

# Alcance, velocidad, velocidad del sonido y ley de Snell

CÓMO LA VELOCIDAD DEL SONIDO AFECTA LA PRECISIÓN DEL RANGO VS LA PRECISIÓN DE LA VELOCIDAD

**A medida que los Sistemas de Perfiles Doppler Acústicos se implementen para aplicaciones más diversas en todo el mundo, los usuarios deberán comprender cómo la velocidad del sonido afecta la precisión de las mediciones acústicas.**

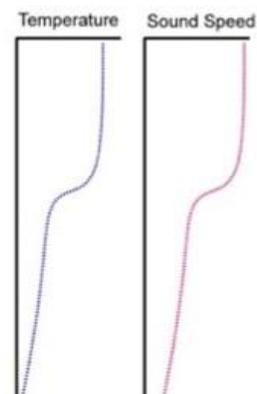
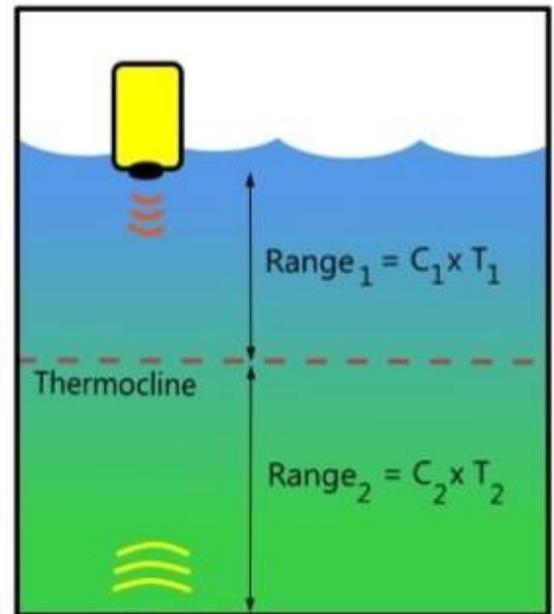
Para esto, nos centraremos específicamente en la diferencia entre precisión de alcance y precisión de velocidad. Esto suele ser una fuente de confusión para los usuarios novatos porque la precisión del alcance depende en gran medida del perfil de velocidad del sonido, mientras que la precisión de la velocidad no. Vamos a ver cómo la velocidad del sonido afecta a ambos tipos de mediciones.

Con la acústica, en realidad no "medimos" longitudes o distancias como lo haríamos con una regla. En lugar de eso, transmitimos un ping acústico al agua y registramos el tiempo que tarda el eco en regresar desde el fondo. Convertimos este tiempo de viaje transcurrido a una distancia mediante multiplicación.

La precisión de esta conversión depende de cuánto sabemos sobre la velocidad del sonido en toda la columna de agua. Este "perfil" de la velocidad del sonido nos dirá qué tan rápido se mueve el ping acústico mientras viaja a través de capas de diferentes temperaturas, salinidades o densidades. Podemos aplicar la siguiente ecuación para calcular el alcance a partir del tiempo utilizando el perfil de velocidad del sonido.

$$Z = \int_0^{T/2} C(z) \cos \theta dt$$

**Z** es el alcance calculado en metros, **C** es la velocidad del sonido, **T** es el intervalo de tiempo entre transmisión y recepción y **θ** es el ángulo del haz desde la vertical. Dividimos el tiempo a la mitad porque el ping recorre la distancia dos veces, una vez hasta el fondo y luego de regreso. Debido a que los sistemas de perfiles Doppler acústicos pueden medir intervalos de tiempo con mucha precisión, la precisión del cálculo del rango depende en última instancia de qué tan bien se conoce la velocidad del sonido. El punto principal es que necesitamos conocer la velocidad del sonido no sólo en el transductor, sino también sobre toda la columna de agua para calcular con precisión el alcance. Los errores de alcance pueden ser muy problemáticos cerca de las ensenadas y desembocaduras de los ríos, donde la temperatura, la salinidad y la densidad del agua pueden cambiar rápidamente en el tiempo y el espacio.



**Figura 1:** La figura anterior ilustra un cálculo de alcance simple utilizando un perfil de velocidad del sonido con dos capas distintas. **C** es la velocidad del sonido y **T** es el tiempo de viaje del ping transcurrido en cada capa. Para medir con precisión el alcance total hasta el fondo, tendríamos que medir directamente la velocidad del perfil del sonido con un instrumento de perfilado como un CTD. El alcance total es entonces la suma o integración de la velocidad del sonido a lo largo del tiempo en cada capa.



Entonces, ahora que sabemos cómo realizar mediciones precisas de alcance, ¿cómo realizamos mediciones precisas de velocidad? Y, ¿cómo influye la velocidad del sonido en estas mediciones de velocidad? Curiosamente, una medición precisa de la velocidad sólo depende de conocer la velocidad del sonido en el transductor. Por lo tanto, en realidad es más fácil medir la velocidad que medir el alcance. Esto puede parecer un poco inusual después de lo comentado anteriormente, pero el alcance y la velocidad son tipos muy diferentes de medidas.

Para medir la velocidad, dejamos atrás el dominio del tiempo y nos centramos en el cambio de frecuencia (o desplazamiento Doppler) de la señal acústica. Como ahora nos preocupa la frecuencia y no el tiempo o la distancia, no necesitamos conocer todo el perfil de velocidad del sonido. Sólo necesitamos saber qué hay en el transductor. La razón de esto es la ley de Snell.

La Ley de Snell es una ecuación bastante simple que se puede utilizar para calcular el cambio en la velocidad y la dirección de una onda cuando viaja desde un medio de una densidad a un medio de otra. A esto también se le llama refracción. No importa cuál sea el cambio de densidad, la relación entre la velocidad y la dirección de una onda permanece constante. Porque un ping acústico es una onda (de sonido); también debe obedecer la ley de Snell.

$$\frac{\sin \theta_1}{C_1} = \frac{\sin \theta_2}{C_2}$$

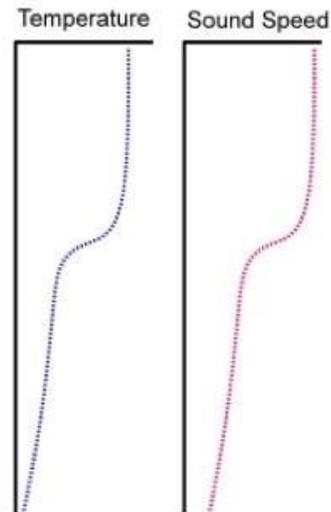
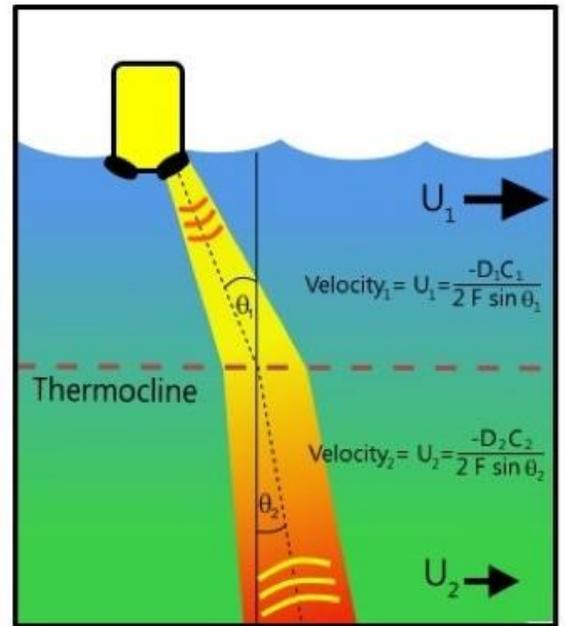
$\theta_1$  y  $\theta_2$  son los ángulos del haz acústico en dos capas de densidad adyacentes y  $C_1$  y  $C_2$  son las velocidades del sonido en cada capa. Si hay varias capas con diferentes velocidades del sonido, aplicaríamos esta ecuación entre cada capa.

A medida que la onda acústica viaja hacia un área de agua más fría y densa, se refracta o se desvía de su ángulo de transmisión original. Se debe tener en cuenta que los ángulos en esta figura están exagerados. El cambio real en el ángulo del haz depende de qué tan grande sea el cambio de densidad de una capa a la siguiente. El punto principal a recordar; es que cualquier energía acústica reflejada de regreso al transductor ha recorrido el mismo camino dos veces, desde el transductor hasta el fondo y viceversa.

Continuando con el ejemplo ilustrado arriba, veamos dónde y cómo se aplica la velocidad del sonido en el cálculo de la velocidad. Comenzamos midiendo el desplazamiento Doppler en cada capa como  $D_1$  y  $D_2$ .

$$D_1 = \frac{-2U_1 F \sin \theta_1}{C_2} \text{ and } D_2 = \frac{-2U_2 F \sin \theta_2}{C_2}$$

$$\frac{\sin \theta_1}{C_1} = \frac{\sin \theta_2}{C_2}$$



**Figura 2:** La figura de arriba ilustra otro escenario de dos capas en el que una termoclina altera la trayectoria de un haz acústico oblicuo. Una termoclina se define como la ubicación de un cambio abrupto, o gradiente, de temperatura cuando se mueve hacia abajo o hacia arriba a través de la columna de agua. Este cambio de temperatura también provocará un cambio en la velocidad local del sonido.

Aplicando la ley de Snell por sustitución en la segunda ecuación obtenemos

$$D_2 = \frac{-2U_2 F \sin \theta_1}{C_1}$$

Podemos reorganizar esta ecuación para calcular la velocidad.

$$U_2 = \frac{-D_2 C_1}{2F \sin \theta_1}$$

Ahora la velocidad en la capa 2 se puede calcular usando la velocidad del sonido de la capa 1. Usando la Ley de Snell, podemos calcular la velocidad del agua en la capa 2 a partir del desplazamiento Doppler medido en la capa 2 y la velocidad del sonido de la capa 1 en el transductor. La clave es que el cambio en el ángulo del haz siempre equilibra el cambio en la velocidad del sonido.

Medir con precisión las velocidades del agua en cualquier lugar de la columna de agua es puramente una función de la frecuencia del transductor F, el ángulo del transductor  $\theta$  y la velocidad del sonido C en el transductor. Recuerde, esto sólo funciona gracias a la ley de Snell y porque estamos midiendo el cambio de frecuencia (el desplazamiento Doppler). En consecuencia, la precisión de las mediciones de velocidad depende únicamente de conocer la velocidad del sonido en el transductor y no en todo el perfil. ¡Gracias Sr. Snell!

Por lo tanto, antes de invertir en un CTD de elaboración de perfiles, debe decidir si es absolutamente necesario para los datos que está recopilando. Dependiendo de la aplicación de su sistema de perfilado Doppler acústico, es posible que necesite o no medir el perfil de velocidad del sonido. Si está midiendo velocidades del agua, perfiles de corrientes o descargas, el perfil de velocidad del sonido no es necesario para mediciones precisas de la velocidad. Sin embargo, si le preocupa la ubicación vertical precisa de las celdas de velocidad en la columna de agua, un perfil de velocidad del sonido ayudará a mejorar este cálculo. Pero, las mediciones precisas de velocidad solo necesitan la velocidad del sonido en el transductor debido a la ley de Snell.

Si está midiendo el rango acústico durante un estudio batimétrico con un sistema de perfil acústico Doppler o cualquier otro transductor, definitivamente debe medir el perfil de velocidad del sonido. Esto mejorará enormemente la precisión de las mediciones de rango, especialmente en áreas donde la temperatura, la salinidad y la densidad del agua son inconsistentes. Si necesita un CTD de perfiles para su aplicación de sistema de perfil Doppleracústico, SonTek tiene varias opciones disponibles para satisfacer sus necesidades.

SonTek, a Xylem Brand  
9940 Summers Ridge Rd.  
San Diego, CA 92121

+ 1.858.546.8327  
[inquiry@sontek.com](mailto:inquiry@sontek.com)  
[SonTek.com](http://SonTek.com)

Sound Principles.  
Good Advice.

