

浅海内波对环境噪声水平方向凹槽的影响

江鹏飞, 衣雪娟, 林建恒, 蒋国健

(中国科学院声学研究所北海研究站, 山东青岛 266023)

摘要: 典型夏季海洋环境噪声垂直指向性水平方向经常出现一显著凹槽。采用三维声速场海洋环境噪声理论模型, 分析了各阶简正波对垂直指向性的贡献, 指出不同阶简正波的贡献不同, 高阶简正波是形成水平方向凹槽的主因, 低阶简正波起填补环凹槽的主要作用, 无内波时海面噪声源激发低号简正波的能量较低, 填补能力较差, 水平凹槽显著; 内波活动期, 内波改变了声信号的传播路径, 引起不同阶简正波耦合, 低号简正波能量增强, 其填补噪声水平凹槽的作用明显加强, 高阶简正波能量减少, 凹槽变浅。还探讨了凹槽填补程度与内波强度之间的关系, 以及有内波时环境噪声垂直指向性随时间的变化。

关键词: 浅海内波; 三维环境噪声模型; 环境噪声指向性; 噪声水平凹槽

中图分类号: TB556

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2011)-05-0407-05

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2011.05.007

Effect of internal wave on horizontal notch of ambient noise in shallow water

JIANG Peng-fei, YI Xue-juan, LIN Jian-heng, JIANG Guo-jian

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

Abstract: Researches indicate that a visible notch often appears in the horizontal direction of the vertical noise directionality in typical summer sea. In this paper, the three-dimensional sound speed profile-ambient noise model is adopted to analyze the contribution of every mode to the vertical directionality, and the differences of contribution are pointed out. The high order modes are the main cause to the noise notch, while the low order modes can fill the notch. When internal waves are absent, the low order modes are weakly excited, the 'fill' ability is feeble and the notch is visible. In the internal wave field, internal waves change the sound signal propagation paths to cause the conversion between different modes. Low order modes are strengthened and higher order modes are weaken, the notch becomes shallow. Besides, the relation of the 'fill' degree with the strength of internal waves and the variation of the vertical directionality with time are discussed.

Key words: linear internal waves in shallow water; three-dimensional ambient noise model; the vertical noise directionality; ambient noise horizontal notch

0 引言

人们对环境噪声的研究始于二次世界大战期间, 目前已经取得大量的实验及理论成果。典型夏季浅海海区, 由于负梯度声速剖面导致声线向海底弯曲, 环境噪声的垂直指向性在水平方向会出现凹槽。在进行某些环境噪声实验时, 人们发现噪声凹槽被一定程度填补, 与此同时实验观测到内波的存在, 内波是海洋内部的重力波, 广泛存在于密度稳定层化海水中, 它们的活动引起声速剖面扰动, 改

变声信号传播路径, 当其范围较大时, 将影响环境噪声特性。1996年, T. C. Yang^[1]为了解释海洋环境噪声数据的异常现象, 讨论了内波对环境噪声的影响。2004年, R. B. Evans 和陈琪芳^[2]研究了内波活动期环境噪声指向性。2006年, Daniel Rouseff^[3]基于东中国海实验数据分析, 研究内波对1~5 kHz环境噪声垂直指向性凹槽的影响。本文讨论典型的夏季浅海区内波对环境噪声垂直指向性的影响, 将内波存在时浅海三维声速场模型与环境噪声模型结合起来, 数值模拟内波活动期对环境噪声垂直指向性水平方向凹槽, 通过数值计算研究内波对环境噪声指向性的影响, 并探讨凹槽填补程度与内波强度之间的关系以及内波传播进入计算区域后环境噪声垂直指向性随时间的变化情况。

收稿日期: 2010-09-05; 修回日期: 2010-12-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10974219)

作者简介: 江鹏飞(1986—), 男, 山东威海人, 硕士研究生, 研究方向为海洋声学。

通讯作者: 江鹏飞, E-mail: joyouc@126.com

1 理 论

1.1 浅海内波三维声速场模型

国内外研究人员在黄海、东海、南海开展了一系列内波实验研究,表1初步总结了浅海内波主要特征:低频内潮波(半日潮,全日潮)普遍存在,高频线性内波和孤子内波叠加其上,伴随内潮波向前传播。由于内潮波的存在,所以内波范围一般较大,在几百公里甚至几百公里以上。不同海域的内波频谱衰减系数不尽相同。

表1 浅海内波主要特征

Table 1 Characteristics of internal waves in shallow water

时间/海域	振幅/m	波速/(m/s)	范围/km	谱衰减系数	备注
92年青岛	5~6	0.329	>58.74	—	—
96年黄海	8	0.3-0.5	—	-1.5, -2	—
01年东海	36	0.6	>180	-1.7, -2.9	高频 cn 波
01年南海	32-95	0.7-1.7	>286	-2, -3	半日潮 孤子内波群
04年南海	15	0.54	—	-2, -1	非半日潮 孤子内波

文献[4]中给出内波引起的声速扰动随时间空间变化的公式为

$$\delta C(r, z, t) = \eta(r, z, t) C_0(z) G(z) N^2(z) \quad (1)$$

其中 η 是质点垂向位移, $c_0(z)$ 是平均声速剖面(本文采用典型夏季浅海声速剖面), $N(z)$ 是浮频率, G 为海洋常数。

质点垂向位移 η 为

$$\eta(r, z, t) = \eta_d(r, z, t) + \eta_s(r, z, t) \quad (2)$$

线性和非线性内波产生质点垂直位移 η_d 和 η_s :

$$\eta_d(z, t) = \int_{\omega_c}^{N_{\max}} \sum_j F(\omega, j) \phi(\omega, j, z) \exp(i(k_{hj}r - i\omega t)) d\omega \quad (3)$$

$$\eta_s(z, t) = \sum_{\omega} \sum_j F(\omega, j) \phi(\omega, j, z) cn^2(2K[(r - Ct)/L]) \quad (4)$$

其中, $K[\cdot]$ 为椭圆积分, L 为特征宽度, k_{hj} 和 ϕ 分别为内波第 j 号简正波水平波数和模态函数, $F(\omega, j)$ 表示内波第 j 号简正波的内波频率谱, 其不同海域具有不同形式。黄海和东海线性内波谱分别见式(5)和(6):

$$\langle |F(\omega, j)|^2 \rangle \propto A_j^2 \sqrt{\omega^2 - \omega_c^2} / (\omega^2 \sqrt{N^2 - \omega_c^2 + \omega^2}) \quad (5)$$

$$\langle |F(\omega, j)|^2 \rangle \propto A_j^2 \sqrt{\omega^3 - \omega_c^3} / (\omega^3 \sqrt{N^3 - \omega_c^3 + \omega^3}) \quad (6)$$

其中 A_j 是各阶模态的强度:

$$A_j^2 = E_0 M (j^2 + j_*^2)^{-p/2} \quad (7)$$

式(7)中 E_0 是线性内波平均能流密度(单位 J/m^2); j_* 为特征模态数(浅海取 1); p 为模态权指数(浅海取 3 或 4), 分别表示模态幅度的衰减和模态幅度谱的斜率; M 是归一化系数。

1.2 环境噪声模型

垂直接收阵获得的海洋环境噪声指向性为^[5]

$$B(\theta) = \left| \sum_j p(z_j) e^{-ik_z \sin \theta} \right|^2 \quad (8)$$

其中 $P(z_j)$ 为接收深度 z_j 处的声压, 其表达式如下:

$$p(z_j) = \int 2\pi r \sum_{m=1}^M a_m \psi_m(z_j) dr \quad (9)$$

a_m 是模式幅度表示为

$$a_m = S(r) \sqrt{\frac{2\pi}{k_m r}} \psi_m(z_0) e^{-ik_m r} \quad (10)$$

其中 $S(r)$ 是某一频率噪声源幅度。则由垂直水听器阵获得的距水听器阵 r_1 到 r_2 范围内所有点源的噪声模式强度可以表示为

$$n_m = \int_{r_1}^{r_2} 2\pi r \langle |a_m|^2 \rangle dr = \frac{4\pi^2}{\kappa_m} \int_{r_1}^{r_2} S^2(r) |\psi_m(z_0)|^2 e^{-2\alpha_m r} dr \quad (11)$$

其中, $k_m = \kappa_m(r) + i\alpha_m(r)$ 为复波数, 假设海面点源互不相关:

$$S^2(r) = \frac{4\pi}{k^2(z_0)} q^2 \quad (12)$$

将(9)、(10)、(12)代入(8)得

$$B(\theta) = \frac{16\pi^3}{k^2(z_0)} q^2 \cdot \int \left| \sum_j \sum_{m=1}^M \frac{1}{\sqrt{k_m(r)}} \psi_m(r, z_0) e^{-ik_m(r)r} \psi_m(r, z_j) e^{-ik_z \sin \theta} \right|^2 dr \quad (13)$$

忽略不同简正波模式之间的相干项, 可化简为

$$B(\theta) \approx \frac{16\pi^3}{k^2(z_0)} q^2 \int \sum_{m=1}^M \left| \frac{\psi_m(z_0) e^{-ik_m r}}{\sqrt{k_m}} \right|^2 \left| \sum_j \psi_m(z_j) e^{-ik_z \sin \theta} \right|^2 dr \quad (14)$$

当环境与距离无关时, 积分可求, 公式可以化简为

$$B(\theta) = \frac{16\pi^3}{k^2(z_0)} q^2 \sum_{m=1}^M \frac{|\psi_m(z_0)|^2}{2\alpha_m \kappa_m} e^{-2|\alpha_m|a} \left| \sum_j \psi_m(z_j) e^{-ik_z \sin \theta} \right|^2 \quad (15)$$

环境与距离有关时 $B(\theta)$ 的表达式为

$$B(\theta) = \frac{16\pi^3}{k^2(z_0)} q^2 \int \sum_{m=1}^M \left| \frac{1}{\sqrt{k_m(r)}} y_m(r, z_0) e^{-ik_m(r)r} \right|^2 \left| \sum_j y_m(r, z_j) e^{-ik_z \sin \theta} \right|^2 dr \quad (16)$$

式(15)是有内波的情况下, 基于改进的环境噪声模型获得的环境噪声垂直指向性表达式。

2 数值计算

2.1 模型验证—内波填补噪声凹槽

利用前面建立的内波-环境噪声模型，数值计算内波对环境噪声特性的影响。假设海洋环境为典型夏季浅海，海深为 70m，负梯度，温跃层在 22~54m 之间，计算范围内各方向均存在内波，且扰动幅度相同，间距为 3 m 的 17 元水听器阵列布放在 11~59m 之间，频率为 100Hz，计算范围 43.2km，步长 10 m。假设噪声源随机均匀分布于海面下 2 m 处，互不相关。

图 1 是一幅典型的内波存在时，声速随深度和距离的分布图。

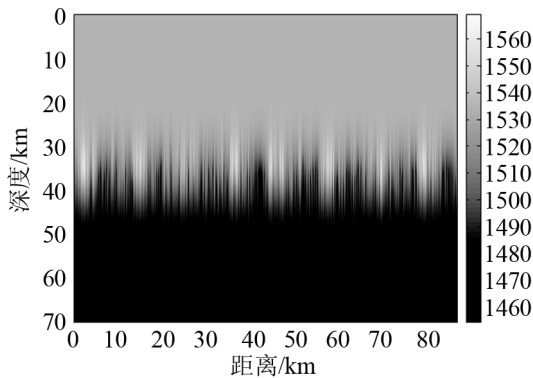


图 1 声速分布

Fig.1 Sound speed profile when internal waves exist

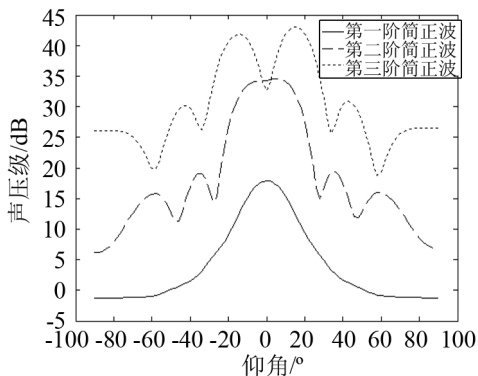


图 2 无内波在时各阶简正波指向性

Fig.2 The vertical directivity of the former three orders of modes without internal waves

图 2 给出了各阶简正波对环境噪声垂直指向性的贡献。内波不存在时，环境噪声垂直指向性在水平方向出现凹槽，直观上可以解释为能够填补噪声凹槽的低阶简正波能量太低。由图 2 可见，第 1、2 阶简正波垂直指向性不存在凹槽，但它们能量远低于出现噪声凹槽的第 3 阶简正波。

图 3 给出内波存在与否的环境噪声垂直指向性对比，可见，内波的存在使环境噪声垂直指向性水

平方向凹槽变浅了，内波对噪声凹槽有一定的“填补”作用。本文从简正波角度探讨这种现象的原因，图 4~6 分别给出内波存在与否时，前三阶噪声模式强度随距离变化情况(每段 10 m)，无内波时，模式强度分贝值随距离线性衰减；内波存在时，模式强度分贝值随距离振荡衰减。垂直水听器阵列接收的 0.5~43.2 km 范围内所有点源前三阶模式强度分贝值如表 2 所示，可见，内波导致简正波耦合，有内波时，第二阶模式强度明显增强，第三阶模式强度减弱，能量从较高阶简正波耦合到低阶，这与文献[1]提出的内波导致简正波耦合的看法一致。由表 2 可知，从分贝数似乎难以看出有内波时，由于简正波耦合，高阶简正波部分能量的转换能够足以补充低阶简正波能量的增加。实际上，有内波时第 3 阶简正波模式强度绝对值的减少量，稍大于第 1、2 阶简正波模式强度由于耦合获得的绝对值增加量之和。

2.2 凹槽深度与内波强度的关系

前面计算了有内波的情况下，环境噪声垂直指

表 2 各阶噪声模式强度
Table 2 Noise mode's intensity

	$n1/dB$	$n2/dB$	$n3/dB$
无内波时	2.3779	30.9138	43.5832
有内波时	4.5212	34.3233	42.9575

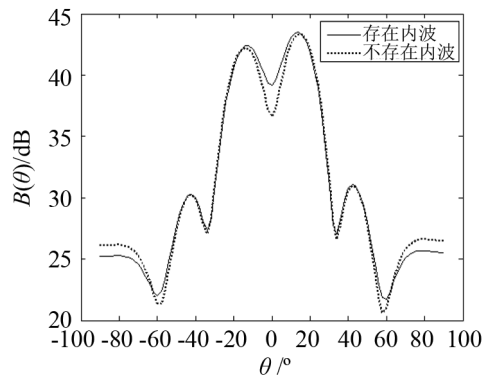


图 3 环境噪声垂直指向性

Fig.3 The vertical directivity of ambient noise

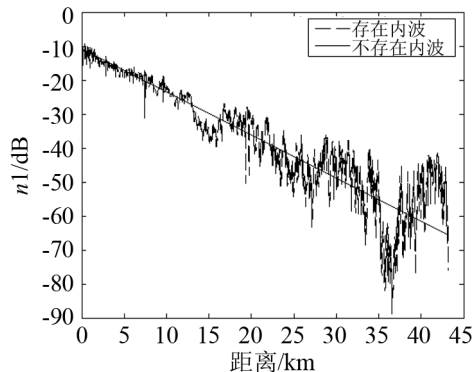


图 4 第 1 阶模式强度随距离变化

Fig.4 The intensity variation of the first order of mode with distance

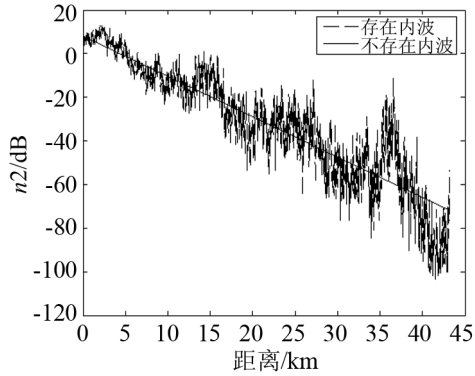


图 5 第 2 阶模式波强度随距离变化

Fig.5 The intensity variation of the second order of mode with distance

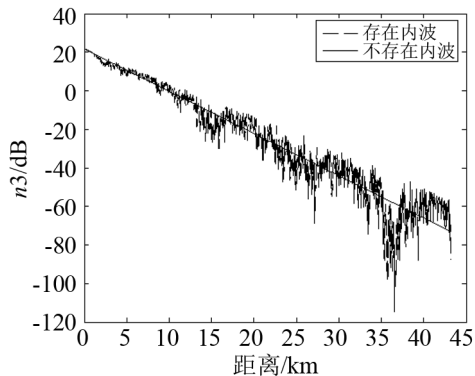


图 6 第 3 阶模式波强度随距离变化

Fig.6 The intensity variation of the third order of mode with distance

向性,证实了内波使水平凹槽变浅。计算中假设内波扰动幅度相同,但实际情况并不如此,内波通常沿某一方向传播,偏离内波传播方向的区域,受到内波的影响有所减弱。本文用内波传播方向引起的声速扰动乘以偏离角度余弦来表示该区域内波的影响。

$$\delta c_{\theta} = \delta c_0 \times \cos \theta \tag{17}$$

不同海区由于地形起伏程度以及不同时期潮流强度的差异,内波强度会发生变化,需要研究噪声水平凹槽深度与内波强度之间的关系。公式(7)中 E_0 为内波能量密度,是内波强度最直观表示,本文通过改变 E_0 的大小,获得噪声凹槽随内波强度的变化情况,如图 7 所示。

可以发现,随着内波能量密度增加,噪声凹槽深度越来越浅。

2.3 环境噪声指向性随时间变化

在实际海洋观测过程中,内波由远及近向水听器阵传播。已知计算范围为 43.2km,而观测到的大多数内波范围无论跨度还是传播距离都远大于此,可假设内波到达计算范围边界之后,逐渐覆盖整个计算区域,在此期间内波对环境噪声的影响会随着时间不断变化。本文探讨内波进入计算海区后,环

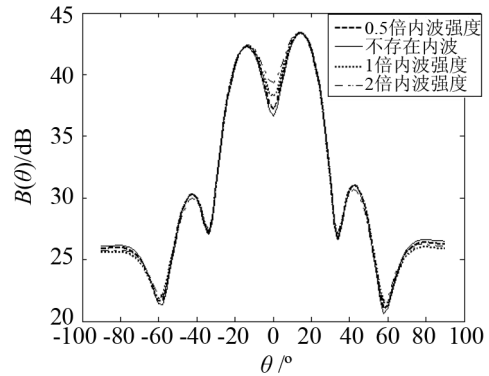


图 7 环境噪声指向性随内波强度变化

Fig.7 The variation of noise vertical directivity with intensity of IWs

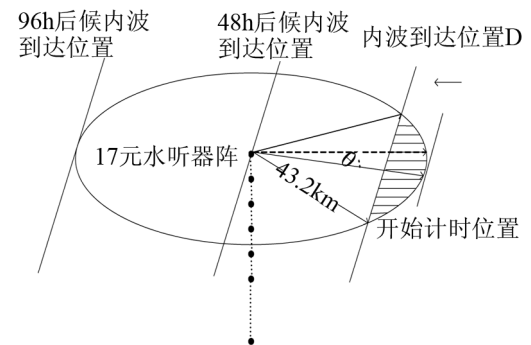


图 8 计算环境示意图

Fig.8 Sketch map of calculated environment

境噪声垂直指向性随时间变化情况,如图 8 所示。

假设内波波前近似一条直线传播,传播速度为 0.25 m/s,当内波到达位置 D 时,阴影区为内波影响区域,96 h 后内波覆盖整个计算区域。图 9 给出内波进入计算海区后,噪声凹槽随时间变化情况,得出结果:随着内波影响范围的逐渐增大,噪声凹槽逐渐被填补。

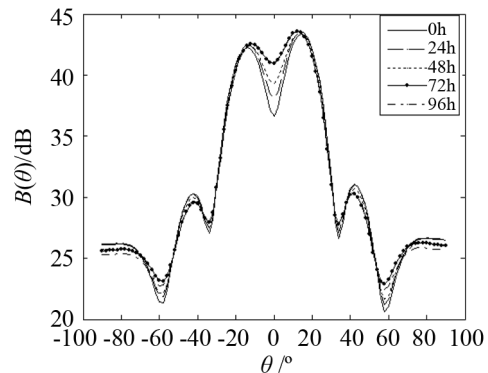


图 9 环境噪声垂直指向性随时间变化

Fig.9 The variation of noise vertical directivity with time

3 结 论

本文将内波活动期三维声速场模型和改进的环境噪声模型相结合,研究内波-环境噪声垂直指向性,数值计算表明,各阶简正波对噪声垂直指向性

的贡献(或影响)不同, 高阶简正波是形成水平方向凹槽的主因, 低阶简正波起填补环凹槽的主要作用, 在典型夏季浅海海域, 无内波时海面噪声源激发低号简正波的能量较低, 填补能力较差, 水平凹槽显著; 内波的出现引起不同号简正波耦合, 低号简正波能量增强, 其填补噪声水平凹槽的作用加强, 高阶简正波能量减少, 水平凹槽变浅了, 所获结论与文献[1]的结果一致。文中还获得了噪声水平凹槽被填补的程度与内波强度的关系, 指出随线性内波能量密度的增加, 水平凹槽被填补的程度增强, 并指出, 在内波向水听器阵传播过程中, 随着内波影响范围的扩大, 噪声垂直指向性水平凹槽被逐渐填补。

参 考 文 献

- [1] Yang T C, Kwang Yoo. The internal waves effecton on the noise vertical directionality in shallow water[C]// Oceans 96 IEEE "Prospects for the 21st century" Conference Proceeding, 1996: 9-16.
- [2] Evans R B. Vertical directivity of ambient noise in the present of internal waves[J]. J. Acoust. Soc. Am, 2004, **115**(5): 2508.
- [3] Daniel Rouself, Dajun Tang. Intenal wave effects on the ambient noise notch in the East China Sea: moel/data comparison[J]. J. Acoust. Soc. Am, 2006, **120**(3): 1284-1294
- [4] Tielbürger D, Finette S, Wolf S. Acoustic propagation through an internal wave field in a shallow water waveguide[J]. J. Acoust. Soc. Am, 1997, **101**(2): 789-808.
- [5] Yang T C, Kwang Yoo. Modeling the environmental influence on the vertical directionality of ambient noise in shallow water[J]. J. Acoust. Soc. Am, 1997, **101**(5): 2541-2553.
- [6] 蒋德军, 高天赋, 张云鹏, 等. 典型浅海温跃层内波对噪声场起伏的影响[J]. 声学学报, 1997, **22**(3): 198-208.
JIANG Dejun, GAO Tianfu, ZHANG Yunpeng, et al. The fluctuation of sound field due to internal waves on the thermocline in typical shallow water[J]. Acta Acoustica, 1997, **22**(3): 198-208.
- [7] 鄢锦, 张仁和. 黄海中部内波特征及其引起的声起伏[J]. 声学学报, 1999, **24**(3): 281-287.
YAN Jin, ZHANG Renhe. Charaterization of the internal waves and their effect on the sound transmission in the midst of the Yellow Sea[J]. Acta Acoustica, 1999, **24**(3): 281-287.
- [8] YANG Jie, ZHOU Shihong, ZHOU Jixun. Internal wave characteristics at the ASIAEX Site I in The East China Sea[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2004, **29**(4): 1054-1060.