

一种色噪声环境下的 DOA 估计新算法

吴云韬, 廖桂生, 陈建峰

(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室, 陕西西安 710071)

摘 要: 本文提出了一种基于色噪声环境下的 DOA 估计新算法, 该算法通过估计噪声协方差矩阵, 进行预白化处理, 克服了色噪声对空间谱估计的影响误差, 计算机仿真结果证实了这一算法的有效性。

关键词: 阵列信号处理; 色噪声; DOA 估计

中图分类号: TN957.52 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2001) 12-1605-03

A Novel Method for Estimating DOA in the Presence of Unknown Colored Noise Fields

WU Yun-tao, LIAO Gui-sheng, CHEN Jian-feng

(Key Lab of Radar Signal Processing, Xi'dian University, Xi'an, Shanxi 710071, China)

Abstract: A new method for estimating spatial narrow-band signal directions of arrival in the presence of colored noise with unknown covariance is presented. An estimate of the noise covariance matrix is given. The data for parameter estimation is then prewhitened using the estimated noise covariance, hence, overcoming the highly biased estimates. Its performances are confirmed by computer simulations.

Key words: array signal processing; colored noise; DOA estimate

1 引言

空间谱估计是近二十年来发展起来的一门新兴信号处理理论。它在雷达、通信、声纳等方面的应用越来越受到重视, 而空间波达方向估计是其研究的一个重要分支。常规的空间谱估计方法有 ML、WSF、MUSIC、ESPRIT、MN (最小内积法), 这些算法都假定天线阵元噪声是白高斯, 或者已知统计特性的色噪声。然而, 未知统计特性的色噪声环境在实际应用中却经常出现。例如, 阵元各通道增益的不一致性以及各通道内部噪声的不一致性都会引起各通道输出噪声功率不相同 (注: 对于天线阵元输出噪声功率不等或阵元输出噪声互相关的情况本文均视为有色噪声); 另外, 对于宽带信号而言, 有色噪声, 如大气噪声, 也会引起各噪声空间和时间的不平稳, 这种不平稳性对于协方差矩阵特征分解后, 其噪声特征值也不会相同, 这样就会引起空间谱估计的严重误差。因此, 有关色噪声环境下的阵列信号处理研究已受到广泛的重视^[1-6]。

针对色噪声引起的空间谱估计误差问题, 常用的方法有:

(1) 设法测得噪声的空间分布 Σ_n , 对矩阵对 (R, Σ_n) 进行特征分解。然而, 在许多情况下, 噪声协方差可能是时变的, 或者不可能精确测得 Σ_n 。

(2) 利用预测的方法, 估计协方差矩阵主对角线上的项, 或者将阵列协方差矩阵降维处理, 即取协方差矩阵避开主对

角线上的项, 但这将牺牲部分阵元数。

(3) 若信噪比较大时, 可以把噪声方差的不稳定性看成平稳噪声的一种扰动, 求出扰动分量后再进行处理^[5]。

(4) 利用旋转或平移阵列的方法, 由于噪声结构保持不变时, 将旋转或平移后的协方差矩阵相减以消除噪声的影响^[5]。

(5) 将噪声视为 ARMA 模型, 采用 ML、Pisarenk、RLS 等方法联合估计 DOA 及噪声模型参数。然而这些方法需要高维搜索, 增加了计算复杂度^[1,3]。

(6) 利用时域特性, 如假定信号为非高斯的, 而噪声为高斯的, 则可利用高阶累计量进行 DOA 估计, 或者在特殊情况下, 利用信号的循环平稳性而去掉噪声的影响。

(7) 利用辅助变量^[2] (IV)。

以上方法至多在某些特定条件下有效, 远没有解决问题。本文提出了一种基于色噪声协方差矩阵为块对角的 DOA 估计新方法, 通过估计噪声协方差矩阵, 然后进行预白化数据相关矩阵, 便可以采用常规的谱估计方法估计 DOA, 克服了噪声对分辨性能的影响误差。

2 信号模型及噪声协方差矩阵的估计

本文考虑远场信号情况, N 元阵接收 P 个非相干源, 阵元间距为 d , 入射波长为 λ , 通常, 阵列信号矢量可以表示为:

$$X(t) = A(\theta) S(t) + n(t) \quad (1)$$

式中,方向矩阵 $A(\theta) = [a(\theta_1), a(\theta_2), \dots, a(\theta_p)]$, $a(\theta_i)$ 表示第 i 个信号的导向矢量, $a(\theta_i) = [1 \quad e^{j \cdot 2\pi \cdot d \cdot \sin(\theta_i)/\lambda} \quad \dots \quad e^{j(N-1)2\pi \cdot d \cdot \sin(\theta_i)/\lambda}]^T$, $S(t) = [S_1(t) \dots S_p(t)]^T$ 为信号的复包络矢量. 噪声矢量 $n(t) = [n_1(t) \dots n_N(t)]^T$, 由式(1)得阵列数据相关矩阵为:

$$R_{xx} = E[X(t) \cdot X^H(t)] = AR_{ss}A^H + Q \quad (2)$$

其中 R_{ss} 为信号相关矩阵, H 表示共轭转置, 由于假定接收 P 个非相干源情况, R_{ss} 为可逆矩阵, Q 为噪声协方差矩阵, 若 $Q = \sigma^2 I$ 时为白噪声情形. 由于, 文[6]已经给出了色噪声环境下信号源数目的精

确估计方法, 所以本文假定信号数目 P 已知, 且在 P 已知情

图 1 阵列结构

况下假定阵列接收系统由 3 个子阵构成(子阵阵元数为 P). 如图 1 所示.

在空间带限环境下, 假定 3 个子阵间的距离足够远, 使得子阵之间的噪声不相关, 即阵列接收的噪声相关矩阵 Q 具有块对角结构. 另外, 在实际情况下, 可能 Q 具有更特殊的结构, 即 $Q = \text{diag}\{Q_1, \dots, Q_N\}$ 这是一个特例. 下面将给出 Q 的一个估计, 令

$$R = \begin{pmatrix} R_1 & X_1 & X_2 \\ X_3 & R_2 & X_4 \\ X_5 & X_6 & R_3 \end{pmatrix}, A \text{ 分块为 } A = \begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{pmatrix},$$

$$Q \text{ 分块为 } Q = \begin{pmatrix} Q_1 & 0 & 0 \\ 0 & Q_2 & 0 \\ 0 & 0 & Q_3 \end{pmatrix}$$

这里 R, A, Q 中各分块子矩阵为 P 阶方阵. 由式(2)可得:
 $R_1 = Q_1 + A_1 R_{ss} A_1^*, R_2 = Q_2 + A_2 R_{ss} A_2^*, R_3 = Q_3 + A_3 R_{ss} A_3^*$
 通常要求阵列结构不存在空间模糊, 由实际阵列结构, 即要求 A 为列满秩, 由 $X_3 = A_2 R_{ss} A_1^*, X_4 = A_2 R_{ss} A_3^*, X_5 = A_3 R_{ss} A_1^*$. 因此 X_3, X_4, X_5 可逆. 则由以上三式可得:

$$\begin{aligned} Q_1 &= R_1 - A_1 R_{ss} A_1^* \\ &= R_1 - X_2 X_4^{-1} X_3 - A_1 R_{ss} A_1^* + X_2 X_4^{-1} X_3 \\ &= R_1 - X_2 X_4^{-1} X_3 - A_1 R_{ss} A_1^* \\ &\quad + A_1 R_{ss} A_3^* A_5^{-1} R_{ss}^{-1} A_2^{-1} A_2 R_{ss} A_1^* \\ &= R_1 - X_2 X_4^{-1} X_3 \end{aligned}$$

同理可得:

$$Q_2 = R_2 - X_3 X_5^{-1} X_6, Q_3 = R_3 - X_5 X_3^{-1} X_4$$

由于实际中 R 用 N 次快拍数据代替, 即 $R = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N X(t) \cdot X(t)^H$. 所以由 Q_1, Q_2, Q_3 我们可以得到 Q 的近似估计为:

$$Q = \begin{pmatrix} R_1 - X_2 X_4^{-1} X_3 & 0 & 0 \\ 0 & R_2 - X_3 X_5^{-1} X_6 & 0 \\ 0 & 0 & R_3 - X_5 X_3^{-1} X_4 \end{pmatrix}$$

由于 $N \rightarrow \infty, R \rightarrow R_{xx}$, 所以 Q 为渐进估计.

3 DOA 估计

下面, 给出估计出的噪声协方差矩阵的一个应用, 即

DOA 估计算法:

(1) 由 $R = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N X(t) \cdot X(t)^H$ 估计 R , 由式(3)估计出 Q .

(2) 用估计出的噪声协方差矩阵 Q 预白化数据相关矩阵 R , 得 R_0 , 对 R_0 进行特征分解得噪声特征子空间

$$E_{NN} = [\hat{e}_1 \dots \hat{e}_{N-p}]$$

(3) 由 MUSIC 方法计算空间谱函数

$$P(\theta) = \frac{1}{\sum_{i=1}^{N-p} |(\hat{Q}^{-1/2} a)^H \hat{e}_i|^2}$$

得 P 个谱峰值对应 P 个信号方向.

4 计算机仿真结果

为了验证本文方法的有效性, 作下面的计算机模拟实验. 实验中, 阵列结构由三个子阵构成, 每个子阵有两个相距半波长的阵元 ($P=2$) 组成. 各子阵输出噪声是分别由高斯白噪声激励一个稳定的 ARMA 模型产生的高斯色噪声. (即阵元数为 $N=6$) 两个窄带空间信号到达方向分别为 $0^\circ, 2^\circ$ 快拍数为 200, 实验结果取 100 次 Monte Carlo 实验的平均数据, 信噪比定义为: $\text{SNR} = 10 \cdot \log_{10}(\frac{P_s}{P_n})$, 其中 P_n 为第一个阵元输出噪声的平均功率, P_s 为信号的功率, 图 2 是两组 $\text{SNR} = 0\text{dB}$ 和 $\text{SNR} = 5\text{dB}$ 的实验结果, 其中虚线是用未白化的数据协方差时 MUSIC 的结果, 它不能分辨两个信号, 而图 2 中实线是利用本文估计的噪声协方差白化后 MUSIC 法的结果, 此时能精确分辨出两个信号源.

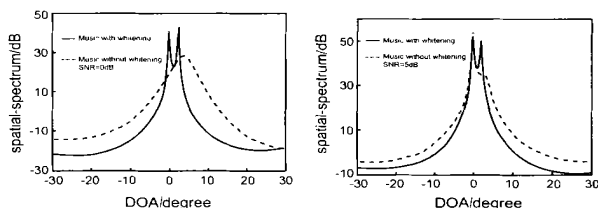


图 2 MUSIC 谱峰

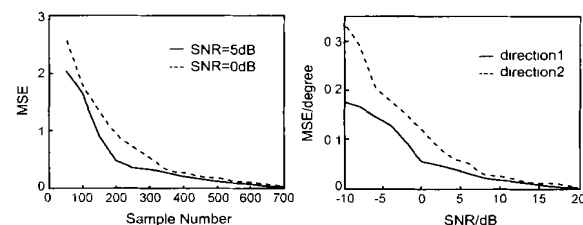


图 3

图 4

图 3 是 $\text{SNR} = 0\text{dB}$ 和 $\text{SNR} = 5\text{dB}$ 时估计的噪声协方差矩阵的均方误差随快拍数据的对比图, 可以看出随快拍数的增加, 本文对噪声协方差矩阵的估计方差将趋于收敛. 图 4 是估计两个源的波达方向的均方误差随信噪比的变化曲线.

图 5, 图 6 分别是 $\text{SNR} = 0\text{dB}$ 和 $\text{SNR} = 5\text{dB}$ 时两个信号源的波达估计误差随快拍数的对比图.

5 总结

本文提出了一种加性色噪声环境下的 DOA 估计新算法,

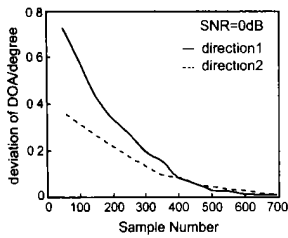


图 5

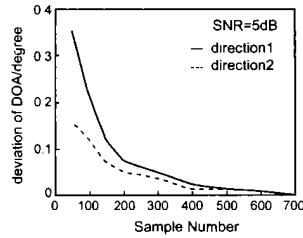


图 6

在假定噪声协方差矩阵具有块对角结构条件下(本文假定阵列由 3 个子阵列组成)可以有效估计出加性色噪声相关矩阵,进而实现色噪声环境下 DOA 估计,理论分析和仿真结果均表明本文提出的方法的有效性,本文提出的色噪声相关矩阵估计方法,容易推广到阵列信号处理其它方面,如自适应波束形成,详细情况另文讨论。

参考文献:

- [1] Bo Goransson ,Bjorn Ottersten. Direction estimation in partially unknown noise fields [J]. IEEE Trans. SP,1999,9(4):2375 - 2384.
- [2] P stoica ,B ottersten. Instrumental variable approach to array processing in spatially correlated noise fields [J]. IEEE Trans. SP,1994,42: 121 - 133.
- [3] V Nagesha ,S Kay. Maximum likelihood estimation for array processing in colored noise [J]. IEEE Trans. SP,1996,44(2):169 - 180.
- [4] J pierre Le cadre. Parametric methods for spatial signal processing in the presence of unknown colored noise fields [J]. IEEE ,Trans. ASSP, 1989,37(7):965 - 983.

- [5] 刘德树,罗景青,张剑云. 空间谱估计及其应用 [M]. 中国科学技术大学出版社,1997:161 - 173.
- [6] Yuehua Wu ,Kwok-Wai Tam. On determination of the number of signals in spatially correlated noise [J]. IEEE Trans. SP,1998,11(44):3023 - 3029.
- [7] 张林让,廖桂生,保铮. 色噪声环境下自适应波束形成 [J]. 电子学报,1998,26(12):81 - 84.

作者简介:



吴云韬 男. 1973 年出生于湖北恩施. 1999 年 9 月进入西安电子科技大学攻读博士学位,主要从事阵列信号处理方面的研究工作。



廖桂生 男. 1963 年出生于广西省. 教授,博士生导师,中国电子学会高级会员,IEEE 会员. 分别于 1985 年 7 月,1990 年 1 月和 1992 年 12 月获广西大学数学系学士学位,西安电子科技大学计算机系和电子工程系硕士和博士学位,发表学术论文 50 余篇,获部委科技进步一等和二等奖多次,主要从事统计信号处理,智能天线和子波变换在雷达,通信中的应用研究。

陈建峰 男. 1973 年出生于安徽省灵璧县. 1999 年 9 月进入西安电子科技大学攻读博士学位,主要从事阵列信号处理及其在通信中的应用研究。