

浅海低噪声信道模型

吴 冠 君

(中国科学院声学研究所)

1985年6月14日收到

摘要 本文根据海洋噪声场随机局部谱展开理论,分析了典型浅海负梯度(或负跃层)下低噪声信道的理论模型。结果表明,对于几百赫以上的表面风关噪声,在上述水文分布和广泛的海底类型下,噪声场具有鲜明的低噪声信道特征。

MODELS OF THE LOW-NOISE-CHANNEL IN SHALLOW WATER

WU GUAN-JUN

(Institute of Acoustics, Academia Sinica)

Received June 14, 1985

Abstract Based on the theory of the local spectrum of ambient-sea noise field, theoretical models of the low-noise-channel for typical shallow-water negative gradient (or thermocline) are developed. The results show that, for the wind-related surface noise sources, the noise field at frequencies above a few hundred Hz is clearly characteristic of the low-noise-channel for above-mentioned sea-hydrographic distribution and various sea-bottom types.

一、引 言

海洋环境噪声场作为一个重要的水声干扰场,对水声检测系统的性能影响极大。对于表面风关噪声场,文献[1]、[2]深入研究了海洋环境噪声场的时空统计特性,指出在浅海负梯度(或负跃层)下存在着水声学上的低噪声信道,在此特殊的水声信道中,海洋环境噪声场具有独特的时空统计结构,据此设计的与此信道匹配的声呐系统——低噪声信道系统,具有比通常系统高得多的增益,在上述恶劣条件下仍能获得良好的远程检测性能。

夏季浅海声速分布呈现强烈负梯度(或负跃层),实际海洋条件下可以见到如图1所示的典型声速分布结构。 D_0 可达8—10 m,跃层厚度可达5—10 m, $\Delta c = c_0 - c_D$ 可达30—40 cm/s,跃层下直至海底为均匀层。本文具体分析了典型声速分布下的

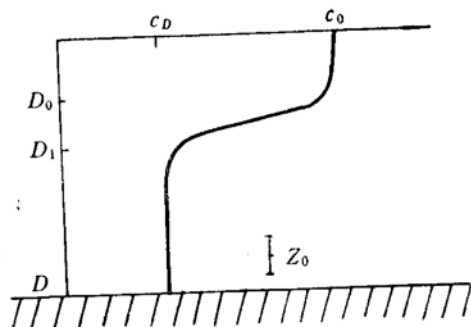


图1 典型夏季浅海声速分布
Typical summer sound speed profile
in shallow water

低噪声信道理论模型。结果表明,对于几百赫以上的表面风关噪声场,在上述水文分布和广泛的海底类型下,具有鲜明的低噪声信道特征。

二、噪声场局部方向性函数

假设海洋噪声源为表面偶极子模型,且在空间上独立。由文献[2]知噪声场时空局部谱展开式为

$$P(x, y, z, t) = \frac{i}{2\pi} \iiint f_{\sigma}(k_x, k_y, i\omega) H(k_x, k_y, z, i\omega) \exp[i(k_x x + k_y y - \omega t)] dk_x dk_y d\omega \quad (1)$$

其中 $f_{\sigma}(k_x, k_y, i\omega)$ 为噪声源时空波数谱。

$H(k_x, k_y, z, i\omega)$ 为传播响应函数,满足波动方程和定界条件:

$$\frac{\partial^2 H}{\partial z^2} + [k^2(z) - (k_x^2 + k_y^2)]H = 0 \quad (2)$$

由图 1 知在跃层下的局部均匀区,具有局部谱尺度函数 $L(D) = D - D_1$, 在 $L(D)$ 内的 z_0 附近可用 W. K. B 近似求解方程 (2), 此时 H 在 z_0 附近可展开成

$$H(k_x, k_y, i\omega) = d_1(k_x, k_y, z_0, i\omega) \exp[ik_z(z_0)(z - z_0)] + d_2(k_x, k_y, z_0, i\omega) \exp[-ik_z(z_0)(z - z_0)] \quad (3)$$

其中 $d_1(\cdot), d_2(\cdot)$ 为平面波展开式系数。由 (1) 和 (3) 式可得 z_0 附近噪声场局部方向性函数为

$$G(\alpha, \varphi, z_0) = G_1(\alpha, \varphi, z_0) + G_2(\alpha, \varphi, z_0),$$

G 同时为 ω 的函数,其中

$$G_1(\alpha, \varphi, z_0) = \begin{cases} \frac{1}{4\pi^2} F_{\sigma}(\omega) |d_1(k_x, k_y, z_0, i\omega)|^2, & 0 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2}, 0 \leq \varphi \leq 2\pi \\ 0, & -\frac{\pi}{2} \leq \alpha < 0, 0 \leq \varphi \leq 2\pi \end{cases} \quad (4)$$

对于向下传播的平面波;

$$G_2(\alpha, \varphi, z_0) = \begin{cases} \frac{1}{4\pi^2} F_{\sigma}(\omega) |d_2(k_x, k_y, z_0, i\omega)|^2, & -\frac{\pi}{2} \leq \alpha < 0, 0 \leq \varphi \leq 2\pi \\ 0 & 0 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2}, 0 \leq \varphi \leq 2\pi \end{cases} \quad (5)$$

对于向上传播的平面波。

此处 $\alpha = \sin^{-1}(\sqrt{k^2(z_0) - v^2}/k(z_0))$, $v^2 = k_x^2 + k_y^2$, $F_{\sigma}(\omega)$ 为源的平均功率谱密度函数,与海洋气象条件有关: $F_{\sigma}(\omega) = E[|f_{\sigma}(k_x, k_y, i\omega)|^2]$. E 为取系综平均。

设跃层近似地为线性梯度:

$$k(z) = k_0[1 + 2a(z - D_0)], \quad D_0 < z < D_1$$

a 为相对声速梯度。

用 W. K. B. 近似对方程 (2) 求解得三类具体解:

(1) $v^2 \leq k_0^2$, 有

$$d_1(\nu, z_0, i\omega) = c_1 \sqrt{\frac{k_z(0)}{k_z(z_0)}} \exp[i\Phi_I(\nu, z_0)] \quad (6a)$$

$$d_2(\nu, z_0, i\omega) = c_1 v_1 \sqrt{\frac{k_z(0)}{k_z(z_0)}} \exp i[2\Phi_I(\nu, D) - \Phi_I(\nu, z_0)] \quad (6b)$$

其中

$$\begin{aligned} \Phi_I(\nu, z) &= \int_0^z k_z(z) dz \\ &= k_z(0) \cdot D_0 + \frac{1}{3ak_0^2} \{ [k_z^2(0) + 2ak_0^2(D_1 - D_0)]^{3/2} - k_z^3(0) \} + k_z(D)(z - D_1), \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} c_1 &= \{1 - v_1 \cdot v_2 \exp[i2\Phi_I(\nu, D)]\}^{-1} = [1 - |v_1| \cdot |v_2| \exp(i\Psi_I)]^{-1} \\ c_2 &= v_1 c_1 \exp[i\Phi_I(\nu, D)], \end{aligned} \quad (8)$$

v_1 为海底反射系数, $v_1 = |v_1| e^{i\phi_1}$; v_2 为海面反射系数, $v_2 = |v_2| e^{i\phi_2}$.

$$\Psi_I = 2\Phi_I(\nu, D) + \phi_1 + \phi_2.$$

由(4)、(5)式得第 I 类局部方向性函数(以下 φ 取: $0 \leq \varphi \leq 2\pi$)

$$G^I(\alpha, \varphi, z_0) = G_1^I + G_2^I,$$

$$G_1^I = \begin{cases} \frac{1}{4\pi^2} F_\sigma(\omega) |c_1|^2 \frac{\sqrt{(c_D/c_0)^2 - \cos^2 \alpha}}{\sin \alpha}, & \frac{\pi}{2} \geq \alpha \geq \alpha^* \\ 0, & \text{其余 } \alpha \end{cases} \quad (9a)$$

$$G_2^I = \begin{cases} \frac{1}{4\pi^2} F_\sigma(\omega) |c_1|^2 |v_1|^2 \frac{\sqrt{(c_D/c_0)^2 - \cos^2 \alpha}}{\sin \alpha}, & -\frac{\pi}{2} \leq \alpha \leq -\alpha^* \\ 0, & \text{其余 } \alpha \end{cases} \quad (9b)$$

其中 $\alpha^* = \sin^{-1} \sqrt{\frac{2\Delta c}{c_0}}$ 为临界角(c 为声速).

$|c_1|^2 = [1 + |v_1|^2 |v_2|^2 - 2|v_1| |v_2| \cos \Psi_I]^{-1}$, 通常设 $|v_2| = 1$, $\phi_2 = \pi$, 则

$$|c_1|^2 = [1 + |v_1|^2 + 2|v_1| \cos(2\Phi_I(\nu, D) + \phi_1)]^{-1} \quad (10)$$

(2) $k_0^2 < v^2 \leq k_D^2$, 此时存在反转点 z_m

$$z_m - D_0 = \left(\frac{v^2}{k_0^2} - 1 \right) / 2a.$$

有:

$$d_1 = (c_1 - ic_2) \exp[i\Phi_{II}(\nu, z_0)] / \sqrt{k_z(z_0)} \quad (11a)$$

$$d_2 = c_2 \exp[-i\Phi_{II}(\nu, z_0)] / \sqrt{k_z(z_0)} \quad (11b)$$

其中

$$\begin{cases} c_1 = \sqrt{v^2 - k_0^2} \exp i[\phi(\nu) + \pi/2] = \sqrt{v^2 - k_0^2} e^{-\theta(\nu)} \cdot e^{i\frac{\pi}{2}} \\ c_2 = |v_1| e^{i\psi_{II}} \cdot c_1 / (1 + i|v_1| e^{i\psi_{II}}), \end{cases} \quad (12)$$

$$\Phi_{II}(\nu, z) = \int_{z_m}^z k_z(z) dz = \sqrt{k_D^2 - v^2}(z - D_1) + \frac{1}{3ak_0^2} (k_D^2 - v^2)^{3/2}, \quad (13)$$

$$\phi(\nu) = \int_0^m k_z(z) dz = i\theta(\nu) = i \left[\sqrt{\nu^2 - k_0^2} \cdot D_0 + \frac{1}{3ak_0^2} (\nu^2 - k_0^2)^{\frac{3}{2}} \right], \quad (14)$$

$$\phi_{II} = 2\Phi_{II}(\nu, D) + \phi_1 \quad (15)$$

由此得第 II 类局部方向性函数

$$G_1^{II}(\alpha, \varphi, z_0) = G_1^{II} + G_2^{II}$$

$$G_1^{II} = \begin{cases} \frac{F_\sigma(\omega)}{4\pi^2} \frac{\sqrt{\cos^2 \alpha - (c_D/c_0)^2}}{\sin \alpha (1 + |v_1|^2 - 2|v_1| \sin \phi_{II})} e^{-2\theta(\alpha)}, & \alpha^* > \alpha > 0 \\ 0, & \text{其余 } \alpha \end{cases} \quad (16a)$$

$$G_2^{II} = \begin{cases} \frac{F_\sigma(\omega)}{4\pi^2} \frac{|v_1|^2 \sqrt{\cos^2 \alpha - (c_D/c_0)^2}}{\sin \alpha (1 + |v_1|^2 - 2|v_1| \sin \phi_{II})} e^{-2\theta(\alpha)}, & 0 > \alpha > -\alpha^* \\ 0, & \text{其余 } \alpha \end{cases} \quad (16b)$$

其中

$$\theta(\alpha) = \sqrt{k_D^2 \cos^2 \alpha - k_0^2} \cdot D_0 + \frac{1}{3ak_0^2} (k_D^2 \cos^2 \alpha - k_0^2)^{3/2}. \quad (17)$$

(3) $\nu^2 > k_D^2$, 此时有

$$H = \sqrt{\frac{k_z(0)}{k_z(z_0)}} \exp \left[i \int_0^z k_z(z) dz \right] = \sqrt{\frac{k_z(0)}{k_z(z_0)}} \exp [-\phi_{III}(\nu, z_0)], \quad (18)$$

其中 $\phi_{III}(\nu, z_0) = \int_0^z \sqrt{\nu^2 - k^2(z)} dz$, 得到不均匀平面波, 随 z 的增加迅速衰减, 所以可以略去。

由公式 (9) 和 (16) 可以清楚地看出, 浅海负梯度下存在着低噪声信道。下面看两个特例。

1. 高损耗海底模型

设海底反射系数 $|v_1| \cong 0$, 相当于跃层下的均匀半无穷空间(深海), 或浅海绝对软底, 此时得到理想的低噪声信道模型。

由公式 (9) 和 (16) 得到:

$$G_1^I = \begin{cases} \frac{N}{4\pi} \cdot \frac{\sqrt{(c_D/c_0)^2 - \cos^2 \alpha}}{\sin \alpha}, & \frac{\pi}{2} \geq \alpha \geq \alpha^* \\ 0, & \text{其余 } \alpha \end{cases} \quad (19)$$

$$G_2^I = 0, \quad \text{对所有 } \alpha$$

$$G_1^{II} = \begin{cases} \frac{N}{4\pi} \cdot \frac{\sqrt{(c_D/c_0)^2 - \cos^2 \alpha}}{\sin \alpha} \cdot e^{-2\theta(\alpha)}, & 0 < \alpha < \alpha^* \\ 0, & \text{其余 } \alpha \end{cases} \quad (20)$$

$$G_2^{II} = 0, \quad \text{对所有 } \alpha$$

综合两类局部方向性函数得到

$$G = G_1^I + G_1^{II}.$$

由 (17) 式得

$$\exp[-2\theta(\alpha)] = \exp\left\{-\left(\frac{4\pi f}{c_D}\right)\left[\sqrt{\cos^2\alpha - (c_D/c_0)^2} \cdot D_0 + \frac{1}{3a(c_D/c_0)^2}(\cos^2\alpha - c_D^2/c_0^2)^{3/2}\right]\right\}, \quad (21)$$

易于看出,对不很低的频率,当 $\alpha < \alpha^*$ 时,随 α 的减小,噪声级迅速衰减,当衰减到某一定值时,噪声级为海洋体积噪声所限制,达 $N_0/4\pi$, 此即为 Wenz 最低噪声级。

图 2 为对典型负跃层水文参数,按公式 (19)、(20)、(21) 画出的低噪声信道模型.图中以频率 f 为参数, $D_0 = 10\text{m}$, $D_1 = 15\text{m}$, $D = 35\text{m}$, $c_0 = 1540\text{m/s}$, $c_D = 1500\text{m/s}$, $\alpha^* \cong 13^\circ$.

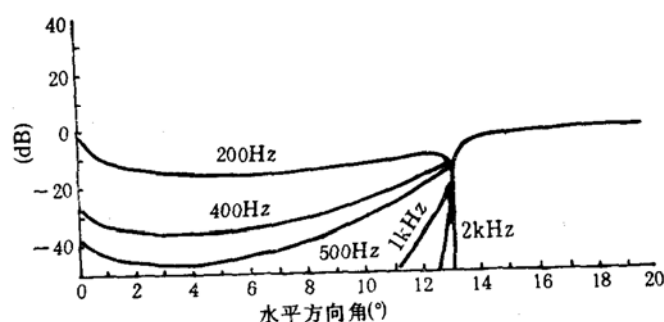


图 2 浅海低噪声信道模型(软底)

Models of the Low-Noise-Channel in Shallow-water (for soft-bottom)

$\alpha = 0$ 时, W. K. B. 近似方法不适用,不能用上述公式计算,但因只有很低频的噪声成份才能以 $\alpha \cong 0$ 的方向入射,故对较高频率, $\alpha \cong 0$ 的解可不予考虑。

对 500Hz 左右的低频成分,表面噪声源应为风关噪声和航运噪声的组合,应对理论模型作适当修改。

2. 低损耗海底模型

设海底为绝对刚性表面,则 $|v_1| \cong 1$, $\phi_1 \cong 0$, 此时有

$$G_1^I = \begin{cases} \frac{N}{4\pi} \cdot \frac{\sqrt{(c_D/c_0)^2 - \cos^2\alpha}}{\sin\alpha} |c_1|^2, & \frac{\pi}{2} \geq \alpha \geq \alpha^* \\ 0, & \text{其余 } \alpha \end{cases} \quad (22a)$$

$$G_2^I = \begin{cases} \frac{N}{4\pi} \cdot \frac{\sqrt{(c_D/c_0)^2 - \cos^2\alpha}}{\sin\alpha} |c_1|^2, & -\frac{\pi}{2} \leq \alpha \leq -\alpha^* \\ 0, & \text{其余 } \alpha \end{cases} \quad (22b)$$

其中 $|c_1|^2 = \frac{1}{2} (1 - \cos\Psi_I)^{-1} = \frac{1}{2} \{1 + \cos[2\Phi_I(v, D)]\}^{-1}$.

$$G_1^{II} = \begin{cases} \frac{N}{4\pi} \cdot \frac{\sqrt{\cos^2\alpha - (c_D/c_0)^2}}{2\sin\alpha(1 - \sin\Psi_{II})} \cdot \exp[-2\theta(\alpha)], & 0 < \alpha < \alpha^* \\ 0, & \text{其余 } \alpha \end{cases} \quad (23a)$$

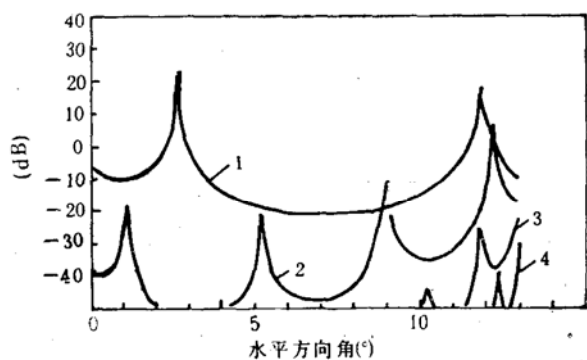
$$G_2^{II} = \begin{cases} \frac{N}{4\pi} \cdot \frac{\sqrt{\cos^2\alpha - (c_D/c_0)^2}}{2\sin\alpha(1 - \sin\Psi_{II})} \cdot \exp[-2\theta(\alpha)], & -\alpha^* < \alpha < 0 \\ 0, & \text{其余 } \alpha \end{cases} \quad (23b)$$

综合两类局部方向性函数得到

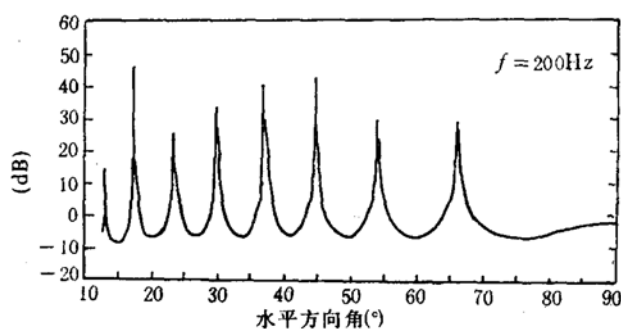
$$G = (G_1^I + G_1^{II}) + (G_2^I + G_2^{II}).$$

图 3(a) 为按公式 (23) 画出的不同频率下的 G_1^{II} , 参数同前. G_2^{II} 的图形与 G_1^{II} 相同, 只是将 α 改为负值.

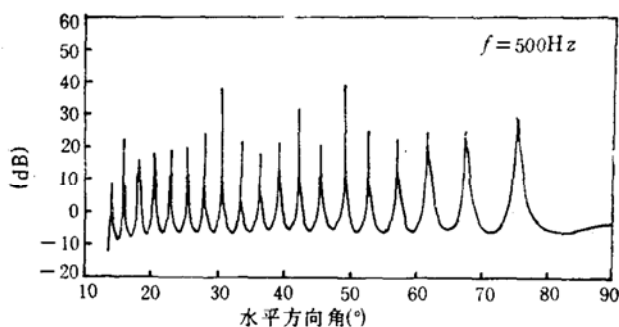
图 3(b)–(e) 为按公式 (22) 画出的 G_1^I , 分别对应于不同的频率; G_2^I 的图形与 G_1^I 相同, 只是将 α 改为负值.



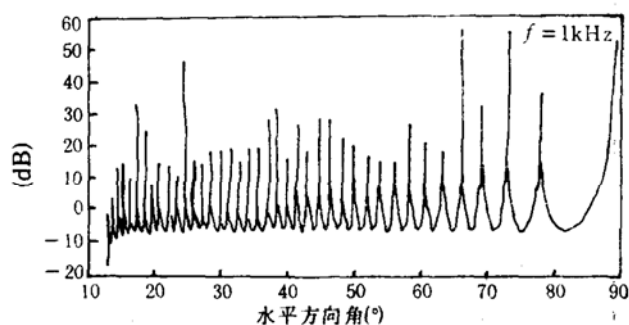
(a) $0 < \alpha < \alpha^*$ (1—200Hz; 2—500Hz; 3—1kHz; 4—2kHz)



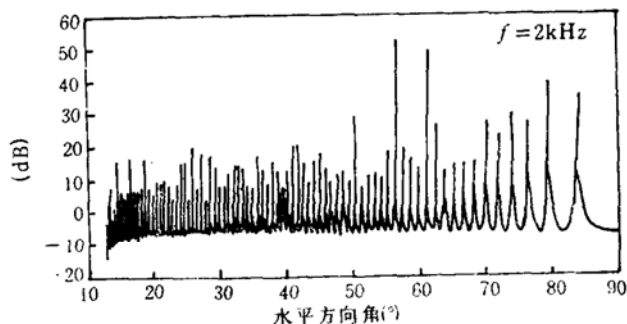
(b) $\alpha^* \leq \alpha \leq \pi/2$ ($f = 200\text{Hz}$)



(c) $\alpha^* \leq \alpha \leq \pi/2$ ($f = 500\text{Hz}$)



(d) $\alpha^* \leq \alpha \leq \pi/2$ ($f = 1\text{kHz}$)



(e) $\alpha^* \leq \alpha \leq \pi/2$ ($f = 2\text{kHz}$)

图 3 浅海低噪声信道模型(硬底)

Models of the Low-Noise-Channel in Shallow-water (for rigid-bottom)

由图 3 诸图看到, 对绝对硬海底模型, 噪声场局部方向性函数在临界角 α^* 以下为衰减的

变速振荡形式,随频率的增加振荡加快,衰减速度也加快。对较高的频率,例如 500Hz 以上,衰减很快,仍为典型的低噪声信道模型。在临界角以上为变速振荡形式,频率增高,振荡加快。上述振荡函数在 $0^\circ - \pm 90^\circ$ 内存在有限个尖峰,其值取决于海中吸收系数,因而依赖于频率。对较高频率,峰值很快下降,其下限分别为图 2 中对应频率下的衰减曲线 ($0 \leq |\alpha| \leq \alpha^*$) 和零分贝线 ($\alpha^* \leq |\alpha| \leq \pm 90^\circ$)。在上述理论计算中,因略去了吸收系数(即设 $\alpha(\omega) \cong 0$),图中的尖峰成为函数的间断点,一旦计入吸收系数(实际海洋介质中总是存在吸收),函数就成为具有有限峰值的连续振荡形式。其物理基础显然是由于海底反射引起的相干叠加效应。

三、结 语

上述计算清楚地展示了浅海低噪声信道模型。本文虽然是对典型负跃层分布进行的计算(此类分布在夏季实际浅海中是经常存在的),所得结果足以说明浅海低噪声信道的模型特征。两个特例示出了两种绝然不同的海底类型下的低噪声信道模型。对实际海洋水文条件和边界条件,都可以用本文提供的公式进行具体计算和画图。所得结果应介于两者之间。

由此可以得出结论,在浅海负梯度(或负跃层)下,对不很低的频率,即对通常的几百赫以上的风关噪声场和广泛的海底类型,噪声场具有鲜明的低噪声信道特征。

有关的实验研究工作*,已经证实浅海低噪声信道的存在,并提供了深入研究这一重要课题的依据。

本文的工作得到许祯镛同志的支持和帮助,曲存让、刘彩芬同志协助完成了电子计算机作图,作者在此一并表示感谢。

参 考 文 献

- [1] 许祯镛,“低噪声信道——角空间过滤系统”,(第二届全国声学会议论文集)。
- [2] 许祯镛,“海洋自然噪声场局部谱”,中国科学, (1979), 33。

* 见第三届全国声学学术会议论文摘要“海洋低噪声信道的实验研究”。