

CAPÍTULO 3 DETERMINACIÓN DE LA PROFUNDIDAD

1. INTRODUCCIÓN

La determinación de profundidad es una tarea fundamental para un hidrógrafo, lo cual requiere del conocimiento específico del medio, de la acústica submarina, de la variedad de los dispositivos disponibles para la medición de la profundidad, de los sensores complementarios para posición y las mediciones del cabeceo y los procedimientos apropiados para lograr y cumplir con los estándares recomendados internacionalmente para la precisión y cobertura como lo indica la publicación de la OHI S-44 en su Quinta edición.

La sondaleza (o escandallo) y la vara para sondear fueron los primeros métodos usados para medir directamente la profundidad del agua. Sus principios de operación fácil aseguraron su uso continuo por muchos siglos.

Los sistemas acústicos de haz simple, derivados de los sonares militares, fueron un desarrollo importante y han sido usados en los levantamientos hidrográficos desde mediados de 1900.

Durante la última década, el levantamiento hidrográfico ha experimentado un cambio conceptual en la tecnología y metodología de medición de la profundidad. Los sistemas acústicos multihaz (MBES) y los sistemas láser aerotransportadores (ALS) proveen ahora una casi cobertura total del fondo marino y medición de profundidad. La alta densidad de datos y elevados ritmos de adquisición han llevado a un conjunto enorme de datos batimétricos y muchos datos auxiliares o anexos.

La última tecnología en equipos de medición de profundidades fue evaluado por el grupo de trabajo del S-44 preparando la 4a edición en 1988 como sigue:

“Las sondas de haz simple han alcanzado una precisión sub-decimétrica en aguas poco profundas. El mercado ofrece una variedad de equipos con diferentes frecuencias, ritmos de pulsos, etc., y es posible satisfacer las necesidades de la mayoría de los usuarios y, en particular, las de los hidrógrafos. (...)

La tecnología de las sondas acústicas multi-haz se está desarrollando con rapidez y ofrece un gran potencial para una investigación precisa y total del fondo del mar, si se usa con los procedimientos apropiados y contando con que la resolución del sistema es la adecuada para la apropiada detección de peligros a la navegación.

El sondeo láser aerotransportado es una nueva tecnología que puede ofrecer sustanciales aumentos de productividad para levantamientos en aguas poco profundas y claras. Los sistemas aerotransportados láser son capaces de medir profundidades de 50 m o más.”

A pesar de las nuevas tecnologías, las sondas de haz simple (SBES) aún permanecen, en el presente, como los equipos tradicionales usados mundialmente en los levantamientos hidrográficos. Estos ecosondas también han evolucionado de sistemas análogos a sistemas de grabación digital, con precisiones más grandes y con exactitudes más altas y con características específicas que permiten una amplia variedad de propósitos a ser cumplidos. El uso de ecosondas digitales junto con sensores de movimiento, sistemas de posicionamiento satelital (como los GPS) y software para la adquisición de los datos, han sido combinados para optimizar la productividad con las reducciones correspondientes en el personal para operaciones de levantamiento.

Los MBES se han vuelto una valiosa herramienta para la determinación de la profundidad cuando se requiere una cobertura total del fondo marino. Un número en aumento de Oficinas de Servicio Hidrográfico (OSH) ha adoptado la tecnología multihaz como la metodología de oportunidad para recolectar datos batimétricos para la producción de nuevas cartas náuticas. La aceptación de los datos de los ecosondas multihaz para ser usados en las cartas náuticas publicadas es un indicador de confiabilidad creciente en la tecnología. A pesar de sus capacidades que impresionan, es necesario que los planificadores, operadores y supervisores tengan un conocimiento profundo de los principios operativos de los MBES, así como de la práctica en la interpretación y la validación de la datos.

Los sistemas de sondeo láser aerotransportado son usados por pocas Oficinas de Servicio Hidrográfico (OSH). Estos sistemas tienen, por ahora, las tasas de adquisición de datos más elevadas y están particularmente ubicados cerca de la orilla o en áreas de aguas poco profundas. Sin embargo, los costos elevados de los equipos envueltos en la recolección de los datos y su operación no permiten precisamente un uso más general.

En este Capítulo, la segunda sección cubre los principios acústicos necesarios para el entendimiento de las ondas acústicas en el mar y sus características físicas, la propagación de la onda acústica y los parámetros acústicos. La tercera sección cubre los sensores de movimiento. La sección 4 cubre las características de los transductores, su clasificación con respecto al patrón del haz, los principios de operación y su instalación. La quinta sección describe los sistemas acústicos de ecosondas de haz simple y sistemas de barrido, para sonares multihaz e interferométricos, con respecto a sus características, principios de funcionamiento, instalación, y uso operacional. Finalmente, la sección 6 explica los sistemas no-acústicos, como el sistema láser aerotransportado y los sistemas de inducción electromagnética, los sistemas de sensores remotos, y los dispositivos mecánicos clásicos.

La terminología usada en este siguiente capítulo, sigue, en lo posible, el Diccionario de Hidrografía [OHI SP-32, Quinta edición, 1994].

2. PRINCIPIOS DE LOS SENSORES ACÚSTICOS Y DE MOVIMIENTO

El agua del mar es el medio donde normalmente las mediciones hidrográficas tienen lugar, por consiguiente el conocimiento de las propiedades físicas del agua de mar y de la propagación de las ondas acústica, es importante para comprender totalmente el contenido y el propósito de este capítulo.

2.1 Las ondas acústicas marinas y características físicas

A pesar de que las ondas electromagnéticas tienen una excelente propagación en el vacío y en el aire, éstas con dificultad penetran o se propagan en los líquidos. Sin embargo, las ondas acústicas, bien sea sónicas o ultra-sónicas, logran una buena penetración y propagación en todos los medios elásticos una vez que éstos se pueden hacer vibrar cuando se someten a variaciones de presión. La mayoría de los sensores empleados para la determinación de la profundidad emplean las ondas acústicas.

2.1.1 Campo acústico

Las ondas acústicas consisten en variaciones sutiles del campo de presión en el agua. Las partículas de agua de mar se mueven longitudinalmente, de un lado a otro, en la dirección de propagación de la onda, produciendo regiones adyacentes de compresión y expansión, similares a aquellas producidas por las ondas longitudinales en una barra.

La intensidad de la onda acústica, I , es la cantidad de energía por segundo que cruza un área de unidad. La intensidad acústica es dada por:

$$I = \frac{p_e^2}{\rho c} \quad (3.1)$$

Donde ρ es la densidad del agua, c es la velocidad del sonido en el agua y p_e es la presión acústica³⁰ efectiva, dada por la raíz cuadrada del pico de la amplitud de la presión, P . Es decir:

$$p_e = \frac{P}{\sqrt{2}}$$

La intensidad de la onda acústica es calculada usando los promedios de la presión acústica en lugar de los valores instantáneos. La presión acústica y la intensidad, debido a su variación en el rango de amplitud, normalmente son expresadas en escalas logarítmicas referidas a niveles de presión y de intensidad, siendo la escala de decibeles la escala logarítmica más común.

El nivel de intensidad acústico, IL , se da por,

$$IL = 10 \log_{10} \frac{I}{I_{Ref}} \quad (3.2)$$

Donde I_{Ref} es la intensidad de referencia.

El nivel de intensidad acústico se expresa alternativamente por,

$$IL = 20 \log_{10} \frac{p_e}{p_{Ref}} \quad (3.3)$$

Donde p_{Ref} es la presión de referencia³¹.

2.1.2 Ecuación del sonar

La ecuación del sonar³² es usada para estudiar y expresar la capacidad de detección y el desempeño de los ecosondas como una función de las condiciones de operación. [Urlick, 1975].

La ecuación del sonar para los ecosondas define la señal o detección del eco como el Exceso de Eco (EE),

$$EE = SL - 2 TL - (NL-DI) + BS - DT \quad (3.4)$$

Donde SL = nivel de origen, TL = pérdida de la transmisión, NL = nivel del ruido, DI = índice de directividad, BS = la fuerza dispersa de retorno del fondo y DT = el umbral de detección.

En esta sección, cada término de la ecuación del sonar se presenta y se estudia para permitir un mejor entendimiento de los procesos involucrados en la propagación de señales acústicas y la detección del eco.

La intensidad de la onda acústica I_r a una distancia r del transmisor se obtiene por,

$$I_r = \frac{p_r^2}{\rho c} \text{ W/m}^2 \quad (3.5)$$

³⁰ Pascal (Pa) es la unidad de presión en el Sistema Internacional

³¹ En la referencia acústica submarina la presión es normalmente adopta como 1 μ Pa.

³² SOund NAvigation and Ranging.

Donde p_r es la presión efectiva en la distancia r desde la fuente y pc es la impedancia acústica³³ (Considerando una velocidad del sonido de 1500 m/s y una densidad de agua de mar de 1026 Kg./m³ la impedancia acústica es $pc = 1.54 \cdot 10^6$ Kg./m²s).

El Nivel de Origen (SL) da el nivel de intensidad de la señal acústica en referencia a la intensidad de una onda plana³⁴ con raíz cuadrada (rms) de presión 1 μ Pa para el punto localizado a 1 metro de distancia del centro de la fuente (transmisor), o sea:

$$SL = 10 \cdot \log_{10} \frac{I_1}{I_{Ref}} \quad (3.6)$$

La Pérdida de Transmisión (TL) toma en cuenta las pérdidas de intensidad acústica debido a la geometría, es decir, de las pérdidas por dispersión, proporcionales a r^2 y las pérdidas debido a la absorción, proporcionales al coeficiente de absorción, dependiendo de las propiedades físicas y químicas del agua de mar y de la frecuencia acústica (ver 2.3.1).

La pérdida dispersa es causada por la geometría del haz con su forma de cono (Fig. 3.1). El aumento en el área resulta en la disminución de la potencia por unidad de área.

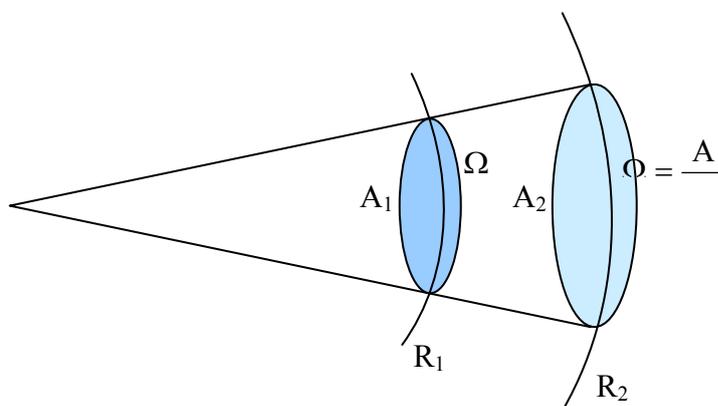


Fig. 3.1 “Pérdida dispersa debido a la geometría del haz”

La potencia, Π , del pulso acústico es igual a la Intensidad x Área:

$$\Pi = I_1 \cdot A_1 = I_2 \cdot A_2$$

Donde $A_1 = \Omega \cdot R_1^2$ y $A_2 = \Omega \cdot R_2^2$, siendo Ω el ángulo sólido³⁵

³³ La impedancia acústica corresponde a la resistencia del medio a la propagación de la onda a través de él. O sea un factor proporcional entre la velocidad y la presión acústica.

³⁴ Las ondas planas ocurren en una región pequeña lejos de la fuente donde la onda se inicia (los puntos donde las vibraciones están en fase), son aproximadamente planos y tienen cambios insignificantes en la amplitud.

³⁵ El ángulo sólido Ω , es el espacio encerrado en una superficie cónica. El valor, expresado en estereorradián (sr), es obtenido como $\Omega = S/R^2$, donde S es la superficie esférica con el centro en el ápice del cono y el radio R.

Por lo tanto, la relación de intensidades es dada por:

$$\frac{I_1}{I_2} = \left(\frac{R_2}{R_1} \right)^2 \quad (3.7)$$

Si se considera la referencia de intensidad en $R_1 = 1\text{m}$, distancia en la cual el nivel de origen (SL) es determinado, la proporción logarítmica de las intensidades relacionada con la transmisión de la pérdida debido a la dispersión es:

$$10 \cdot \log_{10} \frac{I}{I_{\text{Ref}}} = 10 \cdot \log_{10} \frac{1}{R_2^2} = -20 \cdot \log_{10} R_2 \quad (3.8)$$

Entonces la pérdida de transmisión es dada por:

$$TL = 20 \log_{10} r + ar \quad (3.9)$$

Donde r es la distancia al transductor y a el coeficiente de absorción.

El Nivel de Ruido (NL) es dependiente del nivel de ruido del espectro ambiental (N_0) y del ancho de banda del transductor durante la recepción (w),

$$NL = N_0 + 10 \log_{10} w \quad (3.10)$$

El ruido en el océano es generado a través de varias fuentes [Urlick, 1975], tales como: las olas, la lluvia, la actividad sísmica, el ruido térmico, los organismos vivientes y los hechos por el hombre...

Además del ruido, también es importante tener en cuenta el efecto combinado de la energía acústica de dispersión de retorno creada por varios cuerpos marinos; estos incluyen las olas superficiales, las burbujas de aire, la vida marina, materiales en suspensión, etc. Esta contribución es conocida como el Nivel de Reverberación (RL).

Los transductores normalmente tienen la capacidad de concentrar la energía dentro de una forma cónica (Figura 3.2). Esta propiedad puede ser cuantificada, por la ecuación del sonar, como la razón de la intensidad dentro del haz y la intensidad de un punto de la fuente omnidireccional con el misma energía.

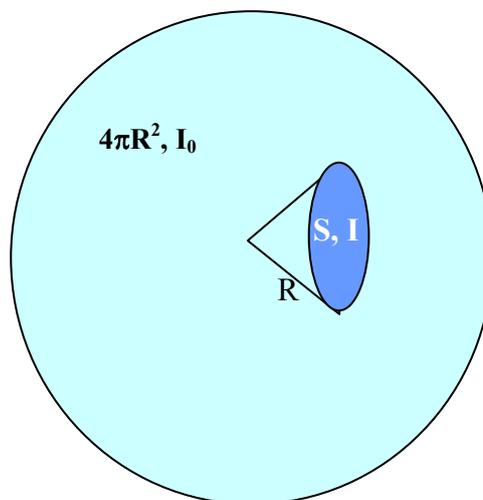


Fig. 3.2 " Superficies sondaadas desde una fuente omnidireccional y una fuente direccional"

La potencia, Π , del pulso acústico es igual a la intensidad por el área. Por lo tanto, considerando la misma potencia para las fuentes omni direccionales y direccionales:

$$\Pi = I_0 \cdot 4\pi R^2 = I \cdot S \quad (3.11)$$

La razón de intensidades es dada por,

$$\frac{I}{I_0} = \frac{4\pi R^2}{S} \quad (3.12)$$

y el Índice de Directividad (DI) se obtiene por:

$$DI = 10 \log_{10} \frac{I}{I_{Ref}} = 10 \log_{10} \frac{4\pi R^2}{S} \quad (3.13)$$

Para un arreglo con longitud, L , y una longitud de onda λ , (con $L \gg \lambda$) el índice de directividad (DI) se da por

$$DI = 10 \log_{10} (2L/\lambda) \quad (3.14)$$

La energía acústica retornada del fondo es la energía utilizada por los sistemas de sonar, así como los medios remotos por los cuales se deducen algunas propiedades de los fondos del mar. El conocimiento del ángulo del haz y del perfil de la velocidad del sonido en la columna de agua permite obtener la fuerza dispersa de retorno corregida por la absorción y la propagación esférica.

Cada partícula en el fondo marino puede semejar a un reflector, y el fondo del mar devuelve la suma de las contribuciones de energía de la interfase agua-fondo y del volumen de sedimentos, debido a cierta penetración de energía en los sedimentos. Sin embargo, la contribución del volumen de sedimentos es menos significativa cuando se utilizan frecuencias altas.

La Fuerza Dispersa de retorno (**BS**) del fondo marino, normalmente es descrita como la suma logarítmica de fuerza de dispersión de retorno intrínseca por unidad de área o índice de dispersión de retorno (SB), que es dependiente de las propiedades reflectivas del fondo marino y del área de dispersión efectiva instantánea A , el área del fondo marino que contribuye a la señal de dispersión de retorno:

$$BS = SB + 10 \log_{10} A \text{ dB.} \quad (3.15)$$

Los límites del área de dispersión de retorno son definidos por la geometría del haz, particularmente por el ancho del haz (del haz transmitido) a lo largo de la dirección en la incidencia normal o nadir, ϕ_T , y por la ancho del haz (del haz receptor) en la dirección de cruce del nadir, ϕ_R .

Para las direcciones fuera del nadir, el área de dispersión de retorno es limitada por el ancho del haz, ϕ_T , y por la longitud del pulso transmitido τ (Figura 3.3). La fuerza de dispersión del fondo marino puede ser dada por:

$$BS = \begin{cases} SB + 10 \cdot \log_{10} (\phi_T \phi_R R^2) & \text{beam width constrict} \\ SB + 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{c\tau}{2\sin\beta} \phi_T R \right) & \text{pulse length constrict} \end{cases} \quad (3.16)$$

Donde R es el rango de inclinación desde el transductor al punto en el fondo del mar, c es la velocidad del sonido, y β es el ángulo del haz con referencia a la vertical.

El coeficiente de dispersión, SB , es usualmente dependiente en forma parcial del ángulo de incidencia, la variación más grande ocurre al estar cerca del nadir y típicamente sigue la ley de Lambert [Urlick, 1975 y de Moustier, 1993] dependencia a más grandes ángulos de incidencia. Es común definir:

$$SB = BS_N, \text{ para incidencia normal } (\beta = 0^\circ)$$

$$SB = BS_O \cdot \cos^2 \beta, \text{ para la incidencia oblicua } (\beta > 10\text{-}25^\circ)$$

Típicamente, BS_N será aproximadamente -15 dB y BS_O será -30 dB. Estos valores pueden cambiar en ± 10 dB o más aun dependiendo del tipo del fondo marino y su aspereza.

Revisando la huella del haz (área sondeada), Figura 3.3, el área sondeada instantánea, A , es una función del ancho del haz transmitido, ϕ_T . El número de muestras por haz depende del intervalo de muestreo (τ_s).

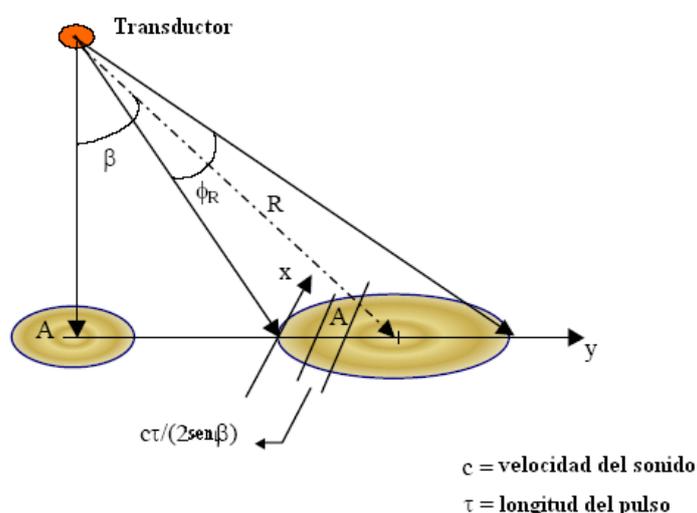


Fig. 3.3 “Muestras de dispersión de retorno”

El Umbral de Detección (DT) es un sistema de parámetros dependientes que establecen el nivel más bajo sobre el cual el ecosonda puede detectar los ecos que retornan.

2.1.3 Temperatura

La temperatura en la superficie del agua de mar varía con la posición geográfica en la tierra, con las estaciones del año y la hora del día [Pickard y Emeryl, 1990]. La distribución de los campos de temperatura es compleja y no puede predecirse con suficiente precisión para los levantamientos hidrográficos; debido a que el comportamiento de la temperatura en la columna de agua es también muy complejo. Tal imprevisto exige una amplia distribución de lanzamientos de perfiles de velocidad del sonido, temporal y espacialmente, para mantener una corriente representativa de los perfiles de velocidad del sonido para el área del levantamiento.

La medición de la profundidad es bastante sensible a las variaciones del perfil de la velocidad del sonido; una variación de un grado centígrado en la temperatura se traduce aproximadamente en una variación de 4.5 m/s en la velocidad de sonido.

La variación de temperatura es el factor dominante para la variación de la velocidad del sonido entre la superficie y el límite más bajo de la termoclina³⁶, desde allí la presión se convierte en la principal influencia.

2.1.4 Salinidad

La salinidad es la medición de la cantidad de sales disueltas y otros minerales en el agua del mar. Normalmente se define como la cantidad total de sólidos disueltos en el agua de mar en partes por mil (ppt o ‰) por peso.

En la práctica, la salinidad no es determinada directamente pero es calculada desde la clorinidad, la conductividad eléctrica, el índice reflexivo o cualquier otra propiedad cuya relación con la salinidad esté bien establecida. Como un resultado de la Ley de Constancia de Proporciones, el nivel de clorinidad en la muestra del agua marina es usado para establecer la salinidad³⁷ de la muestra.

El promedio de salinidad del agua de mar es de alrededor del 35 ‰. La tasa de variación de la velocidad del sonido es de aproximadamente 1.3 m/s por 1‰ de alteración de salinidad. Típicamente la salinidad es medida con un lanzamiento del CTD (conductividad, temperatura, y profundidad) usando la conductividad eléctrica observada, ver 2.2.1.2.

2.1.5 Presión

La presión también impacta significativamente la variación de la velocidad del sonido. La presión es función de la profundidad y la tasa de cambio de la velocidad del sonido es de aproximadamente 1.6 m/s para cada alteración de 10 atmósferas, es decir, aproximadamente 100 metros de profundidad³⁸ del agua.

La presión tiene una influencia importante en la velocidad del sonido en aguas profundas.

2.1.6 Densidad

La densidad del agua depende de los parámetros previos, o sea la temperatura, salinidad y presión.

Cincuenta por ciento de las aguas de los océanos tienen una densidad entre 1.027,7 y 1.027,9 Kg./m³. La más grande influencia en la densidad es la compresibilidad con la profundidad. El agua con una densidad de 1.028 Kg./m³ en la superficie tendría una densidad de 1.051 Kg./m³ en una profundidad de 5.000 metros.

2.2 Determinación de la salinidad, la temperatura y la velocidad del sonido

Esta sub sección describe la instrumentación usada para la determinación de la salinidad, temperatura y la velocidad del sonido así como sus principios operativos y el cálculo de la media de la velocidad del sonido.

³⁶ La termoclina es llamada también la capa de la discontinuidad o la capa termal. La termoclina corresponde a la inclinación de la temperatura negativa vertical en algunas capas de la columna de agua, es apreciablemente más grande que las inclinaciones por encima o por debajo de ella. Las termoclinas principales en el océano son estacionales, debido al calentamiento de la superficie del agua en el verano, o permanentemente.

³⁷ Un comité integrado (IAPO, UNESCO, ICES y SCOR) propuso una adopción universal de la siguiente ecuación para determinar la salinidad desde la cantidad de cloruro: $S = 1.80655 Cl$.

³⁸ Esto se deriva del principio hidrostático, $p(z) = p_0 + \rho gz$.

2.2.1 Instrumentación

2.2.1.1 Perfilador de la velocidad del sonido es el instrumento más común usado para la medición del perfil de la velocidad del sonido a lo largo de la columna de agua. Este instrumento tiene un sensor de presión para medir la profundidad, un transductor y un reflector a cierta distancia de separación, d . La velocidad del sonido se calcula con la ecuación $c = 2d/\Delta t$, donde Δt es el doble del tiempo de viaje de la señal acústica entre el transductor y el reflector (similar a la medición de la profundidad realizada por los ecosondas).

2.2.1.2 CTD es un instrumento electrónico con sensores para la conductividad, temperatura, y profundidad. Este instrumento registra la salinidad por la medición directa de la conductividad eléctrica del agua de mar.

La velocidad del sonido en el agua varía con la densidad y la elasticidad del medio, los cuales son dependientes de la salinidad, temperatura, y la presión. Con la información del CTD (salinidad, temperatura, y presión) es posible calcular la velocidad del sonido en el agua basada en ecuaciones empíricas. Una ecuación simple con precisión adecuada fue presentada por Coppens [Kinsler et al., 1982]:

$$C(Z, T, S) = 1449.05 + T[4.57 - T(0.0521 - 0.00023 \cdot T)] + \quad (3.17) \\ + [1.333 - T(0.0126 - 0.00009 \cdot T)](S - 35) + \Delta(Z)$$

Donde T es la temperatura en grados Celsius ($^{\circ}\text{C}$), S es la salinidad en partes por mil (**ppt**), Z es la profundidad en Km., y $\Delta(Z) \approx 16.3 \cdot Z + 0.18 \cdot Z^2$.

Esta ecuación es válida para una latitud de 45° . Para otras latitudes, la cantidad Z debe ser reemplazada por $Z[1 - 0.0026 \cdot \cos(2\phi)]$, siendo ϕ la latitud.

2.2.1.3 Termistores son elementos cuya resistencia eléctrica depende de la temperatura, la cual depende de la cantidad de radiación de calor³⁹ en el mar. Las cadenas de Termistores son usadas para medir la temperatura del agua en varias profundidades a lo largo de la columna de agua. Estas cadenas, normalmente son ancladas, y consisten de varios elementos de termistores, espaciados regularmente a lo largo de un cable. Un grabador registra cada elemento en secuencia y graba las temperaturas como una función de tiempo.

2.2.2 Operación del instrumento

Es importante para una operación exitosa de un perfilador de velocidad de sonido, antes del despliegue, el perfilador debe tener los parámetros correctos almacenados con los estándares requeridos y deben ser calibrados con condiciones atmosféricas correctas para obtener mediciones confiables de la profundidad.

Debe enfatizarse que, durante la calibración de las compensaciones atmosféricas, un perfilador de velocidad del sonido no debe estar en un compartimento presurizado o la calibración producirá errores en la compensación y por consiguiente, errores en las mediciones de profundidad.

Antes del despliegue o lanzamiento, el perfilador debe estar en el agua durante aproximadamente 15 minutos para su estabilización termal y durante un lanzamiento para medir la velocidad del sonido, se recomienda que se mantenga una velocidad constante de despliegue.

³⁹ La tasa de radiación del calor es dada por la Ley de Stefan que dice que la tasa de emisión de la radiación del calor desde un objeto es proporcional al cuarto poder de su temperatura absoluta.

2.2.3 Procesado y registro de datos

Los perfiles de velocidad del sonido deben ser editados y analizados cuidadosamente para lecturas de velocidad del sonido y de profundidades anómalas.

En general, los perfiladores de velocidad graban las profundidades y la velocidad del sonido, bajando y subiendo. Los dos perfiles deben ser comparados para confirmar que son similares después de lo cual los perfiles son casi siempre promediados para crear el perfil final, aunque esto no es necesariamente requerido, en cualquier evento las lecturas deben ser comparadas y la información adicional debe ser removida para permitir ordenarla de manera ascendente o descendente.

2.2.4 Cálculo de la velocidad del sonido

Después que el perfil de la velocidad del sonido es validado, puede aplicarse a los trabajos del levantamiento. El cálculo se usa para corregir las mediciones de profundidad con la datos del perfil de la velocidad del sonido.

Para los haces cerca de la vertical, en el caso específico de los ecosondas de haz simple, es suficientemente preciso usar el promedio de la velocidad del sonido a lo largo de la columna de agua. Sin embargo, lejos del nadir, es necesario realizar el trazado de un rayo para tener en cuenta la curvatura del haz debido a cualquier fenómeno de refracción encontrado; este es el procedimiento usado en el MBES (ver 5.2.1.8.1).

Para una señal transmitida verticalmente (i.e., $\theta_0 = 0^\circ$), la media armónica de la velocidad del sonido, c_h para una profundidad de z_n es obtenida por:

$$c_h(z_n) = \frac{z_n}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{g_i} \ln\left(\frac{c_i}{c_{i-1}}\right)} \quad (3.18)$$

Donde g_i es la constante del gradiente en la capa i , dada por:

$$g_i = \frac{c_i - c_{i-1}}{z_i - z_{i-1}}.$$

2.3 Propagación del sonido en agua marina

Esta sección se enfoca en la propagación del sonido llamada atenuación, reflexión y refracción

2.3.1 Atenuación

La atenuación es la pérdida en la energía de una onda propagándose debido a la absorción, el despliegue esférico y la dispersión por las partículas en la columna de agua.

La absorción es el resultado de la asociación y la disociación de algunas moléculas en la columna de agua; el sulfato de magnesio ($MgSO_4$) es la mayor fuente de absorción en el agua salada. La tasa de absorción es dependiente de las propiedades físicas y químicas del agua marina y de la frecuencia acústica que se transmite. En la figura 3.4 se puede observar que por encima de una frecuencia de 100 kHz el coeficiente de absorción aumenta con el aumento de la temperatura; entonces, se puede esperar que el alcance del sonar variará con la temperatura del agua.

La dispersión esférica es dependiente de la geometría; para un ángulo sólido la energía acústica se propaga en un área más grande a medida que la distancia desde la fuente aumenta.

Ambas pérdidas por la absorción y la propagación esférica son tomadas en cuenta en la ecuación del sonar (ver 2.1.2). Sin embargo, las pérdidas por la dispersión dependen de las partículas o cuerpos presentes en la columna de agua; la dispersión es principalmente causada por los organismos marinos, una mayor fuente del cual es la capa de dispersión profunda (DSL) que consiste en una capa de plancton cuya profundidad varía a través del día.

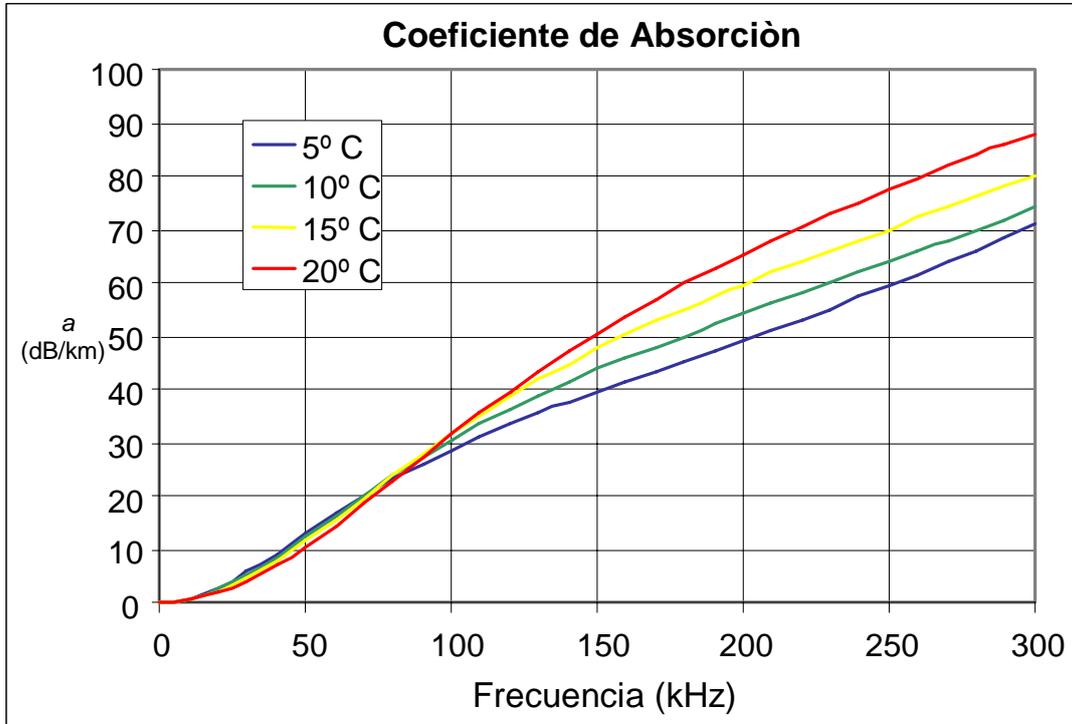


Fig. 3.4 "Coeficiente de absorción"

2.3.2 Refracción y reflexión

La refracción es el proceso en el cual la dirección de propagación de la onda acústica es alterada debido a un cambio en la velocidad del sonido dentro del medio de propagación, o a medida que la energía pasa a través de una interfase, representando una discontinuidad de velocidad del sonido entre dos medios.

De acuerdo a la Ley de Snell y considerando dos medios (Figura 3.5) con velocidades diferentes, c_1 y c_2 , si c_1 es mayor que c_2 , la dirección de propagación de la onda acústica es alterada y el ángulo de transmisión será más pequeño que el ángulo de incidencia. En contraste, si c_1 es más pequeño que c_2 , la dirección de propagación la onda acústica es cambiada y el ángulo de transmisión será mayor que el ángulo de incidencia. Para la incidencia normal no ocurre refracción.

Para la incidencia normal y los fondos lisos, el coeficiente de reflexión⁴⁰ para la presión, \mathfrak{R} , es obtenida por el coeficiente de la presión de amplitud de la onda reflejada y la presión de amplitud de la presión de la onda incidente [Kinsler et al., 1982].

$$\mathfrak{R} = \frac{P_R}{P_I} = \frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1} \quad (3.19)$$

⁴⁰ Es posible definir los coeficientes de reflexión por poder e intensidad. Para la incidencia normal el coeficiente de reflexión para poder e intensidad es el cuadrado del coeficiente de reflexión para la presión

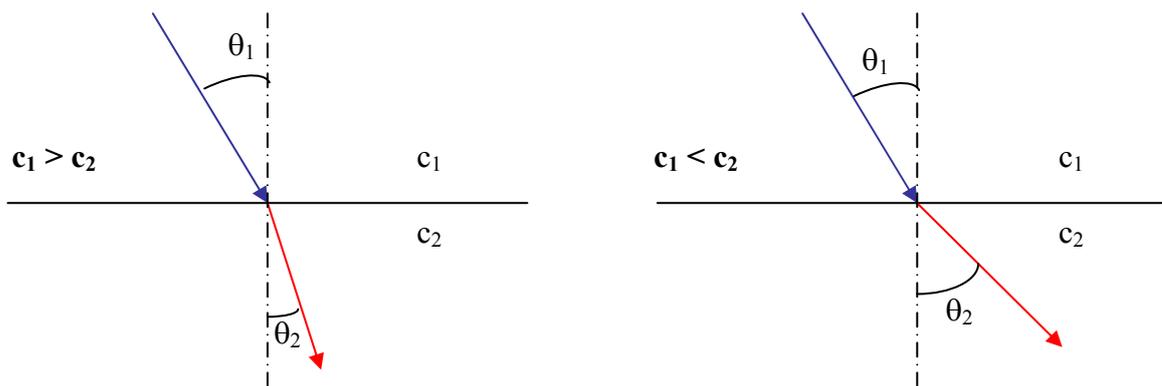


Fig. 3.5 “Principio de la refracción”

Para las condiciones generales, la proporción de la intensidad acústica reflejada y transmitida depende principalmente de:

- Contraste entre las impedancias acústicas de los medios;
- Asperezas del fondo marino
- Frecuencia acústica

2.4 Parámetros acústicos

Las características de un ecosonda son determinadas por los transductores, siendo sus parámetros la directividad, el ancho del haz, la dirección del haz y el nivel de los lóbulos laterales. En esta subsección se analiza cada uno de estos parámetros.

2.4.1 Frecuencia

La frecuencia acústica de los ecosondas es el parámetro que determina el alcance y la penetración del sonido en los sedimentos. La atenuación de la señal acústica en el agua es proporcional a la frecuencia. A más alta frecuencia, mayor será la atenuación y, por consiguiente, será más bajo el alcance y la penetración en el fondo marino.

El ancho del haz depende de la longitud de la onda acústica y del tamaño del transductor. Para haces del mismo ancho las frecuencias bajas requerirán de un transductor más grande.

Las frecuencias de los ecosondas batimétricos son típicamente:

- Aguas con profundidades menores de 100 metros: frecuencias mayores que 200 kHz;
- Aguas con profundidades menores de 1.500 metros: frecuencias de 50 a 200 kHz;
- Aguas con profundidades mayores de 1.500 metros: frecuencias de 12 a 50 kHz;

Las frecuencias de los ecosondas de sedimentos están por debajo de los 8 kHz.

2.4.2 Ancho de banda

Considerando f_0 como la frecuencia de máximo poder de transmisión (frecuencia de resonancia) y f_1 y f_2 como las frecuencias que corresponden a una mitad de ese poder, el ancho de banda es el intervalo de frecuencia entre esas frecuencias (Figura 3.6), es decir, $W = f_2 - f_1$

El factor de calidad del transductor, Q , está dado por,

$$Q = \frac{f_0}{W} \quad (3.20)$$

De estas definiciones se puede identificar que Q y W tienen variación recíproca. Por lo tanto, para optimizar el poder de transmisión, el transductor debe transmitir cerca de la frecuencia de resonancia y por consiguiente debe tener un ancho de banda pequeño, es decir, un valor de factor de calidad alto.

Durante la recepción es necesario tener una buena discriminación de ecos de cualquier otra señal. Aunque, debe definirse bien el rango de la frecuencia, el ancho de banda del transductor debe satisfacer que $W \geq 1/\tau$, donde τ es la duración del pulso.

La solución óptima es tener un transductor de transmisión con un Q alto y un transductor de recepción operando en la misma frecuencia de resonancia pero con un Q bajo.

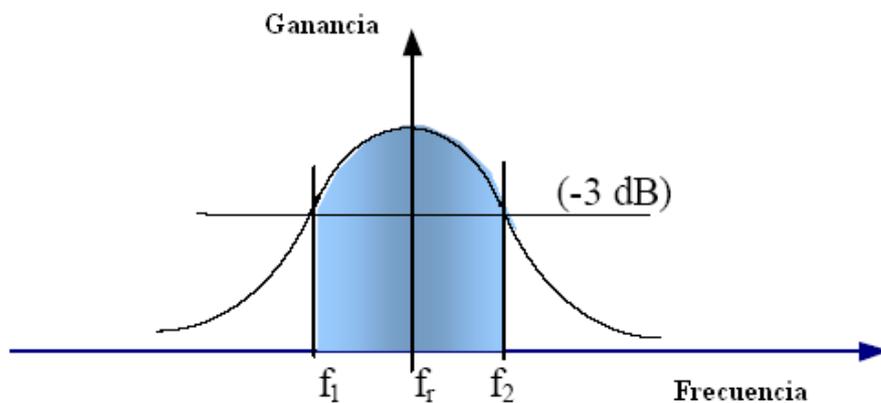


Fig. 3.6 “Ancho de banda del transductor”

2.4.3 Longitud del pulso

La longitud del pulso determina la energía transmitida al agua. Para el mismo poder, mientras más largo sea la longitud de pulso, la energía puesta en el agua es más alta y entonces será mayor el alcance que pueda lograrse con el ecosonda.

Para aprovechar la frecuencia resonante del transductor, la duración del pulso debe ser por lo menos la mitad de su período natural. El inconveniente de los pulsos más largos es la disminución de la resolución vertical de dos rasgos adyacentes (Figura 3.7).

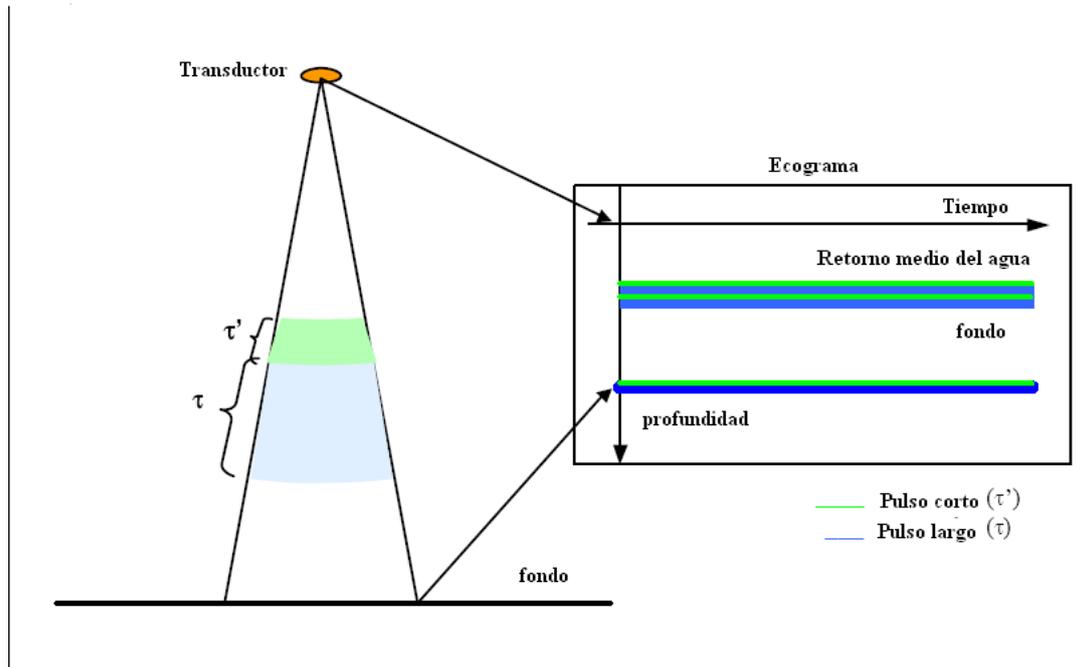


Fig. 3.7 "Resolución como una función de la longitud del pulso"

3. SENSORES DE MOVIMIENTO

El logro de haber sido capaces de corregir las profundidades observadas y su posicionamiento para el movimiento de la embarcación, es decir el comportamiento (rolido, cabeceo, rumbo) y el bandeo fue un gran avance y logro para la calidad y exactitud de los levantamientos hidrográficos. Por este propósito los sensores inerciales con un sensor de rumbo (usualmente un giro compás o una válvula de flujo) o sensores inerciales con la integración de información GPS son usados para medir el comportamiento y el cabeceo de la nave de levantamiento.

El comportamiento de una nave consiste de tres rotaciones en los tres ejes ortogonales convencionales definidos para la nave. Desde aquí, el sistema de coordenadas de la nave es definido como el sistema de mano derecha con el eje x apuntando a la proa, el eje y apuntando al estribor y el eje z apuntando hacia abajo. En el sistema de referencia el rolido corresponde a la rotación en el eje x (el rolido es positivo cuando el estribor está abajo), el cabeceo corresponde a la rotación en el eje y (el cabeceo es positivo cuando la proa está arriba), la guiñada corresponde a la rotación en el eje z (la guiñada es positiva para la rotación en sentido de las agujas del reloj).

Para transformar los datos recolectados, referidos al marco de referencia de la nave, al sistema de coordenadas local es necesario hacer rotaciones de acuerdo al comportamiento percibido. Desde aquí, por convención, el sistema de coordenadas local es definido como el sistema de mano izquierda con el eje x apuntando al Este, el eje y apuntando al Norte y el eje z apuntando hacia abajo.

La siguiente sección cubre los principios de los sensores de movimiento y la exactitud en la medición.

3.1 Principios de operación

3.1.1 Sensores inerciales

Los sensores inerciales o Unidades de Medida Inercial (IMU) son los sensores más comúnmente usados en la hidrografía para la medición del rolido, cabeceo y bandeo. Estos sensores aplican las

leyes de Newton para el movimiento y consisten de tres acelerómetros, montados en ejes tri ortogonales y tres sensores de tasa angulares colocados en el mismo marco que experimenta el mismo movimiento angular de la nave (sistema strap down). El resultado de esta tríada de acelerómetros da una buena estimación del vector de gravedad, la dirección desde la que los pequeños desplazamientos de la nave son medidos. La tríada de los sensores de tasa angular mide los desplazamientos angulares (es decir, rolido, cabeceo y guiñada).

El balanceo es determinado por la doble integración de la aceleración lineal diagnosticada por el acelerómetro vertical.

Los datos de los acelerómetros están filtrados a paso bajo para retirar las variaciones de alta frecuencia desde el vertical aparente debido al oleaje, cambios rápidos o variaciones de velocidad bruscas. Por otra parte, los datos de los sensores de tasa angular son filtrados a paso rápido para retirar los movimientos de frecuencia baja. Entónces el resultado del filtro es el comportamiento de la plataforma con la frecuencia por encima del límite de frecuencia seleccionado (usualmente, el límite de frecuencias de 5 a 20 segundos es aceptado.)

Cuando la nave sufre cualquier aceleración sistemática, cuya duración excede el tiempo constante del filtro de paso bajo utilizado a los acelerómetros, como los de cambios prolongados o variación de la velocidad, la aceleración centripetal o tangencial es percibida como las aceleraciones horizontales prolongadas que no pueden ser filtradas por el filtro de paso bajo. El resultado es la deflección del vertical aparente del vertical verdadero con los errores consiguientes de las medidas angulares (rolido y cabeceo).

La combinación de los dos filtros (de paso bajo y de paso alto) y la relación entre las dos bandas de pase establece las características del sensor.

Estos sensores inerciales, especialmente para el bandeo, son muy sensitivos al intervalo de tiempo usado para la integración. El límite de frecuencia equivalente debe ser sintonizado en el valor adecuado, para detectar las ondas más largas sin rechazar o atenuar las más cortas.

3.1.2 Sensores inerciales con la integración de información GPS

La integración de información GPS provee una intención de determinar el rumbo de la embarcación a través del uso de dos antenas GPS en una línea de base, usualmente orientadas longitudinalmente a la proa de la nave.

La información de la velocidad y el valor de cambio que da el receptor GPS y por los valores de los sensores angulares pueden ser usados para calcular la aceleración centripetal. Tomando en cuenta esta información, las mediciones del rolido y el cabeceo son compensadas por la deflección del vertical aparente. El resultado de este sensor es un rolido y un cabeceo de mayor exactitud que no es susceptible a ninguna aceleración horizontal.

3.2 Medición del rolido, cabeceo y balanceo

Desde mediados del 1990, los sensores de movimiento exactos y económicos han sido utilizados para el levantamiento hidrográfico. Es ahora considerado un requisito esencial no solo para el levantamiento multi haz sino también para el de haz simple cuando se utilizan sistemas de recolección de datos automáticos. Estos sensores son usados para compensar el movimiento de la nave para el rolido, cabeceo y bandeo.

Las profundidades calculadas deben tener en consideración los datos del sensor de movimiento, es decir, el valor desde la oscilación de la nave de levantamiento en el eje longitudinal (rolido - θ_R), el

valor de la oscilación de la nave de levantamiento en el eje transversal (rolido - θ_P), el rumbo de la nave (α) y la oscilación vertical (bando) ver figura 3.8 y anexo A.

3.3 Aproximación

El registro y la aplicación del rumbo de la nave son esenciales para los sistemas de levantamiento de banda de sondajes. Sin embargo, para los levantamientos de haz simple el efecto de la variación del rumbo (guiñada) durante una rotación no es importante si la antena de posicionamiento y el transductor están ubicados en el mismo eje vertical. Cuando la antena de posicionamiento y el transductor no están en el mismo eje vertical, para profundidades posicionadas exactamente, es necesario tener en cuenta el rumbo de la nave.

Para la medición del rumbo en tiempo real están disponibles varios métodos y equipos, como: el girocompás, los compases de válvula de flujo y los DGPS de fase transportables.

La medición del rumbo basada en los de fase transportable es hecha en sensores inerciales que integran la información DGPS. Esta solución permite altas exactitudes.

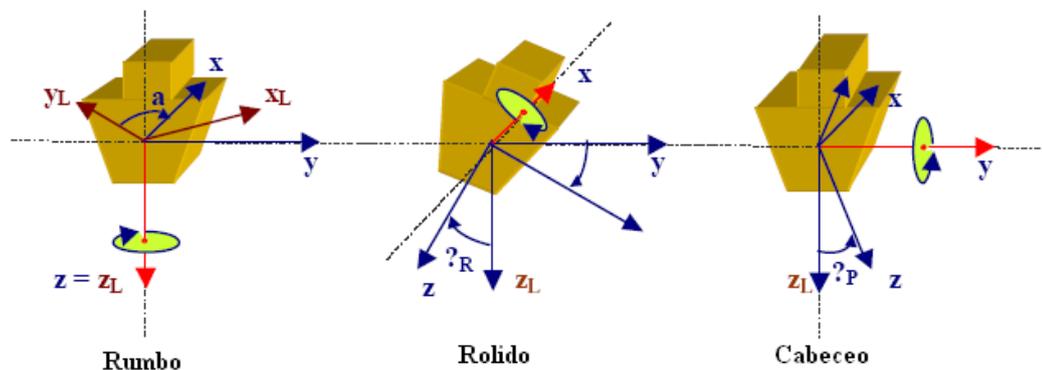


Fig. 3.8 “Comportamiento de la nave”

3.4 Precisión

La precisión del rolido, cabeceo, bando y rumbo deben ser tan altas como sea posible. Los sensores de movimiento disponibles en el presente son suficientemente precisos para ser utilizados en casi todas las órdenes de levantamiento. Sin embargo, durante las aceleraciones horizontales de la nave de levantamiento, aceleraciones centripetales o tangenciales, los sensores inerciales, cuando se usan solos, tienen mediciones sesgadas debido a la desviación del vertical aparente.

Para el MBES es recomendable que los sensores inerciales estén combinados con la integración de la información DGPS para que el efecto de las aceleraciones horizontales pueda ser minimizado. Las exactitudes de sistemas usuales del 95% de nivel de confianza, son de 0.05° para el rolido y el cabeceo, 0.2° para el rumbo y 10 centímetros ó 10% para la altura del bando, el que sea más grande.

Durante los cambios de la nave la medición del bando es degradada debido a la aceleración centripetal. Tradicionalmente es necesario esperar un intervalo de diez veces el período límite para recuperar mediciones exactas después del cambio para permitir la estabilización y acomodo de la unidad de medida.

4. TRANSDUCTORES

Los transductores⁴¹ son uno de los componentes del eco sondas; tienen características de transductor que dictan algunos de los tipos de operación de un eco sondas. Por esta razón es particularmente importante estudiar los principios operativos, las características y los aspectos relacionados como son: el ancho del haz, la directividad, la dirección del haz, la instalación y la cobertura.

Los transductores son los equipos utilizados para la transmisión y la recepción de los pulsos acústicos. Ellos operan al convertir la energía eléctrica en energía mecánica, es decir, los transductores convierten los pulsos eléctricos de un generador de señal a vibraciones longitudinales que propagan en la columna de agua como una onda de presión [Seippel, 1983]. Durante la recepción, recíprocamente, las ondas de presión son convertidas en señales eléctricas.

Esta sección describe las clasificaciones de transductores en relación a: Los principios operativos, el haz, el ancho del haz y la instalación, al final de la sección la evaluación de la ensonificación es presentada.

4.1 Clasificación en relación a la operación

Los transductores son clasificados en relación a su principio operativo, o sea, magnetostrictivo, piezoeléctrico y electrostrictivo.

4.1.1 Magnetostrictivo

Estos transductores tienen un eje de hierro con un espiral de níquel. La corriente C.D (corriente directa) o el pulso a través del eje genera un campo magnético en el espiral que produce una contracción y consecuentemente una reducción de su diámetro. Cuando la corriente eléctrica a lo largo del eje se para el espiral regresa a su tamaño original.

La aplicación de una señal A.C (corriente alterna) genera contracciones y expansiones de acuerdo a las características de la señal aplicada. La amplitud de la vibración inducida será máxima si la frecuencia es igual o armoniosamente relacionada con la frecuencia natural del material del transductor o la frecuencia de la resonancia⁴².

Este tipo de transductor es, sin embargo, menos eficiente que los transductores que operan con el efecto piezoeléctrico.

4.1.2 Piezoeléctrico

Estos transductores están hechos de dos platos con un fondo de cristales de cuarzo en el medio. La aplicación del potencial eléctrico a través de los platos produce una variación en el grosor del fondo de cuarzo (efecto piezoeléctrico). La alteración del potencial eléctrico causa la vibración del cuarzo y consecuentemente la vibración de toda la unidad. Recíprocamente, la compresión mecánica del cristal produce una diferencia potencial entre las caras opuestas del cristal. La amplitud de la vibración será máxima si la frecuencia del potencial eléctrico concuerda con la frecuencia natural del cuarzo.

⁴¹ El transductor es un equipo, con una antena submarina, usado para transmitir pulsos acústicos y para recibirlos de regreso. En particular, si el equipo es usado sólo para la transmisión es llamado proyector y si es usado exclusivamente para la recepción, operado en modo pasivo, es llamado hidrófono.

⁴² Este fenómeno corresponde al reforzamiento o prolongación de cualquier onda de movimiento, como las ondas acústicas. La frecuencia de la resonancia es la frecuencia en la que el transductor vibra más prontamente.

4.1.3 Electrostrictivo

Estos transductores están basados en el mismo principio que los transductores piezoeléctricos. Sin embargo, los materiales usados (normalmente cerámicas policristalinas o ciertos polímeros sintéticos) no tienen naturalmente características piezoeléctricas, por lo que durante los procesos de fabricación necesitan ser polarizados.

Los transductores electrostrictivos son usados casi exclusivamente en estos días. Estos transductores son más livianos, reversibles y pueden ser alineados. Estas alineaciones con un grupo de elementos pequeños, cuando están arregladas apropiadamente, permiten, de acuerdo al teorema del producto (ver 4.2, ecuación 3.26), características similares para un transductor de una sola pieza.

4.2 Ancho del haz

La amplitud de la presión generada por un transductor, en las coordenadas polares, es dada por el producto:

$$P(r, \theta) = P_{ax}(r) \cdot h(\theta) \quad (3.21)$$

Donde θ es el ángulo referido al eje del haz, línea de máxima amplitud de presión e intensidad, r es el rango desde un punto en particular al transductor, $P_{ax}(r)$ es la amplitud de presión en el eje del haz acústico, y $h(\theta)$ es el factor direccional que corresponde a la fuerza relativa de la señal. El factor direccional es normalizado por $\theta = 0$, es decir $h(0) = 1$, entonces $P(r,0) = P_{ax}(r)$.

La directividad del transductor es usualmente representada por un diagrama modelo de haz $B(\theta) = h^2(\theta)$ o en una escala logarítmica como: $b(\theta) = 10 \cdot \log_{10}(B(\theta)) = 20 \cdot \log_{10}(h(\theta))$

El transductor puede ser caracterizado por el ancho de su haz b_w ; esto es comúnmente definido por el ángulo en el nivel -3dB, esto quiere decir, que la apertura angular correspondiente a la mitad del poder referido al eje del haz $b_w = 2\theta_{-3dB}$, ver Figura 3.9.

La medición de la profundidad es desarrollada en cualquier dirección dentro del cono definido por el ancho del haz.

El ancho del haz está relacionado con las dimensiones físicas del transductor y con la frecuencia de los pulsos acústicos. Por ejemplo, el ancho del haz en el nivel -3 dB de un transductor de pistón circular, con un diámetro D , puede ser aproximado por:

$$b_w = 60 \lambda / D \text{ (degrees)}, \quad (3.22)$$

y para un transductor de cara rectangular, con una longitud L y un ancho W , el haz con un ancho en el nivel -3 dB en las dos dimensiones puede ser respectivamente aproximado por:

$$b_w = 50 \lambda / L \text{ and } b_w = 50 \lambda / W \text{ (degrees)}, \quad (3.23)$$

Para una alineación lineal de los elementos del transductor omni direccional N , con una distancia d de separación, la suma de las señales desde los elementos genera un diagrama patrón del haz direccional (figuras 3.10 y 3.11).

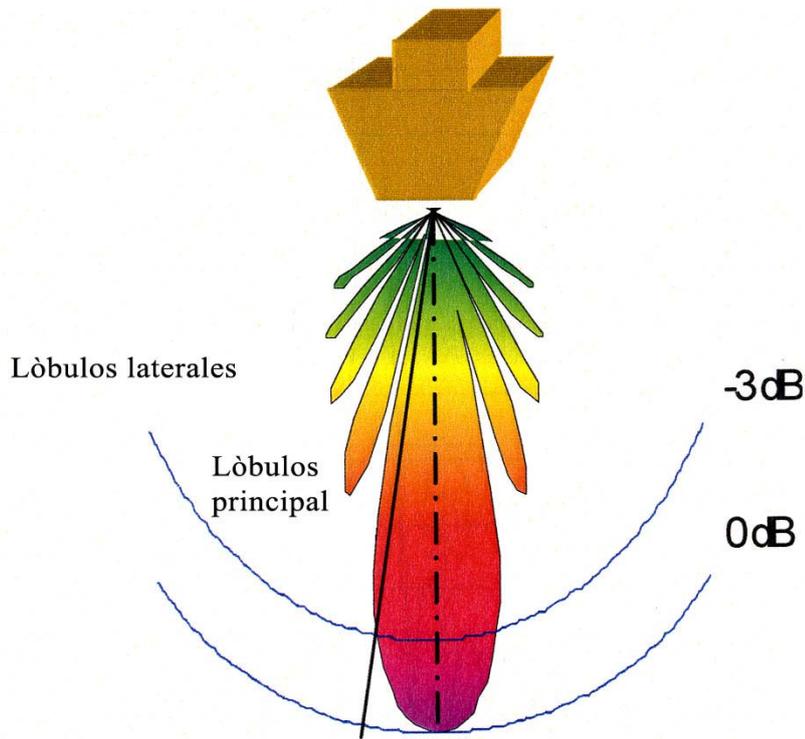


Fig. 3.9 “Ancho del haz definido por el ángulo a un nivel -3dB”

La dirección del eje acústico es perpendicular a la cara de la alineación del transductor. El ancho del haz, en el nivel -3 dB, es dado aproximadamente por

$$b_w = 50 \lambda / ((N-1)d) \text{ (degrees)} \quad (3.24)$$

Donde λ es la longitud de la onda acústica.

El factor direccional de la alineación de los elementos transductores es dada por [Kinsler et al., 1982]:

$$h_{\text{array}}(\theta) = \left| \frac{\sin(N\pi \frac{d}{\lambda} \sin \theta)}{N \cdot \sin(\pi \frac{d}{\lambda} \sin \theta)} \right| \quad (3.25)$$

Teorema de producto - es una ley de acústicas que define el factor direccional de una alineación de N elementos de un transductor como el producto de un factor direccional de un elemento del transductor por el factor direccional de la alineación, es decir.

$$h(\theta) = h_e(\theta) \cdot h_{\text{array}}(\theta) \quad (3.26)$$

y la amplitud de la presión es dada por:

$$P(r, \theta, \phi) = P_{\text{ax}}(r) \cdot h_e(\theta, \phi) \cdot h_{\text{array}}(\theta, \phi) \quad (3.27)$$

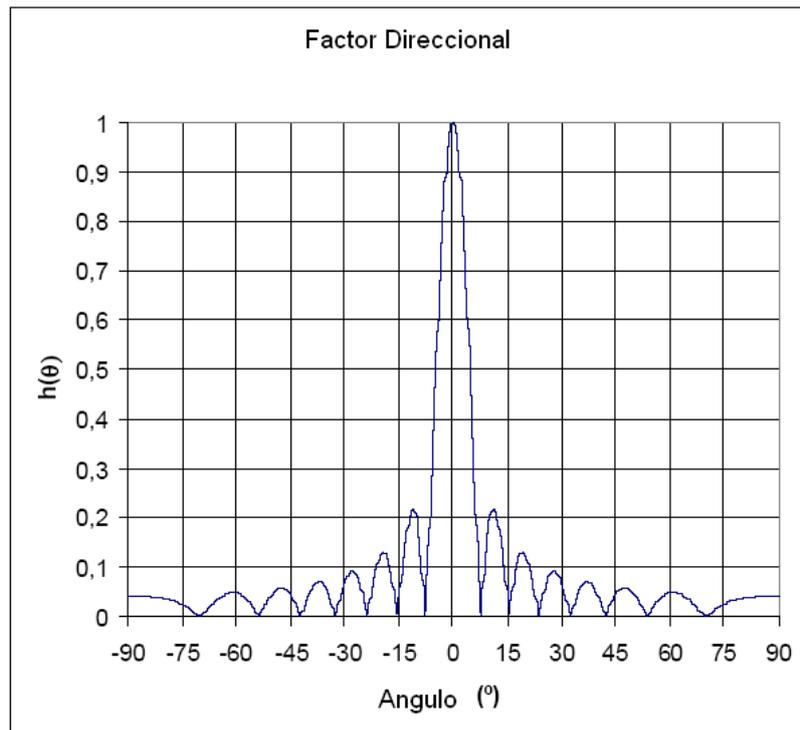


Fig. 3.10 “Factor Direccional”

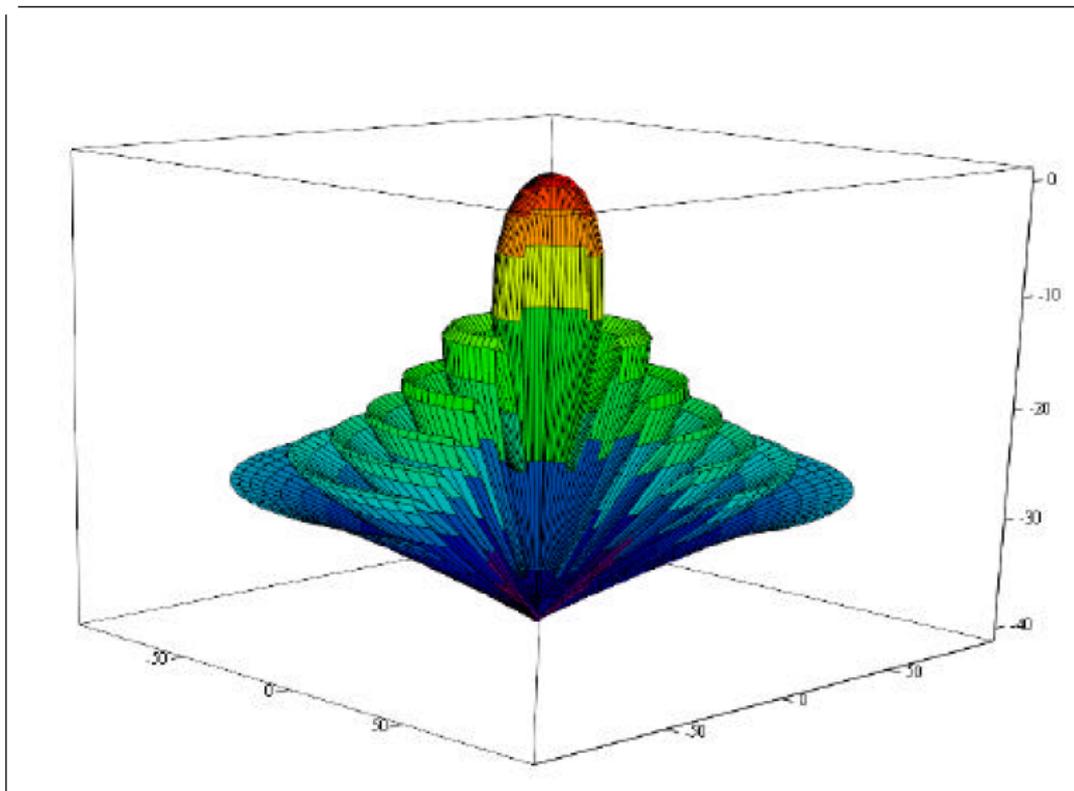


Fig. 3.11 “Patrón de haz de un haz perpendicular a una cara del transductor”

Para un elemento lineal, el factor direccional es:

$$h_{\text{linear}}(\theta) = \left| \frac{\sin\left(\pi \frac{L}{\lambda} \sin \theta\right)}{\pi \frac{L}{\lambda} \sin \theta} \right| \quad (3.28)$$

El factor direccional para una alineación es válido únicamente para el campo lejano, es decir, en el área donde las dos ondas generadas por un elemento central y un elemento exterior desde la misma alineación tienen una diferencia menor a los 180 grados.

$$k \sqrt{R^2 + \left(\frac{L}{2}\right)^2} - kR \leq \pi \quad (3.29)$$

Donde k es el número de la onda, o sea $k = 2\pi/\lambda$.

Por ejemplo, para una frecuencia de 100kHz y una alineación de transductor lineal con $L = 1.5$ m, el campo lejano corresponde a las distancias mayores a 4,0 metros. Esto es usualmente la restricción para la medición mínima de profundidad.

En el campo cercano, el proceso de interferencia crea una representación más compleja de la presión acústica.

El transductor o eje del haz de la alineación del transductor es normal a la cara del transductor. Para formar haces no normales a la cara de la alineación, es necesario dirigir el haz. Este proceso es logrado a través de las técnicas de dirección del haz.

Una alineación con N elementos omni direccionales puede direccional un haz al introducir una fase o un retraso de tiempo en cada elemento. El factor direccional correspondiente es (Figura 3.12):

$$h_{\text{array}}(\theta) = \left| \frac{\sin\left[N\pi \frac{d}{\lambda} (\sin \theta - \sin \theta_{\text{ax}})\right]}{N \cdot \sin\left[\pi \frac{d}{\lambda} (\sin \theta - \sin \theta_{\text{ax}})\right]} \right| \quad (3.30)$$

El resultado de la ecuación es la dirección del eje del haz a la dirección θ_{ax} (Figura 3.13)

La dirección del haz puede ser lograda al introducir un retraso en tiempo o la diferencia de fase a los elementos de la alineación (ecuación 3.31).

La dirección del haz tiene dos propósitos: la estabilización del haz y el haz formado durante la fase de recepción.

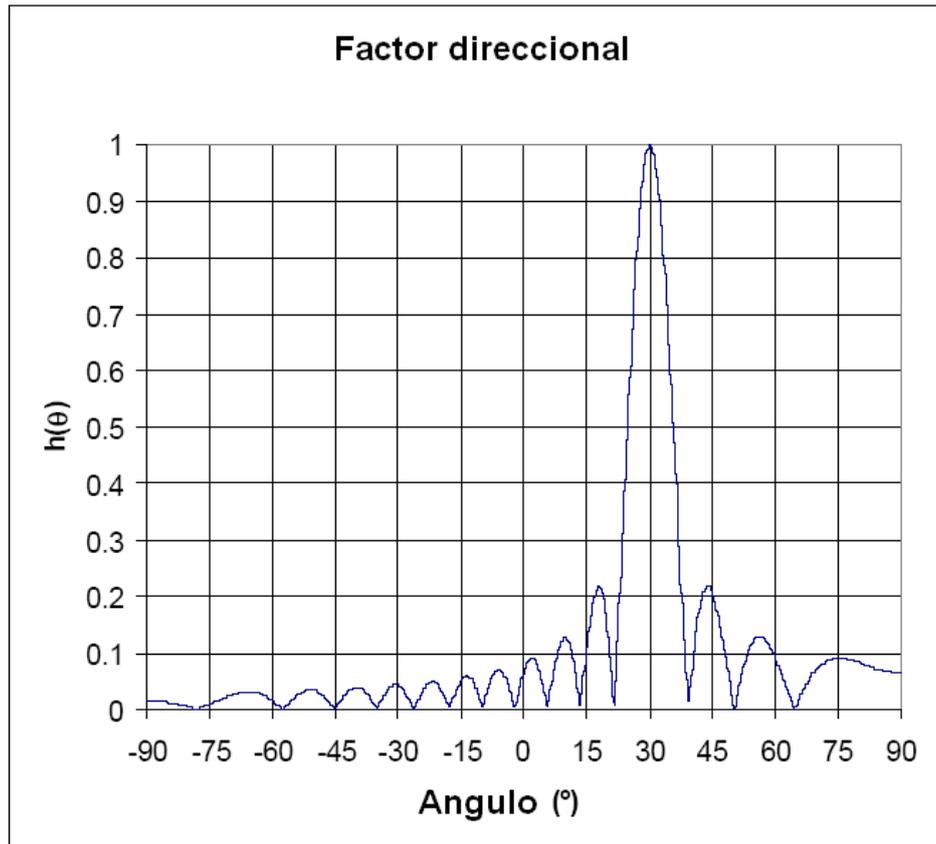


Fig. 3.12 “Factor direccional de una direcci3n de haz de 30 grados”

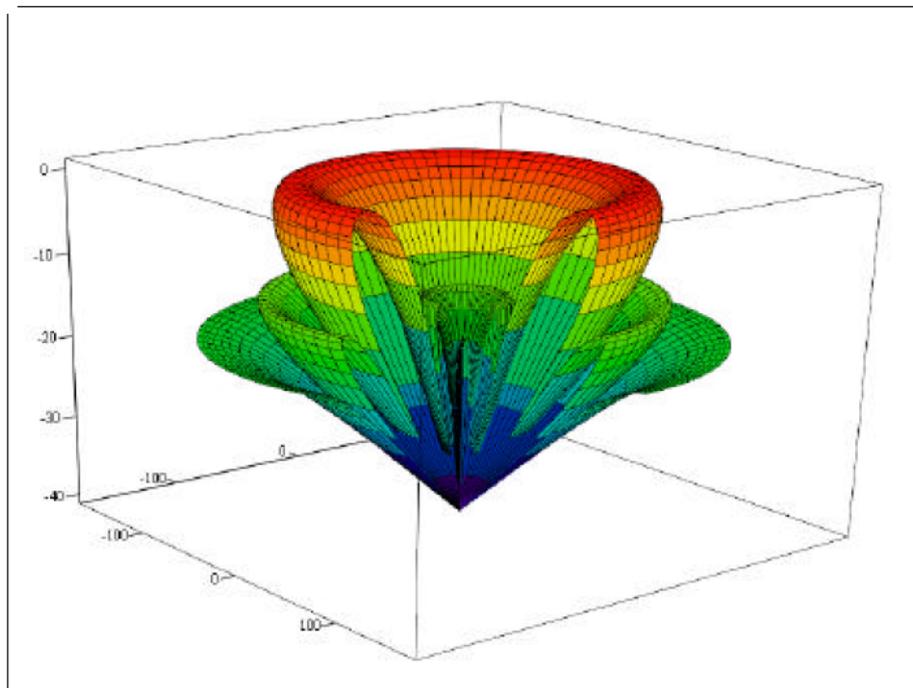


Fig. 3.13 “Patr3n de haz de una direcci3n de haz de 30 grados”

Para la estabilización del haz, es necesario medir el ángulo referido a la dirección normal de la alineación, siendo el retraso de tiempo obtenido de:

$$\Delta t_n = \frac{nd}{c} \sin(\theta_{ax}) \quad (3.31)$$

Durante la formación del haz, las señales desde cada elemento de la alineación están copiadas para cada haz, el retraso de tiempo aplicado a un elemento de un canal en particular o el haz es:

$$\Delta t_{n,i} = \frac{nd}{c} \sin(\theta_{ax_i}) \quad (3.32)$$

Donde i es el orden del haz y n es el número de los elementos del transductor./

Considerando que dos elementos sin dimensión transmiten un pulso con la misma frecuencia pero con un retraso de tiempo, el eje acústico es llevado hacia la dirección donde las frentes de onda, provenientes de los dos elementos, llegan al mismo tiempo. (Figura 3.14).

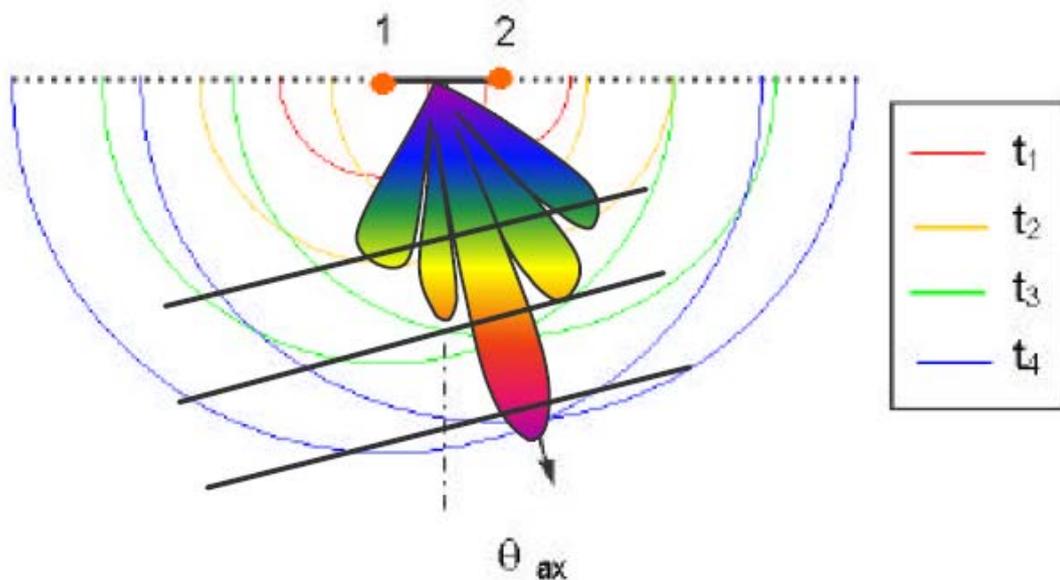


Fig. 3.14 “Ilustración de un haz diseccionado θ_{ax} con dos elementos transductores”

El ancho del haz, usualmente definido en el nivel -3 dB, aumenta con el ángulo de dirección, o sea,

$$b_{w_i} = 50 \frac{\lambda}{(N-1)d \cdot \cos(\theta_{ax_i})} \text{ (degrees)} \quad (3.33)$$

Debido a la forma cónica del haz, cuando es diseccionado, su intersección con el plano de un fondo marino plano resulta en una huella hiperbólica (Figura 3.15).

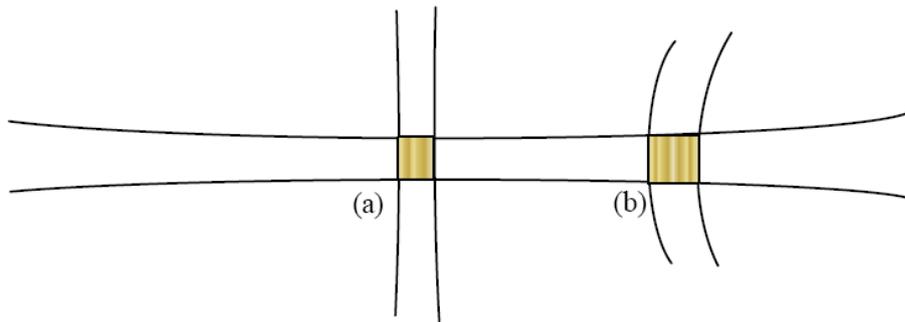


Fig. 3.15 “Huella lineal (a) e hiperbólica (b)”

Los lóbulos laterales tienen efectos indeseables, como la detección de los ecos correspondientes a esos lóbulos. Este es el caso general para los MBES usando ángulos de haz largo donde la detección errónea es hecha en el nadir o en el caso de puntos rocosos (Figura 3.16). Este efecto resulta en contornos batimétricos ondulantes que algunas veces pueden ser identificados como en forma de “omega”. La reducción de los lóbulos es vital para la operación exitosa de los MBS; es lograda usando las funciones de sombreado, aplicadas durante la recepción de los ecos, correspondiendo a la ganancia variable aplicada a los elementos del transductor.

Considerando a todos los elementos del transductor con la misma amplitud, los lóbulos laterales tendrán aproximadamente -13 dB. La técnica usada para reducir los lóbulos laterales consiste en sobreponer una ventana, que amplifique las señales de diferentes elementos con diferentes ganancias. Estas ventanas son usualmente simétricas al centro de la alineación.

La ventana Dolph-Chebyshev es usada con mucha frecuencia; esta ventana tiene la ventaja de optimizar el nivel de los lóbulos laterales para anchos particulares de haz; ésta produce el mismo nivel de amplitud para todos los lóbulos laterales.

La desventaja de la sobre posición de ventanas es la reducción de la directividad resultante.

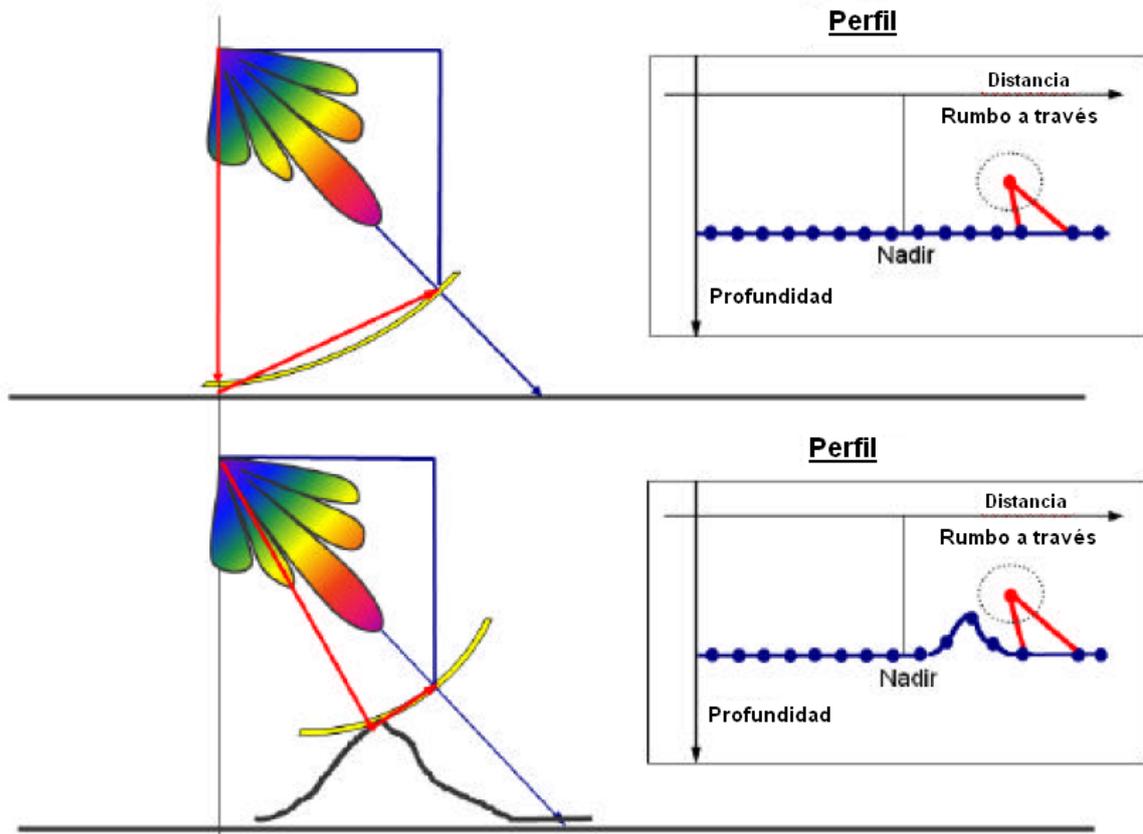


Fig. 3.16 “Medición de la profundidad correspondiente a los lóbulos laterales producidos en la determinación incorrecta de profundidad y en el posicionamiento”

4.3 Clasificación en relación al tipo de haz

Los ecosondas pueden ser divididos en ecosondas de haz simple y ecosondas multihaz. Los SBES pueden tener transductores con una simple pieza de transductor o con una alineación. Los MBES tienen alineaciones de transductores construidas a partir de algunos elementos. Como se mencionó anteriormente, este es un resultado de la necesidad de un haz de formar direcciones múltiples y, algunas veces, de la dirección del haz de compensar para el comportamiento de la plataforma.

4.3.1 Haz único

Los ecosondas de haz simple requieren de un solo transductor, para las transmisiones y las recepciones, pero una alineación de transductores puede ser utilizada particularmente cuando la estabilización es requerida. El conocimiento de los ángulos de rolido y del cabeceo es necesario para la estabilización del haz.

El ancho del haz es una función de las dimensiones del transductor y de la longitud de la onda acústica. A medida que la frecuencia es más alta y que es más grande el transductor, el haz será más angosto. Entonces para tener un haz angosto en frecuencias bajas, un transductor grande es requerido.

El transductor seleccionado para el SBES puede tener un haz angosto cuando la directividad alta es requerida o un haz ancho cuando la directividad no es muy importante pero el detectar las profundidades mínimas o los obstáculos en el fondo marino es una prioridad.

Los haces anchos tienen la capacidad de detectar los ecos dentro de un ángulo grande y sólido, el cual es útil para la identificación de riesgos para la navegación requiriendo una investigación más

avanzada. Estos haces no están usualmente estabilizados, para las condiciones de mares comunes el comportamiento del transductor no impacta las mediciones.

Por otra parte, los haces angostos, típicamente de 2° a 5° , son usualmente requeridos para el trazado de resolución alta. (Figura 3.17). Estos haces pueden ser estabilizados para medir la profundidad verticalmente debajo del transductor

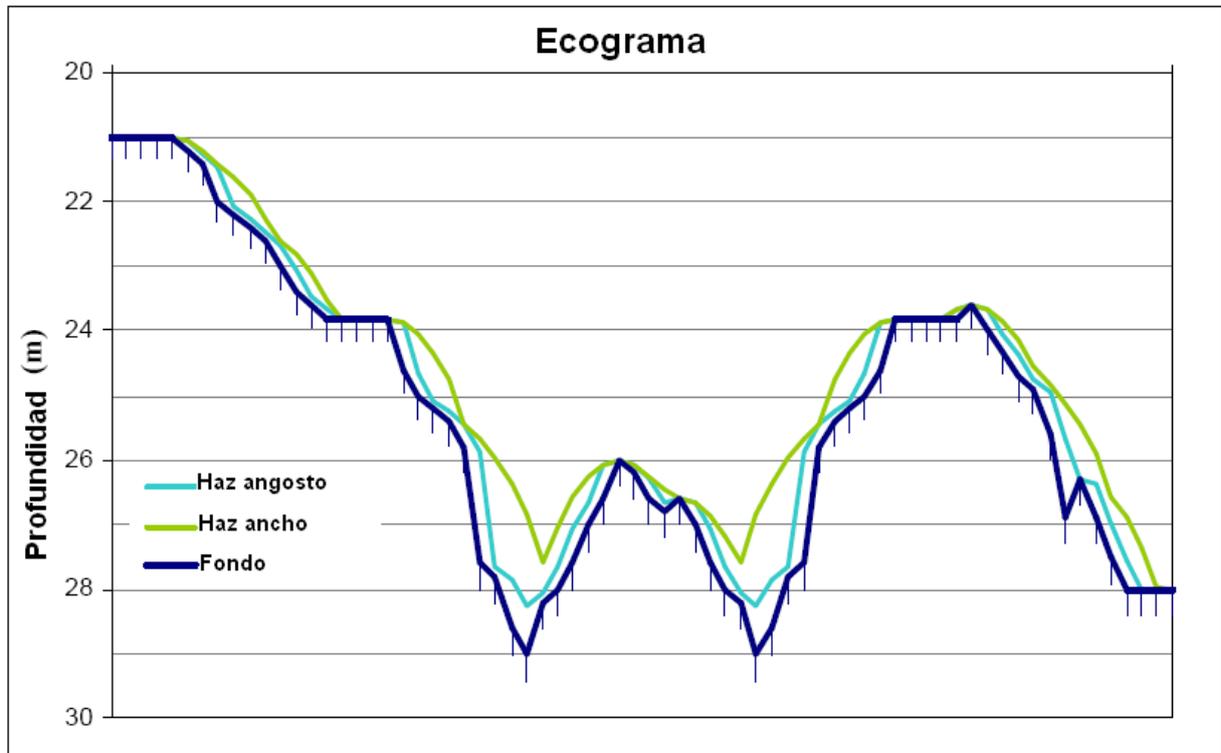


Fig. 3.17 “La ilustración de la medición de la profundidad usando un haz único angosto y uno ancho”

4.3.2 Multihaz

Los MBES normalmente tienen alineaciones transductoras separadas para la transmisión y para la recepción. Es decir, un proyector y un hidrófobo, donde el primero es orientado longitudinalmente y el segundo es orientado transversalmente a la proa de la nave. Lo más común es tener un solo haz de transmisión con forma de ventilador, angosto a lo largo del recorrido, garantizando, sin prestarle atención al comportamiento de la plataforma en estudio, la intersección entre los haces de transmisión y de recepción.

El transductor de recepción forma varios haces, en direcciones predefinidas, angostos a través del recorrido y ancho a lo largo del recorrido, garantizando, sin prestarle atención al comportamiento de la plataforma en estudio, la intersección entre los haces de transmisión y de recepción.

La reducción de los lóbulos laterales es esencial para corregir la medición de la profundidad y el posicionamiento del MBES. Es común tener lóbulos laterales menores a -20 dB.

4.4 Clasificación según su instalación

La instalación de los transductores a bordo de la nave de levantamiento puede tomarse de varias formas. La decisión en el camino en el cual el transductor debe ser instalado depende de lo portátil del sistema, manteniéndolo libre de los tipos de ruido de la nave, incluyendo la corriente de agua

turbulenta bajo la quilla, y la necesidad de bajarlo cerca del fondo marino. La instalación del transductor puede ser montado en la quilla, remolcado o portátil. Cada uno está descrito en los párrafos siguientes.

4.4.1 Fijo en la quilla

Esta es la instalación común del haz simple y de los transductores de multihaz en las embarcaciones grandes, particularmente para aquellos designados para levantamientos de aguas profundas.

La instalación en la quilla puede escogerse opcionalmente de:

- 4.1.1.1 Montado en la cisterna - el transductor es montado con la cara en el casco plano. Esta opción es usada con el transductor de haz único o con el multihaz. La ventaja es que no necesita una estructura especial para la instalación; la desventaja puede ser el ruido de la nave.
- 4.1.1.2 Blister - el transductor es montado en una estructura con una forma de casco pequeño. Esta opción es usada para los transductores de haz único y los de multihaz. La ventaja es la reducción del efecto del flujo de agua del casco en la cara de los transductores; la desventaja es la necesidad de una estructura especial para la instalación.
- 4.1.1.3 Góndola - el transductor es montado en una estructura en forma de góndola (Figura 3.18). Esta opción es usada para los transductores multihaz, particularmente para la operación de aguas profundas. Las ventajas son la reducción del ruido de la nave y la eliminación del flujo de agua en el casco en la cara del transductor ya que pasa en medio del casco y la góndola; las desventajas son la necesidad de una estructura especial para la instalación y consecuentemente un aumento en el calado de la nave en el orden de un metro.

4.4.2 Remolcado

La instalación del transductor en un remolque de pesca es usado para los sonares de barrido cuando es necesario tener una buena estabilidad del transductor, la reducción del ruido en la nave y la habilidad de bajar el transductor cerca del fondo marino.

4.4.3 Portátil

Este método de instalación es comúnmente usado en los transductores de haz único o de multihaz en pequeñas embarcaciones, específicamente aquellas destinadas a levantamientos en aguas poco profundas. Esta instalación puede ser lograda en el lado o sobre la proa (figura 3.19) de la nave. La estructura de apoyo para el transductor debe ser rígida y resistente a la torsión.



Fig. 3.18 “Instalación Góndola”



Fig. 3.19 “Instalación del transductor sobre la proa”

4.5 Cobertura

La cobertura del fondo marino, o sea el área sondeada por el SBES, es el área dentro del haz, donde el tamaño de la huella es dado por (Fig. 3.20):

$$a = 2 \cdot z \cdot \tan\left(\frac{\phi}{2}\right) \quad (3.34)$$

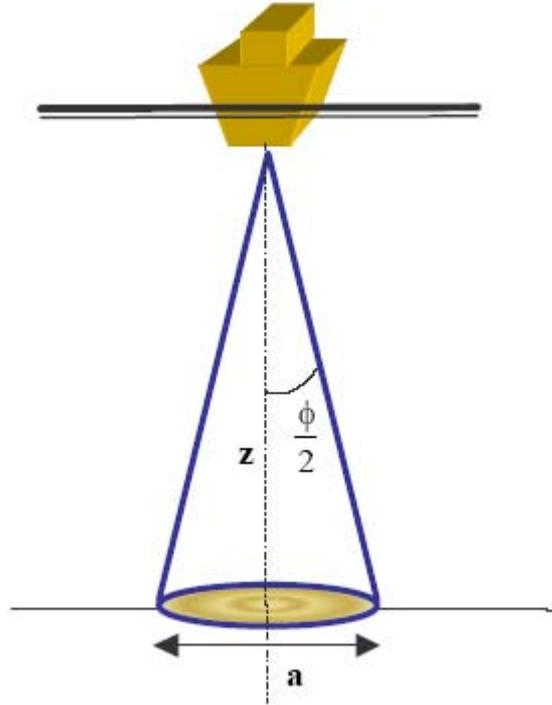


Fig. 3.20 “Cobertura del haz simple”

Para los ecosondas de multihaz, el área sondeada es el resultado de la intersección de los patrones de haz transmitidos y recibidos y es dependiente hasta el ángulo que apunte el haz, el ancho del haz, la profundidad y la inclinación promedio del fondo marino. El área sondeada para cada haz puede ser aproximada por una elipse. Tomando un fondo marino plano y nivelado, la longitud de esta elipse en la dirección de los buques es aproximadamente dada por a_y ,

$$a_y = \frac{2z}{\cos^2(\beta)} \tan\left(\frac{\phi_R}{2}\right) \quad (3.35)$$

Donde z es la profundidad media, β es el ángulo del haz que apunta y ϕ_R es el ancho de la recepción del haz en la dirección del buque. En la presencia de una inclinación, definida por un ángulo ζ , la longitud de la huella acústica es de aproximadamente:

$$a_y = \frac{2z}{\cos(\beta)\cos(\beta - \zeta)} \tan\left(\frac{\phi_R}{2}\right) \quad (3.36)$$

El ancho o la dimensión de la huella de la elipse en la dirección a popa, para un fondo marino plano, es aproximadamente dada por a_x ,

$$a_x = \frac{2z}{\cos(\beta)} \tan\left(\frac{\phi_T}{2}\right) \quad (3.37)$$

Donde ϕ_T es el ancho del haz transmitido.

La cobertura del fondo marino es una función de la dimensión de las áreas sondeadas, el espaciado del haz a través del recorrido, el índice del pulso, la velocidad del buque, la guiñada, el cabeceo y el rolido. Para lograr la cobertura total del fondo marino, las áreas sondeadas por pulsos consecutivos deben superponerse unas con otras, para que cada punto del fondo marino sea zonificado, al menos, por un pulso acústico.

El ancho de la franja de un fondo marino plano es dada por:

$$S_w = 2z \cdot \tan\left(\frac{\Delta\theta}{2}\right) \quad (3.38)$$

Donde $\Delta\theta$ es la cobertura angular entre los haces externos del MBES, efectivamente usados para propósitos hidrográficos

5. SISTEMAS ACÚSTICOS

En esta sección se describen los sistemas acústicos aplicados en el levantamiento hidrográfico. Estos sistemas están divididos de acuerdo a su habilidad de cubrir el fondo marino, es decir, los SBES y los sistemas de franja, bien sea multihaz o sonar interferométrico⁴³

5.1 Ecosondas de haz único

Estos ecosondas son equipos para la determinación de la profundidad al medir el intervalo de tiempo entre la emisión de un pulso sónico o ultrasónico y el retorno de su eco desde el fondo marino

Tradicionalmente, el principal propósito del ecosondas es de producir una resolución constante y alta vertical al perfil del fondo marino en el trazado del eco. El trazado del eco, después de una interpretación cuidadosa, es muestreado y digitalizado manualmente para producir los sondeos.

Durante la última década, la tecnología aplicada en el SBES ha mejorado progresivamente con los digitadores automáticos, los grabadores sin partes móviles y posiciones de anotación en el trazado de eco. Recientemente, las computadoras y los procesadores de señales han permitido que el procesamiento de las señales de tiempo real sea más sofisticado y la presentación de la datos o la visualización en color gráfico, en vez de un grabado en papel.

5.1.1 Principios de operación

Un eco sondas funciona al convertir la energía eléctrica, del generador de pulso, en energía acústica. Como los transductores no transmiten en todas las direcciones, la energía acústica es proyectada en el agua en forma de un haz orientado verticalmente.

El pulso acústico viaja a través de la columna de agua y toca el fondo marino. La interacción con el fondo marino resulta en una reflexión, transmisión y dispersión.

⁴³ Un sistema de distancia determinada de un objeto submarino al medir el intervalo de tiempo, entre la transmisión de una señal submarina o una señal ultrasónica y el eco de retorno. El nombre sonar se deriva de las palabras SOUNd Navigation and Ranging.

La energía reflejada que regresa al transductor, el eco, es percibido por el transductor. La fuerza del eco disminuye rápidamente con el tiempo, por esa razón el eco es ajustado automáticamente de acuerdo a su nivel de energía usando un Control de Ganancia Automática (AGC) en la fábrica y el Ganancia de Tiempo Variable (TVG) para comenzar el descenso del eco como una función de tiempo. Después de la amplificación la señal eléctrica es pasada a un detector envolvente y comparada para el ajuste del umbral para filtrar el ruido de la señal. La señal de salida es entonces visualizada o grabada.

El resultado observable es el intervalo de tiempo entre la transmisión y la recepción del eco, t , siendo la profundidad medida dada por:

$$z_m = \frac{1}{2} \cdot t \cdot \bar{c} \quad (3.39)$$

Donde \bar{c} es la media de la velocidad del sonido en la columna de agua.

5.1.1.1 Parámetros del ecosonda necesitan ser fijados correctamente para obtener una exactitud alta y una grabación clara del fondo marino. Los parámetros más importantes son:

- a) **Poder** – El rango de operación del eco sondas depende de la longitud del pulso, la frecuencia y el poder transmitido. Para optimizar el uso del eco sondas, el poder transmitido debe ser mantenido en los valores más bajos consumados con la detección adecuada. Los aumentos del poder resultarán en los altos niveles de los ecos pero también en niveles de reverberación altos, creando una grabación pobre. El poder es limitado por el fenómeno de la cavitación⁴⁴ y por el rompimiento de la presión del material del transductor.
- b) **Ganancia** - la ganancia ocasiona la amplificación de la señal. La amplificación de la señal también amplifica el ruido y consecuentemente se puede confundir la grabación de los datos. Se recomienda que la ganancia sea ajustada de acuerdo al tipo de fondo marino y al poder de transmisión.
- c) **Intensidad de Registro** – Este parámetro es usado en ecosondas análogos para ajustar la intensidad de la grabación.
- d) **Longitud del pulso** – La longitud del pulso es normalmente seleccionada de manera automática como una función del rango de operación. La longitud del pulso es responsable de la resolución vertical del ecosondas, los pulsos cortos son necesarios para una mejor resolución. Puede ser necesario aumentar la longitud del pulso en áreas con poca reflectividad o con inclinaciones excesivas.

En aguas poco profundas, donde la resolución es más importante, los pulsos cortos deben ser usados. Esto reducirá la probabilidad de los ecos falsos debido a la reverberación fuerte.

- e) **Escala** – Corresponde a la profundidad de la escala de la ventana de grabado del eco sondas. El ancho del papel de grabado es fijado, por lo tanto en las escalas menores una tendrá una resolución vertical baja.

⁴⁴ Este corresponde a la producción de los vacíos pequeños en el agua. Este fenómeno ocurre cuando la presión acústica excede la presión hidrostática.

- f) **Fase de escala** – La fase de escala es una manera de superar las limitaciones de la resolución de grabado impuesto por la escala de trazado del eco. La escala de fase consiste en el grabado de sólo una ventana de profundidad que debe ser cambiada, manual o automáticamente, para mantener el grabado del fondo marino con una resolución vertical satisfactoria sin importar la profundidad del agua (Figura 3.21).
- g) **El calado** – Este parámetro consiste en la inmersión del transductor, para grabar la profundidad con referencia al nivel de agua instantáneo, el calado debe ser fijado y verificado antes que las operaciones de levantamiento comiencen y con cierta regularidad de allí en adelante.
- h) **La velocidad del papel** – La velocidad es particularmente importante y debe ser seleccionada para asegurar una buena resolución horizontal desde la medición de la profundidad.
- i) **Velocidad de sonido** – Este es el valor nominal de la velocidad del sonido que debe corresponder a la media de la velocidad del sonido en el área de operación. En los levantamientos con más solicitud de exactitud, la velocidad del sonido puede ser fijada a la velocidad del sonido de la cara del transductor o a los 1500m/s y después durante el procesado de la datos, la profundidad debe ser corregida aplicando el perfil actual de la velocidad del sonido.

En los ecosondas clásicos análogos, este parámetro no corresponde con la velocidad del sonido sino al valor que calibra los componentes mecánicos y eléctricos del ecosondas para medir la correcta profundidad del agua.

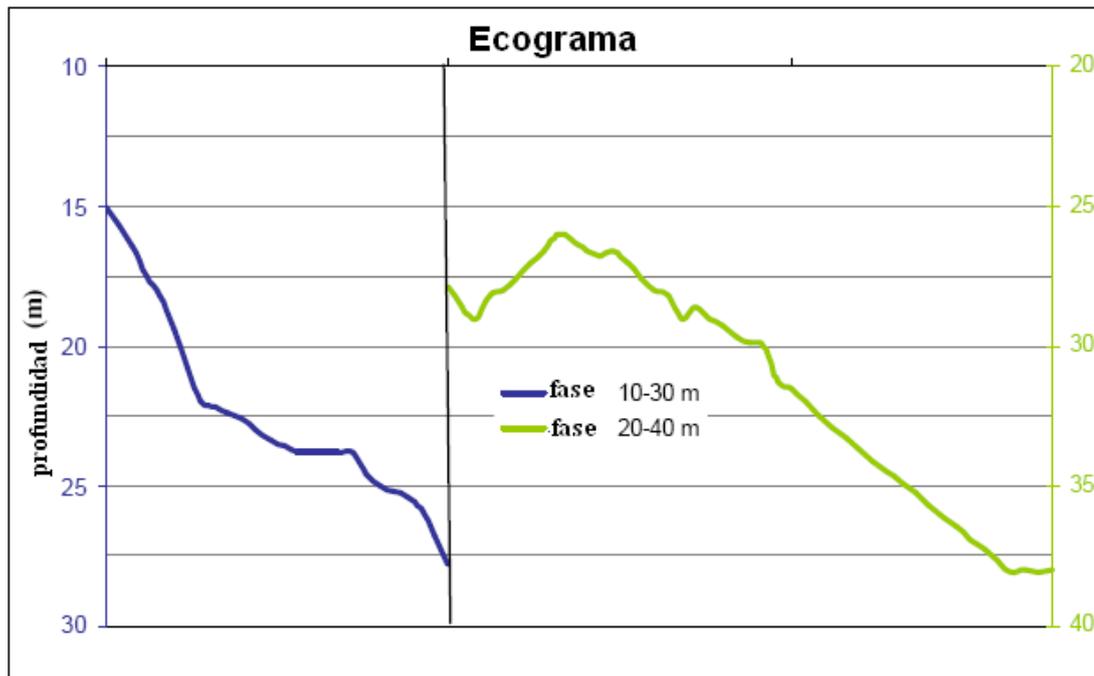


Fig. 3.21 “Escala de grabación”

Los principios de funcionamiento generales del SBES fueron referidos anteriormente. Sin embargo es posible identificar dos tipos de ecosondas, digital o análogo.

Los ecosondas análogos tradicionales, cuyo diagrama es presentado en la Figura 3.22, comienzan el ciclo con la generación de un pulso eléctrico y la transmisión de una explosión de energía en el agua. Después de la recepción de eco y la conversión a energía eléctrica, la señal de voltaje bajo es

preamplificada y pasa al amplificador de grabación, para ser grabada en un trazado del eco, que es un grabado gráfico de las medidas de profundidad obtenidas por un ecosondas con las resoluciones horizontales y verticales adecuadas. Después de que la fase de grabado es completada, es posible iniciar otro ciclo.

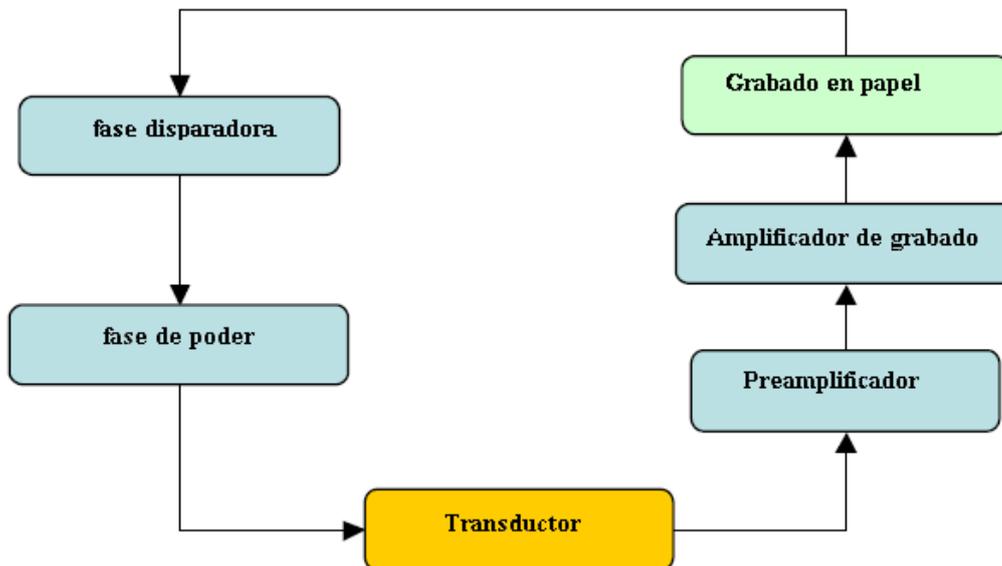


Fig. 3.22 “Ecosondas analógico – diagrama de bloque”

Los ecosondas hidrográficos para aguas poco profundas son normalmente construidos con dos canales (de baja y alta frecuencia). La grabación simultánea de dos frecuencias permite la separación del retorno del fondo marino desde los sedimentos suaves de la superficie y el alineado de rocas debido a sus independencias acústicas diferentes.

El ecosonda digital, ver figura 3.23, trabaja de una manera similar al ecosonda analógico para la transmisión de señal. Sin embargo, durante la recepción del eco, la señal recibida es amplificada como una función de tiempo (ganancia de variación de tiempo) y pasada a través de un detector envolvente donde es finalmente convertida al formato digital, que es la señal que es procesada para determinar la profundidad. Esto permite que la información sea guardada y mostrada en varios formatos.

5.1.1.2 La exactitud en la medición de profundidad es una función de varios factores, el ecosonda como tal y el medio. Usualmente, es necesario calcular el error presupuestado basado en esos factores (ver 5.1.4).

5.1.1.3 La resolución es la habilidad para separar los retornos desde dos o más objetos que estén juntos, es generalmente expresada como la distancia mínima entre dos objetos que pueden ser separados. En mediciones de profundidad, la mayor preocupación es la resolución vertical del ecosondas que depende de:

- a) La longitud del pulso - los pulsos largos tiene una resolución similar (ver 2.4.3). Dos objetos dentro de un haz estrecho serán grabados como un objetivo de señal si están separados a menos de la mitad de un pulso de longitud, serán resueltos como dos ecos separados as están separados a más de medio pulso de longitud.
- b) Sensibilidad y resolución del medio de grabación;
- c) Ancho del haz de transmisión.

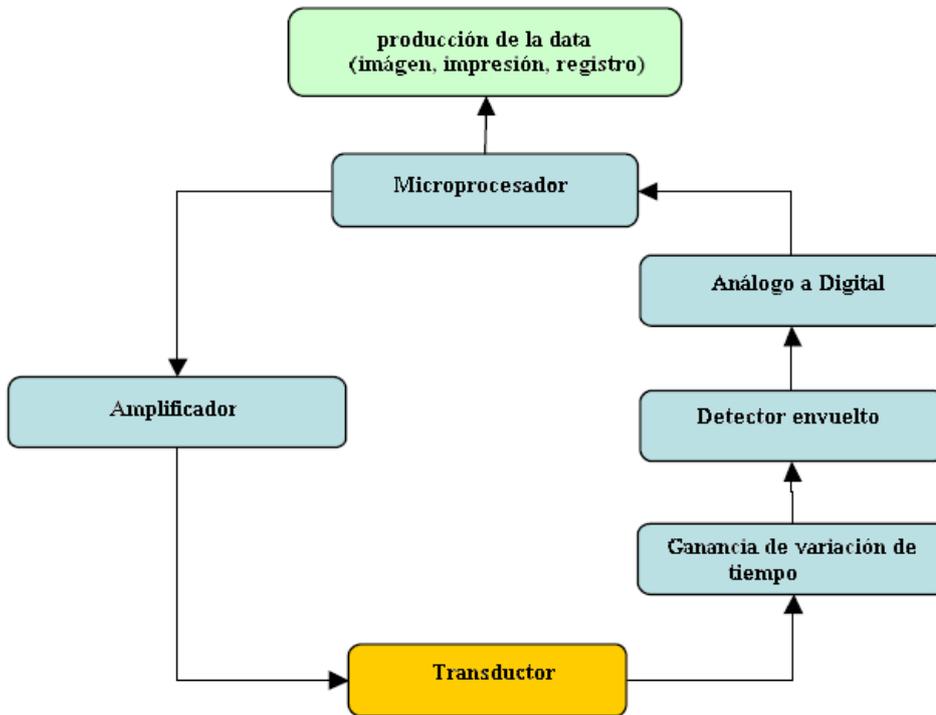


Fig. 3.23 “Ecosondas digital – diagrama de bloque”

5.1.1.4 La Frecuencia de un ecosonda es seleccionada basándose en la intensidad de uso del equipo, es decir, los rangos de profundidad. En algunos casos es deseable usar el mismo equipo en varias profundidades, para ese propósito los ecosondas pueden tener más de una frecuencia y transductor para mejorar la adquisición de datos y la calidad de los datos.

Las frecuencias están ubicadas en los canales normalmente. Los ecosondas con dos canales se usan principalmente en aguas costeras y poco profundas; para aguas profundas, es más común usar una frecuencia baja sencilla.

5.1.2 Instalación y calibración

El transductor puede ser fijado bajo el casco o montado en el lado o sobre la proa. Las consideraciones relevantes son que el transductor debe ser ubicado, en lo posible, lejos de las fuentes de ruido de la nave, tan profundo como para evitar el ruido de la superficie y permanecer sumergido hasta en las áreas rugosas.

También es muy importante que el transductor esté asegurado y orientado verticalmente. Es preferible para el compensador del balanceo y para la antena de posicionamiento estar localizados en el mismo eje vertical del transductor.

La calibración del ecosondas es una tarea de rutina que consiste en ajustar el equipo para asegura la medición correcta de las profundidades. La calibración puede ser hecha con una barra de chequeo o con un transductor especial. El propósito es fijar el parámetro de la velocidad del sonido así como de ajustar los componentes mecánicos y eléctricos. También puede ser posible corregir las medidas de profundidad durante el post-proceso con la aplicación del perfil de la velocidad del sonido.

En aguas poco profundas, la calibración del ecosonda para el promedio de la velocidad del sonido en la columna de agua puede hacerse de las siguientes formas:

- a) La barra de chequeo que consiste en bajar una barra o un plato bajo el transductor en varias profundidades (por ejemplo, cada dos metros) ya sea grabando el error de profundidad para aplicar posteriormente durante el procesado de los datos o forzando el ecosondas para grabar la profundidad correcta desde la barra o plato a través del ajuste del parámetros de la velocidad del sonido (Figura 3.24). En estos casos el valor adoptado para la calibración es el valor medio de las observaciones. Este método debe ser usado bajo los 20 ó 30 metros.
- b) El transductor de calibración es un aparato designado para ejecutar la calibración conociendo una longitud del camino exacta. El proceso de calibración consiste en hacer que el ecosonda grabe el correcto camino de dos vías dentro del transductor de calibración al ajustar el parámetro de la velocidad del sonido. El transductor de calibración es bajado a varias profundidades, cada ajuste del ecosondas, luego de haber realizado la medición, es válido únicamente para la correspondiente profundidad. El valor de calibración utilizado debe ser la media de todas las observaciones. Este método debe ser usado bajo los 20 ó 30 metros.

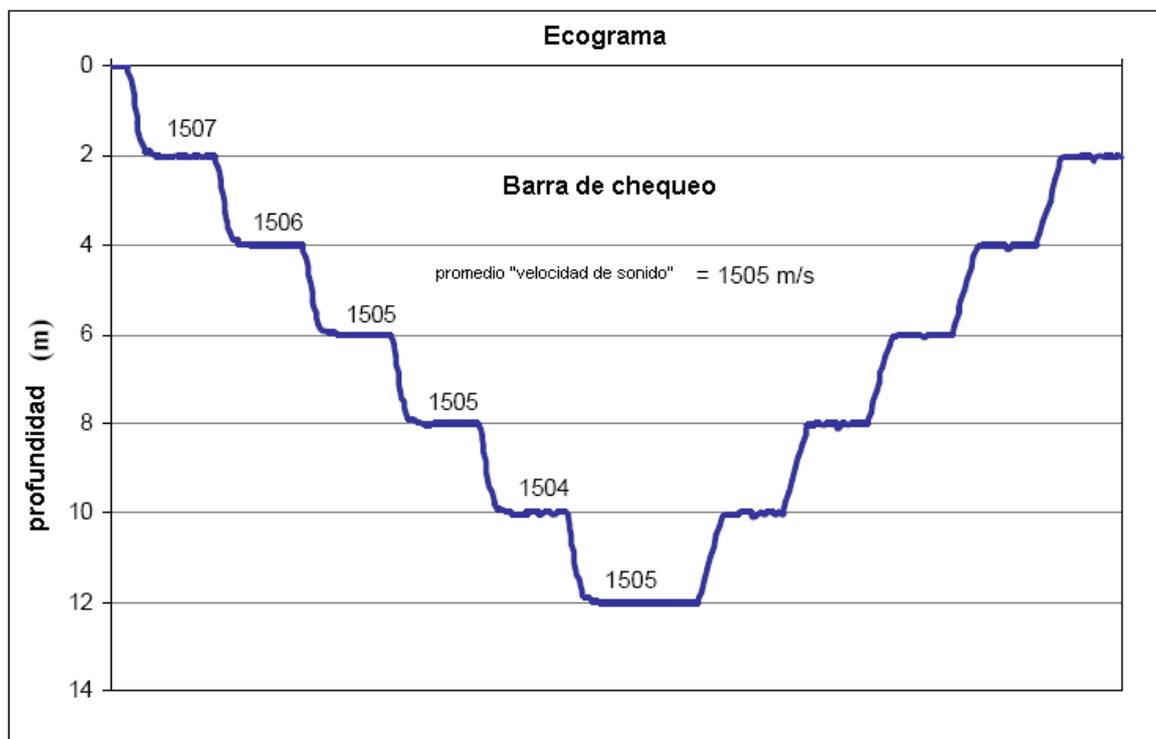


Fig. 3.24 "Ilustración de la barra de chequeo"

- c) Un método combinado puede ser también utilizado con el transductor de calibración y un perfilador de la velocidad del sonido. Este método es usualmente utilizado para profundidades mayores a las detalladas anteriormente. Con un perfilador de la velocidad del sonido y el ajuste de la velocidad de sonido verdadera en el calado del transductor, se sigue un procedimiento similar al descrito en b). En ecosondas mucho más modernos, el parámetro de la velocidad del sonido es fijado al de la velocidad del sonido actual.

La corrección de la profundidad es calculada durante el procesado de los datos, asumiendo que los datos fueron recolectados usando la velocidad del sonido verdadera en el calado del transductor. La corrección de la profundidad se basa en la diferencia entre la velocidad del sonido usada durante la recolección de los datos y la media armónica de la velocidad del sonido calculada del perfil de la velocidad del sonido.

Para profundidades mayores a los 200 metros, no se necesitan corregir las profundidades medidas por la velocidad del sonido, una velocidad de sonido estándar de 1500 m/s es usada normalmente o los valores pueden ser seleccionados de las Tablas de Mathews (N.P. 139).

5.1.3 Operación y registro de los datos

La operación de un ecosonda individual debe ser referida a la del Manual del Operador. Sin embargo, es importante resaltar los siguientes aspectos:

- Antes de comenzar el levantamiento es necesario calibrar el ecosondas a la velocidad del sonido real;
- Una escala general, adecuada para las profundidades esperadas, debe ser seleccionada;
- El canal de frecuencia debe escogerse de acuerdo a su capacidad de rango;
- Cuando se utilice un ecosonda análogo, es esencial fijar la ganancia y la intensidad de la grabación para producir un trazado legible.

5.1.4 Fuentes de error y técnicas de control de calidad

Los errores en la determinación de la profundidad pueden ser divididos en tres categorías: errores grandes (equivocaciones), errores sistemáticos y errores aleatorios.

La equivocación es la terminología usada para definir errores hechos por máquinas; éstas son causadas por defectos mecánicos o por componentes electrónicos.

Los errores sistemáticos son principalmente el resultado de compensaciones (errores fijos) o inclinaciones (errores que varían bajo condiciones diferentes) en sensores de movimiento de la nave de levantamiento, la desalineación del transductor y de otros sensores montados en ángulos. Estos errores pueden ser corregidos fácilmente si la señal y el tamaño del error sistemático pueden ser definidos. Esta categoría puede ser determinada y removida durante la calibración del sistema.

Después de retirar las equivocaciones y los errores sistemáticos en los datos de profundidad, los errores aleatorios se quedarán y éstos pueden ser analizados usando las técnicas estadísticas.

Los hidrógrafos deben estar pendientes de las fuentes que contribuyen al error de profundidad y a su impacto individual. Esta sección identifica varios tipos y presenta las técnicas normales usadas para el control de calidad.

5.1.4.1 Debido a la inclinación del fondo - tomando en consideración las diferentes inclinaciones del fondo marino, en la Figura 3.25, el error de la medición de la profundidad, dz , depende del ancho del haz y de la inclinación. Si no se aplica ninguna corrección, la profundidad del error se dará por:

$$dz = \begin{cases} z_m (\sec(\zeta) - 1) & \text{if } \zeta < \frac{\phi}{2} \\ z_m \left(\sec\left(\frac{\phi}{2}\right) - 1 \right) & \text{if } \zeta > \frac{\phi}{2} \end{cases} \quad (3.40)$$

Donde $\frac{\phi}{2}$ es la mitad del ancho del haz y ζ es la inclinación del fondo marino.

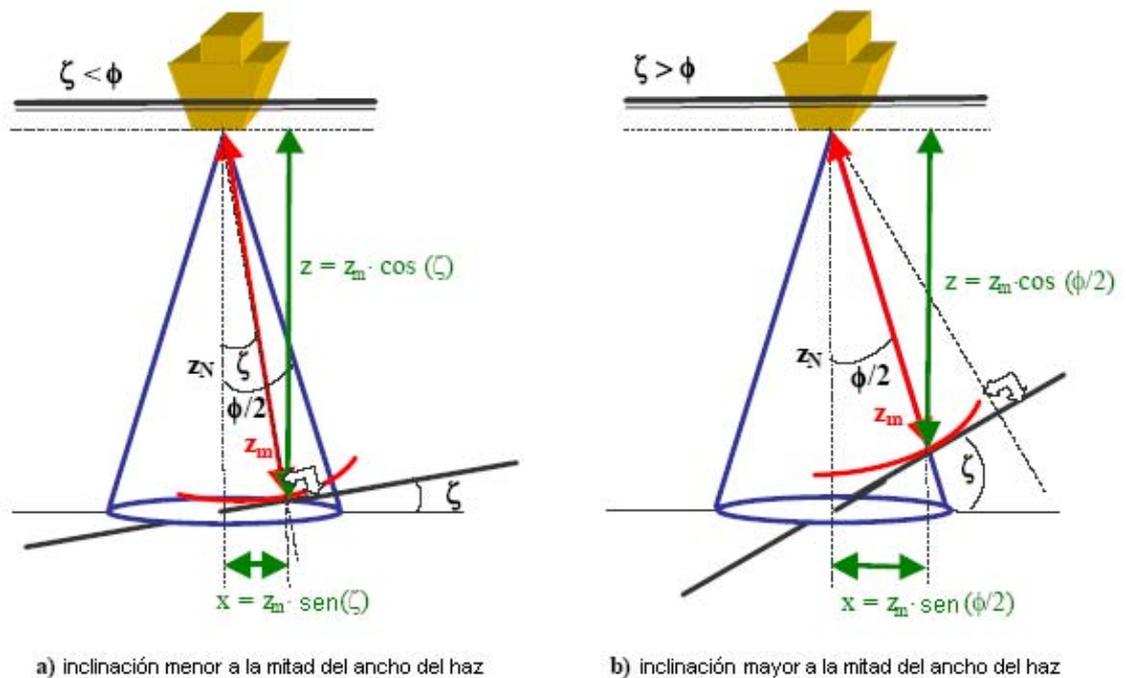


Fig. 3.25 “Efecto del ancho del haz y de la inclinación del fondo marino en la medición de la profundidad y el posicionamiento”

5.1.4.2 Debido a la velocidad del sonido. La variación de la velocidad del sonido es difícil de monitorear y produce, en los ecosondas de haz único, errores en la medición de la profundidad (dz_m), proporcional al error medio de la velocidad del sonido o a la variación (dc) y a la profundidad.

$$dz_c = \frac{1}{2} \cdot t \cdot dc \quad (3.41)$$

o

$$dz_c = z \cdot \frac{dc}{c} \quad (3.42)$$

La magnitud del error de la velocidad del sonido varía con:

- a) la exactitud de la determinación de la velocidad del sonido
- b) la variación temporal de la velocidad del sonido
- c) la variación espacial de la velocidad del sonido

Note que la variancia de la profundidad σ_{zc}^2 debido al error de medición de la velocidad del sonido y a la variación de la velocidad del sonido está escrito como,

$$\sigma_{zc}^2 = \left(\frac{Z}{c}\right)^2 (\sigma_{cm}^2 + \sigma_c^2) \quad (3.43)$$

Donde σ_{cm}^2 es la variancia de la medición de la velocidad del sonido y σ_c^2 es la variancia de la velocidad del sonido debido a las variaciones espaciales y temporales.

La variación de la velocidad del sonido, temporal y espacial, es una contribución externa mayor a los errores de medición de la profundidad. Es importante, que durante la planeación del levantamiento o al comenzar el levantamiento, llevar a cabo un número de mediciones de la velocidad del sonido o de los perfiles de la velocidad del sonido a través del área de estudio distribuidos durante el día para ayudar al hidrógrafo a decidir la frecuencia y la ubicación de los perfiles a ser conducidos dentro del área de estudio durante las operaciones de agrupación de datos.

- 5.1.4.3 Debido a la medición del tiempo Un ecosondas efectivamente mide el tiempo, convierte la medición en profundidad. El error en la medición del tiempo, dt , se relaciona directamente al error de profundidad, dz_t . En los ecosondas modernos, el error en la medición del tiempo es usualmente pequeño y constante. Este error es también tomado en cuenta durante la calibración.

$$dz_t = \frac{1}{2} c \cdot dt \quad (3.44)$$

El error mayor es una función de identificación del punto de medición dentro del eco, es decir, en los algoritmos usados para la detección de la señal.

Note que la variancia de profundidad, σ_{zt}^2 , debido al error de la medición de tiempo está escrita como,

$$\sigma_{zt}^2 = \left(\frac{1}{2} c\right)^2 \sigma_{tm}^2 \quad (3.45)$$

Donde σ_{tm}^2 es la variancia de la medición de tiempo.

- 5.1.4.4 Debido al rolido, cabeceo y bando. El rolido y el cabeceo contribuyen al error en la medición de la profundidad cuando la magnitud de aquellos ángulos es mayor a la mitad del ancho del haz $\frac{\phi}{2}$. La Figura 3.26 describe el error en la medición de la profundidad y en el posicionamiento debido al rolido, θ_R , esta figura puede ser adaptada para el cambio de cabeceo θ_R por θ_P .

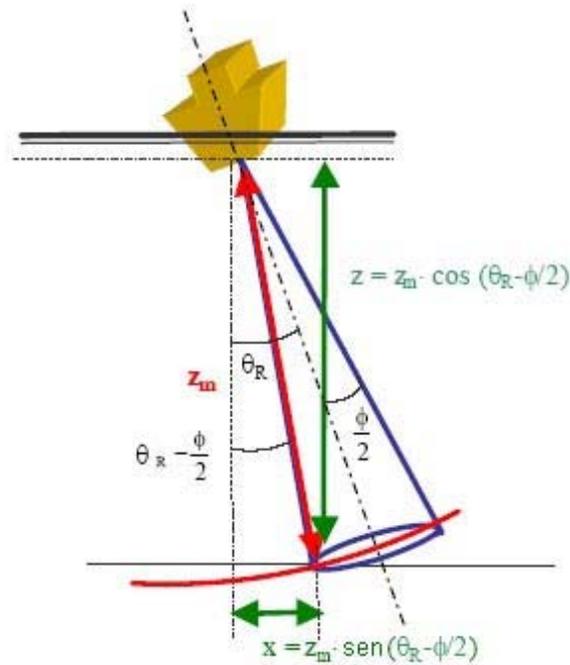


Fig. 3.26 “Efecto del ancho del haz y de la inclinación del fondo marino en la medición de la profundidad y el posicionamiento

Los ecosondas de haz ancho son usualmente inmunes al rolido y al cabeceo de la nave de levantamiento.

Para los ecosondas de haz angosto, este efecto puede ser compensado con la estabilización del haz, es decir, manteniendo el haz vertical sin importar el comportamiento de la nave o corrigiendo la profundidad medida como sigue:

$$dz_{\text{roll}} = \begin{cases} z_m \left(1 - \cos \left(\theta_R - \frac{\phi}{2} \right) \right) & \text{if } \theta_R > \frac{\phi}{2} \\ 0 & \text{if } \theta_R < \frac{\phi}{2} \end{cases} \quad (3.46)$$

El bandeo (h), es el efecto causado por la acción del mar y del oleaje en la nave de levantamiento, es medido con los sensores internos o compensadores de bandeo. El compensador de bandeo debe ser localizado sobre el transductor para medir el bandeo en el mismo eje vertical.

Cuando se usan los sensores internos, la instalación debe estar cerca del centro de gravedad de la nave de levantamiento con el nivelador conocido desde el centro de gravedad al transductor; con los ángulos instantáneos del rolido y del cabeceo, el bandeo medido, h_m , puede ser transferido a la posición del transductor, h_t , con la utilización del bandeo inducido, h_i , (Figura 3.27).

$$h_t = h_m + h_i \quad (3.47)$$

Para calcular el bandeo inducido, considere la nave como un si fuera un cuerpo rígido que es libre de rotar alrededor de los tres ejes (x , y , y z) como se mencionó en el 3. La rotación en el

centro de gravedad (rolido y cabeceo), cerca del que se mide el bandeo generalmente, corresponde a la variación de profundidad del transductor, desde la referencia de la nave (identificada con la letra **V**) a un sistema de coordenadas local (Identificado con la letra **L**). Esta diferencia es llamada balanceo inducido.

El balanceo inducido, adoptado por Hare (1995) para los marcos de referencia definidos en el 3 y el Anexo A, es dado por:

$$h_i = z_t^L - z_t^V = -x_t^V \sin(\theta_p) + y_t^V \cos(\theta_p) \sin(\theta_R) + z_t^V (\cos(\theta_p) \cos(\theta_R) - 1) \quad (3.48)$$

Donde θ_R es el ángulo del rolido, θ_p es el ángulo del balanceo y $(x_t, y_t$ y $z_t)$ son las coordenadas del transductor.

El error total de la medición de la profundidad debido al balanceo es entonces,

$$dh = dh_m + dh_i \quad (3.49)$$

Donde dh_m es el error de la medición del balanceo y dh_i es el error en la determinación del balanceo inducido.

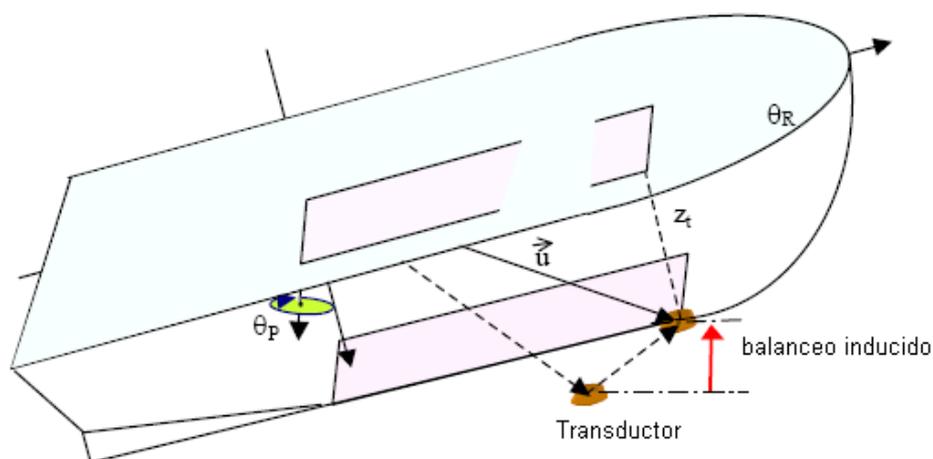


Fig. 3.27 “Balanceo inducido”

Note que la variancia del balanceo inducido es dependiente de la exactitud de la compensación del transductor desde el sensor de movimiento y desde la exactitud de los ángulos de rolido y cabeceo (Hare, 1995).

La variancia total del balanceo corresponde a la variancia de la profundidad, σ_h^2 , es decir,

$$\sigma_h^2 = \sigma_{h_m}^2 + \sigma_{h_i}^2 \quad (3.50)$$

Donde $\sigma_{h_m}^2$ es la variancia de la medida del balanceo y $\sigma_{h_i}^2$ es la variancia del balanceo inducido. Este último error es típicamente insignificante cuando se compara con el error de la medida del balanceo.

Cuando no hay un compensador de balanceo, es posible manualmente suavizar los datos en el trazado del eco. Esta tarea requiere de la experiencia considerable en la interpretación del trazado del eco para

preservar las características del fondo marino. El procedimiento general, en condiciones de rolido insignificantes, es que el trazado del eco debe ser suavizado hasta la mitad entre las crestas y las depresiones (Figura 3.28).

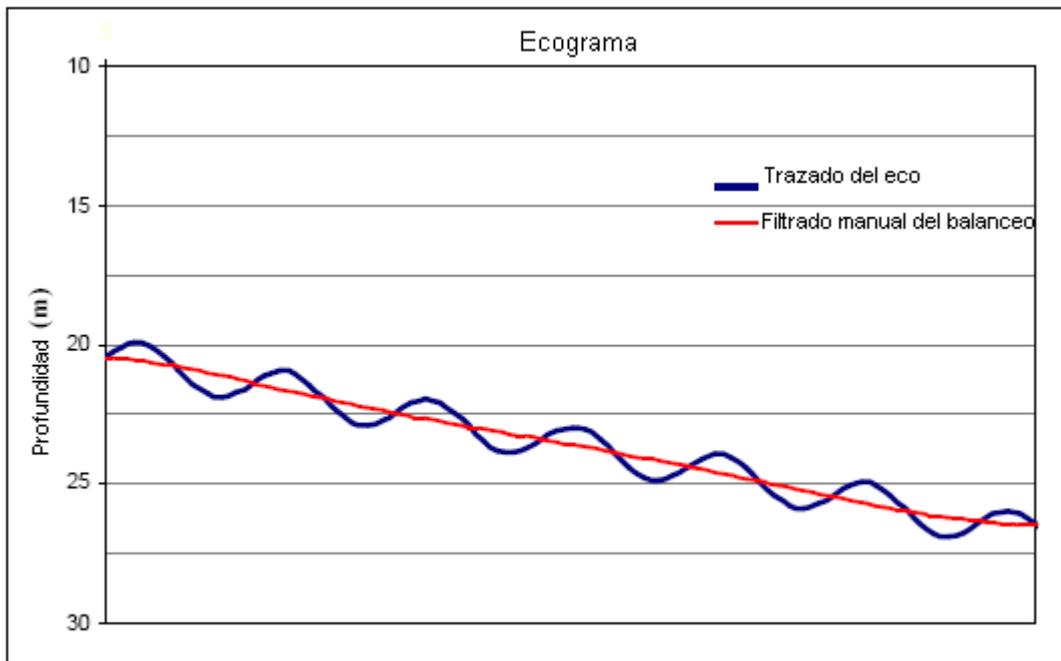


Fig. 3.28 “Filtrado manual de balanceo”

5.1.4.5 Debido al calado, asiento, asentamiento y posición relativa del transductor. La medición exacta del calado del transductor es fundamental para la exactitud del total de la profundidad. Aún así, es necesario actualizar ese valor durante el levantamiento. Las razones para la variación del calado son principalmente debido al consumo de combustible y de agua. La variación del calado, para el mismo desplazamiento, aumenta con el descenso del área flotante en la superficie del mar. El error del calado se propaga directamente como un error de profundidad, $dz_{draught}$.

El asiento es la rebaja en el nivel de una nave en movimiento, relativa a su nivel en estado de inmovilidad. Este efecto, particularmente notable en aguas pocas profundas, es debido a la depresión regional de la superficie del agua en la que se mueve la nave. El error de profundidad debido al asiento es referido como $dz_{settlement}$.

El asentamiento es otro efecto que toma lugar bajo condiciones dinámicas, el cambio en el nivel de la proa y de la popa desde el resto de la condición en respuesta a la elevación y la depresión del nivel de agua en el casco resultando de los sistemas de olas de la proa y de la popa. En las naves de levantamiento donde el cambio en el asentamiento es importante, se calcula usualmente en una tabla contra la velocidad de la nave. El error de profundidad debido al asentamiento es referido como dz_{squat} .

La posición relativa del transductor desde el sensor de movimiento o el compensador de balanceo necesita ser tomado en cuenta para corregir la profundidad medida para el balanceo inducido, ver 5.1.4.4.

El error total dado por la posición del transductor a la línea de agua dz_i es:

$$dz_i = \sqrt{dz_{\text{draught}}^2 + dz_{\text{settlement}}^2 + dz_{\text{squat}}^2} \quad (3.51)$$

Note que la variancia total de profundidad después de la inmersión del transductor está escrita como:

$$\sigma_i^2 = \sigma_{\text{draught}}^2 + \sigma_{\text{settlement}}^2 + \sigma_{\text{squat}}^2 \quad (3.52)$$

Donde $\sigma_{\text{draught}}^2$ es la variancia del calado, $\sigma_{\text{settlement}}^2$ es la variancia del asiento y σ_{squat}^2 es la variancia del asentamiento.

5.1.4.6 Grabado de la lectura y resolución El grabado de la lectura y la resolución para la medición de profundidad es dependiente de los principios operacionales del ecosonda. En el caso del grabado análogo, el operador debe seleccionar los parámetros del ecosonda apropiado durante las operaciones de levantamiento para tener, en lo posible, un trazado limpio de eco y una resolución adecuada. Por otra parte, el grabado digital no tiene más ese grado de dependencia del operador durante en levantamiento pero la supervisión es requerida durante la recolección de los datos.

Cuando los datos son grabados en papel, es necesario seleccionar la ganancia y la intensidad para el grabado legible; también es necesario tener una escala vertical con la discriminación suficiente. Es común usar escalas de fases por esa razón (ver 5.1.1.1).

El trazado del eco debe ser preparado para la lectura; esta tarea consiste en identificar puntos del fondo del mar que pueden ser seleccionados para la lectura de la profundidad. Esto es hecho normalmente con la ayuda de una tabla digitalizadora.

El error asociado con la lectura grabada depende de la experiencia y el cuidado del hidrógrafo. Considerando el ancho de grabado de papel de 20 centímetros y una escala de 0-200 metros, un error de lectura de 0,5 mm producirá un error en la profundidad de 0,5 metros. Por lo que, esta escala no es adecuada para la grabación de la profundidad en aguas poco profundas. El error de lectura es referido como dz_{read} , con una variancia σ_r^2 .

5.1.4.7 La interpretación de un trazado de eco es la responsabilidad del hidrógrafo. La interpretación requiere de la experiencia de identificar formas particulares, ecos múltiples y los ecos falsos.

a) **Los ecos falsos** – son causados por un problema extraño como las algas o los peces en la columna de agua (Fig. 3.29), por las capas de agua separadas por cambios bruscos de temperatura o salinidad o por ambas.

Los ecos falsos son grabados ocasionalmente por los ecosondas y pueden ser interpretados equivocadamente como profundidades correctas. En casos de duda sobre la validez de las profundidades medidas, se debe hacer una investigación de ese sondeo y, si es necesario, rehacer la parte específica de la línea de levantamiento.

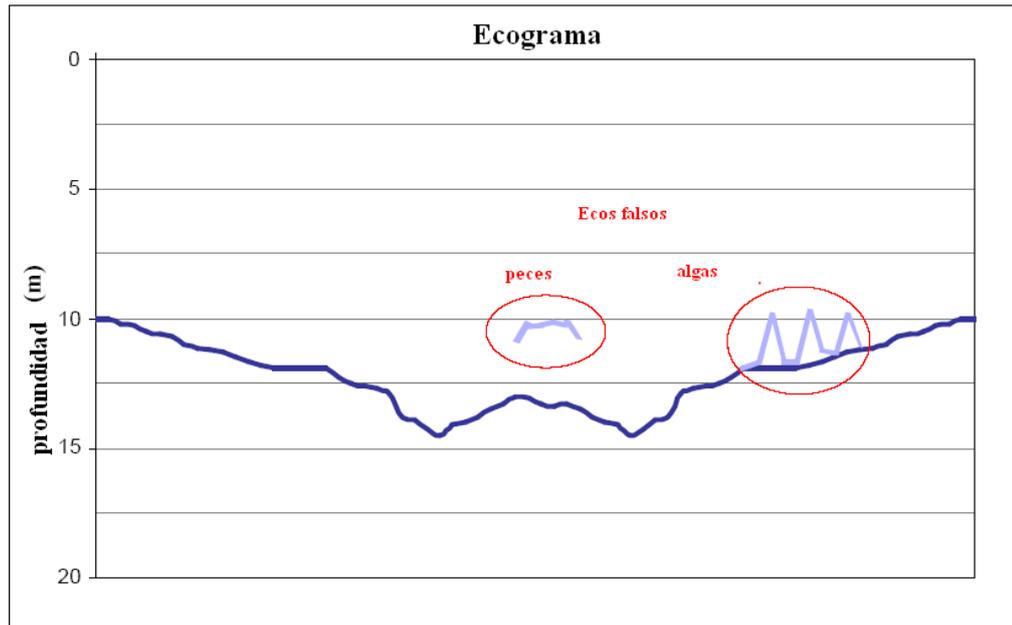


Fig. 3.29 “Ecos falsos”

- b) **Ecos múltiples** – Son ecos recibidos subsiguientes al primero debido a la multiplicidad de reflexiones en ambos sentidos entre el fondo marino y la superficie. Estos reflejos son grabados generalmente como múltiples de la primera profundidad (Figura 3.30)

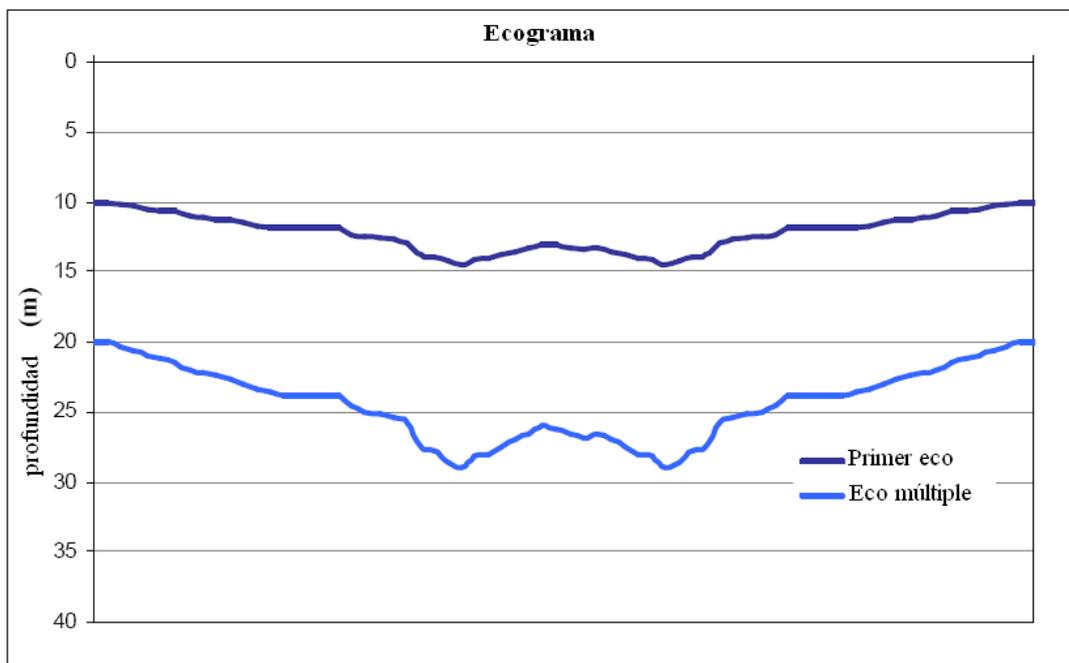


Fig. 3.30 “Grabado de ecos múltiples”

- c) **El balanceo** – es el levantado y caído oscilatorio de la nave debido al levantamiento del casco entero por la fuerza del mar. Puede ser compensado durante la adquisición de un sensor de balanceo o puede ser filtrado manualmente más adelante. La experiencia del hidrógrafo es la herramienta usada para ese propósito, aunque; es difícil algunas veces diferenciar el balanceo en un fondo marino regular.

- d) **Ecos laterales** - También son llamados ecos falsos pero ellos son el resultado de la detección del eco en los lóbulos laterales que resultan en errores de la medida de profundidad y del posicionamiento (ver 4.2)
- e) **Sedimentos no consolidados** - son detectados normalmente por las altas frecuencias de los ecosondas. En aguas poco profundas, es recomendado que dos frecuencias sean usadas al mismo tiempo para diferenciar los sedimentos suaves de la cama de rocas (Figura 3.31).

5.1.4.8 Reducción de la profundidad. Las profundidades medidas, corregidas por el comportamiento de la nave de levantamiento, son reducidas al datum vertical por la aplicación de la marea. El error de profundidad dado por la medición del error de la marea es referido como dz_{tide} .

Adicionalmente al error en la medición de la marea, un error más importante es la corrección co-marea que resulta de la diferencia de la marea actual en el área de estudio y el indicador de la marea. El error de profundidad de un error co-marea es $dz_{\text{co-tidal}}$. Esto puede ser muy significativo en algunas millas de distancia del indicador de área (ver Capítulo 4). Un modelo co-marea o de promedios de peso de dos o más indicadores de mareas puede ser requerido.

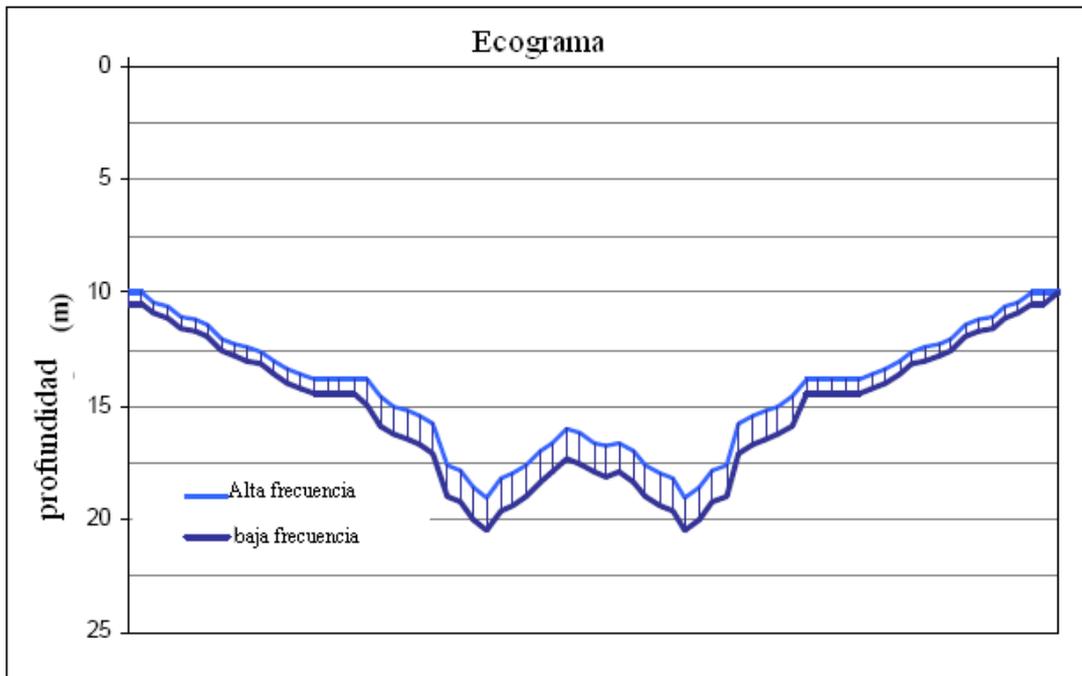


Fig. 3.31 “Grabado de dos canales”

Note que la variancia de la marea σ_{tide}^2 dada la medición del error y la variación co-marea es escrita como,

$$\sigma_{\text{tide}}^2 = \left(\sigma_{\text{tide m}}^2 + \sigma_{\text{co-tidal}}^2 \right) \quad (3.53)$$

Donde $\sigma_{\text{tide m}}^2$ es la variancia de la medición de la marea y $\sigma_{\text{co-tidal}}^2$ es el componente de la variancia co-marea.

La determinación de la marea usando el GPS-RTK (Cinemática de Tiempo Real) dará la determinación exacta de la marea local, sin embargo, el cálculo de la marea necesita de un modelo de las diferencias entre el elipsoide de referencia, el WGS84 y el datum vertical.

El control de calidad es hecho por cálculos estadísticos basados en la comparación de los sondeos desde las líneas de chequeo contra los sondeos vecinos de las líneas de levantamiento. Los resultados estadísticos de la comparación deben cumplir con las recomendaciones de exactitud en el S-44 (Fig. 3.32).

De acuerdo a los errores presentados anteriormente, la variancia de profundidad reducida estimada es escrita como sigue:

$$\sigma_z^2 = \sigma_{z_c}^2 + \sigma_{z_t}^2 + \sigma_h^2 + \sigma_i^2 + \sigma_r^2 + \sigma_{tide}^2. \quad (3.54)$$

El error estimado en la profundidad reducida, en el 68 por ciento o nivel de confianza (1σ), es obtenido por la raíz cuadrada de la ecuación 3.54. Asumiendo que los errores componentes siguen aproximadamente una distribución normal, el error estimado de la profundidad reducida, en el 95 por ciento de nivel de confianza (2σ), es obtenido al sustituir cada variancia σ^2 con $(2\sigma)^2$.

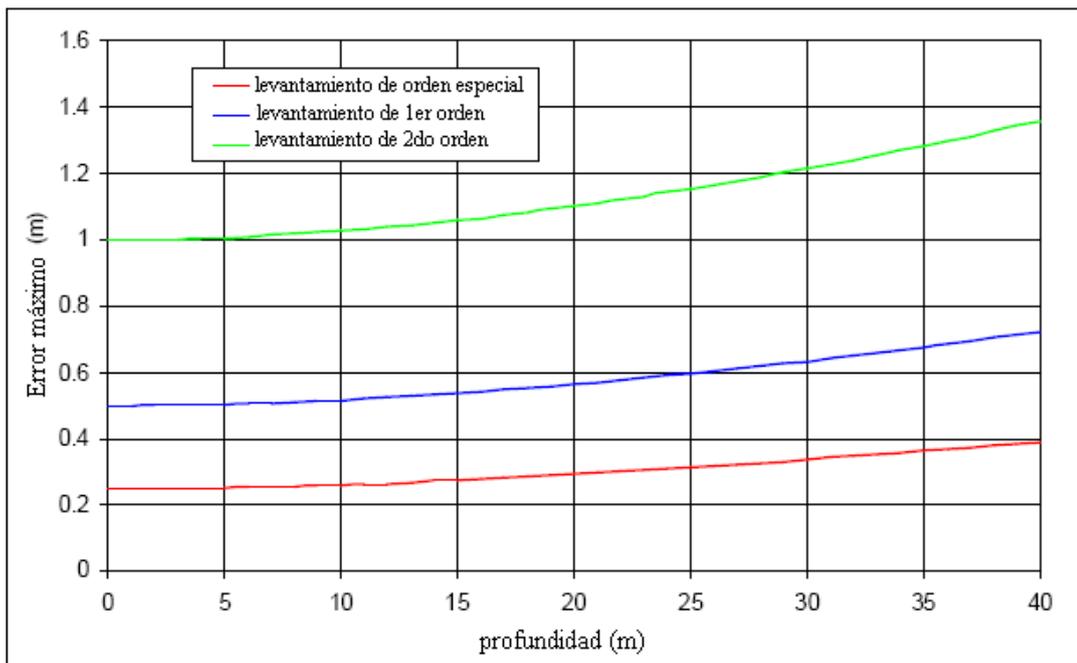


Fig. 3.32 “Requerimientos de exactitud de profundidad mínima para Orden Especial, 1er Orden y 2da Orden (S-44)”

Para cada sistema de levantamiento es recomendado que se cree un estimado de error para evaluar la conformidad con los requerimientos del S-44. La figura 3.33 representa la estimación del error para un ecosonda particular y para condiciones de operaciones particulares.

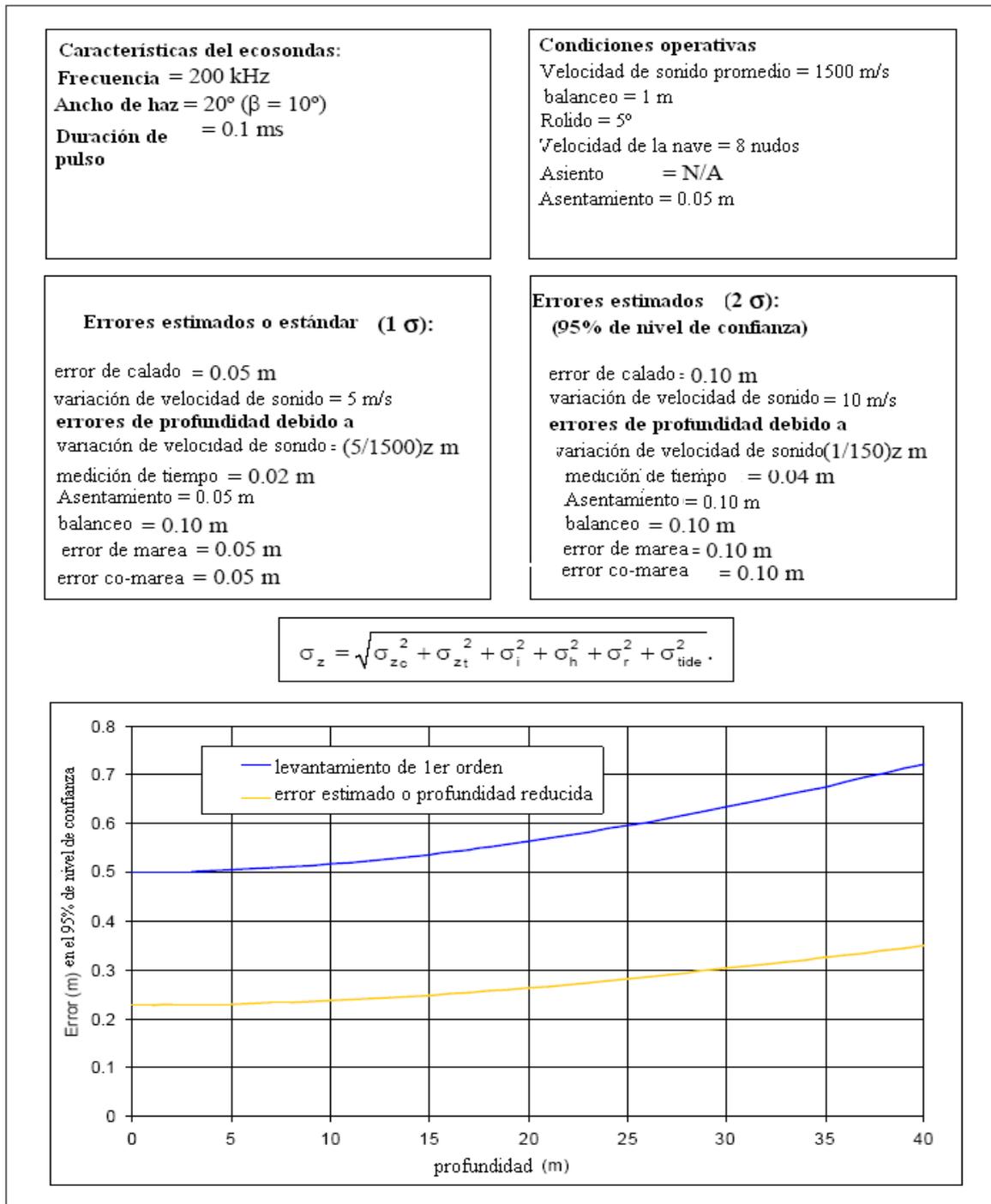


Fig. 3.33 “Estimación del error de profundidad”

5.2 Sistemas de bandas

Los sistemas de banda miden la profundidad en una línea del fondo marino extendiéndose hacia fuera del transductor sonar. Estos sistemas son arreglados de una manera que el perfil, la línea donde se realizan las mediciones, se quede en los ángulos correctos a la dirección del movimiento de la nave del levantamiento. A medida que la nave se mueve, el perfil barre una banda en la superficie del fondo marino, conocido como banda.

Esta sección describe los sistemas de multihaz y los sonares interferométricos.

5.2.1 Los sistemas de multihaz

Los MBES son una herramienta valiosa para la determinación de la profundidad cuando se necesita la cobertura total del fondo marino. Estos sistemas pueden permitir la zonificación completa del fondo marino con el consiguiente aumento de la resolución y la capacidad de detección.

5.2.1.1 Los principios de operación El principio de operación de un multihaz está, en general, basado en una transmisión de pulso en forma de ventilador dirigido hacia el fondo marino y después de la reflexión de la energía acústica por el fondo del mar; algunos haces están formados electrónicamente, usando las técnicas de procesado de señal, con los ángulos de haz conocidos. El tiempo de viaje de ambas direcciones entre la transmisión y la recepción es calculada por los algoritmos de la detección del fondo del mar. Con la aplicación del trazado de rayos (ver 5.2.1.8.1), es posible determinar la profundidad y la distancia transversal del centro de la zona sondeada.

El haz transmisor es ancho al través y angosto a lo largo; recíprocamente, los haces formados durante la recepción son angostos al través y anchos a lo largo. Las intersecciones de estos haces en el plano del fondo del mar son las huellas (áreas sondeadas) para las que las profundidades son medidas.

Ya que las profundidades son medidas desde una plataforma flotante, con seis grados posibles de libertad (tres traslaciones y tres rotaciones), para el cálculo preciso de la medida de la profundidad y su posicionamiento asociado, las mediciones exactas de latitud, longitud, balanceo, rolo, cabeceo y rumbo son requeridas.

A. La detección del fondo es el proceso usado en MBES para determinar el tiempo de llegada y la amplitud de la señal acústica, representando un reflejo del fondo del mar. La confiabilidad de este proceso afecta la calidad de las mediciones. Las equivocaciones de la profundidad pueden ser, entre otros factores, relacionadas al bajo comportamiento de los algoritmos utilizados para la detección del fondo marino. Los algoritmos de detección del fondo marino se pueden categorizar en dos divisiones principales: detección por amplitud y los algoritmos de detección por fase.

a) Detección por Amplitud. La matriz del transductor emite un pulso acústico hacia el fondo del mar y entonces empieza el período de escuchar. En esta fase, la señal de retorno es muestreada en tiempo para cada ángulo de haz. El tiempo de viaje de la señal para el punto de profundidad correspondiente es definido por la amplitud detectada de la señal refleja (figura 3.34).

Los métodos más comunes de detección de amplitud son como siguen:

i) Borde principal de las Señales Reflejadas. Este método es comúnmente utilizado cuando el ángulo de incidencia de la señal acústica al fondo marino es de aproximadamente cero grados. El tiempo de detección del fondo es definido por la primera llegada dentro del ángulo del haz.

Con el aumento del ángulo de incidencia, la señal de retorno pierde su nitidez (tiempo corto) y el método de borde principal no se comporta bien. Se pueden emplear otros dos métodos, que toman en cuenta la variación de las muestras de fuerza de la señal reflejada a través de la huella del haz.

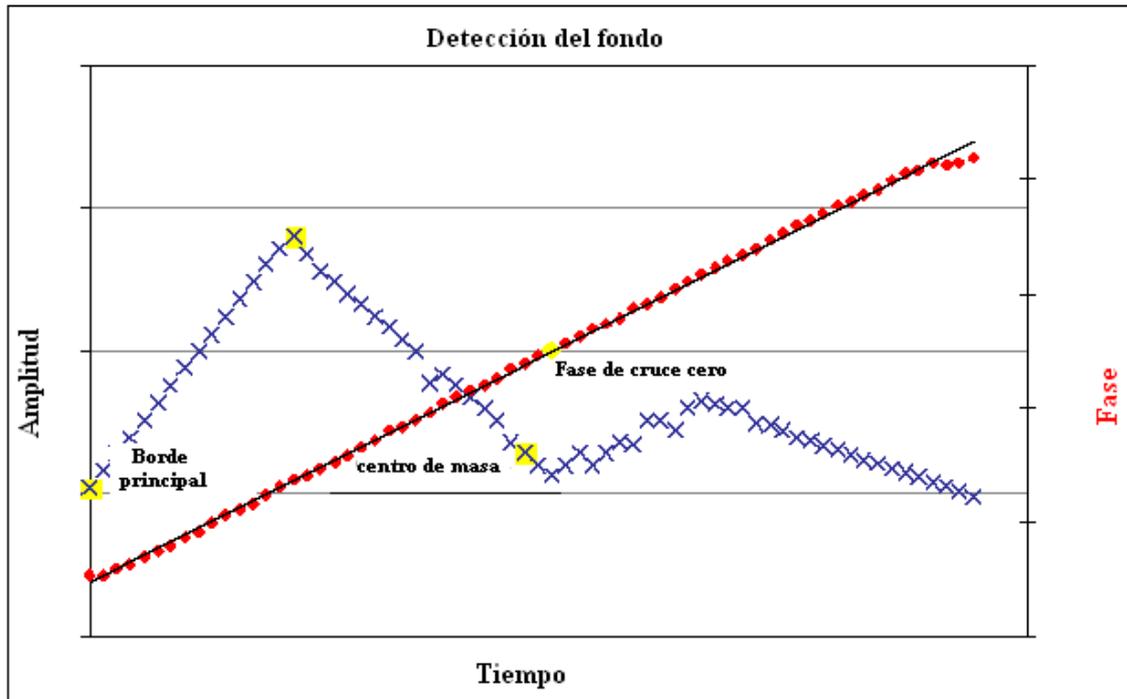


Fig. 3.34 “Métodos de detección del fondo (detección de señal)”

- ii) Amplitud máxima de la Señal Reflejada. La detección del fondo es definida por el tiempo de máxima amplitud dispersa.
 - iii) El centro de la masa de la Señal Reflejada. Este método consiste en determinar el tiempo correspondiente del centro de gravedad de la amplitud de la señal.
- b) **Detección por fase.** La detección por amplitud es la técnica usada para los haces interiores (cerca del nadir), donde la amplitud dispersa tiene valores más altos y un menor número de muestras. Para los haces exteriores, la amplitud dispersa decae y el número de muestras se vuelve muy grande. En consecuencia, el eco es tan manchado en el tiempo que los métodos de detección por amplitud obtienen pocos resultados. En contra de un fondo inclinado en dirección al través lejos del tipo, la mancha del eco es también resaltada. Entonces, el método de detección por fase es comúnmente usada para ángulos de incidencia grandes.

En esta técnica, el alineado del transductor para cada haz es dividido en dos sub alineaciones, casi siempre solapadas, con los centros de las sub alineaciones se separa un número de ondas de alcance. Las direcciones angulares están predeterminadas y cada sub alineación forma un haz en esa dirección, la ventaja es que en el caso de la llegada de ecos simultáneos de distintas direcciones, el sistema MBES resuelve sólo los ecos en la dirección del haz formado. La secuencia de diferencia de estimados de fase son usados entonces para estimar el tiempo de llegada del eco en la dirección predeterminada al encontrar el cruce cero de la secuencia de fase (de Moustier, 1993). La figura 3.35 muestra un ejemplo del método de detección de fase. El equivalente del centro de las dos sub alineaciones esta representado por A y B en una distancia ℓ de separación entre ellas, donde θ es el ángulo de la señal recibida medida desde el eje acústico. Un polinomio de segundo orden puede ser fijado a una secuencia limitada de estimados de fase diferencial para refinar la dirección de la fase de cruce cero.

Cuando la señal de retorno viene de la dirección del eje acústico, es decir $\theta = 0$, las señales en las dos sub alineaciones están en la fase, y esta corresponde al tiempo de viaje acústico.

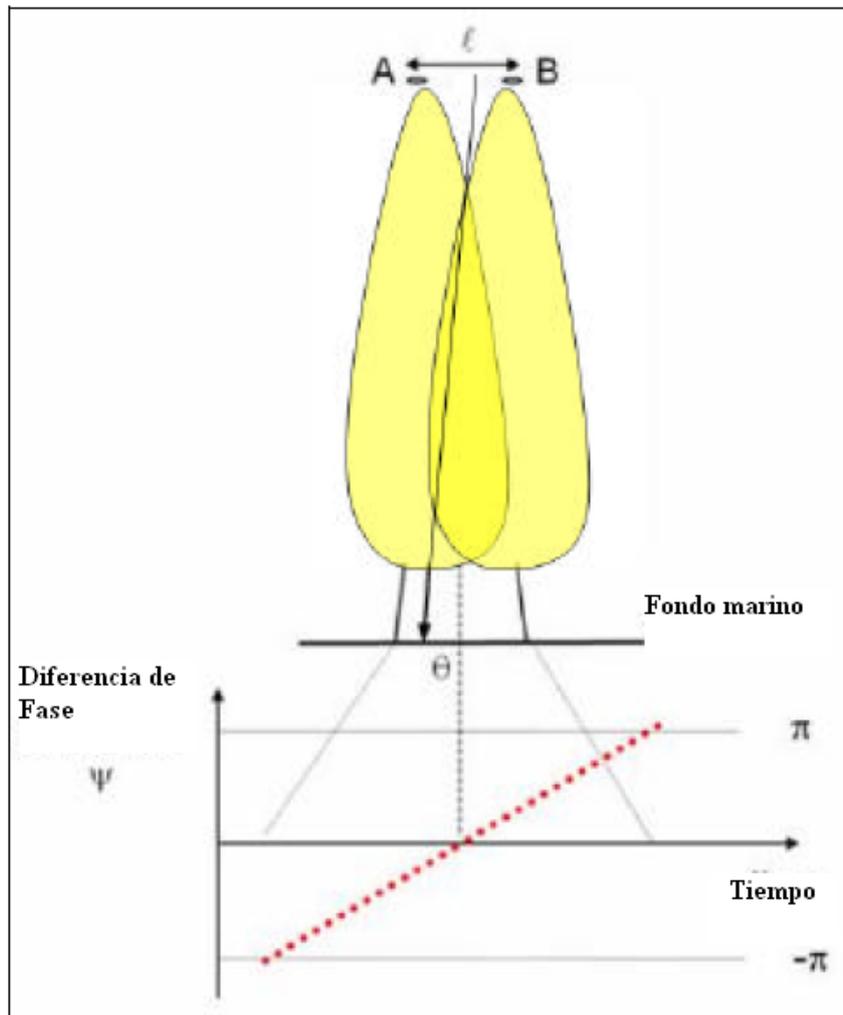


Fig. 3.35 “Métodos de detección del fondo por la diferencia de fase (fase de cruce cero)”

A través de la banda, una combinación de la amplitud y la detección de fase es usualmente requerida para la detección del fondo robusto. Cerca del nadir, la detección de la amplitud debe ser usada dado el hecho de que las series de tiempo de estos haces es muy corta para la detección de una fase robusta. La detección de la amplitud es también usada en el caso de las inclinaciones empinadas que ocurren alejadas del nadir, asociadas con las alturas batimétricas, excepto para el caso extremo de un fondo marino que esta inclinado empinadamente lejos del transductor. La detección de la fase para los haces del nadir tiende más a ser el resultado de un error (equivocación) debido a los retornos de la columna de agua media o debido a los altos retornos de los lóbulos laterales. Las detecciones lejos del nadir son mejores en la fase pero la detección de la amplitud puede ser escogida cuando un retorno más alto es causado por la diferencia de las propiedades de reflexión del objetivo, por un reflejo de un brillo cercano o por una variancia grande de la curva lograda. Estas condiciones pueden ocurrir debido a los efectos como las ruinas y los conglomerados.

B. Transformación Fourier Rápida (FFT)

De acuerdo al 4.2, durante la formación del haz las señales de cada elemento de la alineación son copiadas para cada haz. La suma de la amplitud de los N elementos del transductor es en sí misma una transformación Fourier del vector, con N elementos, correspondientes al patrón de radiación del arreglo de elementos. Si N es una fuerza de 2 el cálculo es de menor demanda y la transformación Fourier es llamada Transformación Fourier Rápida⁴⁵. Este método tiene la ventaja de acelerar el proceso de formación de haces.

Los detalles de este método están señalados en de Moustier (1993).

5.2.1.1. Exactitud. La medición del rango y del ángulo del haz para los sistemas multihaz es más compleja que para los ecosondas de haz simple. En consecuencia, hay un número de factores que contribuyen al error en esas mediciones, incluyendo: el ángulo del haz, el ángulo incidente del fondo marino, el ancho del haz de transmisión y de recepción, el comportamiento y la exactitud del balanceo, la detección de los algoritmos del fondo y el perfil de variación de la velocidad del sonido.

Es necesario usualmente calcular el error estimado basado en esos factores (ver 5.2.1.8).

5.2.1.2 Resolución. Los sistemas de multihaz con su capacidad de zonificación del total del fondo marino contribuyen a una mejor representación del fondo marino y, comparado con los SBES, a una resolución gráfica más alta. Sin embargo, hasta donde le corresponde a las mediciones de profundidad, la resolución dependerá de la frecuencia acústica, los anchos de haces de transmisión y recepción y del algoritmo usado para realizar la detección del fondo.

La resolución en la medición de la profundidad es una función de fase de longitud de las dimensiones del área sondeada. El área sondeada de los ecosondas MBES, cerca a la incidencia normal, es relativamente pequeña, entonces la resolución es más grande que la del los ecosondas de haz simple.

5.2.1.3 La frecuencia de un MBES es seleccionada en base a la intención de uso del equipo, básicamente a los rangos de profundidad y a la resolución.

Las frecuencias de los MBES son típicamente:

- | | |
|--|---------------------------------|
| a. Aguas más bajas a 100 metros: | frecuencias mayores a 200 kHz; |
| b. Aguas más bajas a 1.500 metros: | frecuencias desde 50 a 200 kHz; |
| c. Aguas más profundas a 1.500 metros: | frecuencias de 12 a 50 kHz. |

5.2.1.4 Sistema de sensores asociados e integridad

Los sistemas de multihaz, además del ecosonda como tal, incluyen:

- a) Sensor de movimiento – para el comportamiento (rolido, cabeceo y dirección) y para la medición del balanceo. Actualmente, estos sensores tienen una unidad de medición inercial (IMU) y un par de receptores GPS con sus antenas respectivas. Como un resultado de la tecnología envuelta este sensor es también capaz de proveer el posicionamiento con gran exactitud;

⁴⁵ Es posible aplicar el FFT aún cuando N no es un fuerza 2 al agregar los elementos virtuales con la amplitud cero (padded zeros), ver de Moustier [1993].

- b) Perfilador de velocidad de sonido – para medir la velocidad del sonido a través de la columna de agua;
- c) Sonda de velocidad de sonido – para medir la velocidad del sonido a la cara del transductor. Este debe ser considerado obligatorio para alineaciones planas donde la dirección del haz es requerida;
- d) Sistema de posicionamiento – como se dijo anteriormente, el posicionamiento en los nuevos sistemas de tecnología está integrado con sensores de movimiento. El GPS en modo seudo diferencial p en Cinemática de Tiempo Real (RTK) es el sistema comúnmente utilizado en el mundo entero;
- e) El sensor del rumbo – también integrado en los sensores de movimiento, la solución óptima y más exacta es el rumbo obtenido por los receptores duales GPS.

5.2.1.5 Instalación y Calibración (patch test)

La instalación de los transductores de multihaz puede ser fijada en el casco, a un lado o sobre la proa. La instalación en el casco es usada en embarcaciones grandes o cuando es una instalación permanente, las otras instalaciones son usadas para propósitos temporales a corto plazo en naves pequeñas.

La calibración o prueba de retazos es un procedimiento esencial que consiste en determinar los ángulos compuestos (rolido, cabeceo y acimut) para el transductor y para el sensor de movimiento y la latencia del sistema de posicionamiento. Un análisis detallado y los procedimientos pueden encontrarse en Goldin (1996).

La calibración debe realizarse después de la instalación y después de largos períodos de inoperabilidad o después de cambios apreciables en la instalación.

Antes de la calibración es necesario chequear la instalación de los parámetros y hacer un perfil de velocidad de sonido para actualizar el cálculo de la solución de reflejo.

a) Posicionamiento con retardo de tiempo

El retardo de tiempo o latencia es el tiempo destacado entre la medición de la profundidad y el posicionamiento. El procedimiento para determinar el tiempo destacado consiste en correr dos pares de líneas de levantamiento a diferentes velocidades sobre un fondo marino inclinado, a medida que la gradiente es más empinada será más alta la resolución del parámetro. La inclinación debe ser regular y con suficiente extensión para garantizar el muestreo adecuado. La figura 3.36 ilustra la calibración con retardo de tiempo.

El retardo de tiempo es obtenido al medir el desplazamiento longitudinal de las sondas a lo largo de la inclinación debido a las diferentes velocidades de la nave. Para evitar cualquier influencia del cabeceo destacado las líneas deben ser corridas en el mismo curso.

El retardo de tiempo, δt , puede ser obtenido por la ecuación:

$$\delta t = \frac{\Delta x}{v_2 - v_1} \quad (3.55)$$

Donde Δx es la separación horizontal entre los dos perfiles de sonido cerca al nadir, y v_1 y v_2 son las velocidades de la nave para la línea 1 y 2, respectivamente.

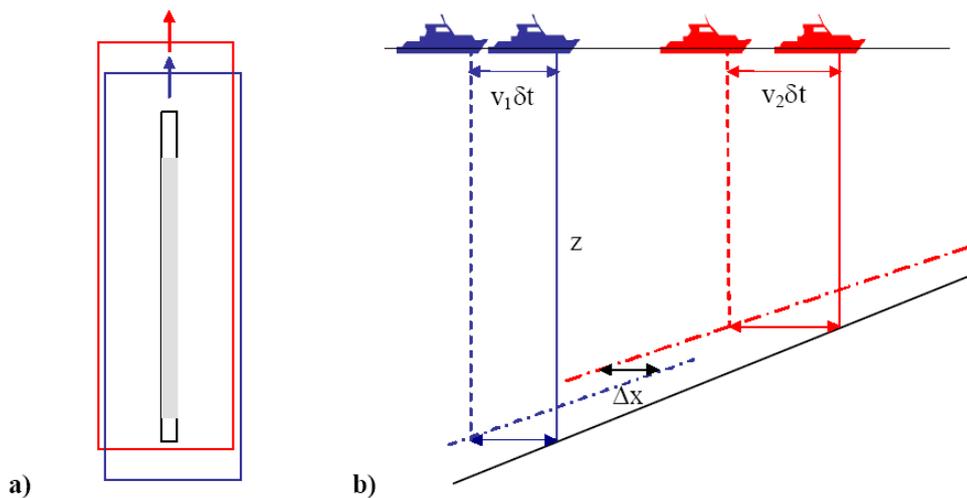


Fig. 3.36 “Calibración de retraso de tiempo

- a) Vista desde arriba de las dos líneas;
 b) Sección longitudinal donde la separación de los dos perfiles de sonido del fondo marino actual es visible.”

b) Desfase por Cabeceo

El desfase por cabeceo es el ángulo compuesto destacado de la unidad de medición inercial y desde la alineación del transductor con el vertical local en el plano longitudinal de la nave. El procedimiento para determinar el cabeceo destacado consiste en correr dos pares de líneas de medición recíprocas a la misma velocidad sobre un fondo marino inclinado, como se mencionó en la calibración de retardo de tiempo, a medida que la gradiente es más pendiente más alta será la resolución de este parámetro. La inclinación debe ser regular y con la suficiente extensión para garantizar el muestreo adecuado. La figura 3.37 muestra la calibración del cabeceo destacado.

Luego de la determinación correcta del retardo de tiempo, el cabeceo destacado es obtenido al medir el desplazamiento longitudinal de los sonidos a lo largo de la inclinación debido al cabeceo destacado. Para evitar cualquier influencia del retardo de tiempo el sistema debe estar compensado para latencia de posicionamiento.

El cabeceo destacado, $\delta\theta_p$, puede ser obtenido por la ecuación:

$$\delta\theta_p = \tan^{-1}\left(\frac{\Delta x}{2 \cdot z}\right) \quad (3.56)$$

Cuando Δx sea el desfase aparente de una sonda en el recorrido de la misma línea de levantamiento en direcciones recíprocas.

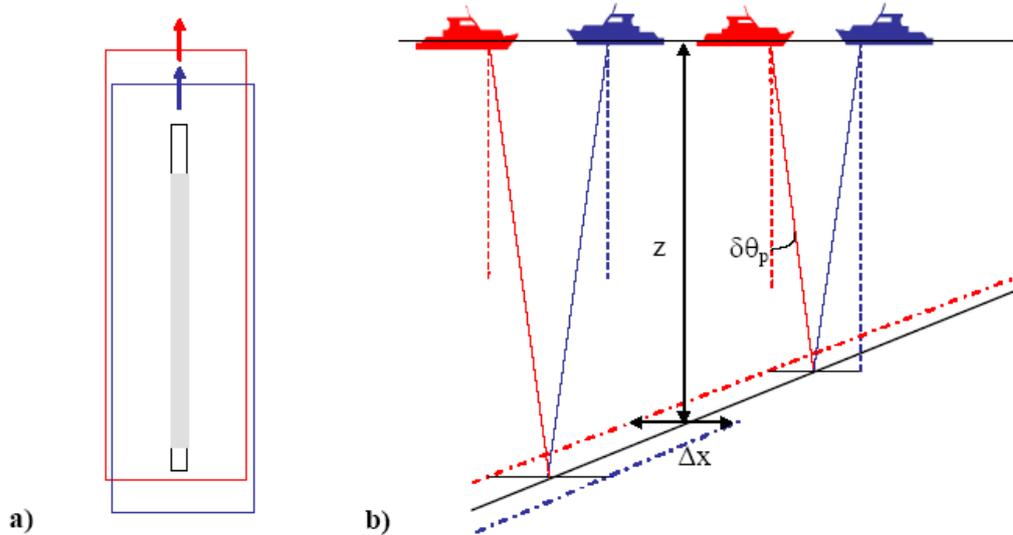


Fig. 3.37 “Calibración del cabeceo destacado.

- a) Vista desde arriba de las dos líneas;
 b) Sección longitudinal donde la separación de los dos perfiles de sonido del fondo marino actual es visible debido al cabeceo destacado.”

c) Desfase Acimutal

El desfase acimutal es el ángulo compuesto destacado desde el sensor del rumbo y desde la alineación perpendicular del transductor al eje longitudinal de la nave. El procedimiento para determinar el acimutal destacado consiste en correr dos pares adyacentes de líneas recíprocas, a la misma velocidad, en un área con un perfil batimétrico bien definido como en un banco. Las líneas adyacentes deben solaparse (no más de 20% del ancho de la banda) en los haces externos en la posición del efecto batimétrico. La figura 3.38 muestra la calibración acimutal destacada.

Luego de la correcta determinación de retardo de tiempo y del cabeceo destacado, el acimutal destacado es obtenido al medir el desplazamiento longitudinal del efecto batimétrico de las líneas adyacentes. Para evitar cualquier influencia del retardo de tiempo y del cabeceo destacado el sistema debe estar compensado para estos destacados.

El acimutal destacado, $\delta\alpha$, puede ser obtenido de la ecuación:

$$\delta\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{\Delta x}{\Delta L}\right) \quad (3.57)$$

Donde Δx es la separación horizontal desde el efecto batimétrico de las líneas recíprocas adyacentes y ΔL es la distancia entre las líneas.

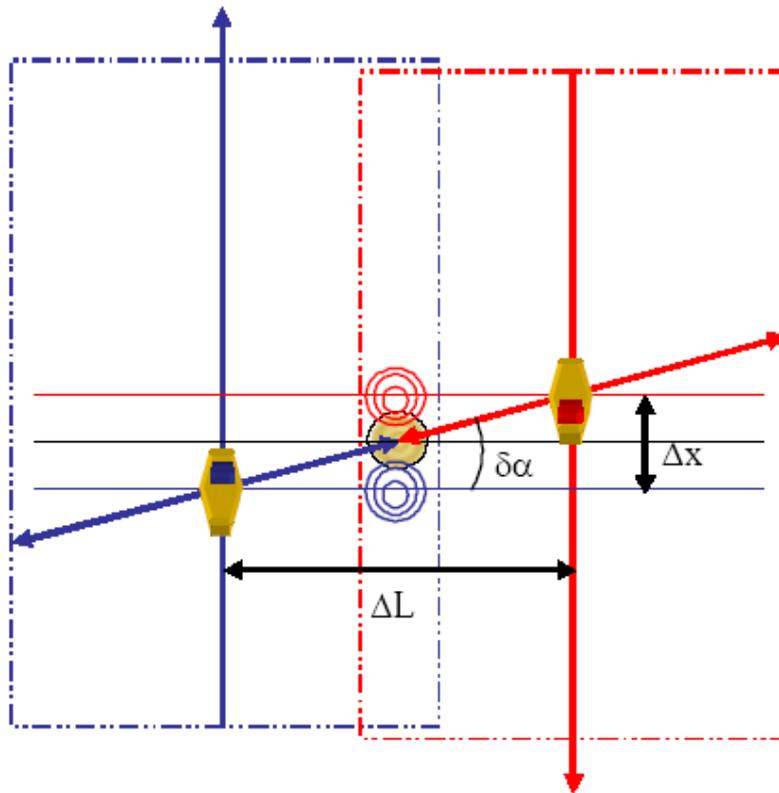


Fig. 3.38 “Calibración acimutal destacado”

d) Desfase por Rolido

El desfase por rolido es el ángulo fuera de línea compuesto de la unidad de medición inercial y de la alineación del transductor con el vertical local en el plano transversal de la nave. El procedimiento para determinar el rolido destacado consiste en correr un par de líneas de levantamiento recíprocas, a la misma velocidad, en un fondo marino plano regular. Las líneas deben solaparse entre ellas. La figura 3.39 muestra la calibración del rolido destacado.

Después de la correcta determinación de retardo de tiempo y del cabeceo y el acimutal destacado, el rolido destacado es obtenido al medir el desplazamiento longitudinal de los haces externos desde las líneas recíprocas. Para evitar cualquier influencia del retardo de tiempo y del cabeceo y del acimutal destacado el sistema debe estar compensado para estos destacados.

El rolido destacado, $\delta\theta_R$, puede ser obtenido por la ecuación:

$$\delta\theta_R = \tan^{-1}\left(\frac{\Delta z}{2 \cdot \Delta y}\right) \quad (3.58)$$

Donde Δz es el desplazamiento vertical entre los haces externos y desde las líneas recíprocas y Δy es la mitad del ancho de la banda o la distancia desde el nadir al punto donde el desplazamiento vertical es medido.

La calibración es hecha usualmente por medio de herramientas interactivas. El ajuste o el cálculo fuera de línea debe ser hecho en varias secciones de muestra para obtener un promedio. Los destacados pueden tener una incertidumbre en el orden de la capacidad de repetición del sensor de movimiento.

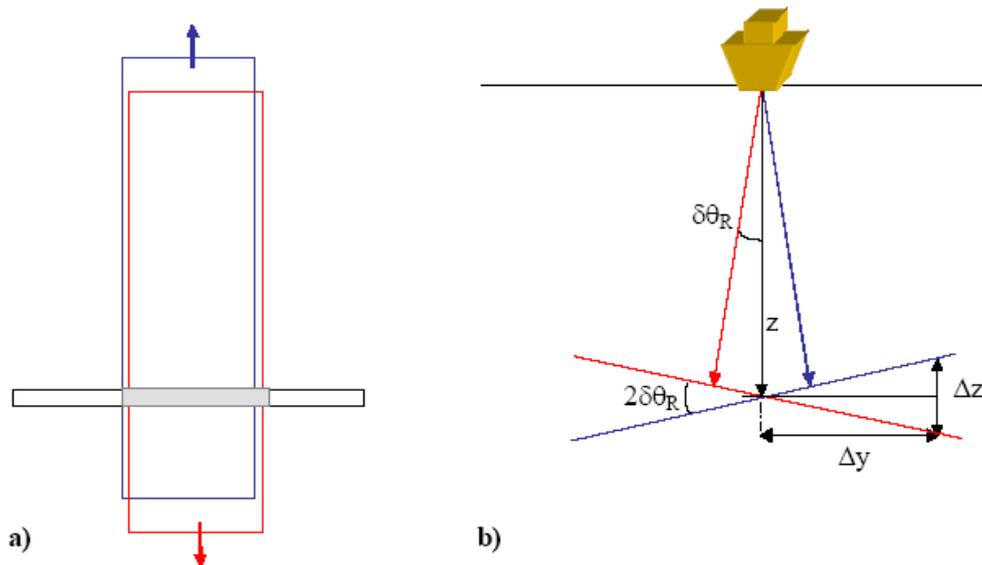


Fig. 3.39 “Calibración del Rolido destacado.

- a) **Vista desde arriba de las líneas recíprocas;**
- b) **Sección de cruce donde la separación pronunciada de los perfiles de sonido desde el nadir a los haces externos debido al rolido destacado son visibles.”**

5.2.1.7 Operación y grabado de la datos

La configuración de la nave y los parámetros de calibración deben ser chequeados al comienzo del levantamiento. Algunos parámetros del sistema deben ser también chequeados. Estos son principalmente los parámetros usados durante la recolección de datos y pueden variar con cada ubicación de levantamiento (ej. En la profundidad de operación máxima, la profundidad esperada, la tasa máxima de impulso, etc.)

Al principio del levantamiento un perfil de velocidad de sonido debe ser hecho y transferido al ecosonda que se va a usar, generalmente en tiempo real. La velocidad del sonido en la cara del transductor debe ser comparada con el valor dado por el sensor de prueba de la velocidad de sonido. Durante la sesión de levantamiento se deben hacer varias pruebas de perfil de sonido de acuerdo al preanálisis de la variación temporal y espacial de la velocidad de sonido.

Mientras se esté haciendo el levantamiento, los sistemas son casi completamente automáticos, el hidrógrafo debe, sin embargo, monitorear la recolección de los datos y la integridad de los mismos. El sondeo total del fondo marino y el solapamiento con las bandas adyacentes debe ser garantizado y monitoreado. Es más importante comparar el solapamiento de los haces externos de las bandas adyacentes y descartar cualquier tendencia a curvatura hacia arriba o hacia debajo de cada impulso.

Al final de cada sesión de levantamiento es altamente recomendado que se cree un respaldo de los datos recolectados.

5.2.1.8 Tipos de error y técnicas de control de calidad

Los tipos de error fueron discutidos en 5.1. 4 pero fueron para los SBES. De aquí en adelante los errores son analizados para MBES, algunos errores son comunes para ambos sistemas, es decir, no varían con el ángulo del haz. Por esta razón algunos de los errores están referidos al punto 5.1.4.

Más detalles en cuanto a la incertidumbre del multihaz pueden ser encontrados en Hare (1995) y en Lurton (2002).

5.2.1.8.1 Debido a la velocidad del sonido. Los errores en la velocidad del sonido o en su variación resultan en soluciones de refracción incorrectas y, en consecuencia, a errores en la medición de la profundidad y en el posicionamiento.

El trazado del rayo⁴⁶ está basado en la ley de Snell que sostiene la relación entre la dirección del rayo y la velocidad de la onda acústica:

$$\frac{\sin\theta_0}{c_0} = \dots = \frac{\sin\theta_i}{c_i} = \kappa \quad (3.59)$$

Donde c_i es la velocidad del sonido θ_i es el ángulo de incidencia referido al vertical en la profundidad z_i , y κ es el parámetro del rayo o la constante Snell.

Asumiendo que el perfil de la velocidad del sonido es discreta (Fig. 3.40), es razonable asumir que la gradiente de la velocidad del sonido en una capa, entre dos mediciones, es constante. Por lo tanto la velocidad de sonido se representa como sigue:

$$c_i(z) = c_{i-1} + g_i(z - z_{i-1}), \quad \text{for } z_{i-1} \leq z \leq z_i \quad (3.60)$$

Donde g_i es la gradiente constante en la capa i , dada por:

$$g_i = \frac{c_i - c_{i-1}}{z_i - z_{i-1}} \quad (3.61)$$

En cada capa el pulso acústico viaja un camino con un radio de curvatura constante, ρ_i , dado por:

$$\rho_i = -\frac{1}{\kappa g_i} \quad (3.62)$$

⁴⁶ El rayo acústico corresponde a la línea dibujada desde la fuente, cada punto es perpendicular al frente de la onda.

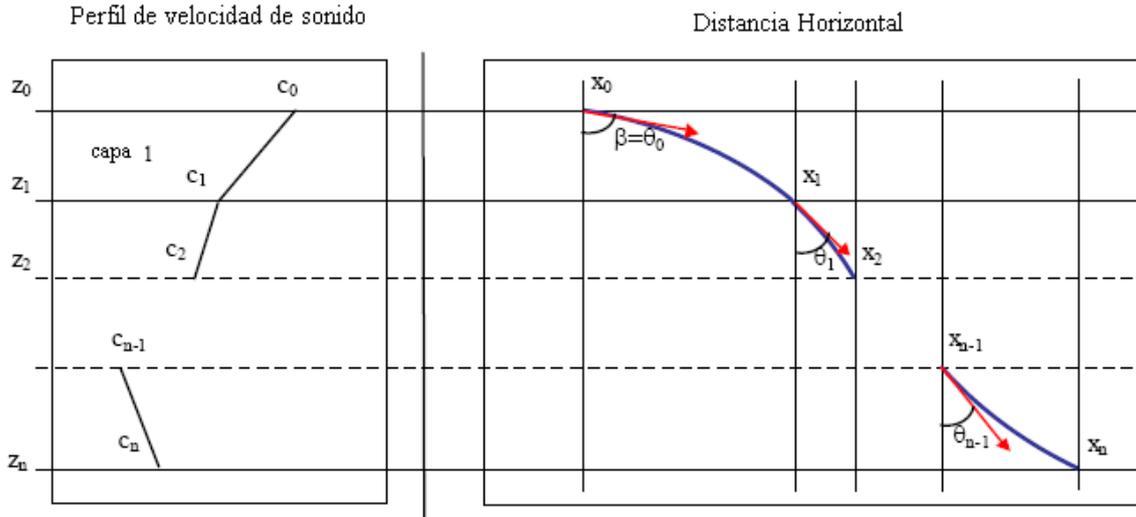


Fig. 3.40 “Trazado de rayo”

Considerando el ángulo de lanzamiento θ_0 (or β) en una profundidad con velocidad de sonido c_0 , la distancia horizontal viajada por el pulso acústico para atravesar la capa i es:

$$\Delta x_i = \rho_i (\cos \theta_i - \cos \theta_{i-1}) = \frac{\cos \theta_{i-1} - \cos \theta_i}{\kappa g_i} \quad (3.63)$$

El reemplazo de $\cos(\theta_i)$ por $\sqrt{1 - (\kappa c_i)^2}$ produce:

$$\Delta x_i = \frac{\sqrt{1 - (\kappa c_{i-1})^2} - \sqrt{1 - (\kappa c_i)^2}}{\kappa g_i} \quad (3.64)$$

El tiempo de viaje del pulso acústico en la capa i , es obtenido por:

$$\Delta t_i = \frac{1}{g_i} \int_{c_{i-1}}^{c_i} \frac{dc}{c \cdot \cos(\theta)} \quad (3.65)$$

Que puede ser escrito como:

$$\Delta t_i = \frac{1}{g_i} \ln \left(\frac{c_i}{c_{i-1}} \frac{1 + \sqrt{1 - (\kappa c_{i-1})^2}}{1 + \sqrt{1 - (\kappa c_i)^2}} \right) \quad (3.66)$$

Para obtener la distancia horizontal total viajada por la señal acústica y el tiempo de viaje, es necesario sumar las distancias Δx_i y los tiempos Δt_i desde el transductor al fondo marino,

$$x = \sum_{i=1}^n \frac{[1 - (\kappa c_{i-1})^2]^{1/2} - [1 - (\kappa c_i)^2]^{1/2}}{\kappa g_i} \quad (3.67)$$

$$t = \sum_{i=1}^n \frac{1}{g_i} \ln \left(\frac{c_i}{c_{i-1}} \frac{1 + \sqrt{1 - (\kappa c_{i-1})^2}}{1 + \sqrt{1 - (\kappa c_i)^2}} \right) \quad (3.68)$$

La determinación de la profundidad y del posicionamiento de sonido es el resultado de la integración del eco a lo largo de cada dirección. Fijado por el ángulo de punta del haz, usando el perfil de la velocidad de sonido actualizado entre la transmisión y el tiempo de viaje de una dirección ($\Delta t/2$).

Tomado un perfil de velocidad de sonido con una gradiente constante, \mathbf{g} , la profundidad es obtenida como:

$$z = \int_0^{\Delta t/2} (c_0 + \mathbf{g} \cdot z) \cdot \cos(\theta) dt \quad (3.69)$$

El error de profundidad, \mathbf{dz}_c , dada la variación del gradiente, \mathbf{dg} , y la variación de la velocidad de sonido en la superficie, \mathbf{dc}_0 , por diferenciación de la ecuación 3.69 puede ser aproximada por:

$$dz_c = \frac{z^2}{2c_0} (1 - \tan^2(\beta)) dg + \frac{z}{c_0} dc_0 \quad (3.70)$$

Donde β y c_0 son, respectivamente, el ángulo puntero del haz y la velocidad de sonido desde el perfil de velocidad de sonido en la cara del transductor. En la ecuación 3.70 el primer término corresponde al error de rango y al error de doblez debido a la variación del perfil de la gradiente, mientras que el segundo término corresponde al error de profundidad debido al perfil fuera de línea de la velocidad de sonido en la profundidad del transductor. Asumiendo que no hay correlación de estos errores, la variancia de profundidad dada por los errores de la velocidad de sonido es escrita como:

$$\sigma_{z_{c_profile}}^2 = \left(\frac{z^2}{2c_0} \right)^2 (1 - \tan^2(\beta))^2 \sigma_g^2 + \left(\frac{z}{c_0} \right)^2 \sigma_{c_0}^2 \quad (3.71)$$

Donde σ_g^2 corresponde a la variancia de la gradiente del perfil de la velocidad de sonido y $\sigma_{c_0}^2$ corresponde a la variancia del valor inicial del perfil de velocidad de sonido usado para el cálculo de la profundidad.

Los errores de la velocidad de sonido son, en la práctica, difíciles de cuantificar y los problemas con las vibraciones temporales y espaciales pueden algunas veces ser tan importantes que la única solución práctica es limitar la cobertura angular del multihaz.

Existe otro componente de error debido al error de la velocidad de sonido o a la variación en la cara del transductor; este componente introduce un error en el ángulo puntero del haz que también introduce errores en la medición y posicionamiento de la profundidad.

Para la dirección del haz o la estabilización, es necesario introducir retardos de tiempo en los elementos del transductor (4.2). Para calcular los retrasos es necesario conocer la

velocidad de sonido en el calado del transductor, esto es normalmente logrado con un sensor de velocidad de sonido instalado cerca del transductor. Cualquier error en la velocidad del sonido en la cara del transductor será propagado como un error en el ángulo puntero del haz (Fig, 3.41).

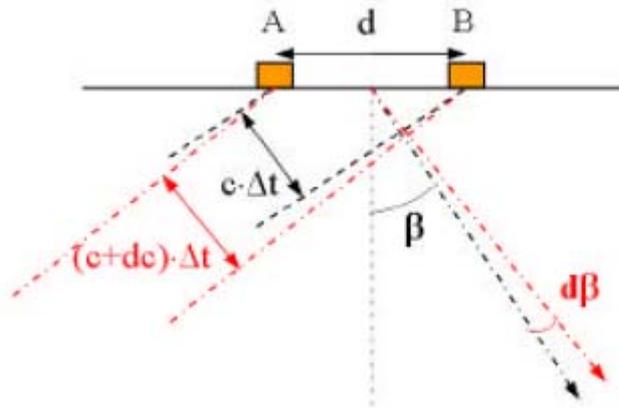


Fig. 3.41 “El error de la dirección del haz a causa de a la variación de la velocidad del sonido”

El retardo de tiempo para direccional el ángulo del haz β , es obtenido por:

$$\Delta t = \frac{d}{c_0} \sin(\beta) \quad (3.72)$$

Por lo que:

$$\beta = \text{asin}\left(\frac{c_0 \cdot \Delta t}{d}\right) \quad (3.73)$$

Por la diferenciación y la apropiada simplificación nos da:

$$d\beta = \frac{\tan(\beta)}{c_0} dc_0 \quad (3.74)$$

El error de la dirección del haz se propaga a un error en la profundidad, dada por:

$$dz_\beta = -\frac{z}{c_0} \cdot \tan^2(\beta) dc_0 \quad (3.75)$$

La variancia de la profundidad dada por la dirección del haz es entonces:

$$\sigma_{z_\beta}^2 = \left(\frac{z}{c_0}\right)^2 \tan^4(\beta) \sigma_{c_0}^2 \quad (3.76)$$

Donde σ_{c_0} corresponde a la variancia de la velocidad del sonido usado para la dirección del haz, usualmente obtenido por el sensor de la velocidad del sonido.

Note que el total estimado de la variancia de profundidad debido a los errores de la velocidad del sonido está escrito como:

$$\sigma_{z_c}^2 = \sigma_{z_c_profile}^2 + \sigma_{z\beta}^2 \quad (3.77)$$

Los errores mencionados anteriormente pueden ser detectados por la inspección visual de la datos al tratar de detectar la curvatura anormal de los perfiles (grupo de haces).

5.2.1.8.2 Debido al sensor de movimiento la medición de profundidad es dependiente del error de cabeceo y del error de rolo, la contribución dada es como sigue:

$$dz_{\theta_R} = R \cdot \cos(\theta_p) \cdot \sin(\beta - \theta_R) d\theta_R \quad (3.78)$$

y:

$$dz_{\theta_p} = R \cdot \sin(\theta_p) \cdot \cos(\beta - \theta_R) d\theta_p \quad (3.79)$$

Las variancias de profundidad son respectivamente:

$$\sigma_{z\theta_R}^2 = (z \cdot \cos(\theta_p) \cdot \tan(\beta - \theta_R))^2 \sigma_{\theta_R}^2 \quad (3.80)$$

y:

$$\sigma_{z\theta_p}^2 = (z \cdot \sin(\theta_p))^2 \sigma_{\theta_p}^2 \quad (3.81)$$

La variancia total de profundidad dada por el comportamiento de la nave y el balanceo es:

$$\sigma_{z\text{motion}}^2 = \sigma_{z\theta_R}^2 + \sigma_{z\theta_p}^2 + \sigma_h^2 \quad (3.82)$$

Donde σ_h^2 es la variancia del balanceo.

5.2.1.8.3 Debido al calado, asiento, asentamiento y posición relativa del transductor. La correcta medida del calado del transductor y el conocimiento del comportamiento de la nave en condiciones dinámicas, asiento y asentamiento, son fundamentales para la exactitud de las profundidades medidas. Estos errores contribuirán al error de profundidad independiente del ángulo del haz.

La variancia total de profundidad debida a la inmersión del transductor, ver 5.1.4.5, está escrita como:

$$\sigma_i^2 = \sigma_{draught}^2 + \sigma_{settlement}^2 + \sigma_{squat}^2 \quad (3.83)$$

Donde $\sigma_{draught}^2$ es la variancia del calado, $\sigma_{settlement}^2$ es la variancia del asiento, y σ_{squat}^2 es la variancia del asentamiento.

5.2.1.8.4 La reducción de la profundidad. Esto ya fue discutido anteriormente en el punto 5.1.4.8.

La QC puede ser hecha por cálculos estadísticos basados en las comparaciones de los sonidos desde las líneas chequeadas con la superficie batimétrica generada desde las principales líneas de levantamiento. Las estadísticas generadas por la comparación deben cumplir con las recomendaciones de exactitud del S-44.

De acuerdo a los errores presentados anteriormente, la variancia de profundidad reducida estimada está escrita como sigue:

$$\sigma_z^2 = \sigma_{zc}^2 + \sigma_{h\text{motion}}^2 + \sigma_i^2 + \sigma_{\text{tide}}^2 + \sigma_{z\text{detection}}^2 \quad (3.84)$$

Donde “ $\sigma_{z\text{detección}}^2$ ” corresponde a la variancia de profundidad debido al algoritmo de detección del fondo marino implementado en el sistema MBES (Lurton, 2002).

El error estimado en la profundidad reducida, en el 68% (o 1σ) de nivel de confianza, es obtenido por la ecuación de raíz cuadrada 3.84. Asumiendo que el componente de errores sigue aproximadamente una distribución normal, el error estimado de la profundidad reducida, en el 95% (o 2σ) de nivel de confianza, es obtenido al sustituir cada variancia σ^2 by $(2\sigma)^2$.

5.2.2 Sonares interferométricos

5.2.2.1 Los sistemas de sonares interferométricos aplican la fase de contenido de la señal del sonar para medir el ángulo del frente de la onda desde el fondo marino o desde un objetivo. Este principio difiere del MBES que forma un grupo de haces receptores y desempeña la detección del fondo marino para cada haz, con amplitud o con la fase. Para detectar la señal de retorno a través de la banda (Hughes Clarke, 2000).

Estos sonares tienen dos o más alineaciones horizontales, cada alineación produce un haz que es angosto a lo largo y ancho al través. Una de estas alineaciones es usada para la transmisión, el sondeo de un sector del fondo marino, dispersando energía acústica en todas las direcciones. Parte de la energía dispersa regresará hacia el transductor, que mide el ángulo hecho con los transductores. El rango es también calculado desde el tiempo observado en las dos direcciones.

El método usado para la medición del ángulo puede ser diverso. El método más simple es el de agregar a la señal copiada desde las dos alineaciones juntas, siendo la amplitud resultante “franjas”, correspondiente a las variaciones en la fuerza de la señal. Si las alineaciones del transductor son separadas por la mitad de la longitud de una onda, habrá sólo una franja, siendo la dirección de la fase cero perpendicular al eje de alineación del transductor y la dirección puede ser determinada sin ambigüedad. Si las alineaciones del transductor están separadas por varias longitudes de onda, el ángulo de la onda detectada puede ser derivada de las direcciones donde la máxima (o la mínima) de las señales recibidas ocurren (fig. 3.42). Sin embargo, este método, cuando es usado por separado, produce sólo unas pocas mediciones. Al usar la gradiente de las franjas para producir más mediciones extiende este método.

5.2.2.2 Sonares de expectativa los sonares de apertura horizontal son usados para detectar obstrucciones futuras de la nave al realizar barridos mecánicos o electrónicos en el plano horizontal. Estos sistemas son apropiados especialmente para la detección de obstrucciones en áreas sin estudio o con malos estudios.

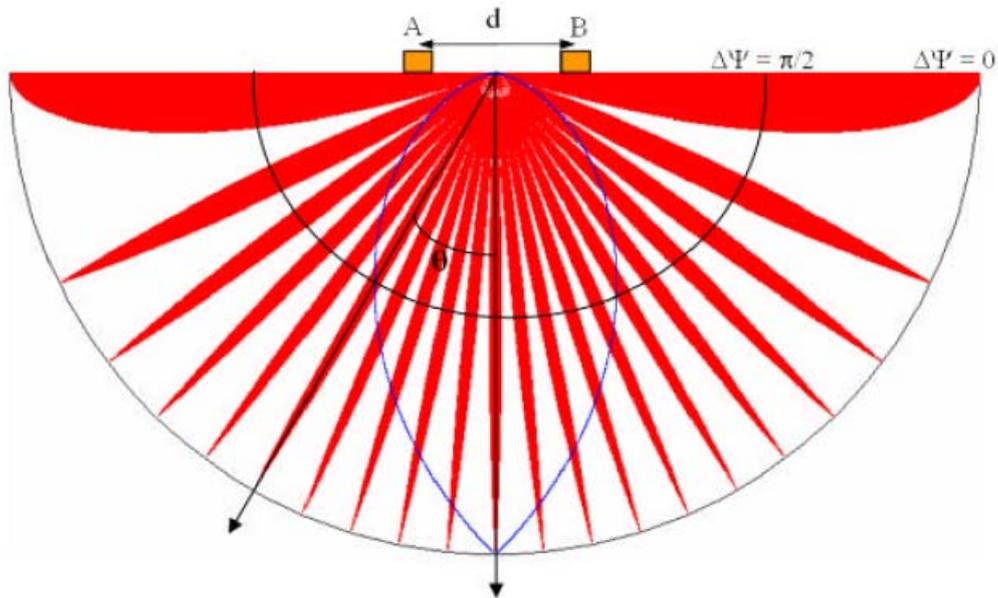


Fig. 3.42 “El patrón resultante de la interferencia, constructiva o destructiva, de señales recibidas en dos alineaciones, separadas por una distancia (d) 10 veces la longitud de la onda acústica (roja) y media longitud de onda (azul)”

6. SISTEMAS NO ACÚSTICOS

Adicionalmente a los sistemas acústicos, presentados en secciones anteriores, hay algunos sistemas electromagnéticos que pueden ser usados para la determinación de la profundidad, como el láser aerotransportado y los sistemas de inducción electromagnética, así como la determinación de la profundidad derivada de la altimetría del satélite. Estos sistemas y los métodos mecánicos tradicionales para la medición de la profundidad y para el barrido están descritos a continuación.

6.1 Sistemas Láser Aerotransportados

Los sistemas láser⁴⁷ ofrecen una alternativa y un complemento a los levantamientos con los sistemas acústicos en aguas poco profundas (Guenther et al., 1996).

Un sistema láser está compuesto por un sistema de barrido láser, un sistema de posicionamiento global (GPS) y una unidad interna de medición (IMU).

6.1.1 Principios de operación

El sondeo láser aerotransportado hidrográfico, LIDAR (Light Detection And Ranking), es un sistema para medir la profundidad del agua. El sistema emite pulsos láser, en dos frecuencias (azul-verde e infrarroja), en un patrón de arco a través del rumbo de vuelo de la plataforma aerotransportada; graba las señales de llegada del pulso de luz reflejadas por la superficie del mar y por el fondo del mar (figura 3.43) la diferencia del tiempo medido, entre los dos retornos, es convertida en distancia.

⁴⁷ Láser es el acrónimo de Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation. El láser básicamente consiste de un diodo que emite una fuente de luz en una frecuencia específica.

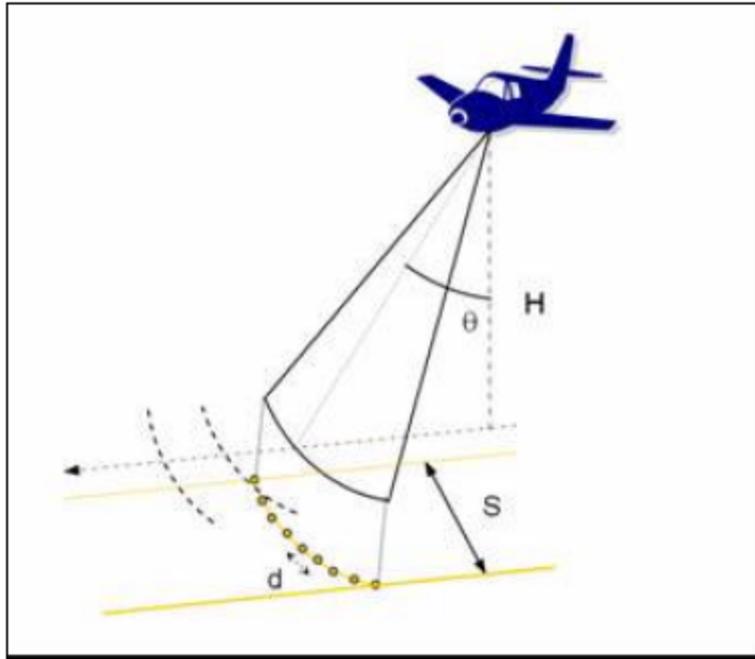


Fig. 3.43 “Geometría de las mediciones Lidar”

La propagación de la luz a través del agua de mar, como la propagación de la energía acústica, depende de la temperatura, presión y la salinidad. El agua de mar es, hasta cierto punto, transparente a la luz. En condiciones ideales, ningún material en suspensión, la atenuación es una función de la absorción y del esparcido.

La transparencia del agua de mar en las regiones infrarrojas y ópticas del espectro electromagnético es una función de cantidad del material suspendido en el agua. Por lo tanto, la transparencia del agua⁴⁸ es una limitante al uso de sistemas de sondeo láser. La operación Lidar de máxima profundidad es de 2 a 3 veces la profundidad del disco Secchi⁴⁹ observado.

Un pulso de luz de dos frecuencias diferentes es transmitido en la dirección del mar; parte de la energía del haz infrarrojo es reflejada en la superficie del mar hacia atrás de la nave, el haz láser azul-verde es transmitido al agua y parcialmente reflejado en el fondo marino, también para ser detectado por el receptor. Usando el tiempo exacto, la distancia del fondo marino puede ser medida conociendo la velocidad de la luz en el agua. El cálculo de la profundidad requiere, adicionalmente, el conocimiento de la geometría de mediciones de acuerdo a la ley de Snell (figura 3.44).

$$\frac{\sin\theta_a}{c_a} = \frac{\sin\theta_w}{c_w} \quad (3.85)$$

Donde θ_a y θ_w son los ángulos de incidencia en el aire y en el agua y c_a y c_w las correspondientes velocidades de luz en el aire y en el agua.

⁴⁸ La transparencia del agua de mar, es decir, la transmisión de la luz visible a través del agua, puede ser medida cuantitativamente por la profundidad determinante del disco de Secchi.

⁴⁹ El disco Secchi es un aparato sencillo para medir la transparencia del agua. El disco es un plato blanco de aproximadamente 30 cm de diámetro, asegurado horizontalmente del extremo de una cuerda marcada en metros. El disco es bajado en el agua del mar y la profundidad en la que se pierde de vista es anotada.

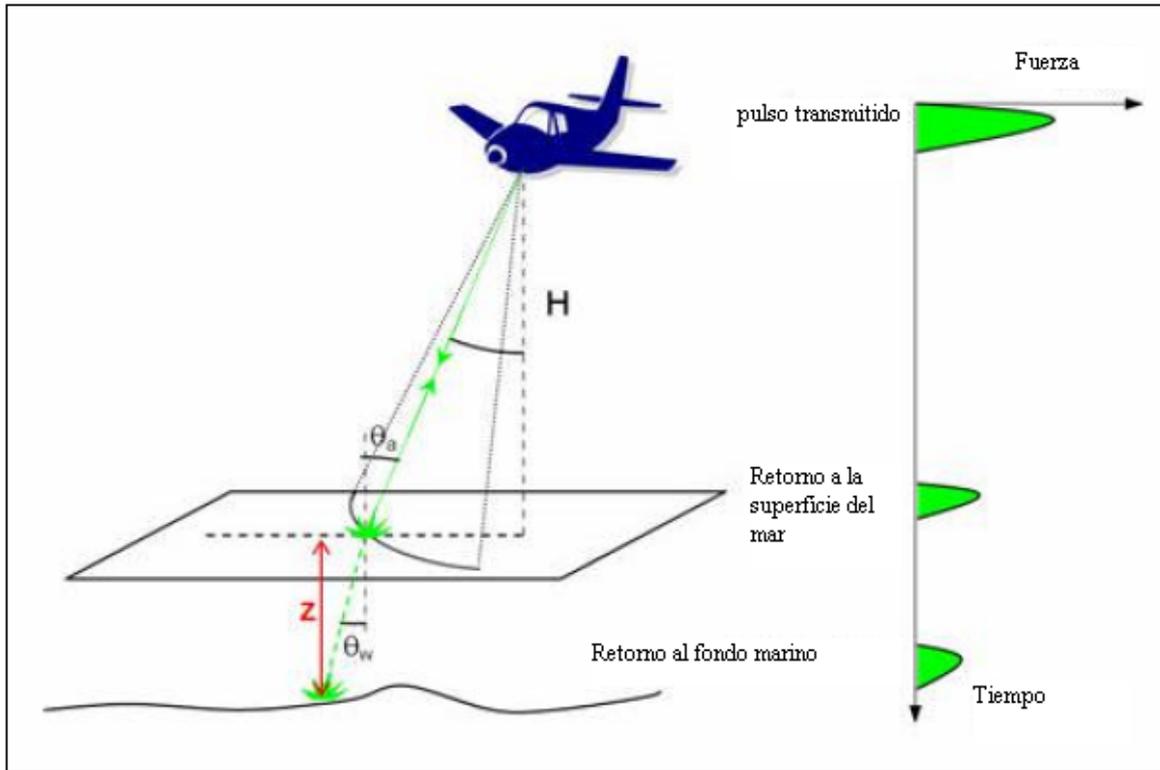


Fig. 3.44 “Principio de funcionamiento Lidar”

6.1.2 Capacidades y limitaciones

Los sistemas láser son eficientes en aguas poco profundas debido a su productividad excelente (Axelsson y Alfredsson, 1999). Esta productividad resulta de la alta velocidad del levantamiento y al ancho de la banda, que es independiente a la profundidad del agua. En contraste, los sistemas de multihaz son operados a una velocidad de levantamiento baja y el ancho de la banda es proporcional a la profundidad del agua (usualmente 2-7 veces la profundidad del agua).

Los sistemas láser dan una buena cobertura, cerca de la cobertura total, en condiciones extremas de salinidad y de temperatura, donde los sistemas acústicos pueden producir datos de baja calidad.

Sin duda, la seguridad es la principal ventaja de la operación del sistema láser, particularmente donde los riesgos bajo el agua pueden ser de gran tamaño para la navegación en la superficie.

A pesar de las capacidades mencionadas anteriormente, los sistemas láser son muy sensibles al material suspendido y a la turbidez de la columna de agua. Las profundidades de operación máximas, en condiciones de operación óptimas, es decir en aguas muy claras, es de cerca de 50-70 metros.

6.2 Sistemas Electromagnéticos Aerotransportados

Los sistemas de inducción electromagnéticos aerotransportados han sido usados por más de 40 años para detectar depósitos minerales metálicos de alta conductividad. Los avances en esta tecnología han permitido el uso de los principios de la inducción electromagnética para el gráfico de las formaciones del fondo marino en aguas poco profundas. Información detallada en sistemas de inducción electromagnéticas aerotransportados es referida en Zollinger et al. (1987) y en Smith y Keating (1996).

6.2.1 Principios de operación

El principio de operación de estos sistemas está basado en la técnica de levantamiento geofísico para medir la conductividad eléctrica del fondo de rocas o el grosor de una capa conductiva.

Un transmisor dipolo magnético, colocado en un helicóptero o asegurado en el ala de un avión, produce un campo magnético, el campo primario, y un receptor remolcado es usado para detectar el segundo campo magnético inducido en el suelo.

Las capas horizontales asumidas, el procesado de la señal en tiempo o la frecuencia dominio pueden ser usados para determinar la conductividad, σ_w , y el grosor de la columna de agua marina, es decir la profundidad de agua y la conductividad σ_s , del fondo marino (figura 3.45).

6.2.2 Capacidades y limitaciones

Este sistema no acústico, debido a las bajas frecuencias envueltas, tiene la capacidad de operar en el hielo grueso. Sin embargo, este sistema está limitado para las profundidades de agua de menos de 100 metros y es, en el presente, para propósitos de reconocimiento solamente.

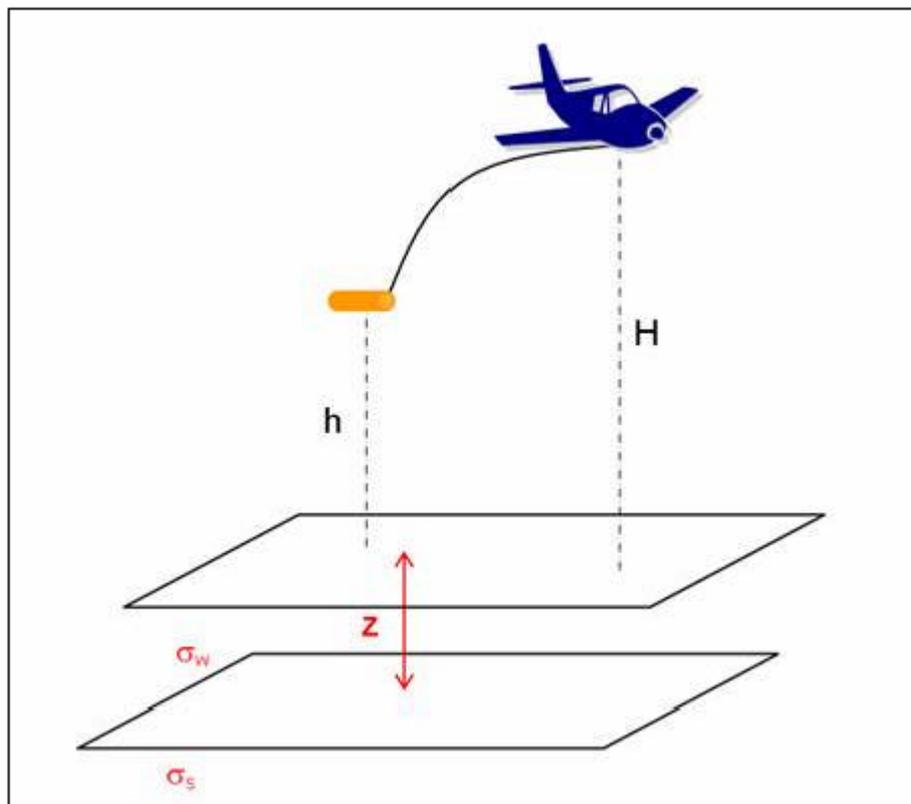


Fig. 3.45 “Principio de trabajo electromagnético aerotransportado”

6.3 Teledetección

Esta sección representa la estimación de la profundidad derivada de la fotografía aérea y de la altimetría satelital, como método adicional para la cobertura de áreas extensas.

6.3.1 Fotobatimetría

Es una práctica común de la fotografía aérea para ser usada para delinear la línea de costa, y algunas veces, es muy útil para el reconocimiento, y planificación del levantamiento hidrográfico, la ubicación de bancos y la creación de una descripción cualitativa del fondo marino en vez un instrumento para determinar la profundidad de agua.

6.3.1.1. Principios de operación

Los procesadores de imagen digital tienen la habilidad de correlacionar la intensidad de la luz con la profundidad. Sin embargo, la variación en la intensidad de la luz es también dependiente del material en suspensión y de las propiedades de reflejo del fondo marino. Entonces una calibración local debe ser retomada para contar a estas variaciones.

6.3.1.2 Capacidades y limitaciones

La aplicación de la fotobatimetría, dentro de los límites presentes de esta tecnología, lleva principalmente la de una herramienta de reconocimiento y de planeación en áreas donde no hay suficiente o ninguna información de profundidad.

6.3.2 Otros

Las imágenes de satélite en la banda visible pueden ser usadas en una manera similar a la fotobatimetría. Sin embargo, los satélites pueden ser equipados con altímetros de alta resolución para graficar la superficie de los océanos y, con el apropiado procesado de datos, es posible estimar las profundidades de todo el globo.

La superficie del océano tiene una forma irregular que imita, hasta cierto punto, la topografía del fondo del mar. Las características del fondo marino, como los montes submarinos, contribuyen a la modificación local del campo de gravedad de la tierra, induciendo una deflexión del vertical, que causa una inclinación en la superficie del mar y consecuentemente la superficie del agua de mar sube para generar una protuberancia en la superficie del mar. La superficie del océano puede ser graficada con un altímetro de satélite exacto y la anomalía, es decir la diferencia entre la superficie del océano observada y la superficie teórica, como la creada por un elipsoide WGS84, puede ser determinada y la profundidad de agua estimada (Figura 3.46).

La integración de la altimetría satelital con las medidas batimétricas pueden producir datos más confiables que contribuyan al conocimiento de la topografía del fondo marino en áreas donde los levantamientos hidrográficos están esparcidos (Smith y Sandwell, 1997).

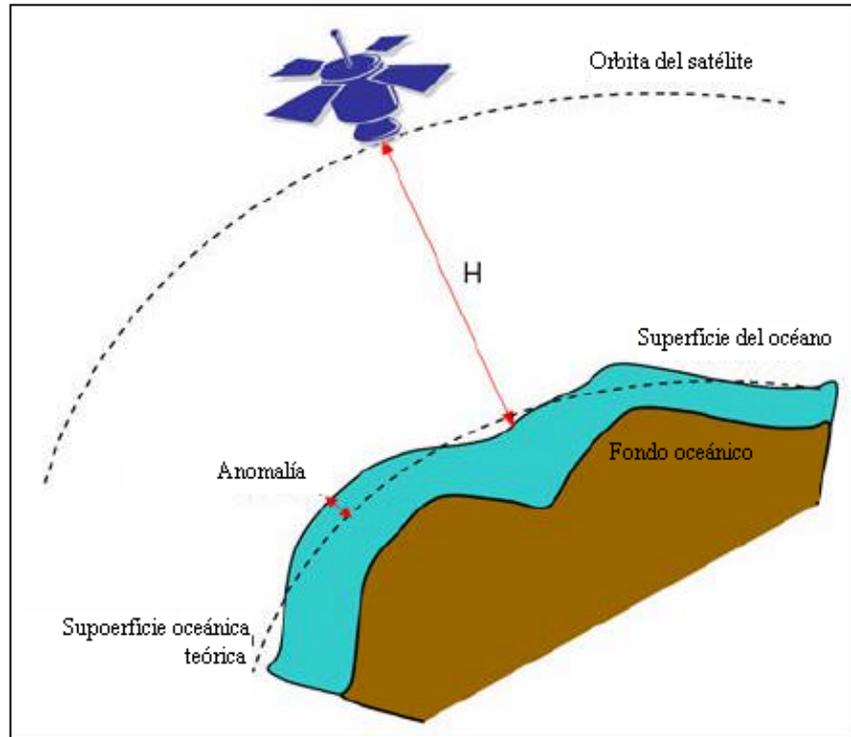


Fig. 3.46 “Batimetría derivada del satélite”

6.4 Sistemas Mecánicos

Los sistemas mecánicos son las herramientas primarias usadas para la medición de profundidad. Sin embargo, estos sistemas permanecen en vigentes y en uso hoy en día.

Los sistemas estudiados hasta ahora realizan, ediciones indirectas y son sensitivos a las características del agua de mar. En condiciones típicas, los errores graves en las mediciones de profundidad son propensos a suceder, estos son generados por los ecos desde dentro de la columna de agua y por lo tanto no están relacionados a la columna de agua, por ejemplo pueden haber sido causados por: algas, bancos de peces, una capa dispersa profunda, plumajes termales y sedimentos en suspensión. Adicionalmente los errores pueden ocurrir cerca del muelle, donde la detección del eco ocurre desde los retornos de los lóbulos laterales desde el muelle mismo.

Los métodos mecánicos (línea guía o vara de sondeo) no son sensitivos a estas condiciones ambientales particulares y pueden dar un método alternativo.

Los métodos de barra o de barrido son una manera inequívoca de detectar profundidades mínimas sobre las ruinas o sobre las obstrucciones y de garantizar las profundidades mínimas a través del canal de navegación.

6.4.1 Línea principal y vara de sondeo

La línea principal ayuda al higrógrafo en resolver la mal interpretación del ecosonda causada por los retornos falsos.

Cuando el fondo es visible, una línea principal o una vara de sondeo pueden consistentemente ser ubicados en los puntos altos y en la profundidad medida. En otras áreas, la detección y la medición puede ser más difícil y los métodos de barrido pueden ser preferidos.

6.4.1.1 Descripción

Una línea principal es una línea graduada con marcas adjuntas y aseguradas al escandallo. La línea es usada para determinar la profundidad del agua cuando se sondea manualmente, generalmente, en profundidades de menos de 50 metros.

Una corrección, para compensar el encogimiento y el estiramiento de la línea, puede ser aplicada a las profundidades obtenidas; este tipo de error, sin embargo, ha sido superado al insertar un alambre dentro de la cuerda.

Una vara de sondeo es una vara graduada con marcas que es también usada para determinar la profundidad del agua cuando el sondeo es manual, generalmente es usado en profundidades de menos de 4 metros.

Como se mencionó anteriormente, hoy día estas herramientas son casi siempre usadas para chequear sondeos anómalos recolectados con los sistemas acústicos que suceden en aguas poco profundas.

6.4.1.2 Tipos de erro

Los tipos de error de medición de profundidad con la línea principal son debidos a:

- a) La curvatura de la línea es inducida por la corriente y produce un error de profundidad. La corrección puede ser problemática y por esta razón, es recomendado solamente retomar las mediciones cuando el impacto de la corriente sea sin importancia, solamente dejando el efecto de la velocidad residual de la nave.
- b) El balanceo contribuirá al error en la medición de la profundidad. El balanceo lleva a la dificultad en la lectura de la profundidad; esto se sobrelleva al tomar un promedio de la lectura entre las crestas de las ondas y de las depresiones.

6.4.1.3. La operación, el grabado de la datos y el procesado

La medición directa de la profundidad debe ser hecha con la nave muerta en el agua y, si es posible, para evitar períodos de corrientes fuertes y de corriente de marea. Es normal, entre las posiciones de sonido sucesivas, mantener la línea principal en el agua para descartar cualquier efecto prominente del fondo marino.

6.4.2 **Barrido de barra**

La cobertura batimétrica con el SBES sólo mide la profundidad a lo largo de las líneas de levantamiento, dejando el fondo marino entre las líneas sin cobertura o información detallada, aunque el sonar de barrido lateral es casi siempre usado para buscar y localizar cualquier efecto prominente del fondo marino entre las líneas SBES. Para los pináculos o restos de rocas, SBES no puede detectar la profundidad mínima cuando el eco es posiblemente muy débil para ser detectado por el receptor, este es particularmente el caso de los mástiles y de las piezas de metal afilados.

Para los propósitos de seguridad de navegación, el uso de un barrido mecánico exacto, con una barra de barrido o con una guaya de barrido, es un medio adecuado de garantizar un mínimo de seguridad de profundidad límite en un área y de acuerdo al S-44, puede ser considerado suficiente para los levantamientos de Orden especial o de Orden 1.

6.4.2.1 Descripción

El barrido está hecho de una barra de 5 a 6 metros de longitud. Cada extremo de la barra puede tener un plomo u otro material pesado, para dar mayor peso y reducir la elevación cuando está sumergido. La barra es suspendida debajo de la nave por líneas graduadas.

Este instrumento es muy fácil de fabricar. El ensayo y error puede ser usado para obtener la mejor solución.

Esto es casi siempre más efectivo y más fácil de manejar que con un barrido de guaya.

6.4.2.2. Metodología de operación

La barra o cuerda debe ser suspendida horizontalmente debajo de la nave. El barrido puede ser equipado con las basculadoras u otros sensores para grabar el contacto con el fondo marino.

La profundidad de la barra debe ser referida al datum vertical, la altura de la marea debe ser grabada durante la operación de barrido y las profundidades reducidas apropiadamente.

Una completa cobertura del área de navegación en el límite seguro de profundidad puede ser hecha; en el caso de que se detecte una obstrucción, la cobertura total alrededor de la obstrucción es recomendada para confirmar que la profundidad mínima es detectada.

6.4.3 Barrido de cable

Como una alternativa del barrido de barra, el barrido de cable puede ser usado para determinar la menor profundidad sobre el factor batimétrico cuando, desde la naturaleza general del terreno visible, se sospecha la existencia de un pináculo de roca y una obstrucción.

Información detallada de barrido de cable puede ser encontrada en el NOAA (1976).

6.4.3.1 Descripción

El barrido es construido de dos pequeñas tablas de red o puertas (idénticas a aquellas usadas por los pesqueros de arrastre). Las tablas de red son conectadas de 40 a 60 metros de la cadena de unión oval. El barrido es frenado y remolcado para que la cadena de conexión sea dragada a lo largo del fondo marino aproximadamente a 60 metros a popa de la nave remolcadora NOAA (1976).

REFERENCIAS

- Artilheiro, F. (1996) *“Analysis and Procedures of Multibeam Data Cleaning for Bathymetric Charting”* Master’s Report, Department of Geodesy and Geomatics Engineering, University of New Brunswick, Fredericton New Brunswick, Canada.
- Axelsson, R. and M. Alfredsson (1999) *“Capacity and Capability for Hydrographic Missions”* US Hydrographic Conference 1999.
- Clay, C. e H. Medwin (1977) *“Acoustical Oceanography”* Wiley and Sons, Toronto.
- de Moustier, C. (1988) *“State of the Art in Swath Bathymetry Survey Systems”* International Hydrographic Review, LXV(2), p. 25.
- de Moustier, C. (1993). *“Signal Processing for Swath Bathymetry and Concurrent Seafloor Acoustic Imaging”* Acoustic Signal Processing for Ocean Exploration, J.M.F. Moura and I.M.G. Lourtie Eds., pp. 329-354.
- Godin, A. (1996). *“The Calibration of Shallow Water Multibeam Echo-Sounding Systems”* Proceedings of the Canadian Hydrographic Conference ‘96, Halifax, NS, Canada, pp. 25-31.
- Guenther, G., R. Thomas, and P. LaRocque (1996). *“Design Considerations for Achieving High Accuracy with the SHOALS Bathymetric Lidar System”* SPIE: Laser Remote Sensing of Natural Waters: From Theory to Practice. 15, pp. 54-71.
- Hare, R. (1995). *“Depth and Position Error Budgets for Multibeam Echosounding”* International Hydrographic Review (LXXII), Monaco, pp 37-69.
- Hughes Clarke, J. (2000). *“Present-day Methods of Depth Measurement”* In: P. Cook and C. Carlton (eds) Continental Shelf Limits - The Scientific and Legal Interface. Oxford University Press, New York.
- IHO (1994). *“Hydrographic Dictionary. Special publication No. 32, 5th edition”* International Hydrographic Organization, Monaco.
- IHO (1998). *“IHO Standards for Hydrographic Surveys. Special publication No. 44, 4th edition”* International Hydrographic Organization, Monaco.

- Kinsler, L., A. Frey, A. Coppens, and J. Sanders (1982). *“Fundamentals of Acoustics”*. Wiley and Sons, Toronto.
- Lurton, X. (2002). *“Acoustical Measurement Accuracy Modelling for Bathymetric Sonars”* Canadian Hydrographic Conference 2002.
- NOAA (1976). *“Hydrographic Manual. 4th edition”* National Oceanic and Atmospheric Administration. US Department of Commerce.
- Pøhner, F. (1993). *“Model for Calculation of Uncertainty in Multibeam Depth Soundings”* Report from Simrad Subsea AS, Horten, Norway, FEMME 93, 16 p.
- Pickard, G. and W. Emery (1990). *“Descriptive Physical Oceanography – An Introduction, 5th edition”* Pergamon Press, Oxford.
- Seippel, R. (1983). *“Transducers, Sensors and Detectors”* Prentice-Hall.
- Smith, R. and P. Keating (1996). *“The usefulness of multicomponent, time-domain airborne electromagnetic measurements”* Geophysics, Vol. 61, No. 1, pp. 74–81.
- Smith, W. and D. Sandwell (1997). *“Global Seafloor Topography from Satellite Altimetry and Ship Depth Sounding”* Science 277. pp. 1956-1962.
- OMG (1996). *“Multibeam Sonar Surveying Training Course. Ocean Mapping Group”* University of New Brunswick.
- Urick, R. (1975). *Principles of Underwater Acoustics*. McGraw-Hill, Toronto.
- Zollinger, R., H. Morrinson, P. Lazenby, and A. Becker (1987). *“Airborne Electromagnetic Bathymetry”* Geophysics, Vol. 52 no. 8, pp. 1172-1137.

BIBLIOGRAFÍA

- Andersen, O. and P. Knudsen (1998). *“Global Gravity Field from ERS1 and GEOSAT Geodetic Mission Altimetry”* Journal Geophysics Research 103(C4), pp. 8129-8137.
- Arabelos, D. (1997). *“On the Possibility to Estimate the Bottom Topography from Marine Gravity and Satellite Altimetry Data Using Collocation”* In: R. Forsberg, M. Feissel, R. Dietrich (eds) Geodesy on the Move Gravity, Geoid, Geodynamics, and Antarctica IAG Symposia 119, Springer – Verlag Berlin Heidelberg, pp. 105-112.
- Burtch, R. (2002). *“Lidar Principles and Applications”* IMAGIN Conference 2002, Traverse City.
- Calmant, S. and N. Baudry (1996). *“Modelling Bathymetry by Inverting Satellite Altimetry Data: A Review”* Marine Geophysics Research 18, pp. 23-134.
- Collet, C., J. Provost, P. Rostaing, P. Pérez, and P. Bouthemy (2000). *“SPOT Satellite Data Analysis for Bathymetric Mapping”* IEEE, pp. 964-967.
- Denbigh, P. (1989). *“Swath bathymetry: Principles of operation and an analysis of errors”* IEEE Journal of Oceanic Engineering 14, pp. 289–298.
- Dixon, T., M. Naraghi, M. McNutt, and S. Smith (1983). *“Bathymetric Prediction from SEASAT Altimeter Data”* Journal Geophysics Research 88, pp. 1563-1571.
- Durey, L., G. Terrie, R. Arnone, and A. Martinez (1997). *“Bottom Reflectance Maps from Hyperspectral Sensors: An Application to AAHIS Data”* In Proceedings, ERIM Fourth International Conference on Remote Sensing for Marine and Coastal Environments, Orlando, pp. 17-19.
- Geng, X. and A. Zielinski (1999). *“Precise Multibeam Acoustic Bathymetry”* Marine Geodesy, 22, pp. 157-167.
- Guenther, G. (1985). *“Airborne Laser Hydrography: System Design and Performance Factors”* NOAA Professional Paper Series, National Ocean Service.
- Guenther, G., A. Cunningham, P. LaRocque, and D. Reid (2000). *“Meeting the Accuracy Challenge in Airborne Lidar Bathymetry”* Proceedings of EARSeL Symposium 2000. Dresden, Germany.

- Guenther, G., M. Brooks, and P. LaRocque (1998). *"New Capabilities of the SHOALS Airborne Lidar Bathymeter"* Proceedings 5th International Conference on Remote Sensing for Marine and Coastal Environments, ERIM International, October 5-7, San Diego, CA, Vol. I, 47-55.
- Guenther, G., P. LaRocque, and W. Lillycrop (1994). *"Multiple Surface Channels in SHOALS Airborne Lidar"* SPIE: Ocean Optics XII, Vol. 2258, pp. 422-430.
- Guenther, G., R. Thomas, and P. LaRocque (1996). *"Design Considerations for Achieving High Accuracy with the SHOALS Bathymetric Lidar System"* SPIE: Laser Remote Sensing of Natural Waters from Theory to Practice, Vol. 2964, pp. 54-71.
- Hammerstad E. (1995). *"Simrad EM 950/1000 - Error Model for Australian Navy"* Extract of Report, Simrad Subsea AS, Horten, Norway, 4 p.
- Hare, R. and A. Godin (1996). *"Estimating Depth and Positioning Errors for the Creed/ EM 1000 Swath Sounding System"* Proceedings of the Canadian Hydrographic Conference '96. Halifax, NS, Canada, pp. 9-15.
- Herlihy, D., B. Hillard, and T. Rulon (1989). *"National Oceanic and Atmospheric Administration Sea Beam System - Patch Test"* International Hydrographic Review, Monaco, LXVI(2), pp. 119-139.
- Hughes Clarke, J. (1995). *"Reference Frame and Integration."* Lecture IV-1 in Coastal Multibeam Hydrographic Surveys. United States / Canada Hydrographic Commission Multibeam Working Group, St. Andrews, New Brunswick, Canada.
- Hughes Clarke, J. (1995a). *"Interactive Bathymetry Data Cleaning"* Lecture X-4 from Coastal Multibeam Hydrographic Surveys. United States / Canada Hydrographic Commission Multibeam Working Group, St. Andrews, New Brunswick, Canada.
- Ingham, A. (1992). *"Hydrography for the Surveyor and Engineer"* 3rd edition, BSP, Oxford.
- Irish, J. and W. Lillycrop (1999). *"Scanning Laser Mapping of the Coastal Zone: The SHOALS System"* ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 54. pp. 123-129.
- Irish, J., J. McClung, and W. Lillycrop (2000). *"Airborne Lidar Bathymetry: the SHOALS System"* PIANC Bulletin. 2000 (103), pp. 43-53.
- Jung, W. and P. Vogt (1992). *"Predicting Bathymetry from Geosat ERM and Ship Borne Profiles in the South Atlantic Ocean"* Tectonophysics 210, pp. 235-253.

- Lillycrop W., L. Parson, and J. Irish (1996). *"Development and Operation of the SHOALS Airborne Lidar Hydrographic Survey System"* SPIE: Laser Remote Sensing of Natural Waters from Theory to Practice, Vol. 2964, pp. 26-37.
- Lillycrop, W. and J. Banic, (1993). *"Advancements in the US Army Corps of Engineers Hydrographic Survey Capabilities: The SHOALS System"* Marine Geodesy, Vol. 15, pp. 177-185.
- Lillycrop, W., J. Irish, and L. Parson (1997). *"SHOALS System: Three Years of Operation with Airborne Lidar Bathymetry - Experiences, Capability and Technology Advancements"* Sea Technology, Vol. 38, No. 6, pp. 17-25.
- Lillycrop, W., L. Parson, L. Estep, P. LaRocque, G. Guenther, M. Reed, and C. Truitt (1994). *"Field Test Results of the U.S. Army Corps of Engineers Airborne Lidar Hydrographic Survey System"* Proceedings of the 6th Biennial National Ocean Service International Hydrographic Conference, Norfolk, VA, pp. 144-151.
- Parson, L., W. Lillycrop, C. Klein, R. Ives, and S. Orlando (1996). *"Use of LIDAR Technology for Collecting Shallow Bathymetry of Florida Bay"* Journal of Coastal Research, Vol. 13, No. 4.
- Pope, R., B. Reed, G West, and W. Lillycrop. (1997). *"Use of an Airborne Laser Depth Sounding System in a Complex Shallow-water Environment"* Proceedings of Hydrographic Symposium XVth International Hydro Conference. Monaco.
- Quinn, R., (1992), *"Coastal Base Mapping with the LARSEN Scanning Lidar System and Other Sensors"* Proceedings, 5th Biennial National Ocean Service International Hydrographic Conference, Baltimore.
- Riley, J. (1995). *"Evaluating SHOALS Bathymetry Using NOAA Hydrographic Survey Data"* Proceedings 24th Joint Meeting of UNIR Sea Bottom Surveys Panel, Tokyo, Japan.
- Sinclair, M. (1998). *"Australians Get on Board with New Laser Airborne Depth Sounder"* Sea Technology, June 1998, pp. 19-25.
- Sinclair, M. (1999). *"Laser Hydrography - Commercial Survey Operations"* Hydro 99.
- Smith, R. and M. Smith (2000). *"Airborne Lidar and Airborne Hyperspectral Imagery: A Fusion of Two Proven Sensors for Improved Hydrographic Surveying"* Proceedings Canadian Hydrographic Conference 2000.
- Thomas, R. and G. Guenther (1990). *"Water Surface Detection Strategy for an Airborne Laser Bathymeter"* SPIE: Ocean Optics X, Vol. 1302, pp. 597-611.

- USACE (2002). *“Hydrographic Surveying Manual”* U.S. Army Corps of Engineers, Department of the Army, Washington.
- Vergos, G. and M. Sideris (1998). *“On Improving the Determination of the Gravity Field by Estimating the Bottom Ocean Topography with Satellite Altimetry and Shipborne Gravity Data”* Department of Geomatics Engineering, University of Calgary.
- Whitman, E. (1996). *“Laser Airborne Bathymetry - Lifting the Littoral”* Sea Technology, August 1996, pp. 95-98.
- Wozencraft, J. (2001). *“The Coastal Zone Revealed Through Shoals Lidar Data”* Proceedings US Hydrographic Conference 2001.
- Wright, C. and J. Brock (2002). *“EAARL: A LIDAR for Mapping Shallow Coral Reefs and Other Coastal Environments”* Seventh International Conference on Remote Sensing for Marine and Coastal Environments Proceedings 2002.
- Yakima, W., Wilt M., H. Morrison, K. Lee, and N. Goldstein (1989). *“Electromagnetic Sounding in the Columbia Basin”* Geophysics, Vol. 54, No. 8, pp. 952-961.
-

CAPÍTULO 3 – ANEXO A
SISTEMAS DE COORDENADAS Y REFERENCIA

A. Sistemas de coordenadas y referencia

La determinación de la profundidad se realiza en una nave es condiciones dinámicas. Usualmente, tres ejes ortogonales de un sistema de referencia (sistema de coordenadas de la nave), es usado a bordo para localizar los sensores hidrográficos y para medir el desempeño y el cabeceo de la nave.

El comportamiento de la nave consiste de los desplazamientos angulares sobre esos ejes, el rolido (transversalmente) sobre el eje x , el cabeceo (longitudinalmente) sobre el eje y , la guiñada (horizontalmente) sobre el eje z . Considerando un sistema de referencia derecho con el eje z apuntando hacia abajo; con la convención usual para la mayoría de los sensores de comportamiento el rolido es positivo cuando el lado de estribor esté abajo, el cabeceo es positivo cuando la popa esté arriba y la guiñada es positiva cuando rote en sentido de las agujas del reloj.

Considerando la Figura A.1, la rotación θ_1 en el plano yz , es decir, la rotación en el eje x , puede ser expresado por la matriz de rotación,

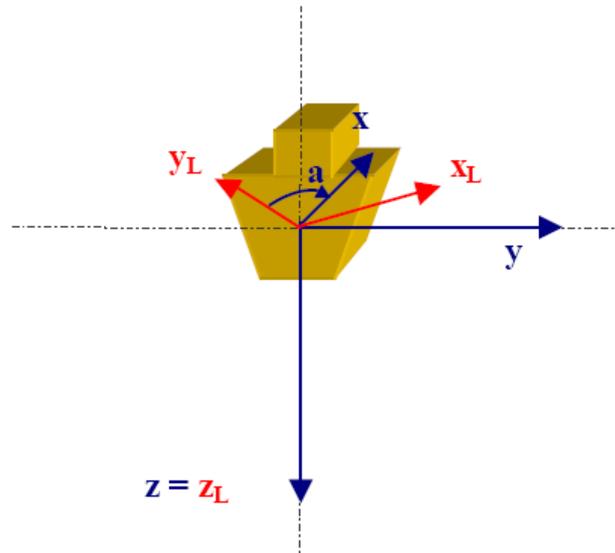


Fig. A.1. “Sistema de referencia de la nave”

$$R_1(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ 0 & -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (\text{A. 1})$$

Y las rotaciones sobre los ejes y y z son respectivamente:

$$R_2(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & 0 & -\sin(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) \end{bmatrix}, \quad (\text{A. 2})$$

$$R_3(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 0 \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (\text{A. 3})$$

La transformación que resulta de tres rotaciones secuenciales es representada por el producto de las matrices de rotación. Las rotaciones sucesivas son aplicadas a la izquierda de este producto.

Considerando las rotaciones sucesivas $(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$ sobre los ejes “x”, “y”, y “z”, la matriz de transformación es dada por,

$$R_3(\theta_3) \cdot R_2(\theta_2) \cdot R_1(\theta_1) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_3)\cos(\theta_2) & \sin(\theta_3)\cos(\theta_1) + \cos(\theta_3)\sin(\theta_2)\sin(\theta_1) & \sin(\theta_3)\sin(\theta_1) - \cos(\theta_3)\sin(\theta_2)\cos(\theta_1) \\ -\sin(\theta_3)\cos(\theta_2) & \cos(\theta_3)\cos(\theta_1) - \sin(\theta_3)\sin(\theta_2)\sin(\theta_1) & \cos(\theta_3)\sin(\theta_1) + \sin(\theta_3)\sin(\theta_2)\cos(\theta_1) \\ \sin(\theta_2) & -\cos(\theta_2)\sin(\theta_1) & \cos(\theta_2)\cos(\theta_1) \end{bmatrix} \quad (\text{A. 4})$$

Las profundidades medidas, inicialmente referidas al marco de la nave, necesitan ser posicionadas en un sistema de coordenadas local. Considerando un sistema de coordenadas local ortogonal izquierdo; con el eje x apuntando al Este, el eje y apuntando al Norte geográfico, y el eje z apuntando hacia abajo.

En una nave de investigación con el roldo, cabeceo y balanceo respectivamente: θ_R , θ_P , y α ; un haz con un rango de inclinación R y un ángulo β (Figura A.2), será transferido desde el triortogonal, derecho, del sistema de coordenadas de la nave $(x', y', z')_N$ al triortogonal, izquierdo, del sistema de coordenadas local $(x, y, z)_L$, con la rotación en el eje x el recíproco al ángulo del roldo $(-\theta_R)$, la rotación en el eje y el recíproco al ángulo del cabeceo $(-\theta_T)$, y la rotación en el eje z el recíproco al ángulo del balanceo $(-\alpha)$ y ya que los dos ejes z son positivos hacia abajo, pero el sistema de coordenadas de la nave es un sistema derecho y el sistema de coordenadas local es un sistema izquierdo, es necesario intercambiar las coordenadas x y y durante la transformación del sistema de coordenadas de la nave al local. Esto se hace al aplicar la matriz R_{xy} .

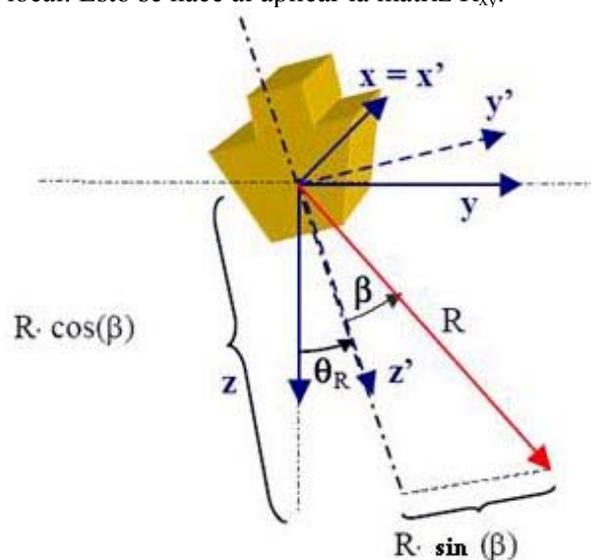


Fig. A.2. “Sistemas de referencia de nivel local y de la nave”

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_L = R_{xy} \cdot R_3(-\alpha) \cdot R_2(-\theta_T) \cdot R_1(-\theta_R) \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix}_N = T(\alpha, \theta_T, \theta_R) \begin{bmatrix} 0 \\ R \sin(\theta) \\ R \cos(\theta) \end{bmatrix}_N \quad (\text{A. 5})$$

Donde R_{xy} es dado por,

$$R_{xy} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T(\alpha, \theta_T, \theta_R) = \begin{bmatrix} \sin(\alpha) \cos(\theta_T) & \cos(\alpha) \cos(\theta_R) + \sin(\alpha) \sin(\theta_T) \sin(\theta_R) & -\cos(\alpha) \sin(\theta_R) + \sin(\alpha) \sin(\theta_T) \cos(\theta_R) \\ \cos(\alpha) \cos(\theta_T) & -\sin(\alpha) \cos(\theta_R) + \cos(\alpha) \sin(\theta_T) \sin(\theta_R) & \sin(\alpha) \sin(\theta_R) + \cos(\alpha) \sin(\theta_T) \cos(\theta_R) \\ -\sin(\theta_T) & \cos(\theta_T) \sin(\theta_R) & \cos(\theta_T) \cos(\theta_R) \end{bmatrix}$$

Donde $T(\alpha, \theta_T, \theta_R)$ es la matriz de transformación del marco de medidas de referencia en el sistema de coordenadas local.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_L = \begin{bmatrix} (\cos(\alpha) \cos(\theta_R) + \sin(\alpha) \sin(\theta_T) \sin(\theta_R)) \cdot R \sin(\beta) + (-\cos(\alpha) \sin(\theta_R) + \sin(\alpha) \sin(\theta_T) \cos(\theta_R)) \cdot R \cos(\beta) \\ (-\sin(\alpha) \cos(\theta_R) + \cos(\alpha) \sin(\theta_T) \sin(\theta_R)) \cdot R \sin(\beta) + (\sin(\alpha) \sin(\theta_R) + \cos(\alpha) \sin(\theta_T) \cos(\theta_R)) \cdot R \cos(\beta) \\ \cos(\theta_T) \sin(\theta_R) \cdot R \sin(\beta) + \cos(\theta_T) \cos(\theta_R) \cdot R \cos(\beta) \end{bmatrix}$$

Note que el ángulo del haz es positivo al lado de estribor y negativo a babor.

