一种基于大深度矢量水听器的深海直达波区近水面声源定位方法

孙梅^{①②*}, 周士弘^①, 李整林^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 泰山学院, 物理与电子工程学院, 泰安 271000

*联系人, E-mail: sunmei@mail.ioa.ac.cn

收稿日期: 2016-02-03; 接受日期: 2016-04-08; 网络出版日期: 2016-08-11

国家自然科学基金(编号: 11434012, 41561144006)、山东省高等学校科技计划(编号: J12LJ56)和泰山学院科研启动基金(编号: Y-01-2013009)

资助项目

摘要 矢量水听器因能够同时获取声场的声压和三维质点振速分量而倍受关注. 矢量水听器在浅海环境下的研究及应用工作较多. 2014年在某深海海域进行的水声综合考察实验中, 矢量水听器被布放在水下3146 m深处, 并成功地接收到了深度为140 m的拖曳声源发射的信号. 本文首先结合实验海域环境, 分析了深海近水面声源直达波区的声线到达结构以及直达声与海面反射声到达大深度接收器的掠射角, 发现二者的均值随距离单调变化, 且声源深度变化对其影响较小; 然后对实验中两条航线上10 km范围内的信号进行分析, 获取目标声源的方位角以及到达矢量水听器的直达声和海面反射声的掠射角, 再根据该掠射角对目标声源的距离进行估计, 实现了对目标声源在二维平面上的定位, 定位结果与目标的GPS航迹符合较好.

关键词 矢量水听器, 深海声源定位, 直达波区, 大深度接收

PACS: 43.30.+m, 43.60.+d, 43.58.+z

深海声源定位一直以来都是海洋声学研究的热点问题之一, 在过去的几十年, 国内外许多专家学者对其进行了研究. 1987年, Yang^[1]利用模式分解的方法, 在4000 m深北冰洋波导中对260 km远处的低频声源进行了定位. 1991年, Tran和Hodgkiss^[2,3]在太平洋东北部5000 m深海波导中对165 km距离上的声源进行匹配场定位实验, 发现深海声源定位存在会聚区模糊问题. 1992年, Westwood^[4]对墨西哥湾4500 m深海中43 km内的声源进行了匹配场定位. 为了解决深海匹配场

声源定位中拷贝场计算速度慢的问题, 周士弘等人^[5]于1997年将广义相积分简正波法应用于拷贝场计算, 对简短垂直阵接收的宽带信号进行匹配场定位. 2013年, 陈连荣等人^[6]采用高斯射线束法作为深海匹配场定位的拷贝场计算方法, 通过并行计算有效提高了拷贝场计算速度. 此外, 陈连荣等人^[7]在对位于深海海底反射声区的声源进行匹配场定位时, 指出了声场周期性相似结构所导致的定位错误问题. 根据深海声道中的会聚现象, 郭李等人^[8]提出了一种基于深海会聚区

引用格式: 孙梅, 周士弘, 李整林. 一种基于大深度矢量水听器的深海直达波区近水面声源定位方法. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2016, 46: 094309
Sun M, Zhou S H, Li Z L. Near-surface source localization in the direct-arrival zone in deep water using a deep-located vector sensor (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2016, 46: 094309, doi: 10.1360/SSPMA2016-00080

声强匹配处理的声源定位方法. 2012年, Duan等人^[9]分析了深海可靠声路径条件下声线多途传播的特点, 提出了一种加权子空间拟合匹配场方法, 利用不同声线的到达角对目标声源进行定位.

以上深海声源定位的研究中, 均只利用了声场中的声压信号. 随着水声传感器研制技术的发展, 矢量水听器已成功应用于浅海目标DOA估计^[10,11]、多目标分辨^[12]、目标声源定位^[13-15]等方面. 矢量水听器在深海声场特性及其应用方面值得研究. 在2014年进行的一次深海实验中, 我们成功地利用大深度矢量水听器获取了声场的声压和三维质点振速信号. 本文将利用矢量水听器获取的直达波和海面反射波信号对目标声源进行被动定位, 结果表明, 定位结果与声源的实际距离符合较好. 这对今后利用矢量水听器进行深海声源定位是一次有意义的尝试.

1 实验概况

2014年夏季, 中国科学院声学研究所声场声信息国家重点实验室、哈尔滨工程大学等单位在某深海海域进行了一次综合性水声考察实验. 图1是发射船航线及接收器布放位置示意图. 矢量水听器布放在图中A0点3146 m深处. 实验期间, 发射船先沿A2至A0航线航行, 再沿A0至A1航线航行, 航速约3节, 航行过程中拖曳换能器发射中心频率900 Hz、带宽200 Hz、脉

图1 实验船航线及接收器布放位置示意图

Figure 1 The relative location of the source ship (solid line) and the receiver site (circle).

宽为20 s的双曲调频(HFM)信号, 间隔130 s发射一次, 发射信号声源级为185 dB, 拖曳换能器深度约为140 m. 实验过程中, 发射船对海深进行了测量, 平均海深为4298 m且海底较平坦. 图2是实验海域的海水声速剖面.

2 基于矢量水听器的深海直达波区近水面声源定位方法

在如图2所示的深海环境下, 位于海表面附近(140 m)的声源激发的声场有直达波区、声影区和会聚区, 如图3所示. 直达波区是指能接收到来自声源的未经海底反射或海底附近反转的声线的区域. 从图3可以看出, 接收器能接收到直达波的水平距离范围与接收器所处的深度有关. 接收器深度越大, 能接收到直达波的水平距离范围越大.

在直达波区, 忽略经海底二次及二次以上反射的声线时, 到达接收器的声线包括直达波、海面反射波、海底反射波、海面-海底反射波、海底-海面反射波以及海面-海底-海面反射波, 如图4所示. 图4中声源深度为140 m, 接收器深度为3146 m, 接收器与声源之间的水平距离为5.1 km. 在图4中, 将直达波与海面反射波标为①、海底反射波和海底-海面反射波标为②、海面-海底反射波与海面-海底-海面反射波标为③.

为提高信噪比, 首先对实验中矢量水听器接收到的双曲调频信号进行脉冲压缩. 设声源发射信号为 $s(t)$,

图2 实验海域海水声速剖面

Figure 2 Sound speed profile of the experiment area.

图3 深海近水面声源声场区域划分
Figure 3 Division of the sound field excited by a shallow source in deep water.

则接收器接收到的信号表示为

$$s_r(t) = \int S(\omega)P(r, z; \omega)e^{-j\omega t} d\omega, \quad (1)$$

其中 $S(\omega)$ 为 $s(t)$ 的频谱, $P(r, z; \omega)$ 为海洋波导中从声源到接收器的传输函数. 经脉冲压缩后的信号表示为

$$s_c(t) = \int |S(\omega)|^2 P(r, z; \omega)e^{-j\omega t} d\omega. \quad (2)$$

图5给出了实验中A2-A0航线上收发水平距离为5.1 km时矢量水听器接收的信号经脉冲压缩后的归一

化波形. 对照图5和4可以看出, 图5所示的 $p(t)$ 和 $v_z(t)$ 波形中能看到图4所示的三组脉冲. 由于噪声干扰以及近距离处到达接收器处的反射声线掠射角较大, 导致质点振速的水平分量较小, 在 $v_x(t)$ 和 $v_y(t)$ 的波形中只能看到图4所示的脉冲①和脉冲②. 此外, 由于直达波和海面反射波不经过海底反射, 矢量水听器接收的 $p(t)$ 和 $v_x(t)$, $v_y(t)$, $v_z(t)$ 中脉冲①的能量最高. 即在直达波区, 直达波和海面反射波对声场起主要贡献.

在直达波区, 声线到达接收器的掠射角是声场的重要特征物理量, 这里先通过仿真来分析直达波区到达大深度接收器的直达声与海面反射声的掠射角随声源距离和深度的变化关系. 在上一节介绍的实验环境下, 当接收器深度为3146 m时, 矢量水听器能够在13 km水平距离范围内接收到来自近水面声源的直达波. 图6(a)给出了声源深度为140 m时到达接收器的直达声线和海面反射声线的掠射角随水平距离的变化关系, 分别用 ϕ_1 和 ϕ_2 表示. 可以看出, 由于接收器处于较大深度而声源深度较浅, 到达接收器的直达声掠射角 ϕ_1 与海面反射声掠射角 ϕ_2 之间的差异较小, 因此在直达波区可以采用二者的均值(在图6(a)中用 ϕ 表示)近似表示直达波和海面反射波到达接收器处的掠射角, 且 ϕ 随距离单调变化.

图6(b)给出了声源深度分别为10, 100, 200, 300 m时到达接收器的直达声和海面反射声的掠射角均值 ϕ 随距离的变化关系. 可以看出, 声源位于不同深度时,

图4 直达波区接收器接收到的主要声线, 其中声源深度为140 m, 接收器深度为3146 m, 接收器与声源之间的水平距离为5.1 km

Figure 4 Main sound rays received by the receiver in the direct-arrival zone, where the source depth is 140 m, the receiver depth is 3146 m and the horizontal range between the source and the receiver is 5.1 km.

图5 收发距离为5.1 km时矢量水听器接收的经脉冲压缩后的信号

Figure 5 Matched-filtered signals received by the vector sensor when the source-receiver range is 5.1 km.

ϕ 随距离的变化基本一致, 即声源深度的影响较小. 因此, 在近水面声源激发声场的直达波区, 到达大深度接收器的直达波和海面反射波的掠射角 ϕ 可用于估计声源距离.

根据矢量水听器测量的声压信号 $p(t)$ 及质点振速分量 $v_x(t)$, $v_y(t)$, $v_z(t)$, 可以得到声能流密度在 x , y , z 三个方向的分量

$$I_i = \langle p(t)v_i(t) \rangle, \quad i = x, y, z, \quad (3)$$

式中 $\langle \rangle$ 表示对时间的平均. 或利用Fourier变换在频域

进行处理, 得到

$$I_i = \text{Re}[P(\omega)V_i^*(\omega)], \quad i = x, y, z, \quad (4)$$

式中 $P(\omega)$ 和 $V_i(\omega)$ 分别表示 $p(t)$ 和质点振速分量 $v_i(t)$ 的频谱, $*$ 表示对复数取共轭, Re 表示取复数的实部.

由 I_x 和 I_y 可以得到

$$\theta(r, z) = \arctan \frac{I_y(r, z)}{I_x(r, z)}, \quad (5)$$

该角度表示目标声源在水平方向上相对于矢量水听器 x 轴方向的角度, 用来对目标声源的水平方位进行估计.

此外, 由 I_x 和 I_y 可以得到声能流密度的水平分量, 用 I_r 表示

$$I_r(r, z) = I_x(r, z)\mathbf{x} + I_y(r, z)\mathbf{y}. \quad (6)$$

由 I_z 和 I_r 可以得到

$$\phi(r, z) = \arctan \frac{I_z(r, z)}{I_r(r, z)}, \quad (7)$$

该角度表示接收点处的声能流密度与水平面的夹角, 即声线到达接收点的掠射角. 公式(7)中 I_r 表示 I_r 的幅度.

通过以上分析可以看出, 可利用矢量水听器接收的直达波和海面反射波(即图4中的脉冲①)对深海直达波区内的近水面声源进行方位和距离被动估计, 具体步骤如下: (1) 利用公式(5)估计目标声源方位; (2) 利用公式(7)估计直达波和海面反射波到达接收器的掠

图6 (网络版彩图)不同收发距离时到达3146 m深接收器的直达波和海面反射波的掠射角. (a) 声源深度为140 m; (b) 声源深度为10, 100, 200和300 m

Figure 6 (Color online) Grazing angles of the direct rays and the surface-reflected rays on a receiver at 3146 m depth for different ranges. (a) The source depth is 140 m; (b) the source depths are 10, 100, 200 and 300 m.

射角; (3) 根据第(2)步中得到的掠射角估计目标声源的水平距离; (4) 根据估计的声源距离和方位对声源进行定位.

3 实验数据处理

本节利用第1节介绍的实验中矢量水听器获取的直达波与海面反射波数据, 对两条航线上10 km范围内的目标声源进行定位.

首先根据公式(5)获取两条航线上目标声源相对于矢量水听器 x 轴方向的角度, 结果如图7所示, 其中A2-A0航线上估计的声源方位角均值为 131.6° , 标准偏差为 7.6° , A0-A1航线上估计的声源方位角均值为 108.8° , 标准偏差为 3.4° , 估计的两条航线夹角为 119.6° . 根据实验期间记录的发射船GPS数据, 得到两条航线

的夹角为 115° . 可见由矢量水听器测量信号估计的目标声源方位变化与实际情况基本一致.

根据公式(7), 计算两条航线上到达矢量水听器的直达波和海面反射波的掠射角均值 φ , 如图8中圆圈所示. 图中横坐标是接收矢量水听器与声源之间的水平距离, 实线是直达波和海面反射波到达接收点的掠射角均值的理论计算结果. 可以看出, 由矢量水听器测量信号得到的掠射角与理论结果基本一致.

相应地, 根据实验环境下理论计算得到的直达波和海面反射波的掠射角均值, 找出图8中的由实验信号得到的掠射角所对应的水平距离, 即为估计的声源距离. 两条航线上的声源距离估计结果如图9中圆圈所示, 图中横坐标是目标声源的GPS距离, 纵坐标是估计的声源距离, 实线为实际距离. 图10给出了两条航线上的声源距离估计误差, 可以看出, 除在水平距离较

图7 方位角估计结果. (a) A2-A0航线上的结果; (b) A0-A1航线上的结果

Figure 7 Estimated source azimuths from the experimental signals. (a) The results along the propagation track of A2-A0; (b) the results along the propagation track of A0-A1.

图8 不同发射信号到达矢量水听器处的掠射角. (a) A2-A0航线上的结果; (b) A0-A1航线上的结果

Figure 8 Estimated arrival angles of the experimental signals. (a) The results along the propagation track of A2-A0; (b) the results along the propagation track of A0-A1.

图9 距离估计结果. (a) A2-A0航线上的结果; (b) A0-A1航线上的结果

Figure 9 Estimated source ranges. (a) The results along the propagation track of A2-A0; (b) the results along the propagation track of A0-A1.

图10 距离估计误差. (a) A2-A0航线上的结果; (b) A0-A1航线上的结果

Figure 10 Errors of estimated ranges. (a) The results along the propagation track of A2-A0; (b) the results along the propagation track of A0-A1.

近的地方(1 km左右)误差较大以外, 大部分距离上的估计结果相对误差都在10%以内, 其中A2-A0航线上相对误差均值为6.7%, A0-A1航线上相对误差均值为7.3%.

得到目标声源相对于接收矢量水听器的方位和水平距离后, 可以确定目标声源在二维平面上的位置, 结果如图11中圆圈所示, 图中实线是实验期间GPS记录的发射船航迹. 可见, 定位结果与目标的GPS坐标基本一致, 说明利用矢量水听器接收的直达波和海面反射波信号对近水面声源进行定位是可行的.

4 结论与讨论

本文利用布放在3146 m深处的矢量水听器测量的直达波和海面反射波信号对水平距离10 km范围内的近水面声源进行了定位. 首先利用实验测量信号估计目标声源相对于矢量水听器x轴的方位角以及直达

波和海面反射波到达矢量水听器处的掠射角, 再利用

图11 定位结果与目标的GPS航迹的比较

Figure 11 Comparison of the localization results with the source ship's GPS track.

该掠射角对目标声源的水平距离进行估计, 进一步实现了对目标声源在二维平面上的定位. 结果表明, 定位结果与GPS测量结果基本一致, 定位相对误差在10%以内, 这为深海直达波区声源定位提供了一种有效途径.

需要说明的是, 文中是利用单个矢量水听器测量信号对目标声源进行定位的结果, 如果采用由多个矢量水听器组成的阵列接收信号, 应该能提高定位精度和定位结果的稳定性. 关于矢量水听器对深海目标的定位能力, 尚需更多的实验数据进一步加以研究.

致谢 感谢所有参加2014年海上实验的工作人员, 是他们的辛勤劳动为本文提供了稳定可靠的实验数据. 感谢哈尔滨工程大学朴胜春教授提供的矢量水听器实验数据.

参考文献

- 1 Yang T C. A method of range and depth estimation by modal decomposition. *J Acoust Soc Am*, 1987, 82: 1736–1745
- 2 Tran Q D, Hodgkiss W S. Matched-field processing of 200-Hz continuous wave (cw) signals. *J Acoust Soc Am*, 1991, 89: 745–755
- 3 Tran Q D, Hodgkiss W S. Experimental observation of temporal fluctuations at the output of the conventional matched-field processor. *J Acoust Soc Am*, 1991, 89: 2291–2302
- 4 Westwood E K. Broadband matched-field source localization. *J Acoust Soc Am*, 1992, 91: 2777–2789
- 5 Zhou S H, Zhang R H, Gong M, et al. Application of WKBZ mode approach to the matched-field source localization in deep water (in Chinese). *Progress Nat Sci*, 1997, 7: 661–667 [周士弘, 张仁和, 龚敏, 等. WKBZ简正波方法在深海匹配场定位中的应用. *自然科学进展*, 1997, 7: 661–667]
- 6 Chen L, Peng Z, Nan M. The application of Gaussian beam method in deep ocean matched-field localization (in Chinese). *Acta Acust*, 2013, 38: 715–723 [陈连荣, 彭朝晖, 南明星. 高斯射线束方法在深海匹配场定位中的应用. *声学学报*, 2013, 38: 715–723]
- 7 Chen L R, Peng Z H, Wang G X, et al. Periodic analogical structure in the source localization in the reflection area of the deep ocean (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2013, 43: s153–s158 [陈连荣, 彭朝晖, 王光旭, 等. 深海海底反射区声源定位中的周期相似结构. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2013, 43: s153–s158]
- 8 Guo L, Song Z J, Wang L. A method of sound source localization based on matching the sound intensity in deep-sea convergence zone (in Chinese). *Tech Acoustics*, 2012, 31: 277–281 [郭李, 宋志杰, 王良. 基于深海会聚区声场匹配处理的声源定位方法. *声学技术*, 2012, 31: 277–281]
- 9 Duan R, Yang K D, Ma Y L, et al. Research on reliable acoustic path: Physical properties and a source localization method. *Chin Phys B*, 2012, 21: 124301
- 10 Wong K T, Zoltowski M D. Root-MUSIC-based azimuth-elevation angle-of-arrival estimation with uniformly spaced but arbitrarily oriented velocity hydrophones. *IEEE Trans Signal Process*, 1999, 47: 3250–3260
- 11 Wong K T, Zoltowski M D. Self-initiating MUSIC-based direction finding in underwater acoustic particle velocity-field beamspace. *IEEE J Oceanic Eng*, 2000, 25: 262–273
- 12 Wang D, Li F. A robust separating and tracking method on two wideband sources by subspace rotation with one vector hydrophone (in Chinese). *Acta Acust*, 2007, 32: 404–410 [王德俊, 李风华. 基于单个矢量水听器和子空间旋转的宽容宽带双目标分辨与跟踪方法. *声学学报*, 2007, 32: 404–410]
- 13 Hawkes M, Nehorai A. Wideband source localization using a distributed acoustic vector-sensor array. *IEEE Trans Signal Process*, 2003, 51: 1479–1491
- 14 Felisberto P, Rodriguez O, Santos P, et al. Experimental results of underwater cooperative source localization using a single acoustic vector sensor. *Sensors*, 2013, 13: 8856–8878
- 15 Rahamim D, Tabrikian J, Shavit R. Source localization using vector sensor array in a multipath environment. *IEEE Trans Signal Process*, 2004, 52: 3096–3103

Near-surface source localization in the direct-arrival zone in deep water using a deep-located vector sensor

SUN Mei^{1,2*}, ZHOU ShiHong¹ & LI ZhengLin¹

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

² School of Physics and Electronic Engineering, Taishan University, Taian 271000, China

Vector sensor has attracted extensive interests for its ability to simultaneously measure the particle velocity and the scalar acoustic pressure field, which has been widely studied in shallow-water acoustics. During a deep-water experiment held in 2014, a vector sensor located at the depth of 3146 m received the experimental signals launched by a towed transducer at 140 m depth. For the experimental environment, the arrival structure of sound rays and the arrival angles of the direct ray and the surface-reflected ray in the direct-arrival zone of a shallow source are analyzed. It is shown that the arrival angles of the direct ray and the surface-reflected ray vary greatly with range, and the variation of the shallow source's depth has little influence on their mean arrival angle. Based on such properties, the arrival angles of the direct rays and the surface-reflected rays at the vector sensor are extracted from the experimental signals within the range of 10 km, and then the source ranges are estimated. Moreover, the source azimuths are also estimated with the experimental signals. Combining the estimated source azimuths and ranges, the source locations on the two-dimensional plane are determined. It is shown that the estimated source locations are consistent with the GPS measurements.

vector sensor, source localization in deep water, the direct-arrival zone, deep receiver

PACS: 43.30.+m, 43.60.+d, 43.58.+z

doi: [10.1360/SSPMA2016-00080](https://doi.org/10.1360/SSPMA2016-00080)