

三维声传播模型 BELLHOP3D 的 MPI 并行优化*

周益清^{1,2†} 骆文于^{1,2}

(1 中国科学院声学研究所, 声场声信息国家重点实验室 北京 100190)

(2 中国科学院大学 北京 100049)

摘要: 近些年, 随着我国对海洋探索的不断深入, 对复杂环境中声场的快速预报提出了越来越高的需求。BELLHOP3D 是一种基于射线法的三维声传播计算模型, 在海洋声学中应用十分广泛。BELLHOP3D 的计算效率比其他常用模型高, 但是仍然有非常大的提升空间。本文使用 MPI (消息传递接口) 对 BELLHOP3D 进行粗粒度的并行优化, 并行后的程序计算结果稳定可靠, 并行效率高, 更适合在实际应用中实现快速的声场预报。本文首先介绍射线法的原理, 然后介绍 BELLHOP3D 的串行算法和并行优化算法, 之后通过数值实验验证并行程序的计算准确性并测试它的并行计算性能。计算结果表明使用 MPI 对 BELLHOP3D 进行并行优化, 计算精度非常高, 而且能大幅节约计算时间。并行 BELLHOP3D 程序可以在 https://github.com/nj-zyq/BELLHOP3D_MPI.git 下载。

关键词: 海洋声学; 水下声传播; 射线法; BELLHOP3D; MPI 并行

中图法分类号: XXXXXX

文献标识码: A

文章编号:

DOI:

MPI parallel optimization of 3D sound propagation model BELLHOP3D

ZHOU Yiqing^{1,2} LUO Wenyu^{1,2}

(1 State Key Laboratory of Acoustics, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In recent years, with the development of marine science in China, there is a more and more demand for the rapid prediction of sound field in complex environment. BELLHOP3D is a sound propagation calculation model based on ray method, which is widely used in ocean acoustics. BELLHOP3D has higher computational efficiency than other commonly used models, but it is still possible to improve its efficiency. In this paper, the coarse-grained parallel optimization of BELLHOP3D is carried out by using MPI (Message Passing Interface). The results calculated by parallel program are stable and reliable, and the parallel efficiency is high, which is more suitable for realizing fast sound field prediction in practical application. This paper first introduces the theory of ray method, then introduces the serial algorithm and parallel algorithm of BELLHOP3D, and then verifies the computational accuracy of parallel program through numerical experiments and finally tests its parallel optimization computing performance. The calculation results show that the parallel optimization of BELLHOP3D using MPI has very high calculation accuracy and can greatly save calculation time. Code is available at https://github.com/nj-zyq/BELLHOP3D_MPI.git.

Keywords: ocean acoustics; underwater sound propagation; ray method; BELLHOP3D; MPI

20XX-XX-XX 收稿; 20XX-XX-XX 定稿

*国家自然科学基金项目(11774374)

作者简介: 周益清(1996—), 女, 宁夏银川人, 博士研究生, 研究方向: 水声物理。

†通信作者 E-mail: zhouyiqing18@mails.ucas.ac.cn

0 引言

射线法^[1]是一种常用的声场计算方法,它通过高频近似,将波动方程进行简化,然后使用较为简单快捷的几何声学求解声线的轨迹,最后叠加求解声场。常用的海洋声传播射线模型有 BELLHOP^[2]、Eigenray^[3]、HWT_3D_mm^[4]和 TRACEO^[5]等。

从上世纪 60 年代早期开始,射线法和简正波法就是计算水下声场的主要方法。射线法的理论发展成熟,物理意义清晰,计算速度快,因此现在仍然有广泛的应用场景,如:水下声场快速预报、海洋声层析、匹配场定位等水声领域。针对声影区和汇聚区声场计算不准确的问题,上世纪 80 年代,Porter^[6]提出了高斯射线追踪理论,使用高斯函数描述波束宽度与射线管宽度的关系,解决了传统射线方法中声影区和会聚区声能量不准确的问题和声束宽度设定的限制,有效地提高了计算精度。

随着水声学研究的不断深入,实际应用对声场计算速度提出的越来越高的要求,以及计算机性能的持续提升和并行计算技术的广泛应用,我们有能力也有必要使用并行计算技术提升水下声场的计算效率。

近年来,有不少学者对常用的声场计算模型进行了并行优化。2009 年,王鲁军^[7]使用 OpenMP 对抛物方程模型进行了优化;2011 年,陈连荣^[8]使用 MPI 对射线模型 BELLHOP 进行了优化;2019 年,张朝金^[9]使用 OpenMP 对射线模型 BELLHOP 进行了优化;2019 年,Ulmstedt Mattias^[10]使用 GPU 对 BELLHOP 进行了加速。不过这些都是对二维声场计算模型进行的并行优化。对于三维模型,近几年也有一些研究,Calazan^[11]对三维射线模型 TRACE3D 进行了并行优化;Zijie Zhu^[12]等人使用 OpenMP 和 MPI 对 Tang^[13]的楔形海底三维声场解析解计算程序进行了并行优化。

BELLHOP3D 模型应用广泛,且结构清晰,非常适合并行。本文使用 MPI 对 BELLHOP3D 进行并行优化。接下来将介绍 BELLHOP3D 的串行实现方法与并行优化方法,并比较串行程序和并行程序的误差与计算速度。

1 BELLHOP3D 串行算法

1.1 射线理论

考虑三维波动方程

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0, \quad (1.1)$$

将简谐波解写成如下形式^[1]

$$p(x, y, z, t) = A(x, y, z) e^{i[\omega t - k(x, y, z)\phi(x, y, z)]} = A(x, y, z) e^{i[\omega t - k_0 \phi(x, y, z)]}, \quad (1.2)$$

其中, A 为振幅, $k = \frac{\omega}{c} = \frac{\omega}{c_0} \frac{c_0}{c} = k_0 n(x, y, z)$ 为波数, c_0 为参考声速, n 为折射率, $k\phi = k_0\phi$ 为

相位, $\phi(x, y, z) = n\phi_1(x, y, z)$ 的量纲为长度,称为程函。

将式(1.2)代入式(1.1)可以得到强度方程

$$\nabla^2 \phi + \frac{2}{A} \nabla A \cdot \nabla \phi = 0, \quad (1.3)$$

以及方程

$$\frac{\nabla^2 A}{A} - k_0^2 \nabla \phi \cdot \nabla \phi + k^2 = 0, \quad (1.4)$$

当 $\frac{\nabla^2 A}{A} \ll k^2$ 时, 且有 $\nabla \phi \cdot \nabla \phi = |\nabla \phi|^2$, 式(1.4)可近似写为

$$|\nabla \phi|^2 = n^2(x, y, z), \quad (1.5)$$

即为程函方程。之后, 声场可以用射线来表示, 射线的方向由折射率决定。可以通过几何关系求解每一条射线的传播方式, 然后进行求和, 从而求解声场。

1.2 BELLHOP3D 声场计算模型

BELLHOP3D^[14] 求解射线方程可以由式(1.5)通过简单的几何关系得到

$$\begin{aligned} \frac{dx}{ds} &= c\xi(s), & \frac{d\xi}{ds} &= -\frac{1}{c^2} \frac{dc}{dx}, \\ \frac{dy}{ds} &= c\eta(s), & \frac{d\eta}{ds} &= -\frac{1}{c^2} \frac{dc}{dy}, \\ \frac{dz}{ds} &= c\zeta(s), & \frac{d\zeta}{ds} &= -\frac{1}{c^2} \frac{dc}{dz}, \end{aligned} \quad (1.6)$$

其中 $c(x, z, y)$ 是声速, $(x(s), y(s), z(s))$ 是射线轨迹, $(\xi(s), \eta(s), \zeta(s))$ 是射线方位角。

BELLHOP3D 中包含几种不同的几何波束。波束宽度与射线管成比例伸缩, 波束围绕中心射线构造, 并根据以声线为中心的坐标 (s, m, n) 定义, 这里 s 是沿声线的弧长, (m, n) 是从场点到中心声线的法向距离, 最小波束宽度为一个波长。其中, 帽形波束可以表示为

$$u_{\text{hat}}(s, m, n) = \frac{1}{\sqrt{|Q(s)|}} e^{i\omega\tau(s)} \frac{[L_1(s) - n][L_2(s) - m]}{L_1(s)L_2(s)}, \quad (1.7)$$

其中, L_1 和 L_2 是射线管的宽度, $|n| < L_1$ 且 $|m| < L_2$, 这意味着波束在射线管外消失。

使用高斯波束通常可以获得更高的精度。任意点的声场是附近多个波束的贡献值和, 而不仅仅是帽形波束提供的两个波束。这种对多个波束的积分可以平滑焦散, 还可以将能量泄漏到阴影区域。几何高斯波束的公式为

$$u_{\text{Gaussian}}(s, m, n) = \frac{1}{\sqrt{|Q(s)|}} e^{i\omega\tau(s)} e^{-\frac{1}{2} \frac{\left[\frac{n}{L_1(s)}\right]^2 \left[\frac{m}{L_2(s)}\right]^2}{L_1(s)L_2(s)}}. \quad (1.8)$$

由于高斯波束精度更高, 所以在后续的数值实验中我们主要使用高斯波束进行计算。

1.3 离散剖分与实现过程

BELLHOP3D 可以自行设定声源发射的俯仰角 α 和方位角 β 范围以及相应的数量 Nalpha 和 Nbeta, 以及接收点的柱坐标 (r, θ, z) 的范围和离散点数 NRr, Ntheta 和 NRz。在程序中主要使用 BELLHOPCORE 函数进行计算, 按照 Nbeta, Nalpha, NRr, Ntheta, NRz 的顺序循环计算每一条声线在接收点的声压 Amp, 然后求和得到对应接收点的总声压 P。具体算法如下:

算法 1 串行BELLHOP3D计算声压

输入: 海洋环境与离散信息(*.env *.bty 等输入文件)

输出: 声压 $P(N\theta, NR_z, NR_r)$

```
1: function BELLHOPCORESERIAL
2:    $P(N\theta, NR_z, NR_r) \leftarrow 0$ 
3:   for  $i\beta=1, N\beta$  do
4:     for  $i\alpha=1, N\alpha$  do
5:       function INFLUENCE3DGeoGAUSSIANCART
6:         for  $i_r=1, NR_r$  do
7:           for  $i\theta=1, N\theta$  do
8:             for  $i_z=1, NR_z$  do
9:               计算Amp
10:               $P(i\theta, i_z, i_r) \leftarrow P(i\theta, i_z, i_r) + \text{Amp}$ 
11:            end for
12:          end for
13:        end for
14:      end function
15:    end for
16:  end for
17:  return  $P$ 
18: end function
```

2 BELLHOP3D 并行算法

使用 MPI 对 BELLHOP3D 进行并行优化。开设 $n\text{procs}$ 个进程, 让他们同时读取输入文件中的环境信息, 然后将不同的方位角分配给不同的进程, 即, 将对 $i\beta$ 的循环分配给 $n\text{procs}$ 个进程, 每个进程处理约 $N\beta/n\text{procs}$ 个方位角的声线。将最后的结果归约求和到 0 号进程的 rdcP 变量, 然后写入输出文件。

并行算法如下所示:

算法 2 并行BELLHOP3D计算声压

输入: 海洋环境与离散信息(*.env *.bty 等输入文件), MPI进程信息

输出: 归约声压rdcP(Ntheta, NRz, NRr)

```
1: function BELLHOPCOREPARALLEL
2:   P(Ntheta, NRz, NRr)  $\leftarrow$  0
3:   rdcP(Ntheta, NRz, NRr)  $\leftarrow$  0
4:   for iloop=1,ceil(Nbeta/nprocs) do
5:     ibeta  $\leftarrow$  (iloop - 1) * nprocs + myrank + 1 (FORTRAN下标从1开始)
6:     for ialpha=1,Nalpha do
7:       function INFLUENCE3DGeoGAUSSIANCART
8:         for ir=1,NRr do
9:           for itheta=1,Ntheta do
10:            for iz=1,NRz do
11:              计算Amp
12:              P(itheta,iz,ir)  $\leftarrow$  P(itheta,iz,ir) + Amp
13:            end for
14:          end for
15:        end for
16:      end function
17:    end for
18:  end for
19:  rank0: rdcP  $\leftarrow$  MPIREDUCE( P )
20:  return rdcP
21: end function
```

3 数值计算结果

3.1 问题描述

计算 Acoustics Toolbox 2020 年版本的算例 wedge3dGaussian。该算例计算点源在全反射楔形海底中产生的声场,使用高斯波束。声源频率为10Hz,位置为(0,-19.1km,8m),接收深度为80m,接收点的水平距离从0至30km,水平距离的离散点数为301,接收点的方向角从-90°至90°,离散点数为901。将声源发射的声线,俯仰角范围设置为[-80°,80°],离散点数151;方位角范围设置为[-90°,90°],离散点数301。海洋环境如图1所示。

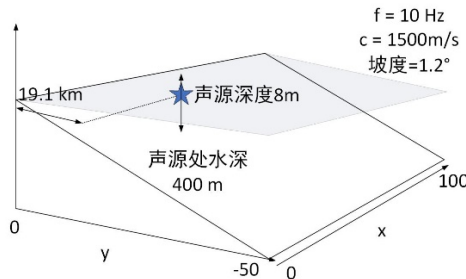


图 1 三维海洋环境示意图

Fig. 1 Schematic diagram of three dimensional environment

3.2 误差分析

本节分别使用串行 BELLHOP3D 和并行 BELLHOP3D 计算接收深度为 80m 平行于水面的平面的传播损失。图 2 是串行 BELLHOP3D、并行 BELLHOP3D 使用单进程和并行 BELLHOP3D 使用 72 个进程计算的传播损失。

数值计算结果显示，使用单进程的并行 BELLHOP3D 与串行 BELLHOP3D 相比完全没有误差，使用 72 进程的并行 BELLHOP3D 与串行 BELLHOP3D 计算的声压最大误差为 2.6577×10^{-9} ，相对误差 8.3053×10^{-7} ，这主要是最后各进程归约求和造成的。

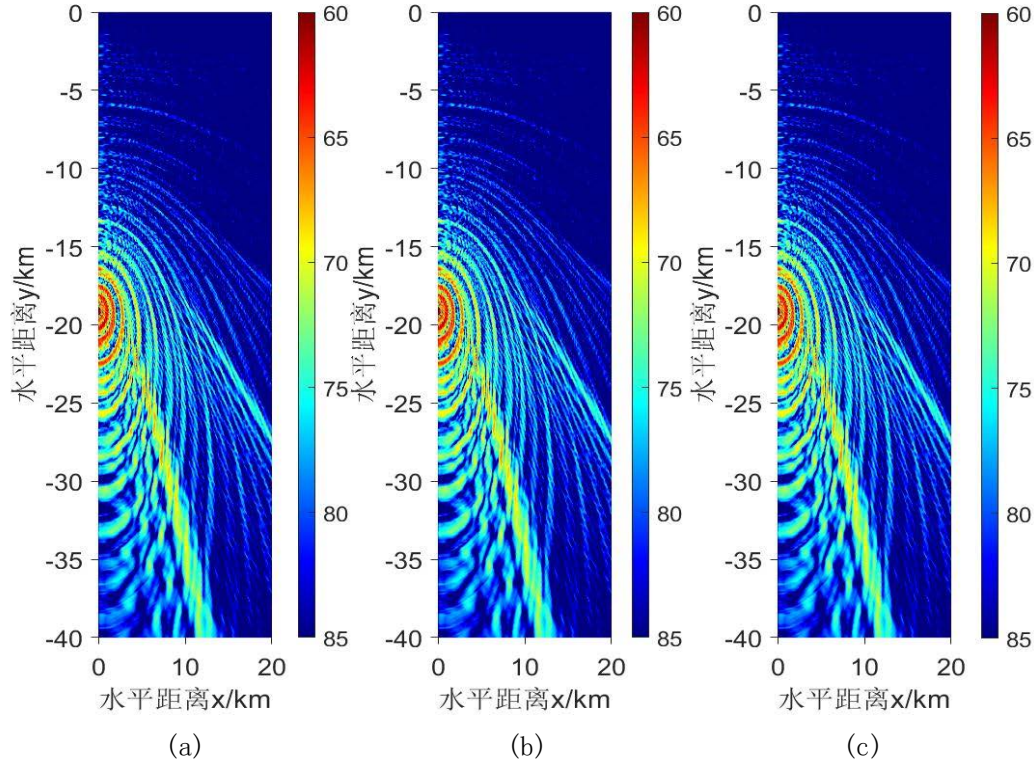


图 2 接收深度为 80m 的水平面的传播损失 (a)串行 BELLHOP3D, (b)并行 BELLHOP3D 使用单进程, (c)并行 BELLHOP3D 使用 72 个进程

Fig. 2 Transmission loss calculated by (a) serial BELLHOP3D, (b) parallel BELLHOP3D with 1 process and (c) parallel BELLHOP3D using 72 processes

3.3 并行测试结果

计算环境：2 个 Intel® Xeon® Gold 6140 CPU，主频 2.30 GHz。使用消息传递软件 oneAPI-2021.1.1，编译优化选项-O3。

并行性能的主要考察指标包括加速比、并行效率和可扩展性。

加速比指串行执行时间与并行执行时间的比值。并行效率指加速比与进程数的比值，即

$$E_p = \frac{T_s}{P \times T_p}, \text{ 其中 } P \text{ 为并程序序执行进程数, } T_p \text{ 为并程序序执行时间, } T_s \text{ 为串程序序执行时间。}$$

可扩展性指的是并行效率与问题规模、处理器数量之间的函数关系，它可以分为强可扩展性与弱可扩展性。强可扩展性指的是保持总体计算规模不变，随着处理器个数的增加，观察并行效率的变化。弱可扩展性指的是保持单个节点的计算规模不变，随着处理器个数的增加，观察并行效率的变化。下面我们将分别测试并行 BELLHOP3D 的强可扩展性和弱可扩展性。

3.3.1 强可扩展性

设置问题规模为 Nbeta=51, Nalpha=501，测试结果如表 1 和图 3 所示。可以看到，随着进程数

的增加，并行效率不断降低，且进程数越大，并行效率降低得越快。当进程数超过 Nbeta 的数量时，并行效率最低，因为有一些进程没有被分配任务。

表 1 强可扩展性测试

Table 1 Strong Scalability Test						
输入 Nbeta	输入 Nalpha	进程数	并行时间(s)	串行时间(s)	加速比	并行效率
51	501	1	157	141	0.8981	0.8981
51	501	2	80.3	141	1.7559	0.8780
51	501	4	40.8	141	3.4559	0.8640
51	501	8	21.7	141	6.4977	0.8122
51	501	16	12	141	11.7500	0.7344
51	501	32	6.69	141	21.0762	0.6586
51	501	64	3.87	141	36.4341	0.5693

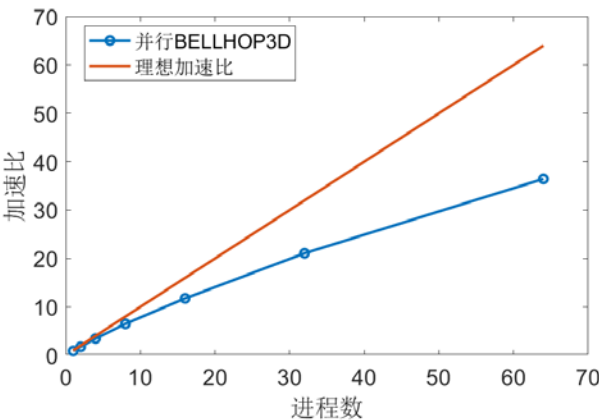


图 3 强可扩展性
Fig. 3 Strong scalability

3.3.2 弱可扩展性

设置每个节点的问题规模为 Nbeta=32，Nalpha=32，测试结果如表 2 和图 4 所示。可以看到，随着进程数的增加，并行效率不断降低，但是降低的速度并不明显。我们对 BELLHOP3D 进行的并行优化，并行效率主要取决于每个节点分配的任务的规模。

我们可以通过寻找对应机器上最优的并行效率，问题增加时保持每个节点的计算规模不变，然后增加节点数，以保持最优的并行效率。

表 2 弱可扩展性测试

Table 2 Weak Scalability Test						
输入 Nbeta	输入 Nalpha	进程数	并行时间(s)	串行时间(s)	加速比	并行效率
32	32	1	16.8	16	0.9524	0.9524
64	32	2	14.5	27.5	1.8966	0.9483
128	32	4	13.5	50.9	3.7704	0.9426
256	32	8	13.2	97.4	7.3788	0.9223
512	32	16	13.2	191	14.4697	0.9044
1024	32	32	13.5	386	28.5926	0.8935

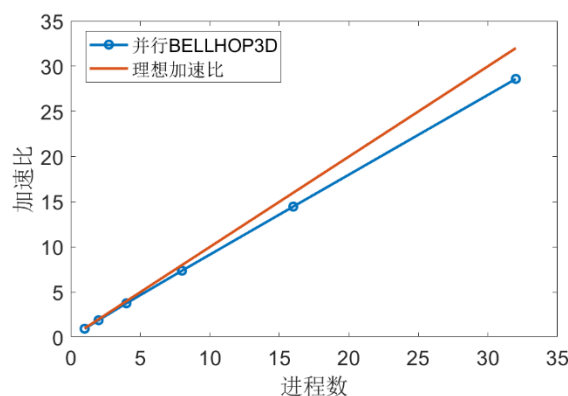


图 4 弱可扩展性
Fig. 4 Weak scalability

5 结论

本文使用 MPI 对射线模型 BELLHOP3D 进行并行优化，将不同方位角的计算分配给不同的进程分别计算声场，然后通过归约求和计算总声场，从而节约计算时间。数值计算结果表明，并行后的 BELLHOP3D 仅在归约求和部分引入误差，精度非常高，且对于粗粒度的问题并行效率较高。

当前版本的并行 BELLHOP3D 仅将声源发射的不同方位角进行了并行，当进程数大于方位角的数量时，并行效率会有明显的下降。因此可以考虑同时对俯仰角进行并行，或者使用其他并行方法，充分利用计算资源。

并行 BELLHOP3D 的加速比主要取决于进程数，当进程数不超过方位角的数量时，可以实现较高的加速比和并行效率。因此，并行后的 BELLHOP3D 非常适合用于计算对实时性要求很高的问题，或者在平时的计算中节约计算时间。

参 考 文 献

- [1] Jensen F B, Kuperman W A, Porter M B, et al. Computational ocean acoustics[M]. New York, NY: Springer New York, 2011.
- [2] Porter M B, Buckner H P. Gaussian beam tracing for computing ocean acoustic fields[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1987, 82(4): 1349-1359.
- [3] Dushaw B D, Colosi J A. Ray tracing for ocean acoustic tomography[R]. Washington Univ Seattle Applied Physics Lab, 1998.
- [4] Zabolotin N A, Godin O A, Sava P C, et al. Tracing three-dimensional acoustic wavefronts in inhomogeneous, moving media[J]. Journal of Computational Acoustics, 2014, 22(02): 1450002.
- [5] Rodriguez O C. The TRACEO ray tracing program[J]. Universidade do Algarve-Signal Processing Laboratory, 2010.
- [6] Porter M B, Buckner H P. Gaussian beam tracing for computing ocean acoustic fields[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1987, 82(4): 1349-1359.
- [7] 王鲁军, 彭朝晖. 基于 OpenMP 的抛物方程声场并行计算方法[J]. 声学技术, 2009, 28(3): 227 - 231.
- [8] Wang Lujun, Peng Zhaohui. Parallel computation of sound field by OpenMP-based PE model[J]. Technical Acoustics, 2009, 28(3): 227-231.
- [9] 陈连荣, 彭朝晖. 高斯射线声场模型在 MPI 环境下的并行算法设计[J]. 声学技术, 2011, 30(3): 34 - 36.
- [10] Chen Lianrong, Peng Zhaohui. MPI parallel computation of sound field based on Gaussian beam model[J]. Technical Acoustics, 2011, 30(3): 34-36.
- [11] 张朝金, 孙炳文. 射线模型 Bellhop 的并行化处理[J]. 应用声学, 2019, 38(1): 1-7.
- [12] Zhang Chaojin, Sun Bingwen. Parallel computation of sound field based on beam tracing model Bellhop[J]. Journal of Applied Acoustics, 2019, 38(1): 1-7.
- [13] Ulmstedt M, Stålberg J. GPU Accelerated Ray-tracing for Simulating Sound Propagation in Water[M]. 2019.
- [14] Calazan R M, Rodríguez O C, Nedjah N. Parallel ray tracing for underwater acoustic predictions[C]. International Conference on Computational

- Science and Its Applications. Springer, Cham, 2017: 43-55.
- [12] Zhu Z, Wang Y, Zhu X, et al. Parallel optimization of three-dimensional wedge-shaped underwater acoustic propagation based on MPI+ OpenMP hybrid programming model[J]. The Journal of Supercomputing, 2021, 77(5): 4988-5018.
 - [13] Tang J, Piao S, Yang X, et al. An analysis of horizontal refraction in the problem of sound propagation in wedge-shaped oceans[C]. OCEANS 2017-Aberdeen. IEEE, 2017: 1-6.
 - [14] Porter M B. Bellhop3d user guide[J]. Technical report, Heat, Light, and Sound Research Inc, 2016.