

# 浅海表面声道中的传播损失

蒋继萍

(中国科学院东海研究站)

浅海声传播问题,由于边界的多次反射,使声场的空间结构复杂化。为此采用了空间平滑化的方法计算平均声场,使问题大大简化。同时为了使问题进一步简化,在计算浅海声场时常假设海表面为平坦表面,反射系数的模为1。然而在实际情况下海表面不是平面,海面波浪的起伏大小直接影响海面的反射系数,不能简单地当作1,特别是在浅海表面声道情况下,海面波浪是影响声场的一个十分重要的因素。本文同时考虑了海面和海底的影响,利用平滑平均声场的计速公式<sup>[1]</sup>对浅海表面声道情况进行数值模拟计算,并与实验结果进行了对照,得到了一些有意义的结论。

实验是在海底底质为沙夹贝壳的海区进行的。海水的平均相对声速梯度为  $a = 0.53 \times 10^{-4} \text{ 米}^{-1}$ 。相应的波导临界频率由公式:

$$f_K = \frac{9C_s}{8h\sqrt{8ah}} \quad (1)$$

计算<sup>[2]</sup>。式中  $C_s$  为海面声速,  $h$  为海深,  $a$  为声速梯度。由(1)式算得临界频率为 370 Hz。

实验时使用的爆炸声源是 25 米深水声信号弹,接收深度为 25 米。对所获得的实验记录磁带,在实验室进行了回放处理,处理框图如下:



图1 记录信号的回放处理

整理得到的 0.5, 0.7 和 1.0 KHz 的测量结果绘于图 3 (以小黑点表示)。

计算平滑平均声强的公式为<sup>[1]</sup>:

$$I = \frac{2}{r} \left[ \frac{C(Z_1)C(Z_2)}{C_s^2} \right] \int_{\alpha_{S0}}^{\pi/2} \quad (2)$$

$$\frac{\sin(2\alpha_s) \exp[-2\beta(\alpha_s)r] d\alpha_s}{S(\alpha_s)[D(Z_1) + \sin^2\alpha_1]^{1/2}[D(Z_2) + \sin^2\alpha_2]^{1/2}}$$

式中  $C_s$  为海面声速,  $Z_1, Z_2$  分别为发射和接收深度。  $\alpha_1, \alpha_2$  为本征声线在发射与接收深度的掠角,  $\alpha_s$  是本征声线在海面的掠角。  $S(\alpha_s)$  是本征声线的跨度。函数  $D(Z)$  是声速梯度  $dC(Z)/dz$  和频率  $f$  的函数:

$$D(Z) = 0.875 \left| \frac{1}{\pi f} \frac{dC(z)}{dz} \right|^{2/3} \quad (3)$$

指数衰减系数  $\beta(\alpha_s)$  与海面、海底反射系数  $V_S(\alpha_s), V_B(\alpha_B)$  及本征声线的跨度  $S(\alpha_s)$  有关:

$$\beta(\alpha_s) = -[\ln|V_S(\alpha_s)| + \ln|V_B(\alpha_B)|] / S(\alpha_s) \quad (4)$$

$\alpha_s$  和  $\alpha_B$  是本征声线在海面和海底的掠角, 有如下的关系:

$$\alpha_B^2 = \alpha_s^2 - 2ah \quad (5)$$

本征声线的跨度  $S(\alpha_s)$  为<sup>[3]</sup>:

$$S(\alpha_s) = 2 \int_0^Z \frac{dz}{\tan \alpha} = 2 \cos \alpha_s \int_0^Z \frac{dz}{\sqrt{n^2(z) - \cos^2 \alpha_s}} \quad (6)$$

式中  $n(z) = C_s/C(z) = 1/(1+az)$ , (6)式积分得反转本征声线的跨度:

$$S(\alpha_s) = \frac{2 \tan \alpha_s}{a} \quad (7)$$

反射本征声线跨度:

$$S(\alpha_s) = \frac{2 \tan \alpha_s}{a} - \frac{2}{a \cos^2 \alpha_s} [1 - \cos^2 \alpha_s (1 + ah)^2]^{1/2} \quad (8)$$

(2) 式中积分下限  $\alpha_s$  是能到达  $Z = \text{Max} \{ Z_1, Z_2 \}$  的本征声线的最小海面掠射角。将(2)式改写为:

$$I_{SF} = \frac{2}{r} \left[ \frac{C(z_1)C(z_2)}{C_s^2} \right] \cdot \left[ \int_{\alpha_{s0}}^{\alpha_{sh}} \phi(\alpha_s) d\alpha_s + \int_{\alpha_{sh}}^{\pi/2} \phi(\alpha_s) d\alpha_s \right] = I_1 + I_2 \quad (9)$$

式中  $\alpha_{sh}$  是在海底反转的本征声线在海面的掠角,  $I_1$  和  $I_2$  分别表示海水中反转的简正波的声强和在海底反射的简正波的声强, 式中被积函数  $\phi(\alpha_s)$  为:

$$\phi(\alpha_s) = \frac{\sin(2\alpha_s) \exp[-2\beta(\alpha_s)r]}{S(\alpha_s)[D(z_1) + \sin^2 \alpha_1]^{1/2}[D(z_2) + \sin^2 \alpha_2]^{1/2}} \quad (10)$$

如果海面波浪满足条件  $k\rho_0 \gg 1$  ( $k$  为声波波数,  $\rho_0$  为海浪相关半径), 在小掠射角情况下, 对于 Pierson-Neumann 海浪谱, 海面的平均声反射系数  $V_s$  为<sup>[3]</sup>:

$$|V_s| = 1 - 0.56(fH)^{3/2} H_{1/10} \sin \alpha_s \quad (11)$$

式中  $H$  为平均海浪波高(谷—峰), 以米为单位,  $H_{1/10}$  为平均 1/10 最高波大, 以米为单位,  $f$  为声波频率, 以千赫为单位。此公式适用于海面不平整性比声波波长小的情况。不同海况下的  $H$  和  $H_{1/10}$  列于表 1<sup>[1, 4]</sup>。

表 1 不同海况下的波高

| 海况(级) | H(米) | $H_{1/10}$ (米) |
|-------|------|----------------|
| 1—2   | 0.3  | 0.6            |
| 3—4   | 0.9  | 1.8            |
| 4—5   | 1.2  | 2.4            |

对于反转简正波, 由(4)式得指数衰减系数为:

$$\beta(\alpha_s) = \frac{-\ln |V_s|}{S(\alpha_s)} \beta_s(\alpha_s) \quad (12)$$

以(7), (11)代入(12)式得:

$$\beta_s(\alpha_s) = 0.28(fH)^{3/2} H_{1/10} a \quad (13)$$

可见在小掠角情况下, 反转简正波的衰减系数  $\beta_s$  是与声波在海面的掠角无关的量。

在非掠射情况下( $k\rho_0 \sin^2 \alpha_s \gg 1$ ), 反射系数  $V_s$ <sup>[3]</sup>:

$$|V_s| = 1 - \frac{(kH \sin \alpha_s)^2}{\pi} \quad (14)$$

对于海底, 目前我们还没有自己直接测量的资料, 用已发表的有关海底反射的资料, 也还没有定量的规律性的描述。因此, 我们参考有关资料, 以三段直线组成的折线段来描述海底反射系数的模(图 2)。这样既能较好地反映海底反射的角度特征, 又使计算简化。表 2 中列出了按三直线模型选取的实验海区的海底反射系数的模。

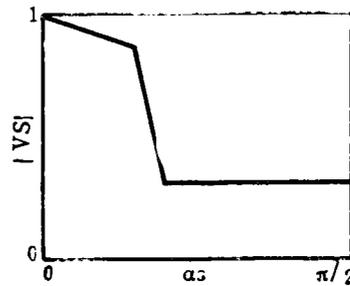


图 2 海底反射系数的模随角度的变化

表 2 海底反射系数

| 掠角<br>频率 | 0° | 20°  | 27°—90° |
|----------|----|------|---------|
| 0.5 仟赫   | 1  | 0.92 | 0.3     |
| 0.7 仟赫   | 1  | 0.9  | 0.3     |
| 1 仟赫     | 1  | 0.8  | 0.3     |

海水吸收损失按 Schulkin-Marsh 公式<sup>[5]</sup>计算。根据(9)式编制了计算机程序,

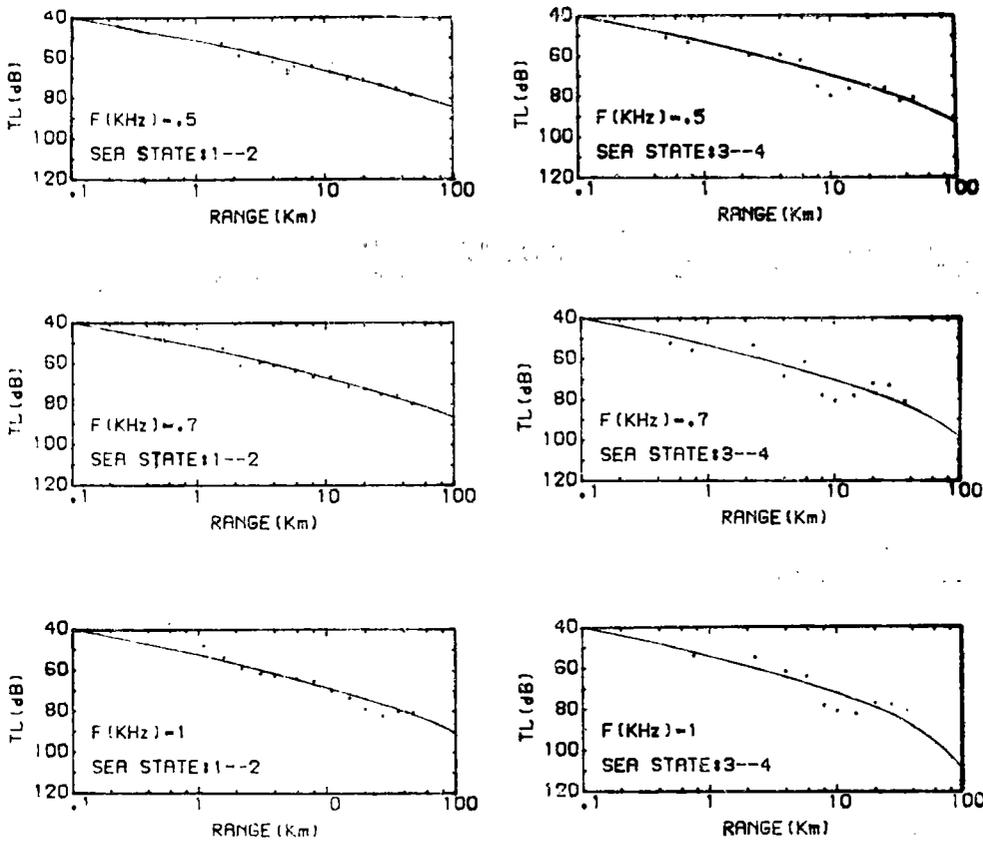


图3 传播衰减曲线

将各有关的参数输入微机，进行模拟计算，在同一海区计算了三个频率（0.5，0.7和1 KHz）。计算结果绘于图3。图中小黑点是实验结果。从图3可以看到计算曲线与实验测量结果符合得相当好。对于1—2海况，均方误差在2dB左右，3—4级海况下，由于测量值本身起伏较大，均方差在5dB左右。

还计算了反射筒正波声强  $I_2$  与反转筒正波声强  $I_1$  之比，定义  $I_2 = I_1$  时的距离为  $R_c$ ，若  $R > R_c$  则声场中反转筒正波占主导地位，声场主要是反转筒正波的贡献。图4中画出了两种不同海况下  $I_2/I_1$  随距离  $R$  变化的曲线。显然在同一海况下频率越高则  $R_c$  越小，亦即波导效应越强。图5和图6分别以频率和海况作参数画出了  $R_c$  的变化，可以看出，在讨论的频段和海况下， $R_c$  与频

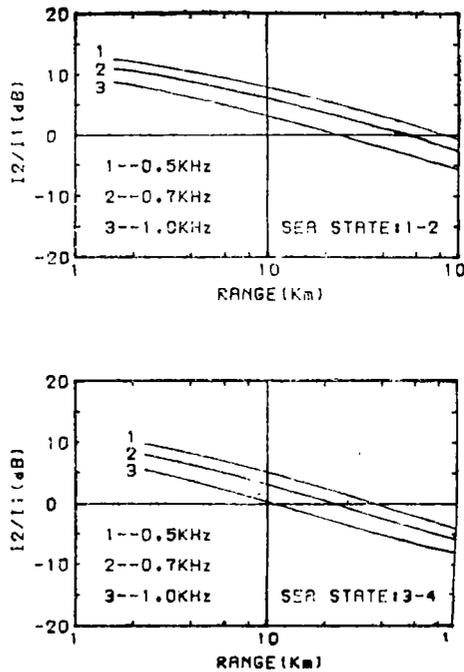


图4  $I_2/I_1$  随距离的变化

表 3

| 海况(级)  | 1—2         | 3—4         | 4—5         |
|--------|-------------|-------------|-------------|
| f(KHZ) | 0.5 0.7 1.0 | 0.5 0.7 1.0 | 0.5 0.7 1.0 |
| Rc(Km) | 80 56 25    | 37 23 11    | 23 13 6.5   |

最后可以得到以下几点结论:

1. 对于浅海表面声道,考虑了海面波浪的反射损失和海水的吸收后,数值模拟方法仍然是一种获得海底反射系数的手段。

2. 在浅海表面声道情况下,即使声波频率高于波导临界频率,在相当大的距离内,反射筒正波声强仍占主导地位,频率越低则反射筒正波起主导作用的距离范围越大,同样海况越低则反射筒正波起主导作用的距离范围也越大。

3. 以三直线模型描述海底反射特性,既能较好地表现出海底的主要特征,又使计算简化,具有实用价值。

### 参 考 文 献

- [1] 张仁和,海洋学报 3(1981), 4, 535—545
- [2] 汪德昭等,“水声学”科学出版社(1981)
- [3] 布列霍夫斯基,“海洋声学”科学出版社(1983)
- [4] 马特维柯著“水声设备作用距离”国防工业出版社 1981年
- [5] Schulkin, M., JASA V.63. No.1. 43 (1978)

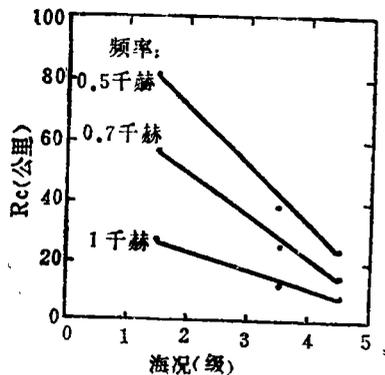


图 5 Rc 随海况的变化

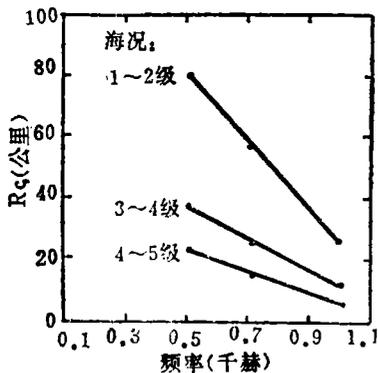


图 6 Re 随频率的变化

率和海况的关系接近于线性变化,对同一频率,海况越高则  $R_c$  越小,这意味着海面反射损失越大则声场中反转筒正波的贡献占的比重越大。表 3 中列出了不同海况和频率下的  $R_c$  值。