

1. Introducción al sonar

Historia del sonar

“Si hace que su barco se pare e introduce la cabeza de un tubo largo en el agua y acerca el extremo exterior a su oreja, escuchará el sonido de barcos a una gran distancia desde donde se encuentra”

Leonardo da Vinci, 1490.

1. “. . . barco se pare” → reducir el propio ruido.
2. “. . . tubo en el agua” → transductor.
3. “. . . a su oreja” → receptor.
4. “. . . escuchará el sonido de barcos” → detección.
5. “. . . a una gran distancia” → baja atenuación.

1687 Isaac Newton: primera predicción teórica de la velocidad del sonido.

$$\frac{\partial \rho}{\partial p} \approx \frac{1}{c^2}$$

1847 Culladon y Sturm:

- Primera medición precisa de la velocidad del sonido en el agua.
- Destello de luz / campana submarina.

1900 Empresa *Submarine Signal Company*: primera aplicación comercial.

- Alcance desde el barco al faro.
- Sondeo simultaneo de campana submarina y bocina de niebla.

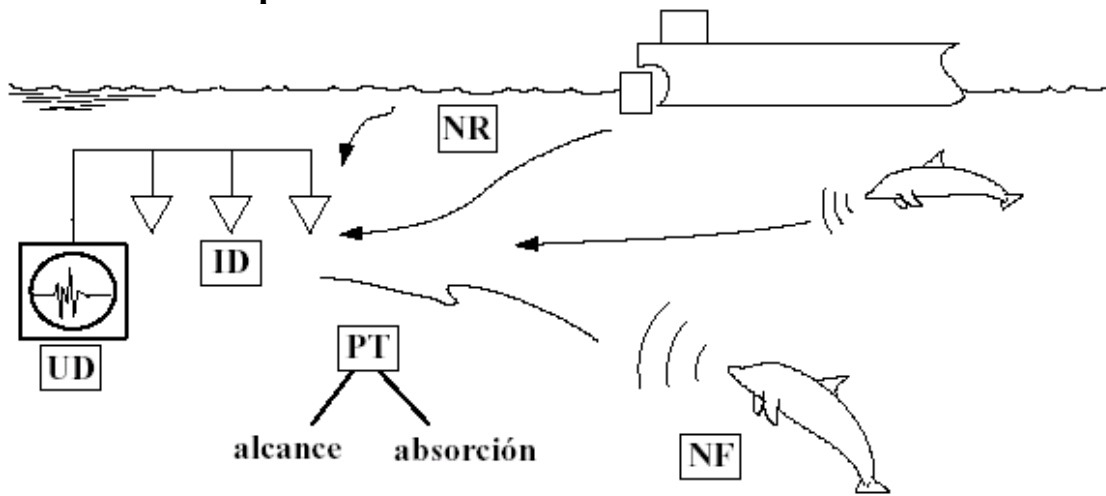
1914 Fessendon: primer sistema sonar activo (detecta iceberg a 2 millas de distancia).

Primera Guerra Mundial: experimentos.

- Equipo operacional de sonar pasivo.
- Experimentos de sonar activo.

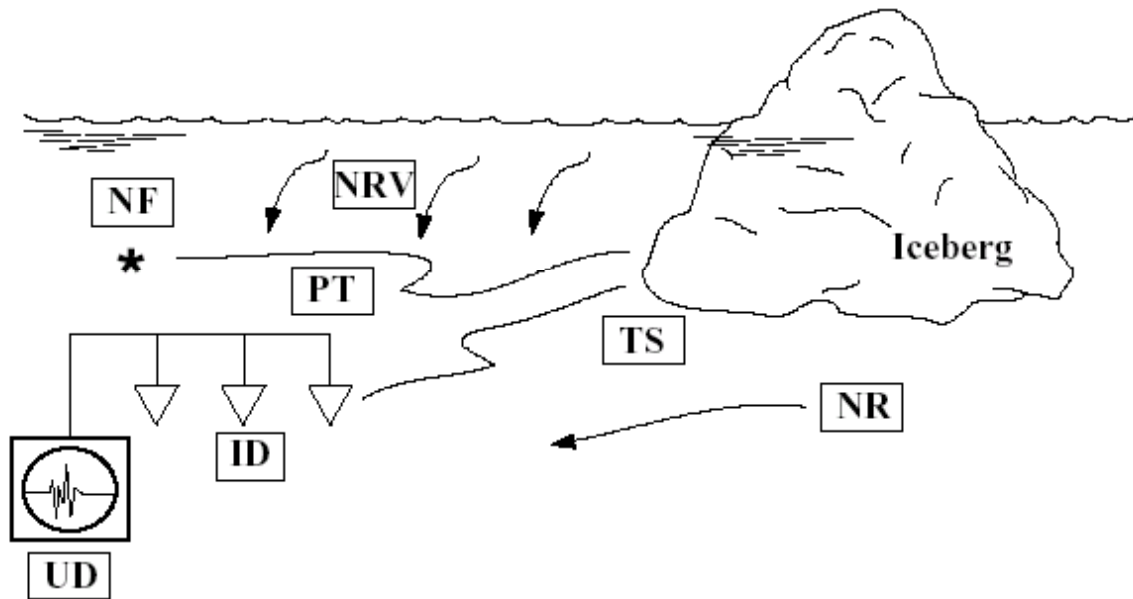
1. INTRODUCCIÓN AL SONAR

Ecuación del sonar pasivo



$$NF - PT - (NR - ID) = UD$$

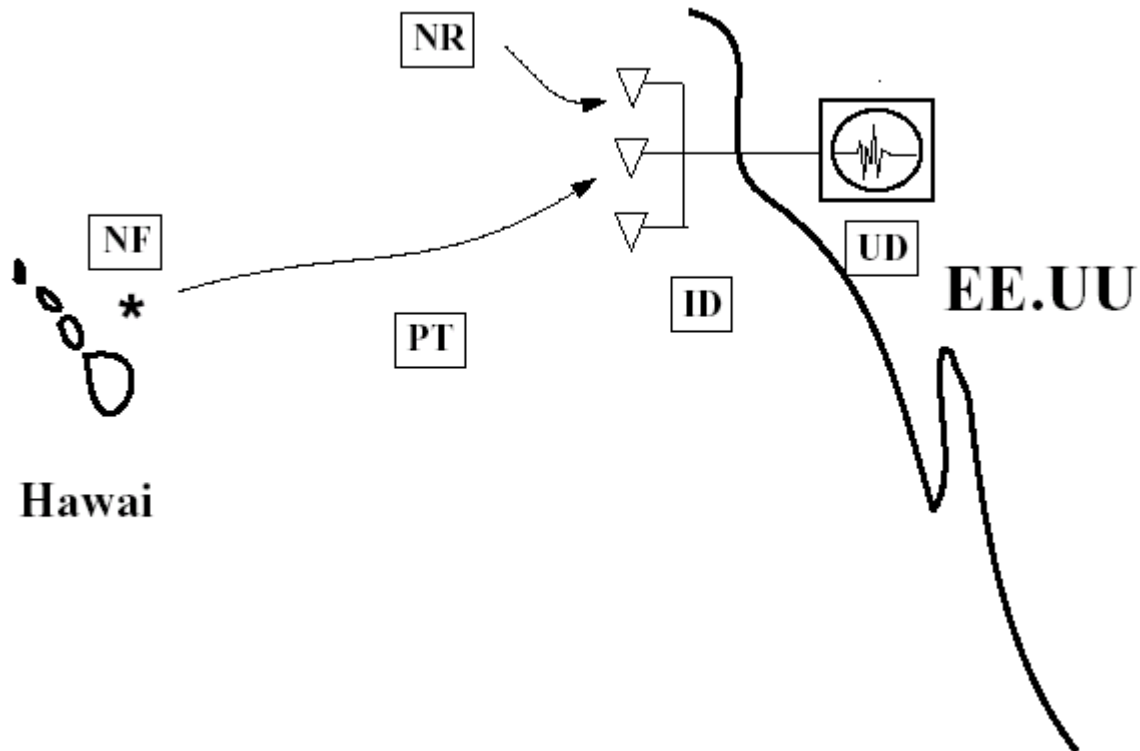
Ecuación del sonar activo



$$NF - 2PT + TS - \left(\frac{NR - ID}{NRV} \right) = UD$$

1. INTRODUCCIÓN AL SONAR

Tomografía



$$NF - PT - (NR - ID) = UD$$

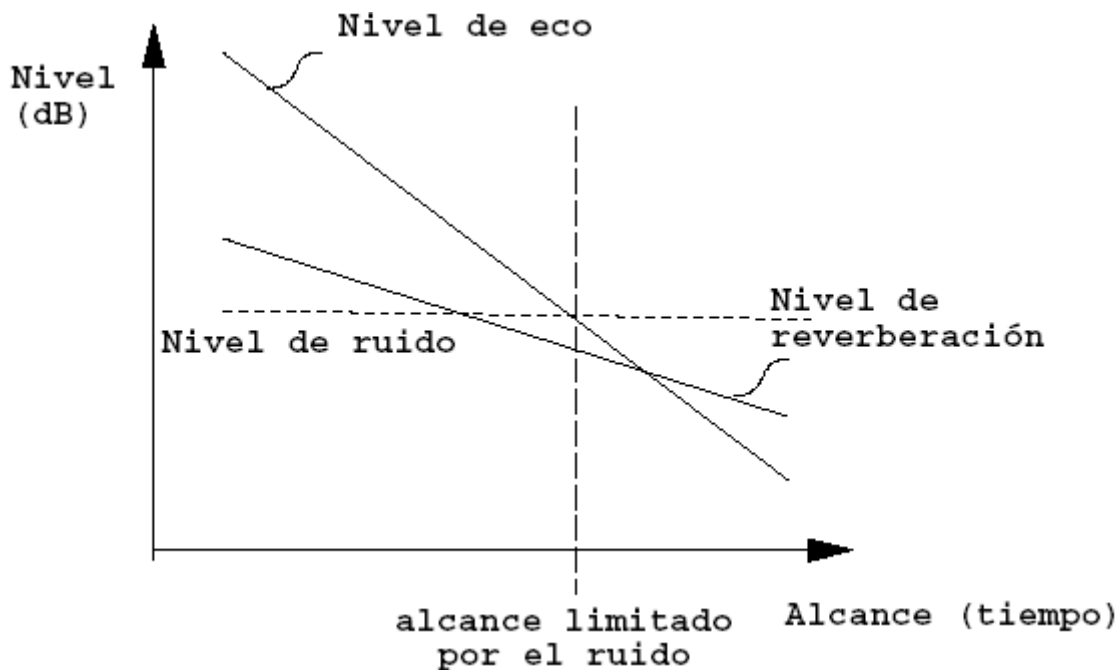
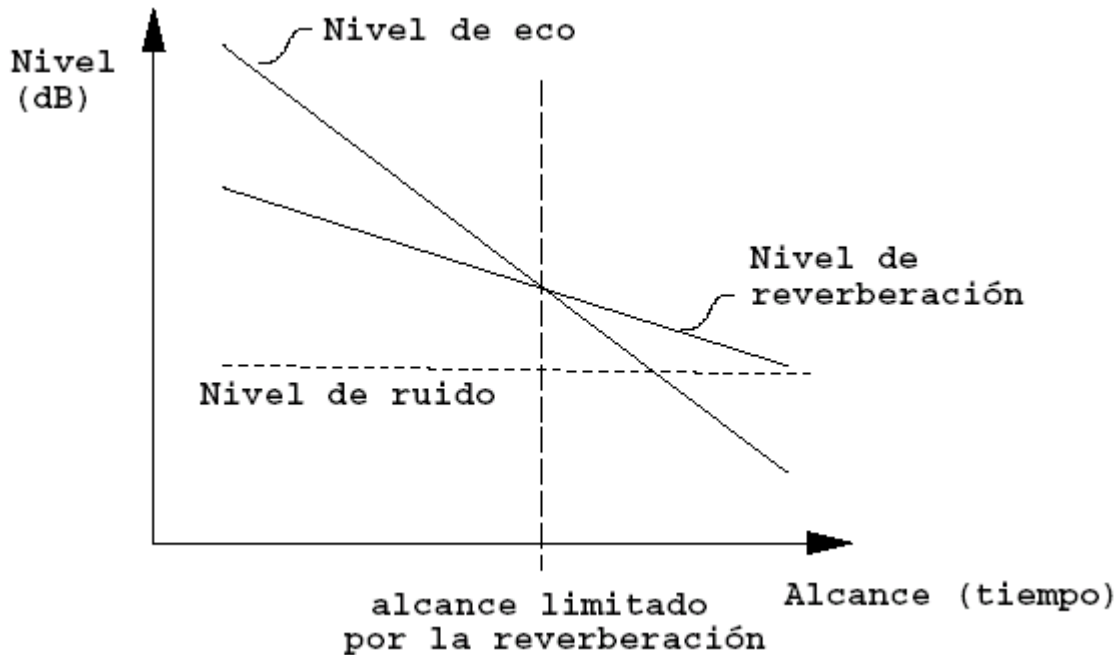
Definiciones de los parámetros:

- NF = nivel de ruido de la fuente.
- PT = pérdida de transmisión.
- NR = nivel de ruido.
- ID = índice de directividad del sistema.
- NRV = nivel de reverberación.
- TS (Target Strength) = fuerza del blanco.
- UD = umbral de detección.

1. INTRODUCCIÓN AL SONAR

Reverberación frente a alcance limitado por el ruido

- Sonar activo.
- Ruido independiente del alcance frente a reverberación dependiente del alcance.
- Defina *Nivel de eco*: $EL = NF - 2PT + TS$



1. INTRODUCCIÓN AL SONAR

Definición de intensidad del sonido

dB = decibelio (en honor a Alexander Graham Bell)

Para acústica:

$$\text{dB} = 10 \log_{10} \frac{I}{I_{\text{ref}}}$$

2. ARRAYS

2 Arrays

Resumen de fórmulas de *array*

Nivel de ruido radiado por la fuente

- $NF = 10 \log \frac{I}{I_{ref}} = 10 \log \frac{p^2}{p_{ref}^2}$ (general)
- $NF = 171 + 10 \log \mathcal{P}$ (omni)
- $NF = 171 + 10 \log \mathcal{P} + ID$ (direccional)

Índice de directividad del sistema

- $ID = 10 \log \left(\frac{I_D}{I_O} \right)$ (general)

I_D = intensidad direccional (medida en el centro del haz).

I_O = intensidad omnidireccional.

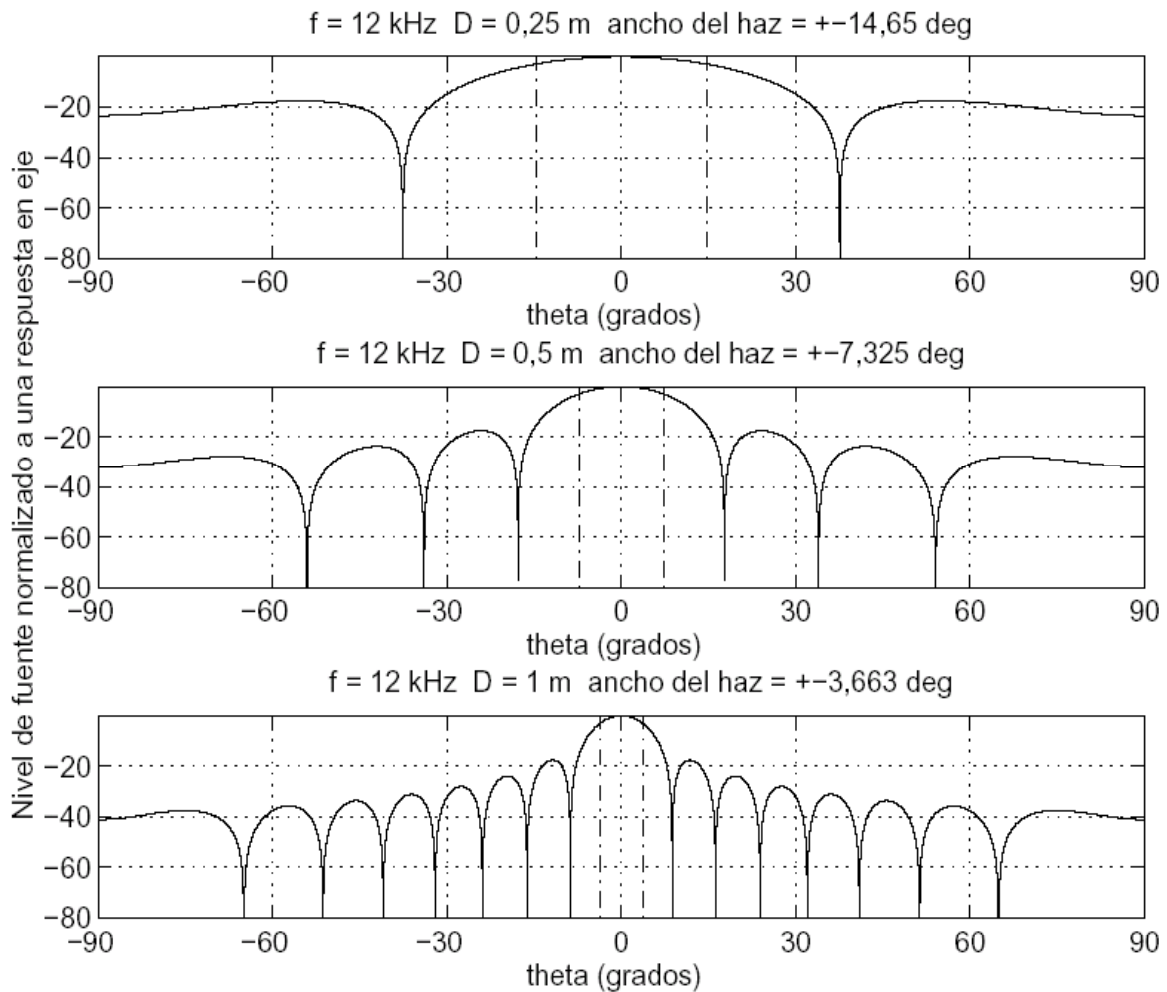
(la misma potencia de fuente radiada por igual en todas las direcciones).

- $ID = 10 \log \left(\frac{2L}{\lambda} \right)$ (line array)
- $ID = 10 \log \left(\left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 \right) = 20 \log \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)$ (array de disco)
- $ID = 10 \log \left(\frac{4\pi L_x L_y}{\lambda^2} \right)$ (array rect.)

Ancho del haz de 3-dB θ_{3dB}

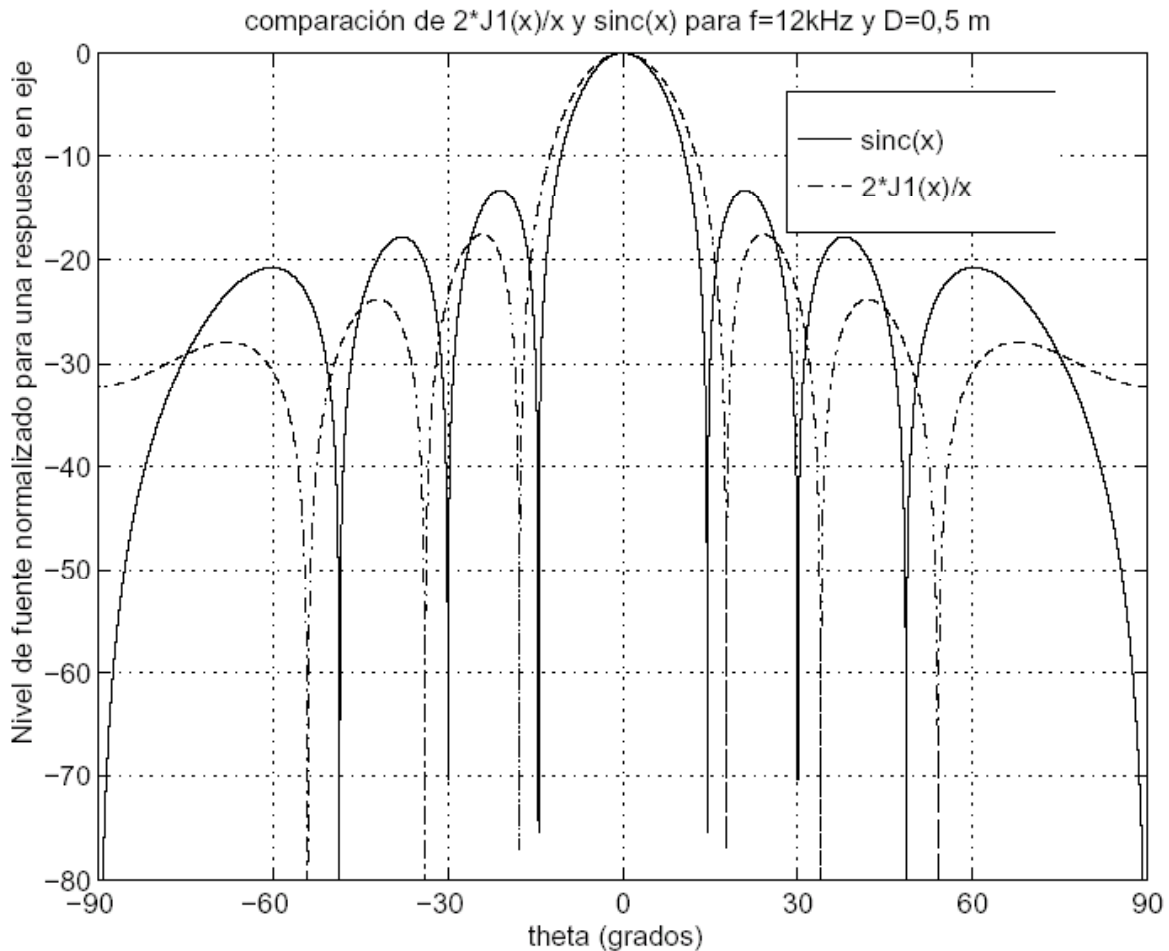
- $\theta_{3dB} = \pm \frac{25,3\lambda}{L}$ deg. (line array)
- $\theta_{3dB} = \pm \frac{29,5\lambda}{D}$ deg. (array de disco)
- $\theta_{3dB} = \pm \frac{25,3\lambda}{L_x}, \pm \frac{25,3\lambda}{L_y}$ deg. (array rect.)

2. ARRAYS



En este diagrama se muestra el patrón de haz para un transductor circular para D/λ igual a 2, 4 y 8. Observe que el patrón de haz se va estrechando conforme aumenta el diámetro.

2. ARRAYS



En este diagrama se compara la respuesta de un *line array* y un transductor de disco circular. El patrón de haz correspondiente al *line array* es el siguiente:

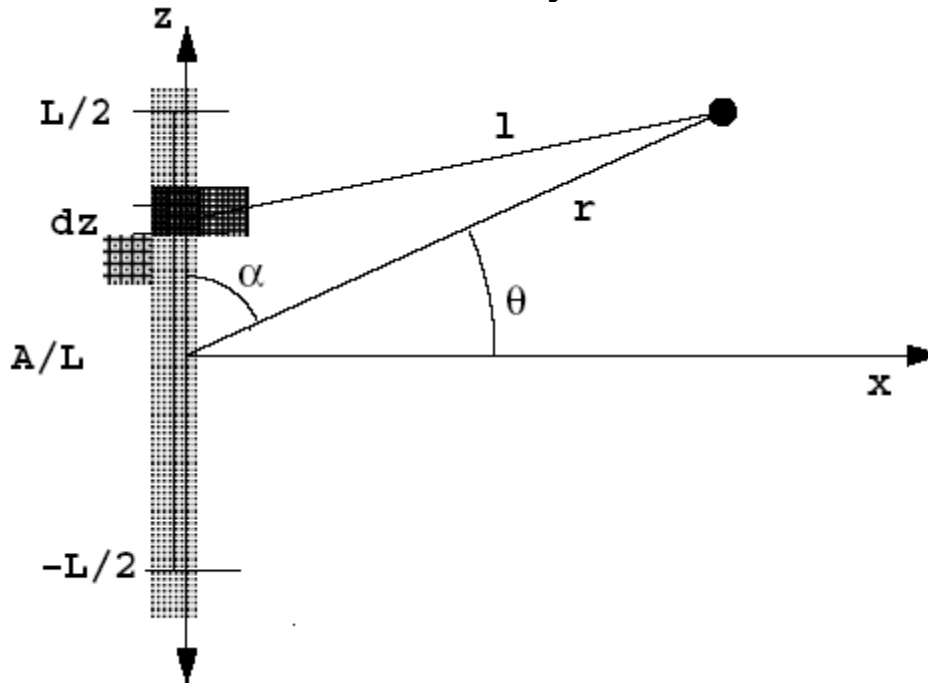
$$b(\theta) = \left[\frac{\sin\left(\frac{1}{2}kL \sin \theta\right)}{\frac{1}{2}kL \sin \theta} \right]^2$$

mientras que para el *array de disco* es:

$$b(\theta) = \left[\frac{2J_1\left(\frac{1}{2}kD \sin \theta\right)}{\frac{1}{2}kD \sin \theta} \right]^2$$

donde $J_1(x)$ es la función de Bessel del primer tipo. Para el *line array*, la altura del primer lóbulo lateral es 13 dB menor que el pico del lóbulo principal. Para el disco, la altura del primer lóbulo lateral es 17 dB menor que el pico del lóbulo principal.

2. ARRAYS

Line array**Geometría del problema**

Nuestro objetivo es calcular el campo acústico en el punto (r, θ) en el campo lejano de un *line array* uniforme de intensidad A/L . En primer lugar, hallemos una expresión para l en términos de r y θ . A partir de la ley de cosenos, podemos escribir:

$$l^2 = r^2 + z^2 - 2rz \cos \alpha.$$

Si factorizamos r^2 desde la izquierda y sustituimos $\sin \theta$ por $\cos \alpha$, obtenemos:

$$l^2 = r^2 \left[1 - \frac{2z}{r} \sin \theta + \frac{z^2}{r^2} \right]$$

y si tomamos la raíz cuadrada de cada lado, obtenemos:

$$l = r \left[1 - \frac{2z}{r} \sin \theta + \frac{z^2}{r^2} \right]^{\frac{1}{2}}$$

Podemos simplificar la raíz cuadrada valiéndonos del hecho de que:

$$(1 + x)^p = 1 + px + \frac{p(p-1)}{2!} + \frac{p(p-1)(p-2)}{3!} + \dots$$

2. ARRAYS

y manteniendo únicamente el primer término para $p = \frac{1}{2}$:

$$(1+x)^{\frac{1}{2}} \cong 1 + \frac{1}{2}x$$

Si aplicamos esto a la expresión anterior tenemos que:

$$l \cong r \left[1 + \frac{1}{2} \left(-\frac{2z}{r} \sin \theta + \frac{z^2}{r^2} \right) \right]$$

Por último, suponiendo que $z \ll r$, podemos omitir el término $\frac{z^2}{r^2}$ para obtener

$$l \cong r - z \sin \theta$$

Cálculo del campo

Para un elemento de longitud dz ubicado en una posición z , la amplitud en la posición de campo (r, θ) es:

$$dp = \frac{A}{L} \frac{1}{l} e^{-i(kl - \omega t)} dz$$

Obtenemos la presión total en el punto (r, θ) del campo, debido al *line array*, integrando:

$$p = \frac{A}{L} \int_{-L/2}^{L/2} \frac{1}{l} e^{-i(kl - \omega t)} dz$$

pero $l \cong r - z \sin \theta$, por lo que podemos escribir:

$$p = \frac{A}{L} e^{-i(kr - \omega t)} \int_{-L/2}^{L/2} \frac{1}{r - z \sin \theta} e^{ikz \sin \theta} dz$$

Puesto que estamos suponiendo que nos encontramos en el campo lejano, $r \gg z \sin \theta$, podemos reemplazar $\frac{1}{r - z \sin \theta}$ por $\frac{1}{r}$ y sacarlo de la integral:

$$p = \frac{A}{rL} e^{-i(kr - \omega t)} \int_{-L/2}^{L/2} e^{ikz \sin \theta} dz$$

2. ARRAYS

A continuación, evaluamos la integral:

$$p = \frac{A}{rL} e^{-i(kr-\omega t)} \left[\frac{e^{ikz \sin \theta}}{ik \sin \theta} \right]_{-L/2}^{L/2}$$

$$p = \frac{A}{rL} e^{-i(kr-\omega t)} \left[\frac{e^{\frac{1}{2}ikL \sin \theta} - e^{-\frac{1}{2}ikL \sin \theta}}{ik \sin \theta} \right]$$

Seguidamente, movemos el término $\frac{1}{L}$ dentro de los corchetes:

$$p = \frac{A}{r} e^{-i(kr-\omega t)} \left[\frac{e^{\frac{1}{2}ikL \sin \theta} - e^{-\frac{1}{2}ikL \sin \theta}}{ikL \sin \theta} \right]$$

y, valiéndonos del hecho de que $\sin(x) = \frac{e^{ix} - e^{-ix}}{2i}$, podemos escribir:

$$p = \frac{A}{r} e^{-i(kr-\omega t)} \left[\frac{\sin(\frac{1}{2}kL \sin \theta)}{\frac{1}{2}kL \sin \theta} \right]$$

que corresponde a la presión en (r, θ) provocada por el *line array*. El cuadrado del término que va entre paréntesis se define como el patrón del haz $b(\theta)$ del array:

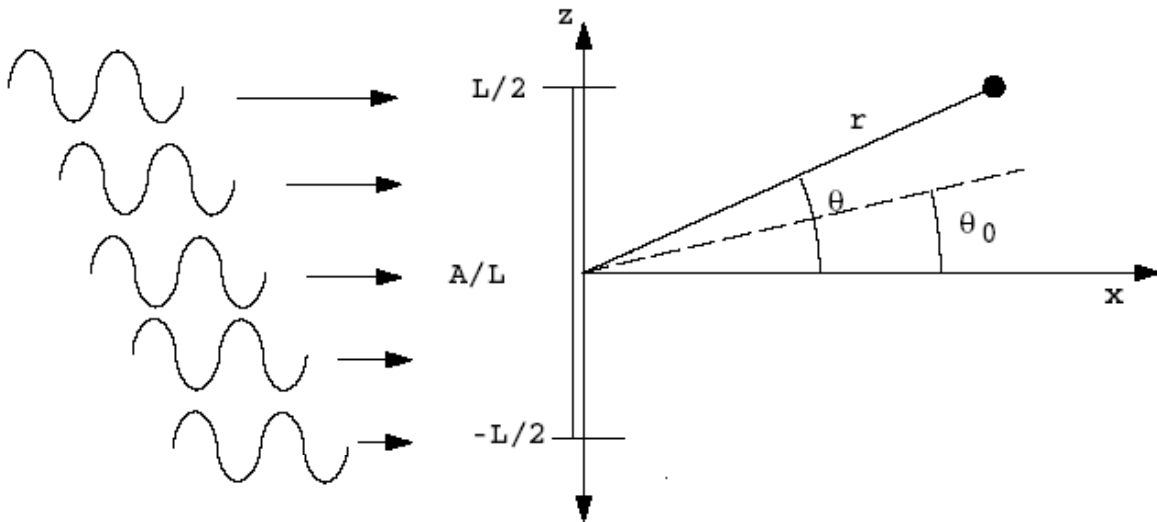
$$b(\theta) = \left[\frac{\sin(\frac{1}{2}kL \sin \theta)}{\frac{1}{2}kL \sin \theta} \right]^2$$

Line Array dirigido

Recuerde la importancia de la fase:

- Fase espacial: $kz \sin \theta = \frac{2\pi}{\lambda} z \sin \theta$
- Fase temporal: $\omega t = \frac{2\pi}{\lambda} t$; $T = \frac{1}{f}$

2. ARRAYS



$k \sin \theta =$ número de ondas vertical.

$k \sin \theta_0 =$ referencia al número de ondas vertical.

Para realizar un *line array* dirigido, aplicamos un desplazamiento de fase lineal $-zk \sin \theta_0$ a la excitación del array:

$$dp = \frac{A/L}{r} e^{iz(k \sin \theta - k \sin \theta_0)} e^{i\omega t} dz$$

podemos escribir

$$zk \sin \theta_0 = \omega z \frac{\sin \theta_0}{c}$$

$$zk \sin \theta_0 = \omega T_0(z) ; T_0(z) = \frac{z \sin \theta_0}{c}$$

El término de fase es equivalente al retardo de tiempo $T_0(z)$ que varía según la posición a lo largo del *line array*. Podemos describir el término de fase de la forma siguiente:

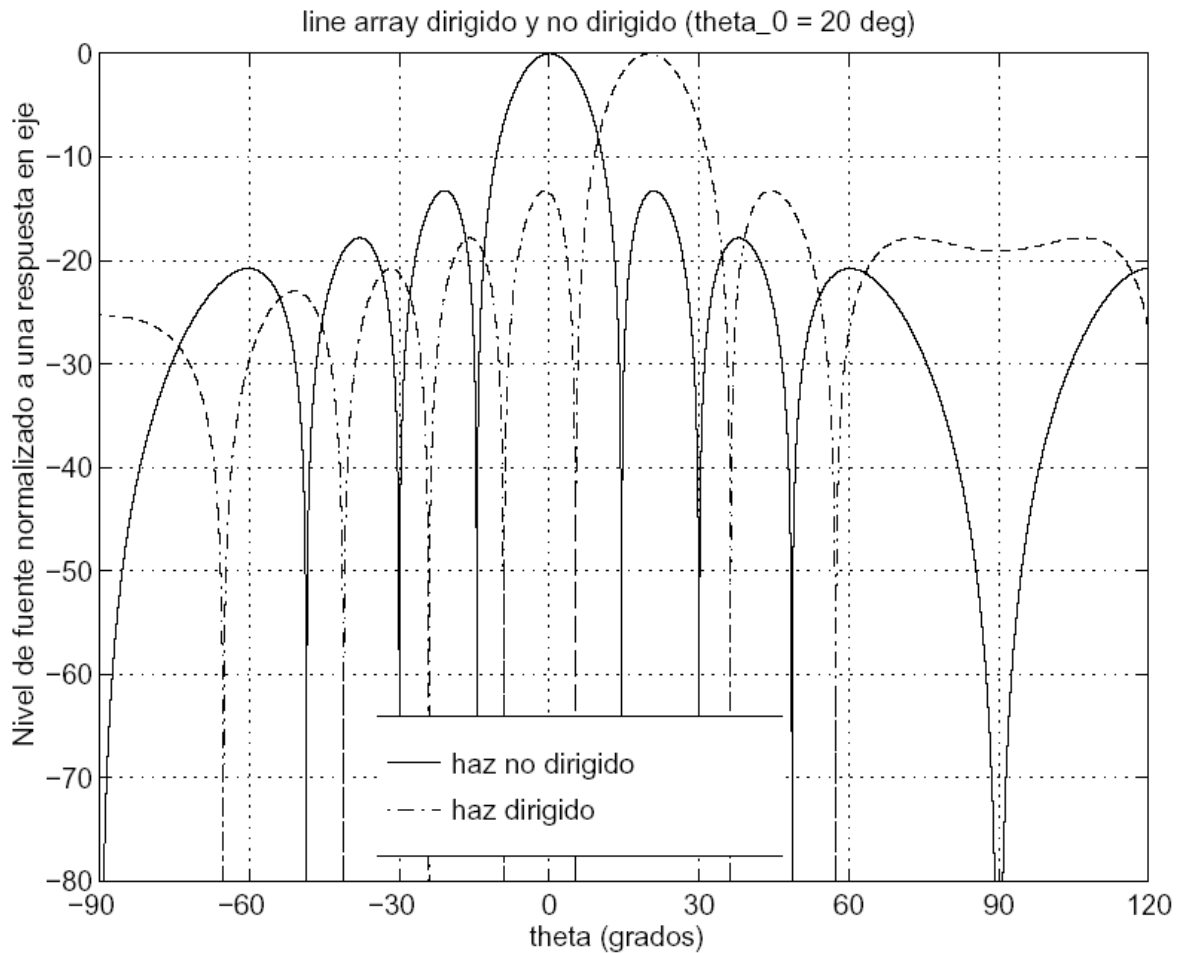
$$e^{iz(k \sin \theta - k \sin \theta_0)} e^{i\omega t} = e^{ikz \sin \theta} e^{-i\omega(t + T_0(z))}$$

si integramos la ecuación 1, tenemos que:

$$p = \frac{A}{r} e^{-i(kr - \omega t)} \left[\frac{\sin\left(\frac{kL}{2} [\sin \theta - \sin \theta_0]\right)}{\left(\frac{kL}{2} [\sin \theta - \sin \theta_0]\right)} \right]$$

2. ARRAYS

El patrón de haz que resulta es una versión variada del patrón de haz del *line array* no dirigido. El centro del lóbulo principal de la respuesta tiene lugar en $\theta = \theta_0$ en lugar de en $\theta = 0$.



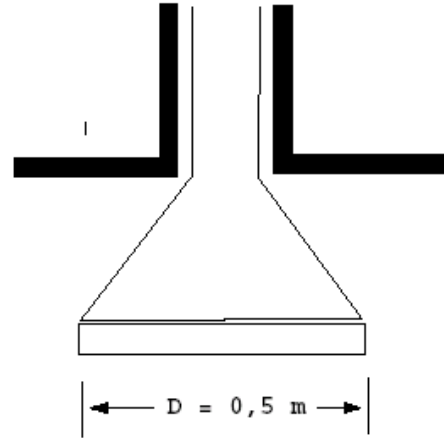
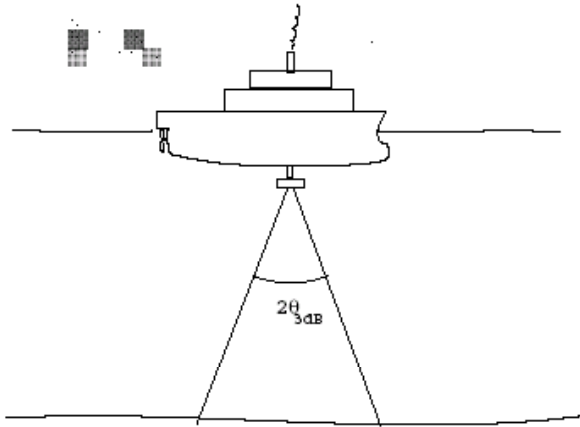
Este diagrama muestra el patrón de haz del *line array* dirigido

$$b(\theta) = \left[\frac{\sin\left(\frac{kL}{2}[\sin \theta - \sin \theta_0]\right)}{\left(\frac{kL}{2}[\sin \theta - \sin \theta_0]\right)} \right]^2$$

para $\theta_0 = 0$ y $\theta_0 = 20$ grados.

2. ARRAYS

Ejemplo 1: batimetría acústica



Dado:

- $f = 12 \text{ kHz}$
- Transductor de disco con Deflector.
- $D = 0,5 \text{ m}$
- Potencia acústica $P = 2,4 \text{ W}$

Calcule:

- $\lambda =$ _____
- $ID =$ _____
- $NF =$ _____
- $\theta_{3dB} =$ _____

Resolución espacial, ϵ

$$\epsilon = 2d \tan \theta_{3dB}$$

$$= d \cdot \underline{\hspace{2cm}}$$

Resolución de profundidad, δ

$$T_F = \frac{2d}{c} \text{ (tiempo de la primera llegada)}$$

$$T_L = \frac{2r}{c} \text{ (tiempo de la última llegada)}$$

$$\delta = (T_L - T_F) \cdot c/2$$

$$= d \left(\frac{1}{\cos \theta_{3dB}} - 1 \right)$$

$$= d \cdot \underline{\hspace{2cm}}$$

2. ARRAYS

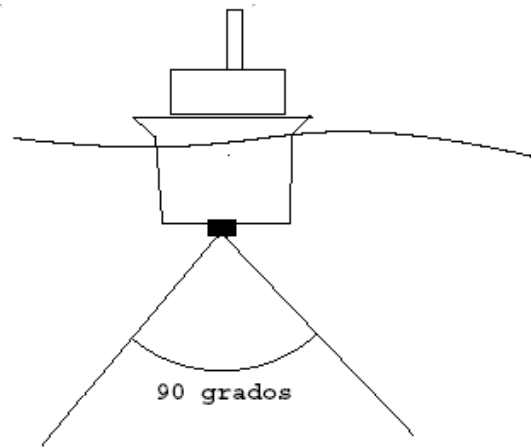
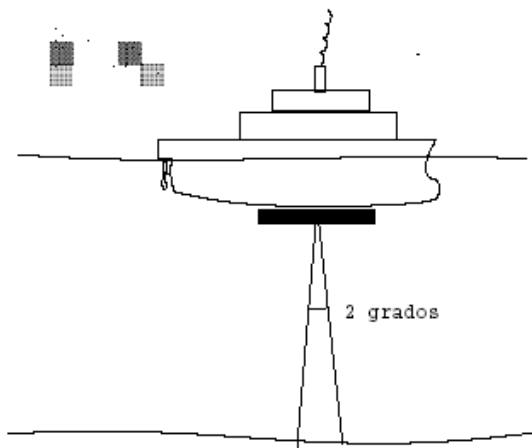
Para $d = 2$ Km.

$\epsilon =$ _____

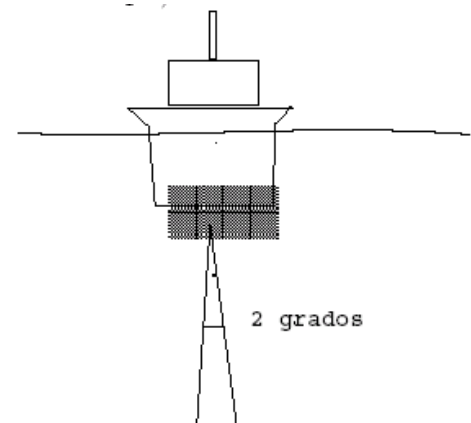
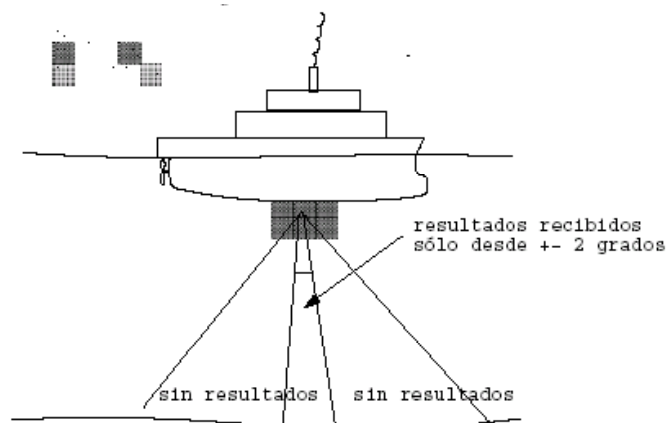
$\delta =$ _____

Ejemplo 2: *SeaBeam Swath Bathymetry* (sistema batimétrico de exploración)

Transmisión: *line array* no dirigido (a lo largo del eje del barco) de 5 metros.



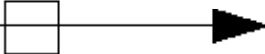
Array recibido: *line array* dirigido (de través) de 5 metros.



Haz neto (vista del plano)

2. ARRAYS

Trayectoria
del barco

A horizontal line with an arrowhead pointing to the right. A small square is positioned on the line, centered between the text and the arrowhead.

Un haz,
2 por 2 grados
(sin dirección)

Trayectoria
del barco

A horizontal line with an arrowhead pointing to the right. A vertical column of ten squares is positioned on the line, centered between the text and the arrowhead. The squares are stacked vertically, with the middle square overlapping the line.

100 haces, 2 por 2 grados
(con dirección)

3. PROPAGACIÓN, PRIMERA PARTE: DISPERSIÓN Y ABSORCIÓN

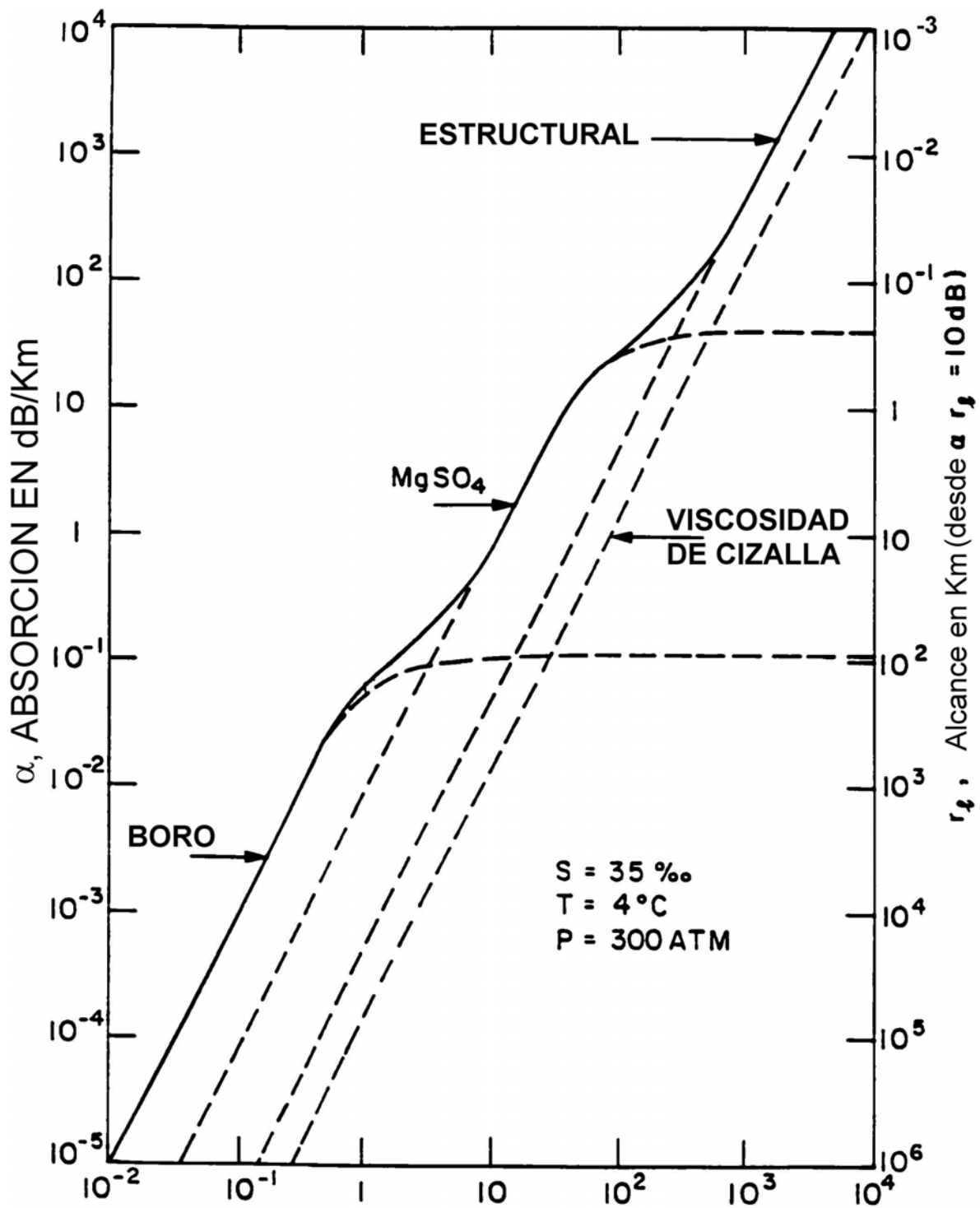
3. Propagación, primera parte: dispersión y absorción

Tabla de valores para el coeficiente de absorción (alfa)

13.00 Otoño, 1999. Acústica: tabla de coeficientes de atenuación

frecuencia [Hz]	alfa [dB/km]	frecuencia [Hz]	alfa [dB/km]
1	0,003	50000	15,9
10	0,003	60000	19,8
100	0,004	70000	23,2
200	0,007	80000	26,2
300	0,012	90000	28,9
400	0,018	100000 (100 kHz)	31,2
500	0,026	200000	47,4
600	0,033	300000	63,1
700	0,041	400000	83,1
800	0,048	500000	108
900	0,056	600000	139
1000 (1kHz)	0,063	700000	174
2000	0,12	800000	216
3000	0,18	900000	264
4000	0,26	1000000 (1 MHz)	315
5000	0,35	2000000	1140
6000	0,46	3000000	2520
7000	0,59	4000000	4440
8000	0,73	5000000	6920
9000	0,90	6000000	9940
10000 (10 kHz)	1,08	7000000	13520
20000	3,78	8000000	17640
30000	7,55	9000000	22320
40000	11,8	10000000 (10 MHz)	27540

3. PROPAGACIÓN, PRIMERA PARTE: DISPERSIÓN Y ABSORCIÓN



Absorción del sonido en el agua marina (apuntes de clase del curso 13.851).

3. PROPAGACIÓN, PRIMERA PARTE: DISPERSIÓN Y ABSORCIÓN

Absorción del sonido en el agua marina

Mecanismo de relajación

(conversión de energía acústica en calor)

Cuatro mecanismos:

- viscosidad de cizalla ($\tau \approx 10^{-12}$ seg)
- viscosidad estructural ($\tau \approx 10^{-12}$ seg)
- sulfato de magnesio – MgSO_4 ($\tau \approx 10^{-6}$ seg) [1,35 ppt]
- ácido bórico ($\tau \approx 10^{-4}$ seg) [4,6 ppm]

Tiempo de relajación, τ

- Si $\omega\tau \ll 1$, entonces se da poca pérdida.
- Si $\omega\tau \approx 1$ o a un número mayor, entonces se genera calor (haciendo que el fluido se mueva demasiado rápido).

El coeficiente α de atenuación depende de la temperatura, la salinidad, la presión y el pH. La siguiente fórmula para α en dB/km se aplica en $T = 4^\circ \text{C}$, $S = 35$ ppt, $\text{pH} = 8,0$ y profundidad = 1000 m. (Urlick, página 108).

$$\alpha \approx 3,0 \times 10^{-3} + \frac{0,1f^2}{1 + f^2} + \frac{44f^2}{4100 + f^2} + 2,75 \times 10^{-4} f^2$$

Resolver la pérdida de transmisión PT para un alcance dado

La ecuación

$$20 \log r + 10^{-3} \alpha r = PT$$

no se puede resolver de forma analítica. Si las pérdidas por absorción y dispersión son comparables en magnitud, tiene tres opciones:

- En un diseño de sonar “propio”, se puede obtener una estimación inicial para el alcance, ignorando, en primer lugar, la absorción y, a continuación, insertando números con absorción hasta conseguir una respuesta que se acerque lo suficiente.

3. PROPAGACIÓN, PRIMERA PARTE: DISTRIBUCIÓN Y ABSORCIÓN

- Para conseguir un procedimiento más sistemático, se puede realizar la iteración de Newton-Raphson (a mano o con ayuda de un programa de computadora), utilizando el alcance sin absorción como aproximación inicial.
- Otra buena estrategia (y también una buena forma de comprobar sus resultados) es realizar un diagrama de PT frente al alcance, con la ayuda de un programa de computadora (p.ej., Matlab).

Método de Newton-Raphson: (fórmulas numéricas en el apartado C, página 362)

$$x_{i+1} = x_i - \frac{f(x_i)}{f'(x_i)}$$

Para hallar la solución para un alcance de PT dado, tenemos:

$$f(x_i) = TL - 20 \log x_i - 10^{-3} \alpha x_i$$

$$f'(x_i) = -\frac{20}{r} - 10^{-3} \alpha$$

$\alpha =$ _____

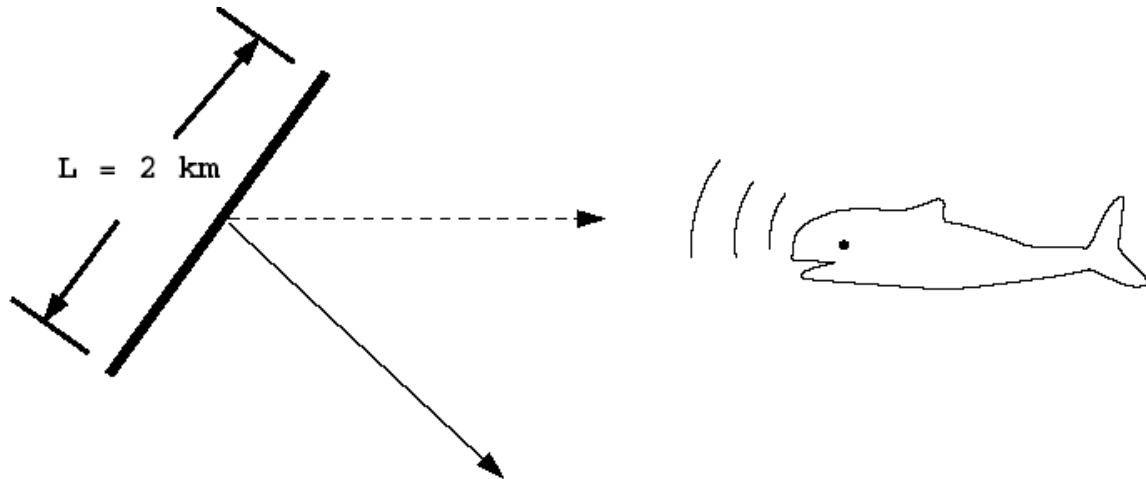
PT = _____

$x_0 =$ _____

i	x_i	$20 \log x_i$	$0,001 \alpha x_i$	$f(x_i)$	$f'(x_i)$	$f(x_i)/f'(x_i)$	$x_{i+1} = x_i - \frac{f(x_i)}{f'(x_i)}$
0							
1							
2							
3							
4							

3. PROPAGACIÓN, PRIMERA PARTE: DISTRIBUCIÓN Y ABSORCIÓN

Ejemplo 1: seguimiento de ballenas



Ecuación del sonar pasivo: _____

Dado:

- $f_0 = 250 \text{ Hz}$
- $\rho = 1 \text{ vatio (omni)}$
- *Line array*: $L = 2 \text{ Km}$
- $UD = 15 \text{ dB}$
- $NR = 70 \text{ dB}$

Pregunta: ¿a cuánta distancia podemos escuchar el sonido de la ballena?

$$PT = \underline{\hspace{10em}} = \underline{\hspace{10em}}$$

$$\lambda = \underline{\hspace{10em}}$$

$$ID = \underline{\hspace{10em}}$$

$$NF = \underline{\hspace{10em}}$$

$$PT = 20 \log r + \alpha * r * 10^{-3} = \underline{\hspace{10em}}$$

$$\alpha = \underline{\hspace{10em}}$$

$$R_t = \frac{8680}{\alpha} = \underline{\hspace{10em}}$$

$$r = \underline{\hspace{10em}} \text{ (sin absorción)} \quad r = \underline{\hspace{10em}} \text{ (con absorción)}$$

3. PROPAGACIÓN, PRIMERA PARTE: DISTRIBUCIÓN Y ABSORCIÓN

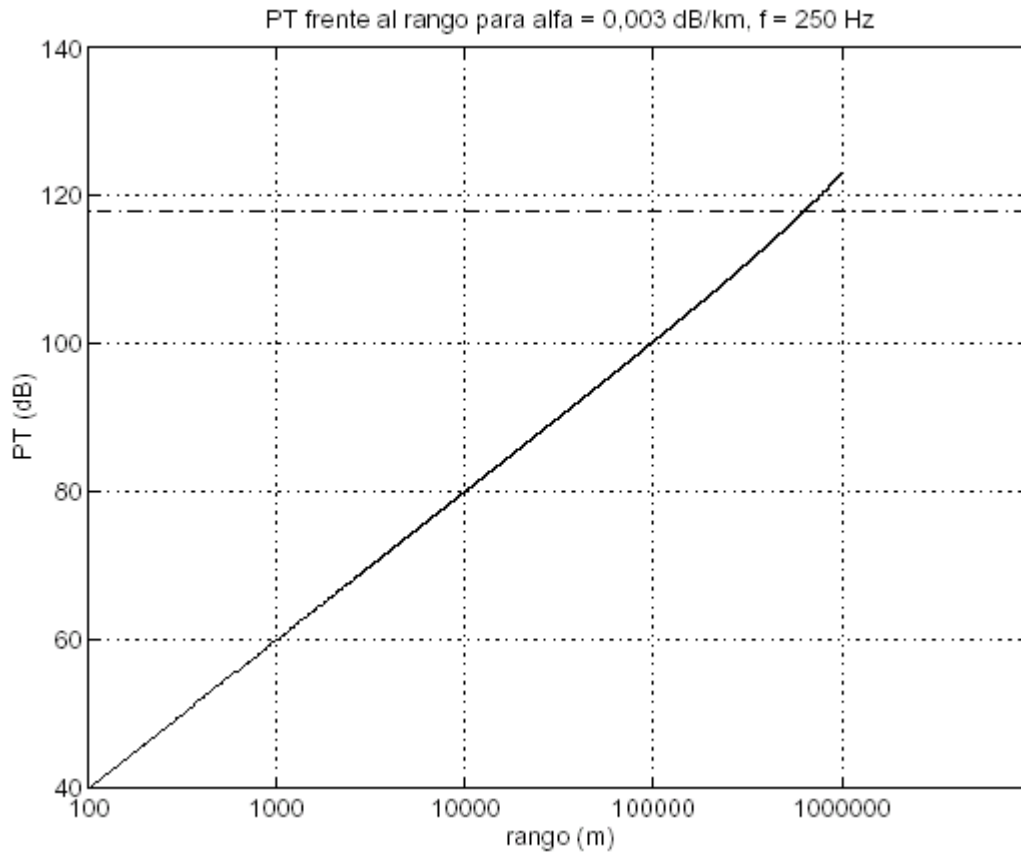


Figura 1: PT frente al alcance para el ejemplo del seguimiento de ballenas ($f = 250$ Hz, $\alpha = 0,003$ dB/km).

$$f(x_i) = TL - 20 \log x_i - 10^{-3} \alpha x_i = \underline{\hspace{10em}}$$

$$f'(x_i) = -\frac{20}{r} - 10^{-3} \alpha = \underline{\hspace{10em}}$$

$$\alpha = \underline{\hspace{2em}} \quad TL = \underline{\hspace{2em}} \quad x_0 = \underline{\hspace{2em}}$$

i	x_i	$20 \log x_i$	$0,001 \alpha x_i$	$f(x_i)$	$f'(x_i)$	$f(x_i)/f'(x_i)$	$x_{i+1} = x_i - \frac{f(x_i)}{f'(x_i)}$
0	500.000	114	1,5	-1,5	$-3,7 \times 10^{-5}$	40540	459500
1	459.500	13,2	1,38	-0,6	$-4,05 \times 10^{-5}$	14805	444694
2	445.000	112,96	1,34	-0,3			
3							
4							

3. PROPAGACIÓN, PRIMERA PARTE: DISTRIBUCIÓN Y ABSORCIÓN

Ejemplo 2: seguimiento de delfines



Ecuación del sonar activo: _____

Dado:

- $f_0 = 125$ kHz
- NF = 220 dB re $1 \mu\text{Pa}$ a 1 metro
- *Line array*: $L = 1$ Km
- UD = 15 dB
- NR = 70 dB

Pregunta: ¿a cuánta distancia podemos escuchar (detectar) el sonido del delfín?

$$PT = \underline{\hspace{10em}} = \underline{\hspace{10em}}$$

$$\lambda = \underline{\hspace{10em}}$$

$$ID = \underline{\hspace{10em}}$$

$$NF = \underline{\hspace{10em}}$$

$$PT = 20 \log r + \alpha * r * 10^{-3} = \underline{\hspace{10em}}$$

$$\alpha = \underline{\hspace{10em}}$$

$$R_t = \frac{8680}{\alpha} = \underline{\hspace{10em}}$$

$$r = \underline{\hspace{10em}} \text{ (sin absorción)} \quad r = \underline{\hspace{10em}} \text{ (con absorción)}$$

$$r = \underline{\hspace{10em}} \text{ (sin dispersión)}$$

3. PROPAGACIÓN, PRIMERA PARTE: DISTRIBUCIÓN Y ABSORCIÓN

$$f(x_i) = TL - 20 \log x_i - 10^{-3} \alpha x_i = \underline{\hspace{2cm}}$$

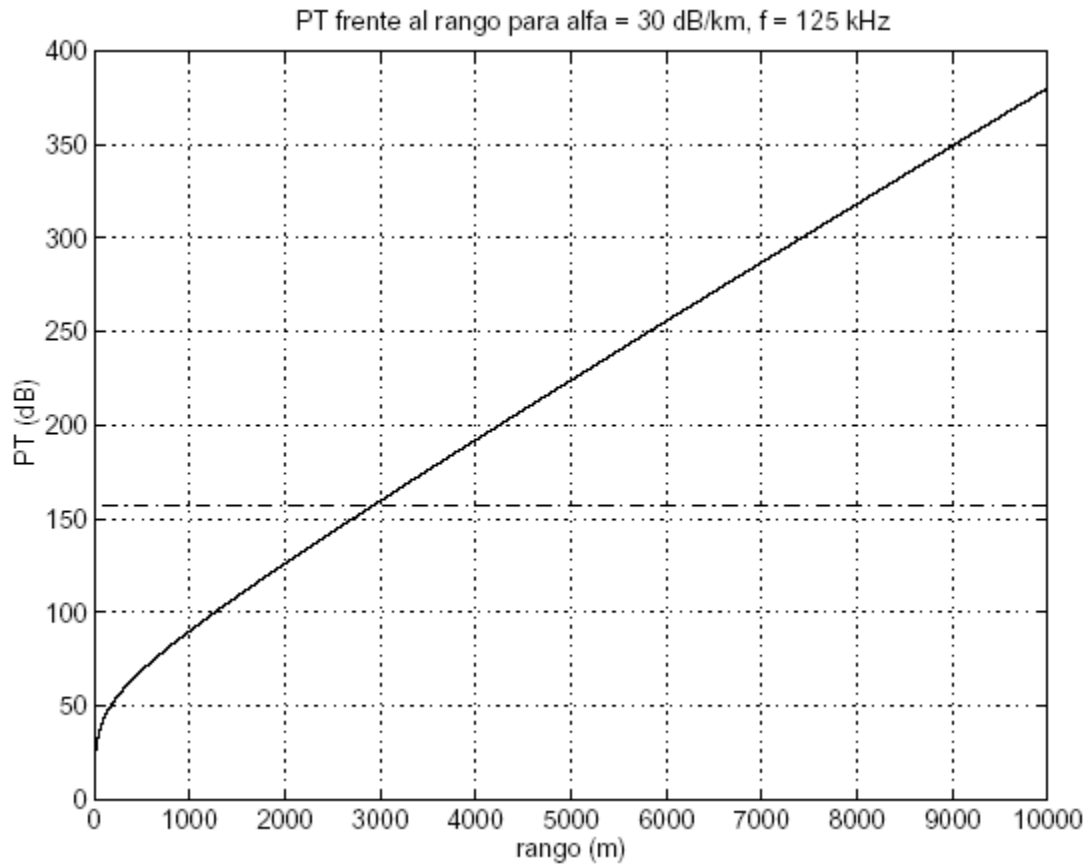


Figura 2: PT frente al alcance para el ejemplo del seguimiento de delfines ($f = 125$ kHz, $\alpha = 30$ dB/km).

$$f'(x_i) = -\frac{20}{r} - 10^{-3} \alpha = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$\alpha = \underline{\hspace{2cm}} \quad TL = \underline{\hspace{2cm}} \quad x_0 = \underline{\hspace{2cm}}$$

i	x_i	$20 \log x_i$	$0,001 \alpha x_i$	$f(x_i)$	$f'(x_i)$	$f(x_i)/f'(x_i)$	$x_{i+1} = x_i - \frac{f(x_i)}{f'(x_i)}$
0	5000	74	150	-67	-0,034	1970	3030
1	3030	69,6	90,9	-3,5	-0,037	95	2935
2	2935	69,35	88,05	-0,4	-0,368	10,9	2925
3	2925						
4							

4. PROPAGACIÓN, SEGUNDA PARTE: REFRACCIÓN

4. Propagación, segunda parte: refracción

En general, la velocidad c del sonido viene determinada por una relación compleja entre la salinidad, la temperatura y la presión:

$$c = f(S, T, D)$$

La fórmula de Medwin es una aproximación útil para c en el agua marina:

$$c = 1449,2 + 4,6T - 0,055T^2 + 0,00029T^3 \\ + (1,34 - 0,010T)(S - 35) + 0,016D$$

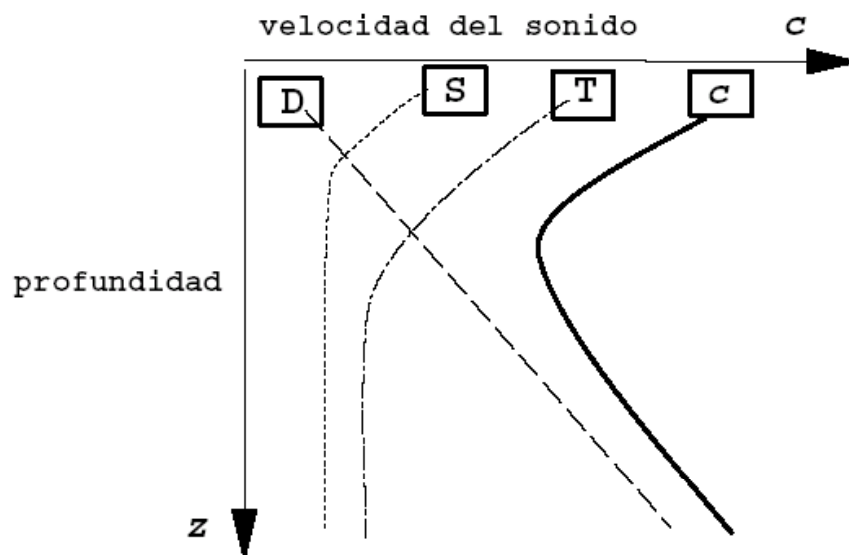
donde S es la salinidad en partes por mil (ppt), T es la temperatura en grados Celsius y D es la profundidad en metros. (Véase Ogilvie, apéndice A.)

Derivados parciales:

$$\frac{\partial c}{\partial T} = 4,6 \text{ m/seg/C}^\circ \quad \frac{\partial c}{\partial S} = 1,34 \text{ m/seg/ppt} \quad \frac{\partial c}{\partial D} = 0,016 \text{ m/seg/m}$$

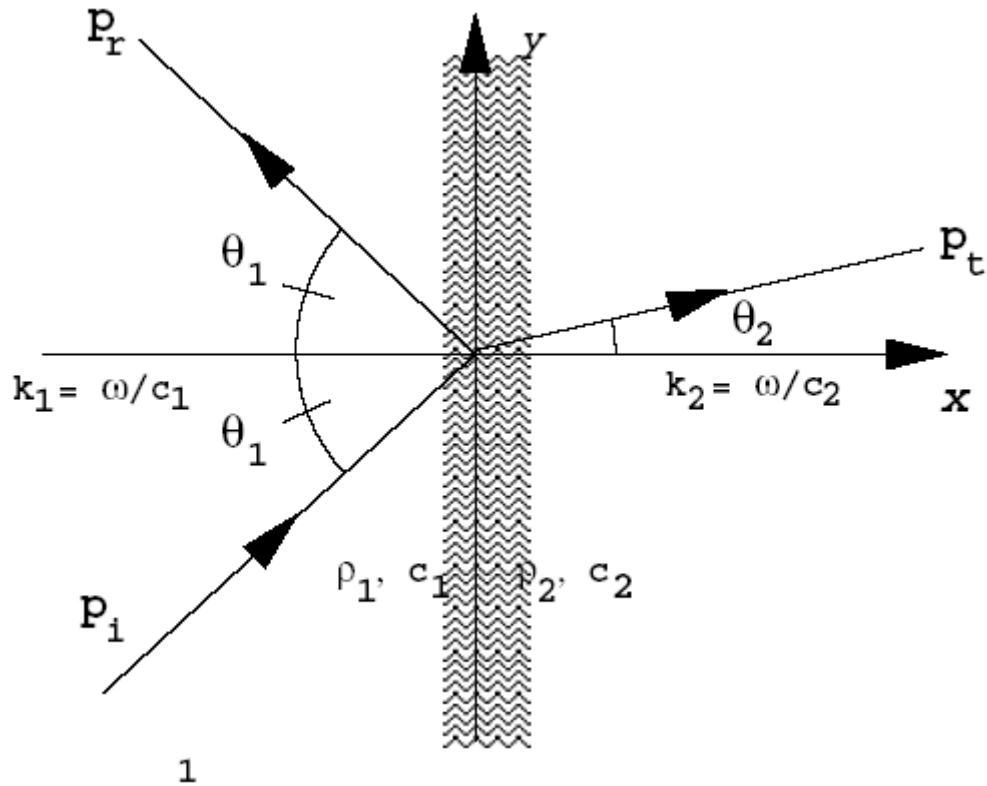
Por ejemplo:

- $\Delta T = 25^\circ \Rightarrow \Delta c = 115 \text{ m/seg}$
- $\Delta S = 5 \text{ ppt} \Rightarrow \Delta c = 6,5 \text{ m/seg}$
- $\Delta D = 6000 \text{ m} \Rightarrow \Delta c = 96 \text{ m/seg}$



4. PROPAGACIÓN, SEGUNDA PARTE: REFRACCIÓN

Sonido a través de una interfaz



$$p_1 = p_i + p_r = I e^{-i(k_1 x \cos \theta_1 + k_1 y \sin \theta_1)} + R e^{-i(-k_1 x \cos \theta_1 + k_1 y \sin \theta_1)}$$

$$p_2 = p_t = T e^{-i(k_2 x \cos \theta_2 + k_2 y \sin \theta_2)}$$

En $x = 0$, se pide que $p_1 = p_2$ (continuidad de presión)

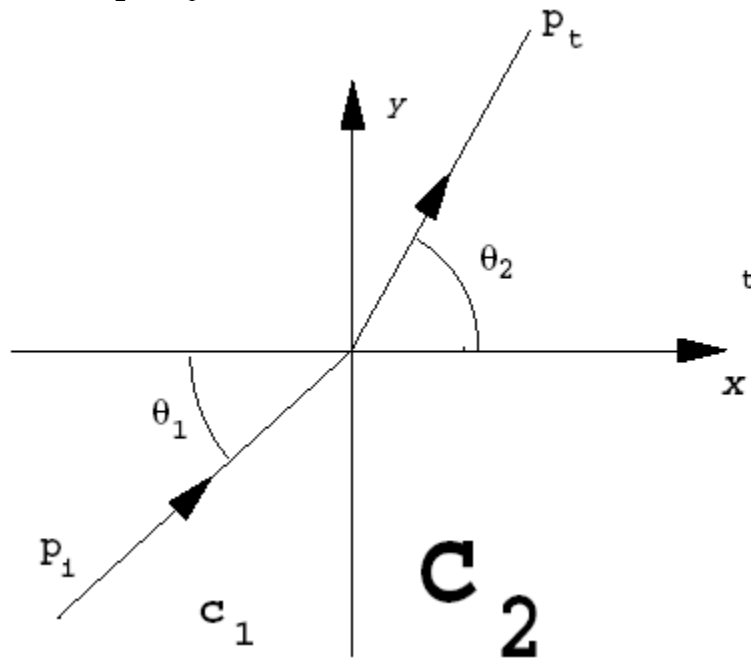
$$(I + R) e^{-i k_1 y \sin \theta_1} = T e^{-i k_2 y \sin \theta_2}$$

Establezca la correspondencia con la fase para obtener la ley de Snell:

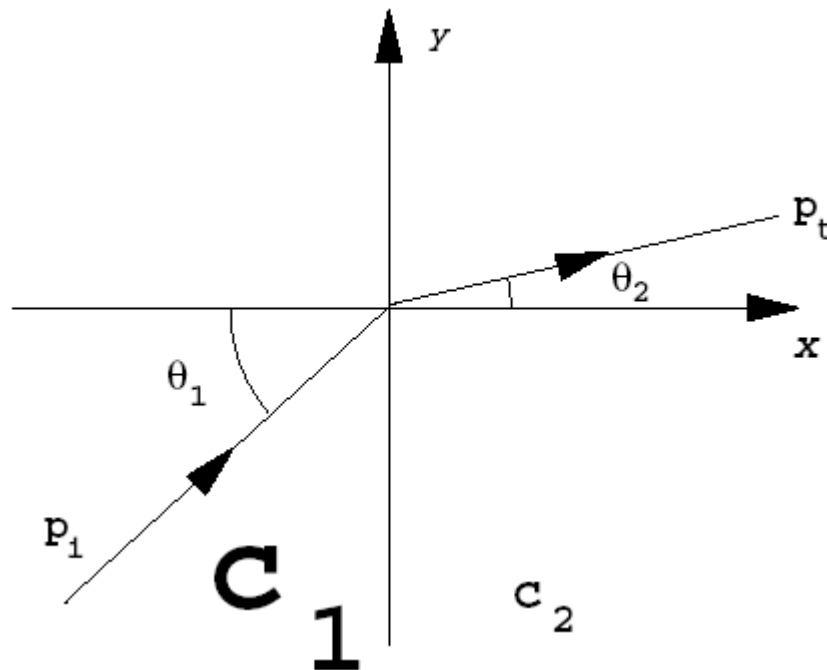
$$\frac{\sin \theta_1}{c_1} = \frac{\sin \theta_2}{c_2}$$

4. PROPAGACIÓN, SEGUNDA PARTE: REFRACCIÓN

Si $c_2 > c_1$, entonces $\theta_2 > \theta_1$



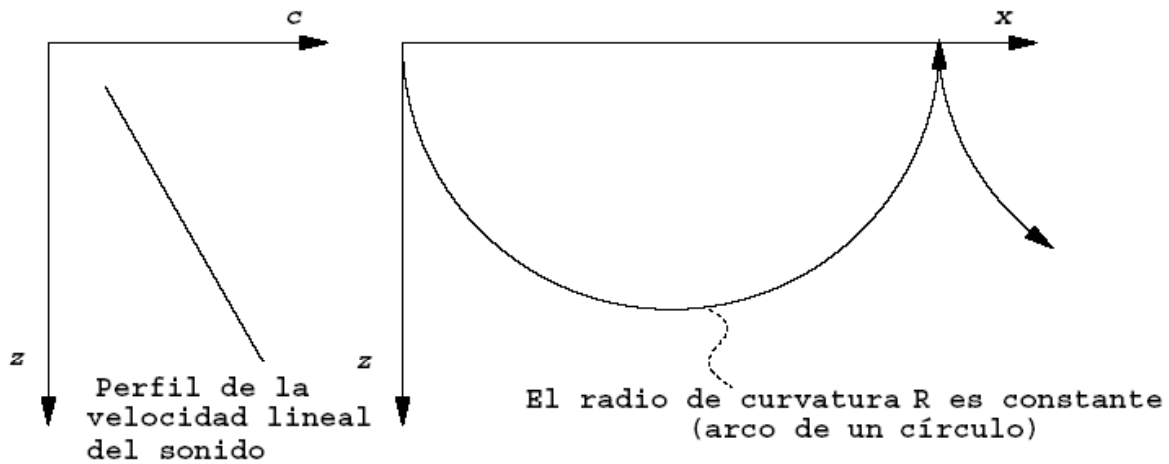
Si $c_2 < c_1$, entonces $\theta_2 < \theta_1$



El sonido se curva *hacia* la región a *baja* velocidad.

El sonido se curva *hacia el lado opuesto* de la región a *alta* velocidad.

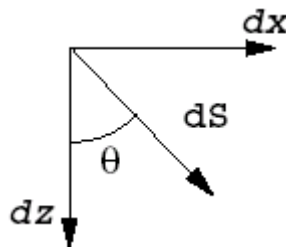
4. PROPAGACIÓN, SEGUNDA PARTE: REFRACCIÓN



Objetivo: probar que el radio de curvatura R es constante para un gradiente de la velocidad lineal del sonido.

Utilice lo siguiente:

1. La ley de Snell: $\frac{\sin \theta}{c} = \text{constante} = \sigma$ o $c = \frac{\sin \theta}{\sigma}$
(σ es la lentitud horizontal o parámetro del rayo)
2. Radio de curvatura: $R = \frac{dS}{d\theta}$
3. Gradiente : $g = \frac{dc}{dz}$
4. $dz = dS \cos \theta$



Primero, utilice la ecuación 4 en la ecuación 2:

$$R = \frac{dS}{d\theta} = \frac{dz}{d\theta} \cdot \frac{1}{\cos \theta}$$

$$R = \frac{dz}{dc} \frac{dc}{d\theta} \cdot \frac{1}{\cos \theta}$$

4. PROPAGACIÓN, SEGUNDA PARTE: REFRACCIÓN

A continuación, utilice la ecuación 3 para $\frac{dz}{dc}$:

$$R = \frac{1}{g \cos \theta} \cdot \frac{dc}{d\theta}$$

pero a partir de la ecuación 1 podemos escribir:

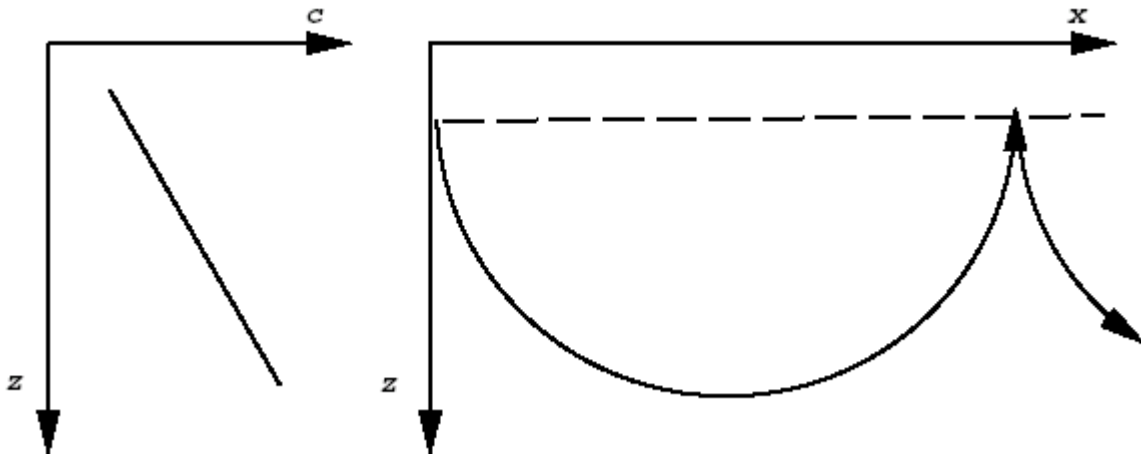
$$\frac{dc}{d\theta} = \frac{\cos \theta}{\sigma}$$

por lo que podemos escribir:

$$R = \frac{1}{g\sigma}$$

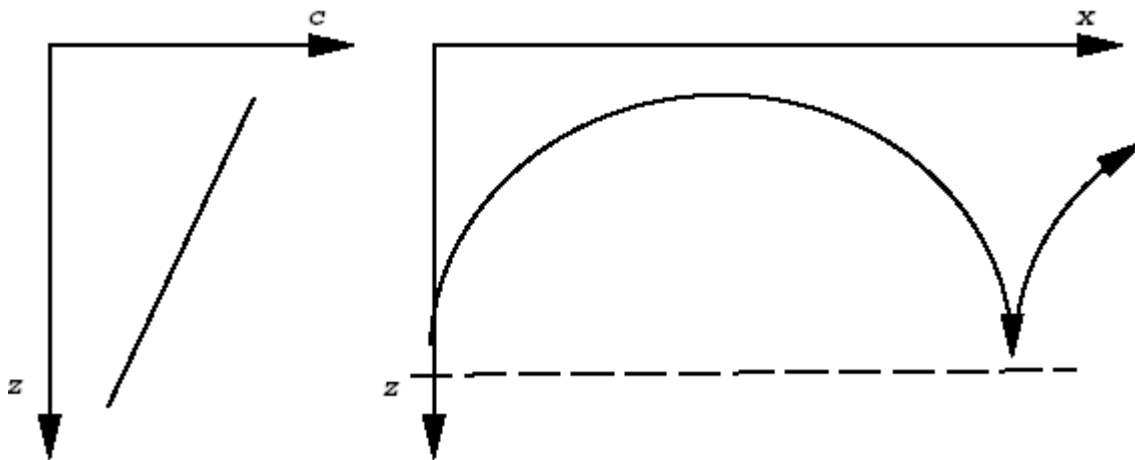
Por consiguiente, para el gradiente de la velocidad lineal del sonido, el radio de curvatura es constante.

⇒ **las trayectorias del rayo son arcos de un círculo**



Para el gradiente $g > 0$, se da una refracción hacia arriba.

4. PROPAGACIÓN, SEGUNDA PARTE: REFRACCIÓN

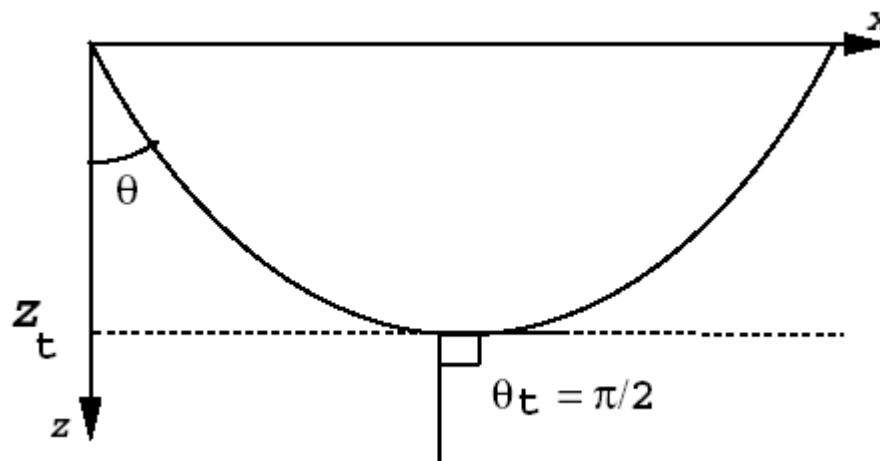


Para el gradiente $g < 0$, se da una reflexión hacia abajo.

Otras formas para R

Puesto que $\frac{\sin \theta}{c} = \sigma = \text{constante}$ para un rayo, podemos seleccionar entre cualquier valor conocido.

Por ejemplo, seleccione $\frac{\sin \theta}{c}$ en el punto de cambio $z = z_t$



$$\text{En } \theta = \frac{\pi}{2} \implies \frac{\sin \theta(z_t)}{c(z_t)} = \frac{1}{c(z_t)} = \sigma$$

4. PROPAGACIÓN, SEGUNDA PARTE: REFRACCIÓN

Por lo tanto:

$$R = \frac{c(z_t)}{g}$$

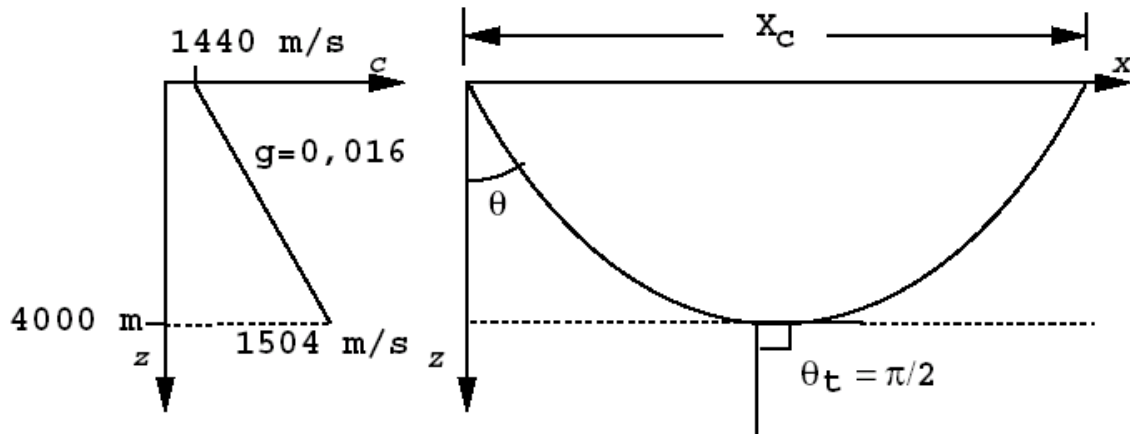
Pero

$$c(z_t) = c(z_0) + g(z_t - z_0)$$

Por consiguiente, para z_0 podemos escribir cualquier profundidad dada:

$$R = \frac{c(z_0)}{g} + (z_t - z_0)$$

Ejemplo 1: propagación ártica

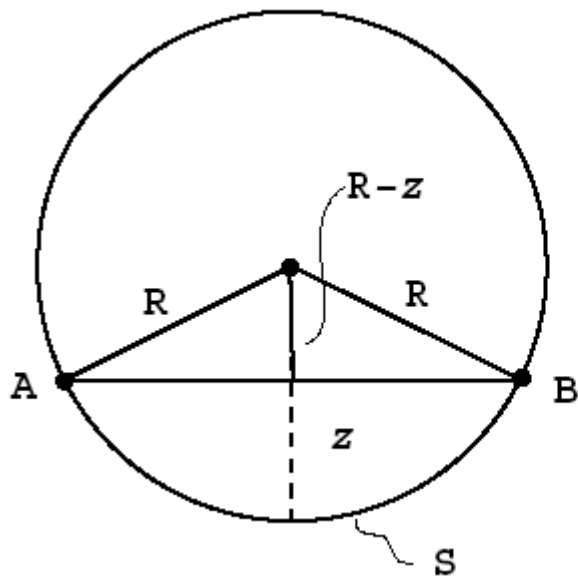


En $z_t = 4000$ m, $\theta_t = \pi/2$, $c(z_t) = 1504$ m/s.

Por tanto, el radio de curvatura $R = \frac{c(z_t)}{g} =$ _____

¿Cuál es el alcance para el primer punto de cambio, X_c ?

4. PROPAGACIÓN, SEGUNDA PARTE: REFRACCIÓN



$$AB = 2\sqrt{2Rz - z^2}$$

$$S = 2R \cos^{-1}\left(\frac{R-z}{R}\right)$$

La distancia X_c es la cuerda:

$$X_c = 2\sqrt{2Rz - z^2} = \underline{\hspace{2cm}}$$

La longitud del arco es la distancia S que recorre el rayo:

$$S = 2R \cos^{-1}\left(\frac{R-z}{R}\right) = \underline{\hspace{2cm}}$$

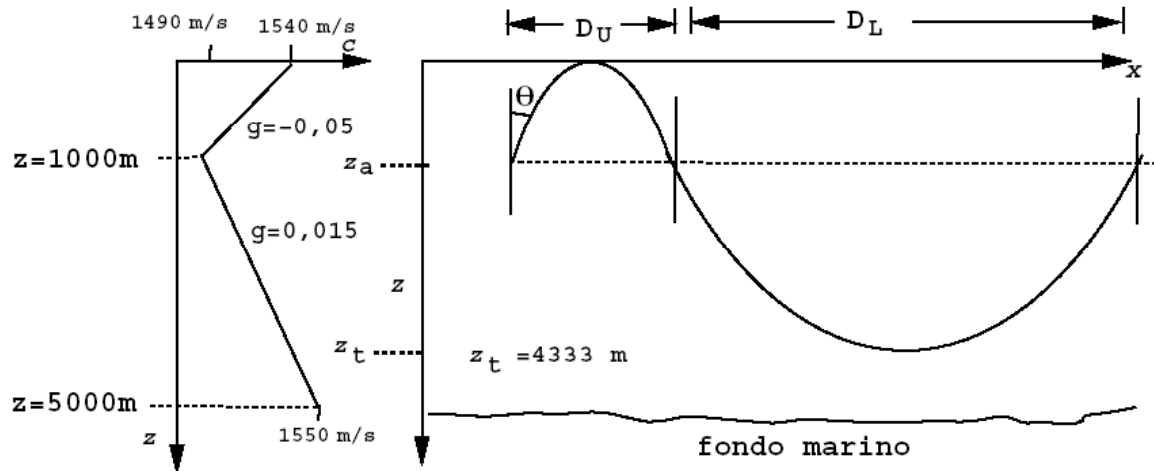
¿Cuál es el ángulo de lanzamiento $\theta(z_0)$ para este rayo?

$$\frac{\sin(\theta(z_0))}{c(z_0)} = \frac{1}{c(z_t)}$$

$$\theta(z_0) = \sin^{-1}\left(\frac{c(z_0)}{c(z_t)}\right) = \underline{\hspace{2cm}}$$

4. PROPAGACIÓN, SEGUNDA PARTE: REFRACCIÓN

Ejemplo 2: conducto bilineal



Superior:

$$R_U = \frac{c(z_t)}{g} = \underline{\hspace{4cm}}$$

$$D_U = 2\sqrt{2R_U z_a - z_a^2} = \underline{\hspace{4cm}}$$

Inferior:

$$R_l = \frac{c(z_t)}{g} = \underline{\hspace{4cm}}$$

$$z_t = R_L - \frac{c(z_a)}{g} + z_a = \underline{\hspace{4cm}}$$

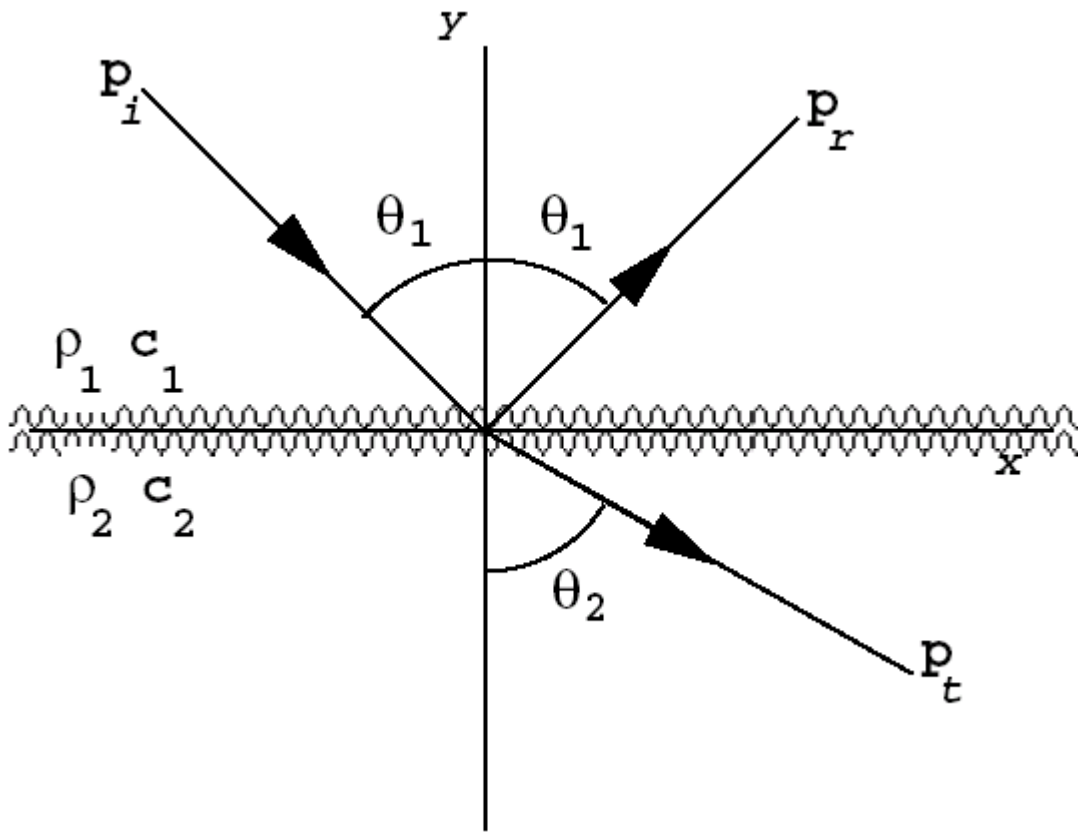
$$D_L = 2\sqrt{2R_L(z_t - z_a) - (z_t - z_a)^2} = \underline{\hspace{4cm}}$$

5. REFLEXIÓN Y FUERZA DEL BLANCO

5. REFLEXIÓN Y FUERZA DEL BLANCO

Reflexión de la interfaz

1



$$p_i = I e^{i\omega t} e^{-i(k_1 x \sin \theta_1 - k_1 y \cos \theta_1)}$$

$$p_r = R e^{i\omega t} e^{-i(k_1 x \sin \theta_1 + k_1 y \cos \theta_1)}$$

$$p_t = T e^{i\omega t} e^{-i(k_2 x \sin \theta_2 - k_2 y \cos \theta_2)}$$

5. REFLEXIÓN Y FUERZA DEL BLANCO

Condición de contorno 1: continuidad de presión:

$$\text{en } y = 0 \quad p_1 = p_i + p_r = p_t = p_2$$

Condición de contorno 2: continuidad de velocidad de partícula normal:

$$\text{en } y = 0 \quad v_1 = v_i + v_r = v_t = v_2$$

Ecuación de momentum:

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial y}$$

$$\text{pero } \frac{\partial v}{\partial t} = i\omega v \quad (\text{ya que } v \propto e^{i\omega t})$$

$$\implies v = \frac{i}{\omega \rho} \frac{\partial p}{\partial y}$$

Continuidad de presión:

$$\begin{aligned} p_i \Big|_{y=0} + p_r \Big|_{y=0} &= p_t \Big|_{y=0} \\ (I + R)e^{-ik_1 x \sin \theta_1} &= T e^{-ik_2 x \sin \theta_2} \\ (I + R)e^{-i\omega x \frac{\sin \theta_1}{c_1}} &= T e^{-i\omega x \frac{\sin \theta_2}{c_2}} \end{aligned}$$

Por lo tanto, utilizando la ley de Snell, podemos escribir:

$$I + R = T \tag{2}$$

5. REFLEXIÓN Y FUERZA DEL BLANCO

Continuidad de velocidad normal:

$$v_i = \frac{i}{\omega \rho_1} \cdot i k_1 \cos \theta_1 p_i = -\frac{\cos \theta_1}{\rho_1 c_1} p_i$$

$$v_r = \frac{\cos \theta_1}{\rho_1 c_1} p_r$$

$$v_t = -\frac{\cos \theta_2}{\rho_2 c_2} p_t$$

$$v_i \big|_{y=0} + v_r \big|_{y=0} = v_t \big|_{y=0}$$

$$\rho_2 c_2 \cos(\theta_1)(I - R) = \rho_1 c_1 \cos(\theta_2)T \quad (3)$$

5. REFLEXIÓN Y FUERZA DEL BLANCO

Podemos resolver las ecuaciones 1 y 2 para obtener los coeficientes de reflexión (R) y de transmisión (T):

$$\mathcal{R} = \frac{R}{I} = \frac{\rho_2 c_2 \cos \theta_1 - \rho_1 c_1 \cos \theta_2}{\rho_2 c_2 \cos \theta_1 + \rho_1 c_1 \cos \theta_2}$$

$$\mathcal{T} = \frac{T}{I} = \frac{2\rho_2 c_2 \cos \theta_1}{\rho_2 c_2 \cos \theta_1 + \rho_1 c_1 \cos \theta_2}$$

Recuerde que dado θ_1 , podemos calcular θ_2 a partir de la ley de Snell:

$$\frac{\sin \theta_1}{c_1} = \frac{\sin \theta_2}{c_2}$$

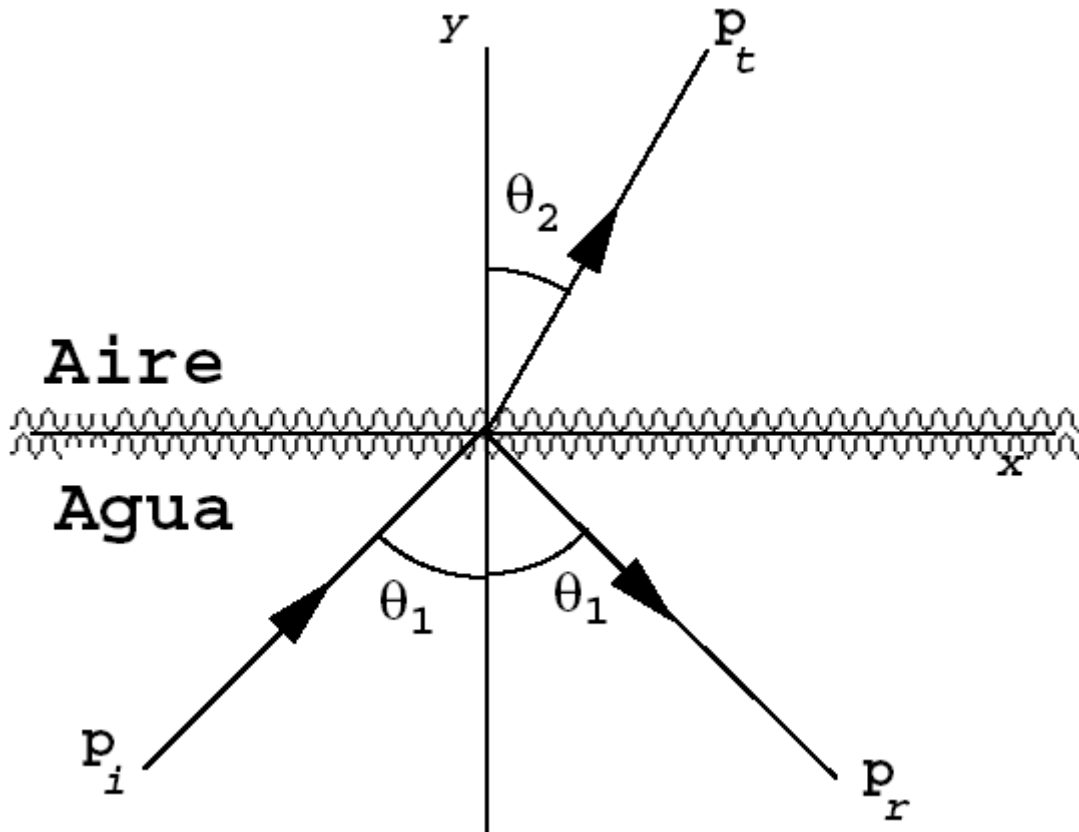
Caso especial: $\theta = 0$ (incidencia normal)

$$\mathcal{R} = \frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1} \equiv \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}$$

$$\mathcal{T} = \frac{2\rho_2 c_2}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1} \equiv \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1}$$

donde $Z = \rho c$ se define como la *impedancia acústica*.

5. REFLEXIÓN Y FUERZA DEL BLANCO

Ejemplo 1: fuente en medio acuático

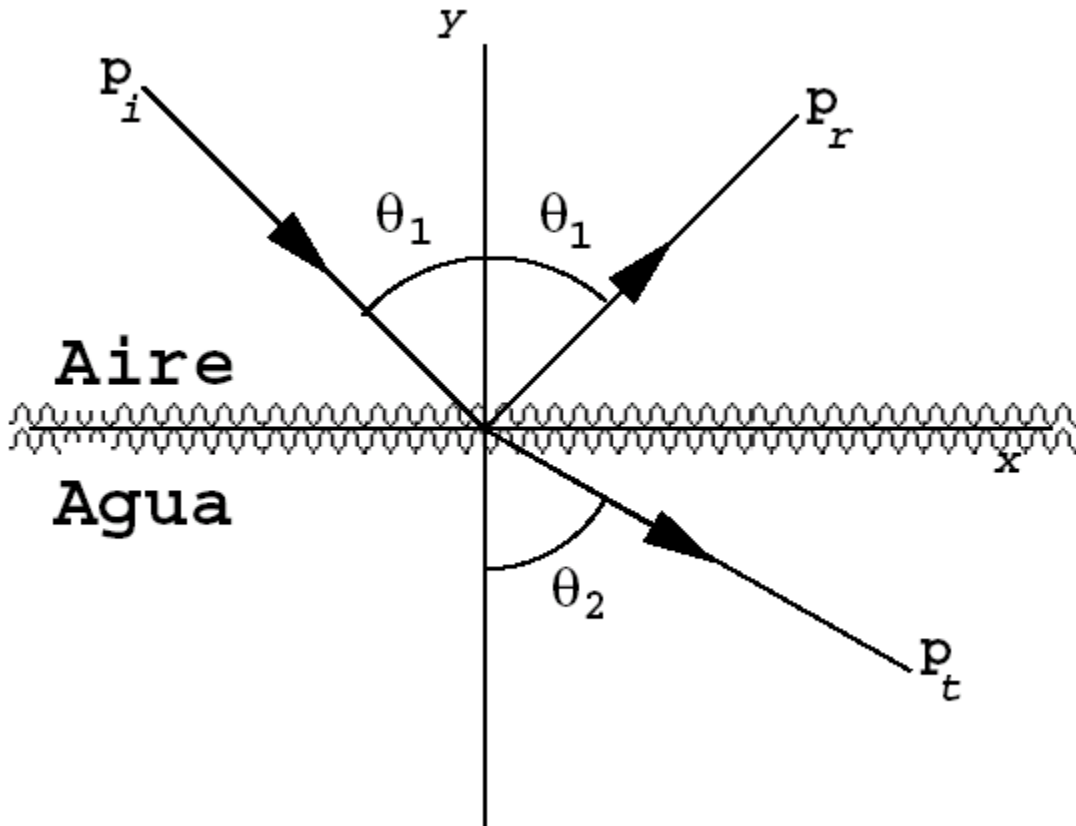
$$\rho_a = 1,2 \text{ kg/m}^3, c_a = 340 \text{ m/seg} \implies Z_a = 408 \text{ kg/m}^2\text{s}$$

$$\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3, c_w = 1500 \text{ m/seg} \implies Z_w = 1,5 \times 10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$$

$$\mathcal{R} = \frac{408 \cos \theta_1 - 1,5 \times 10^6 \cos \theta_2}{408 \cos \theta_1 + 1,5 \times 10^6 \cos \theta_2} \approx -1$$

$$\mathcal{T} = 1 + \mathcal{R} \approx 0 \quad (\text{no se da sonido en el aire})$$

5. REFLEXIÓN Y FUERZA DEL BLANCO

Ejemplo 2: fuente en medio aéreo

$$\mathcal{R} = \frac{1,5 \times 10^6 \cos \theta_1 - 408 \cos \theta_2}{1,5 \times 10^6 \cos \theta_1 + 408 \cos \theta_2} \approx +1$$

$$T = 1 + \mathcal{R} \approx 2 \quad (\text{¡en el agua el sonido se duplica!})$$

¿Satisface esto su intuición?

Considere la intensidad:

$$I_a = \frac{p_a^2}{\rho_a c_a} = \frac{p_a^2}{408}$$

5. REFLEXIÓN Y FUERZA DEL BLANCO

$$I_w = \frac{p_w^2}{\rho_w c_w} = \frac{4p_a^2}{\rho_w c_w} = \frac{4p_a^2}{1,5 \times 10^6} = \frac{p_a^2}{3,75 \times 10^5}$$

$$\implies I_w \approx \frac{1}{1000} I_a$$

¿Satisface esto su intuición?

5. REFLEXIÓN Y FUERZA DEL BLANCO

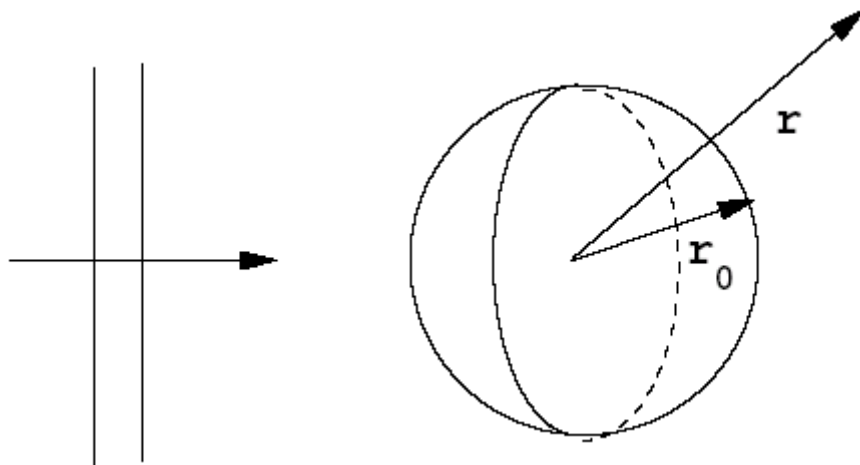
Fuerza del blanco

Suposiciones:

- Blancos más amplios (relativo a la longitud de onda).
- Fuente de onda plana:
 - El haz no presenta variación angular en el blanco.
 - La curvatura del frente de onda es cero.

Ejemplo: esfera rígida o blanda.

$$TS = 10 \log \frac{I_{\text{dif}}}{I_{\text{inc}}} \Big|_{r=r_{\text{ref}}}$$



$$I_{\text{inc}} = \frac{p^2}{\rho c}$$

$$\mathcal{P}_{\text{inc}} = \pi r_0^2 I_{\text{inc}}$$

Suponga que $\mathcal{P}_{\text{dif}} = \mathcal{P}_{\text{inc}}$ (difusión omnidireccional).

$$I_{\text{dif}} = \frac{\mathcal{P}_{\text{dif}}}{4\pi r^2} = \frac{\pi r_0^2 I_{\text{inc}}}{4\pi r^2}$$

5. REFLEXIÓN Y FUERZA DEL BLANCO

Para $r = r_{\text{ref}} = 1$ metro:

$$\text{TS} = 10 \log \frac{r_0^2}{4}$$

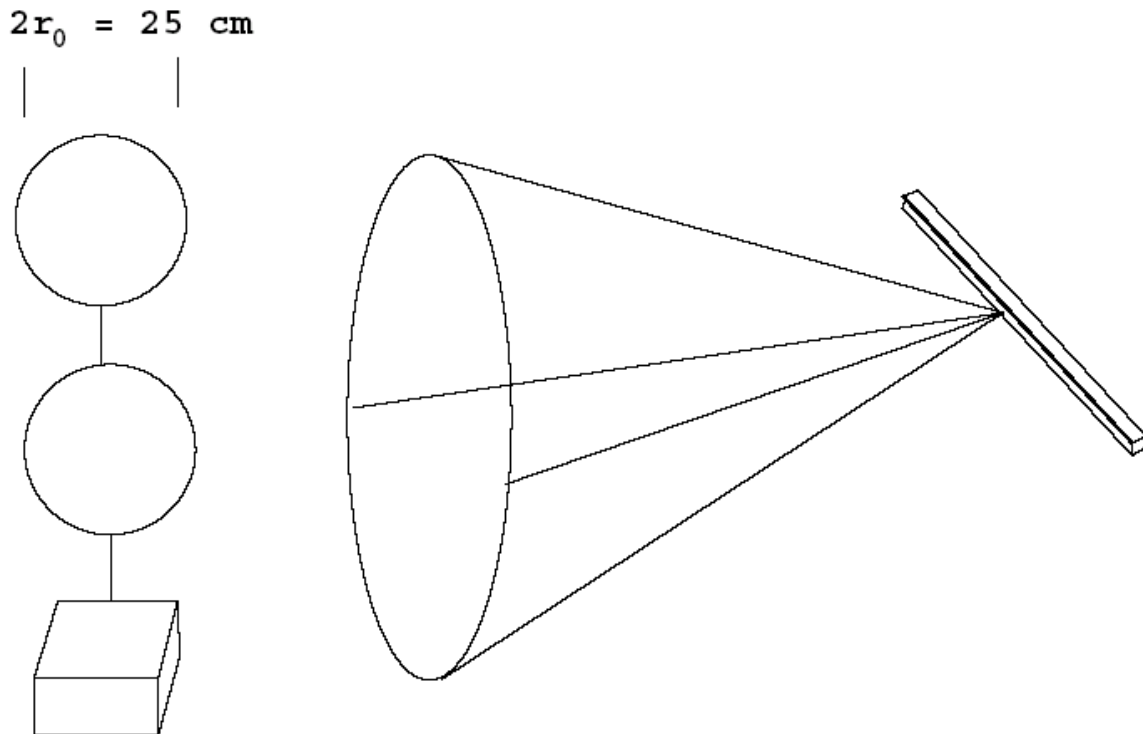
(Suponiendo que $r_0 \gg \lambda$)

Si $r_0 = 2$ metros, entonces $\text{TS} = 0$ dB

6. PROBLEMA DE DISEÑO: SEGUIMIENTO DE FLOTADORES DE FLOTACIÓN NEUTRAL

6. Problema de diseño: seguimiento de flotadores de flotación neutral

Problema de diseño de un sonar



Se necesita:

- Seguimiento para rumbo de $\pm 3^\circ$.
- Error de alcance: $\delta \pm 10$ metros.
- Alcance máximo: $R = 10 \text{ Km}$.
- Sonar activo con $UD = 15\text{dB}$.
- Sonar y flotador en el eje de canal de sonido.
- *Line array* con deflector (fuente y receptor).
- Ruido procedente de olas marinas de superficie (diseño para *Sea State 6*).

6. PROBLEMA DE DISEÑO: SEGUIMIENTO DE FLOTADORES DE FLOTACIÓN NEUTRAL

ID del receptor: $ID_R =$ _____

Longitud de pulso: $\tau =$ _____

Longitud de array: $L =$ _____

Nivel de fuente: $NF =$ _____

Nivel de ruido: $NR =$ _____

Pérdida de transmisión: $PT =$ _____

Longitud de onda: $\lambda =$ _____

ID de la fuente : $ID_T =$ _____

Tiempo de vuelo: $T =$ _____

Intervalo de ping: $T_p =$ _____

Frecuencia: $f =$ _____

Fuerza del blanco: $TS =$ _____

Resolución de alcance: $\delta =$ _____

Potencia acústica: $\mathcal{P} =$ _____

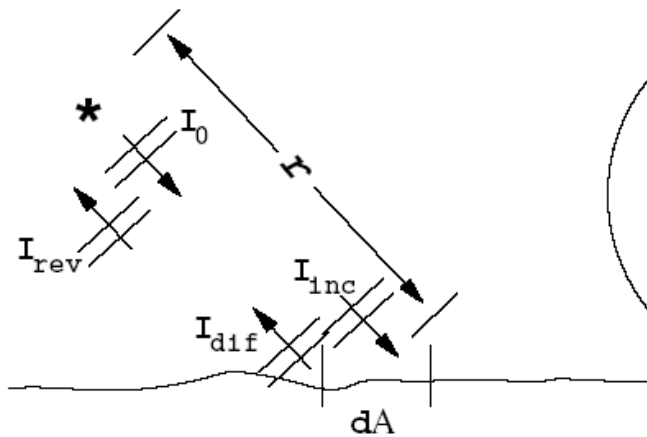
Potencia acústica media: $\overline{\mathcal{P}} =$ _____

7. REVERBERACIÓN

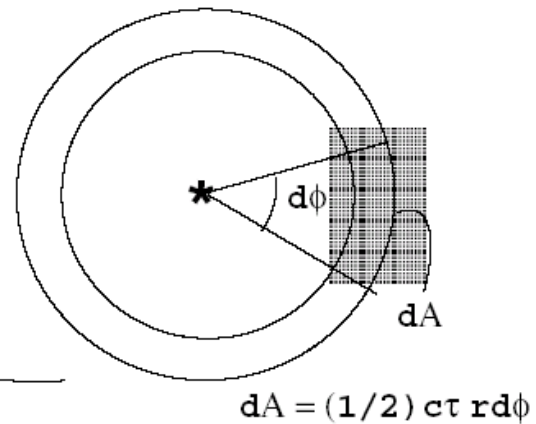
7. Reverberación

Reverberación de superficie

Vista lateral



Vista del plano



$$I_{\text{rev}} = \int_A I_0 \cdot b(\theta, \phi) \cdot \frac{1}{r^2} \cdot \frac{I_{\text{dif}}}{I_{\text{inc}}} \cdot \frac{1}{r^2} \cdot b'(\theta, \phi) dA$$

Defina el ratio $\frac{I_{\text{dif}}}{I_{\text{inc}}}$ como s_s

$$I_{\text{rev}} = \frac{I_0}{r^4} s_s \int_A b(\theta, \phi) b'(\theta, \phi) dA$$

A partir de la fórmula:

$$dA = \frac{c\tau}{2} r d\phi$$

considere únicamente los patrones de haz de la forma:

$$b(\theta, \phi) = b'(\theta, \phi) = \begin{cases} 1, & |\phi| \leq \Phi/2 \\ 0, & |\phi| > \Phi/2 \end{cases}$$

7. REVERBERACIÓN

$$I_{\text{rev}} = \frac{I_0}{r^4} \mathcal{S}_s \frac{c\tau}{2} r\Phi$$

Defina A como el área insonificada $\frac{c\tau}{2} r\Phi$. Tome registros para definir el nivel de reverberación NRV_s :

$$\text{NRV}_s = \text{NF} - 40 \log r + \mathcal{S}_s + 10 \log A \quad (\text{no se da absorción})$$

7. REVERBERACIÓN

Ejemplo: 100 kHz *side scan sonar* (equipo sonar de barrido lateral)

- $f = 100 \text{ kHz}$ ($\alpha = 30 \text{ db/Km}$)
- $\theta_{3dB-H} = 0,5^\circ$
- $\theta_{3dB-V} = 30^\circ$
- $NF = 201 \text{ dB}$ re $1 \mu \text{ Pa}$ a 1 metro (array rectangular)
- $UD = 15 \text{ dB}$
- $NR = 35 \text{ dB}$
- $\tau = 0,1 \times 10^{-3} \text{ seg}$

Ecuación del sonar:

$$ES = NF - 2PT - (NR - ID_r) + \left(\frac{S_s + 10 \log A}{TS} \right) - UD$$

¿Qué cantidad de exceso de señal se da para el fondo de roca frente al fondo de arcilla en un alcance de 300 metros?

- $\lambda =$ _____
- $L_x =$ _____
- $L_y =$ _____
- $ID_R =$ _____
- $2 PT =$ _____
- $10 \log A =$ _____

Roca: $S_s = -20 \text{ dB} \implies ES =$ _____

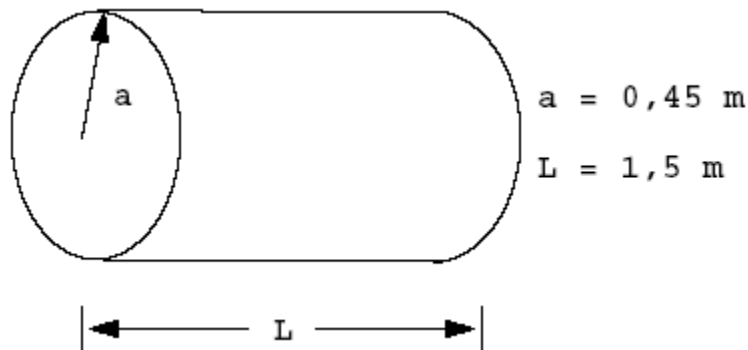
Arcilla: $S_s = -40 \text{ dB} \implies ES =$ _____

7. REVERBERACIÓN

Compare el nivel de eco de un tonel de acero con el nivel de reverberación de rocas y arcilla a 300 m.

- $NE = NF - 2PT + TS$
- $NRV = NF - 2PT + S_S + 10 \log A$

El tonel es un cilindro finito $\implies TS = 10 \log \frac{aL^2}{2\lambda} = \underline{\hspace{2cm}}$



$$NE = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$NRV_{|rocas} = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$NRV_{|arcilla} = \underline{\hspace{2cm}}$$

¿Qué sucede si el tonel se encuentra en un campo con rocas grandes de 2 metros de diámetro? (considere que las rocas son esféricas).

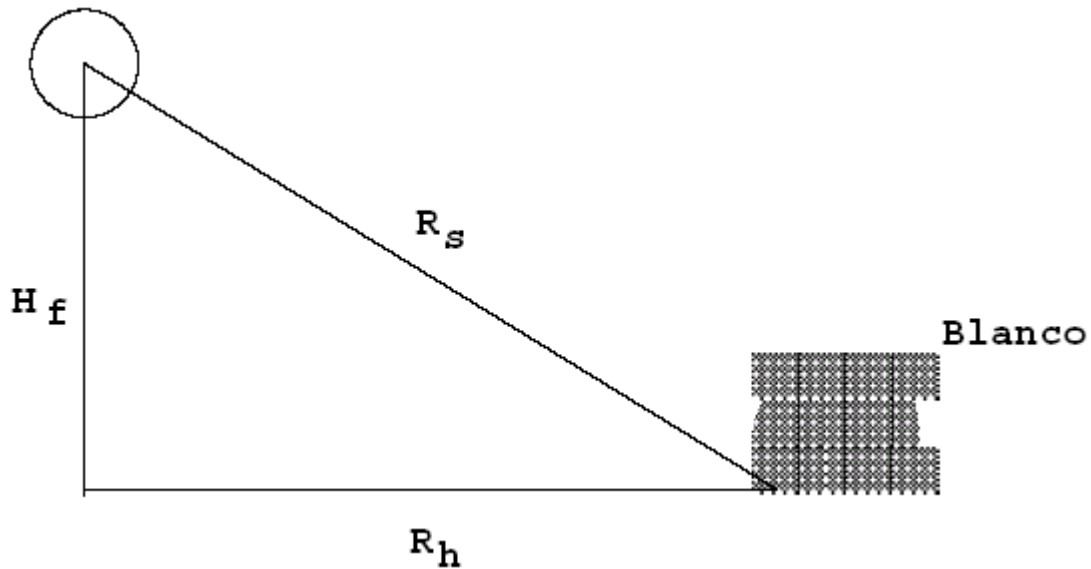
$$TS_{|roca\ grande} = 10 \log \frac{r^2}{4} = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$NE_{|tonel} - NE_{|roca\ grande} = \underline{\hspace{2cm}}$$

7. REVERBERACIÓN

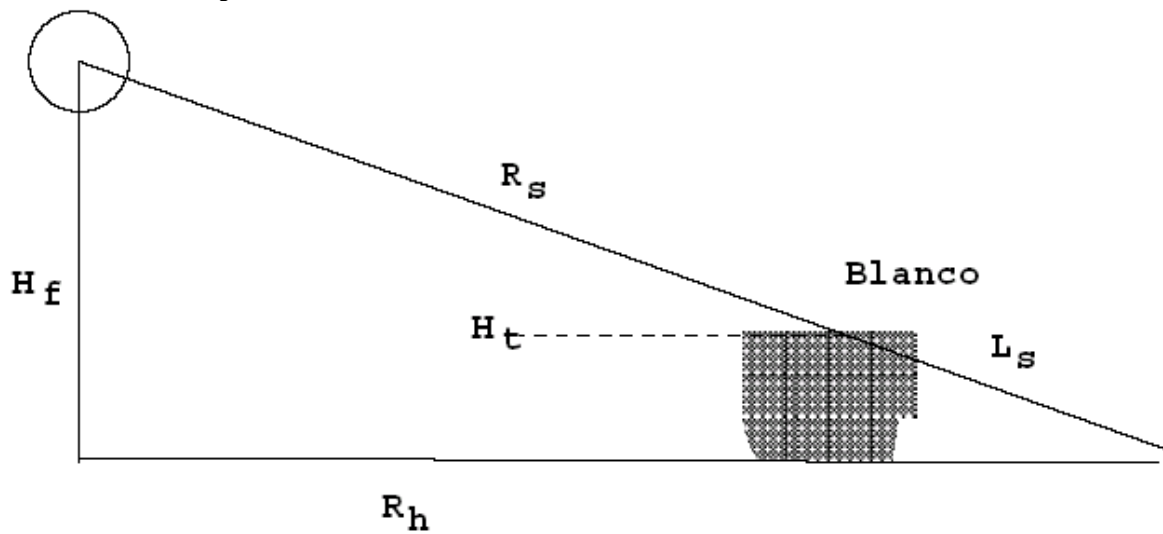
Análisis del *side scan sonar*

Corrección de la distancia oblicua:



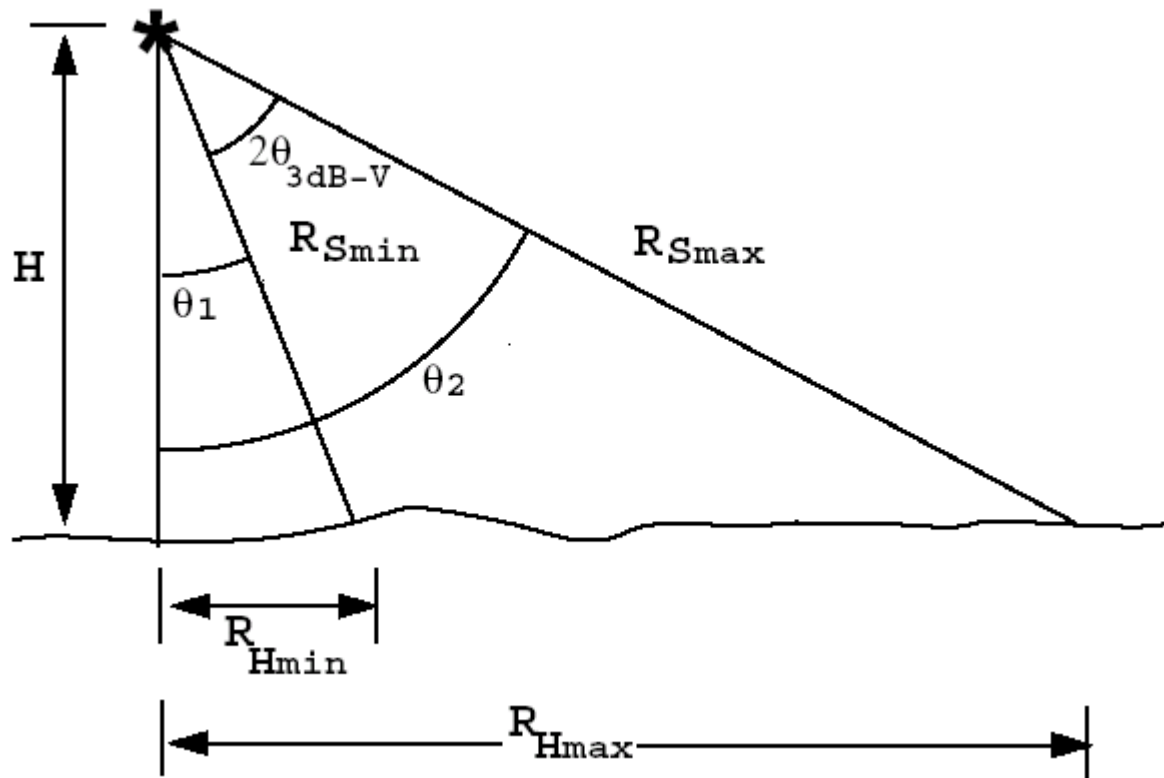
Por el teorema de Pitágoras: $R_h = \sqrt{R_s^2 - H_f^2}$

Altura del objeto:

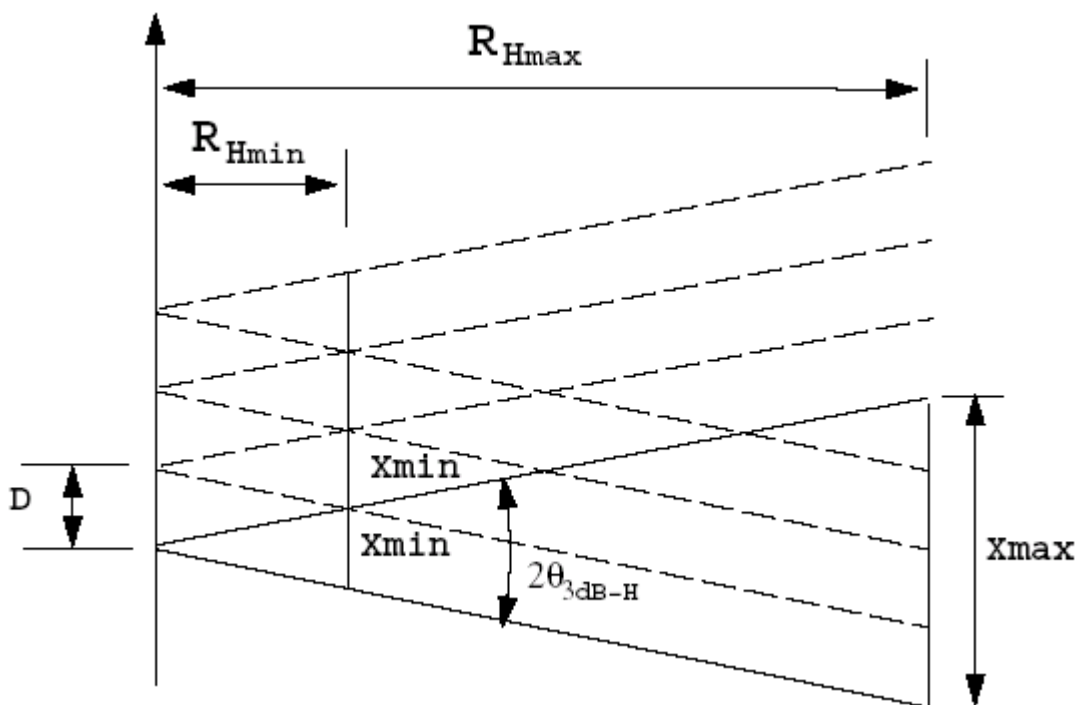


Por el teorema de triángulos similares: $H_t = \frac{L_s H_f}{R_s + L_s}$

7. REVERBERACIÓN

Vista lateral de la geometría de *sidescan*

Dirección del remolque

Vista del plano de la geometría de *sidescan*

7. REVERBERACIÓN

Resumen de definiciones de la variable para el *side-scan sonar*.

- θ_1 es el ángulo que va desde la vertical al borde cercano del haz del ventilador en el plano vertical.

- θ_2 es el ángulo que va desde la vertical al borde lejano del haz del ventilador en el plano vertical.

$$\theta_2 = \theta_1 + 2 * \theta_{3dB-V}$$

- R_{Smax} es la distancia oblicua máxima.

$$R_{Smax} = H / \cos(\theta_2)$$

- R_{Smin} es la distancia oblicua mínima.

$$R_{Smin} = H / \cos(\theta_1)$$

- R_{Hmax} es la distancia horizontal máxima.

$$R_{Hmax} = H \tan(\theta_2)$$

- R_{Hmin} es la distancia horizontal mínima.

$$R_{Hmin} = H \tan(\theta_1)$$

- X_{max} es la resolución a lo largo de la trayectoria a una distancia máxima.

$$X_{max} = 2R_{Hmax} * \tan \theta_{3dB-H}$$

- X_{min} es la resolución a lo largo de la trayectoria a una distancia mínima.

$$X_{min} = 2R_{Hmin} * \tan \theta_{3dB-H}$$

- T_f es el tiempo de vuelo, que corresponde al tiempo requerido para que el ping del sonar viaje la máxima distancia y regrese.

$$T_f = 2 * R_{Smax} / c$$

- T_p es el intervalo de repetición del pulso, que corresponde al tiempo entre los ping. Para evitar una traslapación de ecos de un ping a otro:

$$T_p \geq T_f$$

- v es la velocidad del *towfish* (transductor que se remolca).

- D es la distancia recorrida por el *towfish* durante un ciclo ping. Para evitar vacíos en la cobertura del sonar:

$$D = v * T_p \leq X_{min}$$

8. RUIDO

8. Ruido

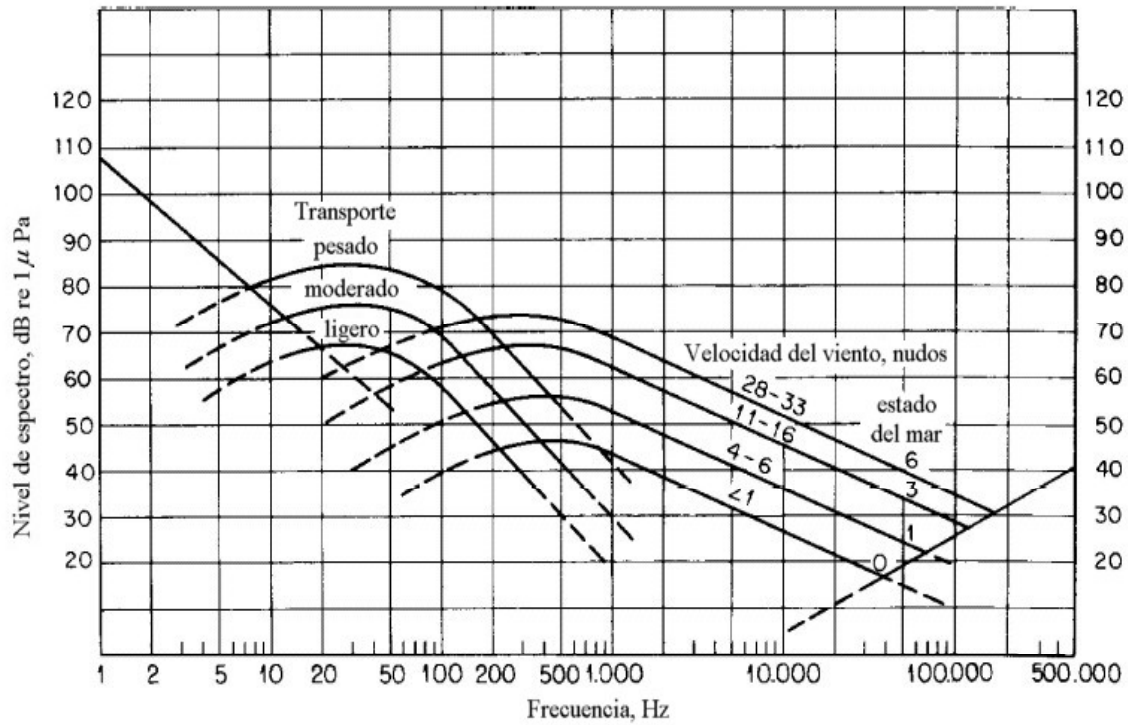
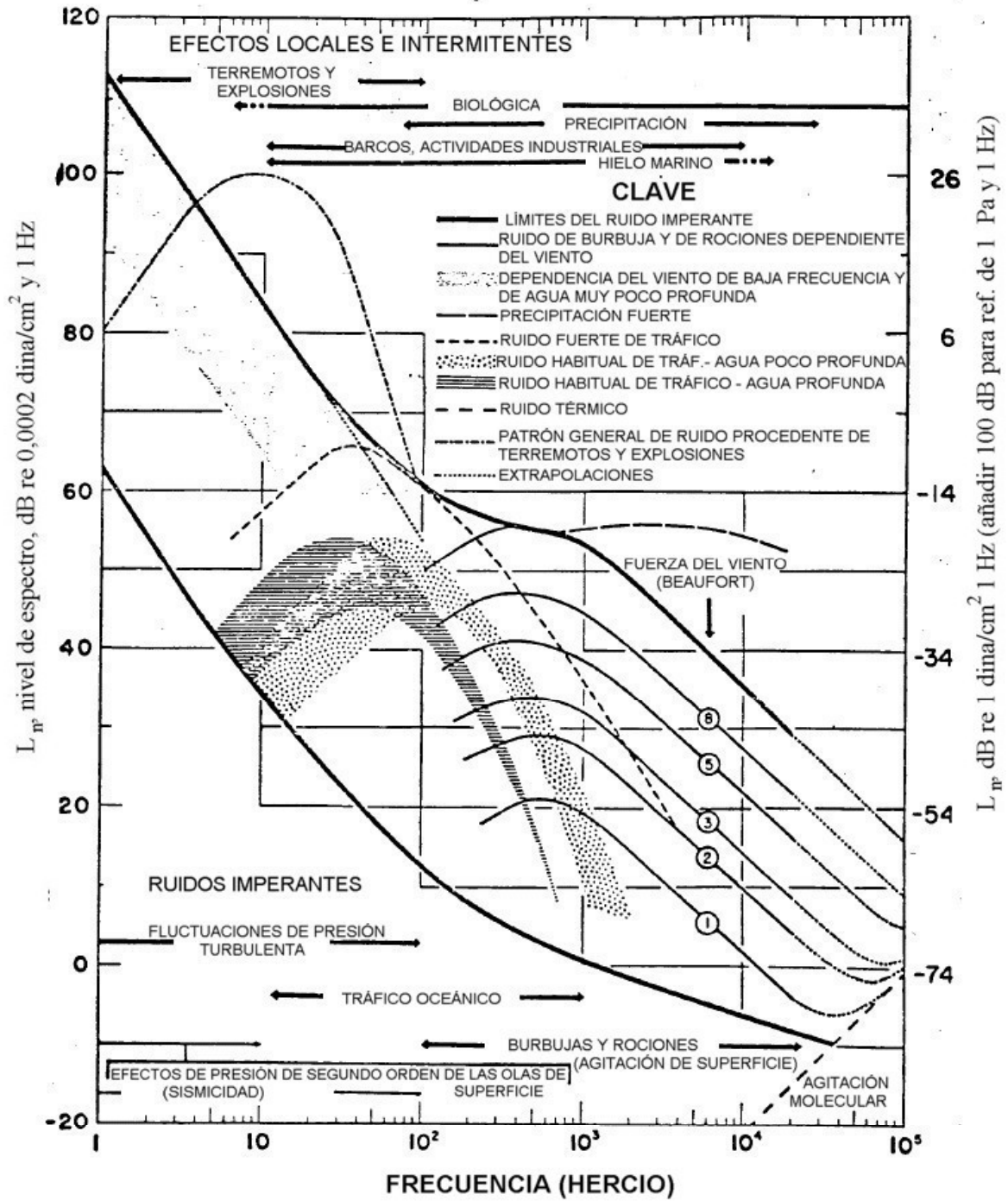


Fig. 7.5. Espectros medios del ruido ambiental de las aguas profundas.

Niveles de ruido en el fondo oceánico profundo (fuente: Urlick)

8. RUIDO



Fuentes de ruido en el océano (fuente: Urick)

8. RUIDO

Cinco bandas de ruido:

- I. $f < 1$ Hz: hidrostático, sísmico.
- II. $1 < f < 20$ Hz: turbulencia oceánica.
- III. $20 < f < 500$ Hz: transporte.
- IV. $500 \text{ Hz} < f < 50 \text{ KHz}$: olas de superficie.
- V. $50 \text{ kHz} < f$: ruido térmico.

Banda I:

$$f < 1 \text{ Hz}$$

- Mareas $f \approx 2$ ciclos/día

$$p = \rho g H \approx 10^4 \cdot H \text{ Pa}$$

nivel de ruido: $\text{NR} = 200 \text{ dB re } 1 \mu \text{ Pa} - 20 \log H$
 ejemplo: marea de 1 metro $\implies 200 \text{ dB re } 1 \mu \text{ Pa}$

- Microseismos $f \approx \frac{1}{7} \text{ Hz}$

En tierra, los desplazamientos son:

$$\eta \approx 10^{-6}$$

Suponga que se da un movimiento armónico,

$$\eta \propto e^{i\omega t} \implies v = \frac{d\eta}{dt} = i\omega\eta$$

Potencia de ruido debida a los microseismos:

$$p = \rho c v = i\omega \rho c \eta = i2\pi f \rho c \eta$$

$$|p| = 2\pi f \rho c \eta = 1.4 \text{ Pa} \implies \text{NL} = 123 \text{ dB re } 1 \mu \text{ Pa}$$

8. RUIDO

Banda II: turbulencia oceánica

$$1 \text{ Hz} < f < 20 \text{ Hz}$$

Mecanismos posibles:

- Ruido del propio hidrófono (parásito).
- Ondas internas.
- Ascenso de aguas profundas (*upwelling*).

Banda III: transporte

$$20 \text{ Hz} < f < 500 \text{ Hz}$$

Ejemplo: ≈ 1100 barcos en el Atlántico norte suponen cada uno 25 vatios de energía acústica.

$$\text{NF} = 171 + 10 \log \mathcal{P} = 215 \text{ dB re } 1 \mu \text{ Pa a } 1 \text{ metro}$$

Mecanismos:

- Ruido de la maquinaria interna (fuerte).
- Cavitación de la hélice (fuerte).
- Turbulencia procedente de la estela de la hélice (débil).

8. RUIDO

Banda IV: olas de superficie

$$500 \text{ Hz} < f < 50 \text{ KHz}$$

- Las observaciones muestran que NR está en función de la velocidad del viento local (estado del mar).
- Mecanismos posibles:
 - Olas rompientes (sólo en un estado elevado del mar).
 - Ruido de flujo del viento (turbulencia).
 - Cavitación (100-1000 Hz).
 - Olas de periodos prolongados.

$$\omega = \sqrt{kg}$$

$$c_p = \frac{\omega}{k}$$

$$c_p^2 = \frac{g\lambda}{2\pi}$$

si $\lambda \approx 2000 \text{ Km}$, entonces $c_p \approx 1500 \text{ m/seg} \implies$ ¡ruido irradiado!

Band V: ruido térmico

$$50 \text{ KHz} < f$$

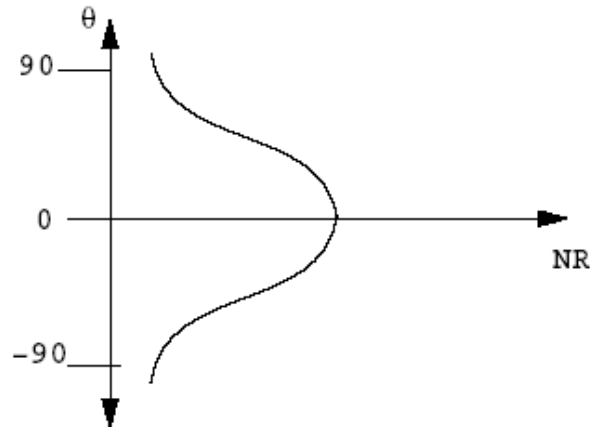
$$\text{NR} = -15 + 20 \log f$$

8. RUIDO

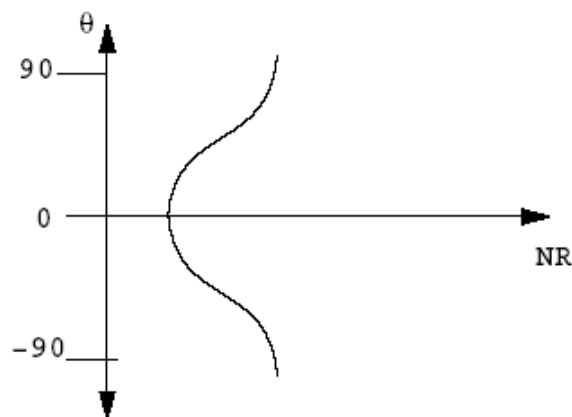
Direccionalidad del ruido

Vertical

- Baja frecuencia:
 - domina el transporte a distancia
 - atenuación baja en la horizontal



- Alta frecuencia:
 - ruido de superficie marina
 - domina la velocidad del viento local
 - atenuación alta en la horizontal



Horizontal

- Baja frecuencia: la más alta en la dirección de los centros de transporte.
- Alta frecuencia: omnidireccional.

9. PRINCIPIOS DE DISEÑO

9. Principios de diseño

Resumen de los principios de diseño importantes

1. El alcance máximo requerido determina la frecuencia máxima.

Regla de Dyer: $\alpha \times r \times 0,001 = 10 \text{ dB}$ [para r en metros]

2. La resolución angular requerida determina el tamaño del array.

- $\theta_{3dB} = \pm \frac{25,3\lambda}{L}$ deg. (line array)
- $\theta_{3dB} = \pm \frac{29,5\lambda}{D}$ deg. (array de disco)
- $\theta_{3dB} = \pm \frac{25,3\lambda}{L_x}, \pm \frac{25,3\lambda}{L_y}$ deg. (array rect.)

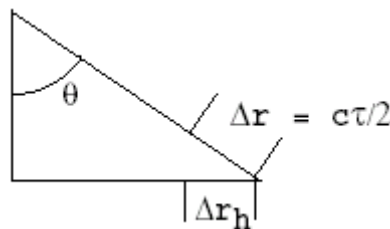
3. La resolución del alcance requerido determina la longitud de pulso máxima.

$$\Delta r = \frac{c\tau}{2}$$

4. En un *side scan sonar*, la resolución del alcance horizontal (a través de la trayectoria) Δr_h viene determinada por la geometría del haz:

$$\Delta r_h = \Delta r \sin \theta$$

donde θ es el ángulo entre un rayo hundido al alcance máximo y la vertical.

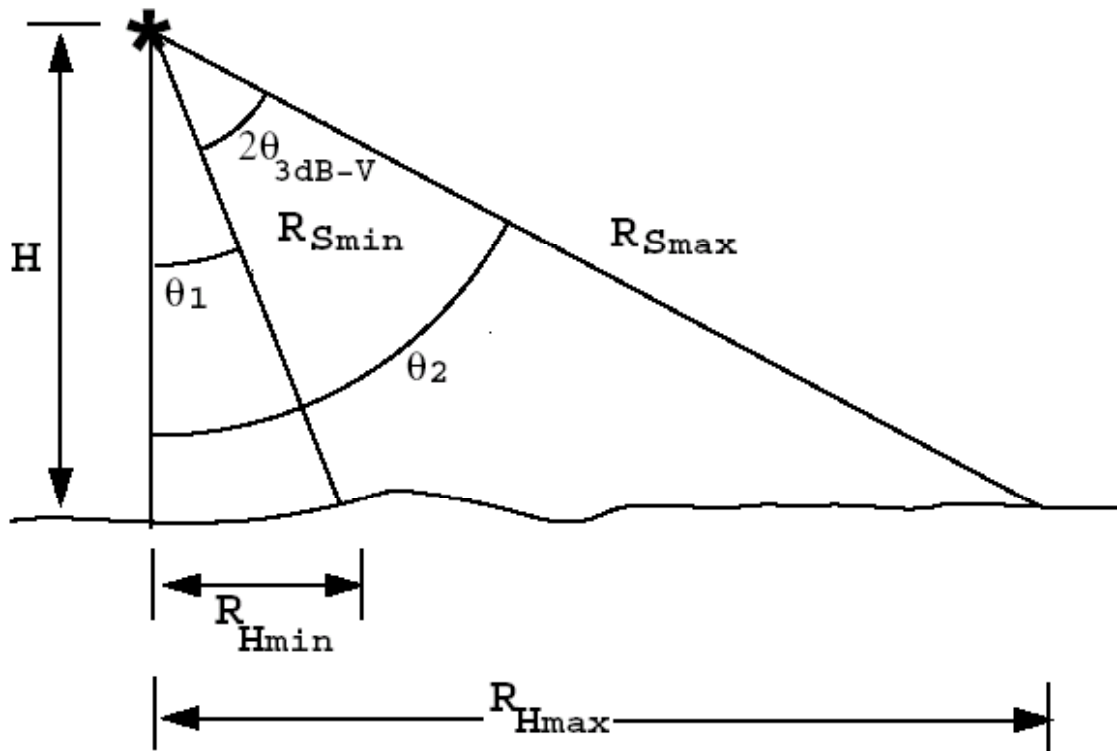


5. Las características del transductor determinan la longitud de pulso mínima.

10. SIDESCAN SONAR

- Para un transductor de banda estrecha, debería usted tener al menos de 10 a 15 ciclos de la frecuencia del portador.

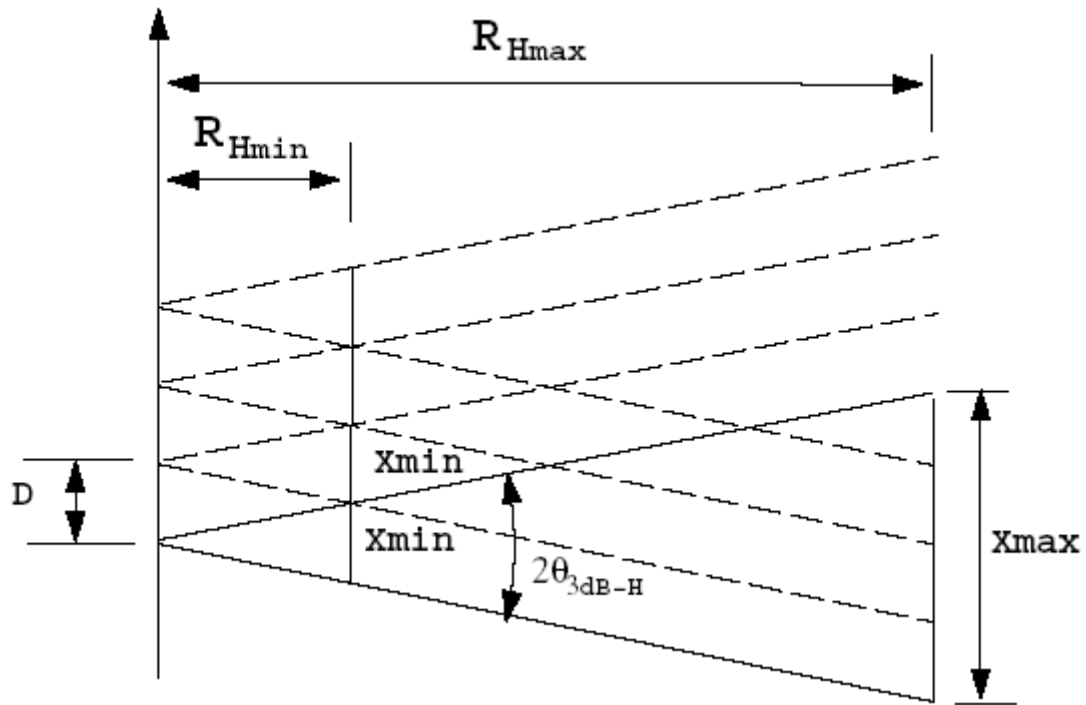
10. *Sidescan sonar*



Vista lateral de la geometría del *sidescan*.

10. SIDESCAN SONAR

Dirección de remolque

Vista del plano de la geometría del *sidescan*.

10. SIDESCAN SONAR

Resumen de definiciones de la variable para el *side-scan sonar*.

- θ_1 es el ángulo que va desde la vertical al borde cercano del haz del ventilador en el plano vertical.

- θ_2 es el ángulo que va desde la vertical al borde lejano del haz del ventilador en el plano vertical.

$$\theta_2 = \theta_1 + 2 * \theta_{3dB-V}$$

- R_{Smax} es la distancia oblicua máxima.

$$R_{Smax} = H / \cos(\theta_2)$$

- R_{Smin} es la distancia oblicua mínima.

$$R_{Smin} = H / \cos(\theta_1)$$

- R_{Hmax} es la distancia horizontal máxima.

$$R_{Hmax} = H \tan(\theta_2)$$

- R_{Hmin} es la distancia horizontal mínima.

$$R_{Hmin} = H \tan(\theta_1)$$

- X_{max} es la resolución a lo largo de la trayectoria a una distancia máxima.

$$X_{max} = 2R_{Hmax} * \tan \theta_{3dB-H}$$

- X_{min} es la resolución a lo largo de la trayectoria a una distancia mínima.

$$X_{min} = 2R_{Hmin} * \tan \theta_{3dB-H}$$

- T_f es el tiempo de vuelo, que corresponde al tiempo requerido para que el ping del sonar viaje la máxima distancia y regrese.

$$T_f = 2 * R_{Smax} / c$$

- T_p es el intervalo de repetición del pulso, que corresponde al tiempo entre los ping. Para evitar una traslapación de ecos de un ping a otro:

$$T_p \geq T_f$$

- v es la velocidad del *towfish* (transductor que se remolca).

- D es la distancia recorrida por el *towfish* durante un ciclo ping. Para evitar vacíos en la cobertura del sonar:

$$D = v * T_p \leq X_{min}$$

11. RESUMEN DE FÓRMULAS IMPORTANTES

11. Resumen de fórmulas importantes

Nivel de fuente:

- $NF = 171 + 10 \log \mathcal{P} + ID$

Índice de directividad:

- $ID = 10 \log\left(\frac{2L}{\lambda}\right)$ (line array)
- $ID = 20 \log\left(\frac{\pi D}{\lambda}\right)$ (array de disco)
- $ID = 10 \log\left(\frac{4\pi L_x L_y}{\lambda^2}\right)$ (array rectangular)

Ancho de haz 3-dB θ_{3dB} :

- $\theta_{3dB} = \pm \frac{25,3\lambda}{L}$ deg. (line array)
- $\theta_{3dB} = \pm \frac{29,5\lambda}{D}$ deg. (array de disco)
- $\theta_{3dB} = \pm \frac{25,3\lambda}{L_x}, \pm \frac{25,3\lambda}{L_y}$ deg. (array rect.)

Pérdida de transmisión, propagación esférica y absorción:

- $PT = 20 \log r + 10^{-3} \alpha r$

Pérdida de transmisión, propagación cilíndrica y absorción:

- $PT = 20 \log r + 10^{-3} \alpha r$

Fuerza de blanco de una esfera ($r_0 =$ radio, supone $r_0 \gg \lambda$):

- $TS = 10 \log \frac{r_0^2}{4}$

Fuerza de blanco de un cilindro: (a una incidencia normal, $a =$ radio, $L =$ longitud):

- $TS = 10 \log \frac{aL^2}{2\lambda}$

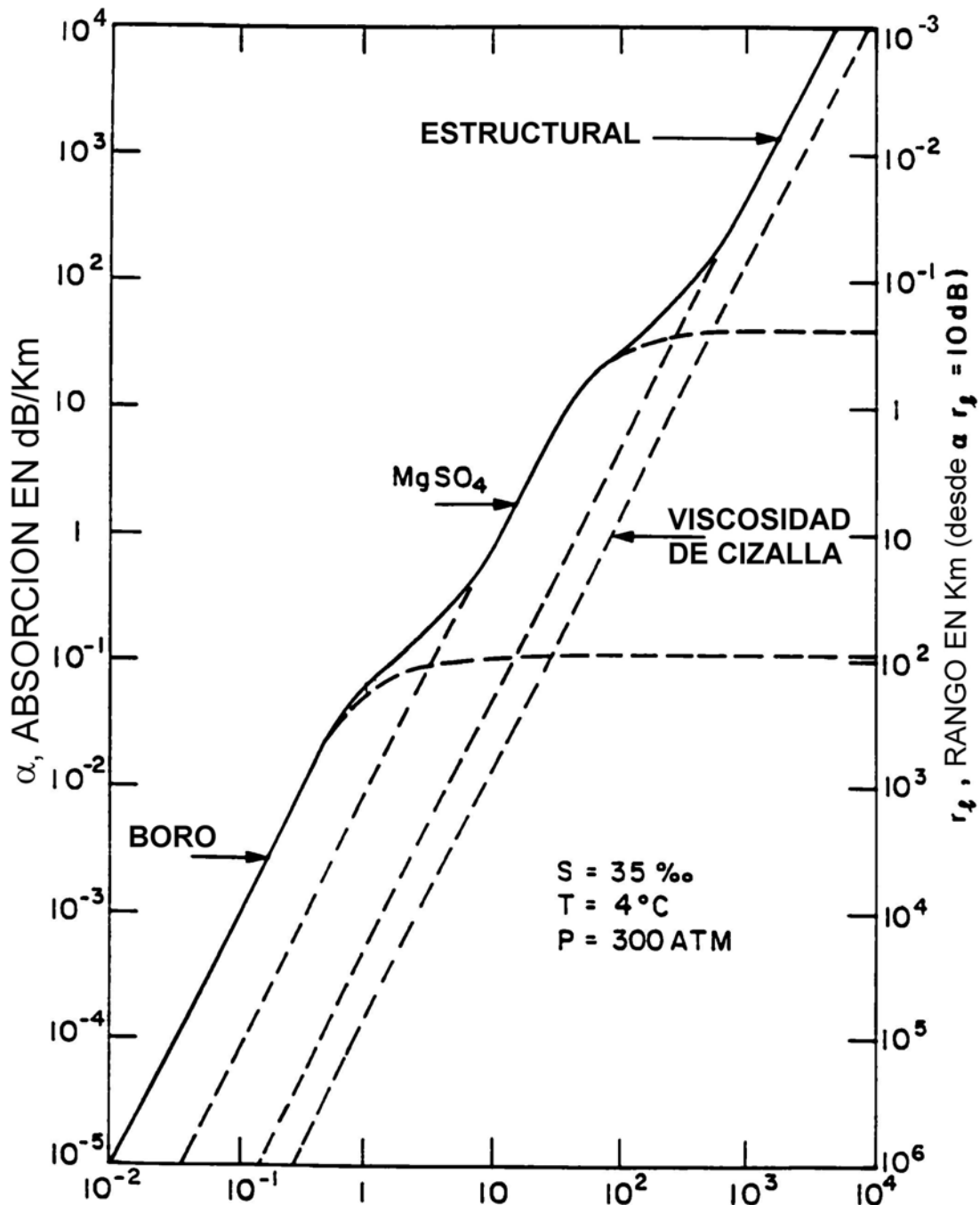
Regla general para la elección de la frecuencia dado el alcance máximo:

- $\alpha r \times 0,0001 = 10 \text{ dB}$ [para r en metros]

11. RESUMEN DE FÓRMULAS IMPORTANTES

Resolución del alcance:

- $\Delta r = \frac{cT}{2}$



Absorción del sonido en el agua marina (de los apuntes de clase del prof. Dyer del curso 13.851)

11. RESUMEN DE FÓRMULAS IMPORTANTES

Tabla de valores para el coeficiente de absorción (alfa)

13.00 Otoño, 1999. Acústica: tabla de coeficientes de atenuación

frecuencia [Hz]	alfa [dB/km]	frecuencia [Hz]	alfa [dB/km]
1	0,003	50000	15,9
10	0,003	60000	19,8
100	0,004	70000	23,2
200	0,007	80000	26,2
300	0,012	90000	28,9
400	0,018	100000 (100 kHz)	31,2
500	0,026	200000	47,4
600	0,033	300000	63,1
700	0,041	400000	83,1
800	0,048	500000	108
900	0,056	600000	139
1000 (1kHz)	0,063	700000	174
2000	0,12	800000	216
3000	0,18	900000	264
4000	0,26	1000000 (1 MHz)	315
5000	0,35	2000000	1140
6000	0,46	3000000	2520
7000	0,59	4000000	4440
8000	0,73	5000000	6920
9000	0,90	6000000	9940
10000 (10 kHz)	1,08	7000000	13520
20000	3,78	8000000	17640
30000	7,55	9000000	22320
40000	11,8	10000000 (10 MHz)	27540

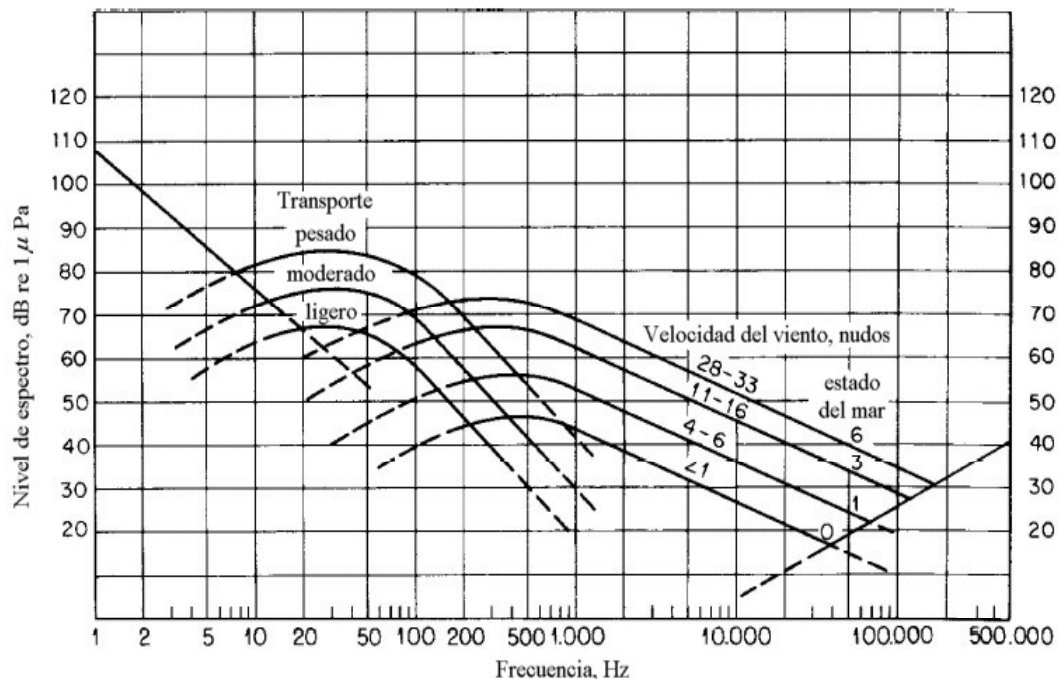


Fig. 7.5. Espectros medios del ruido ambiental de las aguas profundas.

Niveles de ruido en el fondo oceánico profundo (fuente: Urick)