

冲击噪声背景下一种稳健自适应波束形成算法

杨磊¹, 马杰²

1. 中国矿业大学徐海学院计算机科学与技术系, 江苏徐州 221008

2. 徐州师范大学现代教育技术中心, 江苏徐州 221000

摘要 针对冲击噪声背景下, 常规波束形成算法性能下降的问题, 本文提出了一种适用于任意未知统计特性的代数拖尾冲击噪声环境下的基于归一化的线性约束正交投影(NLCOP)算法。该算法通过对输入信号进行无穷范数归一化, 使变换信号的协方差矩阵在代数拖尾的冲击噪声环境下存在且有界, 将自适应权矢量约束于噪声子空间, 提高了波束形成器在冲击噪声背景下的性能。NLCOP 算法无需噪声特征指数的先验信息, 具有更低的副瓣电平且干扰抑制能力强。仿真结果验证了该算法的有效性。

关键词 稳健自适应波束形成; 线性约束正交投影; 分数低阶矩; 冲击噪声

中图分类号 TN911.7

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.36.010

An Algorithm of Robust Adaptive Beamforming under the Background of Heavy-tailed Impulsive Noise

YANG Lei¹, MA Jie²

1. Xuhai College, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, Jiangsu Province, China

2. Modern Education Technology Center, Xuzhou Normal University, Xuzhou 221000, Jiangsu Province, China

Abstract In order to solve the performance degradation of conventional beamformer algorithm under the background of heavy-tailed impulsive noises, a new beamforming approach to combat the arbitrary unknown heavy-tailed impulsive noises of unknown statistics is presented. The new approach, named by Normalized Linearly Constrained Orthogonal Projection (NLCOP) algorithm, is formulated to minimize the noise power of the beamformer's output subject to a pre-specified set of linear constraints. For improving the performance of the beamformer under the background of heavy-tailed impulsive noise of unknown statistics, the new algorithm puts the weighting vector to the noise subspace after the input signal being infinity norm snapshot normalized which makes the second-order-statistics of the input signal existence and bounded. This proposed algorithm does not need prior information or estimation of the impulsive noise's effective characteristic exponent's numerical value, and offers lower sidelobe and better interference-rejection. Simulation results show the effectiveness of the proposed algorithm.

Keywords robust adaptive beamforming; linearly constrained orthogonal projection; fractional lower order moment; impulsive noise

0 引言

自适应波束形成技术作为阵列信号处理的重要分支, 在雷达、探测、通信系统等诸多领域有着广泛的应用。其中, 线性约束正交投影(LCOP)算法以其优良的特性受到广泛关注。在具有代数拖尾概率密度函数的冲击噪声环境下, 由于代数拖尾比高斯分布的指数递减拖尾更长, 且仅存在有限的 p 阶矩($p < \alpha \leq 2$), 而 LCOP 算法需要利用接收信号的协方差矩阵,

即信号的二阶统计量, 因此常规 LCOP 不适用于冲击噪声环境。

针对冲击噪声环境下波束形成性能下降的问题, 文献[1]—[3]利用最小分数低阶矩(FLOM)原理, 分别提出基于 FLOM 的波束形成算法。然而, 基于 FLOM 的算法需要已知 α 的先验信息或估计值, 并且假设噪声的特征指数 α 大于等于算法的分数阶数 p , 在实际应用中, 噪声的特征指数是不可能知道

收稿日期: 2010-12-15; 修回日期: 2011-12-22

作者简介: 杨磊, 讲师, 研究方向为计算机通讯与物联网传输, 电子邮箱: xuhaiyl@163.com; 马杰(通信作者), 讲师, 研究方向为计算机通讯与物联网传输, 电子邮箱: wenlonglily@163.com

的,这就需要进行参数估计。文献[4]、[5]以几何功率为目标函数,提出基于对数矩的波束形成算法,这类算法在噪声模型与假设模型不一致时,性能迅速下降。文献[6]、[7]提出的归一化波束形成算法,适用于任意冲击噪声。

本文在文献[6]、[7]基础上提出一种基于归一化的线性约束正交投影(NLCOP)算法。该算法通过对输入信号进行无穷范数归一化,使变换信号的二阶统计量在代数拖尾的冲击噪声环境下存在且有界,然后将自适应权矢量约束于噪声子空间,提高了波束形成器在冲击噪声背景下的性能,且适用于任意分布噪声模型。

1 信号模型

考虑间距为 d 的 N 个阵元的均匀线阵,各阵元均为全向阵元,方向 $(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_M)$ 的 M 个远场窄带非相干信号入射到阵列,则阵列接收数据 \mathbf{x} 可以表示为

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{A}\mathbf{s}(t) + \mathbf{n}(t) \quad (1)$$

其中阵列接收信号矢量、空间信号矢量、噪声矢量分别为

$$\mathbf{x}(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_N(t)]^T \quad (2)$$

$$\mathbf{s}(t) = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_M(t)]^T \quad (3)$$

$$\mathbf{n}(t) = [n_1(t), n_2(t), \dots, n_N(t)]^T \quad (4)$$

阵列的流形矩阵为

$$\mathbf{A} = [\mathbf{a}(\theta_1), \mathbf{a}(\theta_2), \dots, \mathbf{a}(\theta_M)] \quad (5)$$

其中 $\mathbf{a}(\theta_m) = [1, e^{j2\pi d \sin(\theta_m)/\lambda}, \dots, e^{j2(N-1)\pi d \sin(\theta_m)/\lambda}]^T$ 为 θ_m 方向信号的导向矢量。

假设信号与噪声互不相关,波束形成加权矢量为 $\boldsymbol{\omega}$,则波束形成的输出为

$$\mathbf{y}(t) = \boldsymbol{\omega}^H \mathbf{x}(t) \quad (6)$$

波束形成输出总功率为

$$E\{\mathbf{y}(t)\mathbf{y}^H(t)\} = \boldsymbol{\omega}^H \mathbf{R}_x \boldsymbol{\omega} \quad (7)$$

这里 $\mathbf{R}_x = E\{\mathbf{x}(t)\mathbf{x}^H(t)\}$ 是阵列输入信号的二阶统计量。

2 基于归一化的线性约束正交投影波束形成器

2.1 线性约束正交投影波束形成器

LCMV 波束形成器为

$$\begin{aligned} \min \quad & \boldsymbol{\omega}^H \mathbf{R}_x \boldsymbol{\omega} \\ \text{st} \quad & \boldsymbol{\omega}^H \mathbf{C} = \mathbf{f}^H \end{aligned} \quad (8)$$

其中 \mathbf{C} 是约束矩阵 \mathbf{f} 是对应的约束响应矢量。问题(8)的解为 LCMV 加权矢量:

$$\boldsymbol{\omega}_{\text{LCMV}} = \mathbf{R}_x^{-1} \mathbf{C} (\mathbf{C}^H \mathbf{R}_x^{-1} \mathbf{C})^{-1} \mathbf{f} \quad (9)$$

对 \mathbf{R}_x 进行特征值分解^[8],得

$$\mathbf{R}_x^{-1} = \sum_{i=1}^m (\lambda_i + \lambda_\sigma)^{-1} \mathbf{e}_i \mathbf{e}_i^H + \lambda_\sigma^{-1} \sum_{i=m+1}^N \mathbf{e}_i \mathbf{e}_i^H \quad (10)$$

其中 $\mathbf{e}_i, \lambda_i (i=1, 2, \dots, N)$ 分别为 \mathbf{R}_x 的特征矢量与特征值。在干噪比(INR)较大情况下,干扰特征值 λ_i 远远大于噪声特征值 λ_σ ,故 \mathbf{R}_x^{-1} 可近似表示为

$$\mathbf{R}_x^{-1} \approx \lambda_\sigma^{-1} \sum_{i=m+1}^N \mathbf{e}_i \mathbf{e}_i^H = \lambda_\sigma^{-1} \mathbf{U}_n \mathbf{U}_n^H \quad (11)$$

其中, $\mathbf{U}_n = (\mathbf{e}_{m+1}, \mathbf{e}_{m+2}, \dots, \mathbf{e}_N)$ 为 $N \times (N-m)$ 阶的半酉矩阵。

将式(11)代入式(9)并整理可得,LCOP 自适应权矢量 $\boldsymbol{\omega}_{\text{LCOP}}$ 为

$$\boldsymbol{\omega}_{\text{LCOP}} = \beta \mathbf{U}_n \mathbf{U}_n^H \mathbf{C} (\mathbf{C}^H \mathbf{U}_n \mathbf{U}_n^H \mathbf{C})^{-1} \mathbf{f} \quad (12)$$

其中 β 是一常数。

传统的 LCOP 算法是基于二阶统计量发展而来的,而在代数拖尾的冲击噪声环境下,信号的二阶统计量 \mathbf{R}_x 并不存在,因此传统的 LCOP 算法不能适用。

2.2 线性约束正交投影波束形成算法

本文提出基于归一化的线性约束正交投影(NLCOP)波束形成算法,该算法在 LCOP 结构中用归一化采样信号来代替原始采样信号,归一化采样信号定义为瞬时自适应无穷范数快拍归一化信号^[9],无穷范数快拍归一化信号的二阶统计量在代数拖尾的冲击噪声环境下可以证明是存在且有界的^[9],因此,NLCOP 算法可以应用于任意代数拖尾的冲击噪声环境下。

用 $\aleph(\mathbf{x}(t))$ 表示瞬时自适应无穷范数快拍归一化信号^[10],其表达式为

$$\aleph(\mathbf{x}(t)) = \frac{\mathbf{x}(t)}{\max\{|x_1(t)|, |x_2(t)|, \dots, |x_L(t)|\}} \quad (13)$$

则归一化协方差矩阵为

$$\boldsymbol{\Omega} = E\{\aleph(\mathbf{x}(t)) \aleph(\mathbf{x}(t))^H\} \quad (14)$$

对 $\boldsymbol{\Omega}$ 进行特征分解,得

$$\boldsymbol{\Omega} = \mathbf{V}_s \boldsymbol{\Lambda}_s \mathbf{V}_s^H + \mathbf{V}_n \boldsymbol{\Lambda}_n \mathbf{V}_n^H \quad (15)$$

其中, $\mathbf{V}_s, \mathbf{V}_n$ 分别为 $\boldsymbol{\Omega}$ 的干扰子空间和噪声子空间的矩阵表示,则 NLCOP 算法的加权矢量为

$$\boldsymbol{\omega}_{\text{NLCOP}} = \mathbf{V}_n \mathbf{V}_n^H \mathbf{C} (\mathbf{C}^H \mathbf{V}_n \mathbf{V}_n^H \mathbf{C})^{-1} \mathbf{f} \quad (16)$$

采用采样协方差矩阵求逆算法(SMI)估计 $\boldsymbol{\Omega}^{[11]}$,通过 M 次快拍数据估计得到

$$\hat{\boldsymbol{\Omega}} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \aleph(\mathbf{x}_m) \aleph(\mathbf{x}_m)^H \quad (17)$$

对 $\hat{\boldsymbol{\Omega}}$ 进行特征分解,得

$$\hat{\boldsymbol{\Omega}} = \hat{\mathbf{V}}_s \hat{\boldsymbol{\Lambda}}_s \hat{\mathbf{V}}_s^H + \hat{\mathbf{V}}_n \hat{\boldsymbol{\Lambda}}_n \hat{\mathbf{V}}_n^H \quad (18)$$

因此,基于 SMI 自适应算法的 NLCOP 算法的加权矢量为

$$\boldsymbol{\omega}_{\text{NLCOP}} = \hat{\mathbf{V}}_n \hat{\mathbf{V}}_n^H \mathbf{C} (\mathbf{C}^H \hat{\mathbf{V}}_n \hat{\mathbf{V}}_n^H \mathbf{C})^{-1} \mathbf{f} \quad (19)$$

NLCOP 算法没有特定的噪声模型,适用于任意分布噪声,与传统 LCOP 算法的区别是,归一化信号的二阶统计量在上述噪声环境中是存在且有界的。

3 仿真及性能分析

本节在两种不同冲击噪声环境下比较 NLCOP 算法与传统的 LCOP 算法以及基于 FLOM 的 LCMV 算法的性能。独立蒙特卡罗仿真实验次数均为 500 次,每次试验中快拍数均为 $N=200$ ^[12]。基于 FLOM 的算法采用迭代重加权最小二乘算法进行计算,基于 FLOM 算法的参数 $p=1$ 。仿真中,假设阵列为 24 阵元的等距线阵,阵元间距 $d=\lambda/2$,期望信号方向为 0° ,2 个干扰信号方向分别为 -10° 和 25° ,噪声为空时独立同分布,

干扰噪声比均为 30dB。

考虑空间噪声为 α S α S 冲击噪声,噪声特征指数 $\alpha=1$ 。图 1 为 α S α S 冲击噪声背景下传统 LCOP 算法、基于 FLOM 的 LCMV 算法以及 NLCOP 算法的方向图对比。从图 1 可以看出,传统 LCOP 算法的方向图虽具有低的副瓣但却无法在干扰信号方向形成零陷,基于 FLOM 的 LCMV 算法方向图虽可形成零陷但却具有较高的副瓣,而本文提出的 NLCOP 算法的方向图具有更低副瓣电平,平均达到 -30dB,更接近静态方向图的副瓣特征,而且具有更深的零陷,零陷深度达 -43dB,性能优于传统 LCOP 算法和基于 FLOM 的 LCMV 算法。

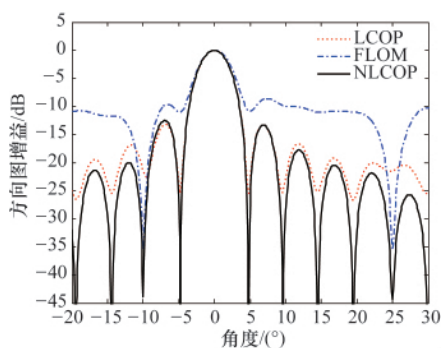


图 1 α S α S 冲击噪声背景下不同波束形成算法的性能
 Fig. 1 Beam patterns of various beamformers under the background of α S α S noise

考虑空间噪声为稳定-高斯混合噪声,噪声特征指数 $\alpha=1.2$ 。图 2 为稳定-高斯混合分布冲击噪声背景下传统 LCOP 算法、基于 FLOM 的 LCMV 算法以及 NLCOP 算法的方向图对比。从图 2 可以看出,本文提出的 NLCOP 算法的方向图与传统 LCOP 算法和基于 FLOM 的 LCMV 算法相比,副瓣电平更低,更接近静态方向图的副瓣特征,且具有更深的零陷,零陷深度达 -45dB。然而,LCOP 算法的方向图无法在干扰信号方向形成零陷,基于 FLOM 的 LCMV 算法方向图具有较高的副瓣,所以 NLCOP 算法性能优于传统 LCOP 算法和基于 FLOM 的 LCMV 算法。

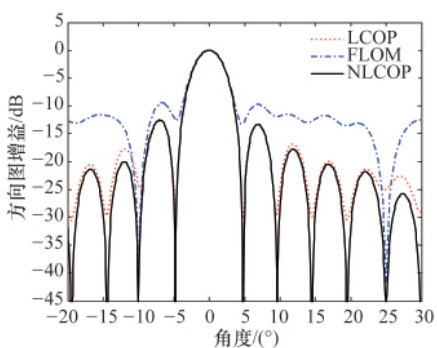


图 2 稳定-高斯混合分布冲击噪声背景下不同波束形成算法的性能
 Fig. 2 Beam patterns of various beamformers under the background of stable-Gaussian-mixture noise

4 结论

本文提出的 NLCOP 算法,通过将输入信号进行无穷范数归一化,同时把自适应权矢量约束于噪声子空间,提高了波束形成器在冲击噪声背景下的性能。NLCOP 算法适用于任意代数拖尾的冲击噪声环境,具有计算更简单、不需要噪声特征指数的先验信息或估计、适用于更广的冲击噪声环境、干扰抑制能力更强、副瓣电平更低等优点。

参考文献 (References)

- [1] Kannan B, Fitzgerald W J. Beamforming in additive α -stable noise using fractional lower statistics (FLOS) [J]. *IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems*, 1999, 3: 1755-1758.
- [2] Taskalides P, Nikias C L. Robust space-time adaptive processing (STAP) in non-Gaussian clutter environments [J]. *IEEE Proceedings-Radar, Sonar, Navigation*, 1999, 146(2): 84-93.
- [3] 何劲,刘中. 脉冲噪声环境中稳健的自适应波束形成算法 [J]. *电子学报*, 2006, 34(3): 464-468.
He Jin, Liu Zhong. *Acta Electronica Sinica*, 2006, 34(3): 464-468.
- [4] He J, Liu Z, Wong K T. Linearly constrained minimum-"Geometric Power" adaptive beamforming using logarithmic moments of data containing heavy-tailed noise of unknown statistics [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2007, 6: 600-603.
- [5] 何劲,刘中. 冲击噪声环境中最小"几何功率"误差波束形成算法 [J]. *电子学报*, 2008, 36(3): 510-515.
He Jin, Liu Zhong. *Acta Electronica Sinica*, 2008, 36(3): 510-515.
- [6] 李洪涛,顾陈,朱晓华,等. 冲击噪声背景下归一化广义旁瓣相消器 [J]. *南京理工大学学报:自然科学版*, 2011, 35(5): 677-680.
Li Hongtao, Gu Chen, Zhu Xiaohua, et al. *Journal of Nanjing University of Science and Technology: Natural Science Edition*, 2011, 35(5): 677-680.
- [7] 李洪涛,贺亚鹏,朱晓华,等. 冲击噪声背景下基于归一化的线性约束特征干扰相消器 [J]. *信号处理*, 2011, 27(5): 795-799.
Li Hongtao, He Yapeng, Zhu Xiaohua, et al. *Signal Processing*, 2011, 27(5): 795-799.
- [8] He J, Liu Z. Linearly constrained minimum-normalised variance beamforming against heavy-tailed impulsive noise of unknown statistics [J]. *IET Radar, Sonar and Navigation*, 2008, 2(6): 449-457.
- [9] 王永良,丁前军,李荣锋. 自适应阵列处理 [M]. 北京:清华大学出版社, 2009.
Wang Yongliang, Ding Qianjun, Li Rongfeng. *Adaptive array processing* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009.
- [10] 顾陈,何劲,朱晓华. 冲击噪声背景下基于最小均方归一化误差的波束形成算法 [J]. *电子学报*, 2010, 38(6): 1-5.
Gu Chen, He Jin, Zhu Xiaohua. *Acta Electronica Sinica*, 2010, 38(6): 1-5.
- [11] 顾陈,何劲,王克让,等. 任意分布冲击噪声背景下基于 ESPRIT 的 DOA 估计方法 [J]. *南京理工大学学报:自然科学版*, 2009, 33(6): 785-789.
Gu Chen, He Jin, Wang Kerang, et al. *Journal of Nanjing University of Science and Technology: Natural Science Edition*, 2009, 33(6): 785-789.
- [12] 刘桂瑜,廖桂生,陶海红. 一种样本污染且快拍数有限情况下的稳健的波束形成方法 [J]. *电子与信息学报*, 2009, 31(1): 192-195.
Liu Guiyu, Liao Guisheng, Tao Haihong. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, 31(1): 192-195.

(责任编辑 马宇红,代丽)