

Equazioni del sonar e specificazioni delle variabili

1) Gli algoritmi di base

Le equazioni del sonar sono gli algoritmi che governano la localizzazione subacquea, sia passiva che attiva.

Le variabili acustiche che compaiono nelle equazioni del sonar sono dipendenti da diversi fattori che esamineremo.

Quando le equazioni del sonar sono soddisfatte significa che, sotto alcune determinanti condizioni, è possibile rivelare la presenza del bersaglio.

Le variabili acustiche coinvolte negli algoritmi sono gli elementi condizionanti tutta la progettazione e la sperimentazione delle apparecchiature elettroniche che costituiscono i sistemi sonar.

Mostriamo ora le equazioni di cui si è parlato:

Per la localizzazione passiva l'algoritmo che governa il fenomeno è il seguente

$$SL - TL = NL - DI + DT$$

Per la localizzazione attiva gli algoritmi che governano il fenomeno sono due; il primo definisce l'equazione in presenza del solo rumore del mare

$$SL - 2TL + TS = NL - DI + DT$$

Il secondo definisce l'equazione in presenza della riverberazione

$$SL - 2TL + TS = RL + DT$$

2) Le tabelle esplicative

Vediamo ora di definire le caratteristiche di tutte le variabili acustiche che compaiono nelle equazioni sopra riportate con l'ausilio di tabelle sintetiche:

Variabile acustica	SL
Definizione in lingua	Source Level
Dimensioni	dB/ μ Pa
Definizione tecnica	Livello della pressione emessa in acqua da una sorgente acustica
Origine del dato	Prevalentemente da misure
Rilievo del dato	Alla distanza di 1 metro dalla sorgente
Esempio di un dato	SL emesso, alla frequenza di 4000Hz in banda 1000Hz, da un cacciatorpediniere che naviga alla velocità di 15 nodi: SL = +155 dB/ μ Pa
Nota	Il valore spettrale di SL si ottiene sottraendo da SL il valore 10Log(banda)

Variabile acustica	NL
Definizione in lingua	Noise Level
Dimensioni	$\text{dB}/\mu\text{Pa}/\text{Hz}^{1/2}$
Definizione tecnica	Livello spettrale della pressione acustica generata dal rumore del mare (moto ondoso)
Origine del dato	Prevalentemente da misure
Rilievo del dato	In zone non trafficate
Esempio di un dato	NL generato, alla frequenza di 950Hz, dal moto ondoso a forza 2: $\text{NL} = +62 \text{ dB}/\mu\text{Pa}/\text{Hz}^{1/2}$
Nota	Il valore di NL si incrementa con l'incrementarsi della banda secondo la radice quadrata della banda stessa

Variabile acustica	TL
Definizione in lingua	Transmission Loss
Dimensioni	dB
Definizione tecnica	Attenuazione delle emissioni acustiche a causa della distanza di percorrenza in mare
Origine del dato per divergenza dei raggi di tipo sferico	Dal calcolo: $\text{TL} = 20 \text{ Log (distanza i metri)}$
Origine del dato per divergenza dei raggi di tipo sferico/cilindrico	Dal calcolo: $\text{TL} = 60 + 10 \text{ Log (distanza i chilometri)}$
Origine del dato per assorbimento da parte dell'acqua di un segnale acustico di frequenza f in KHz	Dal calcolo (tra i più semplici): $\text{TL} = .2f + .00015 f^2 \text{ dB/chilometro}$
Esempio di un dato	Attenuazione di un segnale acustico, durante la percorrenza di un tratto di mare di 3000 metri, per sola divergenza sferica: $\text{TL} = 20 \text{ Log } 3000 = 69.5 \text{ dB}$
Note	In condizioni di propagazione normale del suono, il valore complessivo dell'attenuazione dei segnali acustici in mare è, il più delle volte, la somma dell'attenuazione per divergenza con l'attenuazione per assorbimento

Variabile acustica	DI
Definizione in lingua	Directivity Index
Dimensioni	dB
Definizione tecnica	Indice di direttività di una base acustica ricevente (caratteristica peculiare della base di ridurre, alla propria uscita, il livello delle tensioni elettriche, non coerenti, dovute al rumore del mare)
Origine del dato	Da calcolo
Esempio di un dato	Indice di direttività di una base ricevente cilindrica progettata per lavorare alla frequenza di 10000 Hz; dimensioni della base (diametro 1 metro, altezza 0.8 metri) DI = 24 dB
Note	Il DI di una base varia con la frequenza e con le dimensioni, è legato intimamente alle caratteristiche di direttività orizzontale e verticale della base stessa

Variabile acustica	TS
Definizione in lingua	Target Strenght
Dimensioni	dB
Definizione tecnica	Forza del bersaglio (proprietà riflettenti di un bersaglio investito da un onda acustica)
Origine del dato	Da calcolo per le forme regolari del bersaglio. Da rilievi sperimentali per forme complesse ed irregolari (si pensi alla forma di un sommergibile con torretta ecc.)
Esempi di dati	Valore del Ts di un sommergibile della lunghezza di circa 30 metri che offre il fianco all'onda acustica : TS = 25 dB Valore del Ts di un sommergibile della lunghezza di circa 30 metri che offre la prua all'onda acustica : TS = 10 dB
Note	Il valore del TS è dipendente dalla durata dell'impulso di illuminazione acustica

Variabile acustica	DT
Definizione in lingua	Detection Threschold
Dimensioni	dB
Definizione tecnica	Soglia di rivelazione dei segnali acustici che interviene nei processi di localizzazione, sia attiva che passiva, sia per ascolto diretto che per elaborazione strumentale dei segnali.
Origine del dato	Da calcolo : $DT = 5 \text{Log}(dw/2t)$; d(da curve ROC) w=banda di lavoro; t=tempo di post integr
Esempi di dati	Valore del DT per un sistema di rivelazione in correlazione: DT = 15 dB
Note	Il valore del DT è legato alle probabilità percentuali di rivelazione (Priv) e di falso allarme (Pfa) accettate nell'impostazione del sonar

Variabile acustica	RL
Definizione in lingua	Reverberation Level
Dimensioni	dB/ $\mu\text{Pa}/\text{Hz}^{1/2}$
Definizione tecnica	Livello di riverberazione nell'ambiente subacqueo causato dalle emissioni acustiche; si possono avere tre tipi di riverberazione: di volume, di fondo, di superficie
Origine del dato	Da calcolo e da rilievi sperimentali
Esempi di dati	Valore di RL a seguito di riverberazione dal fondo $RL = +72 \text{ dB}/\mu\text{Pa}/\text{Hz}^{1/2}$
Note	Il fenomeno della riverberazione si presenta sulla base ricevente come un segnale acustico coerente e pertanto non interviene l'abbattimento di questo da parte del DI della base

3) Premesse importanti

Prima di iniziare la manipolazione sulle equazioni del sonar è utile esaminare le variabili acustiche come elementi che subordinano il progetto dell'elettronica e delle parti bagnate di un sistema sonar, ciò per renderci conto del peso che l'entità delle variabili stesse trasferisce a carico della progettazione tutta:

Il valore del SL, nel caso che questo debba essere generato da un trasmettitore per la localizzazione attiva, implica la generazione di potenze elettriche impulsive dell'ordine di decine di migliaia di watt, di conseguenza anche il sistema acustico di trasduzione deve essere commisurato alla potenza in gioco.

Il valore di NL, per qualsiasi tipo di localizzazione, implica particolari attenzioni nel progetto dei preamplificatori idrofonici che sono delegati ad elevare il livello dei segnali idrofonici, detti amplificatori infatti devono avere un rumore elettronico d'ingresso sensibilmente inferiore ad NL.

Il valore di TL, per qualsiasi tipo di localizzazione, implica particolari attenzioni nel progetto di tutta la catena di elaborazione dei segnali dato che, più elevato è il livello di attenuazione per propagazione, tanto più sono piccoli i livelli delle pressioni acustiche dei segnali ricevuti dal sonar e di conseguenza sono oltre modo bassi i livelli delle tensioni di segnale che devono essere trattate dall'apparato.

Per le ragioni esposte il TL subordina anche le caratteristiche della base ricevente che deve avere prestazioni tanto migliori quanto più sono elevate le perdite di propagazione.

Il valore del DI non può essere scelto a piacere per risolvere al meglio le equazioni del sonar; una richiesta di incremento del DI implica un aumento delle dimensioni della base che a volte può essere praticamente irrealizzabile. Il DI dovrebbe sempre essere un dato a priori determinato dalle caratteristiche fisiche della base stessa adattata alla piattaforma che la deve alloggiare.

Il valore del TS, che interviene soltanto nelle equazioni per la localizzazione attiva, deve essere il minimo conosciuto per i tipi dei bersagli destinati a tale ruolo; una scelta errata, rispetto ai valori probabili, si ripercuote sul dimensionamento dei circuiti del sonar rendendoli o troppo sensibili od insensibili rispetto alle necessità reali.

Il valore del DT deve essere commisurato alle probabilità di scoperta e falso allarme che devono caratterizzare il sonar; ottime probabilità di scoperta, implicano circuiti elettronici di rivelazione complessi, mentre accettando medie probabilità di scoperta si possono realizzare sistemi di rivelazione più semplici.

Il valore di RL, che interviene soltanto nelle equazioni per la localizzazione attiva, impone particolari attenzioni nello studio dei circuiti di attenuazione automatica della sensibilità del sonar e della formazione dell'impulso acustico di emissione; questa variabile, che dipende esclusivamente dalle caratteristiche dell'ambiente subacqueo, deve essere valutata correttamente prima di essere messa a calcolo.

4) Dati utili per le computazioni

Nelle tabelle seguenti sono riportati alcuni dati utili alle computazioni delle equazioni del sonar; i dati, indicati per semplicità per la sola frequenza di 6000 Hz, sono relativi ai valori di SLspettrale (generati da un cacciatorpediniere) e di NL (generato dal moto ondoso) :

Velocità del cacciatorpediniere in "nodi"	SLspettrale alla frequenza di 6000 Hz
10	+ 110 dB/ μ Pa/Hz ^{1/2}
15	+ 121 dB/ μ Pa/Hz ^{1/2}
20	+ 128 dB/ μ Pa/Hz ^{1/2}
25	+ 134 dB/ μ Pa/Hz ^{1/2}

Forza dello stato del mare	NL alla frequenza di 6000 Hz
SS = 1	+ 42 dB/ μ Pa/Hz ^{1/2}
SS = 2	+ 49 dB/ μ Pa/Hz ^{1/2}
SS = 3	+ 51 dB/ μ Pa/Hz ^{1/2}
SS = 4	+ 54 dB/ μ Pa/Hz ^{1/2}
SS = 3	+ 56 dB/ μ Pa/Hz ^{1/2}
SS = 6	+ 57 dB/ μ Pa/Hz ^{1/2}

5) Esempi vari di computazione delle equazioni del sonar

5.1) Ricerca dell'incognita SL

Si voglia determinare a quale velocità minima deve navigare un cacciatorpediniere che transita a 25000 metri di distanza per essere rivelato da un sonar che lavora nelle seguenti condizioni:

*frequenza di ricezione 6000 Hz

*banda di ricezione $w=2000$ Hz

*tempo di integrazione post rivelazione $t= 2$ Sec.

*accettazione della probabilità di rivelazione del 50% e della probabilità di falso allarme del 10% (queste condizioni, secondo le curve ROC, portano ad un valore $d=2$) perciò $DT=5\text{Log}(dw/2t)=5\text{Log}(2 \times 2000/2 \times 2) = 15$

*stato del mare pari a $SS=2$; dalla tabella si ha $NL= +49 \text{ dB}/\mu\text{Pa}/\text{Hz}^{1/2}$

*indice di direttività della base ricevente $DI=18\text{dB}$

*attenuazione del segnale acustico durante il percorso (per propagazione sferica ed assorbimento)

$$TL = 20\text{Log } 25000 + 25(.2f + .00015 f^2) = 118 \text{ dB}$$

deve essere risolta l'equazione:

$$SL-TL = NL-DI+DT \quad \text{in SL cioè}$$

$$SL = NL-DI+DT+TL = +49-18+15+118=164 \text{ dB}$$

Se vogliamo servirci delle tabelle per risalire alla velocità della nave dobbiamo trasformare SL, espresso in $\text{dB}/\mu\text{Pa}$ in valore spettrale espresso in $\text{dB}/\mu\text{Pa}/\text{Hz}^{1/2}$, cioè $SL(\text{spettrale})=SL-10\text{Log } 2000 = 164-33 = 131 \text{ dB}/\mu\text{Pa}/\text{Hz}^{1/2}$

Se ora confrontiamo il valore calcolato di $SL(\text{spettrale})=131\text{dB}/\mu\text{Pa}/\text{Hz}^{1/2}$ con i dati riportati in tabella si evince che un cacciatorpediniere che naviga a 25 nodi produce un SL dell'ordine di quello richiesto e pertanto il quesito è ragionevolmente risolto.

5.2) Ricerca del valore del DT

Si voglia determinare quale tempo di post integrazione deve essere assegnato ad un sonar per localizzare un cacciatorpediniere che transita a 15 nodi alla distanza di 20000 metri per essere rivelato dall'apparato che lavora nelle seguenti condizioni:

*frequenza di ricezione 6000 Hz

*banda di ricezione $w=4000$ Hz

*stato del mare pari a $SS=3$; dalla tabella si ha $NL= +51 \text{ dB}/\mu\text{Pa}/\text{Hz}^{1/2}$

*indice di direttività della base ricevente $DI=22\text{dB}$

*accettazione della probabilità di rivelazione del 50% e della probabilità di falso allarme del 10% (queste condizioni, secondo le curve ROC, portano ad un valore $d=2$)

*attenuazione del segnale acustico durante il percorso (per propagazione sferica ed assorbimento)

$$TL = 20\text{Log } 20000 + 20(.2f + .00015 f^2) = 110 \text{ dB}$$

*dalla tabella risulta che il valore di $SL_{\text{spettrale}} = 121 \text{ dB}/\mu\text{Pa}/\text{Hz}^{1/2}$
 pertanto il valore di $SL = 121 + 10 \log 4000 = 157 \text{ dB}/\mu\text{Pa}$

deve essere risolta l'equazione:

$$SL - TL = NL - DI + DT \quad \text{in DT cioè}$$

$$DT = SL - TL - NL + DI = +157 - 110 - 51 + 22 = 18 \text{ dB}$$

Ora dato che

$$DT = 5\text{Log}(dw/2t) = 5\text{Log}(2 \times 4000/2t) = 18 \text{ si risolve in } t \text{ ottenendo}$$

$$t = 4000 / (10^{18/5}) = 1 \text{ Sec.}$$

5.3) Ricerca del valore del DI

Si voglia determinare quale valore del DI deve essere assegnato ad una base ricevente di un sonar affinché questo possa localizzare un cacciatorpediniere navigante alla velocità di 10 nodi alla distanza di 30000 metri date le seguenti condizioni d'impiego dell'apparato:

*frequenza di ricezione 6000 Hz

*banda di ricezione $w = 1000 \text{ Hz}$

*tempo di integrazione post rivelazione $t = 1 \text{ Sec.}$

*accettazione della probabilità di rivelazione del 50% e della probabilità di falso allarme del 10% (queste condizioni, secondo le curve ROC, portano ad un valore $d=2$) perciò $DT = 5\text{Log}(dw/2t) = 5\text{Log}(2 \times 1000/2 \times 1) = 15$

*stato del mare pari a $SS=4$; dalla tabella si ha $NL = +54 \text{ dB}/\mu\text{Pa}/\text{Hz}^{1/2}$

*attenuazione del segnale acustico durante il percorso (per propagazione sferica ed assorbimento)

$$TL = 20\text{Log } 30000 + 30(.2f + .00015 f^2) = 126 \text{ dB}$$

SL dalla tabella $SL = 110 \text{ dB}$

deve essere risolta l'equazione:

$$SL - TL = NL - DI + DT \quad \text{in DI cioè}$$

$$DI = NL + DT - SL + TL = 54 + 14 - 110 + 126 = 84 \text{ dB} \text{ !!!!}$$

Un valore del DI di questa entità non è fisicamente realizzabile date le grandi dimensioni che dovrebbe avere una base con tali caratteristiche acustiche; questo risultato è stato voluto proprio per mettere in evidenza come le variabili acustiche che costituiscono le equazioni del sonar debbano, una volta di più, essere valutate con attenzione per le ripercussioni che le scelte dei valori di queste possono avere sull'insieme del sonar.

5.4) Ricerca del valore di TL

Si voglia determinare a quale distanza massima deve essere posizionato un cacciatorpediniere che transita a 15 nodi per essere rivelato dall'apparato che lavora nelle seguenti condizioni:

*frequenza di ricezione 6000 Hz

*banda di ricezione $w=2000$ Hz

*stato del mare pari a $SS=3$; dalla tabella si ha $NL= +51 \text{ dB}/\mu\text{Pa}/\text{Hz}^{1/2}$

*indice di direttività della base ricevente $DI=22\text{dB}$

*tempo di integrazione post rivelazione $t= 1$ Sec.

*accettazione della probabilità di rivelazione del 50% e della probabilità di falso allarme del 10% (queste condizioni, secondo le curve ROC, portano ad un valore $d=2$) perciò $DT=5\text{Log}(dw/2t)=5\text{Log}(2 \times 2000/2 \times 2) = 15$

*SL spettrale da tabella = 121 : $SL = 121+10\text{Log } 2000 = 154 \text{ dB}/\mu\text{Pa}$

deve essere risolta l'equazione:

$$SL-TL = NL-DI+DT \quad \text{in TL cioè}$$

$$TL = SL-NL+DI-DT = 154-51+22+15 = 140 \text{ dB}$$

La distanza r si ricava ora risolvendo l'equazione trascendente

$$60 + 20\text{Log } r + r(.2f + .00015 f^2) = 140 \text{ dB}$$

con r espresso in chilometri; con l'aiuto del computer si ha $r = 40 \text{ Km}$

5.5) Ricerca del rapporto Si/Ni all'ingresso del sonar

In tutti gli esercizi sviluppati in precedenza si poteva calcolare, tra le altre variabili, anche il rapporto Segnale/Disturbo presente all'ingresso del sonar, calcoliamolo ora; se esaminiamo ad esempio i dati esposti nel paragrafo 5.1 abbiamo:

*frequenza di ricezione 6000 Hz

*banda di ricezione $w=2000$ Hz

*tempo di integrazione post rivelazione $t= 2$ Sec.

*accettazione della probabilità di rivelazione del 50% e della probabilità di falso allarme del 10% (queste condizioni, secondo le curve ROC, portano ad un valore $d=2$) perciò $DT=5\text{Log}(dw/2t)=5\text{Log}(2 \times 2000/2 \times 2) = 15$

*stato del mare pari a $SS=2$; dalla tabella si ha $NL= +49 \text{ dB}/\mu\text{Pa}/\text{Hz}^{1/2}$

*indice di direttività della base ricevente $DI=18\text{dB}$

*attenuazione del segnale acustico durante il percorso (per propagazione sferica ed assorbimento)

$$TL = 20\text{Log } 25000 + 25(.2f + .00015 f^2) = 118 \text{ dB}$$

Variabili da cui si è calcolato $SL = 164\text{dB}/\mu\text{Pa}$

La pressione del segnale che colpisce la base ricevente è:

$SL-TL = 164-118 = 46 \text{ dB}/\mu\text{Pa}$; pressione trasformata in tensione elettrica dalla base che si presenta all'ingresso del sonar.

Il livello assunto per il disturbo NL è $NL= +49 \text{ dB}/\mu\text{Pa}/\text{Hz}^{1/2}$

che calcolato in tutta la banda è $NL+10\text{Log } 2000 = +82 \text{ dB}/\mu\text{Pa}$, questo livello di pressione incide sulla base ricevente che, grazie al valore del DI , è "come se incidesse su di una base non direttiva con una pressione NL ridotta del DI ", si deve pertanto considerare il disturbo pari a $NL-DI= +82-18= 64 \text{ dB}/\mu\text{Pa}$, il valore del rapporto Segnale/Disturbo all'ingresso del sonar è pertanto

$$Si/Ni = (SL-TL) - (NL-DI) = 46 - 64 = -18 \text{ dB}$$

5.6 Ricerca del valore di TS

Si voglia determinare quale valore di TS deve avere un bersaglio, disposto ad una distanza di 5000metri, sottoposto alla illuminazione degli impulsi emessi da un sonar attivo, per essere rivelato dall'apparato che lavora nelle seguenti condizioni:

*la zona di mare non è riverberante

*frequenza di emissione / ricezione 6000 Hz

*banda di ricezione $w=1000$ Hz

*tempo di integrazione post rivelazione $t=.1$ Sec.

*accettazione della probabilità di rivelazione del 90% e della probabilità di falso allarme del 5% (queste condizioni, secondo le curve ROC, portano ad un valore $d=9$)
perciò $DT=5\text{Log}(dw/2t)=5\text{Log}(9 \times 2000/2 \times .1) = 25$

*stato del mare pari a $SS=2$; dalla tabella si ha $NL= +49$ dB/ $\mu\text{Pa}/\text{Hz}^{1/2}$

*indice di direttività della base ricevente $DI=24$ dB

*attenuazione del segnale acustico durante il percorso (per propagazione sferica ed assorbimento)

$$TL = 20\text{Log } 5000 + 5(.2f + .00015 f^2) = 80 \text{ dB}$$

*Emissione di impulsi acustici di livello $SL= 200$ dB/ μPa

deve essere risolta in TS l'equazione:

$$SL-2TL+TS = NL-DI+DT$$

cioè $TS=NL-DI+DT+2TL-SL =+49-24+25+2 \times 80-200=10$ dB