

单矢量水听器线谱多目标分辨研究

陈韶华 陈川 郑伟

(中船重工集团公司第 710 研究所 宜昌 443003)

摘要: 该文提出了一种通过单个矢量水听器低频线谱检测来分辨多目标的新方法, 得出了矢量水听器线谱多目标分辨能力仅与线谱信噪比有关的结论。利用矢量水听器的低频测向能力, 通过方位邻近准则实现了多线谱与多目标之间的关联, 并采用 α 滤波实现了多目标的分辨与航迹自动跟踪。实测舰船数据的仿真结果表明, 该方法采用单个矢量水听器可以分辨互相间隔 10° 的 3 个目标。方法简单有效, 具有工程应用前景。

关键词: 矢量水听器; 线谱; 多目标分辨

中图分类号: U666.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)05-1253-04

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.00460

Multi-sources Distinguishing by Exploring Line Spectra with Single Acoustic Vector Sensor

Chen Shao-hua Chen Chuan Zheng Wei

(Yichang Research Institute of Testing Technology, Yichang 443003, China)

Abstract: A novel method of multi-sources distinguishing is proposed with single acoustic vector sensor by detecting the line spectra. The distinguishing capability is found to be only relative to the output SNR of the line spectra. With the direction finding ability of acoustic vector sensor within low frequency band, the association between the line spectra and the corresponding sources is established by using direction vicinity principle, the multi-sources distinguishing and auto-tracking is then realized with α filtering. Simulations with sea trial data show that adjacent 3 sources within 10° can be distinguished with single acoustic vector sensor. This method is simple and effective, thus has the prospect of engineering applications.

Key words: Acoustic vector sensor; Line spectrum; Multi-sources distinguishing

1 引言

水下多目标分辨是声呐多目标定位与跟踪的关键技术, 常用的方法是水下传感器阵列多波束形成或高分辨方位估计技术^[1]。要分辨间隔很近的两个目标, 前者需要大孔径基阵形成尖锐多波束, 后者需要复杂的矩阵运算, 在小尺度的水中兵器或水下无人航行器上实现仍有困难。

矢量水听器的出现为这一困难的解决提供了新的途径。单个矢量水听器就可以确定目标的方位, 且不存在左右舷模糊问题。文献[2]利用矢量水听器的声压与振速的偶次阶矩联立方程组, 求解得到多个目标的方位。文献[3]研究了希尔伯特黄变换与加权子空间拟合算法的多目标分辨方法。本文基于矢量水听器的低频测向能力, 提出了一种新的单矢量水听器多目标分辨方法。对于辐射不同频率线谱的非相干多目标, 通过线谱的自动提取与频率方位分析, 获得不同目标的线谱特征信息, 然后通过 α 滤波分离并同时跟踪不同目标。

2 矢量水听器对低频线谱的检测与定向原理

矢量水听器可以共点同步测量声场中一点的声压与振速。通过对声压、振速分别进行傅里叶变换, 在频域上可以得到复声强如下^[4]:

$$\mathbf{I}_c(\mathbf{r}, \omega) = P(\mathbf{r}, \omega) \mathbf{V}^*(\mathbf{r}, \omega) \quad (1)$$

式中 ω 表示圆频率, 上标*表示复共轭, $P(\mathbf{r}, \omega)$ 和 $\mathbf{V}(\mathbf{r}, \omega)$ 分别是声压 $p(\mathbf{r}, t)$ 和振速 $\mathbf{v}(\mathbf{r}, t)$ 的傅里叶变换。复声强可以表示为有功声强和无功声强的形式

$$\mathbf{I}_c(\mathbf{r}, \omega) = \mathbf{I}_a(\mathbf{r}, \omega) + i\mathbf{I}_r(\mathbf{r}, \omega) \quad (2)$$

$\mathbf{I}_a(\mathbf{r}, \omega)$ 称为有功声强, 表示向远处传播的声能; $\mathbf{I}_r(\mathbf{r}, \omega)$ 称为无功声强, 表示不传播的声能。

利用有功声强 \mathbf{I}_a 在空间笛卡儿坐标系 x, y, z 轴上的正交投影 $\mathbf{I}_{a,x}, \mathbf{I}_{a,y}, \mathbf{I}_{a,z}$ 可以估计声强幅度谱、声源的水平方位角 ϕ 以及声源和 Z 轴的夹角 θ ,

$$I_a(\omega) = \sqrt{I_{ax}^2(\omega) + I_{ay}^2(\omega) + I_{az}^2(\omega)} \quad (3)$$

$$\phi(\mathbf{r}, \omega) = \tan^{-1} \frac{I_{a,y}(\mathbf{r}, \omega)}{I_{a,x}(\mathbf{r}, \omega)} \quad (4)$$

$$\theta(\mathbf{r}, \omega) = \tan^{-1} \frac{\sqrt{I_{a,x}^2(\mathbf{r}, \omega) + I_{a,y}^2(\mathbf{r}, \omega)}}{I_{a,z}(\mathbf{r}, \omega)} \quad (5)$$

由式(3)~式(5)可见, 矢量水听器有功声强的 3 个分量可以对中心频率为 ω 的窄带信号或线谱进行检测与定向。高斯噪声背景下, 矢量水听器定向误差下限为^[5]

$$\sigma_{\phi}^2 = \sigma_{\theta}^2 = \frac{1}{3M} \frac{1}{\text{SNR}_i} \quad (6)$$

其中 $M=2BT$ 是时间带宽积, SNR_i 是输入功率信噪比。考虑到线谱检测的增益为 $M^{[6]}$, 故矢量水听器定向误差仅与线谱的输出信噪比有关

$$\sigma_{\phi}^2 = \sigma_{\theta}^2 = \frac{1}{3} \frac{1}{\text{SNR}_o} \quad (7)$$

在不考虑通道失配等系统误差的条件下, 上述定向误差决定了基于矢量水听器线谱定向的相邻目标的角分辨能力。如信噪比 10 dB 时, 对相邻两个目标的角分辨能力为 10.5° 。信噪比增加到 20 dB, 角分辨能力提高为 3.3° 。这是理想的情况, 在工程应用中, 由于噪声偏离高斯分布, 分辨能力会有所降低。

在各向同性噪声中, 线谱的声强检测相对于声压检测有大约 3.9 dB 的增益^[6]。此处理增益即使在数十赫兹的低频也存在, 而对于声压阵的检测, 要获得低频处理增益且对目标定向, 需要庞大的阵列, 在水下小平台上无法布设。因此低频处理增益与线谱定向能力是矢量水听器信号处理的显著优点。

在舰船等水中声源的被动探测中, 其低频线谱特征一直是人们关注的对象。一般来说, 不同目标辐射不同的特征线谱, 利用矢量水听器的对线谱的检测与定向能力, 可以分辨并跟踪水下多个目标。但在无人值守的小平台上应用时, 需要解决噪声背景下线谱的自动检测与提取、线谱与目标的关联、及多目标互相干扰等问题。

3 多目标线谱的自动检测与记录

3.1 线谱的自动检测

根据舰船噪声线谱特征及与连续谱的差异, 可得线谱自动提取的 3 个判据:(1)必须包含左右边界, 且左右边界的宽度应小于某一门限;(2)边界的斜率应超过一定的门限;(3)幅度应超过某一门限。根据这 3 条原则即可编程实现线谱的自动提取, 如图 1 所示。

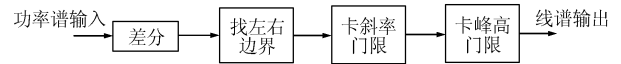


图 1 线谱自动识别示意图

在多目标的情况下, 某一舰船目标辐射噪声中线谱的检测与提取不仅受到环境噪声的干扰, 也受到其它目标辐射噪声的干扰。图 2 用 3 个实测目标数据仿真了多目标情况下功率谱的变化情况, 其中横坐标为归一化频率。图中假设 3 个目标并排航行, 相互距离约 300 m, 航速 16 节, 由远及近通过测量点。仿真时, 根据目标离测量点的距离, 计算传播损失, 由实测船噪声数据与 3 级海况时的噪声级, 模拟出不同距离时一定信噪比的多个目标噪声数据。这里给出了在正横前 1600 m, 800 m 与正横时的多目标功率谱, 横轴为归一化频率, 自动提取的线谱用“+”标出, 采用双通分离窗算法(two-pass split-window algorithm^[7])平滑连续谱背景。采用固定门限与连续谱背景方差相结合的自动峰高门限来提取线谱, 可见与功率谱形状基本相符。

按照目标被检测识别的先后顺序, 比较所提取线谱与各个目标的线谱频率, 标识出了 1, 2, 3 三个目标的线谱。可以看出, 在较远距离上, 如 1600 m 时, 较弱线谱被环境噪声掩盖而无法检测到。在正横附近, 虽然每个目标对环境噪声的信噪比达到最大, 但是彼此的干扰也达到最大, 目标 1 的 5 条线谱有 4 条被其它目标噪声所掩盖而无法检测, 目

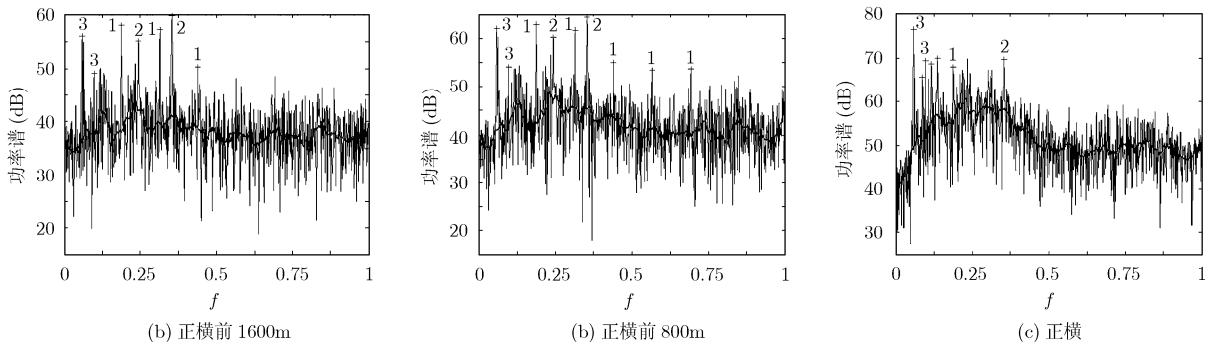


图 2 多目标通过正横前后线谱的变化, 其中的线谱用“+”标注

标 2 有一条线谱被掩盖, 只有目标 3 的线谱占优势。多目标噪声之间的互相干扰, 体现了多目标信号检测与分辨的复杂性。

3.2 线谱的自动记录

由于海洋环境噪声与水声信道复杂多径传播的影响, 各个时刻检测到的线谱都可能变化。有的线谱变得微弱而检测不到了, 而新的频率上线谱可能出现。由于在目标定位跟踪前要经多次检测, 每次检测的线谱数据要有序排列才有利于后续处理。本文采用邻近频率归类准则, 即从第 2 次检测开始, 每个频率都与上次检测到的线谱频率逐一比较, 如果差别小于一个门限值 Δf , 则把该线谱归到同一列。如果上次检测到的线谱在当前检测中未出现, 则当前值赋 0。如果当前检测出现新的线谱, 则为该频率增加一列赋当前值。这样得到在多目标运动过程中的全部线谱。

4 多目标分辨与跟踪

在存在多个目标时, 检测到若干条线谱, 它们分属若干个目标。哪些线谱属于哪个目标, 即线谱与各个目标的关联对于多目标分辨、定位与跟踪至关重要。若关联不当, 易产生跟丢、跟乱的问题, 导致任务失败。本文采用方位邻近准则进行线谱归类。

考虑 2 维矢量水听器, 对于检测到的每一条线谱, 根据其互谱声强的 x 分量与 y 分量, 采用式(4)进行方位估计。用与 3.2 小节同样的顺序记录矢量水听器所估计的方位角。基于非相干目标辐射线谱的唯一性^[8], 首先找出在一段观测时间里出现次数最多也就是最稳定的线谱, 对其瞬时方位进行 α 滤波平滑以消除观测噪声, 然后逐一把其它频率对应的方位与最稳定线谱平滑后的方位做比较, 如果小于门限 $\Delta\theta$ (应小于目标之间的夹角), 则判决该频率与最稳定频率同属一个目标。

α 滤波算法表示为^[9]

$$\bar{\theta}(k) = \bar{\theta}(k-1) + \frac{1}{M} [\theta(k) - \bar{\theta}(k-1)] \quad (8)$$

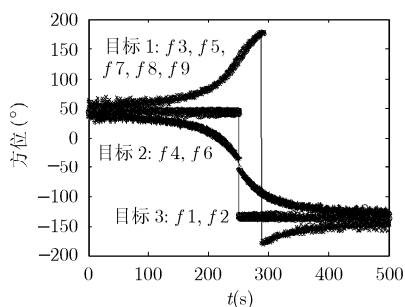


图 3 线谱与多目标的关联

初始值 $\bar{\theta}(0) = \theta(0)$, M 为参与滤波的样本点数。

提取一个目标所有的线谱后, 对剩余的线谱重复上述处理, 直到所有线谱都与相应目标关联, 这样最终辨识出了 1, 2, 3 三个目标。在 3 个目标的 9 条线谱中, 最稳定线谱是第 3 条 (f_3), 与它的方位估计相差 $\Delta\theta$ 的线谱有 f_5, f_7, f_8 及 f_9 , 它们都属于目标 1, 如图 3 所示; 在剩余的线谱中, 最稳定的是目标 2 的 f_4 , 与它的方位估计差别小于 $\Delta\theta$ 的线谱有 f_6 ; 最后余下的 f_1 与 f_2 同属目标 3。各目标在记录起始点与结束点即最远距离时线谱的信噪比约 20 dB 左右, 3 个目标之间的最小夹角是 10° 。此时各线谱方位历程完全混叠, 无法区分。

以上对每个目标都检测到多条线谱, 而每条线谱对应的方位由于不同线谱的信噪比不同而有差异, 这从图 3 中各组线谱方位展宽可以看出。从多条线谱的方位得到目标的方位有两种方式: 一是对各条线谱的方位求平均, 这在方位估计误差随机分布时效果较好; 另一种方式是把最强或最稳定线谱的方位作为目标的方位, 这种方式受噪声干扰可能产生较大偏差。本文采用第 1 种方式, 得到 3 个目标的时间方位历程如图 4 所示, 背景细线是设定的目标真实航迹。可见, 在目标之间夹角较大时, 3 个目标分辨较好; 夹角较小时, 分辨效果比图 3 也有明显改善。但在夹角较小的航迹起始与结束附近, 由于噪声干扰, 多目标分辨仍不够清晰, 需要采用滤波算法处理。

对多目标的方位估计进行滤波处理, 不但可以减小估计误差, 提高多目标分辨能力, 而且可以用于目标定位跟踪。滤波处理通常用卡尔曼滤波算法, 考虑到系统对复杂性的限制, 本文采用较为简单的 α 滤波, 结果如图 5 所示。与图 4 相比, 在起始点与终点的小夹角处 3 个目标可以非常清晰地分辨开来, 其代价是在航迹转折点处由于滤波平均引起航迹失真。仿真分析还表明, 如果线谱的信噪比降低到 10 dB 左右, 不能分辨间隔 10° 的 3 个目标, 但可以分辨间隔 15° 的多目标, 以上结果与式(7)的理

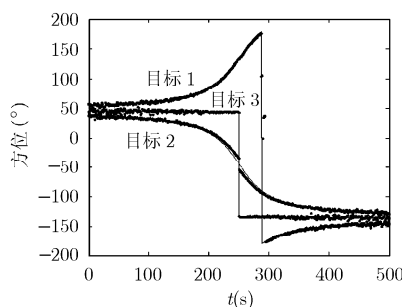


图 4 多目标的平均方位

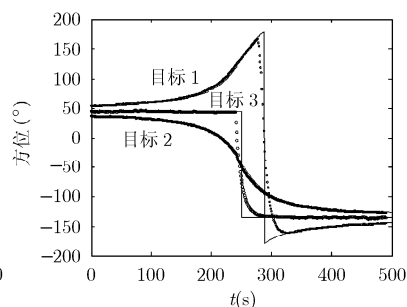


图 5 滤波后的时间方位历程

论分析大致相符。

5 结束语

本文根据矢量水听器的低频测向能力, 利用多目标辐射线谱对应方位的分析实现了线谱与目标的关联, 通过 α 滤波减少了环境噪声与多目标相互之间的干扰, 获得了清晰可以分辨的多目标航迹。在本文实测舰船噪声数据仿真条件下, 采用单个矢量水听器, 能够分辨相互间隔 10° 的 3 个目标。本文方法相对于复杂的多目标高分辨算法, 简单有效, 但在多径信道条件下的应用仍需进一步研究。

参考文献

- [1] 张怀银, 张林让, 吴顺君等. 最小范数准则在多目标 DOA 跟踪中的应用. 电子与信息学报, 2009, 31(2): 279-282.
Zhang Huai-yin, Zhang Lin-rang, and Wu Shun-jun, *et al.* Tracking DOA of multiple targets based on a matrix norm minimization technique. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, 31(2): 279-282.
- [2] 杨士莪. 单矢量传感器多目标分辨的一种方法. 哈尔滨工程大学学报, 2003, 24(6): 591-595.
Yang Shi-e. Method of multi-sources distinguishing by single vector transducer. *Journal of Harbin Engineering University*, 2003, 24(6): 591-595.
- [3] 王逸林, 蔡平, 许丹丹. 应用希尔伯特黄变换的单矢量传感器多目标分辨研究. 声学技术, 2006, 25(4): 376-380.
Wang Yi-lin, Cai Ping, and Xu Dan-dan. Separation of multiple targets using a single vector sensor based on Hilbert-Huang transform. *Technical Acoustics*, 2006, 25(4): 376-380.
- [4] 孙贵青, 杨德森, 张揽月. 基于矢量水听器的水下目标低频辐射噪声测量方法研究. 声学学报, 2002, 27(5): 429-434.
Sun Gui-qing, Yang De-sen, and Zhang Lan-yue. Research on the method for measuring radiated noise by an underwater target in low frequency band based on the vector hydrophone. *Acta Acustica*, 2002, 27(5): 429-434.
- [5] 陈韶华, 相敬林, 石杰等. 三轴四基元非典型声强向量阵对声源定向的理论与实验研究. 电子与信息学报, 2007, 29(5): 1045-1049.
Chen Shao-hua, Xiang Jing-lin, and Shi Jie, *et al.* Theoretical and experimental exploration on two-dimensional DOA estimation for low frequency sound source with non-typical vector acoustic intensity array. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2007, 29(5): 1045-1049.
- [6] 陈韶华, 相敬林, 梁峰等. 声强向量阵的波束形成与检测原理研究. 西北工业大学学报, 2007, 25(2): 301-305.
Chen Shao-hua, Xiang Jing-lin, and Liang Feng, *et al.* Supergain beamforming and improved signal processing for making signal detection easy with vector acoustic intensity array. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2007, 25(2): 301-305.
- [7] Nielsen R. O. Sonar Signal Processing [M]. Norwood, MA: Artech House, 1991, Chap.4.
- [8] 吴国清, 李靖, 陈耀明等. 舰船噪声识别(II)——线谱稳定性和唯一性[J]. 声学学报, 1999, 24(1): 6-11.
Wu Guo-qing, Li Jing, and Chen Yao-ming, *et al.* Ship radiated-noise recognition(II) — stability and uniqueness of line spectrum. *Acta Acustica*, 1999, 24(1): 6-11.
- [9] 赵树杰. 统计信号处理——检测理论、估计与滤波理论及其应用. 西安: 西北电讯工程学院出版社, 1986, 第 8 章.
Zhao Shu-jie. Statistical Signal Processing — Detection, Estimation, and Filtering. Xi'an: Xi Dian University Press, 1986, Chap. 8.

陈韶华: 男, 1978 年生, 博士, 研究方向为水声信号处理。

陈川: 男, 1968 年生, 博士生, 研究员, 研究方向为水下声系统。

郑伟: 男, 1976 年生, 高级工程师, 研究方向为水声换能器。