

矢量水听器阵列宽带相干信号方位估计研究

张忠波, 梁中明

(中国船舶重工集团有限公司第七一〇研究所, 湖北 宜昌 443003)

摘要 针对多径条件下相干声源方位估计问题, 研究了矢量水听器阵列信号方位估计的 MUSIC 与 ESPRIT 方法, 并通过空间重采样推广到宽带信号方位估计中。实船噪声的计算机仿真表明: 6 元矢量水听器阵列可以分辨空间间隔不大于 15° 的 2 个目标, 并可利用相干信号子空间方法解相干源, 在声引信多目标分辨中有应用前景。

关键词 方位估计; 高分辨; 矢量水听器阵; MUSIC; ESPRIT

中图分类号 TN911.7; TB566 **文献标识码** A **文章编号** 2096-5753(2021)04-0318-05

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2021.04.010

Bearing Estimation on Broadband Coherent Signal with Acoustic Vector Sensor Array

ZHANG Zhongbo, LIANG Zhongming

(No. 710 R&D Institute, CSIC, Yichang 443003, China)

Abstract Aiming at the problem of high resolution bearing estimation on broadband coherent signal in case of multipath condition, this paper has studied the method of MUSIC and ESPRIT with acoustic vector sensor array. By adopting the spatial resampling method, the bearing estimation of spatial coherent signals can be resolved. Simulation with field measured ship-radiated noise shows that, two targets separated no less than 15° can be resolved with a 6-element acoustic vector sensor array, though they are spatially coherent, which has good application prospect in fuse multi-target resolution.

Key words bearing estimation; high resolution; acoustic vector sensor array; MUSIC; ESPRIT

0 引言

在阵列信号处理中, 经常遇到相干源的情况, 如水声信道中的多径传播^[1-2]。阵列信号的常规波束形成技术, 具有简单、稳健与可解多个相干信号源的优点, 但也存在分辨率较低的缺点^[3-4]。而高分辨方位估计技术可以突破瑞利限, 区分在空间上相隔较近的多个声源^[3]。声矢量水听器阵与声压阵比较, 可以抗左右舷模糊, 因可以抑制各向同性噪声而具有更高分辨率, 且还具有一些其它的独特优点。

在水声目标探测中, 目标辐射或反射的大多是宽带信号。这是因为宽带信号含有更为丰富的目标信息, 有利于目标参数估计^[6-7]。本文研究矢量水听器阵列宽带 MUSIC 与 ESPRIT 等高分辨方位估计技术, 采用空间平滑解相干源, 最后通过仿真分析比较它们的性能。

1 矢量水听器阵列信号处理基础^[8-10]

考虑 M 元三维矢量水听器阵, 第 m 个阵元接收到的声压振速可写成一个 4 元列向量如下

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_m(t) &= [p_m(t), v_{xm}(t), v_{ym}(t), v_{zm}(t)]^T \\ &= \sum_{k=1}^K s_k(t - \tau_{m,k}) \mathbf{u}(\boldsymbol{\theta}_k) + \mathbf{n}_{pvm}(t) \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $s_k(t)$ 是参考阵元接收到的第 k 个目标信号; $\tau_{m,k}$ 是 m 阵元接收的第 k 个信号相对于参考阵元的延迟; $\mathbf{u}(\boldsymbol{\theta}_k) = [1, \sin \theta_k \cos \varphi_k, \sin \theta_k \sin \varphi_k, \cos \theta_k]^T$ 是包含 1 个声压传感器与 3 个相互正交振速传感器的矢量水听器的阵列流形向量, $\boldsymbol{\theta}_k = [\theta_k, \varphi_k]^T$ 是第 k 个目标入射方向矢量, 包含其方位角与俯仰角; $\mathbf{n}_{pvm}(t) = [n_m(t), n_{xm}(t), n_{ym}(t), n_{zm}(t)]^T$ 是声压与振速传感器上接收的噪声。

对于宽带信号, 首先用 FFT 把式 (1) 的接收信号变换到频域, 把 M 个阵元输出的子带信号写成 $4M \times 1$ 的列向量

$$\mathbf{X}(f) = \mathbf{A}(f, \boldsymbol{\theta}) \mathbf{S}(f) + \mathbf{N}_{pv}(f) \quad (2)$$

式中, $\mathbf{A}(f, \boldsymbol{\theta}) = [\mathbf{a}(f, \boldsymbol{\theta}_1), \dots, \mathbf{a}(f, \boldsymbol{\theta}_K)] = [\mathbf{a}_p(f, \boldsymbol{\theta}_1) \otimes \mathbf{u}(\boldsymbol{\theta}_1), \dots, \mathbf{a}_p(f, \boldsymbol{\theta}_K) \otimes \mathbf{u}(\boldsymbol{\theta}_K)]$ 。其中, \otimes 是 Kronecker 直积, $\mathbf{a}_p(f, \boldsymbol{\theta}_k) = [e^{-j2\pi f \tau_{1,k}}, \dots, e^{-j2\pi f \tau_{M,k}}]^T$ 。

频率成分 f 的窄带信号输出协方差矩阵可写为

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_x(f) &= \mathbb{E}[\mathbf{X}(f) \mathbf{X}^H(f)] = \mathbf{A} \mathbb{E}[\mathbf{S}(f) \mathbf{S}^H(f)] \mathbf{A}^H + \\ &\mathbb{E}[\mathbf{N}_{pv}(f) \mathbf{N}_{pv}^H(f)] = \mathbf{A} \mathbf{R}_s(f) \mathbf{A}^H + \sigma_n^2 \mathbf{I}_v \end{aligned} \quad (3)$$

式中: $\mathbf{I}_v = \mathbf{I}_M \otimes \mathbf{u}_n$, $\mathbf{u}_n = \text{diag}[1/3, 1/3, 1/3]$ 是一个对角矩阵; σ_n^2 是噪声功率。

高分辨方位估计的核心思想是对阵列输出协方差矩阵分解为信号子空间与噪声子空间。在一定条件下, 信号子空间惟一确定信号波达方向, 并可通过数值稳定的奇异值分解精确定向。

2 MUSIC 方法^[5,10]

多重信号分类法 (multiple signal classification, MUSIC) 是 Schmidt 于 1979 年提出的, 它基于阵列输出协方差矩阵的信号子空间与噪声子空间正交的原理。

对协方差矩阵 \mathbf{R}_p 进行特征分解

$$\mathbf{R}_p = \mathbf{A}_p \mathbf{R}_s \mathbf{A}_p^H + \sigma_n^2 \mathbf{I}_M = \mathbf{U}_s \boldsymbol{\Sigma}_s \mathbf{U}_s^H + \mathbf{U}_n \boldsymbol{\Sigma}_n \mathbf{U}_n^H \quad (4)$$

式中: 假定 \mathbf{R}_p 满秩, 对角矩阵 $\boldsymbol{\Sigma}_s$ 含有 K 个大的特

征值, $\boldsymbol{\Sigma}_n$ 含有 $M-K$ 个小的特征值, 且这些小特征值都等于噪声方差 σ_n^2 。

分析表明: 矩阵 \mathbf{A}_p 的各列 \mathbf{a}_p 与噪声空间正交, 故有

$$\mathbf{U}_n^H \mathbf{a}_p(\boldsymbol{\theta}) = 0 \quad (5)$$

于是, 得到空间谱

$$P_{\text{MUSIC}}(\boldsymbol{\theta}) = \frac{\mathbf{a}_p^H(\boldsymbol{\theta}) \mathbf{a}_p(\boldsymbol{\theta})}{\mathbf{a}_p^H(\boldsymbol{\theta}) \mathbf{U}_n \mathbf{U}_n^H \mathbf{a}_p(\boldsymbol{\theta})} \quad (6)$$

用矢量水听器阵列输出协方差矩阵 \mathbf{R}_x 代替 \mathbf{R}_p 进行特征分解得到噪声特征向量 \mathbf{U}'_n , 并用矢量水听器阵列的阵列流形向量 \mathbf{a} 代替 \mathbf{a}_p , 得到矢量水听器阵列波束形成的 MUSIC 空间谱

$$P'_{\text{MUSIC}}(\boldsymbol{\theta}) = \frac{\mathbf{a}^H(\boldsymbol{\theta}) \mathbf{a}(\boldsymbol{\theta})}{\mathbf{a}^H(\boldsymbol{\theta}) \mathbf{U}'_n \mathbf{U}'_n^H \mathbf{a}(\boldsymbol{\theta})} \quad (7)$$

3 任意矢量水听器阵列的 ESPRIT 法

对于声压阵的 ESPRIT 方法只适用于等距线阵, 因为只有等距线阵才能构造 2 个结构相同的子阵。对于矢量水听器阵列, 可适用于任意阵, 这是因为矢量水听器声压振速之间所固有的相位偏转关系, 并因此而不会产生其它方法可能产生的频率模糊。

3.1 矢量水听器阵列的基本 ESPRIT 法^[11]

从矢量阵声压与振速关系得到

$$\tilde{\mathbf{p}}(t) = \mathbf{A}_p(\boldsymbol{\theta}) \tilde{\mathbf{s}}(t) + \tilde{\mathbf{n}}_p(t) \quad (8)$$

$$\tilde{\mathbf{v}}_x(t) = \mathbf{A}_p(\boldsymbol{\theta}) \boldsymbol{\Phi}_x \tilde{\mathbf{s}}(t) + \tilde{\mathbf{n}}_x(t) \quad (9)$$

$$\tilde{\mathbf{v}}_y(t) = \mathbf{A}_p(\boldsymbol{\theta}) \boldsymbol{\Phi}_y \tilde{\mathbf{s}}(t) + \tilde{\mathbf{n}}_y(t) \quad (10)$$

其中,

$$\boldsymbol{\Phi}_x = \text{diag}(\sin \theta_1 \cos \varphi_1, \dots, \sin \theta_K \cos \varphi_K) \quad (11)$$

$$\boldsymbol{\Phi}_y = \text{diag}(\sin \theta_1 \sin \varphi_1, \dots, \sin \theta_K \sin \varphi_K) \quad (12)$$

令

$$\tilde{\mathbf{v}}(t) = \tilde{\mathbf{v}}_x(t) + j \tilde{\mathbf{v}}_y(t) = \mathbf{A}_p(\boldsymbol{\theta}) \boldsymbol{\Phi} \tilde{\mathbf{s}}(t) + \tilde{\mathbf{n}}_v(t) \quad (13)$$

其中

$$\boldsymbol{\Phi} = \boldsymbol{\Phi}_x + j \boldsymbol{\Phi}_y,$$

$$\tilde{\mathbf{n}}_v(t) = \tilde{\mathbf{n}}_x(t) + j \tilde{\mathbf{n}}_y(t)$$

可见, 式 (8) 与式 (13) 之间存在相位旋转关系, 可以应用 ESPRIT 法来求解旋转矩阵 $\boldsymbol{\Phi}$, 进

而解出目标波达方向。现将矢量水听器阵列基本的 ESPRIT 算法总结如下。

1) 根据式 (8) 与式 (13) 组成解析声压与振速列向量;

2) 求阵列的声压输出协方差矩阵 \mathbf{R}_{pp} 与声压振速互协方差矩阵 \mathbf{R}_{pv} ;

3) 计算矩阵束 $\{(\mathbf{R}_{pp} - \lambda_{\min} \mathbf{I}_M), \mathbf{R}_{pv}\}$ 的广义特征分解, Φ 是特征值 λ_k ($k=1, \dots, K$) 组成的对角矩阵 (λ_{\min} 是 \mathbf{R}_{pp} 的最小特征值);

4) 由下式解得目标波达方向

$$\varphi_k = \arctan\left(\frac{\text{Im}(\lambda_k)}{\text{Re}(\lambda_k)}\right) \quad (14)$$

$$\theta_k = \arcsin(\text{abs}(\lambda_k)) \quad (15)$$

由于使用的是二维矢量水听器, 俯仰角 θ_k 在 $[0, \pi/2]$ 与 $[\pi/2, \pi]$ 2 个区间上有模糊, 使用三维矢量水听器可以解决此问题。

3.2 矢量水听器阵列的 TLS-ESPRIT 法^[10]

奇异值分解 (SVD) 与总体最小二乘 (TLS) 的应用可将一个较大维数的病态广义特征值问题转化为一个较小维数的无病态广义特征值问题。

声压协方差矩阵的 SVD 分解为

$$\mathbf{R}_{pp} = \mathbf{U}\Sigma\mathbf{V}^H = [\mathbf{U}_1 \quad \mathbf{U}_2] \begin{bmatrix} \Sigma_1 & 0 \\ 0 & \Sigma_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_1^H \\ \mathbf{V}_2^H \end{bmatrix} \quad (16)$$

式中, Σ_1 由 \mathbf{R}_{pp} 的 K 个主奇异值组成。用 \mathbf{U}_1^H 左乘并用 \mathbf{V}_1 右乘矩阵 $\mathbf{R}_{pp} - \lambda \mathbf{R}_{pv}$ 得到

$$\Sigma_1 - \lambda \mathbf{U}_1^H \mathbf{R}_{pv} \mathbf{V}_1 \quad (17)$$

现在, 较大 M 维 $\{\mathbf{R}_{pp}, \mathbf{R}_{pv}\}$ 的广义特征值问题变为较小 K 维 $\{\Sigma_1, \mathbf{U}_1^H \mathbf{R}_{pv} \mathbf{V}_1\}$ 的广义特征值问题, 特征分解得到旋转矩阵 Φ , 由式 (14) - (15) 可得目标波达方向。

以上信号处理是对窄带信号而言的, 对宽带信号处理, 有 2 种方法: 非相干与相干方法。前者在每个子带进行方位估计, 最后把各个子带的估计结果平均。后者的核心思想是聚焦, 即把不同频率上的信号子空间映射到同一个参考频率上, 从而使得最终形成的宽带信号子空间仍可以用低秩模型表

示 (此时秩等于信号源数), 然后使用窄带信号处理方法进行方位估计。

4 宽带相干信号子空间方法

Wang 等证明^[11], 对于带宽内中心频率为 f_j ($j=1, 2, \dots, J$) 的窄子带, 存在聚焦矩阵 $\mathbf{T}(f_j)$, 使得

$$\mathbf{T}(f_j) \mathbf{A}_p(f_j) = \mathbf{A}_p(f_0) \quad (18)$$

式中: f_0 是带宽内选定的某一参考频率; $\mathbf{A}_p(f_j)$ 是中心频率为 f_j 的窄带信号的方向矩阵。

根据聚焦后阵列输出向量 $\mathbf{T}(f_j) \mathbf{P}(f_j)$, 可以得到 J 个窄子带上聚焦平均的协方差矩阵

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{R}}_p &= \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J \mathbf{E}\{\mathbf{T}(f_j) \mathbf{P}(f_j) \mathbf{P}^H(f_j) \mathbf{T}^H(f_j)\} = \\ &\mathbf{A}_p(f_0) \left(\frac{1}{J} \sum_{j=1}^J \mathbf{R}_s(f_j) \right) \mathbf{A}_p^H(f_0) + \frac{\sigma_n^2}{J} \sum_{j=1}^J \mathbf{T}(f_j) \mathbf{T}^H(f_j) \end{aligned} \quad (19)$$

于是可对 $\bar{\mathbf{R}}_p$ 采用特征值分解等窄带高分辨方位估计方法, 可采用空间重采样^[12-13]方法进行宽带聚焦, 它通过调整阵列的空间采样率即阵元的间距而实现宽带聚焦。

M 元声压传感器阵空间重采样对应的聚焦矩阵 $\mathbf{T}(f_j)$ 的第 m 行第 n 列的数据为^[11]

$$\{\mathbf{T}(f_j)\}_{mn} = \frac{\sin\{\phi_j[(m-1)f_0/f_j - (n-1)]\}}{\pi[(m-1)f_0/f_j - (n-1)]}, \quad m, n = 1, 2, \dots, M \quad (20)$$

式中, $\phi_j = \min(\pi, \pi f_j / f_0)$ 。

相干信号子空间处理方法中的宽带聚焦思想, 不仅有效解决了宽带信号的高分辨方位估计问题, 也同时成功地解决了相干源的问题。

业已证明, 矢量水听器阵列的宽带聚焦矩阵与同结构的声压阵的聚焦矩阵的关系为^[9]

$$\mathbf{T}_v(f_j) = \mathbf{T}(f_j) \otimes \mathbf{I}_4 \quad (21)$$

对于二维声矢量水听器, 上式的 \mathbf{I}_4 变为 \mathbf{I}_3 。相干信号子空间方法相对于非相干方法的一个重大优点是只需处理一次阵列协方差矩阵, 因而运算量大幅度减少。

5 实测数据的仿真分析

宽带信号采用实测的船噪声。3 个信号的中心频率均为 500 Hz, 带宽 200 Hz, 方位角分别为 45°、60° 与 85°。其中第 1 个信号由甲船噪声得到 (如图 1), 第 2、第 3 个信号由乙船噪声得到, 这 2 个信号相干。采用相干信号子空间方法, 通过空间重采样得到聚焦矩阵, 聚焦频率为宽带中心频率 500 Hz。采用 6 元线阵, 输入信噪比 5 dB。方位估计值均为 20 次 Monte-Carlo 仿真的结果, 从中可以看出估计结果的偏差与方差性能。图 3 与图 4 分别给出了矢量水听器阵列 MUSIC 空间谱与 TLS-ESPRIT 方位估计结果。作为比较, 图 2 给出了 MVDR 最优波束形成的空间谱。可见, MUSIC 方法的旁瓣低, 分辨率稍高。也可看出, 矢量水听器阵列的所有估计结果均不存在左右舷模糊问题。6 元阵可分辨间隔小于 15° 的 2 个目标, 具有较高的分辨率。仿真结果也证实了采用 CSM 方法可解相干源。

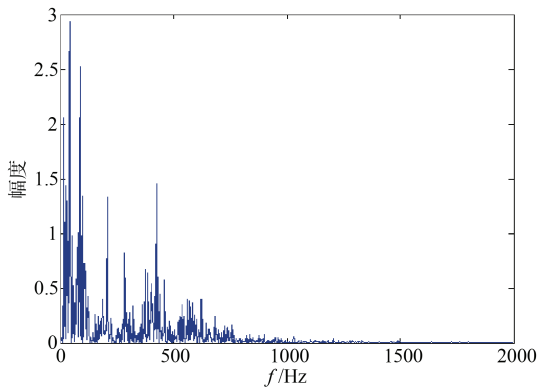


图 1 舰船噪声功率谱
Fig. 1 Power spectrum of ship noise

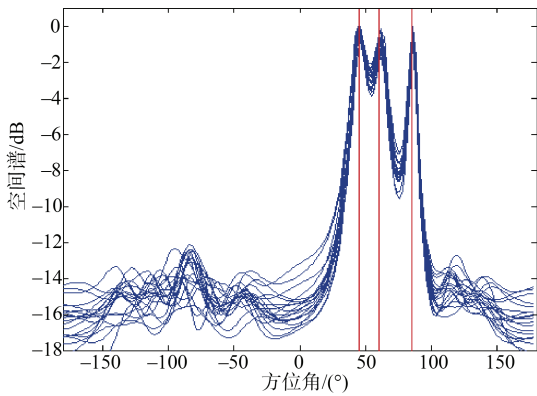


图 2 MVDR 波束形成
Fig. 2 MVDR beamforming

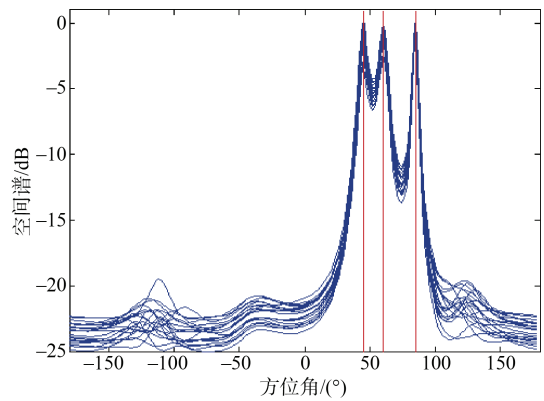


图 3 MUSIC 空间谱
Fig. 3 Spatial spectrum of MUSIC

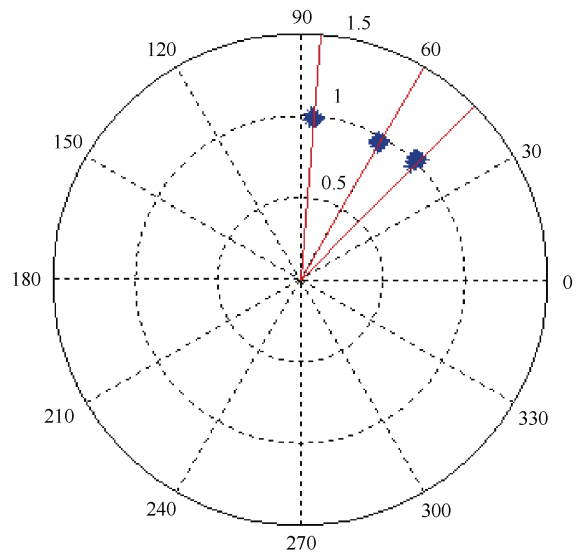


图 4 TLS-ESPRIT 方位估计
Fig. 4 TLS-ESPRIT bearing estimation

6 结束语

本文从理论分析结合应用背景, 研究了矢量水听器阵列条件下高分辨方位估计方法, 着重对 MUSIC 与 ESPRIT 方法进行了对比分析, 并通过空间重采样宽带聚焦方法, 推广应用到宽带信号方位估计。在对实测舰船噪声的仿真实验结果表明, 使用 6 元线阵即可分辨出空间上相隔不大于 15° 的两个目标。其中, ESPRIT 方法相对于 MUSIC 方法, 避免了 MUSIC 方法固有的全空间搜索过程, 运算量相对较小。在实际信号处理应用过程中, 对于宽带相干聚焦方法的一次方位估计的矩阵运算, 只需一次特征分解, 或一次奇异值分解加上广义特

征分解, 计算量远远小于非相干方法的运算量, 具有在水中兵器目标探测与参数估计中具有良好的应用前景。在针对不同的物理场特性条件下, 低信噪比的检测性能略显不足, 后续还需要进一步研究低改进信噪比下的检测性能, 使得本文研究结果在应用中更具健壮性。

参考文献

- [1] 高伟, 王宁, 陈川. 利用船舶噪声的自相关与倒谱联合估计多径时延[J]. 声学学报, 2013, 38(5): 523-532.
- [2] 张贤达, 保铮. 通信信号处理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.
- [3] 刘德树, 罗景青, 张剑云. 空间谱估计及其应用[M]. 北京: 中国科学技术大学出版社, 1997.
- [4] KAY S M. Modern Spectral Estimation: theory and application[M]. India: Pearson India, 1998.
- [5] NEHORAI A, PALDI E. Acoustic vector sensor array processing[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1994, 42(9): 2481-2491.
- [6] (美) 尤利克 R J. 水声原理[M]. 哈尔滨: 哈尔滨船舶工程学院出版社, 1990.
- [7] 陈韶华. 水下自主声探测技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2020.
- [8] 孙贵青, 张春华, 黄海宁, 等. 声矢量传感器线阵的左右舷分辨[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2010, 31(7): 848-855.
- [9] 徐海东. 基于声矢量阵的高分辨率方位估计技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2004.
- [10] 陈华伟, 赵俊渭. 声矢量水听器阵宽带相干信号子空间最优波束形成[J]. 声学学报, 2005, 30(1): 76-82.
- [11] WANG H, KAVEH M. Coherent Signal-Subspace Processing for the Detection and Estimation of Angles of Arrival of Multiple Wideband Sources[J]. IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing, 1985, 33(4): 823-831.
- [12] KROLIK J, SWINGLER D. The detection performance of coherent wideband focusing for a spatially resampled array[C]//International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. US: IEEE, 1990.
- [13] CHEN H, ZHAO J. Coherent signal-subspace processing of acoustic vector sensor array for DOA estimation of wideband sources[J]. Signal Processing, 2005, 85(4): 837-847.

(责任编辑: 肖楚楚)