

文章编号: 1001-0920(2006)08-0945-03

一种基于实值化技术的循环平稳 DOA 算法

刘志刚, 汪晋宽, 薛延波

(东北大学 信息科学与工程学院, 沈阳 110004)

摘 要: 针对 EC-MUSIC 算法的高维复矩阵计算量大、硬件实现成本高等缺点, 提出一种基于实值化技术的循环平稳 DOA 算法。重新构造了具有中心厄尔米特性质的高维矩阵, 将复数矩阵映射成实数矩阵进行处理, 不仅具有信号选择特性, 提高了算法性能, 而且降低了算法的计算量, 有利于算法实用化和通信产品小型化。仿真结果验证了所提出算法的有效性。

关键词: DOA 估计; 循环平稳; 阵列信号处理; 移动通信

中图分类号: TN 911.7 **文献标识码:** A

Cyclic DOA Estimation Algorithm with Real-valued Eigendecomposition

LIU Zhi-gang, WANG Jin-kuan, XUE Yan-bo

(School of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

Correspondent: LIU Zhi-gang, E-mail: zliu@mail.neu.edu.cn

Abstract: A modified extended cyclic MUSIC (EC-MUSIC) algorithm based on real-valued decomposing technique is presented to reduce the computational complexity and high hardware cost. A high-dimensional matrix with center-hermitian property is constructed, which maps a complex matrix into a real one. The proposed algorithm has the signal-selective property, improves its performance, and achieves a substantial reduction of the computational complexity. This algorithm is applicable to communication products with minimity. The effectiveness of this method is verified by simulation results with different SNRs.

Key words: DOA estimation; Cycle stationary; Array signal processing; Mobile communications

1 引 言

在移动通信环境中, 绝大多数信号是非高斯的, 而且具有循环平稳的特性。因此人们提出了许多基于该性质的 DOA 估计算法^[1-4], 很好地消除了噪声和干扰。

与传统的 DOA^[5-7] 估计算法相比, 循环平稳 DOA 估计算法具有以下 3 大优点: 1) 入射到阵列上的期望信号与干扰信号的数目可以大于阵元的数目; 2) 当两个角度很接近的信号之一为期望信号时, 可以很容易地分辨; 3) 干扰和噪声的统计特性可以是未知的。Chang 等同时利用循环自相关阵和循环共轭自相关阵的信息, 提出了 EC-MUSIC

(Extended cyclic MUSIC) 算法^[4], 不仅继承了循环 DOA 估计算法的所有优点, 而且适用于期望信号的数目大于阵列阵元数目的情况。但是, 由于高维矩阵的引入, 算法的计算量比较大。

本文针对 EC-MUSIC 算法的缺点, 提出了一种基于实值化技术^[8,9] 的 MEC-MUSIC (Modified EC-MUSIC) 算法, 重新构造了高维矩阵, 将复数矩阵映射成实数矩阵进行处理, 不仅具有信号选择特性, 提高了算法性能, 而且降低了算法的计算量。

2 基本模型

考虑平面空间中 M 个阵元的全方向等距线阵, 设 D 个循环频率为 α 的循环平稳的窄带信号入射到

收稿日期: 2005-05-31; 修回日期: 2005-08-08

基金项目: 河北省教育厅科学研究指导计划项目 (Z2004103)。

作者简介: 刘志刚(1975—), 男, 河南新乡人, 博士生, 从事非平稳信号处理、波束形成等研究; 汪晋宽(1957—), 男, 沈阳人, 教授, 博士生导师, 从事自适应信号处理等研究。

线阵上, 其到来方向分别为 $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_M$, 其中 $M > D$. 则阵列的接收信号的向量形式为

$$x(t) = As(t) + i(t). \quad (1)$$

其中

$$\begin{aligned} x(t) &= [x_1(t), x_2(t), \dots, x_M(t)]^T, \\ s(t) &= [s_1(t), s_2(t), \dots, s_D(t)]^T, \\ i(t) &= [i_1(t), i_2(t), \dots, i_M(t)]^T, \\ A &= [a(\theta_1), a(\theta_2), \dots, a(\theta_M)] \end{aligned}$$

式中: $x(t)$ 为含有噪声和干扰的数据向量; A 为方向矩阵, 表示阵列流形; $s(t)$ 为循环频率为 α 的信号向量; $i(t)$ 为循环频率非 α 的干扰信号和噪声的数据向量

设阵列接收信号被抽样为 N 次快照的数据, 循环自相关矩阵和循环共轭自相关矩阵分别为

$$R_{xx}^\alpha(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x(t_n)x^H(t_n + \tau)e^{-j2\pi\alpha n}, \quad (2)$$

$$R_{xx}^{\alpha*}(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x(t_n)x^T(t_n + \tau)e^{-j2\pi\alpha n}, \quad (3)$$

式中: 上标 H 表示厄尔米特转置, τ 为特定的延迟参数; 循环频率 α 依赖调制的模式, 通常为载频的两倍, 且受波特率、扩展码的重复率等因素的影响

3 ECMUSIC 算法

设对于任意到来方向 θ 满足条件

$$a(\theta)^2 = \beta \quad (4)$$

不失一般性, 令 $\beta = 1$, 则阵列接收信号的扩展数据向量定义为

$$z_{CE}(t) = \begin{bmatrix} x(t) \\ x^*(t) \end{bmatrix}; \quad (5)$$

扩展循环自相关矩阵为

$$R_{CE}^\alpha(\tau) = \begin{bmatrix} R_{zz}^\alpha(\tau) & R_{zz}^{\alpha*}(\tau) \\ R_{zz}^{\alpha*}(\tau) & R_{zz}^\alpha(\tau) \end{bmatrix}. \quad (6)$$

显然, 式(6)中循环自相关阵与循环共轭自相关阵可分别由式(2)和(3)估计得到. 接着对扩展自相关阵进行奇异值分解, 得到如下与循环 MUSIC 相类似的公式:

$$[U_s \ U_n] \begin{bmatrix} \Sigma & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \Sigma \end{bmatrix} [V_s \ V_n]^H. \quad (7)$$

其中: 下标 s 和 n 分别对应信号和干扰或噪声, 而且随着采样次数的增加, 干扰和噪声对应的特征值趋近于零. 设同维矩阵 U_{n1} 和 U_{n2} 可由下式定义得到:

$$U_n = \begin{bmatrix} U_{n1} \\ U_{n2} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

则 ECMUSIC 的空间谱为

$$P(\theta) = \frac{1}{a^H(\theta)U_{n1}U_{n1}^H a(\theta) + a^H(\theta)U_{n2}U_{n2}^H a(\theta)}. \quad (9)$$

ECMUSIC 算法通过高维的扩展循环自相关矩阵, 同时利用循环自相关阵和循环共轭自相关阵的信息, 不仅提高了算法的分辨率, 而且可以处理期望信号数目大于阵列阵元数目的情况. 然而, 高维矩阵的引入, 使算法计算量随着阵元数目的增加而呈现指数递增, 增加了算法的复杂程度, 不利于硬件实现.

4 MECMUSIC 算法

利用循环自相关阵和循环共轭自相关阵以及它们的共轭矩阵的信息, 特殊的循环自相关矩阵定义为

$$\Gamma^\alpha(\tau) = \begin{bmatrix} \Gamma_1^\alpha(\tau) & \Gamma_2^\alpha(\tau) \\ \Gamma_3^\alpha(\tau) & \Gamma_4^\alpha(\tau) \end{bmatrix}. \quad (10)$$

其中

$$\Gamma_1^\alpha(\tau) = Q^H \{G_1 + JG_1^*J\}Q,$$

$$\Gamma_2^\alpha(\tau) = Q^H \{G_2 + JG_2^*J\}Q,$$

$$\Gamma_3^\alpha(\tau) = Q^H \{G_2^* + JG_2J\}Q,$$

$$\Gamma_4^\alpha(\tau) = Q^H \{G_1^* + JG_1J\}Q,$$

$$G_1 = R_{zz}^\alpha(\tau)R_{zz}^{\alpha H}(\tau),$$

$$G_2 = R_{zz}^{\alpha*}(\tau)R_{zz}^{\alpha H}(\tau).$$

式中: J 为 $R^{M \times M}$ 为斜对角线上元素为 1 而其他元素为零的交换矩阵; 实值化算子 Q 为 $C^{M \times M}$ 为某列共轭对称酉矩阵, 根据所在阵列阵元数目的奇偶性确定, 具体形式如下:

$$Q = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} I & jI \\ J & -jJ \end{bmatrix},$$

$$Q = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} I & \mathbf{0} & jI \\ \mathbf{0}^T & \sqrt{2} & \mathbf{0}^T \\ J & \mathbf{0} & -jJ \end{bmatrix},$$

其中 I 和 $\mathbf{0}$ 分别为单位矩阵和零矩阵.

如果循环自相关矩阵 $\Gamma^\alpha(\tau)$ 的 4 个块矩阵均为实值化矩阵, 则所构成的循环自相关矩阵必然是实值化矩阵. 因此, 第 1 个块矩阵变形得

$$K = Q\Gamma_1^\alpha(\tau)Q^H = G_1 + JG_1^*J. \quad (11)$$

由中心厄尔米特 (Centro-Hermitian) 的定义^[8,9]可知, 循环自相关矩阵 K 为中心厄尔米特矩阵. 进一步由中心厄尔米特的性质可知, 第 1 个块矩阵 $\Gamma_1^\alpha(\tau)$ 为实值化矩阵.

同理, 循环自相关矩阵 $\Gamma^\alpha(\tau)$ 中其他的块矩阵 $\Gamma_2^\alpha(\tau)$, $\Gamma_3^\alpha(\tau)$ 和 $\Gamma_4^\alpha(\tau)$ 均为实值化矩阵. 所以, 所构造的循环自相关矩阵 $\Gamma^\alpha(\tau)$ 是实值化矩阵.

由于实值化算子 Q 的影响, 所构造矩阵的信号空间被改变. 因此, ECMUSIC 算法的空间谱公式必须被修正. 进而可以得到 MECMUSIC 算法的空间谱.

$$P(\theta) = \frac{1}{a^H(\theta)\hat{U}_{n1}\hat{U}_{n1}^H a(\theta) - a^T(\theta)\hat{U}_{n2}\hat{U}_{n2}^H a(\theta)} \quad (12)$$

其中: $\hat{U}_{n1} = Q\hat{U}_{n1}$, $\hat{U}_{n2} = Q\hat{U}_{n2}$, \hat{U}_{n1} 和 \hat{U}_{n2} 是由所构造的循环自相关矩阵 $\Gamma^x(\tau)$ 奇异值分解得到的

算法小结:

1) 根据式 (10), 可以计算所构造的循环自相关矩阵 $\Gamma^x(\tau)$;

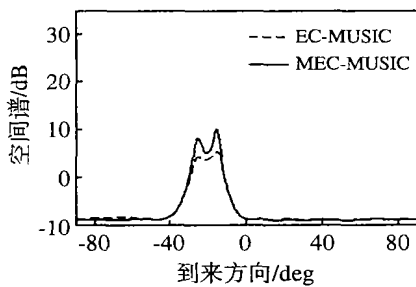
2) 对该矩阵进行奇异值分解, 得到 \hat{U}_n , 进一步可以计算出 \hat{U}_{n1} 和 \hat{U}_{n2} ;

3) 根据式 (12), 可以估计循环平稳信号的到来方向

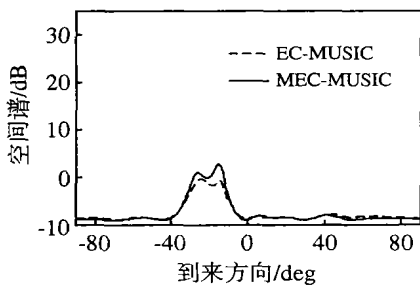
5 仿真实验结果

设阵元数为 8 的均匀线阵, 阵元间距为半个波长, 采样次数为 4 096, 入射信号的循环频率为 0.2, 干扰信号的循环频率为 0.3, 时间延迟参数为 4

按照 Monte-Carlo 实验的方法, 在不同的信噪比条件下, 可以得到如图 1 和图 2 所示的仿真结果。图 1 给出了 2 个独立的循环平稳信号 (-15°、-25°) 和 1 个干扰信号 (15°) 的到来方向在信噪比为 10 dB 和 0 dB 条件下被估计的仿真结果; 图 2 给出了 3 个独立循环平稳信号 (10°、-15°、-30°) 的到来方向在信噪比为 10 dB 和 0 dB 条件下被估计的仿真结果。由图 1 和图 2 可知, 在不同的信噪比条件下, MEC-MUSIC 算法的空间谱比 EC-MUSIC 算法高出了 5~10 dB, 提高了到来方向估计的性能。

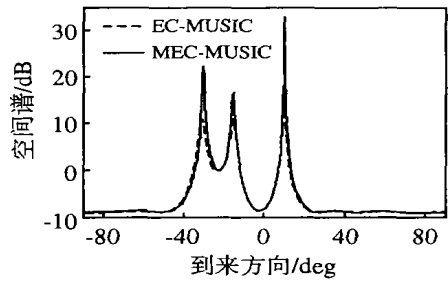


(a) SNR = 10 dB

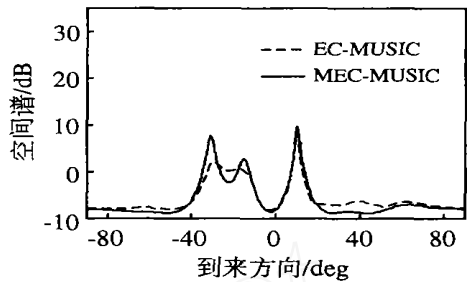


(b) SNR = 0 dB

图 1 两个信号情况下算法性能比较



(a) SNR = 10 dB



(b) SNR = 0 dB

图 2 3 个信号情况下算法性能比较

当阵列中阵元数为 M 时, EC-MUSIC 算法中高维复矩阵的奇异值分解的计算量为 $O(8M^3)$, MEC-MUSIC 算法中实值化矩阵的奇异值分解的计算量为 $O(2M^3)$. 因此, MEC-MUSIC 算法重新构造了高维矩阵, 将复数矩阵映射成实数矩阵来处理, 计算量降低了 75%.

6 结 语

本文针对 EC-MUSIC 算法的高维复矩阵计算量大、硬件实现成本高等缺点, 提出了一种基于实值化技术的循环平稳 DOA 算法。重新构造了高维矩阵, 将复数矩阵映射成实数矩阵来处理, 不仅具有信号选择特性, 提高了算法性能, 而且降低了算法的计算量, 有利于算法实用化和通信产品的小型化。

参考文献 (References)

[1] Gardner W A. Simplification of MUSIC and ESPRIT by Exploitation of Cyclostationary [J]. *Proc IEEE*, 1988, 76(7): 845-847.

[2] Schell S V, Calabreta R A, Gardner W A, et al. Cyclic MUSIC Algorithms for Signal-selective DOA Estimation [A]. *IEEE ICASSP [C]*. Glasgow: IEEE, 1989: 2278-2281.

[3] Schell S V. Performance Analysis of the Cyclic MUSIC Method of Direction Estimation for Cyclostationary Signals [J]. *IEEE Trans on SP*, 1994, 42(11): 3043-3050.

[4] Charge P, Wang Y, Saillard J. An Extended Cyclic MUSIC Algorithm [J]. *IEEE Trans on SP*, 2003, 51(7): 1695-1701.

(下转第 952 页)

4 结 语

本文提出了一种针对超 3G 网络切换中小区选择的智能控制方案。此方案针对超 3G 网络自身多接入技术和业务类型的特点,采用与业务 QoS 密切相关的小区类型、数据速率、覆盖范围、传输延时和呼叫到达率作为评价指标,并用模糊多目标判决算法进行小区选择决策。针对所提出的方案,本文给出了实时高带宽业务和非实时低带宽业务的实例分析和仿真。实例分析中,本文方案在移动主机运行不同业务情况时作出了不同的小区选择。仿真结果表明,本文方案所作出的选择是正确的,有效地保障了切换后移动主机获得最优的服务质量。

参考文献(References)

- [1] Mohr W. Further Developments Beyond Third Generation Mobile Communications [A]. *Int Conf on Communication Technology Proc* [C]. Beijing, 2000, 2: 1001-1008.
- [2] Wang J, Liu J C L, Cen Y h. Handoff Algorithms in Dynamic Spreading WCDMA System Supporting Multimedia Traffic [J]. *IEEE J on Selected Areas in Communications*, 2003, 21(10): 1652-1662.
- [3] McNair J, Akyildiz I F, Bender M D. An Inter-system Handoff Technique for the MT-2000 System [A]. *IEEE Infocom* [C]. Israel, 2000, 1: 208-216.
- [4] Shafiq B, Ghafoor A, Baqai S, et al. Wireless Network Resource Management for Web-based Multimedia Document Services [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2003, 41(3): 138-145.
- [5] Istvan B. A Ranking Method for Multiple-criteria Decision Making [J]. *Int J of Systems Science*, 1997, 28(9): 905-912.
- [6] Ashok K, Gopa K. Optimal System Selection in Fuzzy Environment [J]. *Int J of Systems Science*, 1998, 29(2): 609-616.
- [7] Guenkova-Luy T, Kassler A J, Mandato D. End-to-end Quality-of-service Coordination for Mobile Multimedia Applications [J]. *IEEE J on Selected Areas in Communications*, 2004, 22(5): 889-903.
- [8] Saaty T L. *The Analytic Hierarchy Process* [M]. New York: McGraw Hill, 1980.
- [8] Xie G M, Wang L. Quadratic Stability and Stabilization of Discrete-time Switched Systems with State Delay [A]. *Proc of 43rd IEEE Conf on Decision and Control* [C]. Atlantis, Paradise Island, Bahamas: IEEE, 2004: 3235-3240.
- [9] Khargonekar P P, Petersen I R, Zhou, K. Robust Stabilization of Uncertain Linear Systems: Quadratic Stabilizability and H^∞ Control Theory [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1990, 35(3): 356-361.
- [10] Petersen I R. A Stabilization Algorithm for a Class of Uncertain Linear Systems [J]. *Systems & Control Letters*, 1987, 8(4): 351-357.
- [11] 卢建宁, 赵光宙. 离散时滞切换系统稳定性分析 [J]. *信息与控制*, 2005, 34(3): 381-384. (Lu J N, Zhao G Z. Stability Analysis for Discrete Switched Systems with Time Delay [J]. *Information and Control*, 2005, 34(3): 381-384.)
- [5] Schmidt R O. Multiple Emitter Location and Signal Parameter Estimation [J]. *IEEE Transactions on A P*, 1986, 34(3): 276-280.
- [6] Roy R, Kailath T. ESPRIT-estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques [J]. *IEEE Transactions on A S S P*, 1989, 37(7): 984-995.
- [7] Kundu D. Modified MUSIC Algorithm for Estimating DOA of Signals [J]. *Signal Processing*, 1996, 48(1): 85-90.
- [8] Haardt M, Nosske J A. Unitary ESPRIT: How to Obtain Increased Estimation Accuracy with a Reduced Computational Burden [J]. *IEEE Transactions on S P*, 1995, 43(5): 1232-1242.
- [9] Pesavento M, Gershman A B, Haardt M. Unitary Root MUSIC with a Real-valued Eigendecomposition: A Theoretical and Experimental Performance Study [J]. *IEEE Transactions on S P*, 2000, 48(5): 1306-1314.

(上接第 944 页)

(上接第 947 页)