

深海不完整声道下反转点会聚区研究*

朴胜春¹⁾²⁾³⁾ 栗子洋³⁾ 王笑寒^{3)†} 张明辉¹⁾²⁾³⁾

1) (哈尔滨工程大学, 水声技术重点实验室, 哈尔滨 150001)

2) (哈尔滨工程大学, 海洋信息获取与安全工信部重点实验室, 哈尔滨 150001)

3) (哈尔滨工程大学水声工程学院, 哈尔滨 150001)

(2020 年 8 月 21 日收到; 2020 年 9 月 18 日收到修改稿)

近期南海远程声传播实验数据的处理分析表明在深海不完整声道中声道轴以下存在一种会聚区, 该会聚区相比于海面附近的上反转点会聚区在远距离处具有更高的会聚增益. 本文利用射线简正波理论确定了水中反转型焦散线和海面反射型焦散线位置, 对比发现实验中观测到的深海大深度会聚区位置与水中反转型焦散线位置一致, 证明该会聚区是由大量简正波同相叠加形成的下反转点会聚区, 其在深海声道轴以下的深度范围内都具有会聚效应, 研究了该会聚区的形成条件以及声源深度变化对会聚区焦散结构的影响, 对比了远距离处上下反转点会聚区的传播损失以及会聚区宽度, 分析表明第七个下反转点会聚区的会聚增益仍不小于 10 dB, 研究了声速垂直结构变化对下反转点会聚区的影响, 理论分析结果与实验数据吻合较好.

关键词: 会聚效应, 焦散线, 下反转点, 传播损失**PACS:** 43.30.Bp, 43.30.Zk, 43.30.Dr**DOI:** 10.7498/aps.70.20201375

1 引言

深海声道的声速分布会使声线在远离声道轴处发生上下反转或反射, 并在一定区域聚集形成一种空间周期性的高声强区域, 这个区域被称为会聚区^[1]. 会聚区内的声传播损失小, 有利于水声探测和通信, 因此会聚区声场特性的研究一直是深海声学研究的重点.

早在 20 世纪 40 年代, Woezel 与 Ewing^[2] 和 Brekhovskikh^[3] 各自独立地发现了深海中 SOFAR (sound fixing and ranging) 声道的存在. 20 世纪 50 年代, Berman 等^[4] 也在大西洋海上实验中接收到了 765 英里外 40 英尺处声源发出的信号. Hale^[5] 利用射线声学理论预报了实验中观测到的会聚区传播损失. Urick^[6] 指出在海水深度足够大的完整声道中, 声线可在声道轴以下反转, 不与海底相互

作用, 进而在海面附近反转点处形成会聚区; 在海水深度不够大的非完整声道中, 声线在海底的反射会抑制会聚效应. 他还发现当声源变深时, 观测到的单一会聚区会分裂为左右两个半区, 且间距逐渐增大. 张仁和^[7,8] 根据简正波方法和广义射线理论的研究指出大量的简正波同向叠加可在海面附近反转点处形成反转点会聚区. 龚敏等^[9] 通过实验验证了南海深海声道中存在反转点会聚区, 并指出当声源位于较浅深度时不能忽略海深的影响. 庄益夫等^[10] 发现声速垂直结构的变化对反转点会聚区位置偏移有影响. 李文和李整林^[11] 分析南海海域海底山附近实验结果, 发现由于海底山的阻挡, 第一会聚区位置发生了变化且传播损失增大.

张仁和等^[12] 在对负梯度深海声传播问题的研究中发现, 不完整声道下海底反射的声波也能形成会聚区. 胡治国等^[13] 发现海底斜坡环境会影响会聚区结构. 范培勤等^[14] 对不完整声道条件下海底

* 国家自然科学基金 (批准号: 11234002) 和国防科工局稳定支持项目 (批准号: JCKYS2020604SSJS004) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: wangxiaohan@hrbeu.edu.cn

反射会聚区位置与表面声速、水深之间的对应关系进行了研究. 张鹏等^[15]使用抛物方程数值分析结合射线理论对深海海底反射会聚区现象产生的物理原因进行了分析, 发现在直达声区范围内的海底地形隆起可导致海底反射会聚区提前形成.

会聚区的位置与焦散线有着重要的关系, 焦散线指的是声线图中相邻声线交会所形成的包络线^[1]. Raphael^[16]通过数学推导给出了 SOFAR 声道中声源与接收点位于同一深度的情况下焦散线位置方程. 针对经典射线理论在焦散线附近失效的问题, 目前已经有不少学者对焦散线附近声场预报做了改进研究. Sachs 和 Silbiger^[17]利用 WKB 近似和稳相法对焦散线附近的声场进行了分析. Blatstein^[18]用修正的射线声学理论分析了焦散线附近声场. Duda 和 Bowlin^[19]利用北太平洋 1000 km 传播的确定性射线声学模型, 发现海洋声信道的一个与深度有关的参数 $c\partial_{zz}c/(\partial_zc)^2$ 对几何射线传播有很强的影响, 焦散结构会影响射线的到达时间和强度. Bongiovanni 等^[20]提出了一种将深海温度数据与会聚区现象联系起来的模型, 采用抛物方程模型对所得到的会聚区域公式的精度进行了评估. Tindle^[21]提出了一种计算水声传播波形的新方法, 该方法基于波动方程的广义 WKB 解, 该理论可以计算焦散线亮区和阴影侧以及两个焦散相交形成的焦点处的声场. Ainslie 等^[22]针对水中等声速、沉积层中声速随深度递增的环境研究了声线经过沉积层后向上折射形成的焦散, 通过射线理论得到了焦散线的方程. White 等^[23]发现中尺度特征的存在会改变会聚区位置以及直达声强度.

21 世纪以来, 人们对会聚区的研究更加深入, 在 2009 年与 2010 年, 国外学者于菲律宾海进行了多次大规模的声传播实验, 同步测量了多个水平方位上海洋环境和低频远距离声传播情况, 结合菲律宾海上实验, Heaney 等^[24]研究了位于声道轴附近声源所产生的会聚区的位置以及形状; Stephen^[25]利用 CRAM PE 模型仿真了声源周围半径 260 km 内海面附近的三维声传播损失并与实验结果进行了对比. 我国也在 2014 年进行了南海海域的远程声传播实验, 实验中发现南海大深度处在 450 km 内存在 8 个会聚区, 且在远距离处仍有着较高的会聚增益^[26], 具有较大研究意义.

以往对于会聚区的研究多是集中于声道轴以上靠近海面的会聚区. 本文利用南海海域声传播

实验中测量的环境和声场数据, 应用射线简正波理论求出了水中反转型焦散线和海面反射型焦散线的位置, 通过对比焦散线位置与海上实验中观测到的会聚区的位置, 确定了实验中观测到的会聚区为下反转点会聚区, 研究了焦散线处各阶简正波的相位关系, 分析了不同声速剖面下, 声源深度对下反转点会聚区会聚效应的影响, 给出了平滑平均传播损失公式下的下反转点会聚区会聚增益的计算公式, 对比了上下反转点会聚区的增益, 研究了声速垂直结构变化对下反转点会聚区的影响.

2 深海大深度远程声传播

2014 年夏季, 哈尔滨工程大学等单位在南海深海海域开展了远程声传播实验, 实验的目的之一是为远程声场理论计算模型的检验提供可靠的实验数据. 实验中在 200 m 深度的位置上投放当量 1 kg 的宽带爆炸声源, 水听器在 3146 m 接收到的数据与理论仿真计算得到的声压传播损失随距离变化曲线的对比如图 1 所示^[26].

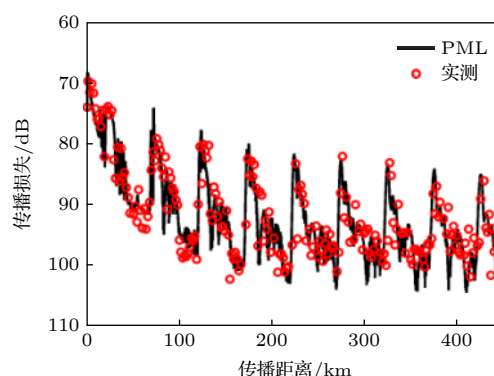


图 1 200 Hz 时声压传播损失曲线与实验数据对比图^[26]

Fig. 1. Comparison diagram of transmission loss and experimental data at 200 Hz^[26].

从图 1 中可以看出, 在深海大深度远距离处, 仍存在着很好的会聚效应, 在 450 km 的范围内, 可以观察到 8 个会聚效应显著的区域, 且随着距离的增大, 会聚效应的效果依然显著, 在第 8 个会聚区处会聚增益仍然高于 10 dB, 研究该会聚区的特性对深海远程声探测具有重大意义.

3 会聚区的位置以及类型

为了解释图 1 中观测到的深海大深度远距离的会聚效应, 利用简正波理论仿真实验海区的声

传播损失. 实验海区具体声速分布如图 2 所示, 图中蓝色虚线表示宽带爆炸声源所在深度 200 m, 蓝色实线表示声源深度处的声速, 红色虚线表示矢量水听器的接收深度 3146 m. 从图 2 中可以看出, 矢量水听器的接收深度是位于声源共轭深度以下的. 相应的环境参数记为, 海面深度为 z_0 , 声速为 c_0 ; 声源深度为 z_s , 声速为 c_s ; 声道轴深度为 z_1 , 声速为 c_1 ; 海底深度为 z_b , 声速为 c_b .

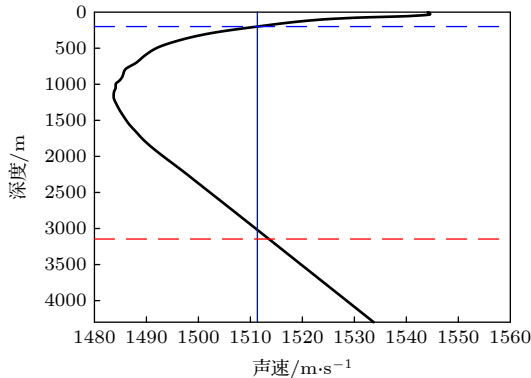


图 2 实验海区声速剖面分布
Fig. 2. Sound speed profile in experiment area.

在水中传播的声波满足如下的亥姆霍兹方程:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial p}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} + \frac{\omega^2}{c^2(z)} p = \frac{-\delta(z - z_s) \delta(r)}{2\pi r}. \quad (1)$$

(1) 式的解可以写为一系列简正波之和的形式:

$$p(r, z) = \frac{i}{4\rho(z_s)} \sum_{m=1}^{\infty} \varphi_m(z_s) \varphi_m(z) H_0^{(1)}(k_m r). \quad (2)$$

将汉克尔函数 $H_0^{(1)}(k_m r)$ 用渐进展开式表示, 得到

$$p(r, z) = \frac{i}{\rho(z_s) \sqrt{8\pi r}} e^{-i\pi/4} \sum_{m=1}^{\infty} \varphi_m(z_s) \varphi_m(z) \frac{e^{ik_m r}}{\sqrt{k_m}}. \quad (3)$$

选取声源深度 200 m, 中心频率 200 Hz, 以中心频率的 1/3 倍频程根据如下的频带内声场能量平均计算公式进行能量平均:

$$\bar{I}(f_0) = \frac{1}{2\Delta f} \int_{f_0-\Delta f}^{f_0+\Delta f} I(f) df. \quad (4)$$

频率范围为 178—224 Hz, 如图 2 所示的声速剖面, 以 1 Hz 为计算步长, 在每一个频点利用 kraken 软件进行声场计算, 然后利用 (4) 式计算声场平均能量, 然后依据此平均能量计算得出频率平均后的传播损失, 得到图 3 所示的传播损失伪彩图.

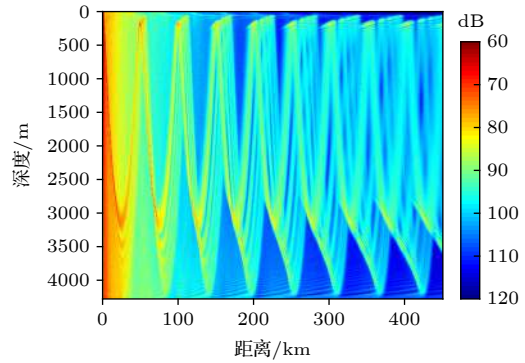


图 3 频率平均传播损失伪彩图

Fig. 3. Pseudo color map of transmission loss with frequency averaged.

从图 3 中可以看出, 在深海不完整声道中, 声道轴以下存在着会聚区. 由于会聚区的位置与焦散线有着重要关系, 为了确定该会聚区的类型, 需要对该会聚区的焦散线类型进行研究. 因此, 接下来根据射线声学理论, 对该会聚区焦散线的位置进行理论计算.

分层介质中的声线传播满足 Snell 定律, 当声源位于 $x = 0, z = z_s$ 处 (声速为 c_s), 出射角为 α_0 的声线经过的水平距离可以由如下的积分形式得出:

$$x = \cos \alpha_0 \int_{z_s}^z \frac{dz}{\sqrt{n^2(z) - \cos^2 \alpha_0}}. \quad (5)$$

根据 Snell 定律, 当声线到达声道轴以下的深海等温层中的反转深度时的声速 c_r 与初始角 α_0 的关系应该满足 $c_r = c_s / \cos \alpha_0$. 由此根据下反转深度处的声速 c_r 与海面声速 c_u 和海底声速 c_b 的关系, 可以将声线轨迹分为 4 种类型: 1) 折射型 (refracted ray, RR), 相应的声速条件为 $c_r < c_u, c_r < c_b$; 2) 海面反射型 (refracted surface-reflected, RSR), 相应的声速条件为 $c_u < c_r \leq c_b$; 3) 海面-海底反射型 (refracted surface-bottom-reflected, RSB), 相应的声速条件为 $c_r \geq c_u, c_r \geq c_b$; 4) 海底反射型 (refracted bottom-reflected, RBR), 相应的声速条件为 $c_b < c_r \leq c_u$. 其中第 4 种类型声线在海底反射, 无法在深海发生反转, 因此也无法在深海大深度形成会聚效应, 其他 3 种类型的声线示意图如图 4 所示.

为书写简便, 定义无量纲的算子 F :

$$F(z, \alpha_0) = \sqrt{1/\cos^2 \alpha_0 - c^2(z)/c_s^2}. \quad (6)$$

将声速剖面代入 (5) 式中进行计算, 得到声线轨迹的水平距离与算子 F 之间的关系, 在相邻两个上反转点之间的一个跨度内, 声线的水平距离 $x(z)$ 可以表示为如下公式:

$$x(z) = \begin{cases} c_s [F(z) - F(z_{ru})] / (\partial c(z) / \partial z) \pm \Delta L, & (x, z) \in \text{I}, \\ c_s [F(z_1) - F(z)] / (\partial c(z) / \partial z) + L_u \pm \Delta L, & (x, z) \in \text{II}, \\ c_s [F(z) - F(z_{rb})] / (\partial c(z) / \partial z) + L_u + L_b \pm \Delta L, & (x, z) \in \text{III}, \\ c_s [F(z_1) - F(z)] / (\partial c(z) / \partial z) + L_u + 2L_b \pm \Delta L, & (x, z) \in \text{V}, \end{cases} \quad (7)$$

其中

$$\begin{aligned} L_u &= c_s [F(z_1) - F(z_{ru})] / (\partial c(z) / \partial z), \\ L_b &= c_s [F(z_1) - F(z_{rb})] / (\partial c(z) / \partial z), \\ \Delta L &= c_s [F(z_s) - F(z_{ru})] / (\partial c(z) / \partial z), \end{aligned}$$

式中, 将一个跨度内的空间分为了 4 个区域. I 区域指的是上反转点到声道轴之间的区域, II 区域指的是声道轴到下反转点的区域, III 区域指的是下反转点到声道轴的区域, IV 区域指的是声道轴到上反转点的区域; z_{ru} 和 z_{rb} 分别为声线在上层海洋环境和下层海洋环境中的反转深度, 当声线在海面处发生反射的时候 $z_{ru} = z_0$, 当声线在海底处发生反射的时候 $z_{rb} = z_b$. L_u 表示声线由上层海洋环境的反转深度到声道轴处所经历的水平距离, L_b 表示声线由声道轴处到下层海洋环境的反转深度所经历的水平距离. ΔL 表示由于声源深度 z_s 和上层海洋环境的反转深度 z_{ru} 的位置差异所产生的声线水平距离的补偿值, 对于负角度出射的声线 (即声线从声源向上发出), ΔL 取正值; 对于正角度出射的声线 (即声线从声源向下发出), ΔL 取负值.

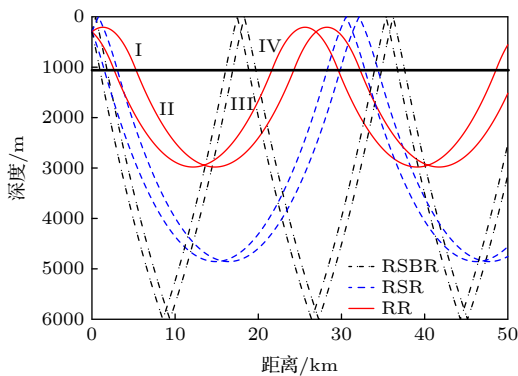


图 4 三类声线示意图

Fig. 4. Schematic diagram of three kinds of rays.

根据 (7) 式, 可以得出在深度为 z 处, 位于第 j 个会聚区中的声线的水平距离 $R_j(z)$ 为

$$R_j(z) = 2(j-1)(L_u + L_b) + x(z). \quad (8)$$

当声线的出射角从小到大逐渐增加时, 声线在同一深度的水平距离是先减小后增大的, 因此始终存在某一出射角使得声线水平距离达到极小值, 即

在 $dR_j(z)/d\alpha = 0$ 处形成焦散线, 这意味着在上层海洋环境反转或反射之后, 总会有不同出射角发出的声线发生聚焦, 从而在上层海洋环境反转点和下层海洋环境反转点之间形成焦散线.

与海面附近的会聚区类似, 深海大深度的会聚效应也是由于不同出射角的声线在传播过程中会聚形成焦散线, 因此具有更大的声强. 对于之前所述的 4 类声线, 在不完整声道中, 由于海底声速小于海面声速, 因此不存在 RSR 型声线, RSR 型声线在海底发生反射, 在海面附近形成海底反射会聚区, RBR 型声线在海底发生反射, 使得海底反射声线在第一个上反转点会聚区前形成一个会聚区, 在远距离处由于多次与海底发生反射, 对会聚区形成不起贡献, RR 型声线在海面附近形成上反转点会聚区, 在声道轴以下形成下反转点会聚区. 根据 (8) 式画出 RR 型声线所形成的焦散线, 并将焦散线位置与传播损失伪彩图进行对比, 得到图 5 所示结果, 其中, 实线为声源处正角度出射的声线形成的焦散线, 虚线为声源处负角度出射的声线形成的焦散线. 从图 5 中可以看出, RR 型声线所形成的焦散线位置与会聚区位置一致, 由此可以判断, 实验中所观测到的会聚区为下反转点会聚区.

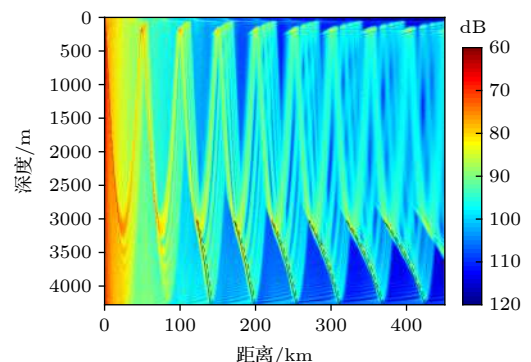


图 5 RR 型声线所形成的焦散线与传播损失伪彩图对比

Fig. 5. Comparisons of caustics formed by refracted rays and pseudo color map of transmission loss.

下面分析会聚区中各阶简正波之间的相位关系, 根据 WKB 解以及汉克尔函数的近似公式, 声压场的相位 θ 可以表示为

$$\theta = \int_{z_s}^z \kappa_n(z') dz' + k_n r, \quad (9)$$

其中

$$\kappa_n^2(z) = k_0^2 q^2(z) - k_n^2, \quad (10)$$

k_n 为第 n 阶简正波本征值, $q(z) = c_0/c(z)$.

相邻的模式会相互干涉并产生相位差, 以阶数 n 为中心的相邻 Δn 阶模式同向叠加时产生的相位差 $\Delta\theta$ 满足 $\Delta\theta/\Delta n = 2\pi m$, 其中 m 为正整数, 根据 (9) 式, 得到如下表达式:

$$\frac{\Delta\theta}{\Delta n} = 2\pi m = \left(\frac{\Delta k_n}{\Delta n} \right) r - \int_{z_s}^z \frac{k_n (\Delta k_n / \Delta n)}{\kappa_n(z')} dz'. \quad (11)$$

因此, 根据 (11) 式, 对于不同的深度, 必须确定中心阶数 n 以及相邻的 Δn 阶模式, 才能分析会聚区中起主要贡献的简正波之间的相位关系. 中心阶数 n 定义为与其他阶模式相比, 在深度 z 处产生最强的模式强度的简正波阶数. 即通过模式强度幅值函数的最大值来确定 n 的值:

$$A_n = \left| \frac{\varphi_n(z_s) \varphi_n(z_r)}{\sqrt{k_n}} \right|. \quad (12)$$

如图 6 所示, 画出了接收深度位于 3146 m 时 RR 型声线所对应的简正波归一化幅值之间的关系. 从图 6 中可以看出, 第 12 阶 RR 型声线所对应的简正波的模态强度幅值函数取得最大值, 意味着该阶简正波对这一接收深度处的声场起主要贡献, Δn 的选取为中心阶数 n 左右两侧极小值对应的阶数, 如图 6 中 $\Delta n = 12$.

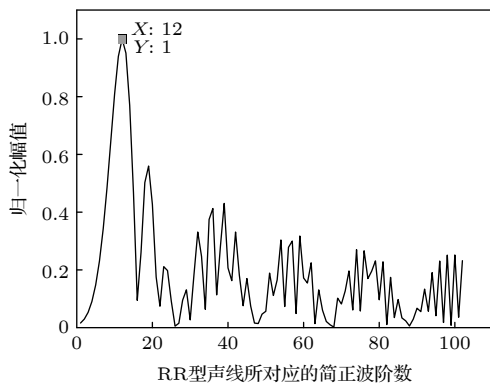


图 6 3146 m 接收深度时 RR 型声线所对应的简正波归一化幅值

Fig. 6. Normalized modal amplitudes, with receiver at 3146 m.

在下反转点会聚区接收深度 3146 m 处, 将 RR 型声线所对应的简正波从第 1 阶开始每相邻

Δn 阶相位差取均值, 得到图 7 所示图像, 从图 7 中可以看出, 以阶数 n 为中心, 相邻 Δn 阶简正波的平均相位差约为 0, 这表明在该会聚区处, 以阶数 n 为中心, 相邻的 Δn 阶简正波几乎是同向叠加的, 因此能够产生更大声强.

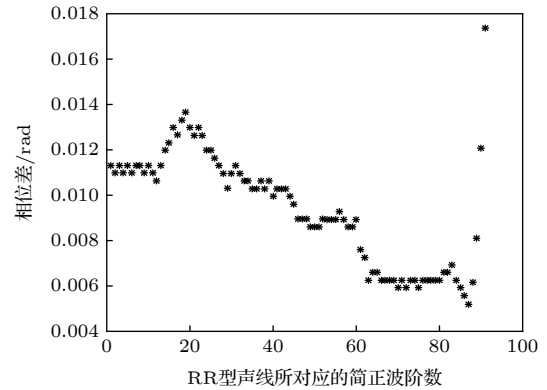


图 7 每 Δn 阶简正波相位差均值

Fig. 7. The mean value of the phase difference of Δn normal modes.

4 下反转点会聚区的特性

4.1 下反转点会聚区的形成条件

由于下反转点会聚区是在下反转点附近出现的会聚区, 因此, 下反转点会聚区的形成与是否存在下反转点有着密切的联系. 图 8 根据实验测得的声速剖面, 画出了不同声速剖面时传播损失伪彩图, 其中完整声道的声速剖面为实验测得的声速剖面进行延伸得到的, 延伸的部分在图中用虚线表示, 并在传播损失伪彩图中标注出了下反转点会聚区的位置. 从图 8 中可以看出, 在完整声道中, 由于声道轴以下的深度足够深, 总会有声线在声道轴以下反转, 因此完整声道中一直存在下反转点会聚区, 且会聚区位置位于声源共轭深度至海面共轭深度之间. 在不完整声道中, 如果声源共轭深度小于海底深度, 则会有声线在声道轴以下反转, 形成下反转点会聚区, 且会聚区位置位于声源共轭深度至海底之间; 如果声源共轭深度大于海底深度, 则没有声线能够在声道轴以下反转, 从而也无法形成下反转点会聚区.

4.2 声源深度对下反转点会聚区焦散结构的影响

本次远海声传播实验海域为不完整声道, 因此

着重研究不完整声道中声道轴以下的下反转点会聚区. 从图 5 中可以看出, RR 型声线所形成的焦散线在每一个下反转点会聚区内有两部分强度较大, 分别由负角度出射的声线与正角度出射的声线所形成, 且负角度出射的声线所形成的焦散线滞后于正角度出射的声线所形成的焦散线.

声源深度对下反转点会聚区的焦散结构具有一定的影响. 从图 8 的分析中可知, 若声源深度处声速大于海底声速, 则不会形成下反转点会聚区,

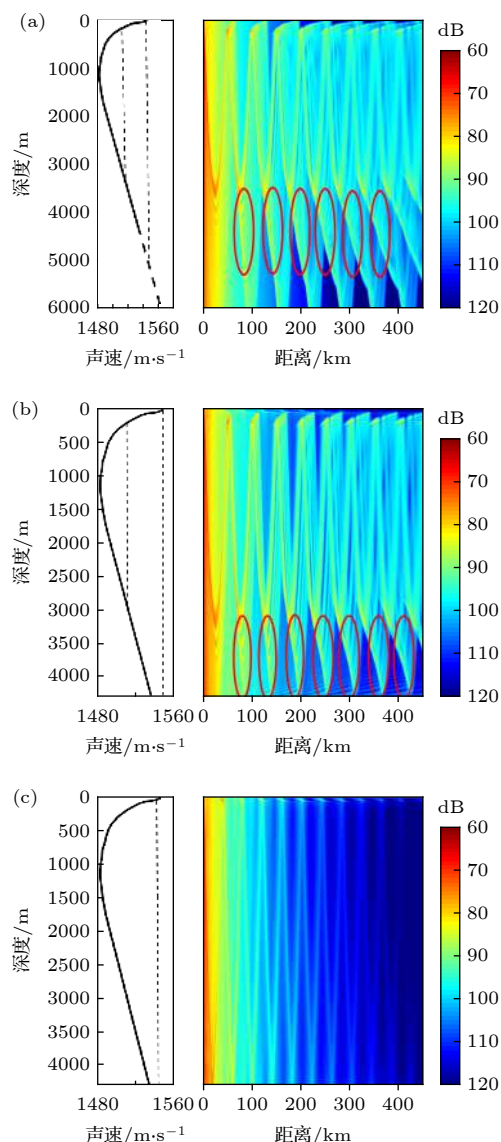


图 8 不同声速剖面传播损失对比图 (a) 完整声道; (b) 不完整声道声源深度声速小于海底声速; (c) 不完整声道声源深度声速大于海底声速

Fig. 8. Comparisons of transmission losses at different sound speed profile: (a) Complete channel; (b) incomplete channel with source depth sound speed less than bottom sound speed; (c) incomplete channel with source depth sound speed greater than bottom sound speed.

当声源深度声速小于海底声速时, 图 9 分别画出了声源深度为 100, 200, 和 500 m 时负角度出射声线以及正角度出射声线的 RR 型声线所形成的焦散线位置结构示意图. 从图 9 中可以看出, 当声源深度较浅的时候, 负角度出射声线以及正角度出射声线的 RR 型声线所形成的焦散线趋于重合, 随着声源深度的增大, 负角度出射声线所形成的焦散线滞后于正角度出射声线所形成的焦散线, 并且声源

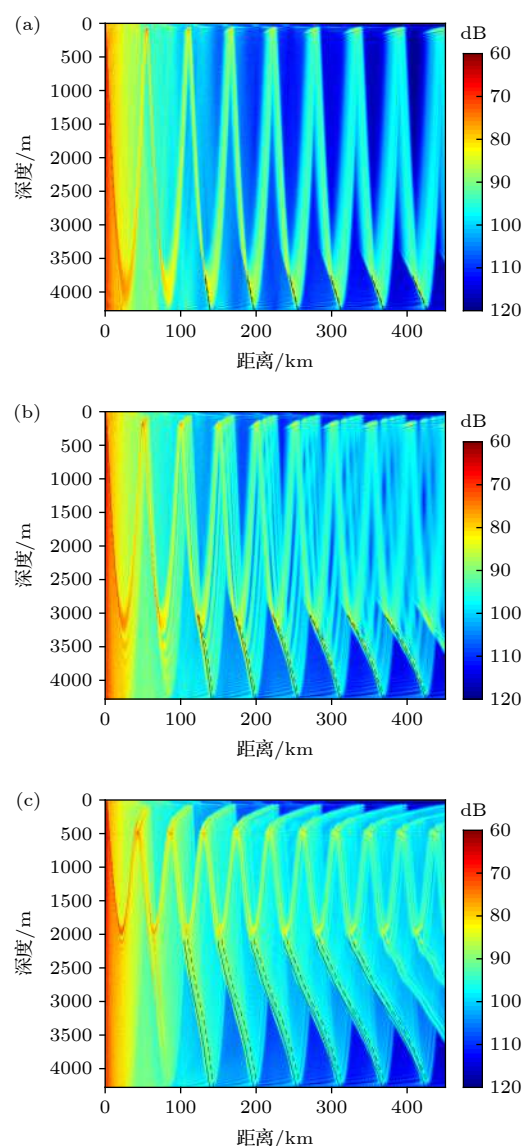


图 9 不同声源深度时 RR 型声线所形成的焦散线结构示意图, 实线为正角度出射声线所形成的焦散线, 虚线为负角度出射声线所形成的焦散线 (a) 声源深度 100 m; (b) 声源深度 200 m; (c) 声源深度 500 m

Fig. 9. Schematic diagram of the structure of caustic lines formed by RR type rays at different source depths. The full line is the caustic line formed by the positive angle of departure, and the imaginary line is the caustic line formed by the negative angle of departure: (a) 100 m; (b) 200 m; (c) 500 m.

深度越深, 两类焦散线之间的距离越大. 随着水平距离的增加, 两类焦散线之间的距离也在逐渐增加, 且焦散线的倾斜程度也在逐渐增加. 从图 9 中也可以看出, 在不完整声道的声道轴以下区域, 下反转点会聚区从声源的共轭深度开始, 一直到海底附近的一定深度范围内都有很强的会聚效应.

选取了接收 4000 m, 分别画出了声源深度 100, 200 以及 500 m 时传播损失图像, 如图 10(a) 所示, 并将第 7 个下反转点会聚区处的传播损失放大显示于图 10(b) 中. 从图 10 中可以看出, 随着声源深度的增加, 下反转点会聚区的宽度逐渐增加, 同时传播损失也逐渐增大.

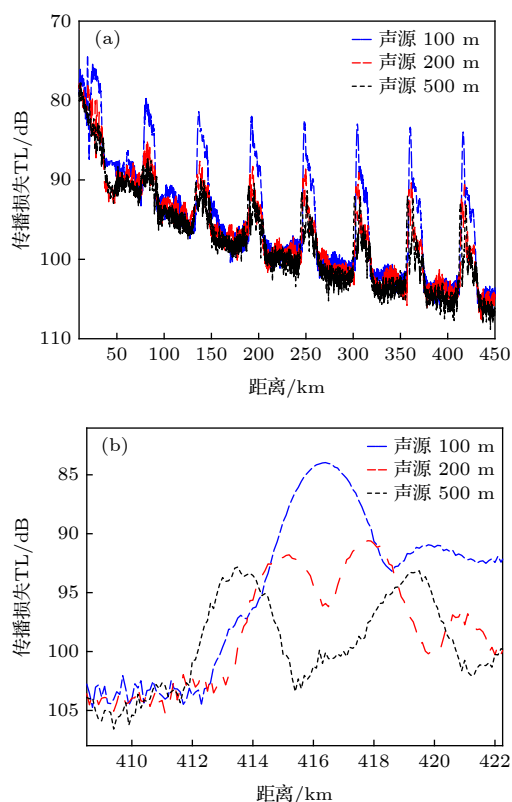


图 10 接收深度 4000 m 传播损失图像 (a) 0—450 km; (b) 第 7 个下反转点会聚区

Fig. 10. Transmission loss with receiver depth at 4000 m: (a) 0–450 km; (b) enlarge view of the 7th lower turning point convergence zone.

4.3 下反转点会聚区空间分布特点

为了对比下反转点会聚区与上反转点会聚区, 选取了声源 200 m, 接收深度 127 m 以及 127 m 的共轭深度 3500 m, 根据 (4) 式计算出平均能量, 得出两个接收深度的传播损失曲线如图 11(a) 所示. 从图 11(a) 中可以看出, 随着水平距离的增大, 下反转点会聚区的传播损失逐渐小于上反转点会聚区.

聚区, 在第 7 个会聚区, 下反转点会聚区传播损失低于上反转点会聚区传播损失约 5 dB. 图 11(b) 为第 7 个会聚区的局部放大图, 从图中可以看出, 随着距离增大, 上反转点会聚区的宽度逐渐展宽, 在第 7 个上反转点会聚区处的会聚区宽度已达 10 km 以上, 而下反转点会聚区在第 7 个下反转点会聚区处的会聚区宽度仍为 5 km 左右.

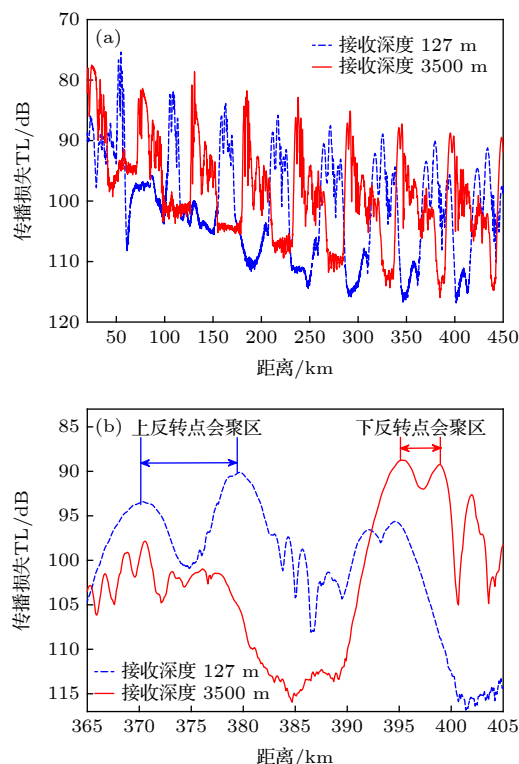


图 11 127 与 3500 m 接收深度传播损失对比 (a) 0—450 km; (b) 第 7 个会聚区处

Fig. 11. Comparison of transmission losses with receiver depth at 127 m and 3500 m: (a) 0–450 km; (b) the 7th convergence zone.

4.4 声速垂直结构变化对下反转点会聚区的影响

深海声道表面层声速受季节变化大, 在夏季为负梯度声速, 在冬季为正梯度声速, 为了研究声速垂直结构的变化对下反转点会聚区的影响, 图 12 分别画出了声源位于 200 m 时夏季和冬季声速剖面情况下下反转点会聚区焦散线位置与传播损失伪彩图的对比. 从图 12 可以看出, 在不完整声道中, 下反转点会聚区的位置并不受冬夏声速变化的影响, 因为在不完整声道中, 下反转点会聚区的范围是从声源共轭深度到海底, 表面层的声速变化并未对声源深度的声速产生影响, 因此也未改变声源

共轭深度. 此外, 冬季由于表面层正梯度声速产生的声道轴的声速仍然大于海底声速, 因此下反转点会聚区的范围仍到海底为止, 因此, 冬季时下反转点会聚区的范围与夏季时一致.

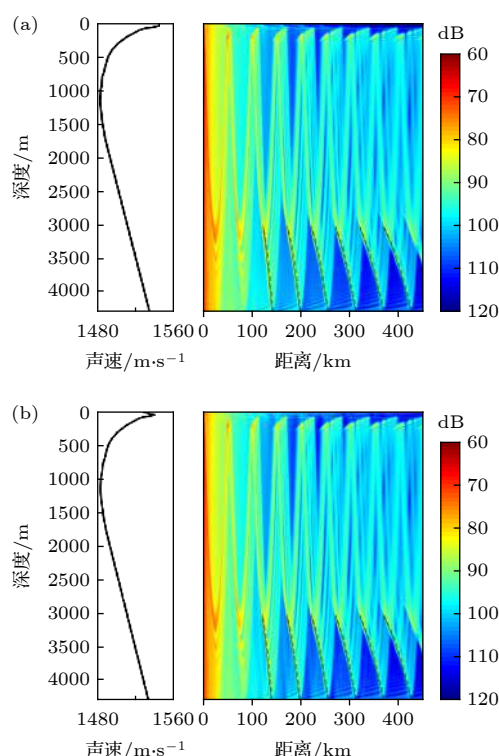


图 12 冬夏声速剖面下反转点会聚区焦散线对比图 (a) 夏季; (b) 冬季

Fig. 12. Comparisons of caustics at lower turning point convergence zone in summer and winter: (a) Summer; (b) winter.

5 总 结

深海声道的声速分布使得声线在远离声道轴处发生上下反转或反射, 并在一定区域聚集成会聚区. 会聚区内的声传播损失小, 有利于水声探测和通信, 因此会聚区声场特性研究一直是深海声学研究的重点. 会聚区根据形成机理可分为反转点会聚区和反射会聚区; 根据空间位置又可将反转点会聚区分为声道轴以上的上反转点会聚区和声道轴以下的下反转点会聚区; 反射会聚区目前研究中发现的为声道轴以上的海底反射会聚区. 本文根据近期南海远程声传播实验数据处理分析中发现的深海大深度处存在的一种会聚区, 并对其进行了研究. 利用射线简正波理论确定了折射型焦散线和海面反射型焦散线的位置, 通过对比发现观测到深海大深度会聚区的位置与折射型焦散线的位置重合, 证明实验中观测到的会聚区是由折射型焦散线

附近大量同向简正波叠加形成的下反转点会聚区. 研究发现下反转点会聚区具有以下特点. 首先, 在不完整声道中, 声源共轭深度小于海底深度时, 才会形成下反转点会聚区. 其次, 研究表明下反转点会聚区的焦散结构与声速剖面分布以及声源深度有着密切的联系. 在不完整声道中, 负角度出射声线所形成的焦散线滞后于正角度出射声线所形成的焦散线, 并且声源深度越深, 两类焦散线之间的距离越大. 随着水平距离的增加, 两类焦散线之间的距离也在逐渐增加, 且焦散线的倾斜程度也在逐渐增加. 除此之外, 根据平滑平均传播损失计算公式对比了上下反转点会聚区传播损失, 随着水平距离的增加, 上下反转点传播损失增益变化基本一致, 但上反转点会聚区宽度展宽的程度大于下反转点会聚区宽度展宽的程度. 最后, 分析了冬夏声速垂直结构变化对下反转点会聚区的影响, 由于不完整声道中下反转点会聚区深度范围的影响取决于声源共轭深度和海底声速, 因此, 表面层冬夏声速变化对下反转点会聚区深度范围的影响并不大.

感谢参与 2014 年南海声传播实验的全体工作人员, 是他们的辛勤劳动为本文提供了可靠的实验数据, 同时还要感谢徐传秀对数据进行的处理.

参考文献

- [1] Jensen F B, Kuperman W A, Porter M B, Schmidt H 2011 *Computational Ocean Acoustics* (2nd Ed.) (New York: Springer-Verlag) pp16, 175
- [2] Woezel J L, Ewing M 1948 *Geol. Soc. Amer. Memoirs* **27** 1
- [3] Brekhovskikh L M 1948 *Dokl. Akad. Nauk. SSSR* **69** 157
- [4] Berman A, Clay C S, Frosch R A, Sherry H B 1959 *J. Acoust. Soc. Am.* **31** 838
- [5] Hale F E 1961 *J. Acoust. Soc. Am.* **33** 456
- [6] Urick R J 1965 *J. Acoust. Soc. Am.* **38** 348
- [7] Zhang R H 1980 *Acta Acust.* **1** 28 (in Chinese) [张仁和 1980 声学学报 **1** 28]
- [8] Zhang R H 1982 *Acta Acust.* **2** 75 (in Chinese) [张仁和 1982 声学学报 **2** 75]
- [9] Gong M, Xiao J Q, Wang M X, Wu Y G, Huang D H 1987 *Acta Acust.* **6** 417 (in Chinese) [龚敏, 肖金泉, 王孟新, 吴寅庚, 黄德华 1987 声学学报 **6** 417]
- [10] Zhuang Y F, Zhang X, Liu Y 2013 *Marin Sci. Bull.* **1** 46 (in Chinese) [庄益夫, 张旭, 刘艳 2013 海洋通报 **1** 46]
- [11] Li W, Li Z L 2016 *Sci. Sin.-Phys. Mech. Astron.* **46** 094303 (in Chinese) [李文, 李整林 2016 中国科学: 物理学 力学 天文学 **46** 094303]
- [12] Zhang R H, Sun G C, Lei L Y, Zhou J L 1981 *Acta Acust.* **3** 198 (in Chinese) [张仁和, 孙庚辰, 雷良颖, 周坚力 1981 声学学报 **3** 198]
- [13] Hu Z G, Li Z L, Qin J X, Ren Y, Zhang R H 2016 *Sci. Sin.-*

- Phys. Mech. Astron.* **46** 094304 (in Chinese) [胡治国, 李整林, 秦继兴, 任云, 张仁和 2016 中国科学: 物理学 力学 天文学 **46** 094304]
- [14] Fan P Q, Da L L, Li Y Y 2012 *Ocean Technol.* **4** 23 (in Chinese) [范培勤, 笕良龙, 李玉阳 2012 海洋技术 **4** 23]
- [15] Zhang P, Li Z L, Wu L X, Zhang R H, Qin J X 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 014301 (in Chinese) [张鹏, 李整林, 吴立新, 张仁和, 秦继兴 2019 物理学报 **68** 014301]
- [16] Raphael D T 1974 *J. Acoust. Soc. Am.* **56** 416
- [17] Sachs D A, Silbiger A 1971 *J. Acoust. Soc. Am.* **49** 824
- [18] Blatstein I M 1971 *J. Acoust. Soc. Am.* **49** 1568
- [19] Duda T F, Bowlin J B 1994 *J. Acoust. Soc. Am.* **96** 1033
- [20] Bongiovanni K P, Siegmann W L, Ko D S 1996 *J. Acoust. Soc. Am.* **100** 3033
- [21] Tindle C T 2002 *J. Acoust. Soc. Am.* **112** 464
- [22] Ainslie M A, Robins A J, Simons D G 2004 *J. Acoust. Soc. Am.* **115** 1449
- [23] White A W, Henry F S, Andrew R K, Mercer J A, Worcester P F, Dzieciuch M A, Colosi J A 2016 *J. Acoust. Soc. Am.* **140** 3952
- [24] Heaney K D, Baggeroer A B, D'Spain G L, Becker K M, Murray J J, Worcester P F, Dzieciuch M A, Mercer J, Andrew R 2009 *Proceedings of the 3rd International Conference & Exhibition on Underwater Acoustic Measurements: Technologies & Results (UAM' 09)* Nafplion, Greece, June 21–26, 2009 p121
- [25] Stephen R 2011 *Woods Hole Oceanographic Institution Technical Report* WHOI-2011-04.
- [26] Xu C X 2017 *Ph. D. Dissertation* (Harbin: Harbin Engineering University) (in Chinese) [徐传秀 2017 博士学位论文 (哈尔滨: 哈尔滨工程大学)]

Lower turning point convergence zone in deep water with an incomplete channel*

Piao Sheng-Chun¹⁾²⁾³⁾ Li Zi-Yang³⁾ Wang Xiao-Han^{3)†} Zhang Ming-Hui¹⁾²⁾³⁾

1) (*State Key Laboratory of Underwater Acoustic Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China*)

2) (*Key Laboratory of Marine Information Acquisition and Security, Ministry of Industry and Information Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China*)

3) (*College of Underwater Acoustic Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China*)

(Received 21 August 2020; revised manuscript received 18 September 2020)

Abstract

In a deep sea sound channel, rays will bend due to the sound speed profile, and convergence zone will occur when the rays are intensive. Transmission loss in the convergence zone is smaller and it is conducive to acoustic detection and communication. Therefore the study of acoustic characteristics in convergence zone is always the focus of deep-sea acoustics. A long-range sound propagation experiment is conducted in the South China Sea. An equivalent broadband explosive sound source of 1 kg is placed at a depth of 200 m, and the hydrophone receives the data at 3146 m far. The processing and analysis of the experimental data indicate that there is a convergence zone below the sound channel axis in the incomplete deep channel. Compared with the upper turning point convergence zone near the surface, this convergence zone has a high convergence gain at a long distance. The caustic lines of refracted type and refracted surface-reflected type are determined by means of ray-normal mode theory. It is found that the location of the deep convergence zone observed in the experiment is consistent with the position of the refracted caustic line. It is proved that the convergence zone is a lower turning point convergence zone formed by the superposition of a large number of normal modes in the same phase, and it has a convergence effect at a certain depth below the sound channel axis in the deep sea. The formation conditions of the convergence zone and the influence of sound source depth on the caustic structure of the convergence zone are studied. The comparisons of the transmission loss and the width between the upper and lower turning point convergence zone at a long distance are made. The analysis shows that the convergence gain in the seventh lower turning point convergence zone is still no less than 10 dB. The influence of the vertical structure of sound velocity on the lower turning point convergence zone is studied. The theoretical analysis results are in good agreement with the experimental data.

Keywords: convergence effect, caustics, lower turning point, transmission loss

PACS: 43.30.Bp, 43.30.Zk, 43.30.Dr

DOI: 10.7498/aps.70.20201375

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11234002) and the Stability Support Program of the Bureau of National Defense Science, Technology and Industry, China (Grant No. JCKYS2020604SSJS004).

† Corresponding author. E-mail: wangxiaohan@hrbeu.edu.cn