

# 斜坡海底海洋环境噪声垂直指向性研究

衣雪娟, 林建恒, 殷宝友

(中国科学院声学研究所北海研究站, 山东青岛 266023)

**摘要:** 为了解决斜坡海底地形的环境噪声高频建模问题, 为三维环境噪声的进一步计算奠定了基础。在射线法的基础上, 采用  $N \times 2D$  的近似算法, 研究了斜坡海底情况下, 均匀分布在海面上的噪声源所产生的环境噪声垂直指向性。考虑了海水吸收, 海底反射, 声速剖面对垂直指向性计算结果的影响。研究表明: 三种因素均会对斜坡海底的噪声垂直指向性产生影响, 其中声速剖面对其影响要大一些。

**关键词:** 海洋环境噪声; 斜坡海底; 垂直指向性

中图分类号: O427

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2008)-04-0511-05

## Vertical directionality of ambient noise in the slope-bottom sea

YI Xue-juan, LIN Jian-heng, YIN Bao-you

(Qingdao Laboratory, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266023, Shandong, China)

**Abstract:** Using  $N \times 2D$  approximate algorithm, the vertical directionality of ambient sea noise with uniform distributed surface sources and slope bottom is calculated based on ray method. The effects of seawater absorption, bottom reflection loss and sound speed profiles on the vertical directionality are considered. The result shows all these three factors especially sound speed profiles affect the directionality in the slope-bottom sea.

**Key words:** ambient sea noise; slope-bottom; vertical directionality

## 1 引 言

海洋环境噪声的研究始于二战期间, 起初从实验研究着手, 为了解释实验研究结果, 随之展开了理论研究, 至今已经发展了多种模型: Cron 和 Sherman 的海洋噪声经典模型<sup>[1]</sup>, Kuperman 和 Ingenito 的分层介质简正波模型<sup>[2]</sup>, Harrison 的射线声学 CANARY 模型<sup>[3,4]</sup>, 以及在这些模型基础上的数值预报模型, 如美国的 RANDI、ANDES 等。Pekins 和 Kuperman<sup>[5]</sup>又将其波动模型推广至三维环境, 但是波动理论的计算受频率限制, 用波动理论计算高频的环境噪声不现实。Harrison 的射线声学模型考虑了海洋信道的多种影响, 可以解决地形较为简单的高频

三维环境噪声建模问题。

大陆架海区是我国近海常见的海底地形。与分层介质中海洋环境噪声计算不同, 斜坡海底情况下海底地形是随距离和方位角变化的, 属于典型的三维问题。声传播的三维计算本身就是一个相当复杂的问题, 而环境噪声模型需要考虑整个海面的噪声源, 计算的难度相当大。这里将在射线声学的基础上, 使用  $N \times 2D$  方法近似计算三维海洋环境噪声。所谓  $N \times 2D$  近似算法就是先将三维环境空间按照方位角划分为  $N$  个扇区(根据接收点的位置和实际环境参数变化的需要, 可以进行均匀分区或者非均匀分区), 在每个扇区内噪声场看作与方位无关, 扇区内的声场均利用与距离有关的二维声传播模型进行计算, 最后将  $N$  个噪声场进行叠加就可获得三维噪声场的近似值。

本文的主要目的是研究斜坡海底情况下, 均匀分布在海面的噪声源所产生的噪声垂直指向性。考虑海水吸收, 海底反射, 以及声速分布的影响, 为三维海洋环境噪声的进一步计算打下了基础。

收稿日期: 2008-01-04; 修回日期: 2008-04-30

基金项目: 预研项目(51303030606 和 51303060507), 中国科学院声学所创新前瞻性项目(sx-cxQ2-02-2006-06), 中国科学院知识创新工程领域前沿项目。

作者简介: 衣雪娟(1979-), 女, 山东烟台人, 硕士, 助理研究员, 研究方向为海洋环境噪声。

通讯作者: 衣雪娟, E-mail: yixuejuan@tom.com

## 2 垂直指向性计算公式

利用射线法对环境噪声建模的基本方程是由 Harrison<sup>[3,4]</sup>推出,假设  $D(\phi, \theta_r)$  代表水听器接收到的来自掠射角为  $\theta_r$ , 方位角为  $\phi$  的单位立体角的噪声功率。海面噪声源经过若干次海面、海底反射到达接收点。斜坡海底情况下,由于海底倾斜,传播过程中声线与海底发生作用后,掠射角度将发生变化,不同周期的射线路径会不同。环境噪声垂直指向性的计算公式见式(1)<sup>[3,4]</sup>:

$$D(\phi, \theta_r) = Q(\theta_r) S(\phi, \theta_r) \quad (1)$$

式中,  $S(\phi, \theta_r)$  代表连接表面噪声源与接收点的所有射线路径中,到达接收点位置  $(\phi, \theta_r)$  的声线贡献之和(对  $n$  的求和从 0 到某个有限值  $N$ ):

$$S(\phi, \theta_r) = \sum_{n=0}^N \left( \prod_{j=1}^n R_s(\theta_{s_j}) R_b(\theta_{b_j}) \exp(-a(s_c)_j) \right) \sin(\theta_s)_n \quad (2)$$

$Q(\theta_r)$  代表声线路径中最后不足一个周期的剩余衰减,它与海底反射系数  $R_b(\theta_b)$  以及海水吸收系数  $a$  有关:

$$Q(\theta_r) = \begin{cases} e^{-as_p}, & \theta_r \geq 0 \\ R_b(\theta_b) e^{-a(s_r - s_p)}, & \theta_r < \dots \end{cases} \quad (3)$$

式(2)和式(3)中  $R_s(\theta_s)$  代表海面能量反射系数,  $\theta_s$  代表海面反射角,  $\theta_b$  代表海底反射角,  $R_b(\theta_b)$  代表海底能量反射系数,  $s_c$  代表声线周期轨迹长度,  $s_p$  代表从源深度出发,从接收点上方到达接收点深度,不足一个周期的声线路径长度。

利用射线法进行环境噪声建模的一个主要任务就是计算声线的多途贡献,在平坦海底的情况下(即式(2)中  $N \rightarrow \infty$  的情形),海面反射角  $\theta_s$ 、海底反射角  $\theta_b$ 、声线轨迹周期长度  $s_c$  均与反射次数无关,而只与接收角度有关,即:同一接收角度的每个周期内,声线的轨迹都是相同的,这时就可以利用等比级数求和公式将式(2)进行简化;而在倾斜海底情况下,每经过一次海底反射,射线的掠射角都要增加或减少 2 倍的海底倾斜角,从而造成不同的周期内,射线轨迹周期长度  $s_c$  会不相同,使得倾斜海底的计算量大大增加。斜坡情况下式(2)中射线的反射次数  $n$  最终也将是一个有限值  $N$  而不是  $\infty$ 。

## 3 数值计算结果

在下面的数值计算中,考虑了两种情况:不考

虑海水吸收和考虑海水吸收。计算实例中的“上坡”和“下坡”定义为:从接收点出发,连接海面声源的声线沿坡度由低处向高处称为上坡;反之由高处向低处则为下坡。

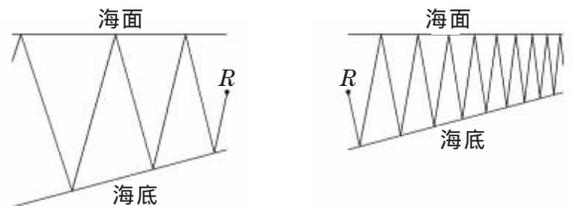
### 3.1 不考虑海水吸收的情况

不考虑海水吸收情况,计及四种声速梯度剖面,采用相同的海底斜坡坡度,  $\varepsilon_0 = 0.01$ ; 由于不考虑海水的吸收,即  $a = 0$ ,从公式(2)、(3)中可以看出,不计考虑海水吸收,射线的周期长度  $s_c$  也暂时无需考虑;海底界面的临界角为  $30^\circ$ ,掠射角小于临界角的海底反射能量损失采用  $R_b(\theta_b) = e^{-\alpha \sin \theta_b}$  形式,其中  $\alpha = 1 \text{ dB/rad}$ 。

#### 3.1.1 等声速分布

图 1 是等声速(声速为 1500m/s)情况下斜坡海底地形分布以及在这种情形下到达接收点的特征声线轨迹示意图。等声速情况下声线轨迹是直线,从海面源出发,海底掠射角小于临界角的声线都能够到达接收点,只是经过海底反射后,声线的掠射角会发生变化。另外需要说明,本文所给出的声线示意图中,横纵坐标轴分别采用了不同的缩放比例。

图 2 是等声速情况下,归一化的噪声垂直指向性与方位角及俯仰角的关系图,图中方位角  $0^\circ$  代表上坡方向,  $180^\circ$  代表下坡方向,  $90^\circ$  代表与斜坡垂直的方向;正的仰角代表声线从接收点上方到达,负的仰角代表声线从接收点下方到达,  $0^\circ$  代表声线从水平方向到达接收点;仰角  $|\theta| > \theta_c$  时,海底反射能量损失较大,每次反射都会有一部分能量透入海底,这部分角度对指向性的贡献非常小,即图中黑色区域描述的部分;仰角  $|\theta| < \theta_c$  时,斜坡的垂直方向具有最高的强度(白色部分),下坡过程俯仰角较小时会出现噪声凹槽,这是由于海面声源产生声线无法以小的仰角到达接收点;另外由于已经不考虑海水的吸收,所以正、负仰角指向性的不对称完全是由公式(3)中的海底损失  $R_b(\theta_b)$  引起的。



(a) 下坡特征声线轨迹示意图 (b) 上坡特征声线轨迹示意图

图 1 等声速情况下特征声线轨迹示意图

Fig.1 Characteristic rays for isovelocity profile

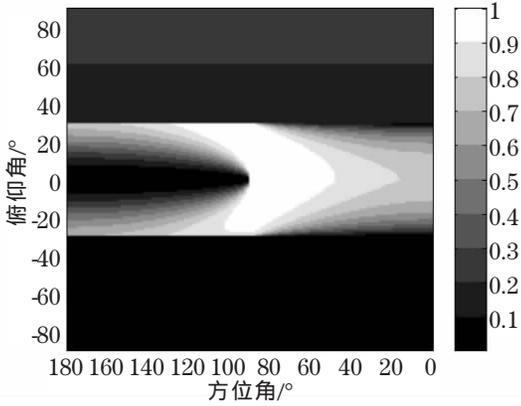


图 2 等声速情况噪声垂直指向性与方位角和俯仰角关系图  
Fig.2 Vertical directivity versus azimuth and elevation angle for isovelocity profile

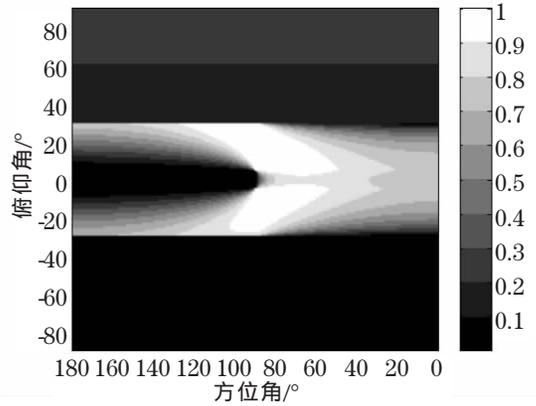


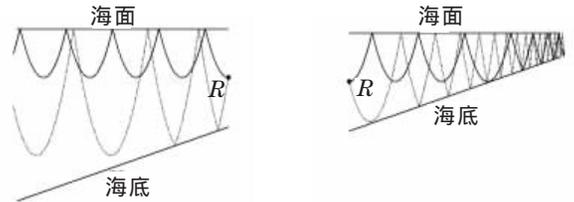
图 4 负梯度声速剖面情况下的噪声垂直指向性与方位角和俯仰角关系图  
Fig.4 Vertical directivity versus azimuth and elevation angle for negative velocity gradient profile

### 3.1.2 负梯度声速分布

图 3 是负梯度声速情况下斜坡海底地形分布以及在这种海底环境情况到达接收点的特征声线轨迹示意图，海面声速为 1505m/s，接收点声速为 1500m/s。负梯度声速分布情况下，声线向海底方向弯曲。图 4 是负梯度声速分布情况下，归一化的噪声垂直指向性与方位角及俯仰角的关系，与等声速情况相比，下坡方向的指向性非常相似，上坡方向仰角 $|\theta| < \arccos(c_r/c_s)$ 内的指向性强度有所减少。

### 3.1.3 正梯度声速分布

图 5 是正梯度声速情况下斜坡海底地形分布以及在这种海底环境情况到达接收点的特征声线轨迹示意图，海面 1500m/s，接收点 1510m/s，海底 1520m/s，正梯度声速分布情况下，声线向海面方向弯曲。图 6 是正梯度声速分布情况下，归一化的噪声垂直指向性与方位角及俯仰角的关系，正梯度声速分布情况下，仰角 $|\theta| < \arccos(c_r/c_b)$ 的声线都能够由海面声源到达接收点，这一角度范围内下坡方向的指向性强度要比上坡方向的强，这是由于下坡方向声线类型大多为海面波导(SD)，而上坡方向声线类型往往由海面-海底反射(SB)转化成海面波导(SD)，下坡方向声线经历的海底反射次数要远远小于上坡方向，因此遭受的海底损失也要少一些。



(a) 下坡特征声线轨迹示意图 (b) 上坡特征声线轨迹示意图

图 5 正梯度声速剖面情况下特征声线轨迹示意图

Fig.5 Characteristic rays for positive velocity gradient profile

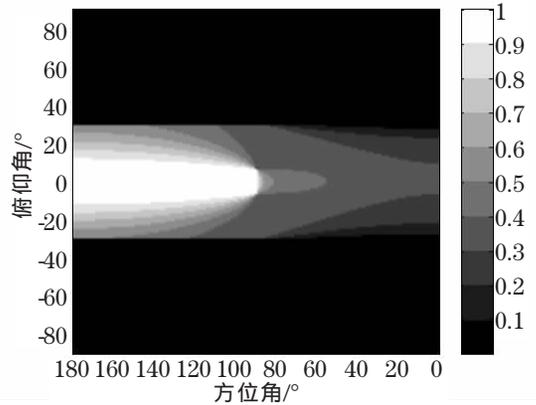
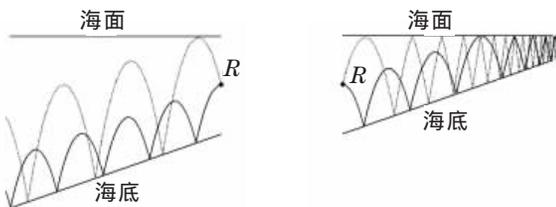


图 6 正梯度声速剖面情况下的噪声垂直指向性与方位角和俯仰角关系图

Fig.6 Vertical directivity versus azimuth and elevation angle for positive velocity profile

### 3.1.4 双线性声速分布

图 7 是双线性声速分布情况下斜坡海底地形分布以及在这种海底环境情况到达接收点的特征声线轨迹示意图，海面声速 1505m/s，接收点声速 1500m/s，接收点处的海底声速 1505m/s，双线性声速分布情况下会形成水中声道。图 8 是双线性声速分布情况下，归一化的噪声垂直指向性与方位角及俯仰角的关系图。仰角在 $|\theta| < \arccos(c_r/c_s)$ 范围内，上坡情况下，海面声源产生的声线将会通过海面-海底

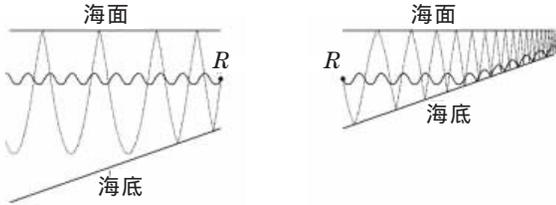


(a) 下坡特征声线轨迹示意图 (b) 上坡特征声线轨迹示意图

图 3 负梯度声速剖面情况下特征声线轨迹示意图

Fig.3 Characteristic rays for negative velocity gradient profile

反射(SD)转化成水中声道(SC),或者海面-海底反射转化为海底波导(BD),最后转化为水中声道,能够以较小的掠射角到达接收点;而下坡情况下,此角度范围内的海面声线都不可能到达接收点。



(a) 下坡特征声线轨迹示意图 (b) 上坡特征声线轨迹示意图

图7 双线性声速剖面情况下特征声线轨迹示意图

Fig.7 Characteristic rays for bilinear profiles

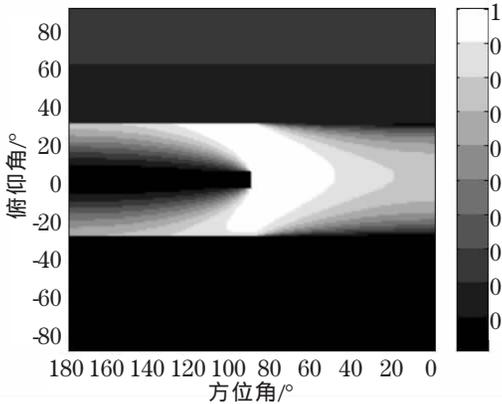


图8 双线性声速剖面情况下的噪声垂直指向性与方位角和俯仰角关系图

Fig.8 Vertical directivity versus azimuth and elevation angle for bilinear profile

### 3.2 考虑海水吸收的情况

斜坡海底地形环境中如果考虑海水的吸收,公式(2)中的不同周期内的射线长度  $s_c$  需要逐一计算,相对于忽略海水吸收的情况要繁琐得多。

本算例计算了等声速剖面(声速 1500m/s),海水吸收取  $a=0.505\text{dB/km}$ ,接收点深度 20m,其所处位置的海深为 30m,斜坡海底的斜率为 0.003,采用的海底反射能量损失如图 9 所示,计算时忽略海面的反射损失,得到的指向性图见图 10。在斜坡的垂直方向,即相当于平坦海底的情况,存在明显的噪声凹槽;而在上坡方向,由于斜坡海底的反射,使得声线方向发生改变,一些海面噪声源能够以水平方向到达接收点,但是由于本算例只考虑 10km 的噪声源半径,所以即使上坡方向,仍然会有一些较大的方位角,由于海面声源无法以小接收角到达接收点,存在噪声凹槽的现象;下坡方向,所有的方位角都存在噪声凹槽现象。由于海底反射造成能量损失,几乎所有的正仰角的能量都要大于对应负仰角的能量。

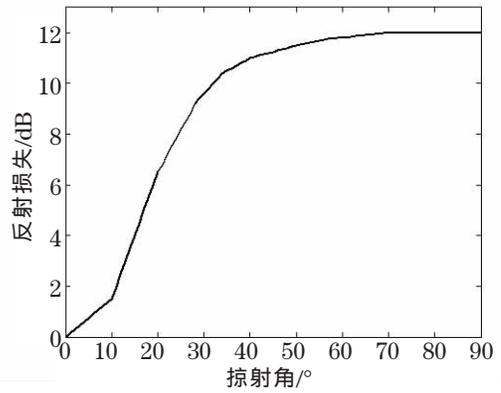


图9 海底反射损失

Fig.9 Bottom reflection loss

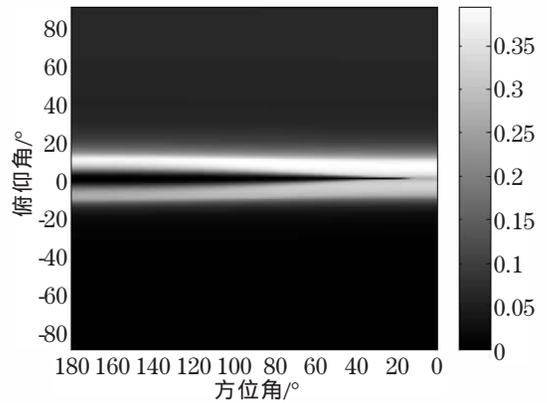


图10 等声速剖面情况下考虑海水吸收的噪声垂直指向性与方位角和俯仰角关系图

Fig.10 Vertical directivity versus azimuth and elevation angle for isovelocity profile and contained absorption

其他环境参数不变,本文将考虑海水吸收(图10)和忽略海水吸收( $a=0$ )(图11)两种情况的指向性图进行对比。可以看出考虑海水吸收的情况,海水的吸收造成能量的衰减,噪声强度要比忽略海水吸收情况时有所降低,同时水平方向的噪声凹槽有进一步加深的趋势。

## 4 结论

以射线声学为基础,利用  $N \times 2D$  近似算法,进

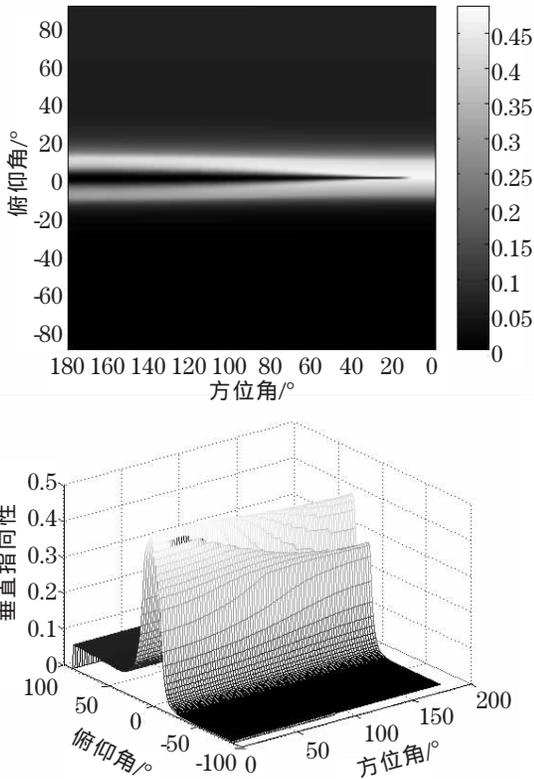


图 11 等声速剖面情况下忽略海水吸收的噪声垂直指向性与方位角和俯仰角关系图

Fig.11 Vertical directionality versus azimuth and elevation angle for isovelocity profile and without absorption

行与距离有关的斜坡海底环境噪声垂直指向性的理论计算,分析了海水吸收,海底反射损失,不同声速

分布影响下的环境噪声垂直指向性特性。

计算结果表明,对于平坦海底时噪声垂直指向性存在凹槽的情况,若采用斜坡海底(其他环境参数保持不变),上坡方向会对垂直指向性凹槽具有一定的填充作用,而下坡方向则有进一步扩大噪声凹槽的趋势。

海洋环境噪声由于源众多,其三维建模是一个非常复杂的过程,对于高频的情况尤为甚之。本文所采用的方法可以解决斜坡海底地形的环境噪声高频建模问题,为三维环境噪声的进一步计算奠定了基础。

#### 参 考 文 献

- [1] Cron B F, Sherman C H. Spatial correlation function for various noise models[J]. J. Acoust. Soc. Am, 1962, **34**(11): 1732-1736.
- [2] Kuperman W A, Ingenito F. Spatial correlation of surface generated noise in a stratified ocean[J]. J. Acoust. Soc. Am, 1980, **67**(6): 1988-1996.
- [3] Harrison C H. Formulas for ambient noise level and coherence[J]. J. Acoust. Soc. Am, 1996, **99**(4): 2055-2066.
- [4] Harrison C H. Noise directionality for surface sources in range-dependent environments[J]. J. Acoust. Soc. Am, 1997, **102**(5): 2655-2666.
- [5] Perkins J S, Kuperman W A, Ingenito F. Modeling ambient noise in three-dimensional ocean environments[J]. J. Acoust. Soc. Am, 1985, **93**(2): 739-752.