16; 4-15

*valore di $Y = 153$ (4 coincidenze)

*coppie idrofoni secondo la disposizione sulla base --> 4 3 2 1 18 17 16 15

*livelli all'uscita dei limitatori di coppia

in un'ipotesi di medio alta correlazione -----> 0 1 1 0 1 1 1 0

*coincidono i segni delle coppie 2-17; 3-16; 4-15

*valore di $Y = 110$ (3 coincidenze)

*coppie idrofoni secondo la disposizione sulla base --> 4 3 2 1 18 17 16 15

*livelli all'uscita dei limitatori di coppia

in un'ipotesi di scorrelazione -----> 0 1 0 0 1 0 1 1

*coincidono i segni delle coppie 2-17; 3-16

*valore di $Y = 75$ (2 coincidenze)

*coppie idrofoni secondo la disposizione sulla base --> 4 3 2 1 18 17 16 15

*livelli all'uscita dei limitatori di coppia

in un'ipotesi di medio alta inversocorrelazione -----> 0 1 0 0 1 1 1 1

*coincidono i segni della coppia 3-16

*valore di $Y = 79$ (1 coincidenza)

*coppie idrofoni secondo la disposizione sulla base --> 4 3 2 1 18 17 16 15

*livelli all'uscita dei limitatori di coppia

in un'ipotesi di piena inversocorrelazione --- ----> 0 1 0 0 1 1 0 1

* non c'è nessuna coppia con coincidenza di segni

*valore di $Y = 77$ (0 coincidenze)

Dal prospetto sopra riportato si evince che dai segni delle 4 coppie, ovvero dal valore di Y , si ha direttamente il peso di correlazione complessiva del gruppo degli 8 segnali; cioè la somma dei

pesi della correlazione. Compito del modello numerico, da implementare in un P.C, è pertanto l'interpretazione dei valori di Y per la costruzione software dei fasci preformati.

Per meglio chiarire i concetti proseguiamo nell'esame di altre configurazioni caratteristiche: quando la sorgente è centrata sul fascio ($\alpha = 0^\circ$) si ha che :

- (1-18) hanno sempre lo stesso segno (0 od 1)
- (2-17) hanno sempre lo stesso segno (0 od 1)
- (3-16) hanno sempre lo stesso segno (0 od 1)
- (4-15) hanno sempre lo stesso segno (0 od 1)

Ciò significa, ad esempio, che una sequenza di termini per segnale centrato sul fascio potrebbe essere:

1-0-1-1-1-1-0-1

La sequenza mostra 4 simmetrie rispetto al centro del gruppo di 8 bit, dovute al fatto che a coppie simmetriche rispetto al centro del fascio corrispondono relazioni di massima coerenza; il gruppo degli 8 bit genera $Y = 189$.

Dato che per questa condizione il sistema FALCON fornisce un valore di correlazione pari al numero delle coppie che sono in coerenza tra loro, cioè $C_{c\alpha=\eta}(\alpha;F) = 4$, al numero 189 si può associare tale valore.

Anche alla sequenza 1-0-1-0-0-1-0-1

pari al valore $Y = 165$ si può associare il peso di massima correlazione di $C_{c\alpha=\eta}(\alpha;F) = 4$.

Proseguendo in questo modo si vede che il valore $C_{c\alpha=\eta}(\alpha;F) = 4$ (condizione di massima correlazione) può essere individuato da un certo insieme di numeri decimali che non possono mai superare $Y = 255$.

Se ad esempio la sorgente non è centrata sul fascio si avranno condizioni di coerenza inferiore alla massima denunciati ad un certo istante, ad esempio, dalla sequenza

0-1 0-1-1-0-1-1

che ha soltanto 3 simmetrie rispetto al centro del fascio alle quali corrisponde il numero $Y = 91$ e il valore di correlazione $C_{c\alpha=\eta}(\alpha;F) = 3$.

Dato che un insieme di 8 bit non può che generare numeri con estensione dal valore 0 al valore 255, i vari valori del coefficiente di correlazione (stato dei segni che compongono le 4 coppie) potranno essere determinati da uno dei 256 valori di Y che la sequenza del gruppo degli 8 segnali clippati fornisce.

Per avere una corrispondenza tra i valori di Y e la correlazione corrispondente è stata studiata, per girare su di un P.C, una routine che consente di calcolare, in funzione del valore numerico Y espresso dagli 8 bit clippati inseriti nel computer, il corrispondente coefficiente di correlazione complessivo esprimibile, in dipendenza delle coincidenze di segno delle 4 coppie di segnali, nei seguenti cinque numeri a base dieci:

4; 3; 2; 1; 0

il valore 4 esprime il massimo di correlazione per $C_{c\alpha=\eta}(\alpha;F)$

il valore 3 esprime un valore medio alto di correlazione per $C_{c\alpha=\eta}(\alpha;F)$

il valore 2 esprime la scorrelazione per $C_{c\alpha=\eta}(\alpha;F)$

il valore 1 esprime un valore medio alto di inversocorrelazione per $C_{c\alpha=\eta}(\alpha;F)$

il valore 0 esprime il massimo di inversocorrelazione per $C_{c\alpha=\eta}(\alpha;F)$

La routine di calcolo commentata è la seguente :

```
FOR x = 0 TO 255

a1 = x AND 15 'isolano i 4 bit msb

a2 = x AND 240 'isolano i 4 bit MSB

a3 = INT(a2 / 16) 'si spostano i 4 bit MSB in posizione msb

'si capovolge a3 per eseguire xor con a1

a4 = INT((a3 AND 1) * 8) + INT((a3 AND 2) * 2) + INT((a3 AND 4) / 2) + INT((a3 AND 8) / 8)

a5 = ABS((a1 XOR a4) - 15) 'si esegue xor tra a1 e a4 (-15 per coinc. =1)

'si sommano aritmeticamente le coincidenze ottenute da xor a1 e a4

'si ottiene il numero del peso : 0; 1; 2; 3; 4

a6 = (a5 AND 1) + ((a5 AND 2) / 2) + ((a5 AND 4) / 4) + ((a5 AND 8) / 8)

i(x) = a6 'scrivono nella matrice i(x) le corrispondenze tra il valore di

'x(dato di entrata) e il valore a6 corrispondente al peso di correlazione

NEXT x
```

La routine illustrata esegue, in modo simile ad un insieme di 4 correlatori digitali, la xor tra i segni delle 4 coppie simmetriche rispetto al centro del gruppo degli **nf** sensori e la somma dei pesi di ciascuna correlazione di coppia, quindi associa ad ogni valore di **Y** la corrispondente somma calcolata; si risolve così, mediante una matrice di conversione $C=f(Y)$, il problema inerente la costruzione numerica dei fasci di direttività della base ricevente, tutti i fasci infatti, nel caso in esempio, possono utilizzare la stessa matrice di conversione.

La matrice di conversione computata con la routine è riportata nella pagina seguente :

Nella tabella di conversione le variabili sono:

x = valore del numero Y

i(x) = coefficiente di correlazione, funzione di Y; C=f(Y), depositato nella matrice.

0	4	22	1	44	3	66	4	88	3	110	3	132	2	154	2	176	1	198	2	220	1	242	1
1	3	23	0	45	2	67	3	89	2	111	2	133	3	155	3	177	2	199	3	221	2	243	2
2	3	24	4	46	2	68	2	90	4	112	1	134	1	156	2	178	0	200	1	222	2	244	1
3	2	25	3	47	1	69	1	91	3	113	0	135	2	157	3	179	1	201	2	223	3	245	2
4	3	26	3	48	2	70	3	92	2	114	2	136	2	158	1	180	2	202	2	224	1	246	2
5	2	27	2	49	1	71	2	93	1	115	1	137	3	159	2	181	3	203	3	225	2	247	3
6	2	28	3	50	1	72	2	94	3	116	2	138	1	160	2	182	1	204	0	226	2	248	1
7	1	29	2	51	0	73	1	95	2	117	1	139	2	161	3	183	2	205	1	227	3	249	2
8	3	30	2	52	3	74	3	96	2	118	3	140	1	162	1	184	2	206	1	228	2	250	2
9	2	31	1	53	2	75	2	97	1	119	2	141	2	163	2	185	3	207	2	229	3	251	3
10	2	32	3	54	2	76	1	98	3	120	2	142	0	164	3	186	1	208	1	230	3	252	2
11	1	33	2	55	1	77	0	99	2	121	1	143	1	165	4	187	2	209	2	231	4	253	3
12	2	34	2	56	3	78	2	100	3	122	3	144	2	166	2	188	3	210	2	232	0	254	3
13	1	35	1	57	2	79	1	101	2	123	2	145	3	167	3	189	4	211	3	233	1	255	4
14	1	36	4	58	2	80	2	102	4	124	3	146	1	168	1	190	2	212	0	234	1		
15	0	37	3	59	1	81	1	103	3	125	2	147	2	169	2	191	3	213	1	235	2		
16	3	38	3	60	4	82	3	104	1	126	4	148	1	170	0	192	2	214	1	236	1		
17	2	39	2	61	3	83	2	105	0	127	3	149	2	171	1	193	3	215	2	237	2		
18	2	40	2	62	3	84	1	106	2	128	3	150	0	172	2	194	3	216	2	238	2		
19	1	41	1	63	2	85	0	107	1	129	4	151	1	173	3	195	4	217	3	239	3		
20	2	42	1	64	3	86	2	108	2	130	2	152	3	174	1	196	1	218	3	240	0		
21	1	43	0	65	2	87	1	109	1	131	3	153	4	175	2	197	2	219	4	241	1		

Naturalmente il grado di correlazione ricavato dalla tabella è determinante soltanto se persiste nel tempo (cosa verificabile mediante il successivo processo di integrazione di cui andremo di seguito a trattare). Il gruppo degli 8 segnali clippati, che identifica un fascio della direttività della base ricevente, può essere opportunamente inviato ad una porta parallela di un P.C. per essere introdotto a calcolo nel rispetto del criterio di campionatura di Nyquist.

I numeri ad 8 bit che si susseguono all'ingresso del P.C. sono introdotti come indirizzi di una matrice numerica fissa formata con i dati della tabella indicata in precedenza.

Il software ad ogni valore introdotto dalla porta fornisce immediatamente il corrispondente coefficiente di correlazione complessivo $C_{\alpha=\eta}(\alpha;F)$ (somma dei 4 coefficienti di correlazione delle 4 coppie di segnali clippati).

Il coefficiente così computato è inserito in una routine di integrazione numerica del tipo :

$$C_m = C(x) + C_m * k k \quad 4)$$

dove

C_m è il contenuto della memoria, fascio, in cui sono state accumulate le somme successive del coefficiente di correlazione globale al tempo t

$C(x)$ è il coefficiente di correlazione complessivo ricavato all'istante dalla tabella di conversione

$k k$ è il parametro che governa la costante di tempo di integrazione

L'algoritmo iterativo esegue la sommatoria progressiva dei valori complessivi di correlazione al ritmo della frequenza di campionatura del gruppo dei segnali clippati; per sua caratteristica il calcolo non può mai portare all'overflow.

L'integrazione numerica consente di evidenziare tutti i valori intermedi di correlazione del fascio, compresi tra i valori di tabella $C_{c\alpha=\eta}(\alpha;F)=0$; $C_{c\alpha=\eta}(\alpha;F)=1$; $C_{c\alpha=\eta}(\alpha;F)=2$; $C_{c\alpha=\eta}(\alpha;F)=3$; $C_{c\alpha=\eta}(\alpha;F)=4$, mediando le variazioni nel tempo degli stati logici che costituiscono il gruppo degli $nf=8$ bit.

Agendo opportunamente sulla tastiera del P.C. si può variare a piacere la costante di tempo di integrazione mediante variazione del parametro kk .

L'andamento della $C_{c\alpha=\eta}(\alpha;F)$ in funzione di α , verificato con una simulazione al P.C., è del tutto analogo a quello della $C^*_{\alpha=\eta}(\alpha;F)$ del modello digitale.

Con procedura uguale a quella ora esposta si compongono i fasci per le direzioni $\alpha=10^\circ$; $\alpha=20^\circ$;...; $\alpha=350^\circ$ a seguito dell'introduzione nel P.C. dei valori di Y relativi ai gruppi di idrofoni centrati rispettivamente su 10° ; 20° ; ...; 350° . Con procedure più complesse, ma sempre basate sullo stesso principio, si possono formare m fasci costituiti ciascuno da nf sensori con $nf > 8$.

12) LA CARATTERISTICA FONDAMENTALE DELLE FUNZIONI DIGITALI

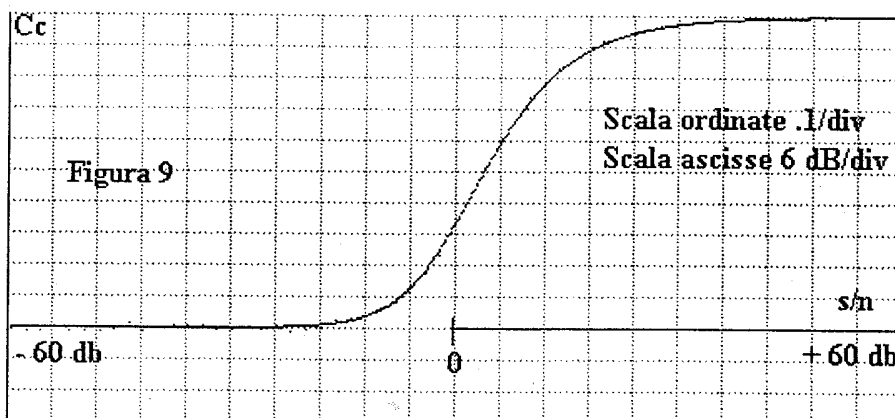
La caratteristica fondamentale delle funzioni di correlazione digitale, mostrate nella 3), è rappresentata dalla presenza del rapporto S/N che ne governa, sia il profilo, sia l'ampiezza; quest'ultima è legata ad una legge estremamente precisa, sempre verificata anche in via sperimentale, che consente il controllo del corretto funzionamento dei sistemi digitali in tutte le condizioni di variabilità del rapporto S/N.

La legge in oggetto ricavata dalla 3) per $\alpha=0$ è espressa dalla 5):

$$C_c(\alpha=0;K) = (2/\pi) \text{Arcsen} \left(\frac{1}{1+(1/K)^2} \right) \quad 5)$$

Dove $K = (S/N)^2$ e S/N è il rapporto segnale disturbo all'ingresso del correlatore

Se l'andamento di una funzione di correlazione sperimentale coincide con la 5) si ha la certezza che il sistema funziona correttamente; ciò consente immediatamente la verifica del modello numerico FALCON che esprime la $C_c(\alpha=0;K)$ mediante simulazione sul P.C. ; il risultato della simulazione e del confronto è riportato nel grafico di figura 9 per valori di S/N da -60 a +60 decibel.



Dalla figura si osserva quanto segue:
il grafico della funzione teorica, secondo la 5), tracciato a tratto continuo.
la punteggiata che rappresenta la risposta della $Cc(\alpha=0;K)$ simulata al P.C.
dalla comparazione dei due tracciati si nota che l'andamento della $Cc(\alpha=0;K)$ è praticamente
coincidente con la curva teorica ad ulteriore dimostrazione della correttezza dell'impostazione di
questo studio.
Chiudiamo questo lavoro ricordando che un prototipo FALCON è stato costruito e sperimentato con
adatta strumentazione presso le officine della 9^a Sezione - Reparto ECG - dell'Arsenale M.M di La
Spezia; l'apparecchiatura ha dato ampia dimostrazione di essere una valida soluzione per la
formazione dei sistemi di fasci preformati per localizzazione subacquea passiva.

Segue appendice

APPENDICE

A1) VALUTAZIONI DEL RAPPORTO S_u/N_u ALL'USCITA DEL FALCON

Per valutare le prestazioni del sistema FALCON in termini di rapporto segnale/disturbo all'uscita (S_u/N_u), il metodo più diretto consiste nel paragonare detto rapporto con quello d'uscita di un sistema di fasci preformati convenzionale. A tale scopo è utile ricorrere all'ipotesi che entrambi i sistemi per la formazione dei fasci, il FALCON ed il tradizionale, siano basati sulla correlazione digitale di cui si è trattato nel paragrafo 10), nel presupposto che i sistemi stessi abbiano in comune:

- il valore della banda di ricezione
- il tempo di integrazione
- il numero dei sensori idrofonici che concorrono alla formazione del fascio

Se ora osserviamo che i livelli dei segnali e dei disturbi all'uscita di un generico correlatore digitale sono espressi, per segnali coerenti d'ingresso, dalle note formule:

$$S_{ud} = (2/\pi) * \text{Arcsen} [1/ \{1+(N/S)^2\}] \quad 1a)$$

dove S ed N sono rispettivamente i livelli dei segnali e dei disturbi all'ingresso

$$N_{ud} = 2/ [\pi * (6/7 * 4 * RC * BW)^{1/2}] \quad 2a)$$

dove:

RC è la costante di tempo d'integrazione e BW è la banda dei segnali d'ingresso

Possiamo ora valutare i rapporti S_u/N_u nei due casi in esame.

Nel sistema FALCON ciascun correlatore elementare fornisce in uscita una tensione di segnale la cui ampiezza è determinata dalla 1a), ed una tensione dovuta al disturbo secondo la 2a).

Dato che la $C*\eta(\alpha; F)$, calcolata per un insieme totale di nf idrofoni, si ottiene mediante la somma di $(nf/2)$ contributi elementari il livello complessivo sarà

$$S_{uf} = (nf/2) * S_{ud} = (nf/\pi) * \text{Arcsen} [1/ \{1+(N/S)^2\}] \quad 3a) - \text{segnale d'uscita corr. FALCON}$$

Questo avviene perché le componenti continue d'uscita di ciascun correlatore elementare si sommano secondo le ampiezze delle loro tensioni.

Il livello complessivo N_{uf} del disturbo d'uscita sarà invece dato dalla somma delle potenze dei disturbi presenti all'uscita di ciascun correlatore elementare perché detti disturbi non sono coerenti tra loro; avremo pertanto:

$$N_{uf} = (nf/2)^{1/2} * N_{ud} = (nf/2)^{1/2} * 2/ [\pi * (6/7 * 4 * RC * BW)^{1/2}] \quad 4a) - \text{rumore d'uscita FALCON}$$

Dal rapporto tra la 3a) e la 4a) abbiamo infine il valore cercato di S_u/N_u per il sistema FALCON:

$$S_{uf}/N_{uf} = (nf/2)^{1/2} * (6/7 * 4 * RC * BW)^{1/2} * \text{Arcsen} [1/ \{1+(N/S)^2\}] \quad 5a)$$

Se ora calcoliamo i corrispondenti valori di S_u e N_u per il sistema di formazione fasci convenzionale dobbiamo tenere conto che in questo caso la correlazione viene eseguita con un solo correlatore al quale sono applicate, ai due ingressi, le somme di $(nf/2)$ segnali resi coerenti tra loro a seguito dell'impiego delle linee di ritardo artificiale, e le somme delle potenze di $(nf/2)$ tensioni dovute ai disturbi che per loro natura non sono coerenti.

Si ha pertanto che l'applicazione della 1a) per valutare il segnale S_u porta alla seguente espressione:

$$S_{uc} = (2/\pi) * \text{Arcsen} [1/ \{1+ (2/nf) * (N/S)^2 \}] \quad 6a) - \text{segnale d'uscita dal correlatore convenz.}$$

Mentre per il calcolo del valore di N_{ud} , tramite la 2a), si deve osservare che N_{ud} è indipendente dall'ampiezza del disturbo all'ingresso del correlatore e perciò si dovrà scrivere:

$$N_{uc} = N_{ud} = 2/ [\pi * (6/7 * 4 * RC * BW)^{1/2}] \quad 7a) - \text{rumore d'uscita dal correlatore convenz.}$$

Dal rapporto tra la 6a) e la 7a) si ottiene il valore di S_{uc}/N_{uc} per il correlatore del sistema di formazione fasci del tipo convenzionale:

$$S_{uc}/N_{uc} = (6/7 * 4 * RC * BW)^{1/2} \text{Arcsen} [1/ \{1+ (2/nf) * (N/S)^2 \}] \quad 8a)$$

Con le formule riportate nella 5a) e nella 8a) possiamo procedere al confronto tra il rapporto S_{uf}/N_{uf} del FALCON e il corrispondente S_{uc}/N_{uc} del sistema convenzionale.

Allo scopo, detto $R1$ il rapporto S_{uc}/N_{uc} del sistema convenzionale ed $R2$ il rapporto S_{uf}/N_{uf} del FALCON, si ottiene che il rapporto tra $R2$ ed $R1$ è:

$$J = R2/R1 = \frac{(nf/2)^{1/2} * \text{Arcsen} [1/ \{1+(N/S)^2 \}]}{\text{Arcsen} [1/ \{1+ (2/nf) * (N/S)^2 \}]} \quad 9a)$$

Se assumiamo ($nf = 8$) come parametro e il rapporto (N/S) come variabile indipendente il computo della 9a) fornisce una serie di dati indicativi del comportamento del rapporto S_{ua}/N_{ua} del FALCON rispetto ad un sistema convenzionale.

Per $S/N < 1.28$ ($J > 1$) le prestazioni del FALCON, in termini di rapporto segnale/disturbo in uscita, saranno superiori a quelle offerte dal sistema tradizionale.

Per $S/N = 1.28$ ($J = 1$) le prestazioni dei due sistemi saranno uguali.

Per $S/N > 1.28$ ($J < 1$) le prestazioni del FALCON saranno inferiori a quelle del sistema tradizionale. I risultati di questo tipo di valutazione, indispensabile in sede di progetto di fattibilità del sistema FALCON, devono essere attentamente valutati in base alle caratteristiche complessive che deve avere il sistema stesso nell'ambito dell'applicazione specifica.

A2) IL COMPORTAMENTO DEL FALCON CON SEGNALI A BANDA STRETTA

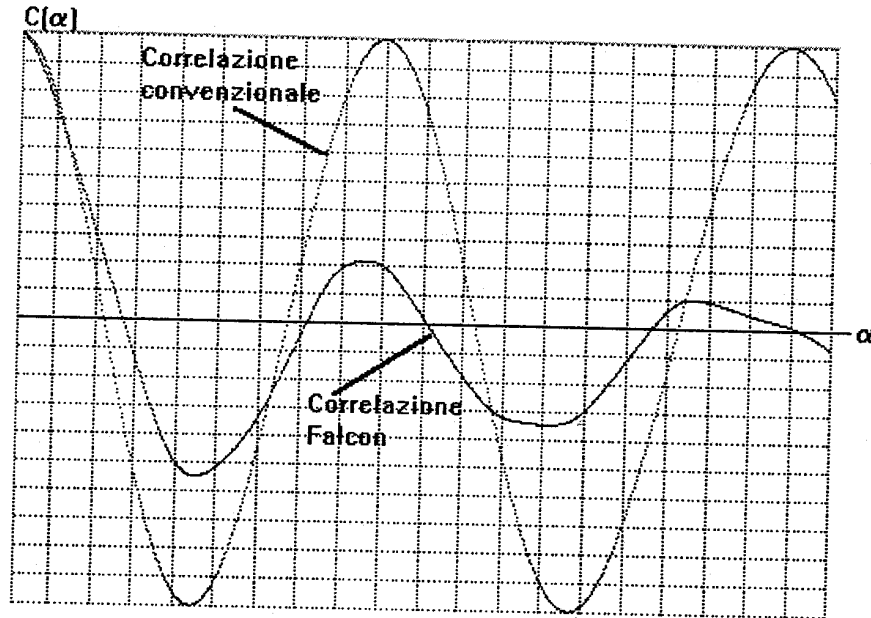
E' di notevole interesse la differenza di comportamento tra un sistema di correlazione convenzionale ed il sistema FALCON quando questi siano impiegati per la formazione di fasci direttivi per la ricezione di segnali a banda stretta o monocromatici. La correlazione digitale convenzionale tra due segnali in banda $f1-f2$ ha una risposta secondo la 1a)

$$C^*_{x-y}(\alpha ; F) = (2/\pi) \text{Arcsen} \left[\left(\frac{1}{1 + (1/K)} \right) \frac{\text{Sen} \left(\frac{2 \pi DF}{c} xy \text{Sen} \alpha \right)}{\text{Sen} \left(\frac{2 \pi DF}{c} xy \text{Sen} \alpha \right)} * \text{Cos} (p) \right] \quad 1a)$$

$$\text{dove } DF = (f2-f1)/2 ; \quad p = \frac{(2 \pi F_0}{c} xy \text{Sen} \alpha) ; \quad F_0 = (f2+f1)/2$$

Se computiamo la funzione di correlazione convenzionale con la 1a), per la base presa ad esempio nel paragrafo 9), nella quale sia stata posta una banda di 1Hz ($f_1=6000$ Hz ; $f_2=6001$ Hz) ed $S/N = 2$, si ha la curva di risposta sinusoidale tracciata in figura 1a per α variabile da 0 a 40° .

Figura 1a



Il comportamento sopra evidenziato penalizza i sistemi idrofonici di rivelazione basati su tale tipo di trattamento; i sistemi di correlazione convenzionali infatti non sono in grado di discriminare una sorgente che emetta una nota pura dato che la loro risposta di direttività nello spazio subacqueo è ambigua, detti sistemi sono adatti soltanto per la formazione di fasci direttivi su bande di frequenza sensibilmente ampie.

Il FALCON invece avendo come risposta la somma di più funzioni di correlazione elementari presenta sulla direzione del fascio la somma dei massimi delle funzioni di correlazione, mentre per le direzioni lontane dal fascio, dove ciascuna funzione elementare presenta ondulazioni rilevanti, si ha una operazione di media tra i massimi positivi di alcune e minimi negativi di altre, con il risultato di un abbattimento significativo delle ondulazioni ambigue. Questo comportamento consente di impiegare il FALCON anche per i sistemi di fasci preformati adatti alla rivelazione di segnali unifrequenziali continui od impulsivi.

La funzione di correlazione complessiva FALCON, come già illustrato in precedenza, è formata dalla 1a) in 4 impostazioni diverse che, per la base presa ad esempio al paragrafo 9), è:

$$C^{*0}(\alpha ; f_1-f_2) = 1.695 [C^{*1-18}(\alpha ; f_1-f_2) + C^{*2-17}(\alpha ; f_1-f_2) + C^{*3-16}(\alpha ; f_1-f_2) + C^{*4-15}(\alpha ; f_1-f_2)]$$

Se computiamo la funzione di correlazione FALCON nella quale sia stata posta la banda di 1Hz ($f_1=6000$ Hz ; $f_2=6001$ Hz) ed $S/N = 2$, si ha la curva di risposta tracciata in figura 1a, per α variabile da 0 a 40° , nella quale si evidenzia l'importante assunto. Il risultato ottenuto è naturalmente migliorabile se alla composizione del fascio possiamo far concorrere più sensori di quelli che sono stati impiegati per la nostra dimostrazione.