引用格式: 陈阳, 王锦霞, 余赟. 局部置信度增强的单矢量水听器互谱方位直方图[J]. 声学技术, 2022, 41(4): 608-612. [CHEN Yang, WANG Jinxia, YU Yun. Local confidence level enhanced cross-spectral DOA histogram of single vector hydrophone[J]. Technical Acoustics, 2022, 41 (4): 608-612.] DOI: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2022.04.019

局部置信度增强的单矢量水听器互谱方位直方图

陈阳¹, 王锦霞¹, 余 赟² (1. 常州大学微电子与控制工程学院, 江苏常州 213164; 2. 中国人民解放军海军研究院, 北京 100161)

摘要:单矢量水听器互谱方位直方图具有一定的多目标分辨能力,但其性能受到目标信号分离正交性(Window Disjoint Orthogonality, WDO)的制约。WDO特性越强,表示主导目标的能量占比越大,互谱方位估计的结果越接近主导 目标的真实方位。文章提出利用局部置信度增强互谱方位直方图的多目标分辨性能。局部置信度表示样本中主成分 与其他成分之间的比值关系,因此可以作为信号WDO特性强弱的估计。在统计互谱方位直方图时,利用局部置信 度对时频点的方位估计结果进行加权,增加WDO特性强的时频点的方位估计结果在方位直方图中的贡献,提高目 标真实方位处的谱峰,从而增强方位直方图多目标分辨的效果。湖试数据的分析表明了利用局部置信度加权能够有 效提高多目标分辨的效果。

关键词: 矢量水听器: 多目标分辨: 分离正交性: 局部置信度 中图分类号: TB56 文献标志码: A 文章编号:1000-3630(2022)-04-0608-05

Local confidence level enhanced cross-spectral DOA histogram of single vector hydrophone

CHEN Yang¹, WANG Jinxia¹, YU Yun²

(1. School of Microelectronics and Control Engineering of Changzhou University, Changzhou 213164, Jiangsu, China;

2. Naval Research Academy of PLA, Beijing 100161, China)

Abstract: The cross spectral DOA histogram obtained by a single vector hydrophone can distinguish multi-targets to a certain extent. However, its performance depends on the window disjoint orthogonality (WDO) of target signals. The WDO indicates the proportion of the dominant signal in the total signals. The stronger the WDO, the closer the estimation of the cross spectral DOA histogram is to the real DOA of the dominant target. In this paper, local confidence level is used to enhance the cross spectral DOA histogram for multi-target resolution. Local confidence level represents the proportion of the principal component in the total components, so it can be used as an estimate of WDO. In counting cross spectral DOA histogram, the DOA estimation results at time-frequency points are weighted by local confidence levels to enhance the contribution of the DOA estimation results at the time-frequency points with strong WDO, so that the spectral peaks near the real DOAs of the targets are increased, and the multi-target resolution is improved. The analysis of lake trial data confirms the availability of local confidence weighting in improving multitarget resolution performance.

Key words: vector hydrophone; multi target resolution; window disjoint orthogonality (WDO); local confidence level

引言 0

矢量水听器同时共点拾取声场的声压与振速信 息[1-2],单个传感器即可实现空域滤波[3]、目标方位 估计^[4],同时具有抗各向同性噪声干扰的能力^[5]。 因此矢量水听器在水下目标的探测、跟踪和通信中 得到了广泛应用[6-7]。

基于矢量水听器的目标测向方法包括平均声强 器、声强流方位直方图、互谱方位直方图等[8],也 可将矢量水听器看作是多通道阵列进行处理⁹⁹,每 种算法各有优缺点。其中直方图算法较其他算法具 有良好的鲁棒性,并具有抑制窄带和强线谱干扰的 能力以及一定程度的多目标分辨能力,广泛应用在 工程中[10-11]。文献[8]利用基于声强流的方位直方图 实现目标方位估计,并利用线谱加权方位直方图实 现了多个线谱目标的分辨与方位估计。文献[12-13] 利用方位直方图在时频域和Huang变换的瞬时频率 域实现了多个宽带目标的分辨与方位估计。文献 [14]在基于Argo浮标平台的矢量水听器海试实验中

收稿日期: 2021-04-01; 修回日期: 2021-04-20

作者简介:陈阳(1982一),男,江苏常州人,博士研究生,研究方 向为水声信号处理。

通信作者: 王锦霞, E-mail: wangjxjk@163.com

也发现了方位直方图可以分辨相邻间隔约80°的试验船和工程船两个宽带目标。文献[15]进一步引入目标信号的加窗分离正交性解释了方位直方图分辨宽带多目标的机理。

舰船的辐射噪声的成分非常复杂,包括线谱、 平稳的各态历经的随机信号,还有瞬变信号[16]。因 此从宏观上看是宽带噪声,在任意时刻任意频率均 有能量分布。但从微观上看,在某些时频点能量会 比较强,而在另外一些时频点内能量较弱,这就导 致多个目标信号在传感器接收端合成时,某些时频 点上不同目标的能量可能存在显著差异,某个目标 信号占据主导作用。这一现象被称为信号的分离正 交性(Window Disjoint Orthogonality, WDO)。分离 正交性在信号盲分离中被广泛应用于多目标分辨与 分离[17-18]。某时频点内信号的WDO特性越高,即 主导信号能量较其他信号能量之和越大,此时频点 的方位估计结果将越偏向于该主导信号的目标方 位。当相当一部分时频点具有这样的特性时,各目 标方位真值附近聚集了相当多的方位估计样本,在 方位直方图中形成谱峰,从而实现方位直方图的多 目标分辨。WDO特性是目标信号的固有特性,随 着目标数量的增加,目标信号的WDO特性随之减 弱,限制了方位直方图的多目标分辨性能。

本文提出利用信号的局部置信度增强互谱方位 直方图的多目标分辨性能。局部置信度表示样本中 主成分与其他成分之间的比值关系,因此可以作为 信号WDO特性强弱的估计。利用每个时频点的局 部置信度对其方位估计结果进行加权,从而增强那 些WDO特性高的时频点的方位估计结果在方位直 方图中的贡献,提高目标真实方位处的谱峰,从而 增强方位直方图多目标分辨的效果。湖试实验数据 的分析结果验证了该方法的有效性。

1 单矢量水听器模型与互谱方位直 方图

矢量水听器的输出包含声场的声压和振速信息。水平自由声场中二维矢量水听器输出信号模型 表示为

$$\mathbf{y}(t) = \begin{bmatrix} p(t) \\ v_x(t) \\ v_y(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{n=1}^N x_n(t) + n_p(t) \\ \sum_{n=1}^N x_n(t) \cos \alpha_n + n_x(t) \\ \sum_{n=1}^N x_n(t) \sin \alpha_n + n_y(t) \end{bmatrix} = \sum_{n=1}^N x_n(t) \begin{bmatrix} 1 \\ \cos \alpha_n \\ \sin \alpha_n \end{bmatrix} + \mathbf{e}(t)$$
(1)

式中: N表示声源数量; $x_n(t)$ 表示第n个声源辐射 到矢量水听器的信号; α_n 表示第n个声源相对于矢 量 水 听 器 的 角 度 (x 轴 为 0° 方 位); e(t) = $\left[n_p(t) \quad n_x(t) \quad n_y(t)\right]^{\mathsf{T}}$ 为声压和振速通道的噪声 向量。

对式(1)进行短时傅里叶变换,则矢量水听器 模型在频域中可表示为

$$\boldsymbol{Y}(\boldsymbol{\omega}, \boldsymbol{m}) = \begin{bmatrix} P(\boldsymbol{\omega}, \boldsymbol{m}) \\ V_{\boldsymbol{x}}(\boldsymbol{\omega}, \boldsymbol{m}) \\ V_{\boldsymbol{y}}(\boldsymbol{\omega}, \boldsymbol{m}) \end{bmatrix} = \sum_{n=1}^{N} X_{n}(\boldsymbol{\omega}, \boldsymbol{m}) \begin{bmatrix} 1 \\ \cos \alpha_{n} \\ \sin \alpha_{n} \end{bmatrix} + \boldsymbol{E}(\boldsymbol{\omega}, \boldsymbol{m})$$
(2)

其中: $\omega \pi m \beta$ 别表示离散频率和离散时间坐标。 $P(\omega,m), V_x(\omega,m), V_y(\omega,m), X_n(\omega,m) \pi E(\omega,m)$ 分别是 $p(t), v_x(t), v_y(t), x_n(t) \pi e(t)$ 的短时傅 里叶变换。每个时频点的方位估计可由式(3) 获得:

$$\theta(\omega, m) = \left\{ \angle \mathbf{Re} \Big[P(\omega, m) V_x^*(\omega, m) \Big] + j \cdot \mathbf{Re} \Big[P(\omega, m) V_y^*(\omega, m) \Big] \right\}$$
(3)

其中: \angle 表示相角, $V_x^*(\omega, m)$ 和 $V_y^*(\omega, m)$ 分别表示 $V_x(\omega, m)$ 和 $V_y(\omega, m)$ 的复共轭。利用方位直方图统 计所有时频点的方位估计结果,得到矢量水听器的 互谱方位直方图。假设直方图统计时的方位间隔为 $\Delta\theta$,统计[$\theta - \Delta\theta/2, \theta + \Delta\theta/2$]区间内的方位估计结果 数量: 当 $\theta - \Delta\theta/2 < \theta(\omega, m) \le \theta + \Delta\theta/2$ 时,相应位置 的直方图的幅值加1,即 $h(\theta) = h(\theta) + 1$ 。

2 局部置信度与增强的互谱方位直 方图

对于时频域内某个时频点 (ω,m) ,定义其周 围的矩形区域 $\Omega_{\omega,m}$,长和宽分别为 l_m 和 l_ω 个时频 点。利用 $\Omega_{\omega,m}$ 区域内的快拍估计频点 (ω,m) 的局 部置信度 $\Gamma(\Omega_{\omega,m})$,如图1所示。局部置信度 $\Gamma(\Omega_{\omega,m})$ 反映了主导目标在时频点 (ω,m) 的主导地 位的强弱。利用主成分分析计算局部置信度 $\Gamma(\Omega_{\omega,m})^{[19]}$ 。

利用 $\Omega_{\omega,m}$ 区域内的所有快拍 $x(\omega,m)$,构造一个半正定的复埃尔米特(Hermitian)矩阵:

$$R(\omega, m) = \sum_{\omega, v \in \Omega_{m,m}} x(\omega, v) x^{H}(\omega, v)$$
(4)

对 $R(\omega,m)$ 进行特征分解,得到三个正的实数 特征向量,按照降序排列记为 $\lambda_1(\omega,m) > \lambda_2(\omega,m) >$



图1 时频域内各时频点 (ω, m) 和其周围的矩形区域 $\Omega_{\omega,m}$

Fig.1 Time-frequency point (ω, m) and the surrounding rectangle area $\Omega_{\omega,m}$

 $\lambda_3(\omega,m)$,则频点 (ω,m) 的局部置信度表示为

$$\Gamma\left(\Omega_{\omega,m}\right) = \frac{2\lambda_1(\omega,m)}{\lambda_2(\omega,m) + \lambda_3(\omega,m)} \tag{5}$$

可见,如果时频点内只有主导目标,则 $\Gamma(\Omega_{a,m})$ 达到最大值,当区域内存在其他目标时, $\Gamma(\Omega_{a,m})$ 随之减小。

用局部置信度对互谱方位直方图进行增强,原 方位直方图统计时,每个样本密度为1,局部置信 度加权的方位直方图,其样本密度为 $\Gamma(\Omega_{o,m})$,即:

$$H(\theta) = H(\theta) + \Gamma(\Omega_{am}) \tag{6}$$

主导目标能量占比越大的时频点其方位越接近 主导目标的真实值,同时其局部置信度*Γ*(*Ω*_{ω,m})也 越大。因此,在增强的互谱直方图中,越接近主导 目标真实方位的方位估计样本,在统计中的贡献度 越大,反之则越小。因而主导目标真实方位处的谱 峰得到增强变得更加明显,从而提高了互谱方位直 方图的目标分辨性能。

3 湖试数据分析

湖试数据是2009年在松花湖采集。试验采用 二维同振式矢量水听器,振速通道的灵敏度按 -6 dB·oct¹的斜率随频率升高递减,并且振速通道 与声压通道存在90°相位差。二维矢量水听器刚性 固定于测量船舷侧水下约4 m上。远处0.5~1 km距 离处有四艘小船(游船)作为四个目标,数据开始时 刻初始方位大致为40°、140°、210°和330°。采样率 48 kHz,FFT 窗长 8 192 点,工作频段0.5~8 kHz, 方位直方图积分长度1 s(6个FFT长度),滑动步长 为8 192 点(1个FFT长度),矩形区域取 *l_m*=*l*_o=3。 两振速通道的信号经FFT 后在频域按照灵敏度的斜 率和相位进行补偿。进而计算互谱方位直方图。 图2为水听器互谱方位直方图,可以看到整个 视野内有4个目标,图中在横坐标处分别标为①、 ②、③、④。随着时间的推移,目标3和目标4的 方位逐渐接近,因此两目标的谱峰的分辨性逐渐变 差。由于船只减速或停机时的目标信号减弱,目标 1和2在38s附近、目标3在40~50s时间段,目标4 在32s附近及48s之后的时间段,方位直方图中的 谱峰减弱甚至被背景淹没,目标历程有明显的间 断。图3为局部置信度增强的互谱方位直方图,可 以看到目标3的历程明显增强,其他目标的历程也 有所增强,目标的区分度更高,方位历程更清晰, 目标的分辨性和历程的连续性被提高。











图 2、3 中, (a)、(b)、(c)、(d)对应的时间分别为6.2867、12.288、20.48及34.1333 s。

图4为不同时刻互谱方位直方图与增强互谱方 位直方图对比,分别对应图2和图3中的(a)、(b)、 (c)、(d)四个时刻,可以看到目标的谱峰均被增强 而更为凸显,增强互谱方位直方图的分辨性能明显 优于互谱方位直方图。



图4 不同时刻互谱方位直方图与增强互谱方位直方图的目标 分辨性能对比

Fig.4 Comparison of the cross-spectral DOA histogram and the local confidence level enhanced cross-spectral DOA histogram at different times

4 结论

本文提出了利用信号的局部置信度来增强互谱 方位直方图的多目标分辨性能。利用每个时频点附 近区域的快拍构造协方差矩阵,并进行主成分分 析,利用特征值计算该时频点信号的局部置信度。 在统计互谱方位直方图时,利用局部置信度对该时 频点的方位估计结果进行加权,WDO特性高的时 频点得到的方位估计结果更接近目标的真实方位, 增加这些点的估计结果在方位直方图中的贡献,提 高目标真实方位处的谱峰,从而增强方位直方图多 目标分辨的效果。湖试数据的分析结果表明,利用 局部置信度可以有效地增强互谱直方图中目标方位 处的谱峰,从而提高多目标分辨的效果。

参考文献

- 杨德森,朱中锐,田迎泽.矢量声呐技术理论基础及应用发展 趋势[J].水下无人系统学报,2018,26(3):185-192.
 YANG Desen, ZHU Zhongrui, TIAN Yingze. Theoretical bases and application development trend of vector sonar technology[J]. Journal of Unmanned Undersea Systems, 2018, 26(3): 185-192.
- [2] 孙芹东,张小川,韩梅,等.面向水下滑翔机平台的耐压复合同 振式矢量水听器[J]. 兵工学报, 2020, 41(10): 2063-2070. SUN Qindong, ZHANG Xiaochuan, HAN Mei, et al. Combined pressure-resistant co-vibrating vector hydrophone for underwater glider platform[J]. Acta Armamentarii, 2020, 41(10): 2063-2070.
- [3] FELISBERTO P, SANTOS P, JESUS S M. Acoustic pressure and particle velocity for spatial filtering of bottom arrivals[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2019, 44(1): 179-192.
- [4] SONG Y, WONG K T. Three-dimensional localization of a near-field emitter of unknown spectrum, using an acoustic vector sensor corrupted by additive noise of unknown spectrum
 [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2013, 49(2): 1035-1041.
- [5] 姚直象.单矢量水听器信号处理研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程 大学,2005.

YAO Zhixiang. Research on signal processing based on single vector hydrophone[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2005.

- [6] STINCO P, TESEI A, FERRI G, et al. Passive acoustic signal processing at low frequency with a 3-D acoustic vector sensor hosted on a buoyancy glider[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2021, 46(1): 283-293.
- [7] SONG A J, ABDI A, BADIEY M, et al. Experimental demonstration of underwater acoustic communication by vector sensors[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2011, 36(3): 454-461.
- [8] 姚直象, 惠俊英, 殷敬伟, 等. 基于单矢量水听器四种方位估计 方法[J]. 海洋工程, 2006, 24(1): 122-127, 131.
 YAO Zhixiang, HUI Junying, YIN Jingwei, et al. Four approaches to DOA estimation based on a single vector hydrophone[J]. The Ocean Engineering, 2006, 24(1): 122-127, 131.
- [9] AGARWAL A, AGRAWAL M, KUMAR A. Higher-order-

statistics-based direction-of-arrival estimation of multiple wideband sources with single acoustic vector sensor[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2020, **45**(4): 1439-1449.

- [10] 王文龙, 王超, 韩梅, 等. 矢量水听器在水下滑翔机上的应用研究[J]. 兵工学报, 2019, 40(12): 2580-2586.
 WANG Wenlong, WANG Chao, HAN Mei, et al. Research on application of vector hydrophone onboard an underwater glider[J]. Acta Armamentarii, 2019, 40(12): 2580-2586.
- [11] 王超, 孙芹东, 张林, 等. 南中国海"G-Argo"声学浮标目标探测 能力分析[J]. 应用声学, 2019, 38(6): 1025-1032.
 WANG Chao, SUN Qindong, ZHANG Lin, et al. Analysis of target detection capability of "G-Argo" acoustic buoy in South China Sea[J]. Journal of Applied Acoustics, 2019, 38(6): 1025-1032.
- [12] 王逸林.希尔伯特黄变换在矢量信号处理中的应用研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2006.
 WANG Yilin. Research on the application of Hilbert-Huang transformation to vector signal processing[D]. Harbin: Harbin
- Engineering University, 2006. [13] 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[J]. 声学技术, 2006, 25(4): 376-380. WANG Yilin, CAI Ping, XU Dandan. Separation of multiple targets using a single vector sensor based on Hilbert-Huang transform[J]. Technical Acoustics, 2006, 25(4): 376-380.
- [14] 孙芹东, 王超, 张小川, 等. 二维矢量水听器及其在 Argo 浮标平 台上的应用技术[J]. 兵工学报, 2020, 41(8): 1566-1572.

SUN Qindong, WANG Chao, ZHANG Xiaochuan, et al. Two-dimensional vector hydrophone and its application in Argo buoy platform[J]. Acta Armamentarii, 2020, **41**(8): 1566-1572.

- [15] CHEN Y, WANG J X, YU Y, et al. The W-disjoint orthogonality of underwater acoustic signals and underdetermined source counting for acoustic vector sensor[C]//2019 IEEE International Conference on Signal, Information and Data Processing. Chongqing, China. IEEE, 2019: 1-4.
- [16] 韩雪, 朴胜春, 付金山. 舰船辐射噪声听觉节奏的时变响度特征提取[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2020, 41(4): 487-492.
 HAN Xue, PIAO Shengchun, FU Jinshan. Time-varying loudness feature extraction of the audition rhythm of ship radiation noise[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2020, 41(4): 487-492.
- [17] RICKARD S. The DUET Blind Source Separation Algorithm [M]//Blind Speech Separation, c2007:217-241.
- [18] SGOUROS T, MITIANOUDIS N. A novel directional framework for source counting and source separation in instantaneous underdetermined audio mixtures[J]. IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing, 2020, 28: 2025-2035.
- [19] ARBERET S, GRIBONVAL R, BIMBOT F. A robust method to count and locate audio sources in a multichannel underdetermined mixture[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2010, 58(1): 121-133.