

一种基于目标特征的相干弱目标 DOA 估计方法

邵 游^{1,2}, 刘福臣^{1,2}, 郑广赢^{1,2}

(1. 声纳技术重点实验室, 浙江杭州 310000;

2. 杭州应用声学研究所, 浙江杭州 310000)

A coherent weak target DOA estimation method based on target features

SHAO You^{1,2}, LIU Fu-chen^{1,2}, ZHENG Guang-ying^{1,2}

(1. Science and Technology on Sonar Laboratory, Hangzhou 310000, Zhejiang, China;

2. Hangzhou Applied Acoustics Research Institute, Hangzhou 310000, Zhejiang, China)

0 引 言

常规波束形成因具有有很好的宽容性, 已经成为目标方位估计目标信号提取的经典算法, 但缺点是分辨率较低, 不能很好的分辨弱目标信号。常用的最小方差无失真响应(MVDR)算法是一种经典的高分辨波束形成算法, 但是不能有效的分辨相干信号, 尤其是弱目标信号^[1]。本文针对上述问题提出了一种基于目标特征的相干弱目标 DOA 估计方法。

1 常规波束形成以及最小方差无失真响应波束形成

1.1 常规波束形成 (CBF)

常规波束形成是阵列信号处理中经典傅里叶变换为基础的谱分析的扩展, 假设信号从 θ 角入射, $s(t)$ 为声源信号, $a(\theta)$ 为驾驶向量, $n(t)$ 为高斯白噪声, 则阵列接收到的信号 $x(t)$ 可以表示为

$$x(t) = a(\theta)s(t) + n(t) \quad (1)$$

最大化能量输出可以用公式表示为

$$\begin{aligned} & \max_m E \{ w^H x(t) x^H(t) w \} \\ & = \max_m w^H E \{ x(t) x^H(t) \} w \\ & = \max_m \left\{ E |s(t)|^2 |w^H a(\theta)|^2 + \sigma^2 |w|^2 \right\} \end{aligned} \quad (2)$$

其中假设空间噪声为白噪声, 为了得到非零解, 我们一般加上约束条件 $|w|=1$, 那么可以得到如下结果

$$w = \frac{a(\theta)}{\sqrt{a^H(\theta)a(\theta)}} \quad (3)$$

上述加权向量可以理解为一个空间滤波器, 对入射信号进行空间滤波。从结果可以看出该加权向量其实就是一个驱动向量。将加权向量代入阵列空间谱估计公式, 得到阵列的总输出即常规波束形成能量输出为

$$P(\theta) = \frac{a^H(\theta) R a(\theta)}{a^H(\theta) a(\theta)} \quad (4)$$

式中 R 是信号的协方差矩阵。

1.2 最小方差无失真响应波束形成 (MVDR)

为了使阵列在信号入射方向响应为 1 而整个波束输出功率最小, 这个准则与最小方差无偏估计的要求是等价的。在该准则下得到最小方差无失真响应 (Minimum Variance Distortionless Response, MVDR) 波束形成器。它最早由 Capon 导出, 所以也称为 Capon 波束形成器^[2]。该约束优化条件可以表示为

当 $w^H a(\theta) = 1$ 时, $w^H R w$ 最小

该约束优化问题可以求解得

$$w_{opt} = \frac{R^{-1} a(\theta)}{a(\theta)^H R^{-1} a(\theta)} \quad (5)$$

将加权向量代入阵列空间谱估计公式, 得到阵列的总输出即常规波束形成能量输出为

$$P = \frac{1}{a(\theta)^H R^{-1} a(\theta)} \quad (6)$$

收稿日期: 2019-07-01; 修回日期: 2019-08-01

作者简介: 邵游(1991—), 男, 浙江建德人, 硕士, 研究方向为阵列信号处理。

通讯作者: 刘福臣, E-mail: fuchen-liu@163.com

2 基于相干信号特征的弱目标 DOA 估计方法 (target-BF)

针对多个相干目标且目标信号强弱差别明显的情况, 本节提出了一种基于相干信号特征的弱目标 DOA 估计方法。该方法首先通过常规波束形成提取某一强目标的单波束数据, 得到该方向目标的协方差矩阵

$$R_{s1+n} = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L X_{i+n} X_{i+n}^H \quad (7)$$

其中 R_{s1+n} 是混合噪声的强目标信号协方差矩阵, 并对其进行约束优化, 数学表达式如下所示

$$\text{Min } w^H R_{s1+n} w \text{ s.t. } w^H a(\theta) = 1$$

利用拉格朗日乘子法解这一最优化问题, 可求得最优权矢量为

$$w_{opt} = \frac{R_{s1+n}^{-1} a(\theta)}{a(\theta)^H R_{s1+n}^{-1} a(\theta)} \quad (8)$$

将最优权矢量带入空间功率谱计算公式, 可以得到新的空间谱估计函数

$$P = \left(\frac{R_{s1+n}^{-1} a(\theta)}{a(\theta)^H R_{s1+n}^{-1} a(\theta)} \right)^H R_x \frac{R_{s1+n}^{-1} a(\theta)}{a(\theta)^H R_{s1+n}^{-1} a(\theta)} \quad (9)$$

其中 R_x 为多个相干信号和噪声混合的协方差矩阵。

具体流程如下所示



3 仿真以及试验数据分析

取一段 20 阵元的均匀线阵, 阵元间隔为半波长, 信号为窄带远场信号, 噪声为均值为 0, 方差为 1 的高斯白噪声。假设干扰与信号为相同频段的窄带信号, 中心频率为 1500Hz, 信号 1 从 -45° 方向入射, 信噪比为 10dB, 信号 2 从 45° 方向入射, 信噪比为 -10dB。下面通过 Matlab 仿真比较 CBF, MVDR 和基于相干信号特征的方法 (target-BF) 对相干弱信号的分辨能力。从图 1 中可以看出 MVDR 对相干信号的分辨能力最弱, CBF 次之, 而基于目标特征的方法能够有效的分辨弱相干信号, 为了进一步验证该方法的性能, 将信号 2 信噪比改为

-30dB, 得到如下对比图 2。

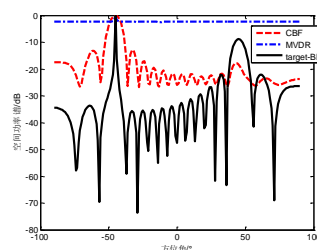


图 1 目标 2 信噪比为 -10dB 情况下三种方法对比图
Fig.1 Comparison of three methods when target2 SNR is -10 dB

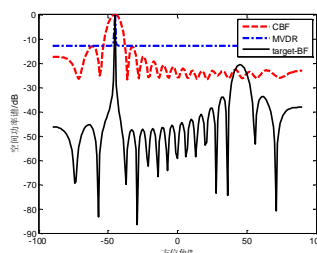


图 2 目标 2 信噪比为 -30dB 情况下三种方法对比图
Fig.2 Comparison of three methods when target2 SNR is -30 dB

从图 2 中可以看出当目标 2 信噪比为 -30dB 时, 基于目标特征的方法仍能有效的分辨弱相干信号, 且效果远远优于常规波束形成以及 MVDR 方法。

取平面阵湖试数据处理, 共有 12×24 个阵元, 采样频率为 24kHz, 发射信号为 2kHz 的单频脉冲信号。该数据包含两路相干信号, 一路信号为直达波另一路为较弱的船底反射波, 利用基于目标特征处理方法结果如下所示, 图中可以看出该方法在实际数据处理中也有较好的效果。

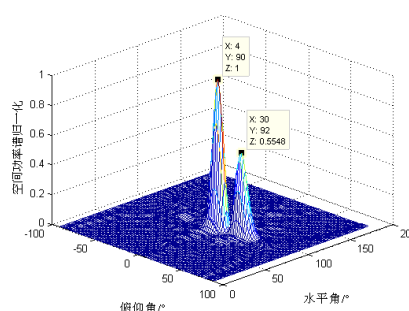


图 3 实际数据处理结果
Fig.3 Actual data processing results

参 考 文 献

- [1] Krim H, Viberg M. Two decades of array signal processing research: the parametric approach[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 1996, 13(4):67-94.
- [2] Krim H, Viberg M. Two decades of array signal processing research: the parametric approach[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 1996, 13(4):67-94.
- [3] 王永良. 空间谱估计理论与算法[M]. 清华大学出版社, 2004.