

基于波束包络信息的多目标检测与方位估计一体化方法

张立杰^{1,2}, 黄建国², 张群飞²

(1. 中船重工集团第710所, 湖北宜昌 443003; 2. 西北工业大学航海学院, 陕西西安 710072)

摘要: 提出一种基于波束扫描系统空间谱输出包络信息的水声信号目标检测与方位估计一体化方法. 该方法在能量检测的基础上, 利用二次包络 3dB 宽度检测模型判断每个谱峰内的目标数目, 并通过二维 Capon 谱搜索估计目标方位. 千岛湖试验结果表明, 与传统算法相比, 提高了低信噪比下的目标检测和方位估计性能.

关键词: 多目标检测; 信源数目估计; 高分辨; 波达方向估计; 水声信号处理

中图分类号: TN911.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2009)12-2823-06

Integrated Method of Multi-Target Detection and DOA Estimation by Exploiting Knowledge of Beam Spectra Envelope

ZHANG Li-jie^{1,2}, HUANG Jian-guo², ZHANG Qun-fei²

(1. CSIC-No. 710 R&D Institute, Yichang, Hubei 443003, China;

2. College of Marine Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072, China)

Abstract: An integrated method of acoustic signal detection and direction of arrival (DOA) estimation is proposed. As exploiting the beam spectra envelope (BE) knowledge of the spatial spectrum outputted by beam scanning system, it is named as BE method, in which, based on the results of energy detection, the 3dB width information of spectral peaks is used further to detect the source number in each peak, and the DOAs are estimated by 2-D Capon searching. The Qiandao Lake experimental results show that, comparing with traditional algorithms, the performance of target detection and DOA estimation is improved at lower SNRs.

Key words: multi-target detection; source number estimation; high resolution; direction of arrival estimation; acoustic signal processing

1 引言

基于小尺度阵的被动目标探测是阵列信号处理的重要内容, 广泛应用于舰载小型声纳、小型水下航行器导航系统、车载雷达、水声通信、医学诊断和治疗等诸多领域. 特别是在水下, 由于信号强度衰减大、信号传播速度低、以及阵列孔径尺度相对较小等的限制, 被动目标探测距离近、分辨能力差. 此外, 小尺度阵常布放于运动载体之上, 使得其工作环境存在很强的自噪声干扰. 如何克服这些问题实现自噪声环境下小尺度阵的远程目标高分辨检测和方位估计是小尺度阵被动目标探测的研究重点和急待解决的问题.

为了获得稳定的低信噪比检测性能, 一般采用波束形成技术获得观测场的空间信息、利用能量检测技术检测目标信号. 常用的波束形成器为常规波束形成和最小方差无失真响应 (Minimum Variance Distortionless Re-

sponse, MVDR)^[1] 波束形成. 能量检测技术有常规宽带能量检测和 Michael V. Bono、Robert E. Zarnich 等人提出的子带峰值能量检测 (Sub-band Peak Energy Detection, SPED) 算法^[2]. 但该类方法不能分辨一个波束宽度内的两个目标, 分辨能力有限.

近二三十年, 广大研究者提出了许多高分辨方位估计理论和方法, 突破了传统波束形成法对多目标分辨能力的限制. 但这类方法大都以信源数已知为前提, 如 MUSIC 算法^[3]、CSS 算法^[4]、TCT 聚焦算法^[5]、宽带直接处理 BASS-ALE^[6] 和 FDM^[7] 算法、以及宽带波束域高分辨 DOA 估计 Root-MUSIC 算法^[8]. 在信源数估计算法中, AIC 准则^[9]、MDL 准则^[10]、比率准则 (RC)^[11]、EGM 算法^[12] 和基于盖尔圆定理的 GDE 多目标检测算法^[13] 较为有效, 然而在实际应用中, 其估计性能随着信噪比的降低而降低, 特别是在低信噪比 (低于 -20dB)、信号时间非白和空间非白等水下实际情况下, 错误检测概率迅

速增加。

本文结合船载舷侧小型声纳阵被动目标探测研究需要,提出了一种基于二次包络的远程多目标高分辨检测与方位估计一体化方法,简记为 BE(Beamspectra Envelop)方法。该方法能够在检测目标源数目的同时给出目标的方位估计,具有高分辨能力。该方法在千岛湖湖试中,利用船体舷侧 2m 线阵成功地对 6km 外、方位间隔约为 1/2 波束宽度的两个水下舰船辐射噪声源进行了检测和方位估计,实现了水下自噪声环境下小尺度阵被动目标远程检测和方位估计。本文以下章节重点对 BE 方法的原理、实现步骤和统计性能进行了描述和分析,并给出了千岛湖湖试结果。

2 信号模型

2.1 阵列输出信号模型

假设阵列为 N 个阵元组成的线阵,阵元无方向性,有 D 个远场信号 $s_1(t), s_2(t), \dots, s_D(t)$, 分别来自 $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_D$ 方向,阵列在 t 时刻接收的 N 维观测数据矢量可以表示为

$$\mathbf{x}(t) = \sum_{d=1}^D \mathbf{a}(\theta_d) s_d(t) + \mathbf{n}(t) \quad (1)$$

其中, $\mathbf{n}(t)$ 为加性噪声向量, $t = 1, 2, \dots, L$ 是采样时刻, L 是快拍数, $\mathbf{a}(\theta_d)$ 表示 θ_d 方向的阵列导向矢量,结构如下:

$$\mathbf{a}(\theta) = \frac{1}{\sqrt{M}} [e^{-j2\pi x_1/\lambda \sin(\theta)}, e^{-j2\pi x_2/\lambda \sin(\theta)}, \dots, e^{-j2\pi x_N/\lambda \sin(\theta)}]^T \quad (2)$$

式中 $x_n (n = 1, 2, \dots, N)$ 表示阵元的位置, λ 为信号波长。

信号 $s(t)$ 是均值为 0、方差为 σ_s^2 的各态历经平稳高斯随机过程,噪声 $n(t)$ 是均值为 0、方差为 σ_n^2 的各态历经平稳高斯随机过程,信号之间及信号与噪声相互独立,有

$$p(s) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_s} \exp\left\{-\frac{s^2}{2\sigma_s^2}\right\} \quad (3)$$

$$p(n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_n} \exp\left\{-\frac{n^2}{2\sigma_n^2}\right\} \quad (4)$$

$$p(s, n) = p(s) \cdot p(n) \quad (5)$$

其中,函数 $p(\cdot)$ 表示概率分布密度函数。

2.2 二次包络 3dB 束宽检测模型

我们将阵列通过多波束配置或波束扫描得到多个方向上信号输出值的过程称为“二次波束形成”。二次波束形成输出为一离散序列,该离散序列的包络定义为“二次包络”,其表达式为

$$\Theta_k(\theta) = |\mathbf{a}^H(\theta) \mathbf{x}(t)|, \theta \in U(\theta_m, \phi) \quad (6)$$

其中, θ_0 为设定的“稀疏”目标检测方位(如图 2 所示),

ϕ 是二次包络波束宽度,定义为二次包络主极大附近最近的两个零点所对应的角度差。

当有目标存在时,二次包络亦会出现形状类似波束图主瓣的谱峰(图 1 给出了信噪比 $\text{SNR} = -18\text{dB}$, 目标方位分别为 $[-2^\circ, 2^\circ, 10^\circ]$ 情况下的二次包络谱图)。仿照波束图中 3dB 波束宽度概念,定义二次包络谱峰相应的两个半功率点所对应的角度差为“二次包络 3dB 束宽 $-\phi'$ ”。

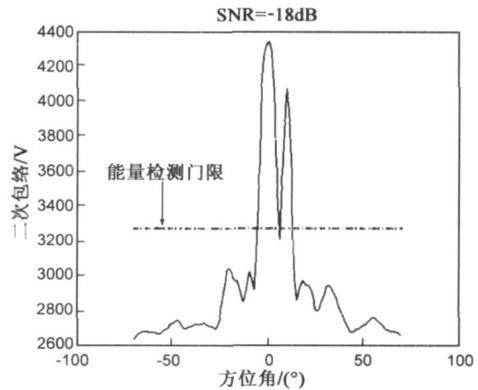


图1 三目标情况下的二次包络谱图

研究表明,理想情况下远场静止单个点目标在固定阵列上由常规波束形成器产生的二次包络 3dB 束宽为一定值 ϕ_0 ,且二次包络 3dB 束宽与输入信噪比无关,仅取决于目标方位 θ 。存在两个或更多个点目标且目标方位夹角 $\Delta\theta$ 在 $[0, \phi]$ 范围内取值时,二次包络 3dB 束宽随 $\Delta\theta$ 的增大而近似线性增大,即 $\phi = \phi_0 + \Delta\phi_s, \Delta\phi_s \in [0, \phi - \phi_0]$ 。

实际应用中受噪声场空间特性随机时变和阵列随机误差的影响,单目标情况下的二次包络 3dB 束宽并不是一个定值,而是在理想值 ϕ_0 基础上叠加了一个随机量 $\Delta\phi_n$,即 $\phi = \phi_0 + \Delta\phi_n$,二次包络 3dB 束宽增量 $\Delta\phi = \Delta\phi_n$ 。当一个二次包络束宽内存在两个或多个目标时,二次包络 3dB 束宽增量 $\Delta\phi = \Delta\phi_n + \Delta\phi_s$ 。假设随机量 $\Delta\phi_n$ 的取值服从指数分布, $\Delta\phi_s$ 服从均匀分布,且相互独立,则有

$$p(\Delta\phi_n) = \begin{cases} \beta \exp\{-\beta \Delta\phi_n\} & , \Delta\phi_n > 0 \\ 0 & , \Delta\phi_n < 0 \end{cases}, \beta > 0 \quad (7)$$

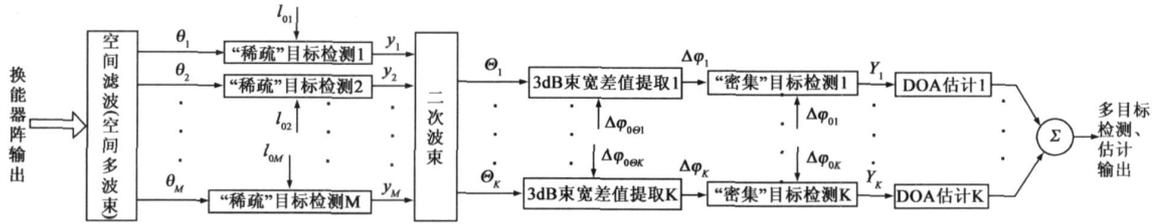
$$p(\Delta\phi_s) = \begin{cases} \frac{1}{\phi - \phi_0} & , 0 \leq \Delta\phi_s \leq \phi - \phi_0 \\ 0 & , \text{else} \end{cases} \quad (8)$$

$$p(\Delta\phi_s, \Delta\phi_n) = p(\Delta\phi_s) \cdot p(\Delta\phi_n) \quad (9)$$

3 基于二次包络的多目标检测与方位估计一体化 (BE) 方法

BE 方法主要内容包括基于二次包络的多目标检测和基于二次包络的方位估计两个有机部分,其实现框

图如图 2 所示. 图中空间滤波采用常规多波束配置或密集常规波束扫描的方式实现.



其中: θ_i —波束扫描方位角, 取值范围为 $[-90^\circ, 90^\circ]$; M —空间方位采样点数; l_{0i} —对应于波束扫描角 θ_i 的“稀疏”目标检测门限; y_i —过门限波束输出; Θ_i —二次包络峰值对应角度, 即“稀疏”目标检测检测到的目标方位; K —二次包络谱峰个数; $\Delta\varphi_{0i}$ —对应于方位 Θ_i 的理想二次包络 3dB 束宽; $\Delta\varphi_i$ —实际二次包络 3dB 束宽相对于理想值的偏移量; $\Delta\varphi_{0k}$ —对应于方位 Θ_k 的“密集”目标检测门限; Y_i —目标源数目输出.

图 2 BE 方法实现框图

3.1 基于二次包络的多目标检测

BE 方法目标检测建立在统计推断理论基础之上, 是一种假设检验方法. 由于信号的先验概率和代价因子无法知道, 目标检测判决准则采用奈曼-皮尔逊(Neyman-Pearson)准则^[14], 即在对虚警概率加以限制的前提下, 使检测概率达到最大. 该方法对目标的检测分两步进行, 首先利用幅度信号检测模型检测不同方位上的空间滤波输出目标的有无, 由于常规波束形成的方位分辨力有限, 称之为“稀疏”目标检测; 在不同空间方位角 θ 上进行“稀疏”目标检测, 再利用二次包络 3dB 束宽检测模型检测“稀疏”目标检测所不能分辨的每个二次包络谱峰是否存在双目标, 称之为“密集”目标检测.

3.1.1 “稀疏”目标检测

在某个波束扫描方位 $\theta = \theta_i$ 上做出两个假设, H_1 假设表示接收的信号中有目标信号, H_0 则表示没有目标信号, 即

$$H_1: x(t) = s(t) + n(t)$$

$$H_0: x(t) = n(t)$$

H_1 假设下, 由于 s 和 n 统计独立, 故它们之和 x 亦为平稳各态历经高斯随机变量, 均值为 0, 方差为 $(\sigma_s^2 + \sigma_n^2)$. 则, x 的似然函数为

$$p(x|H_1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi(\sigma_s^2 + \sigma_n^2)}} \exp\left\{-\frac{x^2}{2(\sigma_s^2 + \sigma_n^2)}\right\} \quad (10)$$

$$p(x|H_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_n^2}} \exp\left\{-\frac{x^2}{2\sigma_n^2}\right\} \quad (11)$$

其似然比判决式为

$$\lambda(x) = \frac{p(x|H_1)}{p(x|H_0)} \stackrel{H_1}{\leq} \mu \quad (12)$$

式中, μ 为奈曼-皮尔逊准则的似然比门限, 取值由给定的虚警概率 P_F 来决定, 即满足下式

$$P_F = \int_{\mu}^{\infty} p[\lambda(x)|H_0] d\lambda(x) \quad (13)$$

当接收信号为 N 个独立测量值时, $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_N]$, $x_i = x(t_i)$, $i = 1, 2, \dots, N$

$$p(\mathbf{x}|H_1) = p(x_1, x_2, \dots, x_N|H_1) = \prod_{i=1}^N p(x_i|H_1) \quad (14)$$

$$p(\mathbf{x}|H_0) = p(x_1, x_2, \dots, x_N|H_0) = \prod_{i=1}^N p(x_i|H_0) \quad (15)$$

此时, 式(12)具有以下形式

$$\left[\frac{\sigma_n^2}{\sqrt{\sigma_s^2 + \sigma_n^2}} \right]^N \exp\left[\frac{1}{2} \left(\frac{1}{\sigma_n^2} - \frac{1}{\sigma_s^2 + \sigma_n^2} \right) \sum_{i=1}^N x_i^2 \right] \stackrel{H_1}{\leq} \mu \quad (16)$$

两边取对数, 得

$$\sum_{i=1}^N x_i^2 \stackrel{H_1}{\geq} \frac{H_0}{N} \frac{2\sigma_n^2(\sigma_s^2 + \sigma_n^2)}{\sigma_s^2} \ln \left[\mu \left(\frac{\sigma_s^2 + \sigma_n^2}{\sigma_n^2} \right)^{N/2} \right] = l_{0i} \quad (17)$$

可见, 检测统计量为信号的能量形式, 其检测门限值 l_{0i} 是噪声功率 σ_n^2 、信号功率 σ_s^2 、虚警概率 P_F 以及独立采样次数 N 的非线性函数. 但当信号功率与噪声功率相比很弱的情况下, 检测门限 l_{0i} 变为采样次数 N 的线性函数.

当噪声空间分布不均匀时, 噪声功率值 σ_n^2 随扫描方位角 θ_i 变化而改变. 对于信号功率确定的目标, 恒虚警概率条件下的检测门限 l_{0i} 是 θ_i 的函数. 实际应用中通过现场噪声学习获得检测门限, l_{0i} 的值为 θ_i 方向上各个噪声样本的能量值 $n^2(t_k, \theta_i)$, $k = 1, 2, \dots, N$ 组成的降序序列 N 的第 h 个元素, 即

$$l_{0i} = N(h) \quad (18)$$

其中, 降序序列 N 为

$$N = \text{sort}[n^2(t_1, \theta_1), n^2(t_2, \theta_1), \dots, n^2(t_N, \theta_1)] \quad (19)$$

h 由虚警概率 P_F 和噪声样本数 N 确定

$$h = N - \lfloor N * P_F \rfloor \quad (20)$$

式中, $\text{sort}[\cdot]$ 表示降序排序运算, $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示取整运算.

3.1.2 “密集”目标检测

对超过第一步检测门限的二次包络谱峰, 利用二次包络谱峰宽度信息进一步检验在每个二次包络谱峰覆盖的方位角范围内是否存在两个目标.

对某一二次包络谱峰作两个假设:

$$H_1: \Delta\varphi = \Delta\varphi_n + \Delta\varphi_s$$

$$H_0: \Delta\varphi = \Delta\varphi_n$$

H_1 假设表示该二次包络谱峰宽度内存在两个目标, H_0 则表示只有一个目标.

H_1 假设下, 由于 $\Delta\varphi_n$ 和 $\Delta\varphi_s$ 统计独立, 故它们的和变量 $\Delta\varphi$ 的分布密度为

$$p(\Delta\varphi|H_1) = \int_{-\infty}^{\infty} p(\Delta\varphi_s, \Delta\varphi - \Delta\varphi_s) d\Delta\varphi_s$$

结合式(7)~(9), 得

$$p(\Delta\varphi|H_1) = \begin{cases} \frac{1}{\varepsilon} [\exp(\beta\varepsilon) - 1] \exp(-\beta\Delta\varphi) & , \Delta\varphi > \varepsilon \\ \frac{1}{\varepsilon} [1 - \exp(-\beta\Delta\varphi)] & , 0 < \Delta\varphi \leq \varepsilon \\ 0 & , \Delta\varphi \leq 0 \end{cases} \quad (21)$$

式中, ε 为一常量, $\varepsilon = \psi - \varphi_0$.

H_0 假设下, $\Delta\varphi$ 的分布规律由 $\Delta\varphi_n$ 决定, 即

$$p(\Delta\varphi|H_0) = \begin{cases} \beta \exp(-\beta\Delta\varphi) & , \Delta\varphi > 0 \\ 0 & , \Delta\varphi \leq 0 \end{cases} \quad \beta > 0 \quad (22)$$

综合式(21)和式(22), 得到 $\Delta\varphi$ 的似然比函数为

$$\chi(\Delta\varphi) = \frac{p(\Delta\varphi|H_1)}{p(\Delta\varphi|H_0)} = \begin{cases} \frac{\exp(\beta\varepsilon) - 1}{\beta\varepsilon} & , \Delta\varphi > \varepsilon \\ \frac{\exp(\beta\Delta\varphi) - 1}{\beta\varepsilon} & , 0 < \Delta\varphi \leq \varepsilon \end{cases} \quad (23)$$

其中, $\Delta\varphi \leq 0$ 时, $\chi(\Delta\varphi)$ 无意义.

在奈曼-皮尔逊准则下, 似然比判决为

$$\chi(\Delta\varphi) = \frac{p(\Delta\varphi|H_1)}{p(\Delta\varphi|H_0)} \stackrel{H_1}{\underset{H_0}{\gtrless}} \lambda_0 \quad (24)$$

式中, λ_0 为奈曼-皮尔逊似然比门限.

考虑到实际情况中 $\Delta\varphi > \varepsilon$ 时, 必然存在多目标, 取

$$\frac{\exp(\beta\Delta\varphi) - 1}{\beta\varepsilon} \stackrel{H_1}{\underset{H_0}{\gtrless}} \lambda_0, \quad 0 < \Delta\varphi \leq \varepsilon \quad (25)$$

两边取对数, 得

$$\Delta\varphi \stackrel{H_1}{\underset{H_0}{\gtrless}} \frac{1}{\beta} \ln(\lambda_0 \beta \varepsilon + 1) = \Delta\varphi_0 \quad (26)$$

检测统计量就是观测值 $\Delta\varphi$, $\Delta\varphi_0$ 为检测门限, 其取值决

定于虚警概率 P_F

$$P_F = \int_{\Delta\varphi_0}^{\infty} p(\Delta\varphi|H_0) d\Delta\varphi \quad (27)$$

实际中, 与能量检测门限类似, 宽度门限 $\Delta\varphi_0$ 的取值为给定虚警概率条件下单目标引起的二次包络 3dB 宽度的统计平均.

3.2 基于二次包络的方位估计

由 3.1 节可知, 本文方法可利用二次包络宽度信息检测各个二次包络谱峰对应的目标源数目是单目标或双目标. 视二次包络谱峰对应的目标数目不同, 相应的目标方位估计分两种情况:

(1) 当检测到二次包络峰由单个目标引起时, 峰值对应的方位角即为目标方位.

(2) 对落在一个二次包络峰(假设峰值对应的方位角为 θ_0) 内的两个目标的方位估计, 通过在 $(\theta_0 - \theta_0)$ 附近的二次波束束宽范围内进行二维 Capon 空间谱谱峰搜索实现^[15].

BE 方法构造的二维 Capon 谱表达式为

$$P(\theta_1, \theta_2) = \frac{1}{\mathbf{a}^H(\theta_1, \theta_2) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{a}(\theta_1, \theta_2)} \quad (28)$$

$$, \theta_1, \theta_2 \in [\theta_0 - \varphi/2, \theta_0 + \varphi/2]$$

其中, $\mathbf{R} = E[\mathbf{x}(t)\mathbf{x}^H(t)]$ 表示阵列输出的协方差矩阵, 二维扫描方向向量 $\mathbf{a}(\theta_1, \theta_2)$ 为阵列导向矢量 $\mathbf{a}(\theta_1)$ 和 $\mathbf{a}(\theta_2)$ 的线性组合

$$\mathbf{a}(\theta_1, \theta_2) = \alpha \mathbf{a}(\theta_1) + \beta \mathbf{a}(\theta_2) \quad (29)$$

式中, α, β 的取值与两个目标的相对强度有关, 当目标强度相等时, $\alpha = \beta = 1/2$

4 性能分析

本节给出了 BE 方法和现有各种多目标检测算法、宽带 DOA 估计算法在实录噪声数据下的性能对比统计结果, 并给出了千岛湖湖试结果. 水声换能器阵为布放于船体舷侧的 20 元均匀线列阵, 阵元间距为中心频率 f_0 ($f_0 = 6\text{kHz}$) 的半波长, 工作频带为 $[4\text{k} \sim 8\text{kHz}]$, 在频带内等间隔抽取 100 个频率点分别运行 BE 方法进行处理、再对处理结果进行非相干累加平均.

4.1 统计性能

对实录阵列纯噪声(舰船自噪声及环境噪声)和纯信号(无噪声背景干扰下的舰船辐射噪声) $4\text{k} \sim 8\text{kHz}$ 宽带数据进行合成, 利用幅度加权产生具有期望信噪比的统计分析数据源. 在相同目标源数目情况下, 对不同检测方法性能进行了统计, 结果如表 1 所示. 与其他宽带 DOA 估计方法角度分辨性能对比如表 2 所示. 其中, 统计次数 N 为 100 次; 虚警概率 P_F 定为 0.05; 最低可检测信噪比定义为检测概率 90% 对应的输入信噪比.

表 1 检测算法最低可检测信噪比统计比较

检测方法	快拍数	最低可检测信噪比(dB)	
		单目标	双目标
BE	1000	- 22	- 20
	5000	- 30	- 30
	10000	- 32	- 32
EGM	12800	- 18	- 20
GDE	12800	- 18	- 16
RC	12800	- 18	- 18
AIC	12800	- 10	- 16

表 2 宽带高分辨 DOA 估计算法最低可分辨信噪比统计比较

宽带 DOA 估计方法	等强双目标夹角 (中心频率 f_0 对应的波束宽度)	分辨概率 90% 对应的信噪比 (dB)	快拍数 (次)
CSS	1/2	- 11	10160
BASS ALE	1/2	- 13.5	10160
FDM	1/2	- 15	10160
TCT-MUSIC	1/2	- 13	8192
WMVDR	2/3	- 15	25600
FFD	1/2	- 21	8192
BE	2/5	- 32	10000

说明: 其中 BASS ALE 方法为 50 次统计所得结果; 其他方法均为 100 次统计。

表 3 检测试验结果记录表

检测方法	判 0 个 (次)	判 1 个 (次)	判 2 个 (次)	判 > 2 个 (次)	目标一方位均值	目标一方位方差	目标二方位均值	目标二方位方差	正确检测概率
BE	0	1	40	1	2.9	0.48	6	0.48	95%
SPED	0	42	0	0	NAN	NAN	NAN	NAN	—
EGM	0	5	30	7	2.9	2.56	15.2	3.83	71%
GDE	1	9	26	6	2.9	2.77	15.3	4.02	62%
RC	0	10	24	8	3.3	0.87	15.4	3.36	57%
AIC	3	0	6	33	3	1.55	13.7	5.75	14%

说明: EGM、GDE、RC 和 AIC 方法的目标方位估计值由宽带 MUSIC 算法给出。

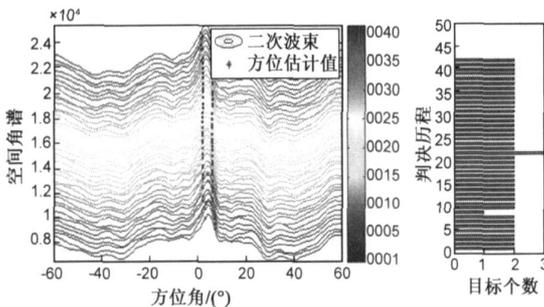


图 3 二次包络瀑布图(左)和对应的 BE 方法检测判元

上述湖试结果显示, BE 方法能够对方位夹角约为 1/2 波束宽度、目标距离约为 6km 的水下远程等强双目标进行正确检测和方位估计, 检测和估计性能优于现有方法, 具有更高的正确检测概率和更低的方位估计误差。

5 结论

本文结合船载舷侧小尺度阵被动水下目标远程探测应用需求, 提出了一种多目标检测方位估计一体化方法 (BE 方法)。该方法首先对常规波束扫描输出的二次包络进行能量检测, 再在能量检测的基础上利用二

各项对比均显示, BE 方法作为一种检测与方位估计的一体化方法在 1/2 波束宽度左右的高分辨目标检测中, 其低信噪比性能超过了目前各种目标检测或高分辨方位估计方法。且该方法基于能量检测, 检测性能逼近于匹配滤波器^[16]。

4.2 湖上试验结果

2006 年 10 月于浙江省千岛湖进行了湖上试验, 试验为远程双目标检测性能测试, 试验的主要目的是为了验证检测估计一体化算法在实际水声环境中的有效性。两目标声靶入水深度均为 8m, 距接收换能器阵距离分别为 6.1km 和 6.09km, 方位相对于接收阵列法线方向分别为 2.9° 和 6°, 两目标声靶方位夹角 3.1°, 发射信号均为实录宽带舰船辐射噪声; 接收阵列入水 8.6m, 舰船自噪声由激振器模拟实现, 接收信噪比为 - 24dB。检测结果记录由表 3 给出, 二次包络瀑布图和对应的 BE 方法检测判源数目历程如图 3 所示。

次包络谱峰宽度信息确定每个谱峰内目标源数目和进行目标方位估计, 实现单个接收波束宽度覆盖范围内多个目标的被动检测与方位估计。与其他多目标检测算法、宽带高分辨方位估计算法的性能对比表明, 在 1/2 波束宽度左右的高分辨目标检测中, 本文算法具有最好的低信噪比性能。在千岛湖湖试中利用 2m 小尺度线阵阵, 本文算法成功地对 6km 外、方位间隔约为 1/2 波束宽度的两个水下等强舰船辐射噪声源进行了被动检测和方位估计, 正确检测概率达到 95%, 方位估计误差小于 0.5°, 优于其他方法。此外, 本文算法计算复杂度低、易于实现, 具有重大工程应用前景。

参考文献:

[1] CAPON J. High resolution frequency wavenumber spectrum analysis[J]. Proceedings of the IEEE, 1969, 57 (8): 1408 - 1418.

[2] 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.

YANG Chenhui, MA Yuanliang, YANG Yixin. Peak energy detection with application to passive sonar display[J]. Applied Acoustics, 2003, 22(5): 31- 35. (in Chinese)

- [3] SCHMIDT R O. Multiple emitter location and signal parameter estimation[J] . IEEE Trans AP, 1986, 34(3) : 276– 280.
- [4] WANG H, KAVEH M. Coherent signal subspace processing for the detection and estimation of angles of arrival of multiple wide band sources[J] . IEEE Trans ASSP, 1985, 33(4) : 823– 831.
- [5] VALAEE Shahrokh, KABAL Peter. Wideband array processing using a two sided correlation transformation[J] . IEEE Trans SP, 1995, 43(1) : 160– 172.
- [6] BUCHLEY K M. Broad band signal subspace spatial spectrum (BASS- ALE) estimation[J] . IEEE Trans ASSP, 1988, 36(7) : 953– 962.
- [7] GRENIER Y. Wideband source location through frequency dependent modeling[J] . IEEE Trans SP, 1994, 42(5) : 1087– 1096.
- [8] ZOLTOWSKI M D, SILVERSTEIN S D. Beamspace root music[J] . IEEE Trans SP, 1993, 41(11) : 344– 364.
- [9] WAX M, KAILATH T. Detection of signals by information theoretical criteria[J] . IEEE Trans ASSP, 1985, 33(2) : 387– 392.
- [10] RISSANEN J. Modeling by shortest data description[J] . Automatica, 1978, 6(2) : 465– 471.
- [11] 王琨, 黄建国. 估计白噪声中正弦信号个数的比率准则方法[J] . 西北工业大学学报, 1996, 14(2) : 304– 308.
- [12] LUO Jingqing, ZHANG Zhiguo. Using eigenvalue gradient method to estimate the number of signal source[A] . YUAN Baozong. WCCG- ICSP 2000[C] . Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2000. 223– 225.
- [13] WU Hsien Tsai, YANG Jar Ferr, CHEN Fwu Kuen. Source number estimators using transformed Gerschgorin radii[J] . IEEE Trans SP, 1995, 43(6) : 1325– 1333.
- [14] VAN TREES H L. Detection, Estimation, and Modulation Theory (Part I) [M] . New York: John Wiley and Sons, 1968.
- [15] KIM II, PARK G T, LEE K K. Computationally efficient high resolution DOA estimation algorithm[J] . Electronics Letters, 2001, 37(12) : 795– 796.
- [16] URKOWITZ H. Energy detection of unknown deterministic signals[J] . Proceedings of the IEEE, 1967, 55(4) : 523– 531.

作者简介:



张立杰 男, 1981 年 7 月生于河北省石家庄市. 博士. 现为中国船舶重工集团公司第 710 研究所工程师, 主要研究方向为水声阵列信号处理、统计信号处理. 在国内外发表论文 20 余篇.
E-mail: zlj416@hotmail.com



黄建国 男, 1945 年 2 月生于湖南省长沙市. 现为西北工业大学航海学院教授、博士生导师、IEEE 西安分会主席. 长期从事水下阵列处理、现代信号处理和水声通信等方面的研究工作. 在国内外发表论文 200 多篇.
E-mail: jghuang@nwpu.edu.cn

张群飞 男, 1968 年生于浙江. 现为西北工业大学副教授, 从事阵列信号处理和计算机仿真等方面的科研工作, 发表学术论文 14 篇.