

一种基于盲源分离的 DOA 估计方法

康春玉¹ 章新华¹ 韩东¹

摘要 方位估计和信号恢复分别是水下目标跟踪和识别的前提. 基于平均时间延迟相关矩阵提出了一种复数域盲源分离方法, 在此基础上实现了 DOA 估计和信号恢复. 实验结果表明, 该方法在同等条件下完成同样的方位分辨要优于多重信号分类 (Multiple signal classification, MUSIC) 方法.

关键词 DOA 估计, 盲源分离, 多重信号分类 (MUSIC) 方法
中图分类号 TB566

A Kind of Method for Direction of Arrival Estimation Based on Blind Source Separation

KANG Chun-Yu¹ ZHANG Xin-Hua¹ HAN Dong¹

Abstract Direction of arrival estimation and signal recovery are the bases of the underwater target tracking and target recognition, respectively. Based on the average time-delayed correlation matrices, a new kind of complex blind source separation is proposed. Then the DOA estimation and the corresponding signals of targets are calculated based on this method. Experimental results show that this method is superior to the multiple signal classification (MUSIC) method for realizing the same resolution at the same situation.

Key words Direction of arrival estimation, blind source separation, multiple signal classification (MUSIC) method

空间信号到达方向 (Direction of arrival, DOA) 估计是阵列信号处理的一个基本问题, 也一直是阵列信号处理中研究的热点. 近几十年来, 科研人员提出了多种 DOA 估计方法^[1-4], 其中基于盲源分离进行方位估计是新近出现的方法^[3-4]. 盲源分离是指在不知道源信号和传输通道参数的情况下, 针对源信号的瞬时混叠和卷积混叠或它们的组合, 根据输入源信号的统计特性, 仅由观测信号恢复出源信号各个独立成分的过程. 到目前为止, 国际上已经发展了多种有效的盲源分离算法^[5-6], 对信号恢复可以取得很好的效果. 但一般的盲分离方法不能对分离出来的信号给出方位, 本文结合盲源分离和旋转不变技术估计信号参数 (Estimation of signal parameters via rotational invariance techniques, ESPRIT) 方法^[2] 的原理, 提出了一种基于盲源分离的 DOA 估计方法. 首先通过平均时间延迟相关矩阵的奇异值分解实现盲源分离, 完成对阵列流形和源信号的估计, 然后根据 ESPRIT 方法原理, 利用子阵间的相位延迟完成目标方位估计. 仿真实验和海上实测数据结果表明, 所提方法能准确估计出目标的方位和相应的源信号. 同时, 在阵元数、信噪比、快拍数的要求和方位分辨率上表现出了比多重信号分类 (Multiple signal classification, MUSIC) 方法更优的性能.

1 问题描述

考虑等距线阵 (Uniform linear array, ULA), 如图 1 所示^[4], 其 M 个阵元等间距排成一直线, 阵元间距为 d . 同时假定 1) 目标源为窄带信号; 2) 阵列位于目标源的远场区, 即目标源到阵列的距离远大于阵列的口径, 从而入射到阵列的信号波前可以近似为平面波, 且阵元之间无互耦; 3) 噪声为互不相关的空间白噪声; 4) 目标源的数目小于阵列的阵元数目.

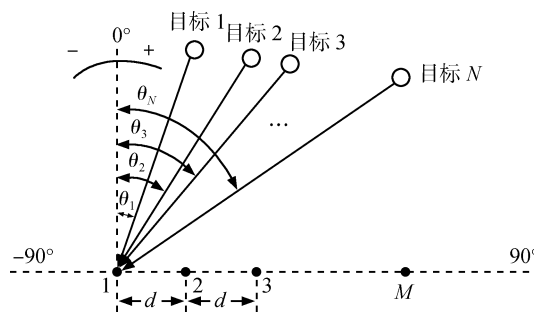


图 1 等距线阵与波入射角
Fig. 1 ULA and angle of incidence

根据上述假设, 若有 N 个目标源, 其波入射角分别为 $\theta_i (i = 1, 2, \dots, N)$, 则等距线阵的方向矩阵^[4] (也称为基阵的阵列流形) 为

$$A = [\mathbf{a}(\theta_1), \mathbf{a}(\theta_2), \dots, \mathbf{a}(\theta_N)]^T \quad (1)$$

其中 $\mathbf{a}(\theta_i) = [1, e^{j\frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta_i}, e^{j\frac{2\pi}{\lambda} 2d \sin \theta_i}, \dots, e^{j\frac{2\pi}{\lambda} (M-1)d \sin \theta_i}]^T$, λ 为入射信号波长.

将各阵元上第 k 次观测的采样写成向量形式为^[5]

$$\mathbf{X}(k) = A\mathbf{S}(k) + \mathbf{N}(k) \quad (2)$$

其中 $\mathbf{X}(k) = [x_1(k), x_2(k), \dots, x_M(k)]^T$, $\mathbf{S}(k) = [s_1(k), s_2(k), \dots, s_N(k)]^T$ 为目标信号向量, $\mathbf{N}(k) = [n_1(k), n_2(k), \dots, n_M(k)]^T$ 为噪声向量. 可见阵列观测信号式 (2) 为盲源分离中复数域的线性瞬态混合形式. 因此可利用某些盲分离复数算法或修改的实数算法, 完成对阵列接收信号的分离, 如果能实现对阵列流形 A 的估计, 则完全可实现目标方位 θ_i 的估计.

2 基于平均时间延迟相关矩阵的盲分离方法

一般来说, 阵列检测到的混合信号 $\mathbf{X}(k)$ (即传感器信号) 中各分量 $x_i(k) (i = 1, 2, \dots, M)$ 是互相关的, 协方差矩阵 $R_{\mathbf{X}\mathbf{X}} = E\{\mathbf{X}\mathbf{X}^T\}$ 不为对角阵, 而一般盲分离算法要求混合信号各分量互不相关. 因此首先需对其进行归一化空间解相关 (预白化) 处理. 实数、复数混合信号经预白化处理后, 盲分离问题将变得更加简单且盲态问题也将减少.

传感器信号 $\mathbf{X}(k)$ 的协方差阵通常对称正定, 根据特征值分解有

$$R_{\mathbf{X}\mathbf{X}} = E\{\mathbf{X}\mathbf{X}^T\} = V\Lambda V^T = V\Lambda^{\frac{1}{2}}\Lambda^{\frac{1}{2}}V^T \quad (3)$$

式中, V 是相应的特征值向量组成的矩阵, $\Lambda = \text{diag}\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_M\}$ 为对角阵, 其特征值 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_M > 0$. 根据信息论准则, 取前面 N 个大的特征值作为信号特征值 $\hat{\Lambda} = \text{diag}\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N\}$, 相对应的特征向量 $\hat{V} =$

收稿日期 2007-09-06 收修改稿日期 2008-04-08
Received September 06, 2007; in revised form April 8, 2008
1. 海军大连舰艇学院信号与信息研究中心, 大连 116018
1. Research Center of Signal and Information, Dalian Navy Academy, Dalian 116018
DOI: 10.3724/SP.J.1004.2008.01324

$[v_1, v_2, \dots, v_N]$ 张成的空间作为信号子空间的估计, 则可由式 (4) 计算白化矩阵^[3].

$$Q = \hat{\Lambda}^{-\frac{1}{2}} \hat{V}^T = \text{diag} \left\{ \frac{1}{\sqrt{\lambda_1}}, \frac{1}{\sqrt{\lambda_2}}, \dots, \frac{1}{\sqrt{\lambda_N}} \right\} \hat{V}^T \quad (4)$$

经白化后的传感器观测信号表示为 $\bar{\mathbf{X}}(k) = Q\mathbf{X}(k)$, 此时数据 $\bar{\mathbf{X}}(k)$ 各分量具有单位方差, 且互不相关, 即 $E\{\bar{\mathbf{X}}(k)\bar{\mathbf{X}}(k)^T\} = I_{N \times N}$.

然后由白化后的观测信号按式 (5) 估计一组时间延迟相关矩阵^[7]

$$\sum_{\tau} (\bar{\mathbf{X}}) = \langle \bar{\mathbf{X}}(k)\bar{\mathbf{X}}^T(k+\tau) \rangle \quad (5)$$

其中 $\tau = 1, 2, \dots, L$, “ $\langle \cdot \rangle$ ” 表示时间平均. 最大时延 L 的确定比较困难, 本文采用文献 [8] 的方法来确定最佳时延. 对估计出的时间延迟相关矩阵取平均, 得到平均时间延迟相关矩阵 $\hat{R}_{\mathbf{X}} = (1/L) \sum_{\tau=1}^L [\sum_{\tau} (\bar{\mathbf{X}})]$. 对得到的平均时间延迟相关矩阵进行奇异值分解 $\hat{R}_{\mathbf{X}} = \bar{U}R_{\mathbf{S}}\bar{V}^H + \sigma^2 I$, 其中 $(\cdot)^H$ 表示共轭转置, \bar{U} 和 \bar{V} 分别称为左右奇异矩阵. 则此时估计的阵列流形 $\hat{A} = Q^{\#}\bar{U} = [\hat{\mathbf{a}}_1, \hat{\mathbf{a}}_2, \dots, \hat{\mathbf{a}}_N]$, 其中 $(\cdot)^{\#}$ 表示求伪逆, 分离的源信号 $\hat{\mathbf{S}}(k) = \bar{U}^H Q\mathbf{X}(k) = [\hat{s}_1, \hat{s}_2, \dots, \hat{s}_N]$.

3 子阵相位延迟进行 DOA 估计

根据 ESPRIT^[2] 的思想, 对于空间某目标, 阵列前 $M-1$ 个阵元 (从第 1 号阵元到 $M-1$ 号阵元) 的响应与后 $M-1$ 个阵元 (从第 2 号阵元到第 M 号阵元) 的响应刚好相差一个相位延迟. 同时根据真实方向矢量 $\mathbf{a}(\theta_i)$ 的估计 $\hat{\mathbf{a}}_i$ 应该与其具有类似的表示形式, 则有如式 (6) 的关系式成立.

$$J_1 \hat{\mathbf{a}}_i e^{-j\hat{\phi}_i} = J_2 \hat{\mathbf{a}}_i \quad (6)$$

其中, $J_1 = [I_{(M-1) \times (M-1)} \quad 0_{(M-1) \times 1}]$, $J_2 = [0_{(M-1) \times 1} \quad I_{(M-1) \times (M-1)}]$, $\hat{\phi}_i = (2\pi d/\lambda) \sin \hat{\theta}_i$. 显然, 由式 (6) 可得 $\exp(-j\hat{\phi}_i) = (J_1 \hat{\mathbf{a}}_i)^{\#} J_2 \hat{\mathbf{a}}_i$, 即 $-j\hat{\phi}_i = \ln[(J_1 \hat{\mathbf{a}}_i)^{\#} J_2 \hat{\mathbf{a}}_i]$. 由此可得

$$-j \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \hat{\theta}_i = \ln[(J_1 \hat{\mathbf{a}}_i)^{\#} J_2 \hat{\mathbf{a}}_i] \quad (7)$$

解式 (7) 可得到相应目标的方位估计, 如式 (8) 所示.

$$\theta_i = \sin^{-1} \left\{ -\frac{\lambda}{2\pi d} \ln[(J_1 \hat{\mathbf{a}}_i)^{\#} J_2 \hat{\mathbf{a}}_i] \right\}, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (8)$$

同时对应方位 $\hat{\theta}_i$ 的目标信号估计为 \hat{s}_i .

4 实验与结论

4.1 仿真实验

仿真实验考虑均匀线列阵位于两窄带目标源的远场, 目标源 1 的方位为 15 度, 目标源 2 的方位为 16 度. 用式 (9) 所定义的均方根误差 (Root mean square error, RMSE) 来检验所提方法的有效性^[3], 并与经典的高分辨率方位估计 MUSIC 方法进行对比.

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{P} \sum_{k=1}^P \frac{(\hat{\theta}_1^k - \theta_1)^2 + (\hat{\theta}_2^k - \theta_2)^2}{2}} \quad (9)$$

其中 $\hat{\theta}_i^k$ 表示第 k ($k = 1, 2, \dots, P$) 次对目标 i 的方位估计, 在实验中, 取 $P = 100$.

图 2 是阵元数为 32, 快拍数为 8192 时, 本文方法与 MUSIC 方法得到的 RMSE 随信噪比 (Signed to Noise Ratio, SNR) 变化的情况; 图 3 是信噪比为 -3 dB, 快拍数为 8192 时, 本文方法与 MUSIC 方法得到的 RMSE 随阵元数的变化; 图 4 是阵元数为 32, 信噪比为 -3 dB 时, 本文方法与 MUSIC 方法得到的 RMSE 随快拍数的变化; 图 5 是阵元数为 128, 信噪比为 -3 dB, 快拍数为 8192 时, 本文方法和 MUSIC 方法分辨两目标方位差为 0.2 度时得到的方位历程图; 图 6 是阵元数为 25, 信噪比为 -3 dB, 快拍数为 8192 时, 本文方法恢复的目标信号、方位估计和相应目标信号的谱图.

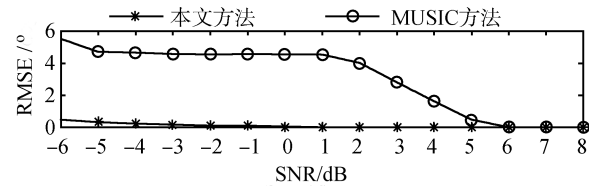


图 2 RMSE 随信噪比的变化

Fig. 2 RMSE varies with SNR

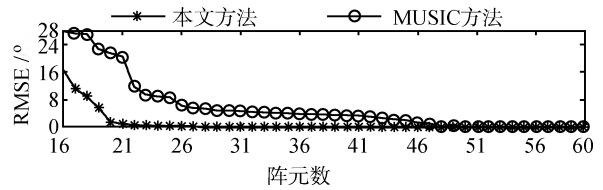


图 3 RMSE 随阵元数的变化

Fig. 3 RMSE varies with sensors number

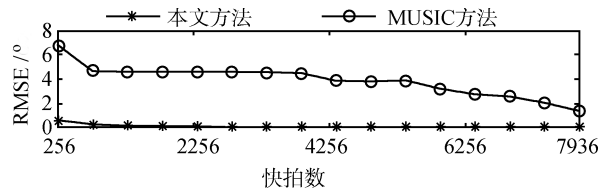


图 4 RMSE 随快拍数的变化

Fig. 4 RMSE varies with snapshots

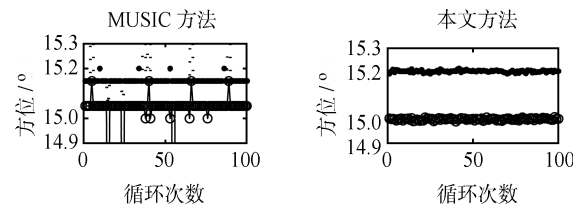


图 5 分辨两目标方位差为 0.2° 时的方位历程

Fig. 5 DOA estimation with 0.2 degree difference

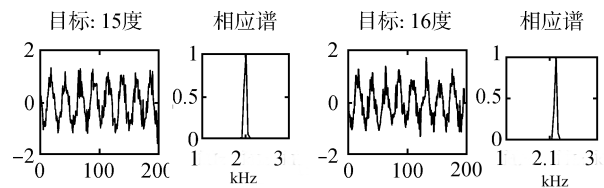


图 6 本文方法恢复的目标信号和相应的方位、功率谱

Fig. 6 Estimation of target signal, orientation and power spectrum using textual method

从图 2~图 6, 可得出如下结论:

1) 在 32 阵元, 快拍数为 8 192, 分离方位差为 1 度的两目标时, 本文方法相对 MUSIC 方法要求的信噪比低得多, 本文方法在信噪比为 -6 dB 时就能达到均方根误差为 0.5 度, 而 MUSIC 方法要达到同样的均方根误差, 则要求信噪比达到 5 dB;

2) 信噪比为 -3 dB, 快拍数为 8 192 时, 本文方法在阵元数大于 21 后, 其 RMSE 对阵元数变化不敏感, 本文方法 21 阵元时的 RMSE 和 MUSIC 方法 47 阵元时相当;

3) 同等条件下, 本文方法对快拍数的变化不敏感, 而 MUSIC 方法则随快拍数的增加 RMSE 减少;

4) 从图 5 可看出, 本文方法在 128 阵元, 信噪比为 -3 dB 时能完成分辨方位差为 0.2 度的两目标, 而 MUSIC 方法估计的方位误差比较大, 说明本文方法比 MUSIC 方法具有更高的方位分辨率;

5) 信噪比为 -3 dB 条件下, 本文方法只需要 25 阵元就能分辨方位差为 1 度的两目标, 而且能较好地恢复出原始波形, 同等条件下 MUSIC 方法不能分辨两目标.

4.2 海上实测数据实验

海上实测数据来源于 8 元线列阵 (阵元间隔 10 cm) 接收远场一窄带发射源的信号. 发射源方位大约 50 度, 发射中心频率为 7 kHz 的 M 序列, 接收船和发射船相距约 5 km, 都处于辅机供电状态. 在应用相应方法之前, 实测数据只经过简单的信号调理. 图 7 是本文方法和 MUSIC 方法对其进行方位估计得到的方位历程图, 图 8 是某一时刻运行时得到的相应波形恢复图.

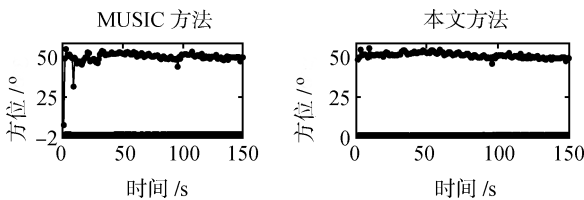


图 7 海上实测数据方位历程
Fig. 7 DOA estimation of sea data

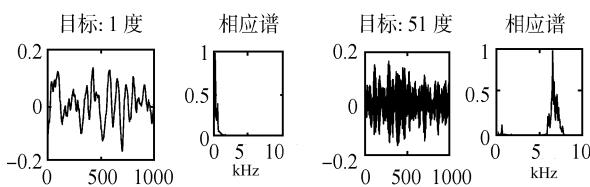


图 8 某一时刻的恢复波形、方位及相应谱
Fig. 8 Estimation of target signal, orientation and power spectrum at a certain moment

从图 7 和 8 可发现, 在真实海洋背景下, 本文方法也得到了比较好的方位估计和源信号恢复结果. 在 1 度左右出现的目标, 通过对恢复的信号进行听音发现, 与接收船辅机声音及其相似.

4.3 结论

本文提出了一种通过平均时间延迟相关矩阵的奇异值分解实现复数域盲源分离和阵列流形的估计, 同时根据两子阵间的空间信息实现 DOA 估计的方法. 仿真实验和海上实测数据结果均表明, 本文方法优于经典的 MUSIC 高分辨方位

估计方法, 而且在完成方位估计的同时能给出相应方位上目标的信号波形. 但本文方法目前只适用于窄带信号情况, 如何将其推广应用于宽带条件还有待进一步的研究.

References

- Schmidt R O. Multiple emitter location and signal parameter estimation. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1986, **34**(3): 276–280
- Paulraj A, Roy R, Kailath T. Estimation of signal parameters via rotational invariance techniques—ESPRIT. In: *Proceedings of the 19th Asilomar Conference on Circuits*. Monterey, USA: Pacific Grave, 1985. 83–89
- Kunihiko Y, Nozomu H. ICA-based separation and DOA estimation of analog modulated signals in multipath environment. *IEICE Transactions on Communications*, 2005, **88**(11): 4246–4249
- Coviello C M, Sibul L H. Blind source separation and beamforming: algebraic technique analysis. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2004, **40**(1): 221–235
- Choi S, Cichocki A, Park H M, Lee S Y. Blind source separation and independent component analysis: a review. *Neural Information Processing — Letters and Reviews*, 2005, **6**(1): 1–57
- Pedersen S M, Jan L, Kjems U, Parra L C. A survey of convolutive blind source separation methods. *Springer Handbook on Speech Processing and Speech Communication*. New York: Springer, 2006. 1–34
- Andreas Z, Klaus R M. TDSEP — an efficient algorithm or blind separation using time structure. In: *Proceedings of the 8th International Conference on Artificial Neural Networks*. Berlin, German: Springer-Verlag 1998. 675–680
- Sun Z L, Huang D S, Zheng C H. Optimal selection of time lags for TDSEP based on genetic algorithm. *Neurocomputing*, 2006, **69**(7-9): 884–887

康春玉 海军大连舰艇学院博士研究生. 主要研究方向为水声信号处理与信息融合. 本文通信作者. E-mail: dlkangcy@126.com
(KANG Chun-Yu Ph.D. candidate at Dalian Navy Academy. His research interest covers underwater acoustic signal processing and information fusion. Corresponding author of this paper.)

章新华 海军大连舰艇学院教授. 主要研究方向为水声信号处理与信息融合. E-mail: xinhua.zh@126.com
(ZHANG Xin-Hua Professor at Dalian Navy Academy. His research interest covers underwater acoustic signal processing and information fusion.)

韩东 海军大连舰艇学院讲师. 主要研究方向为水声信号处理. E-mail: small.hand@163.com
(HAN Dong Lecturer at Dalian Navy Academy. His main research interest is underwater acoustic signal processing.)