

SAVSTMV 波束形成算法研究

卢中新, 周胜增, 高源

(上海船舶电子设备研究所, 上海 201108)

摘要: 矢量阵常规波束形成(Vector array Conventional BeamForming, VCBF)能够消除普通单线阵左右舷模糊现象, 但 VCBF 波束宽度受到“瑞利限”的限制, 不能分辨同一波束内的多个目标。矢量阵导向最小方差(Vector array STeered Minimum Variance, VSTMV)波束形成算法是一种宽带自适应波束形成算法, 具有高分辨力和抗干扰性能。VSTMV 波束形成直接在阵元域进行, 计算量较大且稳健性差, 不利于实时实现和应用。提出一种子阵 VSTMV 波束形成算法(Sub-Array Vector array Steered Minimum Variance, SAVSTMV), 可有效降低计算量, 算法稳健性更强。通过理论研究和仿真计算, 证明该算法比矢量阵常规波束形成算法具有更好的性能, 有利于实际应用。

关键词: 声矢量阵; 自适应波束形成; 子阵域; 矢量阵导向最小方差波束形成

中图分类号: TB556

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2014)-05-0477-04

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2014.05.018

Research on SAVSTMV beamforming algorithm

LU Zhong-xin, ZHOU Sheng-zeng, GAO Yuan

(Shanghai Marine Electronic Equipment Research Institute, Shanghai 201108, China)

Abstract: Conventional vector array beamforming (VCBF) is able to solve the notorious port-starboard (PS) ambiguity problem of the ordinary single linear array. But, the beamwidth of VCBF is restricted by Rayleigh limit, VCBF can not distinguish the multi-targets in the same beam. Vector array steered minimum variance (VSTMV) beamforming is a wideband adaptive beamforming method with high-resolution and anti-jamming capability. However, the VSTMV beamforming implemented in the element-domain causes heavy computational load and low robustness, so it is not suitable for real-time implementation and application in sonar engineering. In this paper, an algorithm of VSTMV beamforming implemented in the sub-array domain (called SAVSTMV beamforming) is proposed, with which the computational load can be reduced and the robustness improved. The better performance of SAVSTMV beamforming over VCBF is proved through theoretical analysis and simulation calculation, which makes the proposed algorithm suitable for practical applications.

Key words: acoustic vector array; adaptive beamforming; sub-array domain; vector array steered minimum variance

0 引言

信号源方位(Direction of Arrival, DOA)估计方法主要包括常规算法和高分辨算法。常规波束形成的缺点是方位分辨力有限且抗干扰性能差; 最小方差无畸变波束形成方法、多重信号分类(Multiple Signal Classification, MUSIC)、导向最小方差(STeered Minimum Variance, STMV)波束形成等高分辨算法方位分辨力高, 波束宽度不受瑞利限限制, 但阵元域处理存在计算量大和稳健性差等缺点。文献[1]提出了基于子带子阵的自适应波束形成算法, 该算法具有计算量小、稳健性好、分辨力高

等特点。

矢量水听器可以同时测量声场中的声压信息和振速信息, 因此, 相比于常规声压阵, 矢量阵可获得更多的信息, 波束形成优于声压阵。文献[2]将 STMV 算法应用到矢量阵中, 提出了矢量阵导向最小方差(VSTMV)波束形成算法。为了改善 VSTMV 波束形成算法稳健性并减小其计算量, 本文将子阵域 STMV 应用与矢量阵相结合, 提出了子阵域 VSTMV 波束形成算法(SAVSTMV), 进行了理论和仿真研究, 并与矢量阵常规波束形成进行了对比。

1 矢量水听器阵列信号模型^[3,4]

假设 M 个二维矢量水听器(它们能同时测量声场中声压和质点振速的两个水平分量)组成均匀直

收稿日期: 2013-08-07; 修回日期: 2013-11-04

作者简介: 卢中新(1984—), 男, 内蒙古扎兰屯人, 硕士, 研究方向为信号与信息处理。

通讯作者: 卢中新, E-mail: lzx_918@163.com

线阵, 间距为 d , 如图 1 所示。

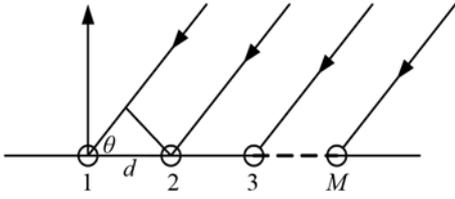


图 1 等间距直线阵
Fig.1 Uniform linear array

由图 1 可见, 该阵型声压阵方向向量为:

$$a_p(\theta)=[1, e^{-j2\pi d \cos \theta / \lambda}, \dots, e^{-j2\pi(M-1)d \cos \theta / \lambda}]^T \quad (1)$$

二维矢量传感器的方向向量为

$$u(\theta)=[1, \cos \theta, \sin \theta]^T \quad (2)$$

则该阵型矢量阵方向向量为

$$a_v(\theta)=\text{kron}(a_p(\theta), u(\theta)) \quad (3)$$

考虑 J 个信号源入射到矢量阵上, 则第 m 个阵元接收的信号表示为

$$z_m(t)=\sum_{j=1}^J a_v(\theta_j) s_j(t) + n_m(t) \quad (4)$$

式中: θ_j 表示第 j 个信号源的入射方向; $s_j(t)$ 表示第 j 个信号源波形, 是第 m 个阵元的声压和振速接收到的噪声矢量, $j=1, \dots, J$, $m=1, \dots, M$ 。

整个矢量阵接收信号可以表示为

$$\mathbf{x}(t)=[z_1(t), \dots, z_M(t)]^T = \mathbf{A}_v(\theta) \mathbf{S}(t) + \mathbf{N}_v(t) \quad (5)$$

其中 $\mathbf{A}_v(\theta)=[a_v(\theta_1), \dots, a_v(\theta_J)]$, $\mathbf{S}(t)=[s_1(t), \dots, s_J(t)]^T$, $\mathbf{N}_v(t)=[n_{v1}, \dots, n_{vM}]^T$ 。 $\mathbf{x}(t)$ 的频域表示为:

$$X(f_k) = A_v(f_k) \overline{S(f_k)} + \overline{N_v(f_k)} \quad (6)$$

$\overline{S(f_k)}$ 和 $\overline{N_v(f_k)}$ 分别表示 $\mathbf{S}(t)$ 、 $\mathbf{N}_v(t)$ 的傅里叶变换, $f_k \in [f_l, f_h]$, $[f_l, f_h]$ 为信号分析频带, $k=l, l+1, \dots, h$ 为相应的频率下标。

2 VSTMV 算法^[2]

导向最小方差(STeered Minimum Variance, STMV)波束形成算法应用到矢量阵上简称为 VSTMV, 文献[2]中对此有详细的介绍, 现将主要推导公式列出。矢量阵列频域输出向量表示为

$$Y(f_k, \theta) = T_v(f_k, \theta) X(f_k) \quad (7)$$

其中:

$$T_v(f_k, \theta) = \text{kron}(T_p(f_k, \theta), \mathbf{I}_3) \quad (8)$$

$T_p(f_k, \theta) = \text{diag}(a_p(\theta))$, \mathbf{I}_3 为 3 阶单位阵。定义

$$\mathbf{R}_{\text{vstcm}}(\theta) = \sum_{k=l}^h T_v(f_k, \theta) \mathbf{R}_{\text{vcsdm}}(f_k) T_v^H(f_k, \theta) \quad (9)$$

为矢量阵对应方向 θ 的导向协方差矩阵(Vector STeered Covariance Matrix, VSTCM)。其中

$$\mathbf{R}_{\text{vcsdm}}(f_k) = X(f_k) X^H(f_k) \quad (10)$$

为频域数据协方差矩阵, 那么矢量阵权向量为

$$W(\theta) = \frac{\mathbf{R}_{\text{vstcm}}^{-1}(\theta) \text{kron}(\mathbf{1}_M, u(\theta))}{\text{kron}(\mathbf{1}_M, u(\theta))^H \mathbf{R}_{\text{vstcm}}^{-1}(\theta) \text{kron}(\mathbf{1}_M, u(\theta))} \quad (11)$$

其中, $\mathbf{1}_M$ 表示为 $M \times 1$ 维单位向量, 则 VSTMV 波束形成的频域波束输出为

$$B(f_k, \theta) = W^H(\theta) Y(f_k, \theta) \quad (12)$$

3 SAVSTMV 波束形成算法

自适应波束形成算法中随着阵元数目的增加, 阵列数据协方差矩阵的维数也随着增大, 从而矩阵求逆计算量剧增, 可以通过划分子阵来降低矩阵维数, 减少矩阵求逆计算量。子阵处理基本原理是将整个接收阵划分成若干个子阵, 对每个子阵进行常规波束形成, 然后将预成在相同方向的不同子阵作为单个接收基元, 最后对这些“子阵基元”进行自适应波束形成^[1]。

对于 M 元二维矢量水听器阵列, 假设将其划分成 N 个子阵, 每个子阵含有 Na 个阵元, 则每个子阵中含有 $3Na$ 路信号(一个声压和水平方向两个振速信号), 对每个子阵进行矢量阵常规波束形成, 同一预成方位下共形成 N 个子波束输出, 最后将这 N 个子波束输出作为接收基元进行自适应波束形成。

定义矢量阵信号选择向量:

$$u_k(\theta) = \text{kron}(\mathbf{I}_{Na}, u(\theta)) \quad (13)$$

其中 \mathbf{I}_{Na} 为 $Na \times 1$ 维单位向量。

重写式(7), 为

$$Y(f_k, \theta) = T_v(f_k, \theta) X(f_k) = [y_1(f_k), \dots, y_M(f_k)]^T \quad (14)$$

$y_m(f_k)$ 表示第 m 个阵元信号经过相移后的值, $m=1, \dots, M$ 。

$$y_m(f_k) = \text{diag}(u(\theta) e^{-j2\pi(m-1)d \cos \theta / \lambda}) \times$$

$$[P_m(f_k), VX_m(f_k), VY_m(f_k)]^T \quad (15)$$

式中, $P_m(f_k)$ 、 $VX_m(f_k)$ 和 $VY_m(f_k)$ 分别为 $p_m(t)$ 、 $vx_m(t)$ 和 $vy_m(t)$ 的傅里叶变换。

第 n 个子矢量阵的常规波束形成成为

$$b_n(f_k, \theta) = u_k(\theta)^H [y_{n1}(f_k), \dots, y_{nNa}(f_k)] \quad (16)$$

其中, $y_{ni}(f_k)$ 表示第 n 个子阵中的第 i 个阵元信号经过相移后的值, $n=1, 2, \dots, N$, $i=1, 2, \dots, Na$ 。

N 个子矢量阵常规波束输出向量为

$$\mathbf{B}_k = [b_1(f_k, \theta), \dots, b_N(f_k, \theta)]^T \quad (17)$$

子矢量阵条件下的空间协方差矩阵为

$$R_B(\Delta f, \theta) = \sum_{k=l}^h \mathbf{B}_k \mathbf{B}_k^H \quad (18)$$

其中 Δf 为处理的频带范围。

子阵域 VSTMV 波束形成的权向量为:

$$\mathbf{W}_{SA}(\theta) = \frac{\mathbf{R}_B^{-1}(\Delta f, \theta) \mathbf{1}_N}{\mathbf{1}_N^H \mathbf{R}_B^{-1}(\Delta f, \theta) \mathbf{1}_N} \quad (19)$$

式中, $\mathbf{1}_N$ 为 $N \times 1$ 维单位向量。

子阵 VSTMV 频域输出为

$$VB(f_k, \theta) = \mathbf{W}_{SA}^H(\theta) \mathbf{B}_k \quad (20)$$

由式(18)可以看出, 通过子矢量阵 VSTMV 处理, 空间协方差矩阵的维数由 $3M \times 3M$ 维下降为 $N \times N$ 维, 相对于 VSTMV, 大大降低了计算量, 有利于工程上的实时实现。

4 仿真分析

仿真条件: 二维矢量水听器个数为 16 个, 阵元间距为 1.5 m, 信号源为 CW 信号, 中心频率为 500 Hz, 加入高斯白噪声, 分析带宽为 100~3000 Hz, 采样率为 16 kHz, 将矢量阵分为 4 个子阵, 每个子阵中有 4 个阵元, 即子阵数 $N=4$, 每个子阵中的阵元数 $N_a=4$, 所以每个子阵含有 12 路信号。

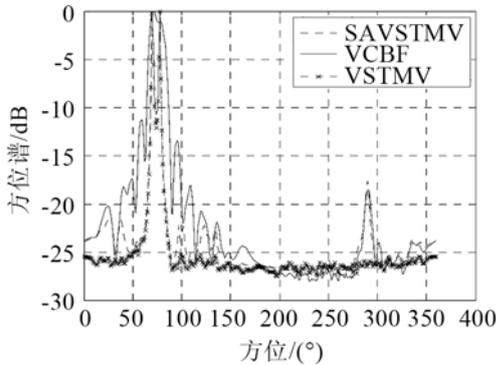


图 2 SAVSTMV、VSTMV 和 VCBF 波束输出(单目标, SNR: 10dB, 方位 70°)

Fig.2 Output patterns of SAVSTMV, VSTMV and VCBF(single target, SNR:10dB, azimuth: 70°)

图 2 为单目标仿真结果, 其中 SAVSTMV 为子阵域 VSTMV 的波束形成算法, VCBF 为矢量阵常规波束形成算法, VSTMV 为阵元域矢量阵 STMV 波束形成算法。对比三种结果可以看出, SAVSTMV 和 VSTMV 都比 VCBF 主瓣较窄, 旁瓣也较低, 提高了方位估计精度。SAVSTMV 与 VSTMV 相比较, SAVSTMV 的左右舷抑制比略低于 VSTMV, 和 VCBF 的左右舷抑制比基本一样。

图 3 为双目标仿真结果, 对比三种结果可以看出, 对于两个方位较近的信号, VCBF 算法不能够分辨出来, 而 SAVSTMV 和 VSTMV 两种算法都能够分辨出来, 但是 SAVSTMV 算法的左右舷抑制比

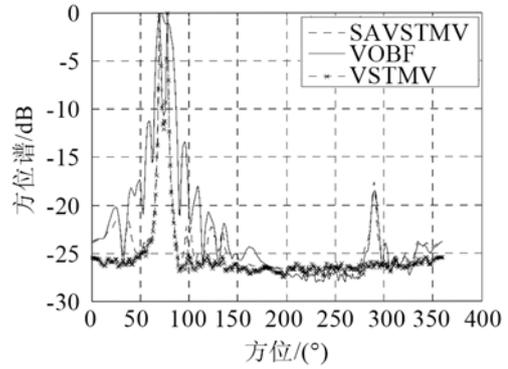


图 3 SAVSTMV、VSTMV 和 VCBF 波束输出(双目标, SNR: 10dB, 方位: [70, 78]°)

Fig.3 Output patterns of SAVSTMV, VSTMV and VCBF (double target, SNR:10dB, azimuths: [70°, 78°])

低于 VSTMV 算法。

在实际试验和工作环境中, 由于海流等其它因素可能会造成拖线阵的变形或者阵元损坏等情况, 由此会影响波束形成的性能下降。通过对个别阵元信号置零来模拟阵元损坏情况, 进行 SAVSTMV 和 VSTMV 的性能对比。将 2 号阵元、6 号阵元信号置零, 仿真结果如图 4 和图 5 所示。

图 4 和图 5 分别是单目标和双目标仿真结果。

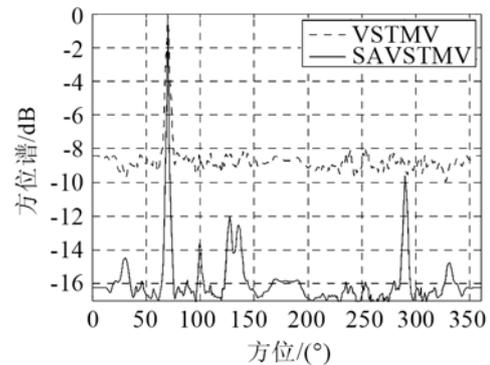


图 4 稳健性比较(SNR: 10dB, 方位 70°)

Fig.4 Comparison of solidity robustness (single target, SNR: 10dB, azimuth: 70°)

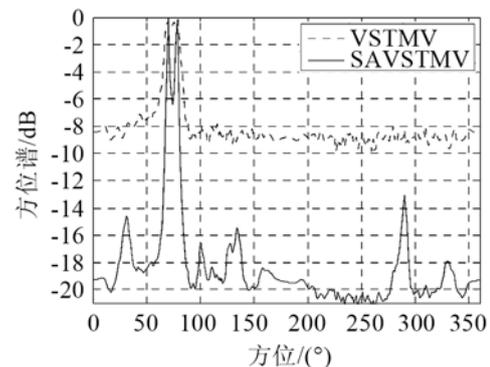


图 5 稳健性比较(SNR: 10dB, 方位: [70, 78]°)

Fig.5 Comparison of solidity robustness (double targets, SNR: 10dB, azimuths: [70°, 78°])

从图 4 和图 5 中可以看出,在矢量阵中阵元损坏的情况下,SAVSTMV 算法要比 VSTMV 算法稳健性好,表现为主瓣窄,旁瓣级低,因此 SAVSTMV 比 VSTMV 具有较好的稳健性。

综上所述可以看出,SAVSTMV 算法方位分辨率高,旁瓣级低,能够消除左右舷模糊现象,并且计算量低,稳健性好,有利于工程上的实时实现。

5 结 论

本文通过对矢量阵进行多子阵常规波束形成,然后再进行 STMV 自适应波束形成,从而降低了计算过程中数据协方差矩阵的计算量,并能有效提高算法稳健性。

仿真表明该算法能够分辨左右舷模糊现象,方位分辨力高,旁瓣级低,在部分阵元失效条件下仍具有较好性能,为工程上的应用具有一定的指导意义。

参 考 文 献

- [1] 周胜增,杜选民.快速收敛最小方差无畸变响应算法研究及应用[J].声学学报,2009,34(6):515-520.
ZHOU Shengzeng, DU Xuanmin. Research and application of fast-convergent minimum variance distortionless response algorithm[J]. Acta Acustica, 2009, 34(6): 515-520.
- [2] 陈阳,惠俊英.声矢量阵导向最小方差波束形成算法研究[J].哈尔滨工程大学学报,2008,29(11):1199-1204.
CHEN Yang, HUI Junying. Acoustic vector-sensor array steered minimum variance beamforming[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2008, 29(11): 1199-1204.
- [3] 惠俊英,惠娟.矢量声信号处理基础[M].北京:国防工业出版社,2009:63-80.
HUI Junying, HUI Juan. Elements of vector Acoustic signal[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009: 63-80.
- [4] 张揽月,杨德森.基于 MUSIC 算法的矢量水听器阵源方位估计[J].哈尔滨工程大学学报,2004,25(1):30-33.
ZHANG Lanyue, YANG Desen. DOA estimation based on MUSIC algorithm using an array of vector hydrophones[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2004, 25(1): 30-33.