西太平洋远程脉冲声传播实验数据分析

吴丽丽^{①②*}, 彭朝晖^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, 北京 100190

*联系人, E-mail: liliwu1990@163.com

收稿日期: 2016-02-03; 接受日期: 2016-04-25; 网络出版日期: 2016-08-09

国家自然科学基金(编号: 11174312, 11434012)和海洋公益性行为科研专项经费(编号: 201405032)资助项目

摘要 2013年7月在西太平洋进行了一次远程声传播实验. 实验使用水下150 m深的拖曳线列阵接收水下125 m深拖曳换能器发射的线性调频声信号(频带范围260–360 Hz), 记录了收发距离为34–220 km, 612–635 km和926–1029 km等三处的声传播数据; 同时用锚系的深水垂直阵潜标接收了水下1000 m深度爆炸的爆炸声信号, 最远传播距离达943 km. 本文对上述远程脉冲声传播数据进行了分析, 获得了深海远程会聚区传播损失曲线、深海声道传播损失及其随接收深度变化曲线, 并使用PE模型和射线模型对上述远程脉冲声传播现象进行了理论分析和解释.

关键词 会聚区传播, 深海声道传播, 传播损失, PE模型**PACS:** 43.30.+m, 43.30.Es, 43.30.Re

深海中温度、盐度及压力随深度变化, 导致声速剖面存在极小值, 形成了水下天然声波导. 声波在深海波导中能够远距离传播.

过去40年中, 在深海海域开展了许多远程声传播实验, 典型的实验如SLICE89^[1]、NPAL98^[2]、ATOC^[3]、LOAPEX^[4]等, 传播距离达几千千米甚至上万千米, 获得了大量实验数据, 研究内容包含复杂海洋环境下声传播^[5,6](如海底山、大陆斜坡、海洋水文等因素对声传播的影响)、散射^[7,8]、混响^[9,10]、声场时间空间相关特性^[11,12]等, 取得了大量的研究成果.

关于深海远程声传播中传播损失的规律, 一些学者也做了研究. 针对会聚区传播中传播损失规律的研究,

Guthrie^[13]在大西洋中进行了2800 km的远程声传播实验, 根据实验数据获得了传播损失曲线, 发现会聚区的位置依赖于声波的频率, 但是未与模型仿真结果比较; Beilis^[14]将射线-简正波理论扩展并应用于深海远程低频声传播中, 通过对传播距离近1000 km传播损失的计算和分析, 发现当声速剖面随距离缓慢变化时, 会聚区的位置会发生改变, 但是文中没有实验数据验证该结论; Boyles^[15]比较了传播损失的实测结果和PE模型预报结果, 两者符合较好, 但是传播距离只包括了前三个会聚区; Zhang等人^[16]使用WKBZ简正波方法, 精确预报了菲律宾海声传播实验中会聚区的位置和形状, 但是传播距离仅为250 km. 关于深海声道

引用格式: 吴丽丽, 彭朝晖. 西太平洋远程脉冲声传播实验数据分析. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2016, 46: 094302

Wu L L, Peng Z H. Analysis of long-range sound propagation in West Pacific Ocean (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2016, 46: 094302, doi: 10.1360/SSPMA2016-00076

传播中传播损失规律的研究, Grigorieva等人^[17]分析了LOAPEX实验中在声道轴接收的距离为3200 km处声波的主要特性, 发现当接收器位于声道轴时, 随着声源远离声道轴所在的深度, 传播损失在迅速增大, 但是文中未比较传播损失的实测结果和模型仿真结果. 陈东荣等人^[18]研究了声道轴附近声场的会聚现象, 使用反转点附近声场的渐近理论分析了接收器位于声道轴附近、传播距离达150 km时声场的会聚情况, 实验和理论结果均表明声源越靠近声道轴, 传播损失越小. 以上研究中, 关于传播距离达几千千米的深海远程声传播损失的研究, 均未比较传播损失的实测结果和模型仿真结果. 在可供查阅的文献中, 虽然部分研究对二者做了比较, 但是传播距离较近(小于400 km).

2013年7月, 中国科学院声学研究所西太平洋进行了一次远程声传播实验, 研究深海远程脉冲声传播的现象和规律. 实验使用水下150 m深的拖曳线列阵接收了水下125 m深换能器发射的线性调频声信号(频带范围260–360 Hz), 传播距离达1029 km; 同时用锚系的深水垂直阵潜标接收了水下1000 m深度爆炸的爆炸声源, 传播距离达943 km. 本文详细分析了该实验获取的声传播数据, 得到了深海远程脉冲声传播中会聚区传播和声道轴传播的传播损失特性, 并利用PE模型RAM和射线模型Bellhop, 对实验数据处理结果进行了理论解释.

1 实验概况

实验于2013年7月在西太平洋海域进行, 由会聚区传播实验和深海声道传播实验两部分组成. 实验中使用了吊放换能器声源和爆炸声源两种脉冲声源.

会聚区传播实验采用双船作业形式, 如图1所示. 其中中国科学院南海海洋研究所“实验3号”调查船作为发射船, 在指定站点A点漂泊. 中国科学院声学研究所“实验1号”科学考察船作为接收船, 沿预定航线航行至B点. 声源为位于125 m深的吊放换能器, 换能器发射线性调频信号, 信号持续时间20 s, 频带范围260–360 Hz. 使用120阵元的水平拖曳线列阵接收声传播信号, 阵元间距约1.5 m, 接收阵位于海面下150 m附近. 声信号由Sony数字录音机记录, 单通道采样频率为4 kHz. 实验中记录了收发距离为34–220 km, 612–635 km 和 926–1029 km 等三处的声传播数据.

深海声道传播实验采用单船结合潜标的作业方式, 如图2所示. “实验1号”作为发射船, 从B点开始沿着预定航线航行至A点, 航行过程中投放爆炸声源, 爆炸标称深度1000 m. 使用锚系的深水垂直阵潜标接收爆炸声信号, 接收阵布放在A点, 由17个自容式水听器组成, 水听器分布在350–1300 m的深度范围, 每个水听器分别记录了11个距离处的声传播信号, 记录信号的最远距离为943 km, 信号的采样频率为10 kHz.

实验期间使用CTD (Conductivity-Temperature-Depth)和XBT (Expendable Bathythermograph)对水中声速进行了测量, 共得到16个距离处的实测声速剖面, 3.2 km处实测剖面的最大深度为1910 m, 其他距离处的最大实测深度为500 m. 声道轴以下的声速结构具有长期的稳定性, 未测深度的声速剖面根据月平均水文数据获得, 将其与实测深度的声速通过插值连接起来得到整个水体中的声速剖面. 图3给出了8个具有代表性的声速剖面, 与声源距离分别为3.2, 212.7, 403.4, 516.7, 688.8, 900.3, 993.9和1008.7 km. 其中, 实线表示

图1 (网络版彩图)会聚区传播实验作业方式示意图
Figure 1 (Color online) Schematic sketch of convergence-zone propagation experiment.

图2 (网络版彩图)深海声道传播实验作业方式示意图
Figure 2 (Color online) Schematic sketch of deep-sound-channel propagation experiment.

图3 声速剖面
Figure 3 Sound speed profile.

实测的声速剖面, 虚线表示未测深度的声速剖面. 从图中可以看出实验海域存在典型的深海声道, 声道轴在910 m附近, 临界深度在5100 m附近, 表层海水声速在1547 m/s左右, 海深到5400 m附近时, 海水声速达到1550 m/s, 这一数值已略大于海水表面声速, 为深海远程声传播创造了很好的水文环境条件.

航行路线上的海深变化如图4所示, 图中横坐标是与A点距离, 纵坐标是海深. 从图可以看出, 在小于800 km内, 海深在5100–6150 m范围内变化且均大于临界深度. 在800–900 km范围内, 海深先从5600 m减小至5050 m, 然后再次增加至5600 m. 在950 km附近, 有一座海底山, 从距离900 km开始, 海深从5600 m迅速减小至3700 m, 在距离山峰60 km处海深增大至5300–5400 m.

2 传播损失实验和理论比较

本节结合实验结果和模型仿真结果, 分析深海远程会聚区传播和深海声道传播中传播损失的一般规律.

图4 航行路线上的海深
Figure 4 Bathymetry along the experimental track.

数值仿真使用基于PE(抛物方程)理论的声学模型RAM^[19,20].

仿真时使用随接收距离变化的16个声速剖面. 海底参数根据实验数据中影区的传播损失值拟合得到, 海底模型如图5所示, 该模型由一层厚度为500 m的沉积层和半无限深的基底层组成. 沉积层的声速由1565 m/s线性增加至1600 m/s, 密度为1.65 g/cm³, 吸收系数为0.1 dB/λ. 基底的声速为1800 m/s, 密度为1.9 g/cm³, 吸收系数为10 dB/λ. 不考虑剪切波对声场的影响.

模型中考虑了声波在海水中的衰减, 海水中的衰减系数是频率的函数^[21], 由以下公式计算得到

$$\beta = 3.3 \times 10^{-3} + \frac{0.11f^2}{1+f^2} + \frac{44f^2}{4100+f^2} + 3.0 \times 10^{-4}f^2,$$

其中, f 是信号的频率, 单位为kHz, β 是水中的衰减系数, 单位是dB/km.

2.1 会聚区传播

为了提高接收信号的信噪比, 先后使用了常规波束形成技术和匹配滤波器对接收到的声传播信号进行处理. 图6给出了会聚区传播实验中不同会聚区(a)

图5 海底模型
Figure 5 Two layered bottom geometry model used for PE model.

和影区(b)的信号时域波形图, 声源深度为150 m, 接收深度为125 m. 从图中可以看出这些信号具有较高的信噪比. 会聚区信号的波形结构较为简单, 不同距离处变化较小. 而影区信号有明显的多途结构, 且不同距离处的信号结构差异较大. 图7所示的是接收信号的信噪比, 图中横坐标是收发距离, 纵坐标是信噪比. 从接收信号中找出真实信号及其长度 T , 真实信号前端幅度较低的信号作为噪声信号, 且噪声信号长度取为 T , 用真实信号的能量除以噪声信号的能量并用分贝单位来表示即为信噪比. 从图中可以看出, 信号的信噪比均在4 dB 以上, 会聚区信号的信噪比远远高于影区信号的信噪比.

图8是会聚区传播实验中传播损失的实测结果和数值预报结果的比较图. 图中圆点为实验值, 虚线为

图6 会聚区传播实验中接收信号时域图. 收发距离64.3, 616.7和956.7 km的3个不同会聚区(a), 收发距离为149.7, 633.4和1028.7 km 3个不同影区(b)

Figure 6 Signals received in convergence-zone propagation experiment in different convergence zones (a) with the source-receiver ranges of 64.3, 616.7 and 956.7 km, and in different shadow zones (b) with the source-receiver ranges of 149.7, 633.4 and 1028.7 km.

图7 会聚区传播实验中接收信号的信噪比

Figure 7 SNR of the signals received in convergence-zone propagation experiment.

图8 (网络版彩图)会聚区传播实验中实验和仿真传播损失对比. 实验结果(点), 球面衰减规律(虚线), 海深水平不变(蓝线), 海深水平变化(红线)

Figure 8 (Color online) Model/data comparisons of transmission losses in convergence-zone propagation experiment. Dots: experimental results, dashed line: spherical spreading, blue line: range-independent environment with ocean depth 5400 m, red line: range-dependent environment with varying ocean depth.

球面衰减规律. 蓝线表示海深水平不变环境下的数值仿真结果, 取声源处A点的海深5400 m, 红线表示海深水平变化环境下的数值仿真结果, 使用实测海深(如图3). 除海深参数不一致外, 两次数值仿真的其他参数是一样的.

实验测得了近距离34–220 km (覆盖前3个会聚区), 610 km 附近的一个会聚区以及远距离926–1028 km 的传播损失. 由图8可以看出, 每隔61.5 km 出现一个会聚区, 610 km 附近是第十个会聚区. 远距离926–1028 km 处的两个会聚区的位置发生偏移, 分别比第15和16个会聚区的位置向右偏移约30和36 km. 随着距离的增加, 会聚区展宽, 第一会聚区有效宽度约3.5 km, 610 km 附近的会聚区有效宽度约9.5 km, 比第一会聚区展宽约6 km. 在近距离34–220 km, 声强按球面扩展规律衰减, 会聚增益约20 dB. 在远距离处, 会聚区增益随距离增加而下降, 610 km 附近的会聚增益约16 dB, 远距离926–1028 km 处的两个会聚区的会聚增益分别约14和7 dB.

由图8可以看出, 在34–220 km 和610 km 附近, 海深水平不变和海深水平变化环境下的数值预报结果均能精确预报会聚区的位置和强度. 但是在926–1029 km 处, 海深水平不变环境下的数值预报结果与实验结果相差较大. 从图中可以看到, 在950–1000 km 附近, 实测传播损失曲线中存在一个很强的影区, 而海深水平不变环境下的数值预报结果没有预报出该影区的位置和强度. 而海深水平变化环境下的仿真预报结果

与实验结果匹配良好.

可以用射线声学理论进一步解释海深对传播损失的影响. 当海深大于临界深度时, 海面附近声源处的海水声速小于海底处声速, 由 Snell 定律^[21]可知, 从声源发出的声线绝大部分不会在海底发生反射, 海深对传播损失的影响很小; 当海深小于临界深度时, 海面附近的声源处的海水声速也可能大于海底处声速, 声源以任何角度发射的声线都会在海底发生反射, 由于海底的声吸收会很大程度影响声波的能量, 因此此时海深对传播损失的影响很大. 为了更直观地说明这一特性, 使用射线声学模型 Bellhop^[22] 对海深水平变化环境下的声场进行计算. 由于 Bellhop 不能处理分层海底问题, 这里使用单参数海底模型, 海底声速为 1600 m/s, 密度为 1.8 g/cm³. 图 9 给出实验环境下声源位于海面附近 (125 m) 时部分声线的传播轨迹. 可以看出, 在小于 800 km 内, 海深大于临界深度, 声线在 5100 m 附近发生反转, 海深对传播损失的影响可以忽略; 在 926–1029 km 处, 海深小于临界深度, 声线在海底发生反射, 海深对传播损失的影响很大.

2.2 深海声道传播

把深海声道传播实验中水听器接收到的实测声压信号经 FFT 变换得到其频谱, 然后在 1/3oct 带宽内进行能量平均并考虑声源级后便得到实验的传播损失, 本节主要对中心频率为 350 Hz 的爆炸声信号的传播损失进行分析.

图 10 给出深海声道传播实验中 17 个水听器接收的

图 9 (网络版彩图) 声源位于 125 m 深度时到达接收点的本征声线. 声速剖面 (左) 和海深 (下) 与图 8 所示声场的 PE 仿真环境是一致的

Figure 9 (Color online) Schematic plots of typical ray trajectories (right) when the source is at a depth of 125 m. The sound speed profile (left) and the ocean bathymetry (bottom) are the same with those used in the PE modeling in Figure 8.

图 10 深海声道传播实验中收发距离 943.2 km 的 17 个通道接收信号时域图

Figure 10 Receiving signals of 17 channels at the source-receiver range of 943.2 km in deep-sound-channel propagation experiment.

宽带爆炸声信号时域波形图, 收发距离为 943.2 km, 可以看出信号具有较高的信噪比, 多途效应明显.

由于声源是运动的, 在用 RAM 对传播损失进行数值仿真时, 我们假设介质是缓慢变化的, 根据互易原理^[21]进行声场计算.

图 11 给出 3 个接收深度 (372, 584, 859 m) 处传播损失的实验结果和数值结果的比较图. 图中圆点表示实验值, 虚点线表示球面衰减规律, 蓝线表示海深水平不变环境下的仿真结果, 红线表示海深变化环境下的仿真结果. 可以看出, 接收深度为 372 m 时, 200 km 内传播损失曲线起伏较大, 且高声强区和低声强区的位置分别与图 8 会聚区传播中会聚区和影区的位置对应, 随着接收距离的增加, 起伏变小. 当接收深度增加时, 只有在很近的距离上, 传播损失曲线起伏较大, 且随着接收深度越来越靠近声道轴, 出现起伏的距离越来越小: 当接收深度为 584 m 时, 只有前 100 km 的传播损失曲线起伏较大, 而当接收深度增加至 859 m 时, 只在前 40 km 出现一个较低的声强区. 可以看出, 当接收距离大于 400 km 时, 与球面衰减规律相比, 3 个接收深度的传播损失随距离衰减更快, 且接收深度越靠近声道轴, 传播损失曲线与球面衰减曲线之间的差值越大.

从图 11 可以看出, 海深水平不变环境下的数值结果和海深水平变化环境下的数值结果均与实验结果吻合良好, 海深对传播损失的影响较小. 可以用射线声学的理论解释这种现象. 当声源位于声道轴附近时,

图 11 (网络版彩图)深海声道传播实验中实测和仿真传播损失随收发距离的比较. 声源深度1000 m, 接收深度(a) 372 m, (b) 584 m和(c) 859 m. 实验结果(点), 球面衰减规律(虚线) 海深水平不变(蓝线), 海深水平变化(红线)

Figure 11 (Color online) Model/data comparisons of transmission losses versus the source-receiver range in deep-sound-channel propagation experiment with the source depth of 1000 m and receiver depths of (a) 372 m, (b) 584 m and (c) 859 m. Dots: experimental results, dashed line: spherical spreading, blue line: range-independent environment with ocean depth 5400 m, red line: range-dependent environment with varying ocean depth.

声波向上(下)传播时, 声线将向下(上)弯曲, 到达声道轴所在的深度后, 开始向相反的方向弯曲, 如此反复, 使得大部分声能被限制在声道轴上下一定厚度的水层中传播, 这部分能量在传播过程中不会触及海底和海面, 因而也不会造成两个边界的散射和吸收, 海深对传播损失的影响可以忽略. 图12给出了实验环境下声源位于声道轴附近时部分声线的传播轨迹. 可以看出, 大部分声线集中在声道轴上下一定厚度的水层中传播, 不和海底发生作用.

图13给出了6个不同深度处水听器接收到爆炸声信号的传播损失随接收距离的变化曲线. 可以看出, 接收深度在646, 829, 1284 m的传播损失小于接收深度在372, 522, 584 m的传播损失, 且接收距离越大(大于400 km), 这种现象越明显.

图 12 (网络版彩图)声源位于1000 m时到达接收点的本征声线. 声速剖面(左)和海深(下)与图11所示声场的PE仿真环境是一致的

Figure 12 (Color online) Schematic plots of typical ray trajectories (right) when the source is at a depth of 1000 m. The sound speed profile (left) and the ocean bathymetry (bottom) are the same with those used in the PE modeling in Figure 11.

图 13 (网络版彩图)深海声道传播实验中6个接收深度处实测传播损失. 接收深度为372, 522, 584, 646, 829和1284 m

Figure 13 (Color online) Experimental transmission losses with receiver depths of 372, 522, 584, 646, 829 and 1284 m in deep-sound-channel propagation experiment.

图14给出了收发距离为7.6, 169.2, 326.1, 629.9和943.2 km的传播损失随接收深度的仿真结果和实验结果的比较图. 图中圆点表示实验值, 实线是海深水平不变环境下的仿真结果. 可以看出, 实验结果与仿真结果符合较好, 传播损失随接收深度的变化出现一定起伏, 但是总体上接收深度越靠近声道轴深度(约910 m), 传播损失越小, 且声道轴处的传播损失比浅深度处(500 m附近)的传播损失最大可减小10 dB.

3 总结

利用2013年7月西太平洋远程声传播实验中接收到的声传播数据和同步观测到的水文资料, 对远程会

图 14 (网络版彩图)深海声道传播实验中实测和仿真传播损失随接收深度变化的比较. 收发距离为(a) 7.6, (b) 169.2, (c) 326.1, (d) 629.9和(e) 943.2 km. 仿真结果(实线), 实验结果(点)

Figure 14 (Color online) Model/data comparisons of transmission losses versus the depth of the receiver in deep-sound-channel propagation experiment at source-receiver ranges of (a) 7.6, (b) 169.2, (c) 326.1, (d) 629.9 and (e) 943.2 km. Dots: experimental results, solid line: numerical results.

聚区传播和深海声道传播的传播损失进行了分析.

在会聚区传播中, 随着距离的增加, 会聚区展宽.

由于海底山的反射阻挡作用, 远距离处的两个会聚区的位置发生偏移. 且在近距离处, 声强按球面扩展规律衰减. 在远距离处, 会聚增益随距离增大而减小. 在深海声道传播中, 在近距离上, 传播损失曲线起伏较大, 且随着接收深度越来越靠近声道轴深度, 出现起伏的距离越来越小. 当接收距离大于400 km时, 与球面衰减规律相比, 传播损失均比球面衰减快, 且接收深度越靠近声道轴深度, 传播损失曲线与球面衰减曲线之间的差值越大. 同时可以看出, 传播损失随接收深度的变化出现一定起伏, 但是总体上随着接收深度越靠近声道轴深度, 传播损失越小.

使用基于抛物方程方法的RAM模型仿真了海深水平不变环境和海深水平变化环境下两种声场的传播损失, 结果表明PE模型能够准确预报深海远程会聚区传播和深海声道传播中的传播损失. 在会聚区传播中, 当海深大于临界深度时, 海底对传播损失的影响很小; 当海深小于临界深度时, 海底对传播损失的影响很大. 在深海声道传播中, 大部分声能被限制在声道轴上下一定厚度的水层中传播, 不和海底发生作用, 海深对传播损失的影响可以忽略, 且声波能量在声道轴深度附近最为集中, 离声道轴越近, 传播损失越小.

致谢 感谢参与2013年夏季西太平洋远程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.

参考文献

- 1 Howe B M, Mercer J A, Spindel R C, et al. SLICE89: A single slice tomography experiment. In: Ocean Variability & Acoustic Propagation. Netherlands: Springer, 1991. 81–86
- 2 Worcester P F, Spindel R C. North Pacific acoustic laboratory. *J Acoust Soc Am*, 2005, 117: 1499–1510
- 3 Munk W. Acoustic thermometry of ocean climate (ATOC). *J Acoust Soc Am*, 1999, 105: 982
- 4 Mercer J A, Howe B M, Andrew R K, et al. The long-range ocean acoustic propagation EXperiment (LOAPEX): An overview. *J Acoust Soc Am*, 2006, 120: 3020
- 5 Baggeroer A, Schmidt H, Sikora J, et al. A comparison of experimental and theoretical forward scattering by the Kermit-Roosevelt Seamount. *J Acoust Soc Am*, 2006, 120: 3063
- 6 Doolittle R. Experimental confirmation of horizontal refraction of cw acoustic radiation from a point source in a wedge-shaped ocean environment. *J Acoust Soc Am*, 1988, 83: 2117–2125
- 7 Hackman R H. Long-range scattering in a deep oceanic waveguide. *J Acoust Soc Am*, 1988, 83: 1776–1793
- 8 Baggeroer A B, Sikora J, Heaney K, et al. Forward scattering from the Kermit-Roosevelt Seamount complex during the SPICEX-LOAPEX-BASSEX experiments. *J Acoust Soc Am*, 2005, 117: 2549
- 9 Chin-Bing S A, Murphy J E. Further results from modeling deep-ocean reverberation from the Mid-Atlantic ridge. *J Acoust Soc Am*, 1995, 97: 3386

- 10 Preston J R. Backscattering mechanisms for reverberation from deep ocean features using ARSRP data taken at the Mid-Atlantic Ridge. *J Acoust Soc Am*, 1996, 99: 2499
- 11 Ostashev V E, Voronovich A G. Spatial coherence of acoustic signals measured during the 1998–1999 North Pacific Acoustic Laboratory (NPAL) experiment. *J Acoust Soc Am*, 2004, 116: 2608
- 12 Brown M G, Beron-vera F J, Udovydchenkov I A, et al. Coherence in long-range deep ocean propagation. *J Acoust Soc Am*, 2009, 125: 2491
- 13 Guthrie A N. Long-range low-frequency CW propagation in the deep ocean: Antigua-Newfoundland. *J Acoust Soc Am*, 1974, 56: 58–69
- 14 Beilis A. Convergence zone positions via ray-mode theory. *J Acoust Soc Am*, 1983, 74: 171–180
- 15 Boyles C A. Comparison of three propagation models with detailed convergence zone transmission loss data. *J Acoust Soc Am*, 1978, 64: S74
- 16 Zhang R H, He Y, Liu H. The WKBZ mode approach to sound propagation in range-independent ocean channels. *Chin J Acoust*, 1994, 13: 1–12
- 17 Grigorieva N S, Fridman G M, Mercer J A, et al. The interference component of the acoustic field corresponding to the Long-Range Ocean Acoustic Propagation Experiment. *J Acoust Soc Am*, 2009, 125: 1919–1929
- 18 Chen D R, Tang Y L, Chen X W, et al. Convergence phenomenon channel sound field near the axis (in Chinese). *Tech Acoust*, 1987, 3: 15–18
[陈东荣, 唐永禄, 陈献文, 等. 声道轴附近声场的会聚现象. *声学技术*, 1987, 3: 15–18]
- 19 Collins M D. A higher-order energy-conserving parabolic equation for range-dependent ocean depth, sound speed, and density. *J Acoust Soc Am*, 1991, 89: 1068–1075
- 20 Collins M D. A split-step Padé solution for the parabolic equation method. *J Acoust Soc Am*, 1993, 93: 1736–1742
- 21 Jensen F B, Kuperman W A, Porter M B, et al. *Computational Ocean Acoustics*. 2nd ed. New York: Springer Science & Business Media, 2011
- 22 Porter M B. Gaussian beam tracing for computing ocean acoustic fields. *J Acoust Soc Am*, 1987, 82: 1349–1359

Analysis of long-range sound propagation in West Pacific Ocean

WU LiLi^{1,2*} & PENG ZhaoHui¹

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

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

A long-range sound propagation experiment was conducted in the West Pacific Ocean in July 2013. LFM (Linear frequency-modulated) signals with frequency band of 260–360 Hz were transmitted by a transducer hung on a floating ship during the experiment and received by a horizontal line array towed by another ship sailing away from the transducer. Signals were received at the ranges 34–220 km, 612–635 km and 926–1029 km. In addition, explosives signals with explosive depth of 1000 m were received by a vertical line array and the maximum propagation range was 943 km. In this paper, experimental data on the long-range propagation are analyzed, and transmission losses versus range in convergence-zone propagation and those versus range and depth in deep-sound-channel propagation are obtained. The PE model and ray theory are used to analyze and explain the properties of the long-range pulse sound propagation observed in this experiment. It is shown that RAM is adequate for estimating the transmission loss. It is shown that in convergence-zone propagation water depth rarely influences the transmission loss when it is greater than the surface conjugate depth but contributes significantly to the transmission loss when the situation is the opposite, however the effect of water depth on transmission loss in deep-sound-channel propagation can be ignored. What's more, the transmission loss increases when the distance between the receiver and the channel axis increases.

convergence-zone propagation, deep-sound-channel propagation, transmission loss, PE model

PACS: 43.30.+m, 43.30.Es, 43.30.Re

doi: [10.1360/SSPMA2016-00076](https://doi.org/10.1360/SSPMA2016-00076)