

基于Bellhop的中尺度涡声传播特性分析

孙晓芳, 张世崧

海军大连舰艇学院, 军事海洋与测绘系, 辽宁 大连

收稿日期: 2023年6月20日; 录用日期: 2023年8月24日; 发布日期: 2023年9月4日

摘要

结合某航次的温盐数据, 利用经验公式, 得到其中尺度冷涡环境下沿水平方向上变化的声速剖面, 结合该声速剖面及所在位置的地形特点, 研究在有涡无涡环境下, 涡心到涡外在不同地形时的声传播损失变化规律。研究发现, 地形因素对声传播损失变化有着重要的影响, 在有地形影响的中尺度涡环境下, 声传播的会聚区变得比较发散, 在无地形时, 会聚区比较集中; 在中尺度涡的影响下, 会聚区会发生一定的偏移, 以冷涡进行分析, 中尺度冷涡会引起会聚区向涡边缘偏移, 且偏移量随着接收端深度的增加而减小, 且会聚带也随之变宽。

关键词

Bellhop, 冷涡, 声传播损失, 会聚区, 中尺度涡

Propagation Characteristics Analysis of Mesoscale Vortex in the Sea Sound Based on Bellhop

Xiaofang Sun, Shisong Zhang

Department of Hydrography and Cartography, PLA Dalian Navy Academy, Dalian Liaoning

Received: Jun. 20th, 2023; accepted: Aug. 24th, 2023; published: Sep. 4th, 2023

Abstract

Based on the temperature and salinity data of a certain voyage, an empirical formula is used to obtain the sound velocity profile that varies horizontally in a mesoscale cold vortex environment. Combined with the terrain characteristics of the profile and its location, the variation of sound propagation loss from the vortex center to different terrains outside the vortex is studied in an environment with and without vortices. Research has found that terrain factors have an important impact on changes in sound propagation losses. In a mesoscale vortex environment with terrain

effects, the convergence area of sound propagation becomes more divergent, while in the absence of terrain, the convergence area is more concentrated; Under the influence of mesoscale vortices, the convergence zone will undergo a certain displacement. Analyzing with a cold vortex, the mesoscale cold vortex will cause the convergence zone to shift toward the edge of the vortex, and the displacement will decrease with the increase of the depth of the receiving end, and the convergence zone will also widen.

Keywords

Bellhop, Cold Eddy, Acoustic Propagation Loss, Convergence Zone, Mesoscale Eddies

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

涡旋作为海洋中的一种旋转的、平移的水体,对于海洋上层水体的物理性质产生了重要的影响。而中尺度涡水平尺度约为 100~500 km,时间尺度约为 20~200 天,寄居在大洋环流中,以微小的速度移动着,能够强烈影响声波在海水中的传播,因此对海洋中尺度结构声传播特性进行分析,确定海洋中尺度结构影响声传播的基本规律,对水下声呐探测、水声对抗任务规划、潜艇隐身及预警探测等方面都有非常重要的意义。

自 20 世纪 70 年代大规模的海洋调查揭示了中尺度现象普遍存在于世界大洋中以来,中尺度涡对声传播特性的影响开始受到广泛关注。由于受海洋资料的限制,早期的研究多采用理想涡模型[1]。当 100 Hz 的无方向性声源的声波通过海洋涡旋, Ralph 了冷涡和暖涡声传播特点,得到声源与涡心位置的不同,导致会聚区距离和传播损失的变化[2]。Hall 应用绝热筒正弦波模型进行声传播受理想涡位置、强度和大小影响的分析。近年来国内积极展开对此问题的分析,刘清宇通过对中尺度涡的分析和建模,研究了中尺度涡旋对深海表面声道和会聚区效应的影响,发现中尺度涡旋引起声速剖面的水平非均匀性变化,并进一步引起会聚区结构特性的改变[3]。李佳讯等建立一个对不同海域普遍试用的海洋中尺度涡模型,利用 MMPE (Monterey-Miami Parabolic Equation)水声模型仿真分析海洋中尺度涡对声传播的影响,得到了涡旋性质、强度和位置、声源频率和置放深度对声传播特性影响[4]。张旭等开展了西太平洋冷涡环境下声传播变异现象的研究[5]。朱凤芹等研究了南海东北部中尺度暖涡对声传播的影响,研究表面暖涡的存在改变了声道轴深度,从而对声线传播方向产生影响,暖涡的存在使从暖涡中心出发的声线会聚区宽度减小,会聚位置前移,暖涡引起的传播损失在有涡和无涡时可以达到 30 dB 以上[6]。

海洋中尺度涡作为一种典型的水平非均匀环境,对其研究时需要考虑其水平方向上的声速剖面的变化,而 Bellhop 模型是以高斯波束跟踪方法为基础,可以计算水平非均匀环境中的声线轨迹和声场的射线模型。本文基于某航次海洋调查中尺度涡的实测温盐数据,结合 Bellhop 模型对地形变化及中尺度涡环境下的声场变化规律进行研究。

2. 声速剖面分析

海水中的声速对温度 T 、盐度 S 和静压力 P 的依赖关系,难以用解析式表示,通常用经验公式来表示它们之间的关系。经验公式是大量海上声速测量数据的实验总结。实用上,通常测量海水中的 T 、 S 和 P ,然后使用经验公式得到声速 c [7]。公式如下:

$$c = 1149.22 + \Delta c_T + \Delta c_S + \Delta c_P + \Delta c_{STP} \quad (1)$$

式中, $\Delta c_T = 4.6233T - 5.458510^{-2}T^2 + 2.82210^{-4}T^3 + 5.0710^{-7}T^4$

$$\Delta c_P = 1.6051810^{-1}P + 1.027910^{-5}P^2 + 3.45110^{-9}P^3 - 3.50310^{-12}P^4$$

$$\Delta c_S = 1.391(S - 35) - 7.810^{-2}(S - 35)^2$$

$$\begin{aligned} \Delta c_{STP} = & (S - 35)(-1.19710^{-3}T + 2.6110^{-4}P - 1.9610^{-1}P^2 - 2.0910^{-6}PT) \\ & + P(-2.79610^{-4}T + 1.330210^{-5}T^2 - 6.64410^{-8}T^3) \\ & + P^2(-2.39110^{-1}T + 9.28610^{-10}T^2) - 1.74510^{-10}P^3T \end{aligned}$$

式(1)适用的范围是: $-3^\circ\text{C} < T < 30^\circ\text{C}$, $33\text{‰} < S < 37\text{‰}$ 以及

$$1.013 \times 10^5 \text{ N/m}^2 < P < 980 \times 10^5 \text{ N/m}^2。$$

结合该经验公式, 利用实测的中尺度涡温盐数据, 得到图 1 所示的声速剖面图。

该声速剖面可以看出, 由涡内到涡外沿水平方向上表层声速值逐渐增大, 涡心为冷涡。

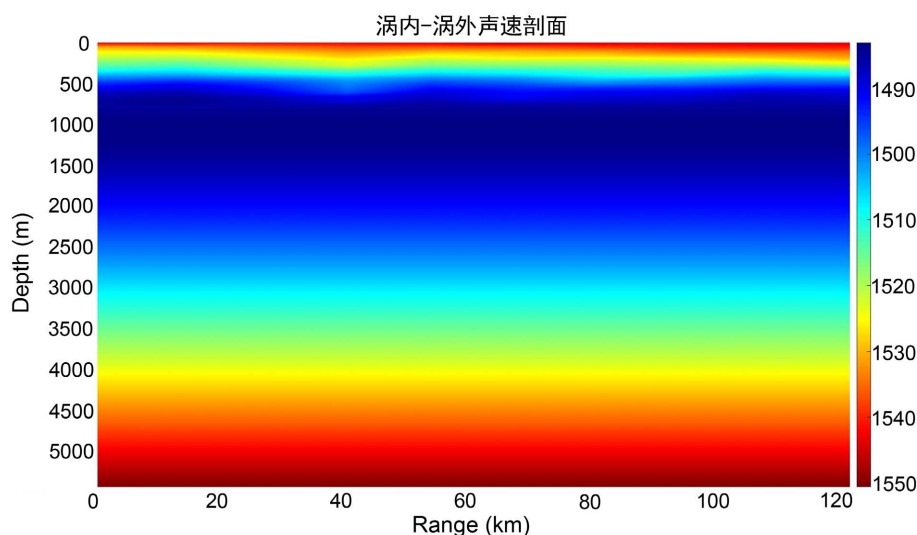


Figure 1. Pseudo color image of sound velocity profile from inside to outside the vortex
图 1. 涡内到涡外的声速剖面伪彩图

3. 模型理论分析

本文基于 Bellhop 模型对中尺度涡环境下冷涡的声传播特征进行了分析。Bellhop 模型是通过高斯波束跟踪方法, 在计算水平方向上非均匀环境中的声场, 对于高频率并伴有水平变化的海洋声速场问题特别有吸引力, 这是简正波模型、波数积分以及抛物方程模型不可替代的。高斯束射线跟踪法的基本思想是将高斯强度分布与每条声线联系起来, 认为以高斯声束的中心声线为代表的声线, 一般都能较平滑的过渡到声影区, 也能较平滑的穿过焦点线, 该方法所提供的计算结果与全波动模型的结果基本保持一致。Bellhop 模型在 600 Hz~30 KHz 频率范围时与实验数据及理论模型符合效果较好, 被指定为美国海军预报海洋 10~100 kHz 频带声传播的标准模型, 而且已经获批可用于频率低至 600 Hz 的军舰中。

Bellhop 对决定声速宽度和曲率的两个微分方程和标准射线方程一起进行积分, 就可以计算出声束中心声线附近的声束场。高斯束射线跟踪给定源点的初始束宽和曲率, 允许在离开声源向外传播时增大和减小曲率, 声束的演变过程由波束宽度 p 和波束曲率 q 决定[8]。

$$\frac{dp}{ds} = c(s)p(s) \quad (2)$$

$$\frac{dq}{ds} = -\frac{c_m}{c^2(s)}q(s) \quad (3)$$

其中, c_m 是声速 $c(r,s)$ 在声线路径法线方向上的二阶导数, 可以写为:

$$c_m = c_{rr}n_{(r)}^2 + 2c_{rz}n_{(r)}n_{(z)} + c_{zz}n_{(z)}^2 \quad (4)$$

其中, $n_{(r)}$, $n_{(z)}$ 是声线的法向量。

高斯声束给定声源的初始宽度和曲率, 允许其在离开声源向外传播时增大或减小曲率。最终我们可以导出的中心声线邻域上的解为以下形式:

$$p^{beam}(s,n) = A \sqrt{\frac{c(s)}{rq(s)}} e^{\left\{-j\omega \left[\tau(s) + \frac{p(s)}{2q(s)}n^2\right]\right\}} \quad (5)$$

式中, A 是任意常数; n 是离中心声线的垂直距离; $\tau(s)$ 是沿着声线的相位延迟。为使上述方程具有能量以中心声线为中心的声束形式, 选择 p 和 q 为复数。这样, p/q 的实部和虚部就可以通过下式与波束宽度 W 和曲率 K 联系起来:

$$W(s) = \sqrt{\frac{-2}{\omega I_m [p(s)/q(s)]}} \quad (6)$$

$$K(s) = -c(s) \operatorname{Re}[p(s)/q(s)] \quad (7)$$

于是动态声线方程就可以简单地用代表初始束宽和曲率的复数初始条件求解。

最后把所有声束加起来, 求得复合声压。各个声束的加权按照均匀介质中的标准点源问题确定。对于点源, 声束的相应加权为:

$$A(\theta_0) = \delta\theta_0 \frac{1}{c_0} \sqrt{\frac{q(0)\omega \cos\theta_0}{2\pi}} e^{\frac{j\pi}{4}} \quad (8)$$

式中, $\delta\theta_0$ 是声束之间的夹角, θ_0 为出射角。

4. 仿真实验分析

基于 CTD 数据计算得到的声剖数据, 选取声源频率为 1000 Hz, 声源发射深度为 100 m, 海底深度为 5500 m, 声速值为 1600 m, 衰减系数为 1.8 dB/ λ , 对有无涡旋及地形变化的情况下, 水声传播规律的变化特点进行分析。

4.1. 地形变化的影响

研究非均匀环境下中尺度涡声传播规律, 在其他条件不变的情况下, 对平底地形与有起伏地形进行对比研究, 如图 2, 图 3 所示, 平坦地形下的声场会聚现象比较明显, 而在有起伏地形变化时, 声场的会聚区开始变得分散, 会聚区变宽, 会聚区的能量也受到了严重的削减, 且对声影区影响也较大。

4.2. 中尺度涡旋结构对声传播会聚区的影响

中尺度涡在世界海洋中普遍存在而又实时变化, 它的出现改变了海区的水文环境分布, 进而使得

水下的声传播特征发生了明显的变化, 其中对于会聚区的偏移影响也非常大。为减少地形因素引起的干扰, 下面将结合平坦地形条件下, 针对有涡无涡环境下不同接收端深度时所对应的会聚区变化进行仿真分析。

分别对接收端深度为 10 m, 50 m, 100 m 以及 500 m 情况下进行有涡无涡时的会聚区偏移特性进行分析, 不难发现在中尺度涡环境下, 当声波由涡内向涡外传播时, 中尺度涡的存在会引起会聚区的偏移, 且随着接收端深度的增加, 会聚区的宽度逐渐变大, 会聚区相对无涡环境下的偏移量逐渐减少, 该仿真中是以冷涡为例进行分析, 可以明显地看到中尺度冷涡的存在引起会聚区向涡外偏移(图 4)。

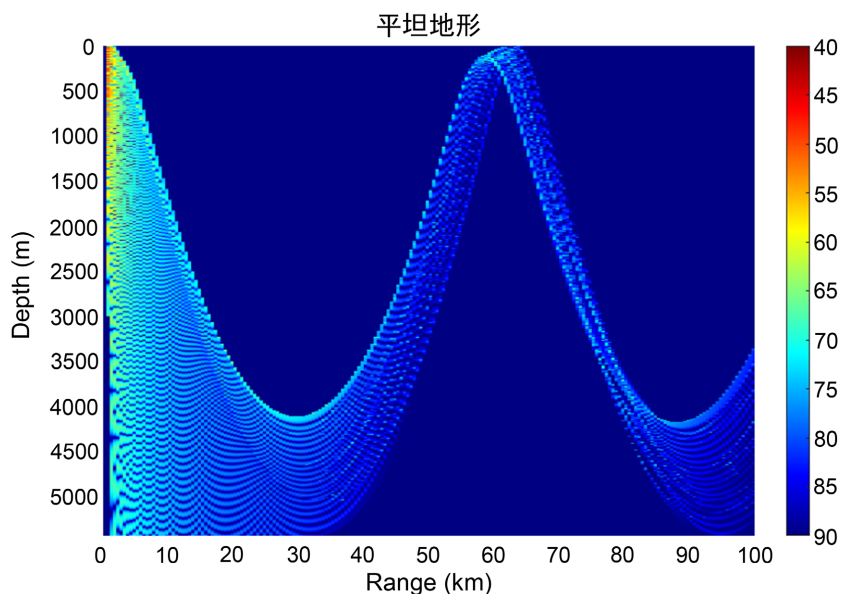


Figure 2. Sound propagation loss under flat terrain

图 2. 地形平坦下的声传播损失

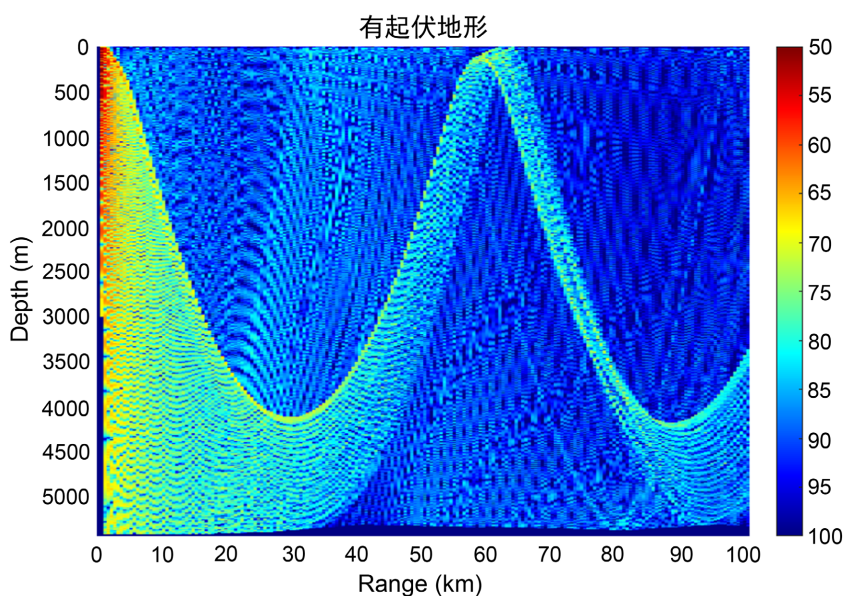


Figure 3. Sound propagation loss with terrain undulations

图 3. 有地形起伏的声传播损失

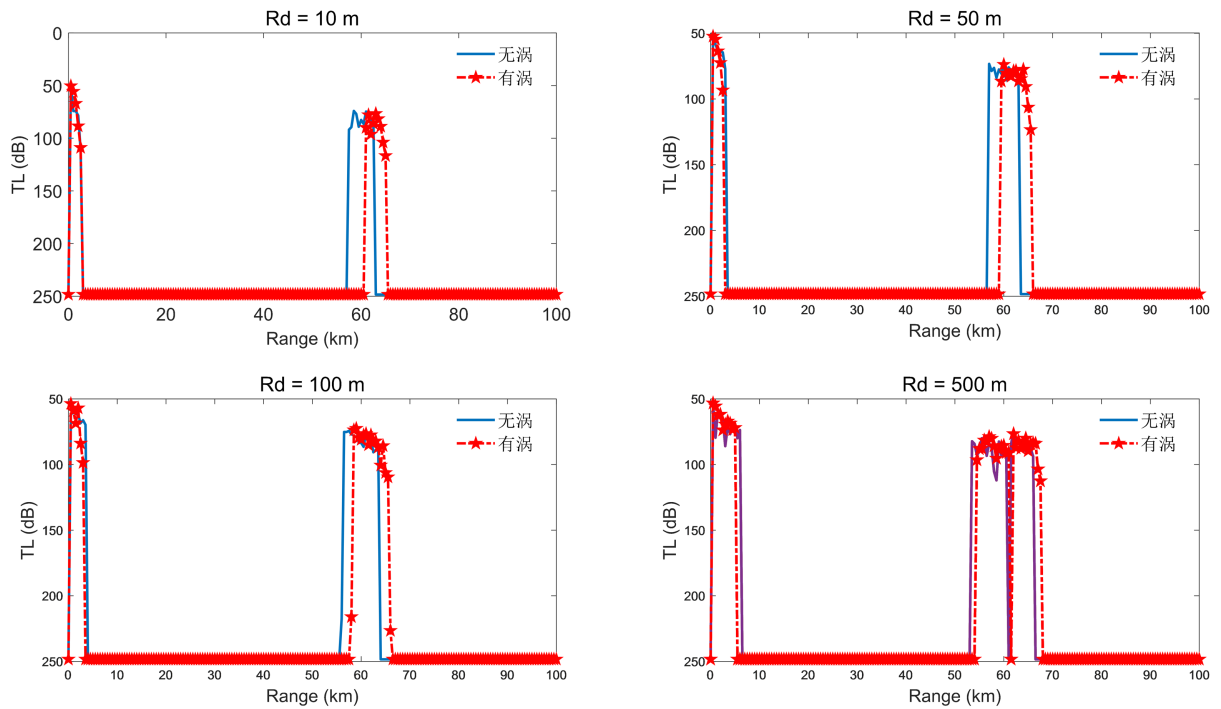


Figure 4. Propagation loss at different receiving depths on flat terrain
图 4. 平坦地形下不同接收深度处的传播损失

5. 结论

本文利用 Bellhop 声场模型, 结合某航次下的实测数据, 对于中尺度涡环境下的声传播特征进行了分析, 结论如下:

1) 海底地形条件对于声传播损失的影响比较大, 尤其是关于会聚区的变化。在有地形影响的中尺度涡环境下, 声传播的会聚区变得比较发散, 在无地形时, 会聚区比较集中。

2) 在中尺度涡的影响下, 会聚区会发生一定的偏移, 以冷涡进行分析, 中尺度冷涡会引起会聚区向涡边缘偏移, 且偏移量随着接收端深度的增加而减小, 且会聚带也随之变宽。

需要补充的是, 本文是以冷涡下的中尺度温盐数据作为原始数据进行计算的, 而且研究的是涡心到涡外的传播过程, 有一定的局限性。后期应深化相关研究工作, 增加暖涡的计算, 以及相应的涡外到涡内等方面的对比研究工作, 针对不同尺寸和强度的中尺度涡, 定量地去研究其对声传播规律的影响。

致谢

本文选题来自《西北太平洋中尺度涡的声传播研究》项目, 感谢张世崧教员在模型调试过程中给予的指导与帮助, 感谢试验组教员们在跟踪识别中尺度涡任务中获得的宝贵数据。

基金项目

海军大连舰艇学院 2022 年学院科研发展基金项目: 《西北太平洋中尺度涡的声传播特性研究》。

参考文献

- [1] 鲍森亮, 张韧, 高飞, 等. 基于海调实测资料的中尺度冷涡的会聚区声传播特征诊断[J]. 海洋科学进展, 2016, 34(4): 523-525.
- [2] Mizobata, K., Saitoh, S. and Wang, J. (2008) Interannual Variability of Summer Biochemical Enhancement in Relation

to Mesoscale Eddies at the Shelf Break in the Vicinity of the Pribilof Islands, Bering Sea. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, **55**, 1717-1728. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2008.03.002>

- [3] 刘清宇. 海洋中尺度现象下的声传播研究[D]: [博士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2006.
- [4] Li, J.X., Zhang, R., Chen, Y.D., *et al.* (2011) Ocean Mesoscale Eddy Modeling and Its Application in Studying the Effect on Underwater Acoustic Propagation. *Marine Science Bulletin*, **30**, 37-46.
- [5] 张旭, 程琛, 邱仁贵. 一个西太平洋冷涡影响下的会聚区声传播变异特征分析[J]. *海洋通报*, 2015, 32(2): 130-137.
- [6] Zhu, F.Q., Zhang, H.G. and Qu, K. (2021) Influence of Mesoscale Warm Eddies on Sound Propagation in the Northeastern South China Sea. *Journal of Harbin Engineering University*, **42**, 1496-1502.
- [7] 刘伯胜, 黄益旺, 陈文剑, 等. 水声学原理[M]. 北京: 科学出版社, 2019: 21-23.
- [8] 杨坤德, 雷波, 卢艳阳. 海洋声学典型声场模型的原理及应用[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2018: 16.