

文章编号:2095-0411(2016)05-0065-04

基于阵不变量的浅海水声目标定位技术

陈 阳¹, 邹 凌¹, 周 彬², 余 赞³, 张 硕¹

(1.常州大学 信息科学与工程学院,江苏 常州 213164;2.杭州应用声学研究所 声呐技术重点实验室,浙江 杭州 310023;3.海军装备研究院,北京 100161)

摘要:提出了一种基于阵不变量理论的浅海目标定位方法。在简正波理论下,推导了阵列接收信号常规波束形成波束输出与单阵元测量声压的互相关声强包络峰值关于模态传播时延和方位的分布结构。分析表明,该结构包含了目标方位和距离信息;在波束-时域声强图中,利用 Radon 变换提取包络峰值的分布结构,进而可以估计目标的方位和距离。仿真研究结果表明,利用该方法能够有效地对目标实现测向和测距,具有较高精度。

关键词:水声定位;波导频散;阵不变量

中图分类号:O 42

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.2095-0411.2016.05.011

Underwater Target Localization Based on Array Invariant in Shallow Water

CHEN Yang¹, ZOU Ling¹, ZHOU Bin², YU Yun³, ZHANG Shuo¹

(1.School of Information Science and Engineering,Changzhou University,Changzhou 213164,China;2.Science and Technology on Sonar Laboratory, Hangzhou Applied Acoustics Research Institute, Hangzhou 310023,China;3.Naval Academy of Armament,Beijing 100161,China)

Abstract: An underwater target localization method based on array invariant in shallow water is proposed. Based on normal modes theory, the cross correlation intensity of the receiving array's conventional beam-forming output and the pressure signal of one element is derived. And the distribution of the cross correlation intensity envelop as the function of modes' travel time delay and array scan angle is analyzed. It is indicated that this distribution contains the information of target's bearing and range. Taking the use of Radon transform, the distribution in beam-time image can be extracted to estimate the bearing and range. The simulation results demonstrate that the target bearing and range can be estimated effectively with this method, which is highly accurate.

Key words: underwater acoustic localization; waveguide dispersion; array invariant

水声定位一直是水声研究内容中的重要问题。在无频散的自由空间里,可以采用声聚焦^[1-2]、三点定位^[3]等方法实现近场的声源定位。然而,海洋波导中存在频散效应^[4-5],利用波导的频散效应进行定

位的方法主要有匹配场处理、波导不变量法和阵不变量法。匹配场处理法^[6-7]通过将测量得到的声场数据与建模得到的声场数据进行匹配来实现声源的定位,该方法要求已知精细的海洋环境参数,当获得

收稿日期:2016-06-24。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61501061,11404406);江苏省科技厅产学研项目(BY2014037-27)。

作者简介:陈阳(1982—),男,江苏常州人,博士,讲师,主要从事信号处理研究。

的海洋环境参数不准确时,便存在环境失配导致的定位不准确和模糊问题。波导不变量的概念最早由 Chuprov 提出,用一常量描述了距离-频率域内声强的干涉条纹斜率,后续研究以此为基础发展了非相干处理和相干处理下的声源定位方法^[8-10]。基于波导不变量的声源定位技术相对简单易行,然而该方法要求波导中存在多阶模态以形成干涉,并且当波导中存在多种类型传播模态时,由于波导不变量不能够近似为一常数而使该方法的应用受到限制。阵不变量^[11-13]理论由 Lee 和 Makris 提出,来描述阵列接收信号波束-时域声强图中波束最大值随时间的轨迹,并以此为基础实现了脉冲声源的定位。本文基于阵不变量理论,进一步研究提出一种针对非脉冲声源的定位方法,利用水平直线阵接收信号常规波束形成输出与单阵元测量声压的互相关声强,实现声源的测向和测距。该方法无需已知海洋先验知识,同时不要求声场中存在多阶模态形成干涉,方法简单易行,定位无模糊,具有广泛的适用性。

1 基本原理

简正波理论下,若声源深度为 z_s ,频率为 f ,接收阵列为 N 元等间距水平直线阵,则各阵元接收信号可以表示为

$$P_i(f) = Q(f) \sum_m \sqrt{\frac{2\pi}{k_{rm} r_i}} u_m(z_s) u_m(z) e^{-jk_{rm} r_i} = \frac{Q(f)}{\sum_m A_m e^{-jk_{rm} r_i}} \quad (1)$$

式中: $Q(f)$ 是声源频谱, r_i 是声源到第 i 号阵元的距离, k_{rm} 是第 m 阶模态的水平波数, u_m 是第 m 阶模态的本征函数, A_m 是第 m 阶模态的幅值。

则阵列接收信号常规波束形成后的声压为:

$$P_B(s, f) = \sum_{i=0}^{N-1} P_i(f) e^{jk_{id} s} = \frac{Q(f) \sum_m A_m e^{-jk_{rm} r_0} \sin b(s - s_m)}{\sum_m A_m e^{-jk_{rm} r_0} \sin b(s - s_m)} \quad (2)$$

其中, $k = \frac{2\pi f}{c}$; $i = 0, 1, \dots, N-1$, d 是阵元间距; θ 是方位; $\sin b(x) = \sin\left(\frac{Nd k}{2} x\right) / \sin\left(\frac{d k}{2} x\right)$, $s = \sin\theta$, $s_m = \sin\phi_m \sin\theta_0$, $\sin\phi_m = \frac{k_{rm}}{k}$ 。

将波束输出 P_B 与单阵元测量声压 P_0 进行互相关,互相关声强 I_c 为

$$I_c(s, \tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} P_B(s, t) P_0(t + \tau) dt = F^{-1} \{P_B(s, f) P_0^*(r_0, f)\} =$$

$$2\text{Re}\left\{\sum_m \sum_n E_{mn}(s, \tau)\right\} \quad (3)$$

E_{mn} 是第 m 阶模态和第 n 阶模态的互相关声强的复包络,

$$E_{mn}(s, \tau) = |Q(f)|^2 \int_0^\infty A_m A_n \sin b(s - s_m) e^{-j r_0 \phi_{mn}} df \quad (4)$$

其中, $\phi_{mn} = (k_{rm} - k_{rn}) - 2\pi f \tau / r_0$ 。 E_{mn} 为关于波束方位 s 和时延 τ 的二维函数,构成波束-时域声强图,定义横轴为波束方位 s ,纵轴为时延 τ 。

下面分析 E_{mn} 关于时延 τ 和波束方位 θ 的分布:

当 $m = n$ 时,

$$E_{mm}(s, \tau) = |Q(f)|^2 \int_0^\infty A_m^2 \sin b(s - s_m) e^{j 2\pi f \tau} df \quad (5)$$

式中: $\sin b(s - s_m)$ 为频率的缓变函数, E_{mm} 被限制在 $\tau \simeq 0$ 附近,并且 E_{mm} 在 τ 轴上的宽度反比于声源频谱 $|Q(f)|^2$ 的带宽。

当 $m \neq n$ 时, E_{mn} 在频率 $f = \tilde{f}$ 处有静态相位点,满足下面关系

$$\left[\frac{\partial \phi_{mn}}{\partial f}\right]_{f=\tilde{f}} = \left[\frac{\partial k_{rm}}{\partial f} - \frac{\partial k_{rn}}{\partial f} - \frac{2\pi \tau}{r_0}\right]_{f=\tilde{f}} = 0 \quad (6)$$

定义 τ_{mn} 是当 $f = \tilde{f}$ 时满足方程(6)的时延,则有

$$\tau_{mn} = \frac{r_0}{2\pi} \left[\frac{\partial k_{rm}}{\partial f} - \frac{\partial k_{rn}}{\partial f}\right]_{f=\tilde{f}} = r_0 \left[\frac{1}{v_{gm}(\tilde{f})} - \frac{1}{v_{gn}(\tilde{f})}\right] \quad (7)$$

式中 v_{gm} 是第 m 阶模态的群速度。

由式(7)可以看出 τ_{mn} 是频率 $f = \tilde{f}$ 时第 m 阶模态和第 n 阶模态的传播时间差。当 $\tau = \tau_{mn}$ 时, $E_{mn}(s, \tau)$ 的峰值出现在

$$s_{mn} = s(\tau = \tau_{mn}) = \sin\phi_m(\tau_{mn}) \sin\theta_0 \quad (8)$$

下面分析方程(8)中 $E_{mn}(s, \tau)$ 的峰值 s_{mn} 与模态阶数 m 、 n , 以及时延 τ_{mn} 的关系。

1) 当 $v_{gm} > v_{gn}$ 时, $\tau_{mn} < 0$

在理想波导中,对于所有频率 f ,模态群速度 v_{gm} 和掠射角 ϕ_m 具有下面关系

$$v_{gm} = c \sin\phi_m \quad (9)$$

假定至少有 1 阶模态满足 $\sin\phi_m(\tilde{f}) \simeq 1$, 则

$v_{gm}(\tilde{f}) \simeq c$, 则

$$\tau_{mn} = r_0 \left(\frac{1}{v_{gm}(\tilde{f})} - \frac{1}{v_{gn}(\tilde{f})}\right) \simeq \frac{r_0}{c} \left(1 - \frac{1}{\sin\phi_n(\tilde{f})}\right) \quad (10)$$

$$s_{mn} = \sin\phi_m(\tau_{mn}) \sin\theta_0 \simeq \sin\theta_0 \quad (11)$$

方程(10)和(11)表明,峰值 s_{mn} 在 τ 轴方向的分布由第 n 阶模态的掠射角 $\sin\phi_n(\tilde{f})$ 决定,而在 s 轴方向的分布始终在声源方位 $\sin\theta_0$ 上。在波束-时域声强图中相关峰 s_{mn} 构成一条垂直于 s 轴的线段,可以通过该线段对应的 s 轴上的位置对声源方位进行估计。

2) 当 $v_{gn} > v_{gm}$ 时, $\tau_{mn} > 0$

由式(7)可得:

$$\tau_{mn} = r_0 \left(\frac{1}{v_{gm}(\tilde{f})} - \frac{1}{v_{gn}(\tilde{f})} \right) = \frac{r_0}{c} \left(\frac{1}{\sin\phi_m(\tilde{f})} - \frac{1}{\sin\phi_n(\tilde{f})} \right) \quad (12)$$

将式(12)代入式(8),有

$$s_{mn} = \frac{r_0 \sin\phi_n(\tilde{f})}{c\tau_{mn} \sin\phi_n(\tilde{f}) + r_0} \sin\theta_0 \quad (13)$$

当声源频率远高于第 n 阶模态的截止频率时, $\sin\phi_n(\tilde{f}) \simeq 1$, 方程(13)变为

$$s_{mn} \simeq \frac{r_0}{c\tau_{mn} + r_0} \sin\theta_0 \quad (14)$$

则 s_{mn}^{-1} 相对于 τ_{mn} 的偏微分为

$$\frac{\partial s_{mn}^{-1}}{\partial \tau_{mn}} = \frac{c}{r_0 \sin\theta_0} = \chi_h \quad (15)$$

声源距离可以表示为

$$r_0 = \frac{c}{\chi_h \sin\theta_0} \quad (16)$$

由式(17)可以看出, s_{mn}^{-1} 与 τ_{mn} 是线性的, 因此相关峰在波束-时域声强图中的轨迹是一条直线。其中 χ_h 是理想波导中水平直线阵的阵不变量, 表征了 s_{mn}^{-1} 随 τ_{mn} 轨迹的斜率。通过提取斜率可以估计出阵不变量 χ_h , 并且前述分析表明利用式(16)可以估计出声源方位, 则将 χ_h 和 $\sin\theta_0$ 的估计值代入式(16)即可以对声源距离进行估计。

2 仿真研究

下面通过仿真实例研究验证上面提出的定位方法。海深 100m, 水中声速为 $1500 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 海底声速为 $1650 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 海底密度为 $1.7 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 海底吸收系数为 $0.5 \text{ dB} \cdot \lambda^{-1}$ 。声源为 500 ~ 700Hz 的白噪声, 接收阵列为 256 元水平直线阵, 阵元间距 1m, 处理频带为 500 ~ 700Hz, 采样频率 5kHz。目标方位 35° , 距离 10km (相对于首阵元)。

对阵列接收信号进行常规波束形成, 波束输出

与首阵元测量声压进行互相关处理, 得到互相关声强 I_c 的波束-时域声强图如图 1 所示, 横轴为方位正弦 $s = \sin\theta$, 纵轴为互相关时延 τ 。

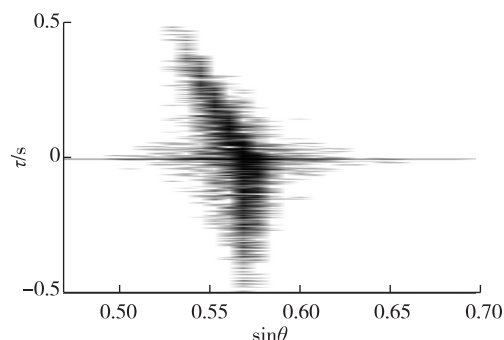


图 1 互相关声强复包络 E_{mn} 波束-时域声强图

Fig.1 Beam-time image of cross-correlated intensity envelope E_{mn}

由图 1 可以看出, 在 $\tau < 0$ 和 $\tau > 0$ 区域内, 不同方位波束的互相关声强最大值随时间变化呈不同规律。由上面的分析可知, 在 $\tau < 0$ 区域内, $s_{mn} \simeq \sin\theta_0$, 则由波束输出最大值对应位置可对目标方位进行估计; 在 $\tau > 0$ 区域内, $\partial s_{mn}^{-1} / \partial \tau_{mn} = c / (r_0 \sin\theta_0)$, 当目标方位确定时, 则通过计算 $\partial s_{mn}^{-1} / \partial \tau_{mn}$ 即可对目标距离进行估计。下面分别对 $\tau < 0$ 和 $\tau > 0$ 区域进行 Radon 变换^[14]得到相关峰峰值轨迹构成的线段的位置和斜率。

首先对 $\tau < 0$ 部分进行 Radon 变换, 如图 2 所示。图 2 中峰值轨迹区域内的白色亮线为 Radon 变换得到垂直于横轴的峰值轨迹直线段, 其对应的坐标方位 $s_{mn} \simeq \sin\theta_0 = 0.57$, 则声源方位的估计值为 34.8° , 估计误差为 0.6%。

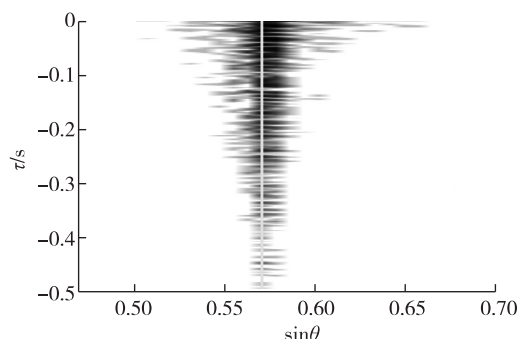


图 2 波束-时域声强图 $\tau < 0$ 区域的 Radon 变换

Fig.2 Radon transform result of $\tau < 0$ domain in beam-time image

然后对 $\tau > 0$ 部分进行 Radon 变换, 如图 3 所示。图 3 中峰值轨迹区域内的白色亮线为 Radon

变换得到峰值轨迹,为一直线段。求得该线段斜率 $\partial s_{mn}^{-1} / \partial \tau_{mn} = 0.26$, 根据目标方位估计值,由式可得距离估计值为 10.13km,估计误差为 1.3%。

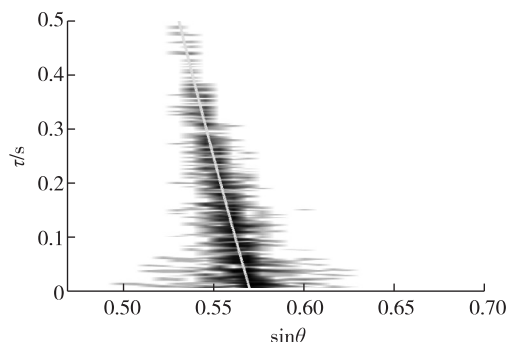


图 3 $\tau > 0$ 区域的 Radon 变换

Fig.3 Radon transform result of $\tau > 0$ domain in beam-time image

3 结 论

海洋波导中存在频散效应,阵不变量描述了波束输出峰值随时间的变化关系。以此为基础,分析了水平直线阵波束输出与单阵元测量声压的互相关声强关于模态传播时延和波束方位的分布结构,以及其与目标方位和距离之间的关系。利用互相关声强中波束输出峰值的轨迹实现了目标的测向和测距。仿真研究结果表明,该方法能够有效的对目标进行定位,测向和测距均具有较高的精度。

参考文献:

- [1] GONG Z, TRAN D D, RATILAL P. Comparing passive source localization and tracking approaches with a towed horizontal receiver array in an ocean waveguide [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2013, 134(5): 3705-3720.
- [2] 梅继丹, 惠俊英, 惠娟. 聚焦波束形成声图近场被动定位技术仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(5): 1328-1333.
- [3] 徐复, 惠俊英, 余赟. 三点法被动定位误差分析及修正[J]. 兵工学报, 2010, 31(9): 1169-1173.
- [4] JENSEN F B, KUPERMAN W A, PORTER M B, et al. Computational Ocean Acoustics [M]. 2nd ed. New York: Springer-Verlag, 2011: 438-444.
- [5] Brekhovskikh L M, Lysanov Y P. Fundamentals of Ocean Acoustics [M]. 3rd ed. New York: Springer, 2003: 143-147.
- [6] SAZONTOV A G, MALEKHANOV A I. Matched field signal processing in underwater sound channels (review) [J]. Acoustical Physics, 2015, 61(2): 213-230.
- [7] BAGGEROE A B, KUPERMAN W A, SCHMIDT H. Matched field processing: source localization in correlated noise as an optimum parameter estimation problem [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1988, 83(2): 571-587.
- [8] TURGUT A, ORR M, ROUSEFF D. Broadband source localization using horizontal-beam acoustic intensity striations [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2010, 127(1): 73-83.
- [9] 余赟, 惠俊英, 赵智勇, 等. 基于声场干涉结构的双水平阵(元)被动测距[J]. 声学学报, 2012, 37(4): 440-447.
- [10] YANG T C. Beam intensity striations and applications [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2003, 113(3): 1342-1352.
- [11] LEE S, MAKRIS N C. The array invariant [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2006, 119(1): 336-351.
- [12] LEE S, MAKRIS N C. A new invariant method for instantaneous source range estimation in an ocean waveguide from passive beam-time intensity data [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2004, 116(4): 2646-2647.
- [13] LEE S. Efficient localization in a dispersive waveguide-applications in terrestrial continental shelves and on europa [D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2006.
- [14] 巩向博. 高精度 Radon 变换及其应用研究[D]. 长春: 吉林大学, 2007.

(责任编辑:李艳)