

## **Propagazione del suono in mare: calcolo dell'attenuazione nei modi normali**

### 1) Generalità

Se l'acqua del mare fosse idealmente elastica ed omogenea le onde sonore emesse da una sorgente acustica immersa subirebbero, durante la loro propagazione, un'attenuazione della pressione di una metà per ogni raddoppiamento della distanza dalla sorgente.

Questo tipo di attenuazione è dovuto alla divergenza sferica dei raggi sonori che si allontanano dalla sorgente, così come divergono i raggi luminosi emessi da una comune lampada ad incandescenza per cui la luce percepita dall'occhio diminuisce con la distanza.

Purtroppo l'acqua del mare non è né perfettamente elastica, né perfettamente omogenea e all'attenuazione dovuta alla divergenza dei raggi se ne aggiungono altre notevoli dovute a cause diverse.

Una delle cause di attenuazione che più facilmente può essere prevista e quindi il suo effetto calcolato è dovuta al parziale assorbimento dell'energia acustica da parte dell'acqua che, secondo diversi processi, la converte in calore.

Mentre l'attenuazione per divergenza non dipende dalla frequenza dell'onda acustica, quella dovuta all'assorbimento è dipendente da essa.

Nel prosieguo di questa nota esamineremo da un punto di vista matematico questi fenomeni per acquisire gli strumenti di lavoro che ci consentano di calcolare l'attenuazione del suono nell'acqua nei casi di propagazione normale.

### 2) L'attenuazione per divergenza

L'attenuazione per divergenza può essere di due tipi:

a) Attenuazione sferica; si sviluppa durante le emissioni acustiche in acqua

b) Attenuazione sferico/cilindrica; si sviluppa durante le emissioni acustiche in acqua in zone di mare medio profonde

#### 2.1) Sull'attenuazione per divergenza sferica

L'espressione che consente il calcolo dell'entità dell'attenuazione per divergenza sferica, in funzione della lunghezza del percorso dei raggi acustici, è la seguente:

$$TL = 20 \text{ Log } R$$

Dove

TL (Transmission Loss) è espresso in dB

R (lunghezza del percorso dei raggi) è espressa in metri

Nel caso che l'attenuazione riguardi le perdite per divergenza sferica di un impulso acustico che parte dalla sorgente e dopo aver illuminato il bersaglio ritorna, come eco, verso la sorgente l'espressione è :

$$TL = 40 \text{ Log } R$$

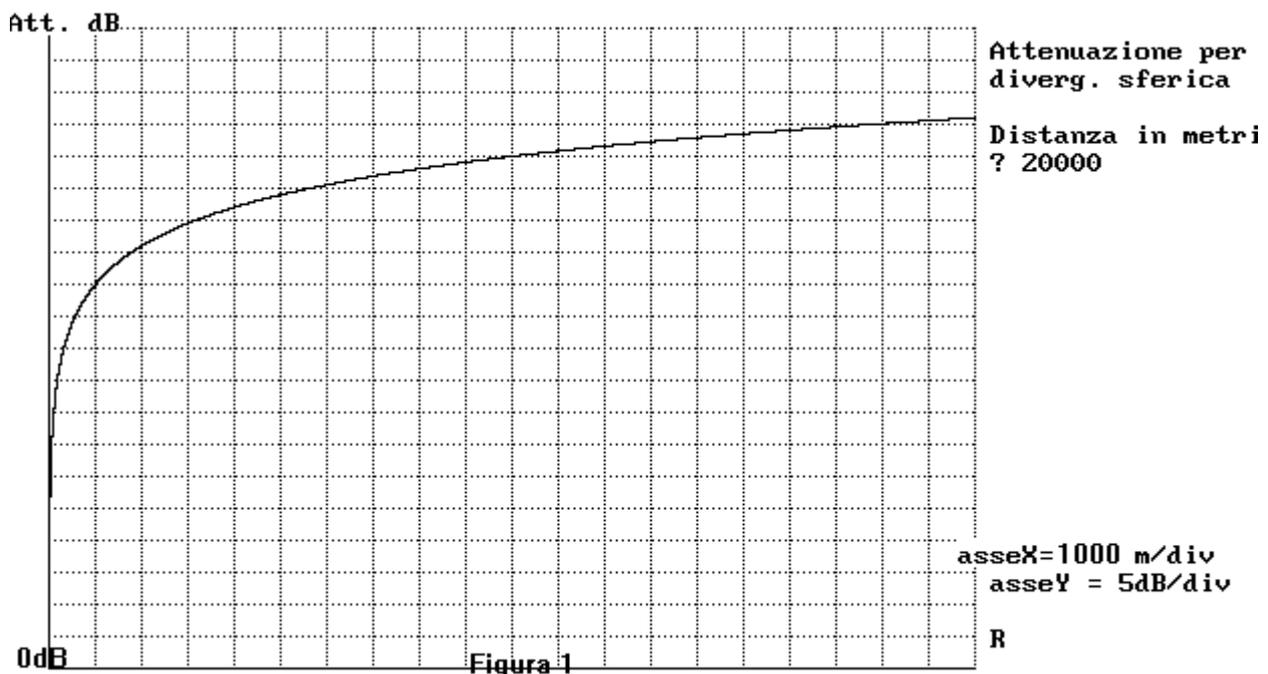
Dove

TL (Trasmission Loss) è espresso in dB

R(lunghezza del percorso dei raggi di sola andata) è espressa in metri

Anche se le formule che abbiamo indicato sono semplici il P.C. può sempre dare un aiuto al tracciamento dei grafici dell'attenuazione, in funzione della distanza, per mostrare globalmente il fenomeno per tutte le possibili distanze che interessano la localizzazione di una sorgente sonora da parte di un sonar.

Per far ciò è stato compilato un programma di calcolo al P.C. che consente ad esempio di presentare il diagramma dell'attenuazione per divergenza sferica, secondo l'espressione ( $TL = 20 \text{ Log } R$ ) così come è mostrato nella figura 1.

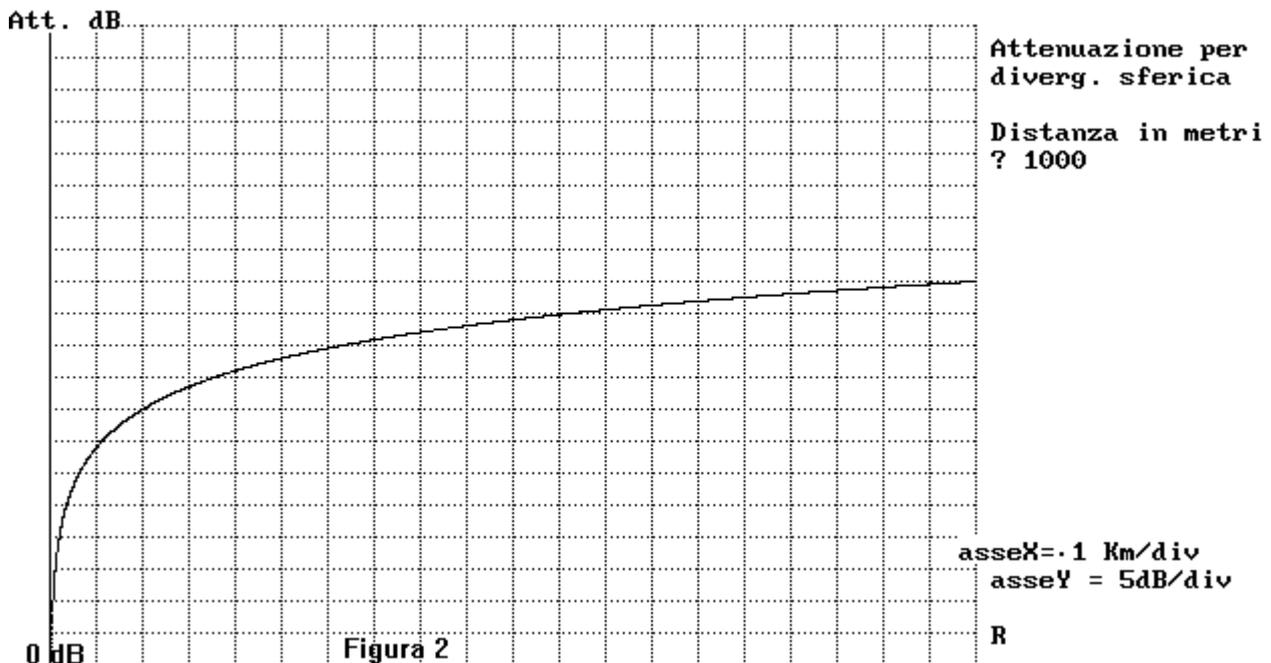


La figura mostra il diagramma dell' andamento della attenuazione per divergenza sferica in un campo di distanze che si estende da 1 metro a 20000 metri, il valore dell'estremo del campo, (20000 m.), è stato introdotto a seguito della richiesta del programma che consente di impostare qualsiasi valore della distanza.

In questo caso ciascuna delle 20 divisioni delle ascisse vale 1000 metri, è pertanto immediato verificare come in corrispondenza della prima divisione, pari a 1000 metri, si riscontri l'ordinata di ampiezza 60dB.

Le ordinate, che indicano l'attenuazione in dB, si estendono da 0 a 100dB con 20 intervalli da 5 dB ciascuno.

La comodità del programma risiede nel fatto che si può analizzare con rapidità qualsiasi intervallo di distanza; la figura 2 mostra ad esempio l'attenuazione per divergenza sferica in un intervallo di soli 1000 metri.



Il programma può essere facilmente modificato per tracciare, se necessario, il diagramma dell'attenuazione secondo l'espressione ( $TL = 40 \text{ Log } R$ ).

## 2.2) Sull'attenuazione per divergenza sferico/cilindrica

La divergenza sferico/cilindrica è caratterizzata dal fatto che nel primo tratto del percorso dei raggi acustici, lungo 1000 metri, la divergenza è di tipo sferico, dopo i 1000 metri la divergenza diventa cilindrica.

L'espressione che consente il calcolo dell'entità dell'attenuazione per divergenza sferico/cilindrica, in funzione della lunghezza del percorso dei raggi acustici, è la seguente:

$$TL = 60 + 10 \text{ Log } (R/1000)$$

Valida soltanto per R maggiore di 1000 metri

Dove

TL (Transmission Loss) è espresso in dB

R (lunghezza del percorso dei raggi) è espressa in metri

Nel caso che l'attenuazione riguardi le perdite per divergenza sferico/cilindrica di un impulso acustico che parte dalla sorgente e dopo aver illuminato il bersaglio ritorna, come eco, verso la sorgente l'espressione è :

$$TL = 120 + 20 \text{ Log } (R/1000)$$

Valida soltanto per R maggiore di 1000 metri

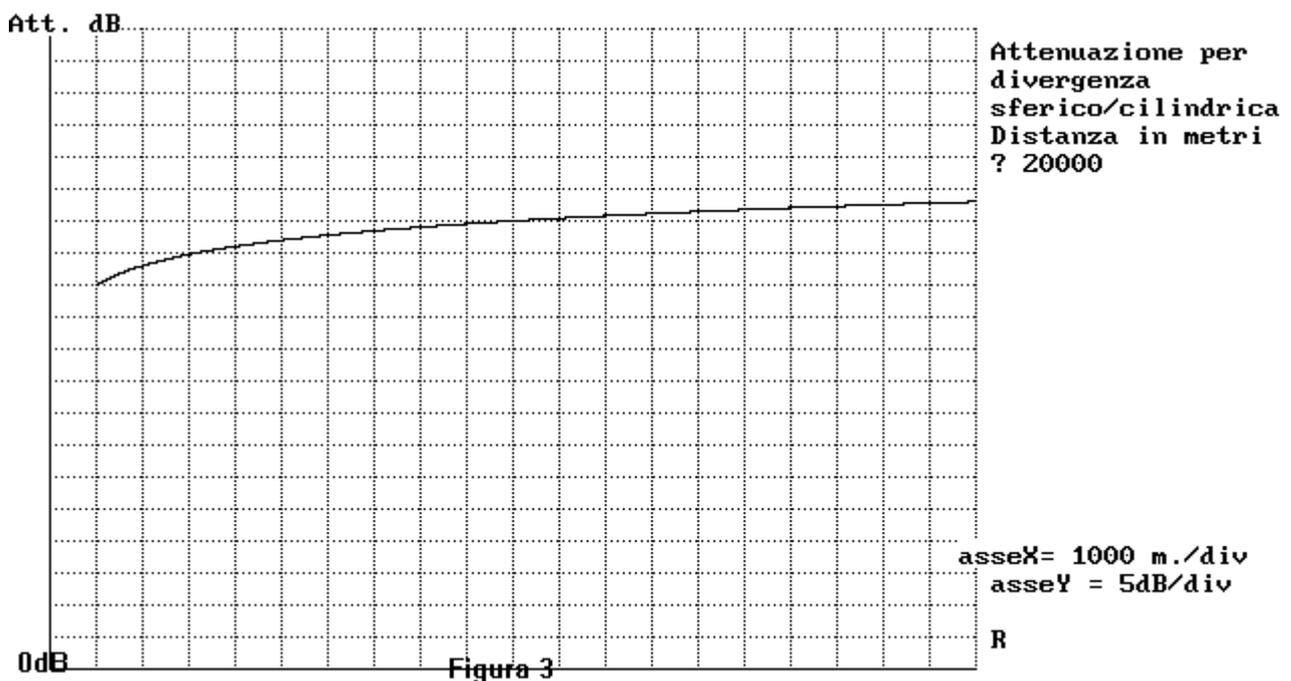
Dove

TL (Trasmission Loss) è espresso in dB

R(lunghezza del percorso dei raggi di sola andata) è espressa in metri

Comparando queste formule con quelle esposte nel paragrafo 2.1 si vede come la propagazione sferico/cilindrica, quando si verifici, penalizza meno della propagazione sferica i livelli dei segnali acustici.

Anche per questo tipo di propagazione è stato compilato un programma di calcolo al P.C. che consente ad esempio di presentare il diagramma dell'attenuazione per divergenza sferico/cilindrica, secondo l'espressione  $[TL = 60 + 10 \text{ Log } (R/1000)]$  così come è mostrato nella figura 3.



La figura mostra il diagramma dell'andamento della attenuazione per divergenza sferico/cilindrica in un campo di distanze che si estende da 1000 metri a 20000 metri, il valore dell'estremo del campo, (20000 m.), è stato introdotto a seguito della richiesta del programma che consente di impostare qualsiasi valore della distanza purché sia  $R > 1000$  metri.

La figura mostra inoltre come la curva sia tracciata a partire dalla distanza di 1000 metri, sotto questa distanza infatti il fenomeno è regolato dalla divergenza sferica che può essere esaminata con gli strumenti indicati nel paragrafo 2.1.

Il programma può essere facilmente modificato per tracciare, se necessario, il diagramma dell'attenuazione secondo l'espressione  $[TL = 120 + 20 \text{ Log} (R/1000)]$ .

### 3) L'attenuazione per assorbimento

L'attenuazione per assorbimento è stata studiata e controllata sul campo da numerosi specialisti, sono state illustrate da questi i metodi di calcolo empirici ed i risultati sperimentali, tra i lavori prodotti uno è diventato lo strumento di routine per coloro che si occupano di problemi relativi alla localizzazione subacquea con il sonar; la legge che lo identifica va sotto il nome di "legge di Thorp".

Questa legge mostra come varia l'attenuazione per assorbimento in funzione della frequenza dei segnali acustici ed è riferita ad un intervallo costante di percorso dei raggi sonori di 1000 metri; l'algoritmo di Thorp è il seguente:

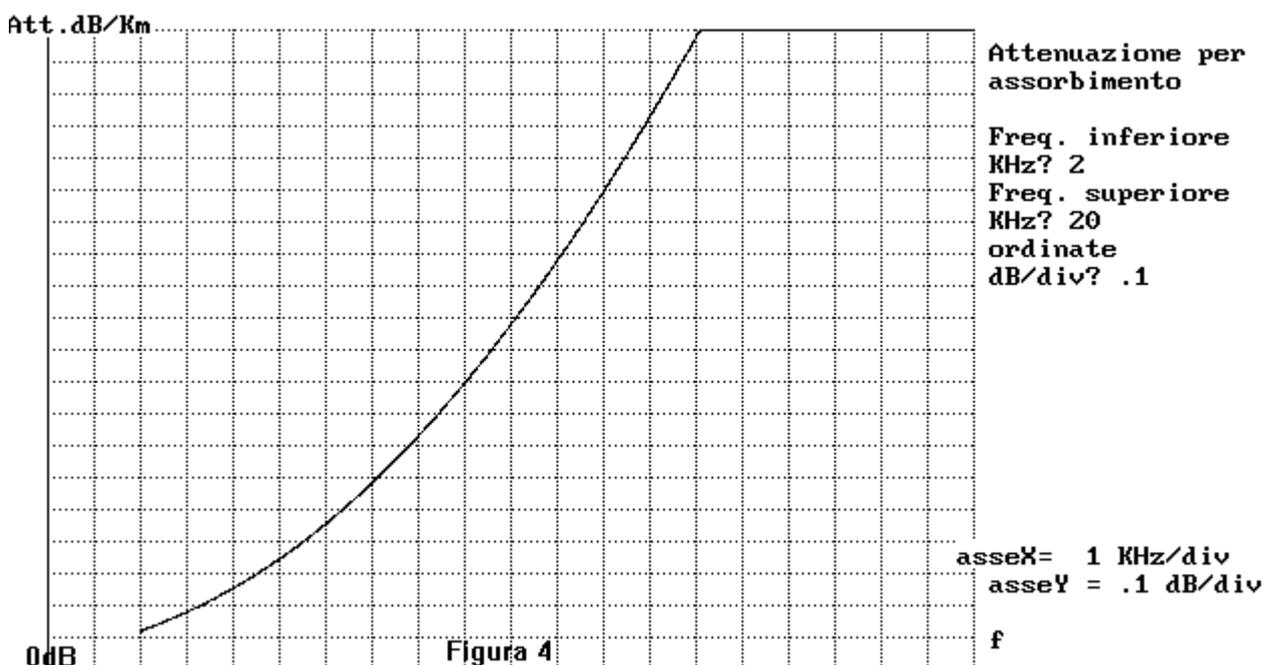
$$\alpha = [0.1 f^2/(1+f^2)] + [40 f^2/(4100+f^2)] + 2.75 * 10^{-4} f^2$$

dove

$\alpha$  è il valore dell'attenuazione per assorbimento espresso in dB/Km

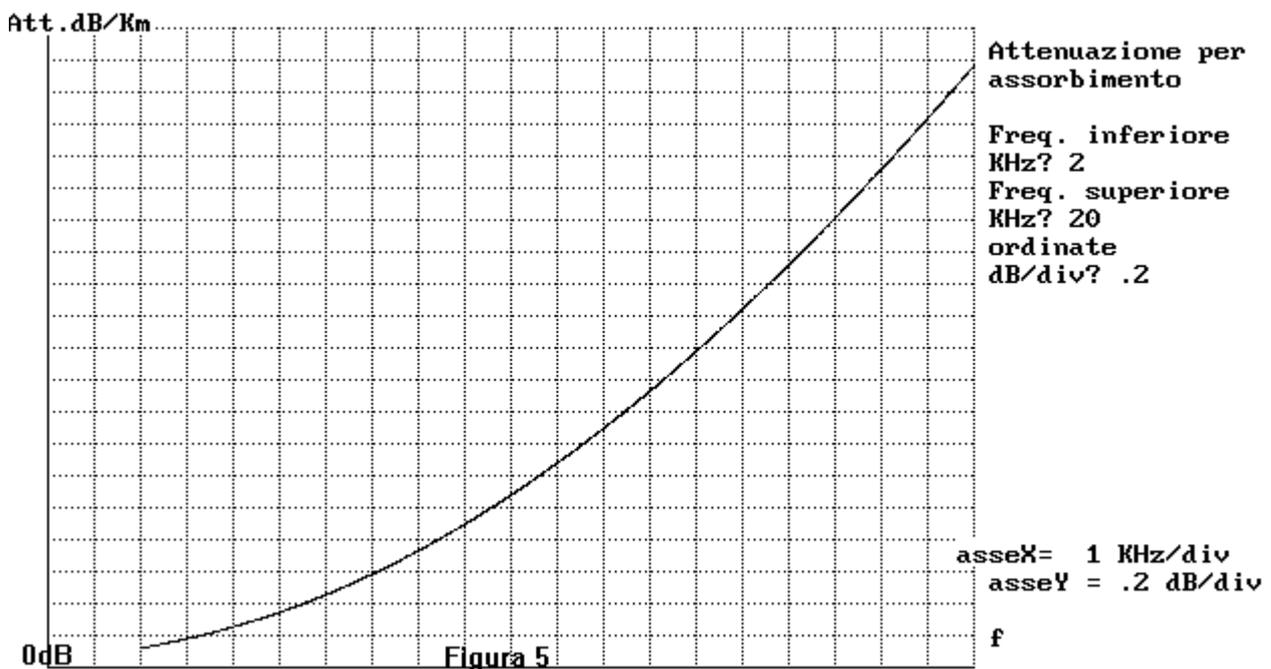
f è la frequenza del segnale acustico

Con l'ausilio di un apposito programma di calcolo tracciamo la curva di  $\alpha = \phi(f)$  in un intervallo di frequenza compreso, ad esempio, tra 2KHz e 20KHz, impostiamo la scala dell'attenuazione a .1 dB/divisione ed otteniamo il risultato grafico sul video del P.C. uguale a quello riportato in figura 4.



La figura 4 mostra come la curva inizi a 2KHz così come l'abbiamo impostata, inoltre si nota come dalla frequenza di 14 KHz il tracciato si appiattisca e non consenta di leggere il valore corretto d'attenuazione, segno questo che l'impostazione della scala delle attenuazioni da noi inserita a .1dB/divisione è troppo piccola; ripetiamo il procedimento con il valore di .2dB/divisione.

La figura 5, ottenuta con la nuova impostazione di scala, mostra ora la curva completa dalla quale si possono leggere i valori dell'attenuazione in tutto il campo impostato delle frequenze.



#### 4) Esempio di calcolo di attenuazione complessiva

Concludiamo questa nota con un esempio di computazione dell'attenuazione complessiva (divergenza+assorbimento), indispensabile per il calcolo delle portate di un sonar.

Si voglia determinare, in condizioni di propagazione sferico/cilindrica, il livello di un segnale acustico ricevuto da un sonar, in banda 3000Hz-7000Hz, emesso da un cacciatorpediniere navigante a 15 nodi alla distanza di 18000 metri; si procede come segue:

-si calcola la frequenza media geometrica della banda:  $f_0 = (3000 \cdot 7000)^{1/2} = 4582 \text{ Hz}$

-si determina il valore spettrale del segnale emesso dal cacciatorpediniere  
 $SL = 131 \text{ dB}/\mu\text{Pa}/\text{Hz}^{1/2}$  si veda (8tec/son)

-si calcola il livello complessivo del segnale nella banda:  
 $SL_w = 131 \text{ dB}/\mu\text{Pa}/\text{Hz}^{1/2} + 10 \text{ Log} (7000-3000) = 167 \text{ dB}$

-si determina il valore dell'attenuazione per assorbimento alla frequenza  $f_0$  estrapolandolo dal grafico di figura 5:

risulta  $\alpha = .3\text{dB/Km}$ , data la distanza di 18 Km l'attenuazione globale per assorbimento è  $.3*18=5.4\text{ dB}$

-si determina il valore dell'attenuazione per divergenza sferico/cilindrica estrapolandolo dal grafico di figura 3:

per  $R=18000$  risulta  $TL= 72.6\text{ dB}$

-si sommano le due componenti d'attenuazione:  $att = 72.6\text{dB} + 5.4\text{ dB} = 78\text{dB}$

-si determina infine il livello del segnale ricevuto dal sonar:

segnale =  $SL_w - att = 167 - 78 = 89\text{ dB}/\mu\text{Pa}$

## 5)Illustrazione dei programmi di calcolo

Tutti i programmi di calcolo e presentazione grafica sono scritti in Qbasic, con facilità possono però essere modificati in qualsiasi altro linguaggio di cui si abbia dimestichezza.

### 5.1)Programma per il calcolo e la grafica dell'attenuazione da divergenza sferica

```
'CALCOLO ATTENUAZIONE PER DIVERGENZA SFERICA
```

```
ini:
```

```
CLS
```

```
SCREEN 9
```

```
FOR x = 20 TO 480 STEP 23
```

```
FOR y = 10 TO 330 STEP 2
```

```
PSET (x, y), 7
```

```
NEXT y
```

```
NEXT x
```

```
FOR y = 10 TO 330 STEP 16
```

```
FOR x = 20 TO 480 STEP 3
```

```
PSET (x, y), 7
```

```
NEXT x
```

```
NEXT y
```

```

LINE (20, 330)-(480, 330)

LINE (20, 10)-(20, 330)

LOCATE 1, 1: PRINT "Att. dB"

LOCATE 2, 62: PRINT "Attenuazione per"
LOCATE 3, 62: PRINT "diverg. sferica"

LOCATE 5, 62: PRINT "Distanza in metri ="
LOCATE 6, 62: INPUT ro

LOCATE 20, 60: PRINT "asseX="; (ro / 20); "m./div"

LOCATE 21, 62: PRINT "asseY = 5dB/div"

LOCATE 23, 62: PRINT "R "

'ANELLO PER IL TRACCIAMENTO CURVA

FOR R = 1 TO ro STEP .1

TL = (20 * LOG(R) / LOG(10)) 'equazione attenuazione f(R)

IF INT(TL) > 100 THEN TL = 100

PSET ((R * 4.6 / (ro / 100) + 20), (330 - (320 / 100) * TL))

NEXT

```

## 5.2)Programma per il calcolo e la grafica dell'attenuazione da divergenza sferico/cilindrica

```

'CALCOLO ATTENUAZIONE PER DIVERGENZA SFERICO/CILINDRICA

CLS

SCREEN 9

FOR x = 20 TO 480 STEP 23
FOR y = 10 TO 330 STEP 2

PSET (x, y), 7

NEXT y

NEXT x

```

```

FOR y = 10 TO 330 STEP 16
FOR x = 20 TO 480 STEP 3
PSET (x, y), 7
NEXT x
NEXT y
LINE (20, 330)-(480, 330)
LINE (20, 10)-(20, 330)
LOCATE 1, 1: PRINT "Att. dB"
LOCATE 2, 62: PRINT "Attenuazione per"
LOCATE 3, 62: PRINT "divergenza"
LOCATE 4, 62: PRINT "sferico/cilindrica"
LOCATE 5, 62: PRINT "Distanza in metri ="
LOCATE 6, 62: INPUT ro
LOCATE 20, 60: PRINT "asseX="; (ro / 20); "m./div"
LOCATE 21, 62: PRINT "asseY = 5dB/div"
LOCATE 23, 62: PRINT "R "
'ANELLO PER IL TRACCIAMENTO CURVA
FOR R = 1000 TO ro STEP .1
IF ro < 1000 THEN END
TL = (60 + 10 * LOG(R / 1000) / LOG(10))'equazione attenuazione
\
f(R)
IF INT(TL) > 100 THEN TL = 100
PSET ((R * 4.6 / (ro / 100) + 20), (330 - (320 / 100) * TL))
NEXT

```

### 5.3)Programma per il calcolo e la grafica dell'attenuazione da assorbimento

```

'CALCOLO ATTENUAZIONE PER ASSORBIMENTO SECONDO THORP
ini:

```

```

CLS

SCREEN 9
FOR x = 20 TO 480 STEP 23
FOR y = 10 TO 330 STEP 2

PSET (x, y), 7

NEXT y

NEXT x

FOR y = 10 TO 330 STEP 16
FOR x = 20 TO 480 STEP 3

PSET (x, y), 7

NEXT x

NEXT y

LINE (20, 330)-(480, 330)

LINE (20, 10)-(20, 330)

LOCATE 1, 1: PRINT "Att.dB/Km"
LOCATE 2, 62: PRINT "Attenuazione per"
LOCATE 3, 62: PRINT "assorbimento"

LOCATE 5, 62: PRINT "Freq. inferiore" 'del campo
LOCATE 6, 62: INPUT "KHz"; f1

LOCATE 7, 62: PRINT "Freq. superiore" 'del campo
LOCATE 8, 62: INPUT "KHz"; f2

LOCATE 9, 62: PRINT "ordinate"
LOCATE 10, 62: INPUT "dB/div"; div

LOCATE 20, 60: PRINT "asseX= "; f2 / 20; "KHz/div"

LOCATE 21, 62: PRINT "asseY ="; div; "dB/div"

LOCATE 23, 62: PRINT "f"

'ANELLO PER IL TRACCIAMENTO CURVA

FOR k2 = f1 TO f2 STEP .01

IF f2 > 200 THEN END

```

```
a = (.1 * (k2 ^ 2)) / (1 + (k2 ^ 2)) + (40 * (k2 ^ 2)) / (4100 +  
+(k2 ^ 2)) + (2.75 * (k2) ^ 2) / 10000
```

```
IF a > (20 * div) THEN a = 20 * div
```

```
PSET ((k2 * 460 / f2 + 20), (330 - (320) * a / (20 * div)))
```

```
NEXT
```