

# 基于波导不变量的双阵元被动探测方法研究

唐 凯<sup>1,2</sup>, 周德富<sup>2</sup>, 韩庆邦<sup>1,3</sup>, 李 建<sup>1,2</sup>,  
范洪辉<sup>4</sup>, 殷 澄<sup>1</sup>, 朱昌平<sup>1</sup>

(1. 河海大学物联网学院, 江苏常州 213022; 2. 国家海洋局南海维权技术与应用重点实验室, 广东广州 510310;  
3. 河海大学淮安研究院, 江苏淮安 223001; 4. 江苏理工学院计算机工程学院, 江苏常州 213001)

**摘要:** 利用一种水声信道统计不变特征(波导不变量)实现被动探测。采用双阵元, 分别对每一个阵元接收的宽带噪声信号进行 LOFAR 分析, 对 LOFAR 图利用 Hough 变换等图像处理方法进行参数估计, 得到波导不变量和曲线(文中讨论抛物线)参数估计值, 进而运用几何关系估计出运动目标的航向角、速度和距离信息。利用 Matlab 仿真验证了该方法的正确性。

**关键词:** 被动探测; 波导不变量; 参数估计; 声学工具箱

中图分类号: TN929.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2015)-02-0139-04

DOI 编码: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2015.02.007

## Waveguide invariant based passive detection method

TANG Kai<sup>1,2</sup>, ZHOU De-fu<sup>2</sup>, HAN Qing-bang<sup>1,3</sup>, LI Jian<sup>1,2</sup>,  
FAN Hong-hui<sup>4</sup>, YIN Chen<sup>1</sup>, ZHU Chang-pin<sup>1</sup>

(1. College of IOT Engineering, Hohai university, Changzhou 213022, Jiangsu, China; 2. The State Oceanic Administration, technology and application of Key Laboratory of the South China Sea Rights, Guangzhou 510310, Guangdong, China;  
3. Huaian Research Institute of Hohai University, Huaian 223001, Jiangsu, China;  
4. School of Computer Engineering, Jiangsu University of Technology, Changzhou 213001, Jiangsu, China)

**Abstract:** The passive detection is realized by using a statistical invariant feature of underwater acoustic channel (waveguide invariant). The proposed method needs two sensors at least to calculate the motion parameters. LOFARgrams analysis is made for broadband noise signals which are respectively received by the two sensors. To get the estimation values of waveguide invariant and parameters of curve, HOUGH conversion is used for parameter estimation of LOFARgrams. Then the moving target's angle, distance and speed are estimated according to geometrical relationship. The method has been employed to process the LOFARgrams obtained from Acoustic Toolbox simulation, and the estimated results of target parameters show the validity of the method.

**Key words:** passive detection; waveguide invariant; parameter estimation; Acoustic Toolbox

## 0 引 言

被动测距作为声呐系统的主要任务之一, 一直是水声工作者致力解决的问题。当前被动测距技术主要方法有: (1) 三元阵被动测距<sup>[1-3]</sup>关键技术为高精度的时延估计; (2) 匹配场被动测距<sup>[4-6]</sup>, 是水声物理学和信号处理学的结合, 它充分考虑了声波在不同环境参数海洋信道中的传播规律, 可以对声源深度和距离同时估计。但是容易出现模糊, 对失配

也比较敏感; (3) 目标运动分析<sup>[7]</sup>(Target Motion Analysis, TMA)方法, 包括纯方位 TMA、频率-方位 TMA、多途 TMA 等多种方法。近年来, 随着波导不变量研究的深入, 从声场干涉结构提取声源距离的方法得到迅速发展。

波导不变量  $\beta$ , 是由俄罗斯学者 S. DChuprov 在 1982 年首先提出<sup>[8]</sup>, 仅用了一个标量参数, 即反映了距离、频率及其与距离-频率图上干涉条纹斜率的关系, 描述了声场的频散特性和相长的频散干涉结构。通常获得的干涉结构也可以被称为 LOFAR 图, 可以利用短时傅里叶变换获得。利用  $\beta$  描述 LOFAR 图中干涉条纹的斜率并得到干涉条纹轨迹方程, 据此可提取目标运动参数或环境信息。这开辟了声呐信号处理的新途径。

本文提供了一个简单有效的方法来估计运动声源信息(航向、速度、距离等)。首先需要得到通

收稿日期: 2014-04-01; 修回日期: 2014-07-04

基金项目: 国家自然科学基金(11274091, 61302124, 11274092)、国家海洋局南海维权技术与应用重点实验室 2013 年度开放基金(1306)、河海大学中央高校基金项目(2011B11014, 2013B18514)、淮安河海研究生院开放基金资助项目。

作者简介: 唐凯(1990-), 男, 江苏人, 硕士, 研究方向为水声信号处理。

通讯作者: 韩庆邦, E-mail: hqb0092@163.com

过持续接收目标声信号产生的 LOFAR 图, 然后对该图利用 Hough 变换进行图像处理, 提取图中曲线的参数值(计算波导不变量)。最后结合阵元之间的几何关系与干涉条纹方程<sup>[9]</sup>, 估计出目标的运动信息。

### 1 波导不变量

根据定义, 波导不变量<sup>[8,10]</sup>可以表示为:

$$\beta = \frac{r}{\omega} \frac{d\omega}{dr} = -\frac{d(1/v)}{d(1/\mu)} \quad (1)$$

式中:  $r$  为距离;  $\omega$  为角频率;  $\beta$  为不变量, Pekeris 波导中其近似值为 1;  $v$  为简正波的平均相速度;  $\mu$  为平均群速度。

因此, 若海洋环境信息已知, 根据式(1)可以预报  $\beta$  值。但是该方法较麻烦, 而且实际中很难确知海洋环境信息。实际上, 可以利用短时傅里叶变换得到 LOFAR 图, 通过建立干涉条纹与  $\beta$  的关系, 进而根据图像处理方法提取  $\beta$ 。

如图 1 所示, 在 Pekeris 波导下, 通过仿真数据可得到距离-频率图。从图中可以清晰地看到有规律的干涉图案, 它们的干涉条纹斜率也可以通过波导不变量来表征。

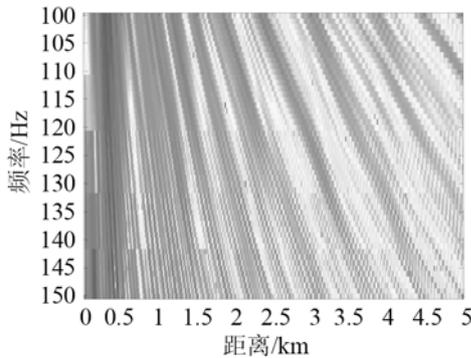


图 1 距离-频率图  
Fig.1 The picture of distance versus frequency

### 2 干涉条纹方程

在距离无关波导的情况下, 假设目标运动如图 2 所示, 是一个由远及近、由近及远的过程。接收阵的声学中心  $R$  位于坐标原点  $O$ , 目标  $s$  作匀速直线运动, 其速度为  $v$ , 辐射宽带连续谱信号, 最近通过距离为  $r_0$ , 最近通过时刻为  $t_0$ 。

由几何运动关系可以推导<sup>[11]</sup>得出 LOFAR 图上干涉条纹满足下面关系式:

$$\omega = \omega_0 [1 + (v/r_0)^2 (t - t_0)^2]^{\beta/2} \quad (2)$$

式中:  $r_0$  为最近点距离;  $t_0$  为到达最近点距离的时刻;  $\omega_0$  为积分常数。

若方括号内项  $[1 + (v/r_0)^2 (t - t_0)^2]$  接近 1 (一般容易满足), 则方程依据泰勒级数展开进一步近似为:

$$\omega - \omega_0 = \frac{\omega_0}{2} \beta (v/r_0)^2 (t - t_0)^2 \quad (3)$$

式(3)又可以写成:

$$(t - t_0)^2 = \frac{2}{f_0 \cdot \beta \cdot (v/r_0)^2} \cdot (\omega - \omega_0) \quad (4)$$

式(4)符合抛物线的标准方程:

$$(x - x_0)^2 = 2 \cdot p \cdot (y - y_0) \quad (5)$$

式(5)中,  $p$  为抛物线参数, 是正常数。

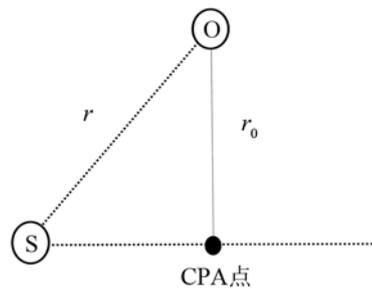


图 2 单阵元目标运动示意图  
Fig.2 Target motion diagram for a single sensor

### 3 双阵元测距原理

双阵元定位模型如图 3 所示。目标通过阵元 A 和 B 的最近距离分别为  $D_1$  和  $D_2$ , 最近时刻分别为  $t_{01}$  和  $t_{02}$ ,  $\Delta d$  为两阵元间距离, 航向角为  $\theta$ 。

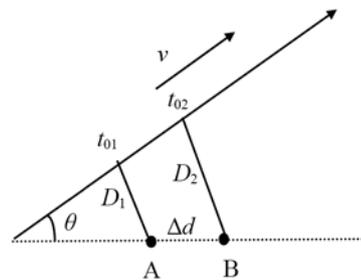


图 3 目标运动几何关系图  
Fig.3 Geometrical relationship between a moving target and two receiving sensors

每个阵元接收器信号生成 LOFAR 图, 干涉条纹都满足式(2), 呈抛物线状。

由式(4)和式(5), 可以得出:

$$r_0 = \sqrt{p \cdot f_0 \cdot \beta \cdot v^2} \quad (6)$$

于是, 根据式(6), 可以得出目标经过阵元 A 和阵元 B 的最近距离分别为:

$$D_1 = \sqrt{p_1 \cdot f_{01} \cdot \beta \cdot v^2} \quad (7)$$

$$D_2 = \sqrt{p_2 \cdot f_{02} \cdot \beta \cdot v^2} \quad (8)$$

由图 3 中简单几何关系，有：

$$\Delta d \sin \theta = D_2 - D_1 \quad (9)$$

$$\Delta d \cos \theta = \Delta t \cdot v, \quad \Delta t = t_{01} - t_{02} \quad (10)$$

两个阵元上都会接收到信号，得到相关的 LOFAR 图，通过对 LOFAR 图干涉条纹的处理，可以分别求得波导不变量  $\beta$ ，取相关和均值得到一个相对精确的波导不变量  $\bar{\beta}$ 。结合式(7)~(10)可以求得目标速度信息、航向信息和最近点距离。

### 4 仿真研究

本文用计算机仿真来验证以上方法的准确性和合理性。仿真主要采用声学工具箱(AT)。仿真设定：动目标以 3.23 m/s 作匀速运动(如图 3 所示)，运动方向与阵元方向的夹角为 37°，与阵元 A 的最近距离为  $D_1=3500\text{m}$ ，阵元 A 和阵元 B 之间的距离为  $\Delta d=200\text{m}$ ，目标运动时持续辐射 300~600 Hz 的低频宽带噪声。本次仿真主要环境参数如图 4 所示。

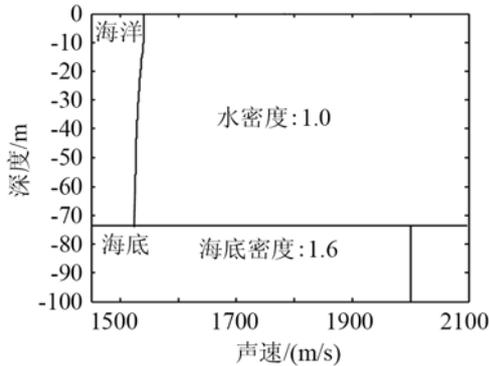
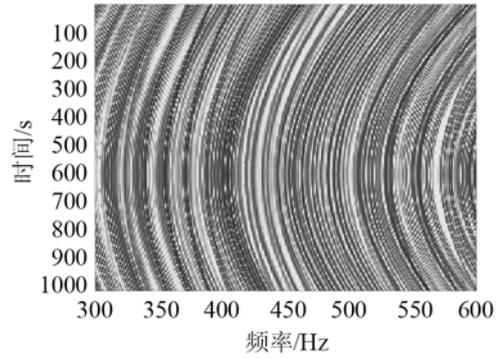


图 4 仿真环境  
Fig.4 Simulated acoustic field model

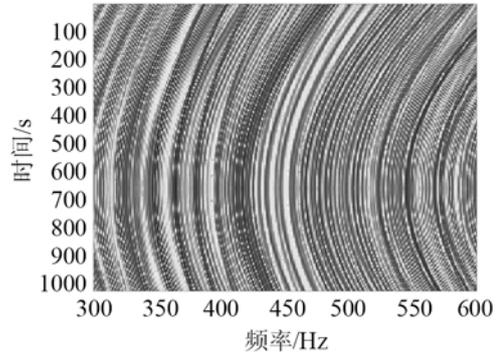
在图 3 模型中，通过仿真可以在 A 阵元和 B 阵元处分别得到 LOFAR 图 A 和 LOFAR 图 B，如图 5 所示。从图 5 中可以看到明显的抛物线形状的干涉条纹，这是因为低频声场存在稳定的干涉结构，当动目标由远-近-远通过阵元时，接收器上产生的 LOFAR 图干涉条纹形状就会呈现抛物线型。而抛物线的顶点所对应的时刻，就是通过最近点(CPA)的时刻。

由图 5 可知，目标通过阵元 A 的 CPA 点： $t_{0A} \approx 600\text{s}$ ，目标通过阵元 B 的 CPA 点： $t_{0B} \approx 651\text{s}$ ，于是  $\Delta t = t_{0B} - t_{0A} = 51\text{s}$ ；运用 Hough 变换图像处理分别估计 LOFAR 图 A 和图 B 中抛物线形干涉条纹的参数： $f_{01}=446, p_1=2710$ ； $f_{02}=455, p_2=2818$ ；波导不变量估计值(均值)为  $\beta=0.80$ 。

以上数据结合上文中定位算法，可以求出目标



(a) LOFAR 图 A



(b) LOFAR 图 B

图 5 仿真数据 LOFAR 图

Fig.5 LOFARgrams obtained from simulation data

的运动信息如表 1 所示，表中同时给出了真实值和估计值。比较两者，可以求得误差，从而验证了方法的正确性。

表 1 目标运动参数估计值与真实值对比  
Table 1 Estimated values versus true values of target parameters

参数	估计值	真实值	误差
$v$	3.50 m/s	3.23 m/s	8.4%
$\theta$	31°	37°	16.2%
$D_1$	3440 m	3500 m	1.7%
$D_2$	3543 m	3620 m	2.1%

由表 1 可以看出，通过比较真实值和估计值，两个最近点距离的误差分别是 1.7%和 2.1%，速度的误差是 8.4%，航向误差为 16%。仿真研究发现此方法在估计目标距离时获得了较好的结果，误差不超过 3%，速度和航向误差稍显大些。

仿真分析可知，在估计航向角时，估计的精度不是很高，而航向角是由式(9)确定，由于  $\Delta t$  和速度  $v$  同时需要估计，此间运算涉及到的近似较多，而且在运用抛物线模型的同时本身也会有一些误差，所以此方法在估计航向角时有一定的缺陷。

上述仿真没有考虑噪声影响，但实际情况下 LOAFR 图的信噪比对于条纹识别、波导不变量提取以及运动信息的估计有着非常大的影响。表 2 给

出了加入不同信噪比噪声后, 经过多次蒙特卡洛仿真对估计结果产生的影响。

表 2 添加噪声后参数估计结果  
Table 2 Parameter estimation results after adding noise

SNR	7 dB 以下	7~25 dB	25~30 dB	30 dB 以上
$\beta$ 估计影响	不能估计	可以合理估计	可以合理估计	可以合理估计
目标运动参数估计影响	不能估计其他参量	但是不能正确估计 CPA 点、速度、航向角	71% 的正确率估计速度 $v$ 。57% 的正确率估计 CPA 点距离, 对航向角不能有效估计航向角。	能够正确估计 CPA 点和速度 $v$ , 对航向角的估计误差较大。

## 5 结 论

本文提出了一个较为简便有效的方法来估计目标运动的参数(距离、航向、速度)。目标运动时辐射稳定的低频宽带噪声信号, 在阵元接收器处可以获得较为清晰的干涉结构(LOFAR 图)。此方法需要至少两个阵元, 结合一种图像处理方法 Hough 变换, 分别对两阵元上获得的 LOFAR 图进行处理, 估计得到干涉条纹曲线的参数和波导不变量, 结合几何运动信息, 达到最终估计参数的目的。

本文通过 AT 工具箱仿真得到 LOFAR 图, 验证了此方法的合理性。参数估计结果显示, 在限定条件下, 对距离的估计效果较好, 误差不超过 3%。

本文的方法较其他被动探测方法, 不需要环境先验知识就能对目标运动参数进行估计, 而且算法简便。从仿真结果可以看出, 在未考虑背景干扰的情况下, 相当于在高信噪比条件下, 该被动测距算法有较高的估计精度, 通过表 2 分析可知, 本方法对接收信噪比有要求, 信噪比在 20 dB 以上时可正确估计  $\beta$ , 在 30 dB 以上时对目标速度、最近点距

离等的估计可信。被动测距的稳健性分析和实验研究将是今后的工作重点。

## 参 考 文 献

- [1] 李启虎. 数字式声纳设计原理[M]. 安徽: 安徽教育出版社, 2002: 350-353.  
LI Qihu. The design principle of digital sonar[M]. Anhui: Anhui Education Publishing House, 2002: 350-353.
- [2] 仲祺祺, 毛卫宁. 双基阵被动定位位置估计算法研究[J]. 声学技术, 2003, 22(4): 269-272.  
ZHONG Qiqi, MAO Weining. Estimation algorithm of bistatic passivelocation[J]. Technical Acoustics, 2003, 22(4): 269-272.
- [3] 行鸿彦, 唐娟. 时延估计方法的分析[J]. 声学技术, 2008, 27(1): 110-114.  
XING Hongyan, TANG Juan. Analysis and survey of algorithms for Time-delay estimation[J]. Technical Acoustics, 2008, 27(1): 110-114.
- [4] Melvin J. Hinich. Maximum likelihood estimation of the position of a radiating source in a waveguide[J]. J. Acoust. Soc. Am, 1979, 66(2): 480-483.
- [5] Shang E C. Source depth estimation in waveguides[J]. J. Acoust. Soc. Am, 1985, 77(4): 1413-1418.
- [6] Yang T C. A method of range and depth estimation by modal decomposition[J]. J. Acoust. Soc. Am, 1987, 82(5): 1736-1745.
- [7] 毛卫宁. 水下被动定位方法回顾与展望[J]. 东南大学学报, 2001, 31(6): 1-4.  
MAO Weining. Review and prospect of passive positioning method of underwater[J]. Journal of Southeast University, 2001, 31(6): 1-4.
- [8] Chuprov S D. Interference structure of a sound field in layered ocean[M]. Nanka Moscow, 1982, 71-91.
- [9] 李启虎. 浅海波导中水下目标辐射噪声干涉条纹的理论分析和试验结果[J]. 声学学报, 2011, 36(3): 254-257.  
LI Qihu. Theoretical analysis and experimental results of Interference striation pattern of underwater target radiated noise in shallow water waveguide[J]. Acta Acustica, 2011, 36(3): 254-257.
- [10] Brekhovskikh L M, Lysanov Y P. Fundamentals of Ocean Acoustics[M]. 2nd ed. NewYork: Springer-Verlag, 1991: 140-152.
- [11] 李建. 声矢量传感器线阵波导不变量被动测距研究[J]. 应用声学, 2012, 31(4): 250-254.  
LI JIAN. Studies of waveguide invariant passive ranging of acoustics vector sensor line array[J]. Applied Acoustics, 2012, 31(4): 250-254.