深海海底山对声波的反射和阻挡效应

李文^{①②}, 李整林^{①③*}

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;

③ 中国科学院声学研究所, 南海研究站, 海口 570105

*联系人, E-mail: lzhl@mail.ioa.ac.cn

收稿日期: 2016-02-03; 接受日期: 2016-04-05; 网络出版日期: 2016-07-25

国家自然科学基金资助项目(编号: 11434012, 41561144006)

摘要 2014年在中国南海进行了一次深海海底山环境的声传播实验. 本文利用宽带爆炸声信号分析了海底山对声传播的影响. 在第一会聚区位置, 由于海底山的阻挡, 海底山环境下传播损失(TL)增加了30 dB以上. 此外, 实验观察到在第一影区的位置, 由于海底山的反射, 海底山环境下的传播损失比无海底山环境下的传播损失减小近7 dB. 在28 km附近, 海底山环境下的传播损失随着接收深度的增大而增大, 接收深度170与1868 m处的传播损失相差近10 dB. 在距离大于30 km时, 不同接收深度条件下的声传播损失随距离的变化趋势基本一致, 且大部分距离处的差异小于3 dB. 实验得到的传播损失和脉冲到达结构与理论计算结果符合得很好, 并利用射线和波动理论解释了由于海山引起的传播损失异常现象和脉冲到达结构.

关键词 海底山, 声传播, 反射, 阻挡, 射线**PACS:** 43.30.Cq, 43.30.Dr, 92.10.Vz

1 引言

海底山对声传播有重要的影响. 过去几十年, 国内外开展了一系列围绕海底山的实验. 最早的一次可以追溯到1968年, 这次实验^[1,2]在东北太平洋的中途岛和威克岛附近展开, 实验发现经过海底山的声压峰值比没有经过海底山的声压峰值低35 dB, 而且有、无海底山环境下接收到能量谱密度比与频率无关. 另一次实验在1975年围绕Dickins山展开, Champan和Ebbeson^[3]利用爆炸声源分析了围绕Dickins山的多途传

播现象, 发现海底山导致声传播损失比无海底山时增大了10–15 dB, 他们发现在频率大于50 Hz时影区的传播损失与 $f^{1/2}$ 成正比, 这与Medwin-Spaulding模型^[3]的计算结果一致. Ebbeson和Turner^[4]解释了230 Hz的CW信号通过Dickins山时产生的声影区现象, 实验发现深度较浅声源的传播损失增加了近15 dB, 他们利用多普勒频移分离了直达波和海底山引起的后向折射波, 发现后向折射波的能量比直达波的低6–13 dB. Kim^[5]利用BASSEX实验详细分析了海底山环境下声传播现象. 对于宽带脉冲信号, 在海山遮挡的影区内理论计

引用格式: 李文, 李整林. 深海海底山对声波的反射和阻挡效应. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2016, 46: 094303

Li W, Li Z L. The reflection and shadow effects of seamounts on sound propagation in deep water (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2016, 46: 094303, doi: 10.1360/SSPMA2016-00077

算结果与实验结果相差较大,这是因为3D模型计算量大,最高计算频率为68.2 Hz,而且只计算了有限号数的简正波,计算时海底山的模型只是简单的圆锥体.尽管有关海底山的实验和理论有了很大的进步,在实验方面研发出更高源级的声源、更高灵敏度的水听器、更精确的水下信号记录系统等设备,在理论方面开发出基于射线、简正波、抛物方程等方法的三维声传播模型.但是由于海底山底质结构复杂、海底参数直接获取难度很大,加上海洋环境的不确定性,使得有关的问题尚未定论^[5-7].

本文首先介绍了2014年中国南海海域深海声传播实验,并对比分析了有、无海底山环境下的传播损失差异.最后,利用脉冲到达结构和本征声线分析、解释了海底山环境下的声传播机制,并通过实验与模型计算结果对比,验证了海底山环境下的声传播现象.

2 实验简介

2014年6月,声场声信息国家重点实验室在中国南海海域进行了一次深海声传播实验,实验目的之一是为研究深海海底山环境下的声传播规律提供实验数据.实验设备布放如图1所示,声学接收潜标由27个自容式水听器(USR)组成,水听器深度从100–1900 m非等间隔分布.USR的采样率为16 kHz.“实验1号”船以10节的速度分别在O2T1和O2T2两个方向上每隔6 min发射一枚标定深度为200 m、TNT当量为1 kg的宽带爆炸声源.

图2给出了O2T1和O2T2两个方向上的海底深度,O2T1方向上海底较为平坦,平均深度约为4305 m,O2T2方向上有两座海底山,第一座海底山最高处距离海面

图1 (网络版彩图)实验设备布设示意图
Figure 1 (Color online) Experimental configuration.

图2 (网络版彩图)O2T1和O2T2方向上的海深随距离的变化
Figure 2 (Color online) Bathymetry along two propagation tracks.

809 m,距离接收潜标30 km,海底山宽度约35 km,第二座海底山相对比较小,最高处距离海面约为2450 m.图3给出了实验期间测得的声速剖面,0–1760 m深度处的声速由声速仪(CTD)测得,1760–4305 m深度处的声速是由声速的经验公式^[8]计算得到,其中温度和深度由温深计(TD)测得,而盐度在海深大于1760 m时变化很小,从数据库中插值得到.声道轴深度在1040 m左右,海底处声速为1532 m/s,海表面声速为1544 m/s,为不完全声道.

实验接收到的声信号记为 $x(t)$,经过离散傅里叶变

图3 实验期间测得的海水声速剖面
Figure 3 Sound speed profile measured in the experiment.

换得到信号的频谱 X_i ,并在中心频率 f_0 的1/3倍频程内取平均,得到窄带信号的平均能量

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

其中 F_s 为采样率, nf_1 和 nf_2 分别为频率下限和频率上限对应的频点数.

传播损失表示为

$$TL(f_0) = SL(f_0) - (10\log[E(f_0)] - b), \quad (2)$$

其中 S 和 b 分别表示声源级和水听器的灵敏度.

图4给出了有、无海底山环境下的声传播损失的实验结果,其中声源中心频率300 Hz,声源深度200 m,接收深度170 m.从图4可见,在28 km处,海底山环境下的传播损失比无海底山环境下的减小近7 dB,而在56–62 km,原平海底环境下的声场会聚区结构被破坏,使得传播损失增大了30 dB以上.

图5给出了海底山环境下传播损失随距离和深度的变化.图5(a)给出了接收深度从106–1868 m条件下的二维传播损失.图5(b)给出了4个接收深度的传播损失曲线,从中可以看出在28 km附近,随着接收深度增大,传播损失随之增大,接收深度170与1868 m处的传播损失相差近10 dB.在距离大于30 km时,不同接收深

图4 (网络版彩图)O2T1和O2T2两个方向上的传播损失,声源中心频率300 Hz,声源深度200 m,接收深度170 m

Figure 4 (Color online) TLs along two tracks with/without seamounts, where the central frequency is 300 Hz, the source depth is 200 m, and the receiver depth is 170 m.

度条件的声传播损失随距离的变化趋势基本一致,且在大部分距离处的差异小于3 dB.

3 解释实验现象

为了解释图4和5中观测到的实验现象,利用BELL-HOP射线模型^[8]计算了有、无海底山环境下的声场.为了与海上实验情况一致,根据互易原理^[8],对调声源和接收器的位置.实验过程中,通过海底取样获得了接收潜标位置的海底样本,通过分析得知海底主要是黏土质粉砂.海底参数采用两层海底模型^[9]:沉积层的厚度、声速、密度、衰减系数分别为5 m, 1565 m/s, 1.6 g/cm³, 0.5 dB/λ;无限大基底的声速、密度、衰减系数分别为1650 m/s, 1.8 g/cm³, 0.4($f/1000$)^{0.9} dB/λ,其中 f 的单位是kHz.

图6给出了有、无海底山环境下声传播损失随距离和深度的二维变化结果,其中声源中心频率300 Hz,声源深度200 m.从图6(a)中可以看出28和56–62 km分别位于平海底环境下的第一影区和第一会聚区.对比图6(a)和(b),可见在30 km之前部分声能量被海底山反射到了第一影区位置,使得能量比无海底山环境下的高.而在第一会聚区的位置,大部分的声线被海底山阻挡,只有少部分大掠射角的声线能通过反射越过海底山.海底山的山顶距离平海底环境下的第一会聚区位置约21–26 km.根据惠更斯原理,等效于声波从海底山的距离位置上发出,则原来平海底环境下第一会聚区的位置正好位于海底山等效二次声源的第一影区位置,使得此处的能量最小.所以,最终使得传播损失比无海底山时增大了30 dB以上.

图7给出了接收深度为170 m时,有、无海底山环境下的模型计算的传播损失与实验结果的比较.从图中可以看出,尽管海底山环境下的声场分布比较复杂,但是理论计算与实验的结果能够很好地符合.在距离大于50 km时,由于模型计算时的海底声学参数及海底地形随距离的变化等都会存在一定的误差,所以,海底山环境下理论计算的远距离传播损失与实验结果差异稍大.

3.1 海底山对28 km处脉冲到达结构的影响

图8(a)和(b)分别给出了实验和计算的不同距离的

图5 海底山环境下传播损失随距离和深度的变化, 其中声源频率300 Hz, 声源深度200 m. (a) 潜标所有深度上的结果(深度106–1868 m); (b) 4个接收深度上的结果(170, 536, 1248和1868 m)

Figure 5 TLs for the environment with seamounts. (a) TLs at whole receiver depth from 106 m to 1868 m; (b) TLs at four receiver depths of 170, 536, 1248 and 1868 m, where the central frequency is 300 Hz, the source depth is 200 m.

图6 有、无海底山传播方向上二维传播损失比较. (a) 无海底山方向; (b) 有海底山方向. 其中: 声源中心频率300 Hz, 声源深度200 m

Figure 6 Comparison of the numerical TLs for the environments without seamounts (a) and with the presence of seamounts (b), where the central frequency is 300 Hz, and the source depth is 200 m.

图7 有、无海底山方向声传播损失实验结果与模型计算结果比较. (a) 无海底山方向; (b) 海底山方向, 其中: 声源中心频率300 Hz, 声源深度200 m, 接收深度170 m

Figure 7 Comparison of the numerical TLs and experimental TLs for the environments without seamounts (a) and with the presence of seamounts (b), where the central frequency is 300 Hz, the source depth is 200 m, and the receiver depth is 170 m.

图8 脉冲达到结构随距离变化二维彩图. (a) 实验结果; (b) 模型计算结果, 其中声源中心频率300 Hz, 带宽10 Hz, 声源深度200 m, 接收深度170 m

Figure 8 2D color map of range-stacked arrival pulses. (a) Experimental results; and (b) numerical results, where the central frequency is 300 Hz with a bandwidth of 10 Hz, the source depth is 200 m, and the receiver depth is 170 m.

脉冲声到达结构^[5], 图9给出了距离为28 km处脉冲幅度的相对值, 其中声源中心频率300 Hz, 带宽10 Hz, 仿真时频率间隔取0.1 Hz. 图8和9中横坐标为相对时间, 为实际信号到达时间减去 $r/1500$, 其中 r 代表接收器距离声源的距离. 图8中声压的归一化幅值为

$$E = 20\log_{10}(|p(r, t) / p_{\max}(r, t)|), \quad (3)$$

其中 p 是声压, $p_{\max}$ 是 p 绝对值的最大值. 图8中白色实线的位置是海底山最高处所在距离(30 km), 白色虚线的位置是能量极大值所在的距离(28 km). 图10给出了

图9 距离为28 km处(图7白色虚线所在位置)理论计算和实验得到的脉冲到达结构比较

Figure 9 Comparison of numerical arrival pulses with the experimental results at the range of 28 km indicated by horizontal dashed lines in Figure 7.

有、无海底山环境下的主要本征声线图, 图10(a)中3种主要的本征声线分别用不同的颜色和线型标出: (1) 经过一次海底反射(1BR)的脉冲最先到达, 标记为红色实线; (2) 第二次到达的脉冲经过1BR和一次海面反射(1SR)或2SR, 标记为黑色虚线或蓝色点线; (3) 第三次到达的脉冲为经过2BR和1SR或2SR, 标记为绿色虚点线.

而在无海底山的环境下, 图10(b)中经一次海底反射的声线只有图10(a)中15 km之前的部分声线(除了绿色点线对应的经2次以上海底反射的声线)能到达接收器位置, 即经过一次海底反射声线的数量只有海底山环境下的一半, 而且标注为相同线型的声线有相近的幅值和相位. $20\log_{10}(2)$ 约等于6 dB, 加上海底山反射的其他路径声线携带的能量, 使得28 km处的传播损失减小了7 dB. 在海底山遮挡的影区位置(56–62 km), 实验和计算的脉冲达到结构也大致能符合. 但是, 在影区海底山的底质声学参数和地形的微小变化或不确定性都会导致在声传播信号的能量和到达结构方面存在差异.

3.2 海底山对不同接收深度条件下声传播的影响

为了解释图5中海底山环境下相同距离不同深度上传播损失差异达10 dB以上的现象, 图11给出了4个接收深度(170, 536, 1248, 1868 m)条件下的本征声线. 可以看出, 随着接收深度的增大, 到达28 km处的本征

图 10 (网络版彩图)不同海底环境下对应距离28 km处的主要本征声线. (a) 有海底山; (b) 无海底山. 其中: 声源深度200 m, 接收深度170 m

Figure 10 (Color online) Eigen rays from the source to the receiver at the range of 28 km. (a) With the presence of seamounts; (b) without seamounts, where the source depth is 200 m and the receiver depth is 170 m.

图 11 (网络版彩图)距离28 km处不同接收深度对应的主要本征射线. (a) 170 m; (b) 536 m; (c) 1248 m; (d) 1868 m, 其中声源深度200 m

Figure 11 (Color online) Comparison of the eigenrays for different receiver depths. (a) 170 m; (b) 536 m; (c) 1248 m; and (d) 1868 m, where the range is 28 km and the source depth is 200 m.

图12 (网络版彩图)距离60–90 km处不同接收深度对应的主要本征射线. (a) 170 m; (b) 1868 m, 声源深度200 m

Figure 12 (Color online) Comparison of the main eigenrays for different receiver depths. (a) 170 m; and (b) 1868 m, where the source ranges are from 60 to 90 km, and the source depth is 200 m.

声线的数量在减少而且大部分声线的掠射角在变大,使得传播损失变大.

从图5可以看出当距离大于30 km时,不同接收深度条件下的声传播损失随距离的变化趋势基本一致.原因主要是由于海底山的阻挡使得大部分声线都会被海底山反射后从海底山顶部离开;即使有少部分如图12(b)中的绿色虚线所示的声线不与海底山相互作用,也是从海底山顶部跨越.根据惠更斯原理,如同有许多声源从海底山顶部(距离在30–35 km之间,深度在0–1500 m之间)发出,导致在距离山顶外的50–60 km距离上(对应图5(b)中80–90 km距离位置处红色实圈的位置)形成“第一会聚区”,在图5(b)黑色点圈的位置(130–140 km)形成“第二会聚区”,声线的路径在图12中用红色实线标出.

另外,图5(b)中80–90 km距离上“第一会聚区”的宽度大约有30 km,这是由于海底山的反射(图12中粉色虚线标出了声线的路径),使得在距离等效声源位于30–45 km处(图5(b)中绿色虚圈位置)的能量增强,且与等效声源形成的“第一会聚区”传播损失大小接近.参考图4中有海底山环境下28 km处和无海底山环境下第一会聚区处传播损失均约为80 dB.所以,当距离大于30 km时,海底山环境下不同接收深度条件的声传播损失随距离的变化趋势基本一致.

4 结论

利用2014年在一次南海海底山环境下的声传播实验数据,研究了海底山对深海声传播的影响,并对实验观测到的有、无海底山时声传播差异现象进行了理论解释.结果表明:当海底山位于第一影区位置且声源深度较浅时,由于海底山的反射,会使得传播损失减小近7 dB;由于海底山阻挡了大部分深海折射的声波,破坏了深海平坦海底环境下的会聚区的结构,会使得在第一会聚区位置(56 km)的传播损失增大近30 dB.另外,在声波第一次入射到海底山对应的声反射区距离上(28 km附近),声传播损失会随着接收深度的增大而增大,170–1868 m深度上不同接收深度处的传播损失最大相差将近10 dB.这是由于随着接收深度的增大,能够到达接收器的声线数量减少,且大部分声线与海底的掠射角增大进而导致传播损失增大.而在经海底山后,传播损失随距离的变化趋势基本一致,因为不同接收深度条件下的声线等效于都是从山顶附近发出,由于两座海底山之间的海底较平坦,而且声波经深海声道传播后,没有与第二个海底山作用,所以能够重新生成会聚区和影区.研究结果对认识深海声道环境与复杂海底地形共同作用条件下的声传播规律及水声探测等应用具有重要意义.

致谢 感谢参加海上实验和研制设备的全体人员为本文提供了可靠的实验数据!

参考文献

- 1 Northrop J. Underwater sound propagation across the Hawaiian Arch. *J Acoust Soc Am*, 1970, 48: 417–418
- 2 Nuttle D A, Guthrie A N. Acoustic shadowing by seamounts. *J Acoust Soc Am*, 1979, 66: 1813–1817
- 3 Champan N R, Ebbeson G R. Acoustic shadowing by an isolated seamount. *J Acoust Soc Am*, 1983, 73: 1979–1984
- 4 Ebbeson G R, Turner R G. Sound propagation over Dickins seamount in the northeast pacific ocean. *J Acoust Soc Am*, 1983, 73: 143–152
- 5 Kim H J. Forward Sound Propagation Around Seamounts: Application of Acoustic Models to the Kermit-Roosevelt and Elvis Seamounts. Dissertation for Doctoral Degree.. Boston: Massachusetts Institute of Technology, 2009
- 6 Peng Z H, Zhang R H. On study of the theory and algorithm of the three dimensional coupled mode-parabolic equation. *Chin J Acoust*, 2005, 23: 77–80
- 7 Zhang R H, He Y, Liu H, et al Application of the WKBZ adiabatic mode approach to sound propagation in the Philippine Sea. *J Sound Vib*, 1995, 184: 439–451
- 8 Jensen F B, Kuperman W A, Porter M B, et al Computation Ocean Acoustic.. New York: Springer, 2011
- 9 Li Z L, Zhang R H. A broadband geoacoustic inversion scheme. *Chin Phys Lett*, 2004, 21: 1100–1103

The reflection and shadow effects of seamounts on sound propagation in deep water

LI Wen^{1,2} & LI ZhengLin^{1,3*}

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

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

³Haikou Laboratory of Acoustics, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Haikou 570105, China

The seamounts have enormous effects on sound propagation in deep water. Some abnormal propagation phenomena were observed for two different tracks with the flat bottom and the seamounts bottom environments. A propagation experiment was conducted in the South China Sea in 2014. The effects of seamounts on sound propagation were analyzed by using the wideband signals. It's observed that, in the first shadow zone about 28 km, the transmission loss (TL) for the environment with the seamounts was decreased up to 7 dB compared with the TL for the environment without the seamounts, due to the reflection effects of the seamount. And in the first convergence zone about 56 km, the TL was increased more than 30 dB for the shallow source. It was because that most of the deep refraction waves were blocked by the seamount. In the reflection zone of seamount, the TL increased as the depth of the receiver became deeper for less of sound rays could arrival and most of the grazing angles became bigger. Moreover, the TL difference between receiver depth 170 and 1868 m was nearly 10 dB. At the range more than 30 km, the TL trends were consistent as receiver depth vary from 170 to 1868 m, because it can be equivalent to that all the rays were reject from the top of the seamount. The numerical TLs and pulse arrival structures can match with experimental results well. Abnormal TLs and pulse arrival structures at different ranges are explained by using ray and wave theory.

seamounts, propagation, reflection, blockage, rays

PACS: 43.30.Cq, 43.30.Dr, 92.10.Vz

doi: 10.1360/SSPMA2016-00077