

浅海负跃层平均混响强度的垂直结构

李玉昕、李志宽、杨颐华

(中国科学院北海研究站)

本文对浅海负跃层条件下平均远程海底混响强度进行了计算,并与实验结果进行了比较,计算公式与实验结果符合较好。实验与计算说明,在海面比较平静的情况下,浅海混响强度主要决定于海底的散射强度。当收、发合置于负跃层之上时,远程平均混响强度按 t^{-5} (t 表示发射后的时间)变化;当收、发合置于负跃层之下层时,平均远程混响强度按 $t^{-2.5}$ 至 t^{-3} 变化;当收、发铅直分置于负跃层之上、下时,混响强度是互易的。根据浅海负跃层混响的特点,提取了小掠射角海底反向散射强度。

一、引言

众所周知,混响级是声纳方程的一个重要参数,它对声纳性能预报具有重要意义。自1975年至1980年底,我们在黄海、渤海进行了大量的混响实验测量。该海区在夏、秋两季呈现声速负跃变层,当声波穿过负跃层传播时产生折射和跃层的反射效应,这种效应使得平均混响强度及其衰变规律表现出与等速情况时(即等速层)有显著的区别。而且,当发射器和水听器合置或铅直分置于负跃层之上、下水层时,平均混响强度也是不相同的。

本文使用射线方法,在不对海底散射模型作特别假定的情况下,得出了浅海负跃层平均远程海底混响强度的公式,与[1]的两种海底散射模型的结果一致,与负跃层传播的理论计算及实验结果相符合。

二、浅海负跃层条件下远程混响强度的计算

假定水文条件为负跃层,海面平静,忽略海面散射的影响,海面强度反射系数为1。令离源1米处的源强为1,收、发皆无方向性。对海底不作特别假定,令有效海底反射系数为 $|V(\theta_2)|$,海底散射强度为 $\alpha_b(\theta_2, \theta_2')$, θ_2 表示射线在海底的入射角, θ_2' 表示海底的散射角。发射信号为 τ 毫秒的正弦脉冲,其它假设条件按文献[1]。

1、收、发合置于负跃层之上时远程海底平均混响强度的表达式

(1)射线描述(见图1)。

设收、发(R'、S)合置于负跃层之上层,接近水面放置。令出射角为 θ_1 ,射线经负跃层折射至海底,与海底夹角为 θ_2 , $\theta_2^2 \approx \theta_1^2 + 2a\Delta h$, $a = \frac{1}{c_2} \cdot \frac{\Delta c}{\Delta h}$, $\Delta c = c_1 - c_2$, c_1 、 c_2 分别表示负跃层上、下层的声速。当出射角小于临界角 θ_p 时, $\theta_2 \approx \theta_p \approx \sqrt{\frac{2\Delta c}{c_0}}$, c_0 表示平均声速。

对远程混响而言,射线经 m 次弹跳至海底散射区,由海底散射后又经 n 次弹跳返回接收器R'。令S、R'至海底某一散射点的水平距离为R,则:

$R \approx R_m \approx R_n \approx (2m+1) \cdot r \approx (2n+1)r^{[1]}$,其中 r 为由声源至海底第一次弹跳点($m=0$)的水平距离。

(2) 负跃层上发上收时远程平均混响强度的表达式。

依射线路径, 可写出负跃层上发上收时远程海底平均混响强度 $I_{b上,上}$ 的表达式:

$$I_{b上,上} = 4 \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \left[\frac{F_{13} \cdot |V(\theta_{2m})|^{2m}}{R_m^2} \cdot \frac{F_{31} \cdot |V(\theta'_{2n})|^{2n}}{R_n^2} \cdot \alpha_b(\theta_{2m}, \theta'_{2n}) \cdot A_{mn} \right] \quad (1)$$

其中,

$$F_{13} \approx \frac{(2m+1)h_1}{R_m} \cdot \frac{1}{\theta_p}$$

$$F_{31} \approx \frac{(2n+1)h_1}{R_n} \cdot \frac{1}{\theta_p}$$

考虑远程情况, 只有小出射角的声线对混响有贡献。当出射角 $\theta_1 < \theta_p$ 时, 射线与海底夹角恒定, $\theta_2 \approx \theta_p$ 。经海底散射后返回接收器 R' 的声线也只能是散射角大于 θ_p 的射线, 所以入射角 θ_2 与散射角 θ_2' 都等于临界角。并且, $\alpha_b(\theta_{2m}, \theta'_{2n})$ 等于 $\alpha_b(\theta_p)$, $|V(\theta_2)|$ 等于 $|V(\theta_p)|$ 。(1)式中其它的量为:

$$A_{mn} = \pi R c_2 \tau$$

$$R \approx R_m \approx R_n \approx \frac{1}{2} c_2 t^{[1]}$$

式中 t 表示发射结束后某一时刻。

将上述各式代入(1)式得:

$$I_{b上,上} \approx 4h_1^2 \pi c_2 \tau \alpha_b(\theta_p) \cdot \left[\frac{1 + |V(\theta_p)|^2}{(1 - |V(\theta_p)|^2)^2} \right]^2 \cdot \frac{1}{R^5 \theta_p^2} \quad (2)$$

(2) 式是在不对海底散射模型作特殊假定的情况下求出的。如果假定海底散射模型为兰贝特散射, 即 $\alpha_b(\theta_p) = \mu \sin^2 \theta_p$, 将 $\alpha_b(\theta_p)$ 及海底反射因子 $Q = \frac{-1_n |V(\theta_p)|}{\theta_p}$ 代入 (2) 式中去, 则可得出[1]的结果。

2. 浅海负跃层上发下收及下发上收时海底平均混响强度及两者比较。

其射线描述见图 2。根据射线路径可以写出负跃层上发下收时平均海底混响强度

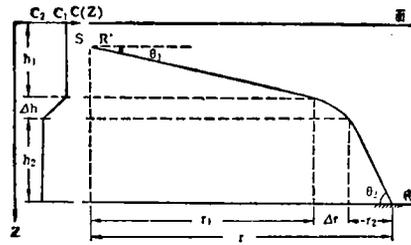


图 1 负跃层上发上收时海底混响的射线图

$$R_m = (2m+1)[r_1 + \Delta r + r_2]$$

$$R_n = (2n+1)[r_1' + \Delta r' + r_2']$$

为:

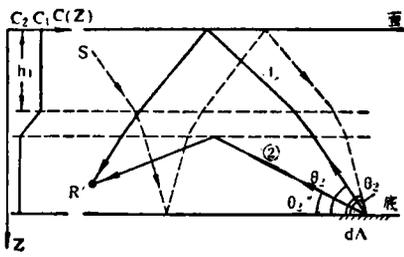
$$I_{b上,下} = 4 \sum_m \sum_{n'} \left[\frac{F_{13} \cdot |V(\theta_{2m})|^{2m}}{R_m^2} \cdot \frac{F_{33} \cdot |V(\theta'_{2n'})|^{2n'}}{R_n^2} \cdot \alpha_b(\theta_{2m}, \theta'_{2n'}) \cdot A_{mn'} \right] + 4 \sum_m \sum_{n''} \left[\frac{F_{13} \cdot |V(\theta_{2m})|^{2m}}{R_m^2} \cdot \frac{|V(\theta''_{2n''})|^{2n''}}{R_n^2} \cdot \alpha_b(\theta_{2m}, \theta''_{2n''}) \cdot A_{mn''} \right] \quad (3)$$

其中, F_{13} 是负跃层的上至下聚集因子, F_{33} 是负跃层的下至下聚焦因子。 $R_m \approx R_n \approx \frac{1}{2} c_2 t$, $A_{mn} \approx \pi R c_2 \tau$, $|V(\theta_{2m})| \approx |V(\theta'_{2n})| \approx |V(\theta_p)|$, 考虑到远程情况 $\alpha_b(\theta_{2m}, \theta'_{2n}) = \alpha_b(\theta_p)$ 。

负跃层下发上收时, 射线路径见图 2 b。同样可写出下发上收时平均海底混响强度的表达式:

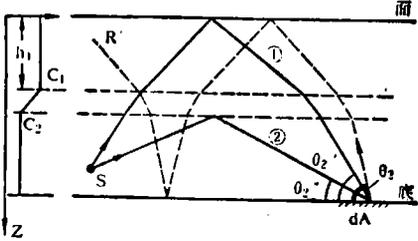
$$I_{b上,下} = 4 \sum_n \sum_m \left[\frac{F_{33} \cdot |V(\theta'_{2n})|^{2n}}{R_n^2} \cdot \frac{F_{31} \cdot |V(\theta_{2m})|^{2m}}{R_m^2} \cdot \alpha_b(\theta'_{2n}, \theta_{2m}) \cdot A_{nm} \right] + 4 \sum_{n2} \sum_m \left[\frac{|V(\theta''_{2n''})|^{2n''}}{R_n^2} \cdot \frac{F_{31} \cdot |V(\theta_{2m})|^{2m}}{R_m^2} \cdot \alpha_b(\theta''_{2n''}, \theta_{2m}) \cdot A_{n''m} \right] \quad (4)$$

比较(3)、(4)式, 考虑到远程时, θ_{2m}



(a) 上发下收时海底混响的路径

①穿透负跃层的声线 ②在负跃层处反转的声线
虚线为由源至海底 dA 处的穿透负跃层的声线



(b) 下发上收时海底混响的路径

①穿透负跃层的声线 ②在负跃层处反转的声线
虚线为由海底 dA 处散射回 R' 的穿透跃层的声线

图2 负跃层上发下收和下发上收时海底混响的路径

$\approx \theta'_{2n} \approx \theta_p$, $A_{mn'} = A_{n'm}$, $F_{13} = F_{31} |n'm$, 显然, (3)式与(4)式中的第一项相等, 若第二项中的 $\alpha_b(\theta''_{2n'}, \theta_{2m})$ 与 $\alpha_b(\theta_{2m}, \theta''_{2n'})$ 相等, 则 $I_{b\downarrow, \uparrow}$ 应等于 $I_{b\uparrow, \downarrow}$. 而

$$\alpha_b(\theta_{2m}, \theta''_{2n'}) = \alpha_b(\theta_p, \theta''_{2n'})$$

$$\alpha_b(\theta''_{2n'}, \theta_{2m}) = \alpha_b(\theta''_{2n'}, \theta_p)$$

上式中 $\alpha_b(\theta_p, \theta''_{2n'})$ 表示入射角为 θ_p 、散射角为 $\theta''_{2n'}$ 的海底散射强度。而 $\alpha_b(\theta''_{2n'}, \theta_p)$ 表示入射角为 $\theta''_{2n'}$ 、散射角为 θ_p 的散射强度。根据互易原理, 两者应相等, 即

$$\alpha_b(\theta_p, \theta''_{2n'}) = \alpha_b(\theta''_{2n'}, \theta_p)$$

于是, $I_{b\uparrow, \downarrow} = I_{b\downarrow, \uparrow}$.

如果按照文献[3]的经验海底散射模型来分析, 当兰贝特散射时,

$$\alpha_b(\theta_p, \theta''_{2n'}) = \mu \sin \theta_p \sin \theta''_{2n'}$$

$$\alpha_b(\theta''_{2n'}, \theta_p) = \mu \sin \theta''_{2n'} \sin \theta_p$$

于是, $\alpha_b(\theta_p, \theta''_{2n'}) = \alpha_b(\theta''_{2n'}, \theta_p)$, $I_{b\uparrow, \downarrow} = I_{b\downarrow, \uparrow}$, 是符合互易原理的。但在“均匀”散射时,

$$\alpha_b(\theta_p, \theta''_{2n'}) = \mu \sin \theta_p$$

$$\alpha_b(\theta''_{2n'}, \theta_p) = \mu \sin \theta''_{2n'}$$

由图3看出, $\theta''_{2n'} < \theta_p$, 导致 $I_{b\uparrow, \downarrow}$ 不等于 $I_{b\downarrow, \uparrow}$, 与互易原理相违背。

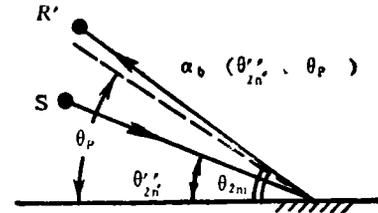
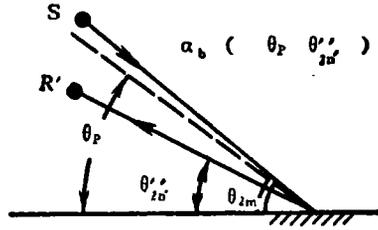


图3 关于散射强度 $\alpha_b(\theta_p, \theta''_{2n'})$ 和 $\alpha_b(\theta''_{2n'}, \theta_p)$ 的示意图

3. 收、发合置于负跃层之下时远程平均海底混响强度。

其射线路径见图4。为了便于分析, 假定 $\Delta h \rightarrow 0$, 将跃层视为“理想跃层”。据此可以写出负跃层下发下收时远程平均海底混响强度的表达式:

$$I_{b\downarrow, \uparrow} = \sum_m \sum_n \left[\frac{F_{33} \cdot |V(\theta_p)|^{2m}}{R_m^2} \cdot \frac{F_{33} \cdot |V(\theta_p)|^{2n}}{R_n^2} \cdot \alpha_b(\theta_p, \theta_p) \cdot A_{mn} \right] + 2 \sum_m \sum_{n'} \left[\frac{F_{33} \cdot |V(\theta_p)|^{2m}}{R_m^2} \cdot \frac{|V(\theta_{2n'})|^{2n'}}{R_{n'}^2} \cdot \alpha_b(\theta_p, \theta_{2n'}) \cdot A_{mn'} \right] + 2 \sum_m \sum_{n'} \left[\frac{|V(\theta_{2n'})|^{2n'}}{R_{n'}^2} \cdot \frac{F_{33} \cdot |V(\theta_p)|^{2m}}{R_m^2} \cdot \alpha_b(\theta_{2n'}, \theta_p) \cdot A_{n'm} \right] + 4 \sum_{n'} \sum_{n''} \left[\frac{|V(\theta_{2n'})|^{2n'}}{R_{n'}^2} \cdot \frac{|V(\theta_{2n''})|^{2n''}}{R_{n''}^2} \cdot \alpha_b(\theta_{2n'}, \theta_{2n''}) \cdot A_{n'n''} \right]$$

$$\cdot \frac{|V(\theta_{2n}')|^{2n''}}{R_{2n}^2} \cdot \alpha_b(\theta_{2n}', \theta_{2n}'')$$

$$\cdot A_{n' n''}] \quad (5)$$

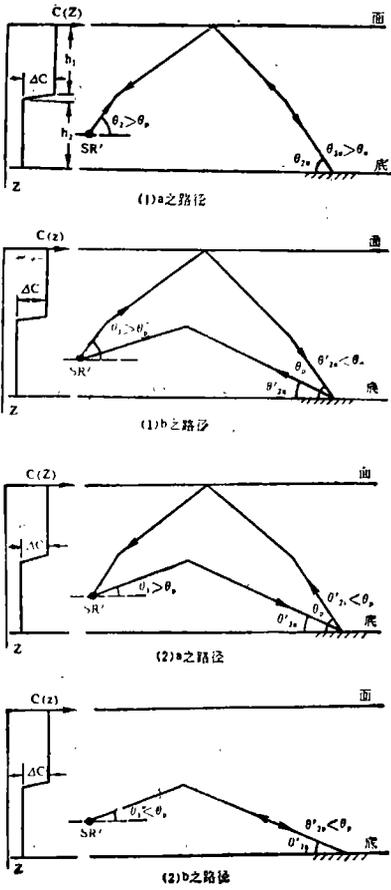


图4 收发合置于负跃层之下层时的海底散射路径

b之路径的入射角及散射角。

A_{mn} 、 A_{mn}' 、 $A_{p'm}$ 、 $A_{n'n}''$ 分别表示按图4中相应的路径，脉宽为 τ 毫秒的声脉冲所形成的海底散射面积。

(5) 式中 F_{33} 是负跃层条件下，下至下的聚焦因子，见图5。

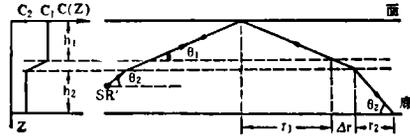


图5 负跃层下发下收时的第一种混响路径

$$F_{33} = \frac{R_m}{\partial R_m / \partial \theta_2 \cdot \sin \theta} \quad [4]$$

对于远程情况很易得出：

$$F_{33} = \frac{4m^2 h_1^2}{\theta_p^2 R_m} \quad (6)$$

于是，可以得出(5)式中第一项的结果：

$$\sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \left[\frac{F_{33} \cdot |V(\theta_{2m})|^{2m}}{R_m^2} \cdot \frac{F_{33} \cdot |V(\theta_{2n})|^{2n}}{R_n^2} \cdot \alpha_b(\theta_{2m}, \theta_{2n}) \cdot A_{mn} \right]$$

$$= \frac{16h_1^4 \alpha_b(\theta_p) \pi c \tau}{R^7 \theta_p^4}$$

$$\cdot \frac{|V(\theta_p)|^2 \cdot (1 + |V(\theta_p)|^2)}{(1 - |V(\theta_p)|^2)^3} \quad (7)$$

由(7)式看出，(5)式中的第一项按 t^{-7} 变化，衰减得很快。(5)式中的第四项是海深为 h_2 的均匀层混响的结果，通常按 $t^{-2.5}$ 至 t^{-3} 衰变 [2]。而第二、三项的衰减速率介于上述两者之间。因此，收、发合置于负跃层之下层时(收、发皆无方向性)，其远程平均海底混响的衰减规律取决于(5)式中的第四项。另外，这里得到一个有趣的结果，即收、发皆无方向性并且它们合置于负跃层之下层时，其远程平均海底混响强度等效于有指向性的源和有指向性的接收器在均匀层的结果。其收、发联合束宽 θ_0 (垂直平面) 等于临界角 θ_p ，而在水平方向无方向性，这对于

(5)式中 R_m 表示由源出发，按图4、(1)、a 路径，在上、下两界面之间经 m 次弹跳至海底散射区的水平距离。

R_n' 表示按图4、(2)、a 之路径，在跃层和海底之间经 n' 次弹跳至海底散射区的水平距离，也表示按图4(1)、(b)之路径由海底散射区返回接收器的水平距离。

R_n 表示按图4(1)、a 路径，由海底散射区返回接收器的水平距离。

R_n'' 表示按图4、(2)、b 之路径，由海底散射区在跃层与底之间经 n'' 次弹跳返回接收器的水平距离，取 $R_n'' \approx R_n'$ ， $R_m \approx R_n$ [2]。

θ_{2n}' 、 θ_{2n}'' 分别按图4、(1)b, (2)a, (2)

研究低频小掠射角海底散射强度具有实际意义。其一，这类混响是由小于 θ_p 的小掠射角的声线所贡献。其二，它避开了海面的影响。

三、实验结果

本文总结了自1975年至1980年五次海上实验结果(水文条件见图6)。声源为定深爆炸声源，其爆炸深度分别为7米、25米、50米。在测量混响的同时，测量了声源级。数据处理采用丹麦2112频分仪，用2305声级记录仪记录混响曲线。

图6~8中的混响曲线，已扣除了声吸收，扣除了声源级，并对混响尾进行了扣除噪声的修正。

通过实验看出，海面较为平静时，浅海负跃层混响以海底混响为主。实验与理论说明：

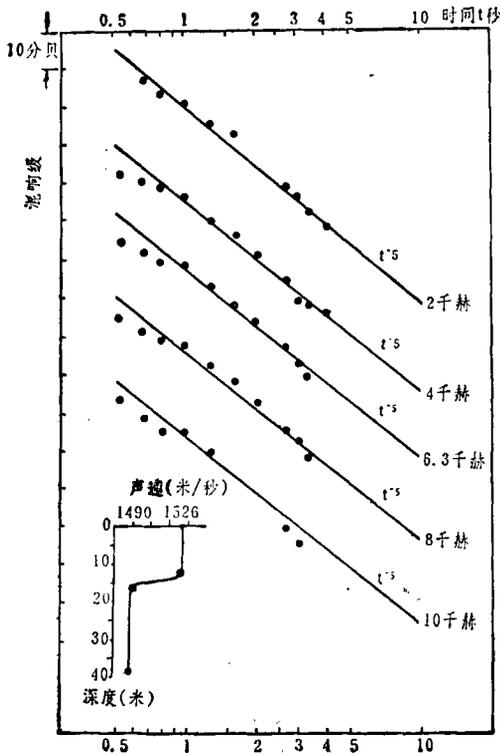
1. 当收、发合置于负跃层之上时(见图6, 实验1、2、3、4), 远程平均混响强度按 t^{-5} 衰减, 而近程混衰缓慢, 类似均匀层。从近程混响转到远程混响取决于海底的底质和频率。由图5看出, 在频率低于2千赫时, 混响强度随时间的衰变率低于负五次方。实验结果与(2)式一致, 与文献[1]的结论一致, 与传播理论计算和实验相符合。

2. 收、发合置于负跃层之下时, 平均远程混响强度按 $t^{-2.5}$ 至 t^{-3} 衰变。

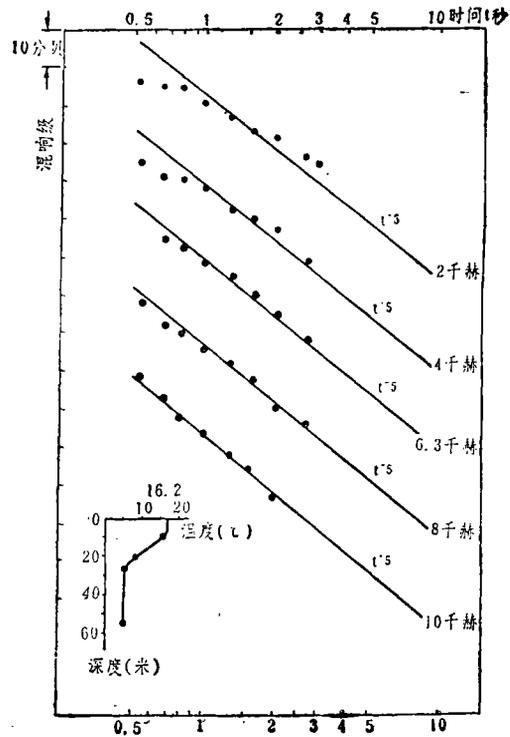
实验结果见图7、实验1。由图7看出, 其跃层厚度 $\Delta h=4$ 米, $\Delta c=36$ 米/秒, 可近似视为“理想跃层”。其平均远程混响强度按 $t^{-2.5}$ 至 t^{-3} 规律衰变, 符合(5)式的结论, 与文献[2]均匀层的结果一致。

3. 负跃层上发下收和下发上收时平均混响强度的比较。

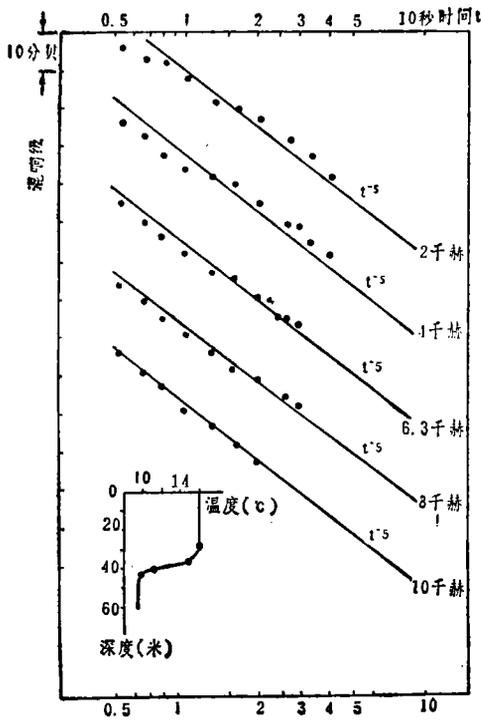
由图8实验2、实验4看出, 负跃层上发下收的平均混响强度与下发上收时没有明



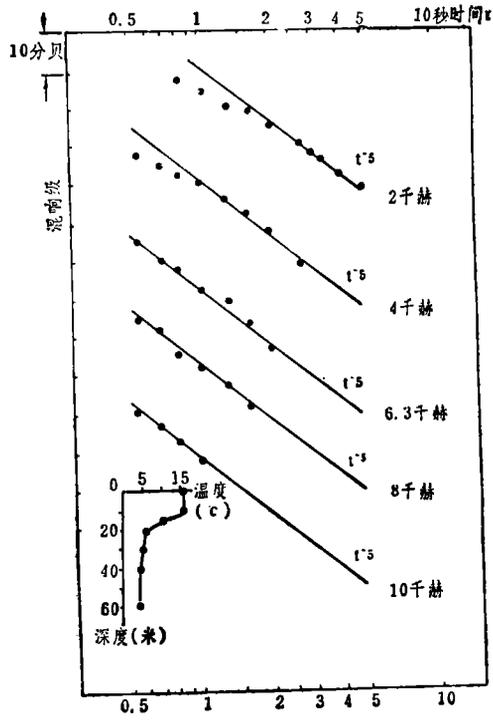
a—实验1



b—实验2



c—实验 3



d—实验 4

图 6 负跃层上发上收时平均混响级

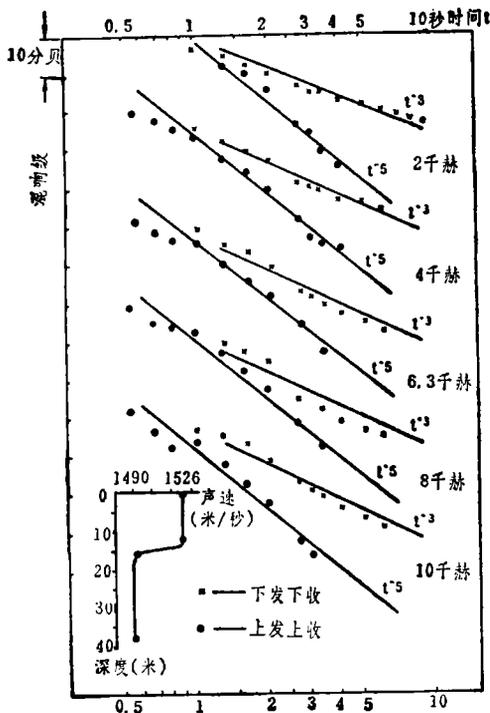


图 7 负跃层上发上收与下发下收平均混响衰减规律的比较(实验1)

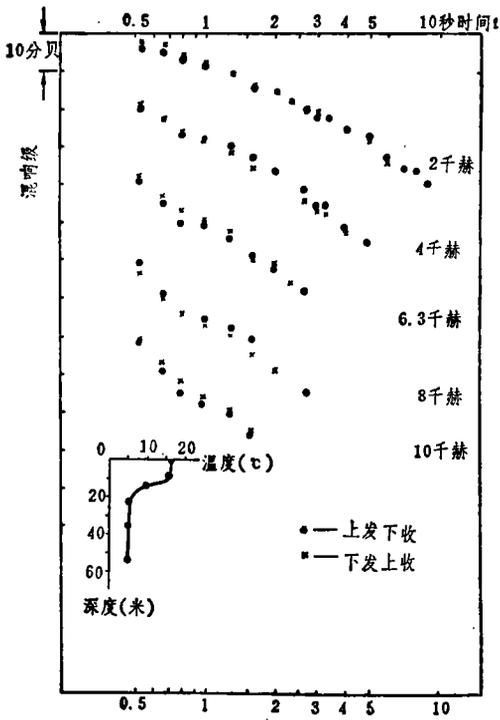
显的差别,显然这是符合互易原理的,这与(3)、(4)式的分析一致。

4. 利用浅海负跃层条件下混响强度的测量,提取小掠射角的海底反向散射强度。

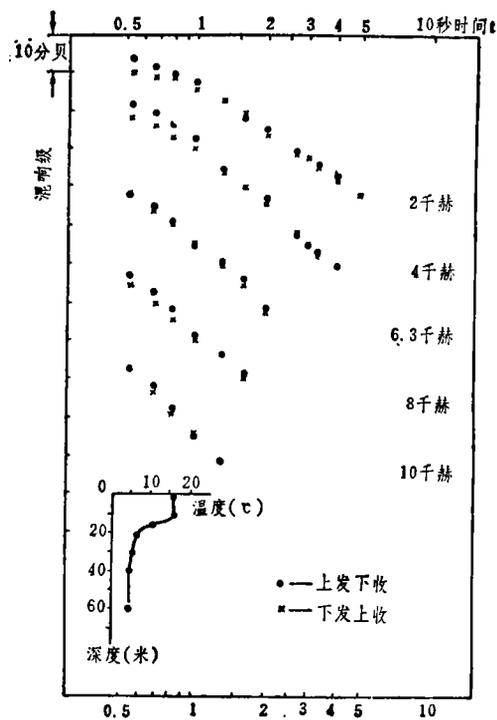
低频小掠射角海底反向散射强度的测量是十分困难的,国外多是在深海进行测量。近几年来我们利用浅海均匀层混响的测量反推出小掠射角下海底反向散射强度。但是,利用浅海负跃层混响的测量,可以得到更多的海底散射信息。

以图 6、实验 3 为例。水文条件为声速负跃变层,水深 60 米,泥底。收、发在负跃层之上层(在水下 6 米处), $h_1=37$ 米, $c_2=1486$ 米/秒,临界角 $\theta_p=9^\circ$, 测量的 $|V(\theta_p)| \approx 0.53$ 。发射 1 秒后 10 千赫的混响级 = -115.5 分贝(已扣除声源级、声吸收,并折合到 1 毫秒的脉宽)。

利用(2)式,可得出海底反向散射强度:



a—实验 2



b—实验 4

图 8 负跃层上发下收与下发上收混响级的比较

$$S_b(\theta_p) = 10 \log \alpha_b(\theta_p) \\ = 10 \log I_{b_{上、上}} - 10 \log(4h^2_1 \pi c_2 \tau) \\ + 20 \log \theta_p - 20 \log \left[\frac{1 + |V(\theta_p)|^2}{(1 - |V(\theta_p)|^2)^2} \right] \\ + 50 \log R$$

将以上各量代入上式得:

$$S_b(\theta_p) \approx -39.6 \text{ 分贝}$$

上述结果与同时用脉冲声(10千赫,脉宽1毫秒)直接测出的海底反向散射强度 $S_b(\theta_p) \approx -41$ 分贝可视为一致。

四、结 束 语

本文在射线理论近似下,对浅海负跃层混响的垂直结构实验做了分析,理论与实验符合较好。特别当收发合置于负跃层之上时

符合更好些,并且可由实测的混响级 $RL_{上上}$,根据(2)式提取小掠射角的海底反向散射强度。通过混响的互易性实验,验证海底散射模型应服从互易原理。

作者谨向曾对本文提供过宝贵帮助的同学表示感谢。

参加实验和数据处理的还有董仲奎同志。

参 考 文 献

- [1] 吴承义,《用射线方法计算浅海混响平均强度(I)》,声学学报,(1980),No.3,211—219.
- [2] 吴承义,《用射线方法计算浅海混响平均强度(I)》,声学学报,(1979),NO.2,114—119.
- [3] Mackenzie, K. V., *Long-range Shallow-water Reverberation* J. A. S. A., 31(1962), 62.
- [4] JI. M. 布烈霍夫斯基赫,《分层介质中的波》,科学出版社,1960.