利用深海海底反射声场特征的水面声源被动测距

吴俊楠^{①②}, 周士弘^{①*}, 张岩^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 100049

*联系人, E-mail: shih_zhou@mail.ioa.ac.cn

收稿日期: 2016-02-03; 接受日期: 2016-04-19; 网络出版日期: 2016-08-09

国家自然科学基金资助项目(编号: 11174312, 10974218, 11125420)

摘要 海底反射声工作方式是指声波经一次海底反射到达接收器的工作方式, 是深海影区内水声探测的重要途径. 依据射线声学理论, 深海海底反射声工作方式下的声场由海底反射路径(BR)、海面-海底反射路径(SBR)、海底-海面反射路径(BSR)、海面-海底-海面反射路径(SBSR)起主要贡献, 4条路径声波的到达时间不同, 利用其到达时延差可以分析深海海底反射声工作方式下的声场强度干涉结构. 分析发现, 海底反射声区声场强度在频率域呈现周期性, 且频率间隔随距离增加而增大, 且频域间隔对应于多途时延差的倒数, 因此可以利用多途时延差与距离的关系来估计声源距离. 对于水面声源, 声源处的海面反射可以忽略, 因此其海底反射声场由BR和BSR传播路径的声波起主要贡献, 其干涉条纹的频域间隔对应于BR路径和BSR路径时延差的倒数. 本文通过分析深海海底反射声工作方式下声场强度干涉结构, 得到了多途时延差随距离变化的关系, 并将其应用于水面声源的被动测距, 仿真结果和实验结果均证明了该方法的有效性.

关键词 深海海底反射声, 水面声源, 干涉结构, 被动测距

PACS: 43.30.Cq, 43.60.Fg

深海海底反射声工作方式下的水面目标被动测距是深海水声探测的重要研究课题之一. 海底反射声工作方式特指对一次海底反射声信号进行检测的方式, 是深海第一影区内水声探测的重要途径. 水面目标一般是指声源深度在10 m以内的水面船等.

浅海波导中, 声场强度在距离-频率二维平面上通常呈现稳健的干涉结构特征, 干涉条纹的频率间隔不仅与距离有关, 与频率也有关, 满足 $\delta(\ln f) = \beta \cdot \delta(\ln r)$, 这里 f 是频率, r 是距离, β 是波导不变量^[1]. 基于波导不

变量的被动测距^[2-4]是浅海被动测距方法之一. 深海海底反射声场强度在距离-频率二维平面上通常也呈现干涉结构特征. 与浅海不同的是, 当声源深度和接收深度一定时, 深海声场干涉条纹的频率间隔随声源距离变化, 与频率无关, 因此可以直接利用其条纹频率间隔来估计声源距离, 这就是本文所提出的被动测距方法. 浅海声场强度距离-频率干涉结构一般基于简正波理论来进行分析. 深海条件下, 利用射线声学理论中的本征声线到达时间来分析干涉结构会更加

引用格式: 吴俊楠, 周士弘, 张岩. 利用深海海底反射声场特征的水面声源被动测距. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2016, 46: 094311
Wu J N, Zhou S H, Zhang Y. Passive ranging of surface source using bottom bounced sound in deep water (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2016, 46: 094311, doi: 10.1360/SSPMA2016-00082

简便. Harrison^[5]曾利用本征声线的到达时间分析了浅海不同声速剖面下干涉条纹与距离的关系; 翁晋宝等人^[6]利用射线理论分析了深海直达声区、影区和会聚区的干涉结构, 并将其应用于海底声学参数反演. 本文通过分析深海海底反射声工作方式下水面声源的干涉结构, 得到多途时延差与距离的关系, 并将其应用于水面声源的被动测距.

本文第1节通过分析深海影区的干涉结构得到多途时延差与距离的一一对应关系; 第2节给出利用多途时延差进行距离估计的数值仿真结果; 第3节利用海试数据进行方法验证; 第4节对全文进行总结.

1 多途时延差与距离的关系

1.1 深海影区的干涉结构

射线声学理论中, 深海影区是指直达声线与反转声线不能到达的区域, 其主要声场能量由反射损失较大的海底反射声贡献. 在第一影区, 二次及以上海底反射声由于能量衰减大而对声场的贡献可以忽略不计, 一次海底反射声对声场起主要贡献, 因此, 海底反射声工作方式下声场仅考虑一次海底反射声. 此时到达接收器的本征声线有且仅有4种路径, 分别为海底反射路径(1-BR)、海面-海底反射路径(2-SBR)、海底-海面反射路径(3-BSR)、海面-海底-海面反射路径(4-SBSR), 图1给出了上述4种声线路径的轨迹图.

依据射线声学理论, 在海水水平分层介质中, 点

声源激发的声场可以表示为上述4条路径声线的相干叠加^[7], 即

$$p(r, z; f) = \sum_m A_m(r, z) V_{bm} V_{sm} e^{i2\pi f t_m(r, z)}, \quad (1)$$

其中, $m = 1, 2, 3, 4$ 分别对应于BR, SBR, BSR和SBSR路径, r 和 z 表示接收器的距离和深度, $A_m(r, z)$ 为第 m 条声线声压振幅, V_{bm} 和 V_{sm} 分别对应于第 m 条声线的海底和海面复反射系数, t_m 为第 m 条声线到达接收器的传播时间. f 为声源频率.

4条路径均为一次海底反射路径, 假定声压振幅和海底反射系数近似相等, 且考虑到海面反射系数的模等于1, 反射相移为 π , 则(1)式可以近似为

$$\begin{aligned} p(f) &= A_1 V_{b1} (e^{i2\pi f t_1} - e^{i2\pi f t_2} - e^{i2\pi f t_3} + e^{i2\pi f t_4}) \\ &= A_1 V_{b1} [e^{i2\pi f t_1} (1 - e^{i2\pi f \Delta t_{12}}) - e^{i2\pi f t_3} (1 - e^{i2\pi f \Delta t_{34}})], \end{aligned} \quad (2)$$

其中 Δt_{12} 和 Δt_{34} 分别为第1, 2条声线和第3, 4条声线到达接收点的时延差^[6], 即

$$\Delta t_{12} = t_2 - t_1 \approx \frac{2 \int_0^{z_s} \sqrt{n^2(z) - \cos^2 \alpha_2} dz}{c_0}, \quad (3)$$

$$\Delta t_{34} = t_4 - t_3 \approx \frac{2 \int_0^{z_s} \sqrt{n^2(z) - \cos^2 \alpha_4} dz}{c_0}. \quad (4)$$

依据射线声学理论, 该时延差的物理意义是两条

图1 (网络版彩图)深海影区4条声线的到达路径. 右上图: 声源处发射声线的放大图. 右下图: 接收处到声线的放大图
Figure 1 (Color online) Arrival paths of the four eigenrays in shallow zone of deep water. Enlarged view of the launched rays at the source (upper right). Enlarged view of the arrival rays at the receiver (lower right).

本征声线深度维声程差所产生的时延; 两条本征声线水平距离相等, 出射角近似相等, 距离维的声程差近似为零.

式(3)和(4)中, z_s 为声源深度, α_2, α_4 分别为第2条声线和第4条声线的出射角(相对于水平面的夹角), $n(z)$ 为海水的折射率. 由式(3)和(4)可以看出, $\Delta t_{12}, \Delta t_{34}$ 随声源深度增加而增大; 出射角随距离增加而减小, 因此 $\Delta t_{12}, \Delta t_{34}$ 随距离增加而减小. 声线2和声线4轨迹接近, 出射角近似相等, $\Delta t_{12} \approx \Delta t_{34}$. 则式(2)可进一步近似为

$$p(f) = A_1 V_{b1} e^{i2\pi f t_1} (1 - e^{i2\pi f \Delta t_{12}}) (1 - e^{i2\pi f \Delta t_{13}}), \quad (5)$$

其中 Δt_{13} 为第1, 3条声线到达接收点的时延差, 表示为

$$\Delta t_{13} = t_3 - t_1 \approx \frac{2 \int_0^{z_r} \sqrt{n^2(z) - \cos^2 \alpha_3} dz}{c_0}, \quad (6)$$

其中 α_3 为第3条声线的出射角, z_r 为接收深度. 由式(6)可以看出, Δt_{13} 随接收深度增加而增大, 随距离增加而减小. 接收水听器接收到的声强可以表示为

$$|p(f)|^2 = 4|A_1 V_{b1}|^2 (1 - \cos 2\pi f \Delta t_{12}) (1 - \cos 2\pi f \Delta t_{13}). \quad (7)$$

从式(7)可以看出, 深海影区声场的声强随频率有两种干涉周期. 当满足 $f\Delta t_{12} = l$ ($l=1, 2, 3, \dots$) 或 $f\Delta t_{13} = n$ ($n=1, 2, 3, \dots$) 时, (7)式表示的声强为极小值, 在声强的频率-距离二维图上表现为干涉相消的条纹, 条纹的频率间隔分别为 $F_1 = 1/\Delta t_{12}$, $F_2 = 1/\Delta t_{13}$. F_1 与距离和声源深度有关, F_2 与距离和接收深度有关.

1.2 水面声源的多途时延差

对于水面声源来说, 由于声源深度很小 ($z_s \leq 10$ m), 使得第1, 2条声线到达接收点的时延差 Δt_{12} 很小, 干涉频率周期 F_1 很大, 因此在较窄的频带范围内周期为 F_1 的干涉条纹数量很少, 很难加以利用; 相比之下, 当接收深度较大时, 第1, 3条声线到达接收点的时延差 Δt_{13} 较大, 干涉频率周期 F_2 较小, 在较窄的频带范围内其对应的干涉条纹比较明显. 因此, 当声源位于水面附近、接收器位于一定深度时, 在声场强度的距离-频率二维平面中能够观察到的通常为频率周期为 F_2 的干涉条纹, 相应的多途时延差为BR, BSR两条路径声线到达接收点的时延差, 也即上述分析的多途时延差 Δt_{13} ,

$$\Delta t = \Delta t_{13} \approx \frac{2 \int_0^{z_r} \sqrt{n^2(z) - \cos^2 \alpha_3} dz}{c_0}. \quad (8)$$

前面分析指出, Δt 随收发距离增加而减小, 随接收深度增加而增大. 下面利用Bellhop射线模型^[8]进行数值仿真分析. 仿真使用的声速剖面如图2所示. 选取频率为300 Hz, 水面声源深度为10 m, 接收深度为150 m. 针对海底反射声工作方式下水面声源激发的声场, 图3和4分别给出了多途时延差与距离和接收深度之间的关系. 从图3可以看出, 多途时延差随距离增加而减小, 且由Bellhop模型计算的结果与公式(8)计算的结果近似相等. 从图4可以看出, 多途时延差随接收深度增加而增大, 这与理论分析一致.

图2 深海典型声速剖面
Figure 2 Typical sound speed profile in deep water.

图3 (网络版彩图) 多途时延差与距离的关系
Figure 3 (Color online) Variation of time delay between BSR and BR paths versus surface source range.

图4 多途时延差与接收深度的关系

Figure 4 Variation of time delay between BSR and BR paths versus receiver depth.

2 利用多途时延差估计水面声源距离

由上一节分析可知,在海底反射声工作方式下,水面声源激发声场的多途时延差与接收深度和收发距离有关.当接收深度固定时,多途时延差仅与距离存在一一对应的关系,如图3所示.在实际工作中接收深度往往是已知的,而多途时延差可以通过接收声场强度频谱的傅里叶变换获得,因此利用多途时延差与距离之间的关系便可以估计声源距离.下面通过仿真结果来验证方法的有效性.仿真使用的声速剖面如图2所示.

首先给出深海水面声源激发声场强度的距离-频率二维分布图,如图5所示,其中声源深度为10 m,接收器深度为150 m,频率带宽为50–370 Hz.由图中可以看出,水面声源激发声场强度的干涉结构有两种干涉条纹,第一种对应图中的粗条纹,其干涉周期很大;第二种对应图中的细条纹,其干涉周期较小,干涉条纹十分明显,与前面的理论分析相符.

取图5中距离15 km处声强的频谱图,如图6所示,可以明显看出有两个周期 F_1 和 F_2 .其傅里叶变换结果示于图7,从图中可以看出, $\Delta t_{12} = 5.8 \text{ ms}$, $\Delta t_{13} = 95.7 \text{ ms}$,另外对公式(7)作傅里叶变换后还有两个峰值 $\Delta t_{13} - \Delta t_{12} = 89.8 \text{ ms}$, $\Delta t_{13} + \Delta t_{12} = 101.6 \text{ ms}$,其幅度约为 Δt_{12} , Δt_{13} 的一半.实际应用中阵列信号处理采用的带宽有限且低频时难以获得较高的检测增益, Δt_{12} 通常检测不到,因此15 km距离处取最强峰对应的BR, BSR声线到达时延差95.7 ms.再根据图3中收发距离与多途时延差的对应关系,可以得到估计的

图5 利用Bellhop射线模型仿真的深海水面声源海底反射声场干涉结构

Figure 5 Interference pattern of bottom bounced sound of surface source in deep water simulated by Bellhop ray model.

图6 距离15 km处声强的频谱图

Figure 6 Intensity spectrum at source range of 15 km.

距离为14.3 km.可见,利用多途时延差来估计声源距离是可行的.

3 实验数据验证

实验数据来自2014年夏季某深海实验水平阵接收到的声场数据,水平阵平均深度为150 m.选取实验期间某段时间水平阵波束形成后得到的某过往船只的噪声数据,图8给出的是该时间段内该船噪声强度的干涉结构(LOFAR谱图).从图中可以看出,船噪声强度的干涉结构在频率域呈现明显的周期性,且不同时刻的频域周期不同.取其中一个时刻,此时由AIS记

图7 利用傅里叶变换得到的多途时延差
Figure 7 Calculated time delay through Fourier transform.

图9 实验期间某时刻某船只的声强谱图
Figure 9 Instantaneous intensity spectrum of ship radiated noise during the experiment.

图8 实测的水面船激发的海底反射声场干涉结构
Figure 8 Measured interference pattern of bottom bounced sound of surface ship radiated noise in deep water.

录的该船与接收船的实际距离为20.4 km, 其声场强度随频率的变化关系如图9所示, 从图中可以看出明显的周期性. 其傅里叶变换结果如图10所示, 峰值对应的多途时延差为72 ms, 即此时BR, BSR声线的到达时延差为72 ms. 最后根据图3中收发距离与多途时延差的对应关系, 可以得到估计的距离为19.5 km, 估计误差为4.4%. 表1给出了另外4个不同时刻估计得到的距离及估计误差, 可以看出该测距方法能够有效估计水面船只的距离, 估计误差在5%以内.

图10 利用傅里叶变换得到的多途时延差
Figure 10 Time delay calculated through Fourier transform.

表1 4个不同时刻的距离估计结果
Table 1 Estimated range results at 4 different time

时间	多途时延差 (ms)	AIS测量距离 (km)	估计距离 (km)	估计误差
时刻1	58	24.3	23.4	3.7%
时刻2	63	22.7	22.2	2.2%
时刻3	72	20.4	19.5	4.4%
时刻4	82	17.4	17.1	1.7%

4 总结

综合以上分析, 可以得出以下结论:
(1) 深海海底反射声工作方式下声场有两种干涉

结构. 对于水面声源来说, 在较窄的频带范围内, SBR, BR声线时延差对应的干涉结构不明显, 通常观察到的为BSR, BR声线时延差对应的干涉结构, 利用声场强度干涉结构的频率周期可以得到其到达接收点的多途时延差, 两者之间呈倒数关系.

(2) 水面声源激发的海底反射声场多途时延差与接收深度和收发距离有关, 随接收深度增加而增大,

随收发距离增加而减小.

(3) 当接收深度已知时, 海底反射声的多途时延差与收发距离存在一一对应关系. 对接收信号LOFAR谱作傅里叶变换可以得到多途时延差, 进而可以估计出声源距离. 数值仿真结果证明了方法的有效性, 实验结果表明利用海底反射声多途时延差可以有效地估计水面声源的距离, 估计误差在5%以内.

致谢 感谢参加海上实验以及处理数据的全体人员!

参考文献

- 1 Chuprov S D. Interference structure of a sound field in a layered ocean. In: Brekhovskikh L M, and Andreev I B, eds. Ocean Acoustics: Current State. Moscow: Nauka, 1982. 71–91
- 2 Rakotonarivo S T, Kuperman W A. Model-independent range localization of a moving source in shallow water. *J Acoust Soc Am*, 2012, 132: 2218–2223
- 3 Thode A M. Source ranging with minimal environmental information using a virtual receiver and waveguide invariant theory. *J Acoust Soc Am*, 2000, 108: 1582–1594
- 4 Ren S L, Guo L H, Jin Y L. Application of eigenanalysis-based adaptive interference suppression algorithm in passive source range estimation (in Chinese). *Appl Acoust*, 2013, 32: 312–319 [任岁玲, 郭良浩, 金燕利. 基于特征分析的自适应干扰抑制方法在水声目标被动测距中的应用. *应用声学*, 2013, 32: 312–319]
- 5 Harrison C H. The relation between the waveguide invariant, multipath impulse response, and ray cycles. *J Acoust Soc Am*, 2011, 129: 2863–2887
- 6 Weng J B. Sound Field Interference Structure in Deep Water: Theory and Application (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences [翁晋宝. 深海声场干涉结构分析与海底声参数反演研究. 博士学位论文. 北京: 中国科学院大学, 2015]
- 7 Liu B S, Lei J Y. Principle of Underwater Acoustics (in Chinese). Harbin: Harbin Engineering University Press [刘伯胜, 雷家煜. 水声学原理. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 1993]
- 8 Michael B. Porter. The BELLHOP Manual and User's Guide: Preliminary Draft. La Jolla: Heat, Light, and Sound Research, Inc., 2011

Passive ranging of surface source using bottom bounced sound in deep water

WU JunNan^{1,2}, ZHOU ShiHong^{1*} & ZHANG Yan¹

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

²College of Physics, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Bottom bounced pattern in deep water interprets the pattern under which rays arrive at the receiver through the paths hitting the bottom boundary once, and it is of great importance in underwater acoustic detection in shadow zone. Based on the ray theory, the bottom bounced sound field in deep water is mostly contributed by four eigenrays including bottom-reflected (BR) path, surface-bottom-reflected (SBR) path, bottom-surface-reflected (BSR) path and surface-bottom-surface-reflected (SBSR) path, all of which arrive at different time with different time delay. On the basis of the time delay of four eigenrays, the interference striation pattern of the bottom bounced sound field can be derived. From the derivation, it can be found that the striation appears periodic in the frequency domain at a certain source-receiver range, and the period increases with range increasing. As the frequency period corresponds to the reciprocal of multipath time delay, the range can be estimated by the time delay. As for a near-surface target source, surface reflection at the source could always be neglected, and then the sound field can be thought of as the contribution of BR path and BSR path. As a result, the frequency period of its striation corresponds to the reciprocal of the time delay between BR path and BSR path. In this paper, the relationship between the time delay and range is obtained by analyzing the interference striation pattern of the bottom bounced sound field in deep water, and then it is applied to passive ranging of surface sources. The approach is demonstrated valid by the simulated data. Experimental results shows that the range of the surface source can be estimated effectively, with an estimation error less than 5%.

bottom bounced sound in deep water, surface sources, interference striation pattern, passive ranging

PACS: 43.30.Cq, 43.60.Fg

doi: [10.1360/SSPMA2016-00082](https://doi.org/10.1360/SSPMA2016-00082)