

西太平洋远距离声传播特性*

毕思昭¹⁾²⁾ 彭朝晖^{1)†} 王光旭^{1)‡} 谢志敏³⁾ 张灵珊¹⁾

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) (中国科学院大学物理学院, 北京 100190)

3) (海军军事海洋环境建设办公室, 北京 100081)

(2022 年 3 月 28 日收到; 2022 年 7 月 5 日收到修改稿)

声信号在海水中能够传播上千千米, 远距离声传播与近距离声传播的特性不同. 本文利用西太平洋声源与接收最远距离近 2000 km 的水声实验数据, 对实验海区的海洋环境信息、实验使用的接收垂直阵信息进行处理, 分析大洋完全声道环境下, 远距离声传播能量衰减规律和多途到达结构特性. 在远距离传播能量衰减规律方面, 随着传播距离增大, 海水吸收对声能衰减的作用凸显, 海水吸收系数的选取对声场能量预报的准确性至关重要. 较低频信号海水吸收较小, 中心频率 100 Hz 的声信号, 传播距离从 1000—2000 km, 传播损失仅增大 6 dB 左右. 深海声道远距离声传播多途到达结构特性方面, 实验海区温跃层声速较高, 使得到达接收点的本征声线数目更多, 多途到达结构更复杂, 海面反射声线形成的到达结构处在整体到达结构的靠前位置, 且能量相对较强; 受西北太平洋副热带模态水的影响, 声速剖面存在双跃层结构, 导致部分声线到达接收点的时间较早, 多途到达结构在时间轴上的长度延长.

关键词: 远距离声传播, 传播损失, 到达结构**PACS:** 43.30.Zk, 43.30.Es, 43.30.Cq**DOI:** 10.7498/aps.71.20220566

1 引言

由于声信号是海洋环境中唯一有效远距离信息传递的载体, 开展深海远程声传播特性的实验和理论研究, 探清深海大洋环境下远距离声传播的规律, 对远程水声通信、远程水声导航等应用工作有重要的意义.

国外曾开展了一系列的深远海实验, 如 SLICE89^[1], AET^[2], ATOC^[3], NPAL98^[4], LOAPEX^[5], PhilSea10^[6] 等, 传播距离达上千千米甚至上万千米. 2013 年, 我国科研人员在西太平洋也成功开展了最远传播距离达 1000 km 的远距离声传播实验^[7].

针对远距离声传播能量衰减规律的研究, Guthrie^[8] 根据大西洋远距离声传播实验获取的声传播距离达 2800 km 的传播损失曲线, 发现会聚区间距存在频率依赖性. Beilis^[9] 运用射线-简正波理论预报深海远距离传播中的会聚区位置, 通过对传播距离近 1000 km 传播损失的计算和分析, 发现当声速剖面在传播路径上缓慢变化时, 会聚区的位置也随之发生改变. Boyles^[10] 通过比较前 3 个会聚区范围内传播损失的实测结果与抛物方程声场模型计算结果, 验证了抛物方程模型的准确性. 张仁和和何怡^[11] 提出的 WKBZ 简正波理论计算结果与实验数据相比匹配良好, 在分析深远海声传播特性中具有精度高、计算速度快的优势. 秦继兴等^[12] 基于简正波模型和射线理论对大陆坡造成的

* 国家重点研发计划 (批准号: 2021YFF0501200) 和国家自然科学基金 (批准号: 11774374) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: pzh@mail.ioa.ac.cn

‡ 通信作者. E-mail: wgx@mail.ioa.ac.cn

深海声道轴附近声能量较为集中的实验现象给出了合理的物理解释.

在远距离声传播多途到达结构研究方面, Colosi 等^[13]分析了 AET 实验接收距离 3252 km 处声信号多途到达结构, 分析了内波对到接收信号早期到达结构的传播时间、强度等影响. Van Uffelen^[14,15]等发现内波会导致远程声传播到达结构在深度上扩展进入几何影区. Kim^[16]通过实验研究, 结合二维抛物方程模型与三维耦合简正波模型对海底山环境下的远程声传播特性进行研究, 发现海底山会显著地改变声信号的传播损失和到达结构. 韩梅和陆娟娟^[17]对北太平洋水下脉冲声信号传播特性进行仿真, 初步分析了声源位于声道轴深度时, 不同距离、不同深度上的声传播特性. 吴丽丽^[18]利用西太平洋海域远距离声传播实验数据, 分析了海底深层声学结构对影区到达结构的影响. 张燕^[19]分析了传播距离达 200 km 的声信号时域到达结构, 并运用匹配场定位方法对声源位置进行校准. 候温良等^[20]基于南海深海实验获取的信号波形多途结构, 结合仿真分析了与海底进行四次反射的波形.

综上, 针对远距离声传播能量衰减规律以及深海声道多途到达结构特性, 还缺乏与实验数据相结合的系统性的研究. 本文利用 2019 年西太平洋远距离声传播的实验数据, 对实验获取的海洋环境数据进行精细处理, 并且对实验过程中接收垂直阵的位置、姿态等信息进行估计. 在此基础上, 通过比较传播损失实验与仿真结果, 总结远距离声传播能量衰减规律, 并对深海声道远距离声传播多途到达结构进行分析.

2 远距离声传播实验及实验数据处理

2.1 实验过程介绍

2019 年 6 月, 声场声信息国家重点实验室在西太平洋进行了一次深海远距离声传播实验. 实验采用如图 1 所示的单船结合潜标的方式进行, 接收潜标系统由 28 个的自容式水听器 (USR) 组成的垂直阵, USR 按照设计深度布防在 128—6000 m 范围内, 接收灵敏度为 -170 dB, 信号采样率为 16 kHz. 科考船分别在 T1 (500 km 站位), T2 (1000 km 站位), T3 (1500 km 站位), T4 (2000 km 站位) 等 4 个站位投放若干标定深度 200 m 和 1000 m 的宽带爆炸声源. 科考船在航行过程中使用抛弃式温度探头 (expendable bathy thermograph, XBT) 测量海水温度剖面, 沿航迹共投掷 101 枚.

2.2 环境数据处理

远距离传播声传播实验中, 由于传播距离远, 涉及海区范围广, 现场获取数据处理所需的实验海区精确的环境数据难度极大, 因此需要采取合理方法, 处理、补齐所需海洋环境数据.

图 2 中蓝色实线为 2000 km 站位投放的一枚爆炸声源声信号传播至接收潜标的路径, 黑色点为 XBT 投放点, 反映实验船航迹. 可以看到, 实验中测量 XBT 数据的轨迹与声传播路径不匹配. 借助美国国家海洋和大气管理局 (NOAA) 发布的 WOA (World Ocean Atlas)^[21,22] 数据库数据, 将 XBT 测量得到的温度数据与 WOA 数据库温度数据进行同化处理, 得到网格化温度数据.

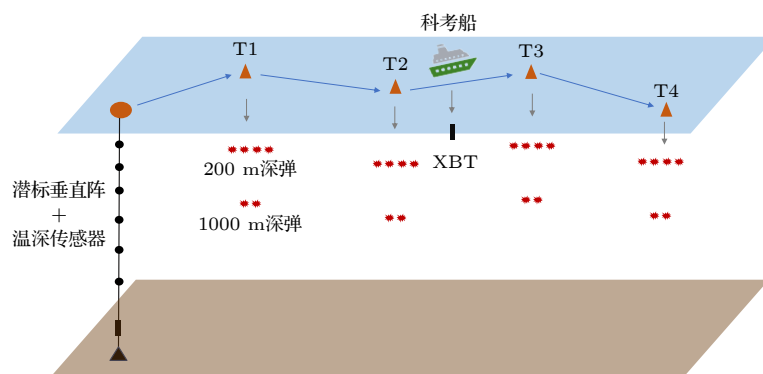


图 1 海上实验示意图

Fig. 1. Schematic diagram of sea experiment.

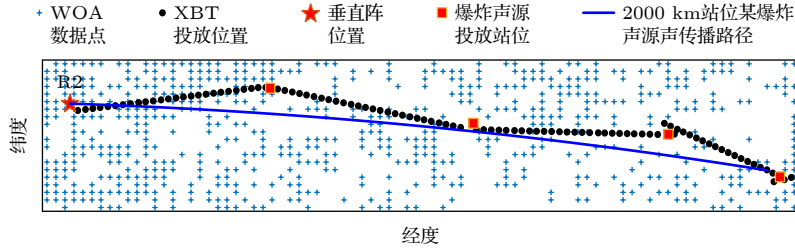


图2 实验海区 WOA 数据点和实验测量点分布图

Fig. 2. Distribution diagram of WOA data and experimental measurement in the experimental sea area.

在同化温度数据时采用最优插值数据同化算法^[23]. 最优插值技术是将空间零散分布的观测资料 (XBT 测量数据) 插值到规则网格点 (WOA 数据) 上, 进而得到最优估值, 即通过观测值与背景值的线性组合来获得分析值. 最优插值法表达式为

$$\mathbf{x}_a = \mathbf{x}_b + \mathbf{K}(\mathbf{y} - \mathbf{H}\mathbf{x}_b), \quad (1)$$

其中, \mathbf{x}_a 为最优插值得到的分析值, \mathbf{x}_b 为背景值, 即为补齐网格后的 WOA 数据库温度数据. \mathbf{y} 为观测值, 即使用 XBT 测量得到的温度数据. \mathbf{H} 为映射矩阵, 即将背景值映射得到观测点处, 得到观测位置处的背景值, \mathbf{H} 一般取双线性插值算子. \mathbf{K} 为分析误差最小 (统计意义上) 权重矩阵:

$$\mathbf{K} = \mathbf{B}\mathbf{H}^T(\mathbf{H}\mathbf{B}\mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1}, \quad (2)$$

其中, \mathbf{B} 矩阵是背景误差协方差矩阵, \mathbf{D} 是背景值方差组成的对角线矩阵, \mathbf{C} 是背景值误差的相关矩阵, \mathbf{R} 是观测误差协方差矩阵.

以上处理得到实验海区网格化温度数据, 与 WOA 数据库内盐度数据结合, 计算得到实验海区内, 全海深、网格化的声速剖面数据. 图 3 为利用网格化的声速剖面数据得到的 500 km 站位最后一枚爆炸声源声信号传播至接收垂直阵路径上的声速剖面变化情况.

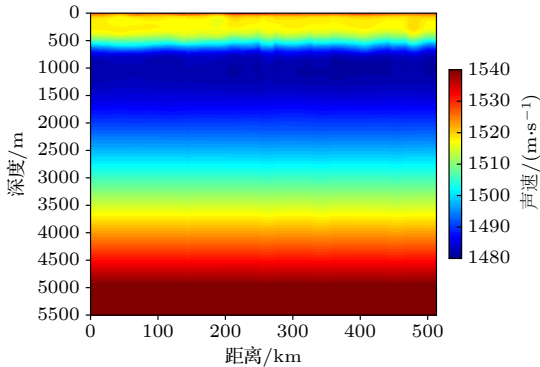


图3 500 km 站位声传播路径上的声速剖面变化

Fig. 3. Change of sound speed profile along sound propagation path of 500 km station.

由于实验中声传播距离较远, 地球曲率不可忽略, 引入地球曲率修正方法^[24], 对声速剖面进行如下处理:

$$z = z' + z'^2/(2r), \quad c = c'(1 + z'/r), \quad (3)$$

其中, z' 和 c' 为实测数据处理后得到的海深和声速, z 和 c 为进行地球曲率修正后的海深和声速, r 为地球半径, 取 6371 km.

由于条件限制, 实验中没有获取声传播路径上的海底底质数据和海深数据. 海底地形数据来自 ETOPO1 数据库^[25], 图 4 所示为 500 km 站位最后一枚爆炸声源声信号传播至接收垂直阵路径上的海深. 可以看到海水深度较大, 结合处理得到的声速剖面数据, 判定实验海区为大洋完全声道环境. 海底底质类型以及沉积层厚度分别从 deck41 数据库^[26]、GlobSed 数据库^[27] 获取.

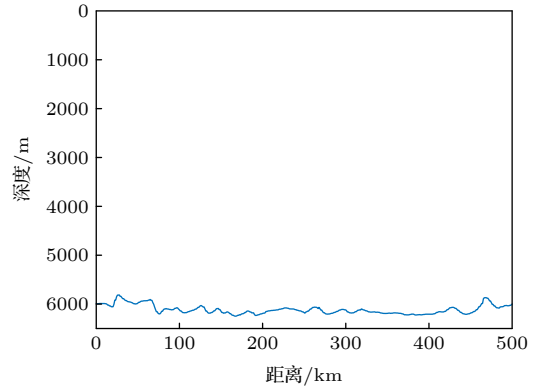


图4 500 km 站位声传播路径上的海深变化

Fig. 4. Change of ocean depth along sound propagation path of 500 km station.

2.3 垂直阵信息处理

在此次深远海声学实验中, 实验海区海深较深、海况较差, 实验设备布放难度大, 接收垂直阵出现了位置偏移、姿态倾斜等情况, 对后续精确声学分析造成很大的困扰, 必须加以修正.

本次实验布放垂直阵时, 采用垂直阵上方的信标和浮体先入水, 然后水听器依次入水, 最后吊放垂直阵最下方重块入水的方式. 实验中只记录了垂直阵重块入水时的经纬度坐标. 垂直阵最下方重块从入水到坐底的过程中, 垂直阵上层的浮体牵引重块在水平方向上发生位移, 导致记录的重块入水位置与真实的重块坐底位置存在偏差. 在声源端, 利用投弹机进行爆炸声源的投放, 同时记录了每个爆炸声源入水位置的经纬度. 投弹时, 投弹机内置程序已经将船行进对落水点的偏移进行修正. 由于存在海流的微弱影响, 爆炸声源初入水时轨迹呈抛物线, 随后垂直入水至爆炸点, 其水平偏移很小, 海流的影响可以忽略. 综上, 爆炸声源与垂直阵之间的距离误差是由于垂直阵真实位置与记录的重块落水位置存在偏差导致的.

垂直阵下方重块坐底后, 因为实验时段海流流速较大, 垂直阵会发生向某方向的倾斜, 其在垂直方向上垂直阵倾斜的角度和在水平方向上垂直阵倾斜的方向都随时间不断变化. 图 5 中各条曲线为垂直阵上各个水听器在实验期间的深度变化情况, 可以看到, 较浅层的水听器深度起伏较大, 且与水听器的设计深度有较大差异.

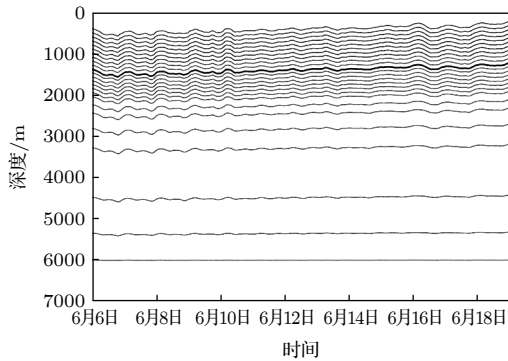


图 5 实验期间各个水听器深度随时间变化情况

Fig. 5. Variation of the depth of hydrophones during the experiment.

根据实际测量的各个水听器每个时刻的深度, 得到各个水听器在水体中的实际深度间隔, 同时假设相邻两个水听器之间的绳子是绷直状态, 进而根据三角关系来估计阵型. 最下面水听器与重块之间的间隔极小, 所以假定最下面的水听器固定不动.

如图 6 所示, 假设各个阵元之间的设计深度间隔为 L_1, L_2, \dots , 而测量得到的阵元在水体中的实际深度间隔为 Z_1, Z_2, \dots , 根据三角关系, 计

算得到阵元 2 相对于阵元 1 的水平偏移为 $\Delta s_1 = \sqrt{L_1^2 - Z_1^2}$, 阵元 3 相对于阵元 1 的水平偏移为 $\Delta s_1 + \Delta s_2 = \sqrt{L_1^2 - Z_1^2} + \sqrt{L_2^2 - Z_2^2}$, 以此类推, 可以计算出垂直阵上每个阵元的偏移情况, 用 $\Delta s(n)$ 表示. 图 7 展示的是采用上述方法计算后, 实验过程中 6 月 8 日 00:00:00、6 月 12 日 00:00:00、6 月 16 日 00:00:00 垂直阵的倾斜情况. 可以看出, 垂直阵倾斜明显, 最上层偏移可达 1500 m 以上, 且不同时刻垂直阵倾斜变化幅度较大.

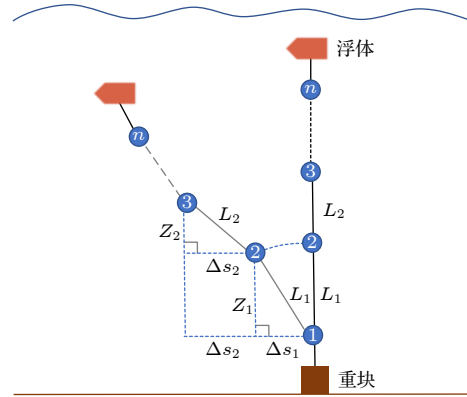


图 6 阵型估计示意图

Fig. 6. Schematic diagram of array geometry estimation.

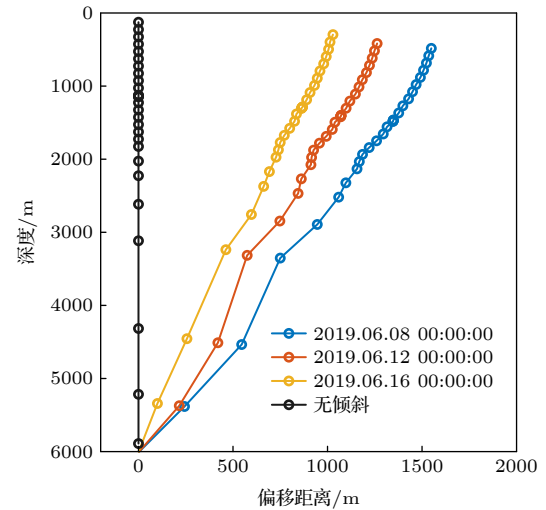


图 7 阵型

Fig. 7. Array geometry.

上述方法可以获取垂直阵在垂直方向上的倾斜信息, 但是无法得到垂直阵在水平方向上的偏向信息. 假设垂直阵在水平方向无偏向, 爆炸声源距离垂直阵较远, 接收处声波可以认为是平面波. 图 8 和图 9 分别表示的是爆炸声源与垂直阵三维示意图、爆炸声源与接收垂直阵水平面投影示意

图, 其中 θ 为垂直阵偏向到声源来波方向的投影角, 那么对垂直阵接收到的时域信号时延补偿表示为

$$\Delta t(n) = \Delta s(n) \cos \theta / c_0, \quad (4)$$

其中, c_0 取 1500 m/s.

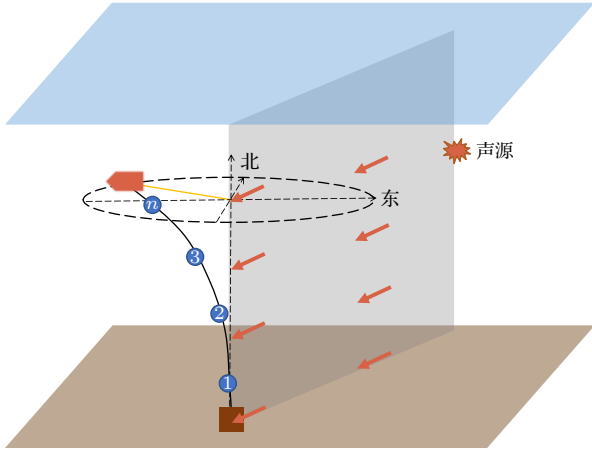


图 8 爆炸声源与接收垂直阵三维示意图

Fig. 8. 3D schematic diagram of explosion sound source and receiver array.

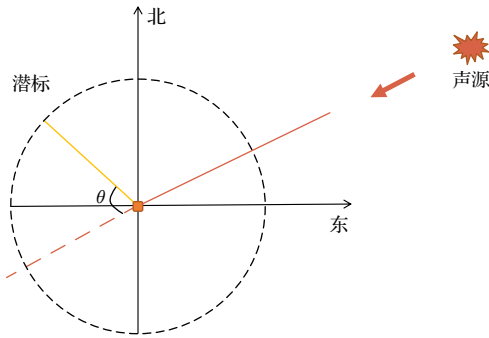


图 9 爆炸声源与接收垂直阵水平面投影示意图

Fig. 9. Schematic diagram of the horizontal plane projection of the explosion sound source and receiving array.

上面分析可以知道, 垂直阵的准确位置信息和偏向角度 θ 未知, 为得到准确的实验数据信息, 便于之后的分析, 以 500 km 站位为例, 利用匹配的方法来处理.

使用抛物方程声场计算模型 (RAM-PE)^[28] 仿真多途到达结构. 声场计算模型计算得到各个频点的频域声压, 然后通过逆傅里叶变换得到频域声压的时域波形. 设 $s(t)$ 为声源信号, 某一深度上水听器接收到的信号可以表示为

$$p(r, z, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} S(\omega) P(r, z, \omega) e^{-i\omega t} d\omega, \quad (5)$$

其中, ω 为角频率, $S(\omega)$ 为声源的频谱, $P(r, \omega, t)$ 是海洋环境中从声源到接收水听器的传输函数. 数

值仿真采用 2.2 节处理得到的环境数据, 并沿传播路径更新声速剖面, 频带取 100—200 Hz. 对计算得到的波形取归一化处理, 并取包络, 之后设置阈值进行置零处理, 提取出主要到达结构. 同时对实验接收到的声信号进行相同的处理. 图 10(a) 展示了实验中接收到的一段时域波形, 图 10(b) 是对接收到的波形取包络后得到的结果, 图 10(c) 是设置阈值进行置零处理后提取出的主要到达结构的结果. 因为实验中是人工记录爆炸时间, 无法得到从声源到垂直阵的准确传播时间, 所以, 以下时间轴均为相对时间.

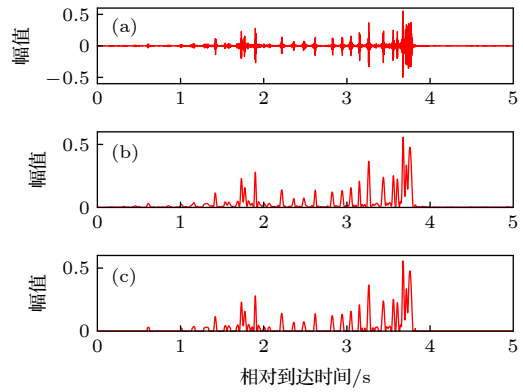


图 10 实验接收信号的时域波形 (a) 实测接收到的时域波形; (b) 取包络后波形; (c) 置零处理后波形

Fig. 10. Time domain waveform received in the experimental: (a) Time domain waveform by the experiment; (b) the waveform after the envelope; (c) the waveform after zero processing.

对实验数据与仿真数据做匹配处理, 匹配方法为

$$B = \frac{\sum_t \sum_n (A^e(t, n) - \bar{A}^e)(A^c(t, n) - \bar{A}^c)}{\sum_t \sum_n (A^e(t, n) - \bar{A}^e)^2 \sum_t \sum_n (A^c(t, n) - \bar{A}^c)^2}, \quad (6)$$

其中 B 为模糊表面, $A^e(t, n)$ 为截取的实验数据经图 10 所示过程处理后, 第 n 个水听器 t 时刻的幅值, \bar{A}^e 为截取的实验数据处理后幅值的平均值, $A^c(t, n)$ 为仿真计算结果经图 10 所示过程处理后, 第 n 个水听器 t 时刻的幅值, \bar{A}^c 为仿真计算结果处理后幅值的平均值.

传播距离搜索范围为未修正前记录距离的前后 10 km, 偏向角度搜索范围为 0° — 180° . 记录距离为 481.5 km, 496.5 km, 513.7 km 的 3 枚 1000 m 爆炸声源的实验数据匹配处理结果如图 11 所示.

从匹配结果可以出, 估计的 3 个爆炸声源与垂直阵之间的距离分别为 484 km, 499 km 与 516 km 左右, 即真实距离要比记录的重块入水处与声源入水处的距离远大约 2.5 km, 垂直阵的偏向与声源来波方向的夹角约为 45° . 在海水中, 垂直阵的偏向随时间不断变化, 但在 500 km 站位, 实验期间垂直阵偏向较为稳定, 所以在后续分析中, 该站位垂直阵偏向取 45° .

经过以上处理, 得到了接收垂直阵的位置、水中的姿态和偏向等较为准确的信息, 计算得到爆炸声源与垂直阵之间的实际传播距离, 并对垂直阵向某方向倾斜造成的不同深度水听器之间接收到声信号的相对时延进行补偿. 对垂直阵接收到的时域声信号归一化, 并取对数^[29], 就可以得到实际传播距离 484 km (记录传播距离 481.5 km) 的 1000 m 爆炸声源多途到达结构, 图 12 为修正前后的比较图. 由于垂直阵各个水听器实际深度较大, 且最上方两个水听器存在故障, 所以在海深 682 m 以浅的水听器没有接收到声信号, 在图中显示为空白. 可以看到, 修正前后多途到达结构差异明显.

3 远距离声传播特性分析

3.1 远距离声传播能量衰减规律

在实验数据处理过程中, 将接收垂直阵水听器接收到的声信号记为 $y(t)$, 对 $y(t)$ 进行离散傅里叶变换得到声信号的频谱 Y_i , 并在中心频率的 1/3 倍频程内取平均, 可以得到窄带信号的平均能量为

$$E(f_0) = \frac{2}{F_s^2} \frac{1}{nf_2 - nf_1 + 1} \sum_{i=nf_1}^{nf_2} |Y_i|^2, \quad (7)$$

其中 f_0 为中心频率, F_s 为采样率, nf_1 和 nf_2 分别为频率的下限和上限对应的频点数. 实验获得的声传播损失 (transmission loss, TL) 可以表示为

$$TL(f_0) = SL(f_0) - (10 \log[E(f_0)] - b), \quad (8)$$

其中 SL 和 b 分别表示声源级和水听器的灵敏度级.

数值仿真使用 RAM-PE 模型计算传播损失. 根据声学互易原理, 仿真中将声源置于 0 km 处不同水听器所在的深度, 接收在原爆炸声源深度的不同距离处.

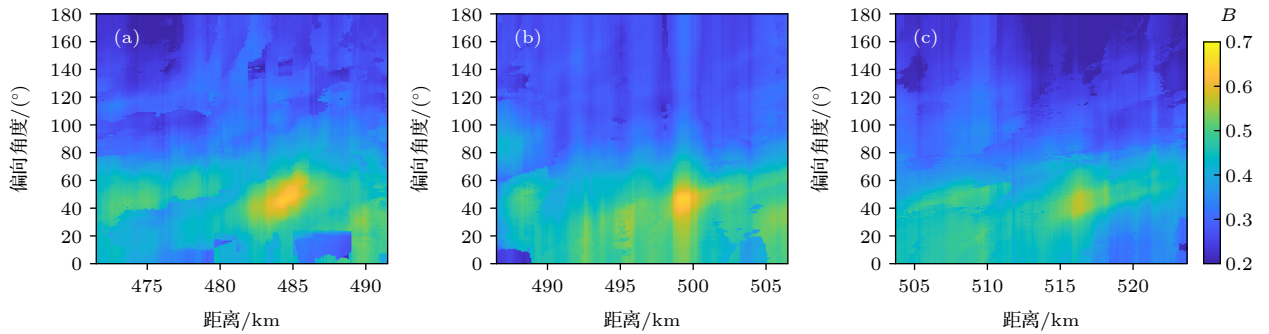


图 11 匹配处理结果 (a) 记录距离 481.5 km; (b) 记录距离 496.5 km; (c) 记录距离 513.7 km

Fig. 11. Matching processing results: (a) Recording distance of 481.5 km; (b) recording distance of 496.5 km; (c) recording distance of 513.7 km.

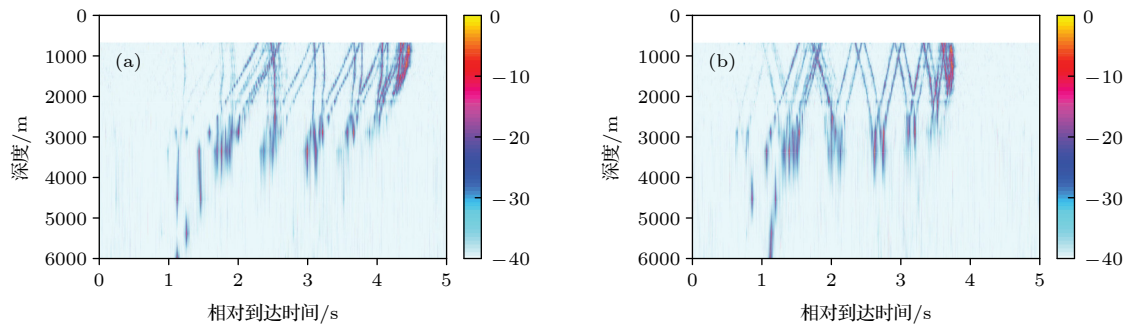


图 12 垂直阵接收到的多途到达结构 (a) 修正前; (b) 修正后

Fig. 12. Arrival structure received by the vertical line array: (a) Before correction; (b) after correction.

分析中最初选取的海水吸收系数 α (dB/km) 计算公式^[30]为

$$\alpha \simeq 3.3 \times 10^{-3} + \frac{0.11f^2}{1+f^2} + \frac{44f^2}{4100+f^2} + 3.0 \times 10^{-4}f^2, \quad (9)$$

其中频率 f 的单位为 kHz, 且将 (9) 式记为公式 a. 图 13 为 2000 km 站位, 声源深度 200 m、接收深度 1216 m(取此站位接收水听器的平均深度)、中心频率为 100, 300 和 500 Hz, 采用公式 a 计算得到的传播损失结果(蓝色实线)与实验结果(黑色点)的比较图. 从图 13 可以看出, 计算结果与实验结果差异极大, 且声信号频率越高, 差异就越大. 当中心频率为 500 Hz 时, 在 2000 km 站位, 采用计算公式 a 计算得到的传播损失与实验结果差异可达 35 dB. 由于实验区域为大洋完全声道环境, 海深较深且无较大起伏, 海底对远距离声传播的影响可以忽略. 因此, 推测实验与理论计算结果的差异性是由于海水吸收系数计算公式选取与实际海水吸收损失不匹配导致的.

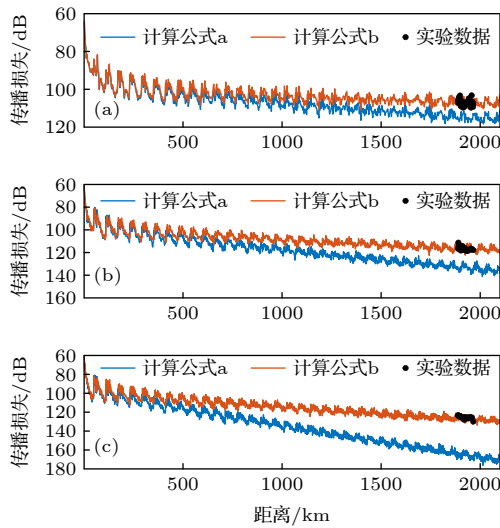


图 13 不同吸收损失计算公式下传播损失实验结果与仿真结果比较, 中心频率分别为 (a) 100 Hz; (b) 300 Hz; (c) 500 Hz

Fig. 13. Comparison of experimental data and simulation results of TLs calculation under different absorption loss calculation formulas, the center frequencies are (a) 100 Hz, (b) 300 Hz, (c) 500 Hz, respectively.

另行选取海水吸收系数 α (dB/km) 计算公式^[31]:

$$\alpha = 0.79A \frac{f^2}{0.8 + f^2} + 36 \frac{f^2}{5000 + f^2}, \quad (10)$$

(10) 式记为计算公式 b. 参数 A 的选取与海区有

关. 本次实验海域, A 取 0.055^[32]. 频率 f 的单位为 kHz. 如图 13 所示, 采用公式 b 计算得到的传播损失的结果(红色实线)与实验结果(黑色点)吻合良好, 与根据计算公式 a 的计算的结果(蓝色实线)差异很大. 同时可看到, 传播距离的前 200 km, 两种吸收系数计算公式仿真得到的传播损失曲线差异较小, 而随传播距离增大, 两条曲线差异增大. 因此, 在远距离声传播的能量预报中, 要选取契合实验海区的海水吸收系数公式, 不恰当的选取可能会导致预报结果与实验结果产生较大的偏差.

图 14 所示为 500, 1000, 1500 和 2000 km 站位不同频率传播损失实验与仿真结果的比较图, 接收深度分别为 1275, 1293, 1273 和 1216 m(均取各站位接收水听器的平均深度). 可以看出, 当传播距离在 500 km 以内时, 不同频率的传播损失差异较小, 而在 500 km 以外, 不同频率间的传播损失差异逐渐显著, 当传播距离达到 2000 km 时, 不同频率之间的传播损失差异明显. 经 (10) 式计算, 频率为 100 Hz 的声信号传播 1000 km, 海水吸收损失

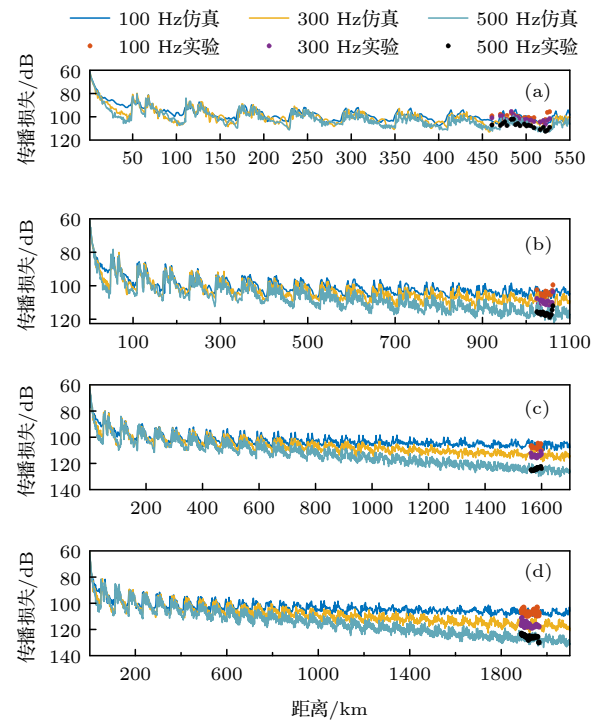


图 14 不同频率下传播损失实验数据与仿真计算比较, 传播距离分别为 (a) 500 km, (b) 1000 km, (c) 1500 km, (d) 2000 km

Fig. 14. Comparison of experimental data and simulation results of TL calculations at different frequencies, the propagation distances are (a) 500 km, (b) 1000 km, (c) 1500 km, (d) 2000 km, respectively.

约为 0.7 dB, 频率为 300 Hz 时, 海水吸收损失约为 5.4 dB, 而频率为 500 Hz 时, 海水吸收损失约为 12.3 dB. 从实验数据可看到, 中心频率为 100 Hz 的低频声信号, 传播距离从 1000—2000 km, 传播损失仅增大约为 6 dB. 而对于较高频声信号, 其频率越高, 海水吸收系数越大, 且海水吸收损失会随传播距离的增大而线性累加, 这是制约高频信号在海水中远距离传播的主要原因.

3.2 远距离声传播多途到达结构分析

深海声道具有良好的远距离传播性能, 在大洋层析、远程水声导航等领域中有重要应用. 本节分析大洋完全声道环境下, 深海远距离声道轴传播多途到达结构特性, 以 500 km 站位为例, 实验中声源深度为 1000 m, 位于声道轴附近位置, 频带取 100—200 Hz. 通过 2.2 节的处理得到了 500 km 站位最后一枚爆炸声源声信号传播至接收垂直阵路径上的平均声速剖面 and 声速起伏情况, 如图 15 所示. 可以看出, 声速剖面在传播路径上的变化主要集中在声道轴 (1000 m) 以浅, 整体来看, 声速剖面起伏较小.

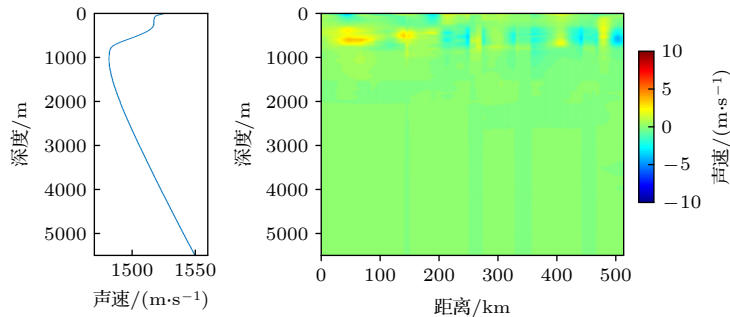


图 15 500 km 站位声传播路径上的平均声速剖面 and 声速起伏情况

Fig. 15. Average sound velocity profile and sound velocity fluctuation on the sound propagation path at 500 km station.

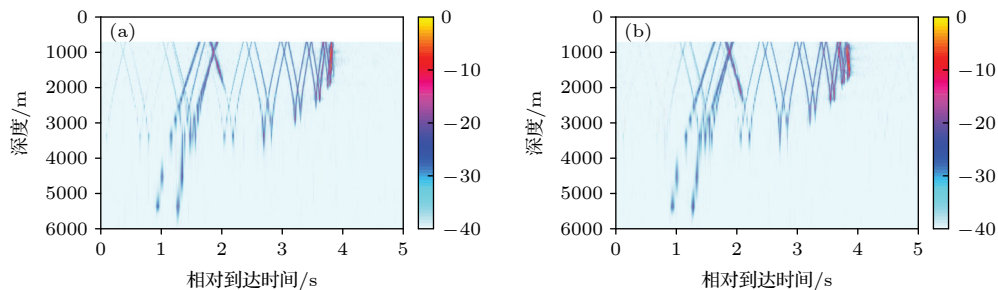


图 16 仿真多途到达结构比较 (a) 沿传播路径更新声速剖面; (b) 平均声速剖面

Fig. 16. Comparison of simulation arrival structure: (a) Updated sound velocity profile along the propagation path; (b) average sound velocity profile.

图 16 为选取不同声速剖面条件下, 传播距离 484 km 仿真计算得到的多途到达结构. 从图 16 可以看到, 平均声速剖面条件下, 仿真计算结果与沿传播路径更新声速剖面条件下得到的多途到达结构结果基本一致, 只在部分细节上存在差异, 并与图 12(b) 所示的实验结果吻合较好. 所以对于传播路径上声速起伏不大的情况, 可以用平均声速剖面代替沿传播路径更新的声速剖面来进行远距离传播的多途到达结构的预报.

垂直阵接收到的多途到达结构如图 17 所示, 从图 17 可以看出, 与刘伯胜和雷家煜^[33]提到的深海声道传播中接收到的声信号声强逐步增大至最后尖锐截止的现象不同, 实验中接收到的多途到达结构在接收较早阶段就出现了若干能量较强的条纹, 即红色方框内的条纹. 红色方框内的条纹之后, 才符合能量从小到大, 然后尖锐截止的规律. 并且红色方框内的条纹的交错分布, 与红色方框之后条纹呈现出的数组双“Λ”条纹叠加组合的规律不同.

由于海底对声传播的影响较小, 所以推测是实验海区的声速剖面结构造成的图 17 所示特殊的多途到达结构. 对 3 种不同声速剖面环境进行分析,

如图 18 所示. 实验声速剖面为 500 km 站位最后一枚爆炸声源声信号传播至接收垂直阵列路径上的平均声速剖面, 冬季声速剖面为 WOA 数据库中获取的 1 月份在该传播路径上的平均声速剖面 (忽略表面声道), 类 Munk 剖面为通过修改 Munk 剖面参数 [34] 得到的, 在声道轴以下深度与实验声速剖面近似的声速剖面. 相比于冬季声速剖面, 实验声速剖面存在双跃层现象, 即约 0—150 m 深度出现一个较小的跃层, 这是因为实验海区位于西北太平洋副热带模态水区域, 该区域在夏季会出现一个深度约 150—300 m 的暖水团, 此暖水团打破了原有的声速剖面结构. 相比于类 Munk 剖面, 另外两种剖面温跃层声速明显偏高, 即温跃层温度较高.

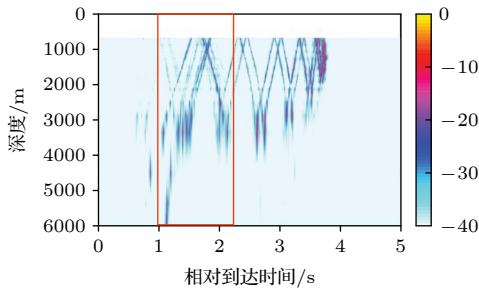


图 17 垂直阵列接收到的多途到达结构

Fig. 17. Arrival structure received by the vertical array.

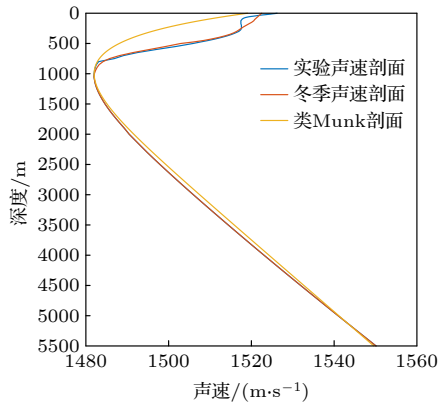


图 18 3 种不同的声速剖面

Fig. 18. Three different sound speed profiles.

利用 RAM-PE 仿真计算冬季声速剖面与类 Munk 剖面下传播距离 484 km 的多途到达结构, 仿真环境参数与图 16 仿真所采用的环境参数相同, 声信号频带取 100—200 Hz, 具体结果如图 19 所示. 从图 19(a) 可以看出, 冬季声速剖面仿真条件下多途到达结构与实验获取的多途到达结构类似, 在多途到达结构的早期也出现了较强的条纹.

对比图 17 与图 19(a) 发现, 实验中获取的多途到达结构在早期较强的结构之前, 即相对到达时间的 0.5—1.2 s 处, 还存在几条较暗的条纹. 从图 19(b) 可以看出, 类 Munk 剖面仿真得到的结果则符合典型的声道轴传播规律, 但整体结构较为简单, 与实验数据以及冬季声速剖面仿真得到的结果差异很大.

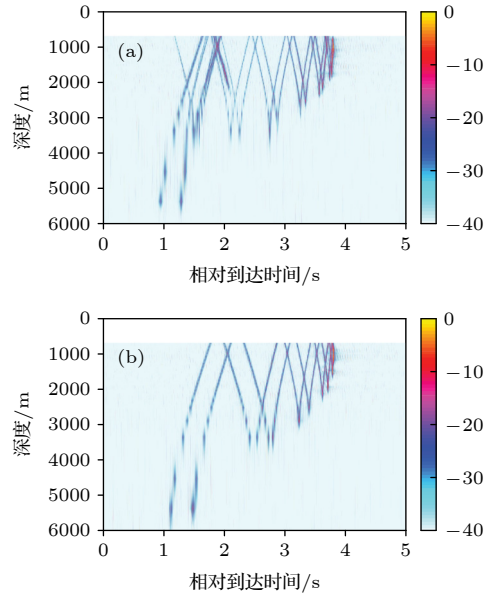


图 19 仿真多途到达结构 (a) 冬季声速剖面; (b) 类 Munk 剖面

Fig. 19. Simulation arrival structure: (a) Sound speed profile in winter; (b) similar Munk sound speed profile.

利用射线方法分析多途到达结构, 采用 Bellhop 模型进行仿真. 图 20—图 22 分别为图 18 所示 3 种声速剖面条件下射线方法仿真计算的结果, 传播距离为 484 km, 接收深度为 1495 m. 其中, 图 20(a)、图 21(a)、图 22(a) 所示为从声源到接收点的本征声线, 图 20(b)、图 21(b)、图 22(b) 为本征声线的种类, 图 20(c)、图 21(c)、图 22(c) 为接收点接收到的多途到达结构, 各个到达结构的颜色与图 20(b)、图 21(b)、图 22(b) 中所示的不同类型的本征声线相对应.

图 20(b) 所示, 在实验声速剖面环境下, 从声源到接收点, 存在 5 种本征声线. 绿色和粉红色声线分别代表发射掠射角朝向海面 and 发射掠射角朝向海底的海面反射声线, 这两类声线在与海面进行若干次反射后, 到达接收点. 红色和蓝色声线即为发射掠射角朝向海面以及发射掠射角朝向海底, 同时上反转点深度位于水团位置的声线, 可以看到, 这两类声线受到水团影响, 在上反转点位置附近,

出现了横向的拉长. 黑色声线为在水体内翻转的声线, 且其上反转点在水团位置下方, 不受到水团的影响. 而图 21(b) 和图 22(b) 所示的冬季声速剖面环境与类 Munk 剖面环境下, 均只存在 3 种类型的声线, 即绿色和粉红色的海面反射声线 and 在水体内反转的黑色声线.

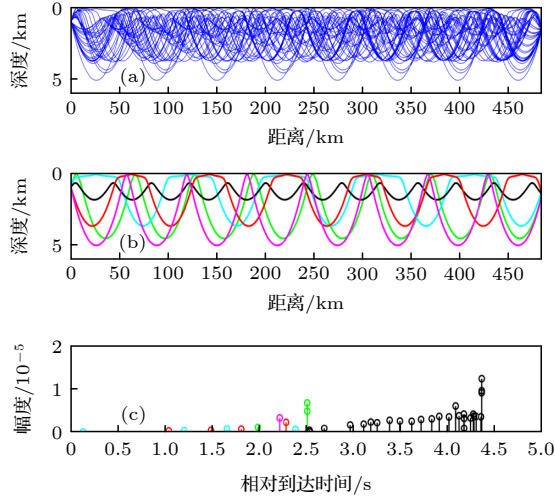


图 20 实验声速剖面环境下 1495 m 接收深度上本征声线和多途到达结构 (a) 本征声线; (b) 五种类型的本征声线; (c) 仿真多途到达结构

Fig. 20. Eigenrays and multipath arrival structures at 1495 m reception depth in experimental sound speed profile environment: (a) Eigenrays; (b) five types of eigenrays; (c) simulation of multipath access structure.

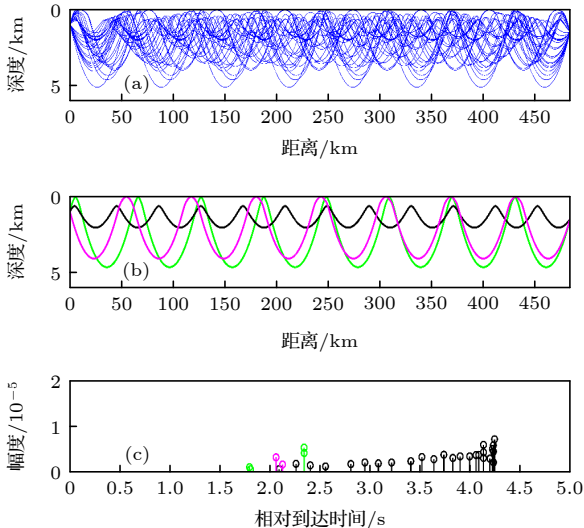


图 21 冬季声速剖面环境下 1495 m 接收深度上本征声线和多途到达结构 (a) 本征声线; (b) 三种类型的本征声线; (c) 仿真多途到达结构

Fig. 21. Eigenrays and multipath arrival structures at 1495 m reception depth in winter sound speed profile environment: (a) Eigenrays; (b) three types of eigenrays; (c) simulation of multipath access structure.

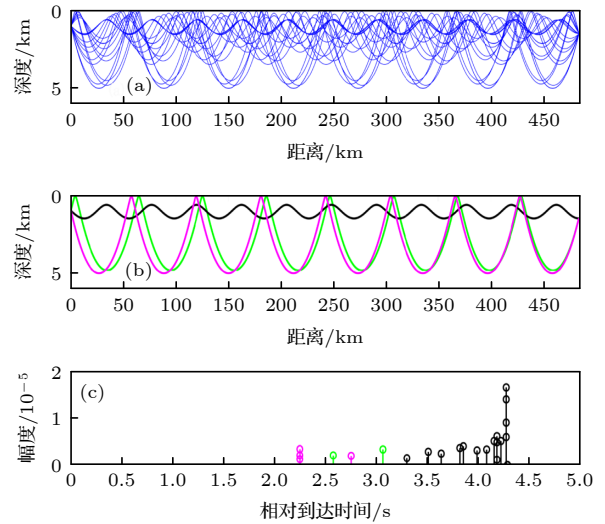


图 22 类 Munk 剖面环境下 1495 m 接收深度上本征声线和多途到达结构 (a) 本征声线; (b) 三种类型的本征声线; (c) 仿真多途到达结构

Fig. 22. Eigenrays and multipath arrival structures at 1495 m reception depth in similar Munk sound speed profile environment: (a) Eigenrays; (b) three types of eigenrays; (c) simulation of multipath access structure.

对比图 21(c) 与图 22(c) 可以看出, 冬季声速剖面下仿真得到的多途到达结构接收到信号在时间轴上长度更长, 到达声线条数更多; 海面反射声线形成的到达结构与水体内反转声线形成的到达结构交错, 且相对于声道轴附近传播的声线形成的、最后接收到的能量最强的到达结构, 海面反射声线形成的到达结构能量较强. 这是因为, 冬季声速剖面比类 Munk 剖面温跃层的声速更大, 根据斯奈尔定律, 声源深度相同的情况下, 掠射角绝对值更大的声线可以在温跃层内反转然后传播. 因此在冬季声速剖面环境下, 到达接收点的声线更多, 到达结构更复杂, 海面反射形成的到达结构与在水体内反转的声线形成的到达结构交错. 到达接收点的声线一定程度上弱化了在声道轴附近反转的声线的能量, 所以海面反射声线形成的到达结构能量相对较强. 而类 Munk 剖面仿真得到的结果中, 两类声线形成的到达结构则在时间轴上分开. 整体的到达结构更为规整. 实验声速剖面与冬季声速剖面的温跃层结构近似, 温跃层声速较高导致的多途到达结构规律也近似.

同时对比如 20(c) 与图 21(c) 可以看到, 实验声速剖面仿真得到的多途到达结构中包括红色和蓝色两类被西北太平洋副热带模态水影响的声线形成的到达结构. 这两种声线到达时间比海面反射

声线(绿色和粉红色)到达时间更早,并且发射掠射角绝对值越大,到达越晚,因为发射掠射角绝对值越大的声线,传播路径就会受到水团上部声速较小区域的影响较大,在该深度水平位移较大,所以到达时间偏晚,这一规律与黑色声线的特征正好相反.

通过综合分析其他接收深度的多途到达结构,在图23中对实验中接收到的传播距离484 km多途到达结构海面反射声线,以及受水团影响的声线形成的条纹进行标注.红色标注的条纹为发射掠射角朝向海面的海面反射声线形成的,黄色标注的条纹是发射掠射角朝向海底的海面反射声线形成的,绿色条纹为受到水团影响形成的,其能量较弱.在这3类被标注的条纹之后,是在水体内部反转且上反转点在水团之下形成的声线形成的条纹.

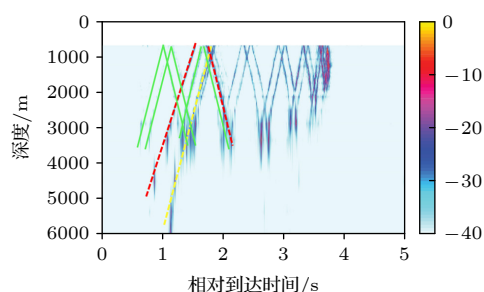


图 23 垂直阵接收到的到达结构

Fig. 23. Arrival structure received by the vertical line array.

4 总 结

本文结合2019年西太平洋远距离声传播实验数据,克服远距离声传播实验中,传播距离远,涉及海区范围广,同步获取的环境数据存在稀疏或缺失,接收垂直阵的精确位置、水中的姿态和偏向信息缺乏等困难,对大洋完全声道环境下远距离声传播特性进行研究,得到的主要结论如下:

1) 当传播距离达到上千千米量级时,海水吸收将成为影响传播损失的重要因素.在声场能量预报中应选择与实验海区相对应的海水吸收系数,如果海水吸收系数选择不当,会在远距离声传播能量预报中会造成较大的误差.对较低频声信号,海水吸收损失较小,随着传播距离增大,传播损失增大的幅度缓慢,传播距离从1000—2000 km,中心频率为100 Hz声波传播损失增大约6 dB.而对于高频声信号,海水吸收是制约其远距离传播的主要因素

2) 实验海区声速剖面具有双跃层结构,且温

跃层声速较高.这种特殊的声速剖面是深海声道远距离传播多途到达结构特征的主要影响因素.实验海区温跃层声速较高,使得到达实验接收点的本征声线更多,多途到达结构更复杂;海面反射声线形成的到达结构与在水体内反转声线形成的到达结构交错,处在整体到达结构的前端,且能量相对较强.西北太平洋模态水影响上反转点深度在水团位置的声线,使得实验中接收点更早接收到声信号,并且使多途到达结构在时间轴上的长度更大.

感谢参加2019年西太综合调查实验的全体工作人员,他们的辛勤工作为本文提供了可靠宝贵的实验数据.

参考文献

- [1] Worcester P F, Cornuelle B D, Hildebrand J A, Hodgkiss W, Spindel R C 1994 *J. Acoust. Soc. Am.* **95** 3118
- [2] Worcester P F, Cornuelle B D, Dzieciuch M A, et al. 1999 *J. Acoust. Soc. Am.* **105** 3185
- [3] Colosi J 2004 *J. Acoust. Soc. Am.* **116** 1538
- [4] Vera M, Heaney K D 2005 *J. Acoust. Soc. Am.* **117** 1624
- [5] Mercer J A, Colosi J A, Howe B M, Dzieciuch M A, Stephen R 2009 *IEEE J. Oceanic. Eng.* **34** 1
- [6] Worcester P F, Dzieciuch M A, Mercer J A, et al. 2013 *J. Acoust. Soc. Am.* **134** 3359
- [7] Wu L L, Peng Z H 2015 *Chin. Phys. Lett.* **32** 094302
- [8] Guthrie A N 1974 *J. Acoust. Soc. Am.* **56** 58
- [9] Beilis A 1983 *J. Acoust. Soc. Am.* **68** 171
- [10] Boyles C A 1978 *J. Acoust. Soc. Am.* **64** S74
- [11] Zhang R H, He Y 1994 *Prog. Nat. Sci.* **6** 32 (in Chinese) [张仁和, 何怡 1994 自然科学进展: 国家重点实验室通讯 **6** 32]
- [12] Qin J X, Zhang R H, Luo W Y, Wu L X, Jiang L, Zhang B 2014 *Acta Acust.* **39** 145 (in Chinese) [秦继兴, 张仁和, 骆文于, 吴立新, 江磊, 张波 2014 声学学报 **39** 145]
- [13] Colosi J A, Scheer E K, Flatté S, et al. 1999 *J. Acoust. Soc. Am.* **105** 3202
- [14] Van Uffelen L, Worcester P F, Dzieciuch M A, Rudnick D L 2009 *J. Acoust. Soc. Am.* **125** 3569
- [15] Van Uffelen L, Worcester P F, Dzieciuch M A, Rudnick D L, Colosi J A 2010 *J. Acoust. Soc. Am.* **127** 2169
- [16] Kim H J 2009 *Ph. D. Dissertation* (Boston: Massachusetts Institute of Technology)
- [17] Han M, Lu J J 2009 *Comp. Simulat.* **26** 11 (in Chinese) [韩梅, 陆娟娟 2009 计算机仿真 **26** 11]
- [18] Wu L L 2017 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: The Institute of Acoustics of the Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [吴丽丽 2017 博士学位论文 (北京: 中国科学院声学研究所)]
- [19] Zhang Y 2017 *M. S. Thesis* (Beijing: The Institute of Acoustics of the Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [张燕 2017 硕士学位论文 (北京: 中国科学院声学研究所)]
- [20] Hou W L, Gong M, Chen D R 1989 *Tech. Acoust.* **8** 3 (in Chinese) [侯温良, 龚敏, 陈东荣 1989 声学技术 **8** 3]
- [21] Locarnini R A, Mishonov A V, Baranova O K, et al. 2018 *World Ocean Atlas (Volume 1: Temperature)* **81** 52
- [22] Zweng M M, Reagan J R, Seidov D, et al. 2018 *World Ocean Atlas (Volume 2: Salinity)* **82** 50
- [23] Gandin L S 1963 *Objective Analysis of Meteorological Fields*

- (translated from the Russian) p184
- [24] Bi S Z, Peng Z H, 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 114303 (in Chinese) [毕思昭, 彭朝晖 2021 物理学报 **70** 114303]
- [25] Amante C, Eakins B W 2009 *Psychologist* **16** 3
- [26] Susanne B, Martin W 1976 *Deck41 Surficial Seafloor Sediment Description Database* (NOAA National Centers for Environmental Information)
- [27] Straume E O, Gaina C, Medvedev S, Hochmuth K, Gohl K, Whittaker J M, Abdul Fattah R, Doornenbal J C, Hopper J R 2019 *Geochem. Geophys. Geosy.* **20** 4
- [28] Collins M 1998 *J. Acoust. Soc. Am.* **93** 1736
- [29] Li Z L, Dong F C, Hu Z G, Wu S L 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 134305 (in Chinese) [李整林, 董凡辰, 胡治国, 吴双林 2019 物理学报 **68** 134305]
- [30] Jensen F, Kuperman W, Porter M, Schmidt H 2011 *Computational Ocean Acoustics* (2nd Ed.) (New York: Springer-Verlag)
- [31] Fisher, H. F 1977 *J. Acoust. Soc. Am* **62** 13
- [32] Lovett, Jack R 1980 *J. Acoust. Soc. Am* **67** 338
- [33] Liu B S, Lei J Y 2009 *Principles of Underwater Acoustics* (Beijing: Science Press) p141 (in Chinese) [刘伯胜, 雷家煜 2010 水声学原理 (北京: 科学出版社) 第141页]
- [34] Munk W H 1974 *J. Acoust. Soc. Am.* **55** 220

Characteristics of long-range sound propagation in western Pacific*

Bi Si-Zhao¹⁾²⁾ Peng Zhao-Hui^{1)†} Wang Guang-Xu^{1)‡}

Xie Zhi-Min³⁾ Zhang Ling-Shan¹⁾

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

2) (School of Physical Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

3) (Naval Military Marine Environment Construction Office, Beijing 100081, China)

(Received 28 March 2022; revised manuscript received 5 July 2022)

Abstract

Acoustic signals can travel thousands of kilometers in seawater, and the characteristics of long-range sound propagation are different from short range propagation. This paper is based on a long-range underwater acoustic experimental data obtained from the western Pacific Ocean, where the farthest propagation distance is nearly 2000 km. The ocean environment information and vertical line array information are carefully processed. We analyze the attenuation of long-distance acoustic propagation in seawater and multi-path arrival structure characteristics under the complete acoustic channel environment of the ocean. In terms of the attenuation law of long-distance propagation energy, with the increase of propagation distance, the effect of seawater absorption on the attenuation of sound energy becomes prominent, and the selection of absorption coefficient is very important for the accurate prediction of sound field energy. Absorption in seawater of low frequency signals is small, and the transmission loss of acoustic signal with 100 Hz center frequency increases only by about 6 dB when the propagation distance increases from 1000 km to 2000 km. In terms of multi-path arrival structure characteristics of deep-sea acoustic channel for long-distance sound propagation, the thermocline sound velocity profile in the experimental sea area has a higher sound speed, making the number of eigenrays reaching the receiving point more and the multi-path arrival structure more complex. The arrival structure formed by sea surface reflected eigenrays is at the earlier position of the overall arrival structure and has relatively strong energy. Owing to the influence of subtropical water over the northwest Pacific Ocean on the sound speed profile, the time of some eigenrays arriving at the receiving point is earlier, and the length of multi-way arrival structure on the time axis is prolonged.

Keywords: long-rang sound propagation, transmission loss, arrival structure

PACS: 43.30.Zk, 43.30.Es, 43.30.Cq

DOI: 10.7498/aps.71.20220566

* Project supported by the State Kay Research and Development of China (Grant No. 2021YFF0501200) and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11774374).

† Corresponding author. E-mail: pzh@mail.ioa.ac.cn

‡ Corresponding author. E-mail: wgx@mail.ioa.ac.cn



西太平洋远距离声传播特性

毕思昭 彭朝晖 王光旭 谢志敏 张灵珊

Characteristics of long-range sound propagation in western Pacific

Bi Si-Zhao Peng Zhao-Hui Wang Guang-Xu Xie Zhi-Min Zhang Ling-Shan

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 214302 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20220566

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220566>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

地球曲率对远距离声传播的影响

Effect of earth curvature on long range sound propagation

物理学报. 2021, 70(11): 114303 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201858>

深海海底反射会聚区声传播特性

Characteristics of convergence zone formed by bottom reflection in deep water

物理学报. 2019, 68(1): 014301 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181761>

深海不完整声道下反转点会聚区研究

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

物理学报. 2021, 70(2): 024301 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201375>

一种低声速沉积层海底参数声学反演方法

Geoacoustic inversion for acoustic parameters of sediment layer with low sound speed

物理学报. 2019, 68(9): 094301 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190183>

浅海周期起伏海底环境下的声传播

Sound propagation in shallow water with periodic rough bottom

物理学报. 2021, 70(3): 034302 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201233>

基于大气声传播理论的爆炸声源能量估计

Energy estimation of explosion sound source based on atmospheric sound propagation theory

物理学报. 2021, 70(24): 244203 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210562>