

基于二阶统计量的盲波束形成方法¹

冯大政 保 铮 史维祥*

(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室 西安 710071)

*(西安交通大学 西安 710049)

摘 要 为了恢复二阶统计独立的源信号, 本文给出一种基于二阶统计量的盲波束形成方法。这个方法是基于二阶统计独立的源信号之间统计互不相关的特性, 此方法适用于任意流形阵列的盲波束形成。除了要求噪声是白色的外, 源信号必须是有色的随机信号或确定信号。没有必要估计波达方向。在源信号估计中, 此方法使信号与干扰加上噪声之比达到了最大。与累积量基方法相比, 这个方法的最突出优点有: 方法简单, 运算量少以及二阶相关矩阵易鲁棒地估计, 因此更适合于在移动通信中应用。

关键词 二阶统计量, 盲波束形成, ESPRIT 方法

中图分类号 TN911.7

1 引言

传统波束形成方法和方向估计方法常被称为阵列结构方法, 这类方法的突出特点是须知道阵列流形^[1]。另一大类方法是信号特征方法, 近年来它受到了越来越多的重视^[2-4]。信号特征方法是利用信号特性的先验知识进行阵列响应估计。假设信号是正弦波或是正交的信号, 可以实现阵列响应的盲估计。

本文利用信号的二阶统计特性进行盲波束形成。由于信号是统计不相关的, 通过适当延时信号形成等价的虚拟子阵的输出, 然后用 ESPRIT 方法估计阵列响应, 最后用最大似然法估计源信号。注意用最大似然法估计源信号比用波束形成恢复的信号要准确和鲁棒。

为了盲估计阵列的响应, 本文对源信号和干扰作出如下假设: (1) 源信号之间互不相关且源信号与干扰互不相关; (2) 源信号是有色的宽平稳信号, 干扰是白色的噪声; (3) 阵列对来自不同方向上的信号有不同的响应。

2 信号模型

假设由 M 个阵元组成的阵列具有任意阵列流形和未知的响应。在时刻 t , 阵列收到的信号是

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

其中 $\mathbf{r}(t) = [r_1(t), \dots, r_M(t)]^T$, $\mathbf{s}(t) = [s_1(t), \dots, s_P(t)]^T$, 且 $E\{\mathbf{s}(t)\} = 0.0$ 和 $E\{\mathbf{s}(t)\mathbf{s}^H(t)\} = \Lambda$, Λ 是对角矩阵, $\mathbf{n}(t)$ 是统计独立的白噪声矢量, \mathbf{A} 是阵列响应矩阵。我们的目标是设计盲波束形成器以恢复源信号。

3 算法

3.1 第一步阵列响应矩阵的估计 首先选定两个适当的延时时间 τ_1 和 τ_2 (称为延时对), 然后作如下时域相关矩阵。

$$\mathbf{R}(\tau_1) = E\{\mathbf{r}(t + \tau_1)\mathbf{r}^H(t)\} \quad (2)$$

$$\mathbf{R}(\tau_2) = E\{\mathbf{r}(t + \tau_2)\mathbf{r}^H(t)\}. \quad (3)$$

¹ 1998-05-18 收到, 1999-04-26 定稿

国家自然科学基金资助项目 (No.69972037) 和国家部级基金资助 (99J7.2.1.DZ0118)

由于源信号与源信号之间以及与干扰之间互不相关, 并且干扰为白色噪声, 所以 (3) 和 (4) 式进一步可以表示成

$$\mathbf{R}(\tau_1) = \mathbf{A}\Lambda(\tau_1)\mathbf{A}^H, \quad (4)$$

$$\mathbf{R}(\tau_2) = \mathbf{A}\Lambda(\tau_2)\mathbf{A}^H, \quad (5)$$

其中 $\Lambda(\tau_1)$ 和 $\Lambda(\tau_2)$ 为对角矩阵。利用 (4) 和 (5) 式, 可以估计出阵列响应的方向, 但不能确定比例复常数和源信号的排列顺序^[5]。阵列响应矢量的估计是建立在 ESPRIT 算法基础上^[4,6]。

在 ESPRIT 算法中, 由奇异值分解 (SVD) 估计信号子空间, 并进一步由特征值分解 (EVD) 确定对角矩阵 $D = \Lambda^{-1}(\tau_1)\Lambda(\tau_2)$ 和阵列响应矩阵。如何利用 ESPRIT 方法确定阵列响应矩阵, 请参考文献 [4]。计算步骤总结如下:

步骤 1 从 $M \times 1$ 阵列数据矢量估计相关矩阵:

$$\hat{\mathbf{R}}(\tau_1) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mathbf{r}(t_i)\mathbf{r}^H(t_i + \tau_1), \quad (6)$$

$$\hat{\mathbf{R}}(\tau_2) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mathbf{r}(t_i)\mathbf{r}^H(t_i + \tau_2), \quad (7)$$

其中 N 为快拍数, 将 $\hat{\mathbf{R}}(\tau_1)$ 和 $\hat{\mathbf{R}}(\tau_2)$ 扩展成 $2M \times M$ 矩阵 $\mathbf{C} \triangleq \begin{bmatrix} \mathbf{R}(\tau_1) \\ \mathbf{R}(\tau_2) \end{bmatrix}$ 。

步骤 2 对 \mathbf{C} 执行 SVD, 取前 P 个显著大的奇异值所对应的奇异矢量张成信号子空间, 则 P 为信号数目的估计值。令 \mathbf{C} 的前 P 个左奇异矢量和右奇矢量组成的矩阵依次为 \mathbf{U}_1 和 \mathbf{V}_1 。

步骤 3 分解 \mathbf{U}_1 成两个 $M \times P$ 矩阵 \mathbf{U}_{11} 和 \mathbf{U}_{12} , 即 $\mathbf{U}_1 = \begin{bmatrix} \mathbf{U}_{11} \\ \mathbf{U}_{12} \end{bmatrix}$ 。

步骤 4 计算 $\mathbf{F} = \mathbf{U}_{11}^+ \mathbf{U}_{12} = (\mathbf{U}_{11}^H \mathbf{U}_{11})^{-1} \mathbf{U}_{11}^H \mathbf{U}_{12}$ 是一个 $P \times P$ 矩阵。

步骤 5 执行 \mathbf{F} 的特征分解, $\mathbf{F} = \mathbf{T}\mathbf{D}\mathbf{T}^{-1}$, 得到 \mathbf{T} 和 \mathbf{D} , 其中 $\mathbf{D} = \Lambda^{-1}(\tau_1)\Lambda(\tau_2)$ 。

步骤 6 由 $\mathbf{A}\Lambda(\tau_1) = \mathbf{U}_{11}\mathbf{T}$ 和 $\mathbf{A} = \mathbf{V}_1(\mathbf{T}^{-1}\mathbf{D})^H$ 估计 $\Lambda(\tau_1)$, 并进一步确定 $\Lambda(\tau_2)$, 其中 Σ 是前 P 个奇异值组成的对角矩阵。

步骤 7 阵列响应矩阵的估计是

$$\mathbf{A} = \frac{1}{3} (\mathbf{U}_{11}\mathbf{T}\Lambda^{-1}(\tau_1) + (\mathbf{U}_{12}\mathbf{T}\Lambda^{-1}(\tau_2) + \mathbf{V}_1(\mathbf{T}^{-1}\mathbf{D})^H))。$$

3.2 第二步利用最大似然法估计源信号 有了阵列响应矩阵的估计, 利用最大似然法估计出源信号为

$$\mathbf{u}(t) = (\mathbf{A}^H\mathbf{A})^{-1}\mathbf{A}^H\mathbf{r}(t). \quad (8)$$

这个估计信号比波束形成器恢复的信号要准确。

我们的方法很类似文献 [4] 中的方法, 但有以下几点不同: (1) 实现虚拟子阵的方法不同, 在文献 [4] 中至少需要两个完全一致的阵元, 严格讲在文献 [4] 中的方法不是盲的, 我们通过时间平移实现虚拟子阵; (2) 我们的阵列响应估计式是三项平均, 文献 [4] 中的阵列响应估计式是二项平均; (3) 在本文中的不相关信号容易实现但噪声模型有偏离实际之处, 而在文献 [4] 中的完全独立信号不易实现但噪声模型更具有一般性; (4) 本文可以选择多个延时以改进阵列响应的估计, 而文献 [4] 通过选择多个累积量对改进阵列响应的估计, 这就要求有更多一致的阵元对; (5) 我们用最大似然法估计源信号, 而文献 [4] 用波束形成恢复信号。

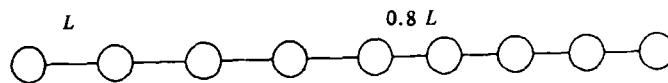


图 1 非均匀阵列

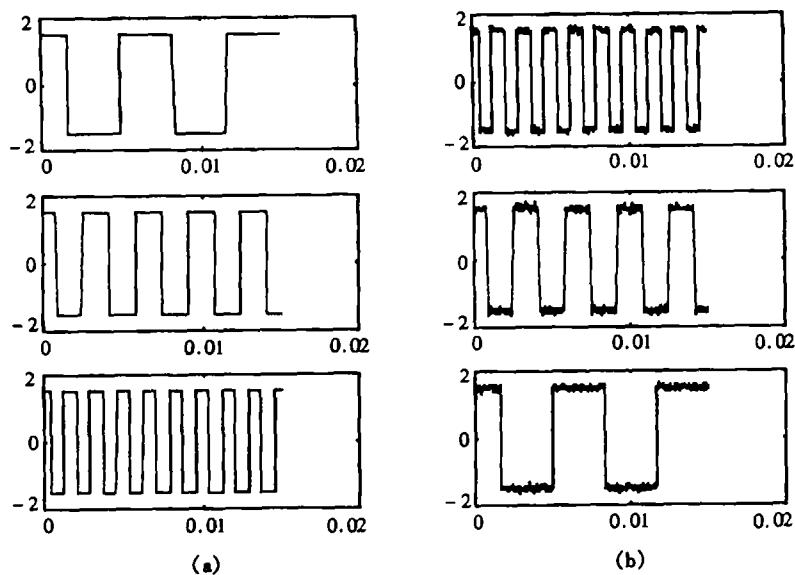


图 2 (a) 源信号; (b) 源信号的估计

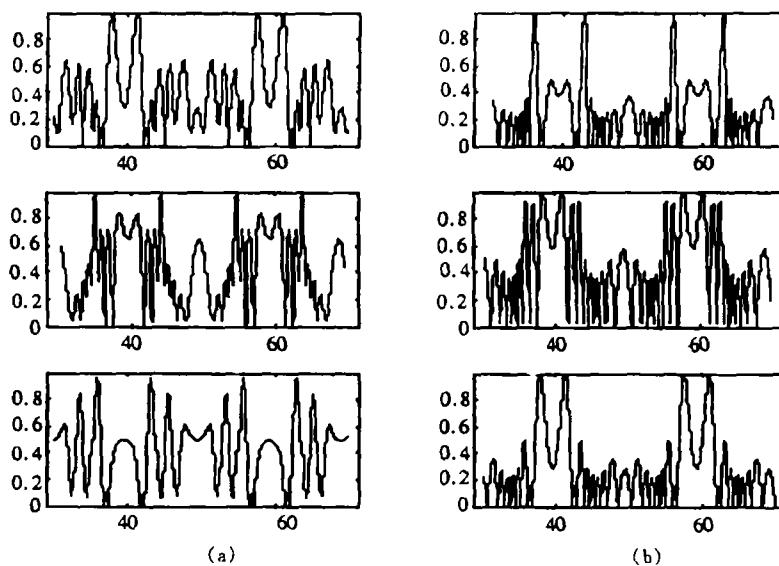


图 3 (a) 传统最小方差波束形成器的方向图 (b) 本文波束形成器的方向图

4 结果和讨论

三个独立的方波信号入射到如图 1 所示非均匀线阵上。第一个方波信号 $s_1(t) = 1.5\text{sign}[\cos(150t)]$ 的入射角为 40° ，第二个方波信号 $s_2(t) = 1.5\text{sign}[\cos(300t)]$ 的入射角为 50° ，第三个方波信号 $s_3(t) = 1.5\text{sign}[\cos(600t)]$ 的入射角为 60° 。取 3000 次快拍。利用以上算法恢复的源信号如图 2 所示。传统最小方差波束形成器和本文波束形成器的方向图如图 3(a) 和 3(b) 所示。可见此方法取得了较好的结果。

参 考 文 献

- [1] Monzingo R A, Miller T W. Introduction to Adaptive Arrays. New York: Wiley, 1980, 25-200.
- [2] Cardoso J F, Souloumiac A. Blind beamforming for nonGaussian signals. IEE Proc.-F, 1993, 140(2): 362-370.
- [3] Tong L, Inouge Y, Liu R. Waveform preserving blind estimation of multiple independent sources. IEEE Trans. on Signal Processing, 1993, 41(10): 2461-2470.
- [4] Gonen E, Mendel J M. Applications of cumulants to array processing Part III: Blind beamforming for coherent signal. IEEE Trans. on Signal Processing, 1997, 45(9): 2252-2264.
- [5] Tong L, Soon V, Huang Y F, Liu R. Indeterminacy and identifiability of blind identification. IEEE Trans. on Circuits & Syst. 1991, 38(3): 499-509.
- [6] Ray R, Kailath T. ESPRIT-estimation of signal parameters via rotational invariance techniques. Opt. Eng., 1990, 29(4): 296-313.

BLIND BEAM-FORMING BASED ON SECOND-ORDER STATISTICS

Feng Dazheng Bao Zheng Shi Weixiang*

(Key Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071)

*(Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

Abstract In order to recover the statistically independent source signals, the paper proposes a novel blind beam-forming approach based on two-order statistics. In this method, the source signals are extracted by the statistic properties of the zero cross-correlation between any two source signals, under the case of unknown array manifold. The approach can be applied to the array beamforming with arbitrary array manifold and error. The method requires that the noise is white and the source signals are colored or deterministic, and not requires the estimation of arrival-direction of signals. In extracting source signals, it will make SNR be largest. On the contrary to the blind beamforming based on higher-order statistics, it is simple and robust, and can extensively be applied to the blind separation of mobile communication signals.

Key words Two-order statistics, Blind beamforming, ESPRIT approach

冯大政: 男, 1959 年生, 博士, 副教授, 从事信号处理方面的教学和科研工作.

保 铮: 男, 1927 年生, 教授, 中国科学院院士, 从事雷达系统和雷达信号处理方面的教学和科研工作.

史维祥: 男, 1928 年生, 教授, 从事机电控制方面教学和科研工作.