

微弱信号被动检测的 STMV 波束形成方法研究

刘宇轩, 赵美琪, 陈韶华

(中国船舶集团有限公司第七一〇研究所, 湖北 宜昌 443003)

摘要 针对在干扰背景下水下微弱信号的目标检测以及来波方向估计问题, 研究了基于导向最小方差 (Steered Minimum Variance, STMV) 的子带极值能量检测 (Sub-band Extreme Energy Detection, SEED) 方法的检测性能, 并与常规能量检测 (Conventional Energy Detection, CED) 和常规波束形成 (Conventional Beamforming, CBF) 进行了比较分析。仿真与试验结果表明: SEED 方法的检测性能优于 CED 方法, STMV 方法能够在低信噪比下分辨目标与干扰, 而基于 STMV-SEED 方法的多目标分辨能力优于 CBF-SEED 方法。

关键词 子带极值能量检测; 常规波束形成; 导向最小方差波束形成; 多目标分辨

中图分类号 TN911.7: TB566 文献标识码 A 文章编号 2096-5753(2022)01-0086-06

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2022.01.014

Research on Weak Signal Passive Detection Based on Steered Minimum Variance Beamforming

LIU Yuxuan, ZHAO Meiqi, CHEN Shaohua

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

Abstract Aiming at the problems of underwater weak signal detection and incoming wave direction estimation under interfering background, the detection performance of Sub-band Extreme Energy Detection (SEED) based on Steered Minimum Variance (STMV) adaptive beamforming is studied, and compared with Conventional Energy Detection (CED) and Conventional Beamforming (CBF). Simulation and experimental results indicate that SEED has better detection performance than CED, the STMV method can distinguish target and interference in low SNR, and the STMV-SEED method is superior to the CBF-SEED method in multi-target resolution performance.

Key words Sub-band Extreme Energy Detection, Conventional Beamforming, Steered Minimum Variance Beamforming, multi-target resolution

0 引言

常规能量检测 (Conventional Energy Detection, CED) 是被动声呐实现目标探测功能的常用方法, 但由于常规波束形成作为宽带能量检测前置处理, 其“瑞利限”导致目标方位轨迹模糊, 方位分辨力降低, 特别是在复杂海洋环境下, 常规能量检测的性能往往受到限制。因此, 对于实际声呐应用, 必

须对 CED 进行改进, 提高方位分辨能力^[1]。

M.Bono 提出了一种子带峰值能量检测 (Sub-band Peak Energy Detection, SPED) 算法, 该算法利用信号峰值的空间一致性, 对各子带方位的峰值能量进行累加并作为波束的输出, 以此来改善方位显示效果^[2]。董晋提出了一种主动声呐的宽容 STMV 波束形成方法, 该方法借鉴了宽容 CAPON

波束形成的思路, 有效避免了阵型失配、阵元幅向不一致等问题^[3]。

本文研究了基于 STMV-SEED 的信号处理方法, 该方法可以有效提高目标信号与干扰的分辨能力, 改善目标信号的方位历程图显示, 从而提高被动声呐微弱信号的检测性能。

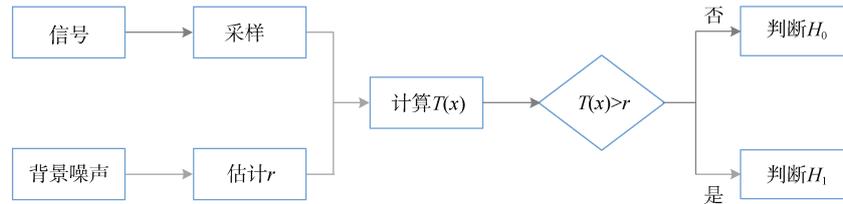


图 1 常规能量检测原理框图

Fig.1 Principle block diagram of Conventional Energy Detection

假设信号序列 $s(n) \sim N(0, \sigma_s^2)$, 平稳随机噪声 $g(n) \sim N(0, \sigma^2)$ 均服从高斯分布, $n = 0, 1, 2, \dots, N-1$, 信号与噪声相互独立。则二元假设检验可表示为

$$\begin{cases} H_0 : x(n) = g(n) \\ H_1 : x(n) = s(n) + g(n) \end{cases} \quad (1)$$

根据奈曼-皮尔逊准则可得, 如果超过门限 r , 则判断为 H_1 , 否则判断为 H_0 。即

$$T(x) = \sum_{n=0}^{N-1} x^2(n) \begin{matrix} < r & H_0 \\ > r & H_1 \end{matrix} \quad (2)$$

其中, 检测统计量 $T(x)$ 通过计算信号的能量, 并将其和检测门限 r 比较后所得到的结果作为判断的依据。可以直观地理解为, 若接收信号中存在目标信号, 则该信号的能量一定会增加。方差归一化后可得:

$$\begin{aligned} T(x)/\sigma^2 &\sim \chi^2, H_0 \\ T(x)/(\sigma^2 + \sigma_s^2) &\sim \chi_N^2, H_1 \end{aligned} \quad (3)$$

式中, χ_N^2 是自由度为 N 的中心化 χ^2 分布。可得到检测概率 P_d 和虚警概率 P_f 的关系为

$$P_d = Q\left(\frac{Q^{-1}(P_f) - \sqrt{N/2} \cdot \sigma_s^2 / \sigma^2}{\sigma_s^2 / \sigma^2 + 1}\right) \quad (4)$$

其中:

$$Q(x) = \int_x^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}t^2\right) dt \quad (5)$$

1 常规能量检测

常规能量检测是高斯噪声中高斯信号的最佳检测器, 也称为平方检波, 通过时间域的积分处理可以使目标辐射噪声的能量从背景噪声中显现出来。常规能量检测原理框图如图 1 所示, 其原理是基于水下声信号的短时能量的概率分布特性。

常规能量检测模型是信号检测的一阶统计量分析, 一般假定噪声为零均值高斯白噪声, 被检测的信号也是一个高斯随机过程, 常规能量检测是高斯噪声中高斯信号的最佳检测器。常规能量检测模型是信号检测的一阶统计量分析, 一般假定噪声为零均值高斯白噪声, 被检测的信号也是一个高斯随机过程, 常规能量检测是高斯噪声中高斯信号的最佳检测器。但由于常规波束形成作为宽带能量检测前置处理, 其“瑞利限”导致目标方位轨迹模糊, 方位分辨力降低, 特别是在复杂海洋环境下, 常规能量检测的性能迅速降低, 因此, 对于实际声呐应用, 有必要改进 CED, 提高方位分辨能力。

2 子带极值能量检测^[4]

子带极值能量检测同常规能量检测一样都是利用频率方位信息, 不同的是 CED 是对整个频带各个方位的能量求和, 而 SEED 利用信号峰值和谷值的空间一致性, 对每个子带在各个方位上的峰值和谷值的能量进行求和。SEED 不仅利用了峰值信息还利用了谷值信息, 它先对每个子带在各个方位上的峰值能量求和, 然后减去该子带在各个方位上的谷值能量。

假设声呐的工作频段被分为了 N 个子带, 阵列信号经过预处理之后, 对信号中的每个子带作波束形成, 其输出的空间谱为 $P(\theta), \theta = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N]$ 。然

后对空间谱的每个子带取局部极值,非极值点归 0, 得到子带极值谱, 即

$$P(\theta) = \begin{cases} P_i(\theta), & P_i(\theta) > P_{i-1}(\theta) \& P_i(\theta) > P_{i+1}(\theta) \\ P_i(\theta), & P_i(\theta) < P_{i-1}(\theta) \& P_i(\theta) < P_{i+1}(\theta) \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

并构成子带极值谱矩阵:

$$P(\theta) = [p_1(\theta), p_2(\theta), \dots, p_N(\theta)]^T \quad (7)$$

然后对各个方位上不同子带的极值差进行累

加, 得到能量谱:

$$P'(\theta) = \sum_{i=1}^N p_i(\theta) \quad (8)$$

由式(6)和式(8)可以看出, 如果某一方位上存在宽带信号, 那么该方位上子带的极值谱中会出现局部极值, 累加后信号得到增强。而由于噪声是随机分布的, 累加后其能量被平滑。子带极值能量检测的流程图如图 2 所示。

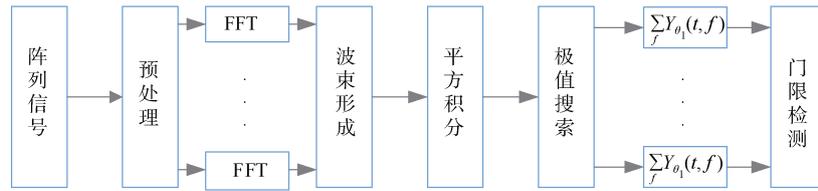


图 2 子带极值能量检测流程图

Fig.2 Flow chart of sub-band extreme energy detection

相较于 CED 利用信号全部能量的特点, SEED 在进行能量累加时只利用了峰值与谷值信息, 消除了极值以外的子带能量干扰, 降低了噪声对算法的影响, 进而提高了检测性能^[5]。

3 STMV 波束形成^[6-7]

常规波束形成的性能稳健, 对阵元幅度与相位失配较为宽容, 运算量小, 且可以解相干源, 因而在声呐、雷达与水下探测系统中得到了广泛应用^[8-9], 但是常规波束形成受“瑞利限”的限制, 对同一波束宽度内的多个目标不能分辨, 抗干扰能力较差^[10-11]。

在这种情况下, 可以采用更高分辨力波束形成方法代替常 CBF, 比如导向最小方差波束形成。STMV 波束形成利用声场的空-时统计特性, 在一定带宽下仅需少量的快拍数就能实现快速收敛, 每一快拍的波束输出可在单次快拍内完成。STMV 波束形成的基本原理是通过旋转波束方向, 使指定方向 θ 的输出值为 1, 而使总的输出能量最小^[12-13]。本文主要以 STMV 波束形成为例进行分析, 比较分析 STMV 波束形成与 CBF 的性能。

假设间隔均匀的线阵列由 N 个阵元组成, 阵元间距为 d , 空间存在 M 个信号源, 那么第 n 个阵元接收到的信号表示为

$$x_n(t) = \sum_{m=1}^M s_m(t - \tau_n(\theta)) + v_n(t) \quad (9)$$

式中: s_m 为目标信号; v_n 为背景噪声, $\tau_n(\theta) = (n-1)d \cos(\theta)/c, n=1, 2, \dots, N$ 。然后对数据块中每个阵元接收到的信号作 FFT, 得到个阵元在频率 f_k 的频率数据向量 $X_m(f_k)$, 其中 m 表示阵元, k 表示频率。

求解互谱密度矩阵:

$$R(f_k) = E(X(f_k)X^H(f_k)) \quad (10)$$

式中, $X(f_k) = [X_0(f_k), X_2(f_k), \dots, X_{M-1}(f_k)]^T$ 。

然后计算导向协方差矩阵 (Steered Covariance Matrix, STCM):

$$R_{\text{STCM}}(f, \theta) = \sum_{k=l}^K T(f_k, \theta) R(f_k) T^H(f_k, \theta) \quad (11)$$

式中: $R(f_k)$ 为频率 f_k 的互谱密度矩阵; Δf 为处理的频率范围, $k=l, l+1, \dots, K$; $T(f_k, \theta)$ 为对角导向矩阵, 即对角元素与常规波束形成的阵列流行向量一致, 可表示为

$$T(f_k, \theta) = \begin{bmatrix} e^{j2\pi f_k \tau_1(\theta)} & 0 & L & 0 \\ 0 & e^{j2\pi f_k \tau_2(\theta)} & & M \\ M & & O & 0 \\ 0 & L & 0 & e^{j2\pi f_k \tau_N(\theta)} \end{bmatrix} \quad (12)$$

则 STMV 自适应波束形成的最佳权向量为

$$W(\theta) = \frac{R_{\text{STCM}}^{-1}(Vf; \theta) I_N}{I_N^H R_{\text{STCM}}^{-1}(Vf; \theta) I_N} \quad (13)$$

式中, I_N 为 N 维单位向量。

STMV 的波束输出:

$$B(f_k, \theta) = W^H(\theta) Y(f_k, \theta) \quad (14)$$

STMV 的输出功率:

$$P_{\text{STMV}}(\theta) = \frac{1}{I_N^H R_{\text{STCM}}^{-1}(Af; \theta) I_N} \quad (15)$$

STMV 波束形成流程图如图 3 所示。

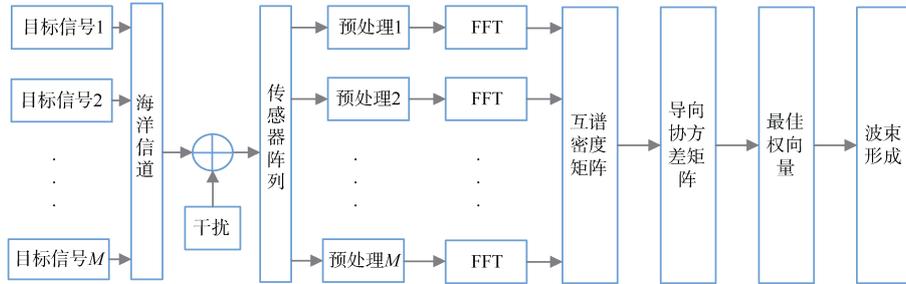


图 3 STMV 波束形成流程图

Fig.3 Flow chart of Steered Minimum Variance Beamforming

由于 STMV 波束形成的主瓣窄、旁瓣低, 噪声抑制能力强, 当进行极值搜索时, 局部峰值与谷值所在的方位更加精确, 同时也减少了对邻近方位的影响。因此, 基于 STMV 的 SEED 方法可以进一步提高被动声呐的微弱信号检测能力。

4 计算机仿真及试验数据分析

4.1 计算机仿真

假设均匀线列阵由 10 个水听器组成, 按半波长布阵, 采样频率为 5 kHz, 背景噪声为高斯白噪声, 信噪比为 -10 dB。

图 4 是常规能量检测和子带极值能量检测的单目标波束图, 目标信号来波方向是 105°。图 5 是常规能量检测和子带极值能量检测的多目标分辨图, 目标信号的来波方向分别为 105°和 120°。

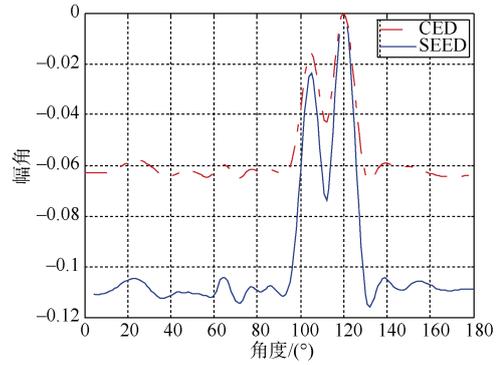


图 5 CED 和 SEED 的多目标分辨图

Fig.5 Multi-target beam diagram of CED and SEED

从图 4-5 可以看出, 无论是单目标还是多目标, SEED 方法的主瓣更窄, 旁瓣更低, 多目标分辨能力更强。

图 6 是 CBF 和 STMV 波束形成的单目标波束图, 目标信号的来波方向为 120°。图 7 是 CBF 和 STMV

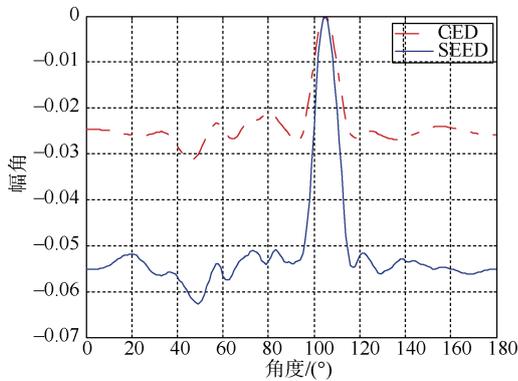


图 4 CED 和 SEED 的单目标波束图

Fig.4 Single target beam diagram of CED and SEED

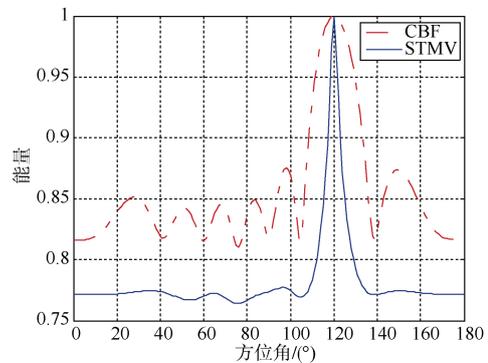


图 6 CBF 和 STMV 的单目标波束图

Fig.6 Single target beam diagram of CBF and STMV

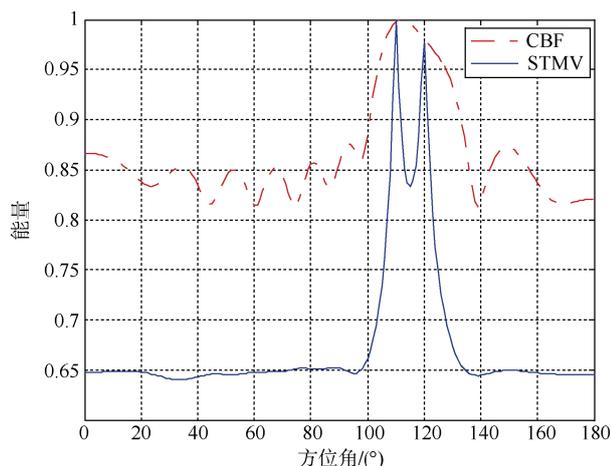


图 7 CBF 和 STMV 的多目标分辨图

Fig.7 Multi-target beam diagram of CBF and STMV

波束形成的多目标分辨图,目标信号的来波方向分别为 110°和 120°。

4.2 试验数据分析

试验采用 10 元舷侧阵,试验目标是一条科研试验船,平均海深 300 m,水下测量平台的深度约为 200 m,试验时海况约 2 级。目标船直线航行,由远到近从测量平台上方通过再远离,正横距离约为 120 m,俯仰角定义为目标入射方向与垂直向上方向夹角,因此目标在测量平台正上方时为 0°,在远距离处为 90°。

图 8 是基于 CBF 的 SEED 方法的方位历程图,图 9 是基于 STMV 的 SEED 方法的方位历程图。

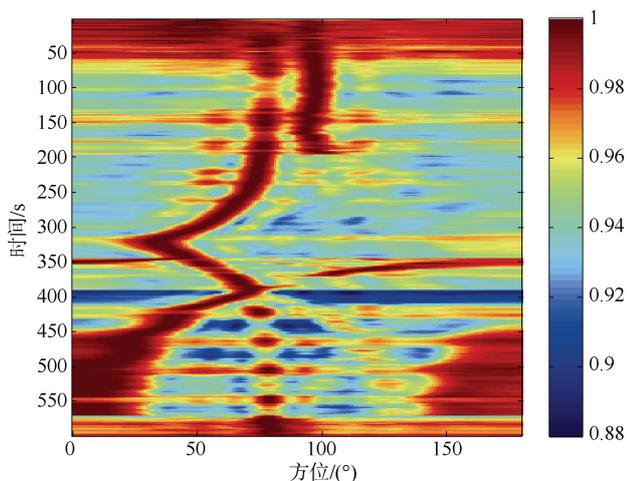


图 8 基于 CBF-SEED 方法的方位历程图

Fig.8 Azimuth course map based on CBF-SEED method

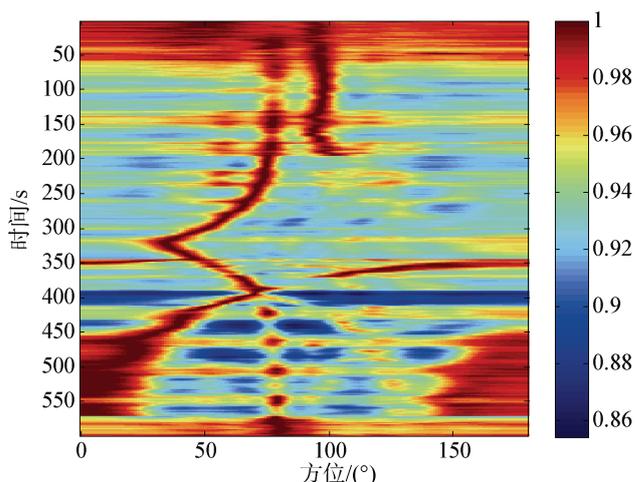


图 9 基于 STMV-SEED 方法的方位历程图

Fig.9 Azimuth course map based on STMV-SEED method

从图 8 可以看出,STMV 波束形成的主瓣更窄,旁瓣更低。当目标信号的信噪比较低时,CBF 很难分辨多目标信号的方位,而 STMV 波束形成能够分辨多目标信号的方位,说明 STMV 波束形成的多目标分辨能力更强。

从图 9 可以看出,目标信号的方位角随时间先变小后变大,在 320 s 时目标通过正横位置附近。在 0~200 s 时,在 100°的方位上有一个干扰,在 350~600 s 时,同样也有一个干扰随时间从 180°变化到 0°附近。基于 STMV 的 SEED 方法的方位历程图的目标和干扰的轨迹更清晰,可以明显分辨目标和干扰的方位角变化,其检测性能优于基于 CBF 的 SEED 方法。

5 结束语

本文对 SEED 和 SED 的检测性能进行了比较分析,仿真结果表明:SEED 方法能明显提高目标的方位分辨能力。然后结合 STMV 波束形成与 CBF 对微弱信号的检测性能进行了比较分析,通过计算机仿真和试验数据分析表明,该方法具有更好的抗干扰能力与更高的分辨率,能够在强干扰条件下估计微弱信号的来波方向,并改善时间方位历程的显示效果,提高被动声呐的微弱信号检测性能。并且该方法性能稳定、计算简单,在水声工程领域有良好的应用前景。

参考文献

- [1] VAN T L. Optimum array processing [M]. New York: John Wiley & Sons Inc., 2003.
- [2] BONO M, SHAPO B. Sub-band energy detection in passive array processing[P]. US: ADA405484, 2000.
- [3] 董晋. 一种适用于主动声纳的宽容 STMV 波束形成方法[J]. 声学与电子工程, 2012 (4): 42-45.
- [4] 杨晨辉, 马远良, 杨益新. 峰值能量检测及其在被动声纳显示中的应用[J]. 应用声学, 2003, 22 (5): 31-35.
- [5] STERGIOPOULOS S. Advanced signal processing handbook [M]. US: CRC Press LLC, 2001.
- [6] 蒋小勇, 于李洋, 杜选民. 提高被动声纳宽带检测性能的一种新方法[J]. 声学技术, 2011, 30 (6): 484-488.
- [7] KROLIK J, SWINGLER D. Multiple broadband source location using Steered Covariance Matrices[J]. IEEE Trans Acoustics Speech and Signal Processing, 1989, 37 (10): 1481-1494.
- [8] CAPON J. High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis[J]. Proceedings of the IEEE, 1969, 57 (8): 1408-1418.
- [9] MOY G, WAGNER C, FEARING R S. Compliant tactile display for teletaction[C]// Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation. US: IEEE, 2000.
- [10] 李涛, 蒋小勇, 周胜增. 基于宽带稳健 STMV 波束形成的相关检测方法[J]. 声学技术, 2019, 38 (5): 600-603.
- [11] 周亦军, 刘千里. STMV 波束形成算法并行处理实现方法研究[J]. 计算机与数字工程, 2017, 45 (9): 1731-1735.
- [12] 曹欣荣, 吴久涛, 陈亚伟, 等. 基于指向最小误差的宽带稳健波束形成方法[J]. 现代雷达, 2017, 39 (9): 38-41, 56.
- [13] 邱涛, 陈韶华. 深弹自导过程的波束相关处理仿真[J]. 数字海洋与水下攻防, 2021, 4 (2): 128-132.

(责任编辑: 肖楚楚)