

浅海表面声道中的低频简正波

朱柏贤 林书金
(中国科学院东海研究站)

采用时域和时/空域分离的方法,在实际海洋传播条件下进行简正波分离。当频率足够低时,在浅海表面声道中可得到海底反射类型的单个简正波。通过研究这类简正波的频率特性与海底声学参数的关系,可以对海底的声学参数作出估计。

一、引言

在海洋声传播的各种情况中,近年来浅海声波传播受到了人们最大的关注。可以看到,大量的文献讨论了浅海声波传播。研究浅海声传播时理论上的困难是在于边界同声波相互作用的复杂性。但是,只要对边界作某种适当的简化还是可以得到一些有用的结果。文献^[1,2]讨论了浅海表面声道的简正波声场。为了分析海底与声波的互作用,研究单个简正波显然要比研究整个简正波场具有更大的优越性^[3]。本文应用时域和时/空域分离的方法对于浅海表面声道在31.5—200赫的频率范围内获得海底反射类型(乙类)的单个简正波。通过研究这类单个简正波的频率特性与海底声学参数的关系,可以对海底的声学参数作出估计。

二、实验结果

在海上采用双船进行浅海爆炸声传播实验。接收船在预定点抛锚,用录音机记录宽带声信号。发射船按预先规定的投弹方案投放爆炸声信号弹。爆炸声源深度与接收器深度相同,

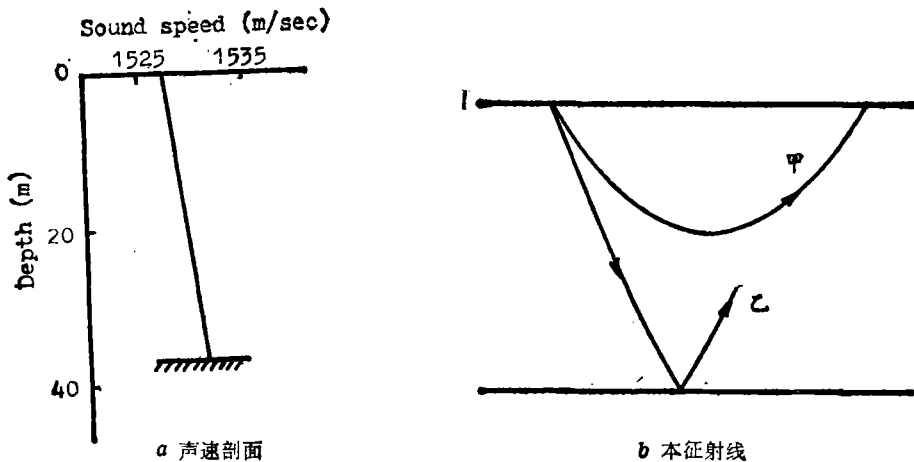


图1 浅海表面声道

约为25米。此外，在几个选定的距离上记录了声场垂直分布。实验期间在不同时间和不同地点对环境参数所作的测量可知，实验海区的平均水深约为37米，平均声速剖面为图1左部所示之表面声道，其声速梯度 $a=5.306 \times 10^{-5}$ (1/米)，海面声速 $c_0=1528$ (米/秒)。在图1右部画出了表面声道中可能存在的两类简正波所对应的本征射线，甲类本征射线未经海底反射，而在水层内反转；乙类本征射线经受海底反射。显然，在表面声道中为了研究海底与声波的相互作用，必须设法在实验上分离出乙类简正波。为此目的，在实验室采用类似于文献^[3]所使用的信号处理方法，并选择滤波器的中心频率小于波导的临界频率 $f_c=9C_0/8H\sqrt{8aH}$ 。对于图1所示之声速剖面， f_c 约等于370赫。磁带回放时分两路输出，其中一路输出信号的频率为315赫，而另一路输出信号的频率分别选取31.5，40，63，80，100，125，160和200赫。这两路信号同时输入到记忆示波器，读取低频信号波形的振幅 A_0 及相对于频率为315赫信号的传播时间差 Δt 。此外，根据磁带记录的声场垂直分布，还可得到确定距离上(时域上可分离)单个简正波振幅随深度的变化。由此可以得到不同频率的简正波强度 $I=20\log A_0$ 。把各个距离 r 上的强度值加上 $10\log r$ ，用线性坐标画在图2中，应用线性回归方法得到直线的斜率 K_i (分贝/公里)，而简正波的指数衰减因子 $\beta=|K_i|/8.686$ (1/公里)。表1列出了根据实验点得到的 K_i 值以及对应的 β 值。在图3中用不同符号点出了各个频率($\Delta t, r$)的实验值。同样，可以得到直线的斜率 K_i (毫秒/公里)，其数值也列在表1中。最后，在图4中给出了在13公里距离上，第一个简正波($\frac{\pi}{2} < k_z H < \pi$)相对于某一固定深度的振幅垂直分布。

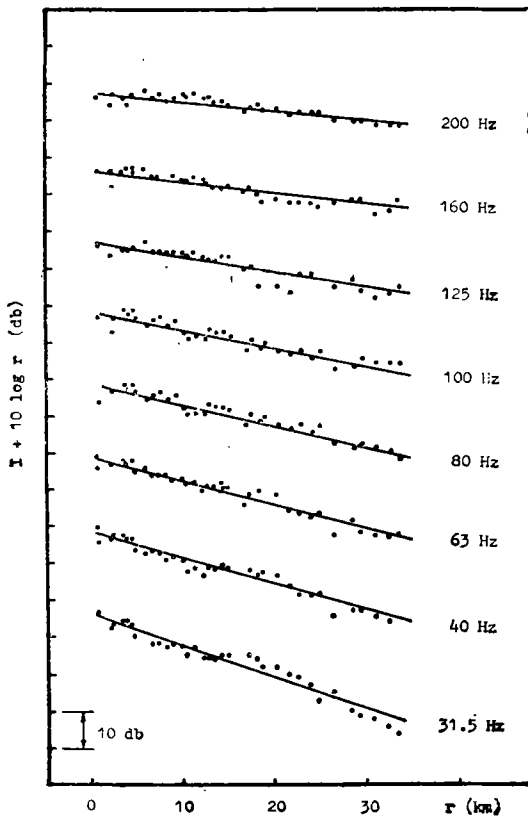


图2 各频率简正波强度随距离的衰减

三、理论计算

在图1所示的介质模型中，海水声速 $C(z)$ 是深度 z 的线性函数，密度为常数 ρ 。海底假定为液态均匀半空间，其密度和声速分别为 ρ_1 和 C_1 ，其中 $C_1=C_0(1-iA)$ 。由上所述，我们感兴趣的是乙类简正波，根据简正波理论^[2]，乙类简正波的本征值 $\mu_1 + i\beta_1$ 由下面方程式确定

$$\int_0^H (k^2(y) - \mu_1^2)^{1/2} dy = \left(l + \frac{1}{2}\right) \pi + \frac{1}{2} \varphi(\mu_1), \quad (1)$$

$$\beta_1 = -\ln |V(\mu_1)| / (D_1 + d_1) \quad (2)$$

本征函数为

$$Z(z, \mu_1) = \sqrt{\frac{2}{D_1 + d_1}} \cdot \frac{\sin[\int_0^z (k^2(y) - \mu_1^2)^{1/2} dy]}{(k^2(z) - \mu_1^2)^{1/4}} \quad (3)$$

简正波在水中传播的群速度为

表1 各频率简正波 K_1 和 K_2 的实验值

f(赫)	31.5	40	63	80	100	125	160	200
K_1 (分贝/公里)	-0.827	-0.741	-0.622	-0.510	-0.358	-0.305	-0.258	-0.200
β (1/公里)	0.0952	0.0853	0.0716	0.0587	0.0412	0.0351	0.0297	0.0230
K_2 (毫秒/公里)	10.15	9.65	5.73	4.97	2.80	1.80	1.50	0.61

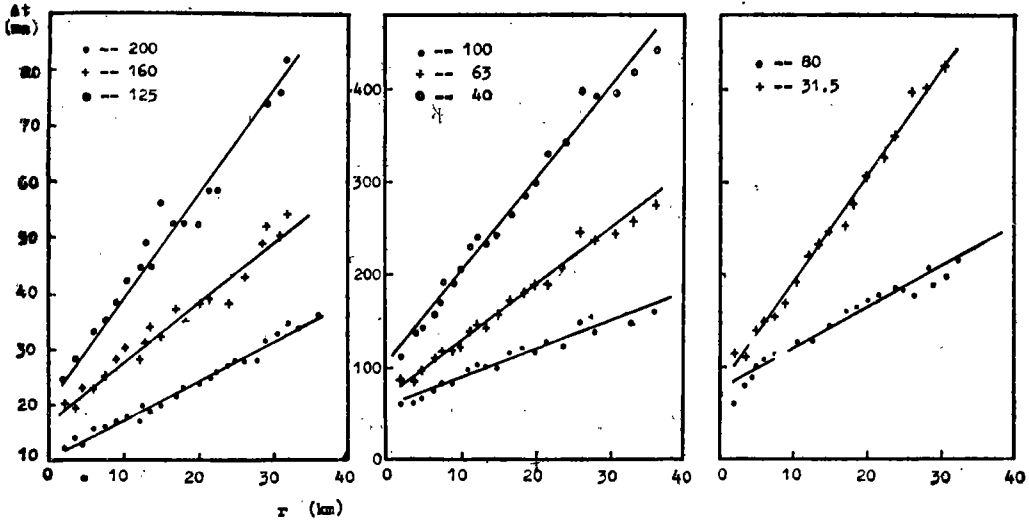


图3 各频率简正波的 Δt - r 依赖关系

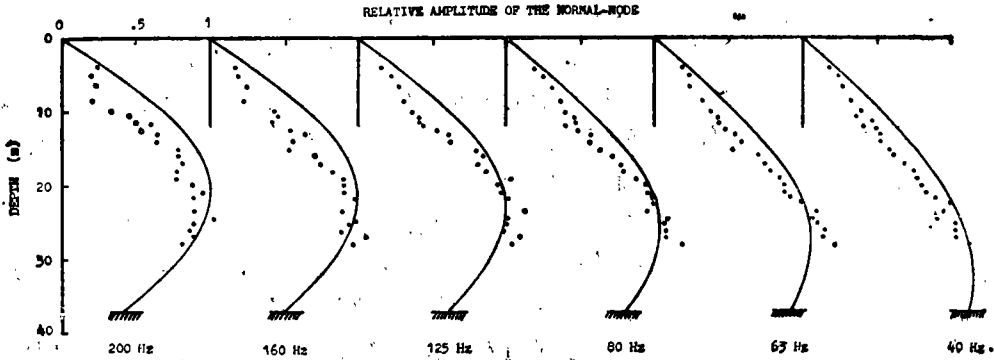


图4 简正波的相对振幅垂直分布随频率的变化

$$U_l = (D_l + d_l) / (T_l + t_l) \quad (4)$$

这里 D_l 是号码为 l 的本征射线的跨距, T_l 是沿该射线的传播时间, 它们分别等于

$$D_l = \int_0^H \frac{2\mu_l dz}{(k^2(z) - \mu_l^2)^{1/2}}, \quad (5)$$

$$T_l = \int_0^H \frac{2k(z) dz}{C(z)(k^2(z) - \mu_l^2)^{1/2}} \quad (6)$$

d_l 和 t_l 由下面关系式给出

$$d_i = \left(\frac{\partial \varphi}{\partial \mu} \right)_{\mu_i}, \quad t_i = - \left(\frac{\partial \varphi}{\partial \omega} \right)_{\mu_i} \quad (7)$$

在上列公式中 $|V(\mu_i)|$ 和 φ 分别是海底反射系数的模和幅角, 即 $V(\mu_i) = |V(\mu_i)| \exp(-i\varphi(\mu_i))$, H 是海深。当信号频率较低时, 出现在公式(2), (3)和(4)中的 d_i 和 t_i 是不能忽略的。若海底为液态均匀半空间, 利用公式(7), 计算可得

$$d_i = I_m(iF(\alpha_i)/k), \quad (8)$$

$$t_i = I_m(iF(\alpha_i)\cos\alpha_i/\omega), \quad (9)$$

$$F(\alpha_i) = \frac{2m(1-n^2)}{\tan\alpha_i(m^2\sin^2\alpha_i + \cos^2\alpha_i - n^2)(\cos^2\alpha_i - n^2)^{1/2}} \quad (10)$$

其中 $k = \omega/c$, $n = c/c_1$, $m = \rho_1/\rho$, $\omega = 2\pi f$, f 为声波的频率, c , ρ 和 c_1 , ρ_1 分别是海底上、下介质中的声速和密度。令信号频率 $f = 315$ 赫的简正波群速度为 U_0 , 而其余各频率简正波的群速为 U , 则相对于315赫信号的传播时间差为

$$\Delta t = K_i r$$

$$K_i = (U_0/U - 1)U_0. \quad (11)$$

这里 r 是声源与接收点之间的水平距离, 简正波的群速按公式(4)计算。

四、数值结果和讨论

根据对实验海区现场状况的了解, 海底质地较硬, 属高声速类型。由于缺乏海底物理参数的直接测量资料, 我们参考某些有关的测量结果^[4,5], 选取 $m = 1.745$, $n = 0.9433$ 及不同的 A 值进行数值计算, 海水声速剖面则利用图1所示之现场测量结果。利用公式(1)—(11), 对不同信号频率计算得到简正波的 β_i , K_i 和 $Z(z, \mu_i)$ 。数值计算表明, 对于上述信号频率一般都不能忽略公式(7)所给出的修正值, 尤其是对于计算简正波的指数衰减因子。

图4中的实线是理论计算得到的第一个简正波的相对振幅随深度的变化。由于实验布设上的一些原因, 实验点的分布尚欠理想, 但总的说来, 实验点与理论曲线还是比较符合的。可以看到, 随着频率的降低水层中简正波的能量逐渐向海底转移。另外, 海底声速的虚部 A 对简正波相对振幅随深度的变化没有显著的影响。从简正波理论这是可以预见到的。

图5给出了计算得到的简正波指数衰减因子随频率的依赖关系, 其中 A 取值范围为0.002—0.006。可以看到, 简正波衰减因子随 A 的变化是很敏感的, 对于给定的 A 值, 简正波衰减因子的计算值随频率的降低而增大, 也即随着波长的增大, 穿入海底的能量就增大, 从而引起水层中传播的简正波衰减因子的增大。把表1中 β 的实验值点在该图中, 可看出实验点并不落在一条曲线上, 这表明, 一般不能用一个 A 值来计算不同频率的简正波衰减因子。

图6的实线是理论计算得到的 K_i 值随频率的变化, 各曲线对应于不同的 A 值, “+”号是 K_i 的实验值(见表1)。数值计算表明, 对于频率大于60赫的信号当 A 的数值从0.001变化到0.016时, K_i 的数值基本上没有什么变化。随着频率的降低本征值所对应的掠角 α_i 接近于海底的临界角, 这时计算群速的近似公式(4)就不再适用, 在图6中我们用虚线表示 K_i 的可能变化趋势。从图6看, 实验点的分布靠近参数 A 取值为 10^{-3} 量级的理论曲线, 这与分析简正波衰减因子得到关于参数 A 的信息相一致。

以上讨论了水层中传播的单个简正波时间信息和幅度信息(水平方向和垂直方向)的频率

特性。综合上述实验结果和理论计算，可以得到如下简要结论：采用时域及时/空域分离的方法，在浅海表面声道中可获得乙类单个简正波，在 31.5—200 赫的频率范围内，一般不能忽略公式 (7) 所给出的修正量，尤其是对于计算简正波的指数衰减因子，取 $m=1.745$, $n=0.9433$ ，当信号频率从 200 赫变化到 31.5 赫时，海底声速虚部 A 的数值约由 0.005 逐渐下降到 0.001。按照 Hamilton^[4] 的经验公式 $a=Kf$ ，相当于 K 的数值从 0.202 变化到 0.067。即随着声波波长的增大，

$\beta \times 10^4$ (1/km)

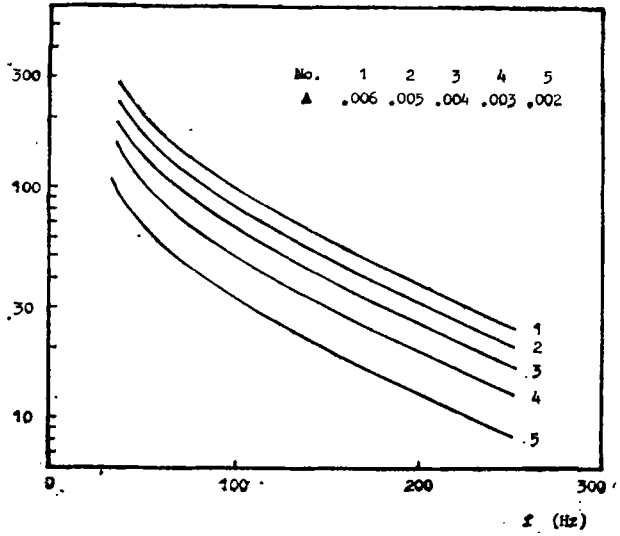


图5 简正波指数衰减因子随频率的变化

K 的数值变小，这与 Hamiton 阐述的关于 K 的数值随海底深度增大而变小的趋势相一致。

作者得到张仁和同志的有益讨论，传播组的同志参加了海上实验，在此一并表示感谢。

参 考 文 献

- [1] Ю. Л. Газарян, Акуст. жур., 2(1956),133-136.
- [2] 张仁和, 物理学报, 24(1975), 200—209.
- [3] 张仁和, 肖金泉, 龚敏, 声学学报, No.2(1980), 7 3-85.
- [4] E. L. Hamilton, Geophy., 37(1972), 620-646.
- [5] E. L. Hamilton, J. Geophy. Rea., 75(1970), 4423-4446.

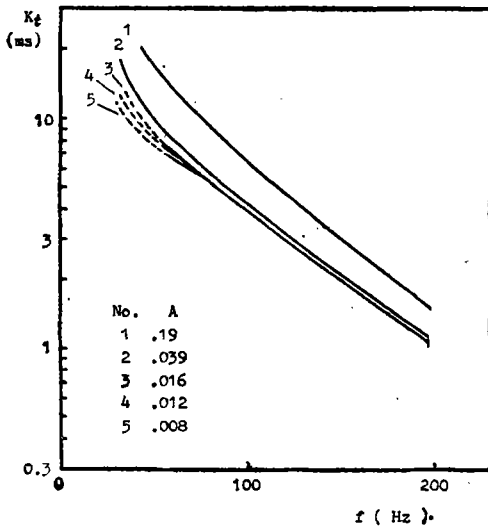


图6 简正波的 K 值随频率的变化