

盲源分离与高分辨融合的 DOA 估计与信号恢复方法

康春玉¹ 章新华¹ 韩东¹

摘要 目标方位估计 (Direction of arrival, DOA) 和信号恢复分别是水下目标定位、跟踪与识别的前提。基于盲源分离方法可以得到含有阵列流形信息的解混矩阵, 融合成熟的高分辨方法提出了一种新的方位估计、信号恢复模型和方法。在宽带信号背景下进行了仿真实验, 结果表明该方法可实现目标方位的实时估计和目标信号的恢复。在同等条件下完成同样的目标方位分辨率, 比单纯的高分辨方法要求的阵元数和快拍数较少, 要求的信噪比要低。海上实测数据检验也表明, 比常规的最小方差无失真响应 (Minimum variance distortionless response, MVDR) 方法得到了更好的结果, 明显提高了弱目标信号的空间谱能量, 增强了检测弱目标信号的能力。

关键词 目标方位估计, 信号恢复, 盲源分离, 最小方差无失真响应, 多重信号分类

DOI 10.3724/SP.J.1004.2010.00442

DOA Estimation and Signal Recovery Combined Blind Source Separation with High Resolution

KANG Chun-Yu¹ ZHANG Xin-Hua¹ HAN Dong¹

Abstract Direction of arrival (DOA) estimation and signal recovery are the base of the underwater target orientation, tracking and recognition, respectively. Based on the array manifold which can be estimated using blind source separation, and by combining the complex blind source separation with the high resolution method, a new method for direction estimation and signal recovery is proposed. It was tested by the simulation with wideband data, the result showed that this method can complete the real-time estimation of the target direction and estimate the corresponding signal of targets. It is superior to the single high resolution method for the same result under the same condition. It was also tested by the recorded data in real sea. Its performance is better than that of the routine minimum variance distortionless response (MVDR) method. It can obviously increase the space spectrum power of the faint target signal and improve the detection capability of the sonar system.

Key words Direction of arrival (DOA) estimation, signal recovery, blind source separation, minimum variance distortionless response (MVDR), multiple signal classification (MUSIC)

目标方位估计, 也称为定向或空间信号波达方向 (Direction of arrival, DOA) 估计, 是阵列信号处理的一个基本问题, 也是雷达、声纳、导弹、鱼雷等设备的最基本功能, 定向精度和方位分辨的性能直接影响这些装备的使用效果, 因此得到广泛的重视。高分辨方位估计在阵列信号处理中一直是研究的热点, 近几十年来, 科研人员提出了多种 DOA 估计方法^[1-4]。其中, 由 Schmidt 等^[2] 提出的多重信号分类

(Multiple signal classification, MUSIC) 方法得到了最为深入的研究, 其缺点是必须精确知道目标源的个数, 但严格意义上讲, 在很多的实际背景下这些条件是很难满足的; 同时对相应目标信号的恢复必须通过波束形成才能完成。而实时方位上的信号恢复在目标识别中是必不可少的。因而在实际的应用中, 最小方差无失真响应 (Minimum variance distortionless response, MVDR) 方法因为其不需要预知源数目个数而得到了广泛的应用, 但其方位分辨率不如 MUSIC 方法。因此, 如果能在未知源数目的情况下, 既能进行高分辨的方位估计又能恢复出波形将是实际应用中迫切需要的。

盲源分离 (Blind source separation, BSS) 是 20 世纪最后 10 年迅速发展起来的研究领域^[5-7]。发展至今, 时间虽然不长, 但已成为现代数字信号处理的一个十分活跃的领域, 已经在电子信息、通信、生物医学、图像增强、雷达、地球物理、远程传感、地震勘探、数据挖掘等许多领域, 尤其是在无线通信和生物医学方面得到了成功的应用。所谓“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^[6-7]。各种算法对信号恢复取得了很好的效果, 但一般的盲源分离方法不能对分离出来的信号给出方位, 结合盲源分离和高分辨方法各自的优点, 本文提出了一种新的方位估计、信号恢复模型和方法, 不仅能对目标方位进行估计而且能实时给出对应方位上的目标信号。仿真实验结果表明, 所提方法能在不知道目标源个数的情况下准确估计出目标的方位和相应目标信号。并与单纯的高分辨方法进行了对比分析, 结果表明该方法在同等条件下比高分辨方法需要更少的阵元、更低的信噪比 (Signal-noise rate, SNR) 及更少的快拍数, 而且能得到更高的方位分辨率。海上实测数据检验也表明, 比常规的 MVDR 方法得到了更好的结果, 明显提高了弱目标信号的空间谱能量, 增强了检测弱目标信号的能力。

1 问题描述

考虑等距线阵 (Uniform linear array, ULA) 如下图 1 所示^[5], 其 M 个阵元等间距排成一直线, 阵元间距为 d 。同时假定: 1) 目标源为宽带信号; 2) 阵列位于目标源的远场区, 且阵元之间无互耦; 3) 目标源的数目小于阵列的阵元数目。

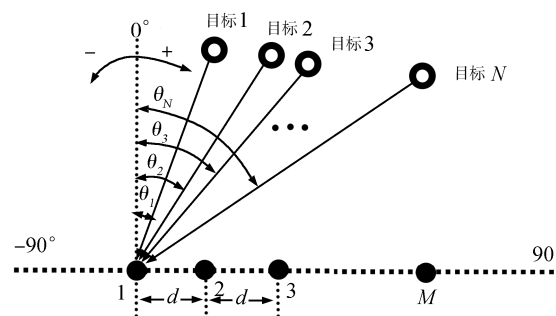


图 1 等距线阵与波入射角

Fig. 1 ULA and angle of incidence

收稿日期 2009-02-05 录用日期 2009-10-13
Manuscript received February 5, 2009; accepted October 13, 2009
海军大连舰艇学院科研发展基金 (2009032) 资助
Supported by Science Development Foundation of Dalian Navy Academy (2009032)
1. 海军大连舰艇学院信息与通信工程系水声教研室 大连 116018
1. Department of Information and Communication Engineering, Dalian Navy Academy, Dalian 116018

上述模型下, 基阵第 m 阵元的接收信号可表示为

$$x_m(t) = \sum_{i=1}^N s_i(t - \tau_{im}) + n_m(t) \quad (1)$$

式中, $x_m(t)$, $s_i(t)$, $n_m(t)$ 分别表示第 m 阵元的接收信号, 第 i 个目标源信号和第 m 阵元上的加性噪声, τ_{im} 表示第 m 阵元相对参考点接收到第 i 个信号的时间延迟, 对式 (1) 两边同时进行傅里叶变换, 则得到基阵接收信号的频域形式, 如式 (2) 示。

$$X_m(f) = \sum_{i=1}^N S_i(f) e^{-j2\pi f \tau_{im}} + N_m(f) \quad (2)$$

式中, $X_m(f)$, $S_i(f)$, $N_m(f)$ 分别为 $x_m(t)$, $s_i(t)$, $n_m(t)$ 的傅里叶变换. 式 (2) 写成矩阵形式如式 (3).

$$X(f) = A(f, \Theta)S(f) + N(f) \quad (3)$$

式中, $X(f) = [X_1(f), X_2(f), \dots, X_M(f)]^T$ 表示阵接收信号的傅里叶变换, $S(f) = [S_1(f), S_2(f), \dots, S_N(f)]^T$ 表示源信号的傅里叶变换, $N(f) = [N_1(f), N_2(f), \dots, N_M(f)]^T$ 表示加性噪声的傅里叶变换, $A(f, \Theta) = [\mathbf{a}(f, \theta_1), \mathbf{a}(f, \theta_2), \dots, \mathbf{a}(f, \theta_N)]$ 称为基阵的阵列流形, 其中 Θ 表示 θ_i 的集合, 向量 $\mathbf{a}(f, \theta_i)$ 称为基阵对 θ_i ($i = 1, 2, \dots, N$) 方向入射频率为 f 的信号响应向量 (或方向向量) 表示为

$$\mathbf{a}(f, \theta_i) = [1, e^{j\frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta_i}, \dots, e^{j\frac{2\pi}{\lambda} (M-1) d \sin \theta_i}]^T \quad (4)$$

由阵列观测信号的频域表达式 (3) 可看出, 其刚好为盲源分离中复数域的线性瞬态混合形式. 因此利用某些盲源分离复数域算法^[8] 或修改的实数域算法, 可完成对阵列频域接收信号的分离。

2 新的目标方位估计与信号恢复模型

基于盲源分离技术能很好地分离出独立源和高分辨方法在方位估计中的优势, 提出如图 2 所示的方位估计与信号恢复模型. 首先对阵列接收到的信号进行傅里叶变换, 离散化成 J 个子带; 然后对每个子带 j ($j = 1, 2, \dots, J$) 进行升采样, 并采用文献 [8] 中描述的复数域盲源分离方法进行盲源分离, 得到解混矩阵 \hat{A}_j , 对分离出来的每一路信号用文献 [9] 的方法进行噪声属性判别, 对不是噪声的分离信号根据解混矩阵 \hat{A}_j 重构其对应的阵列接收信号, 此时相当于阵列接收信号只有一个目标对其起作用, 对重构的阵列信号采用高分辨方法 (高分辨方法可以采用 MUSIC 方法, 也可采用 MVDR 方法等, 在后面的分析中, 如果采用的是 MUSIC 方法, 则本文方法称为 BSS + MUSIC 方法, 若采用的是 MVDR 方法, 则称为 BSS + MVDR 方法) 得到空间谱输出和对应重构此阵列信号的目标方位, 记录此时目标的方位和相应的目标信号, 同时把所有分离信号对应的空间谱进行求和, 得到子带 j 的总空间谱输出; 最后将所有子带得到的空间谱进行求和, 得到总的空间谱, 搜索其谱峰得到最后确定的目标源个数和方位, 并由该方位再去搜索先前记录的分离信号对应的方位, 如果发现方位一致, 则记录此方位上对应的盲源分离信号, 最后将同一方位上对应的盲源分离信号进行聚类, 再进行反傅里叶变换, 则可以把该方位上对应的目标信号恢复出来。

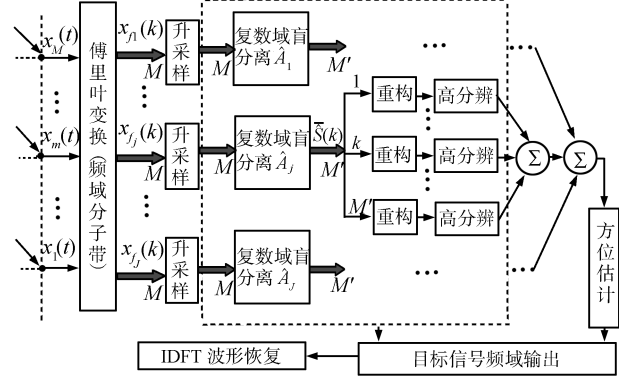


图 2 方位估计与信号恢复模型

Fig. 2 DOA estimation and signal recovery model

上述模型中, 复数域盲源分离和高分辨两关键步骤采用的是现有方法. 另一关键步骤是由去除噪声后的分离信号 $\hat{S}(k)$ 和解混矩阵 \hat{A}_j 对传感器阵列信号进行重构, 即去除不感兴趣的成分. 重构公式如下:

$$X_r = \hat{A}_j^\dagger \hat{S}_r \quad (5)$$

其中, \hat{A}_j^\dagger 表示解混矩阵 \hat{A}_j 的伪逆, $\hat{S}_r = [\hat{S}_r(1), \hat{S}_r(2), \dots, \hat{S}_r(N)]$ 是从盲源分离信号 $\hat{S}(k)$ 中选择的独立成分, $X_r = [X_r(1), X_r(2), \dots, X_r(N)]$ 为感兴趣成分 \hat{S}_r 对应的传感器阵列接收信号, 即阵列重构信号。

3 数据检验

3.1 仿真数据

仿真实验考虑均匀线列阵位于两宽带目标源的远场, 两目标源均用海上实录舰船辐射噪声代替 (频率范围: 100 Hz ~ 1500 Hz), 目标 1 方位为 -1° , 目标 2 方位为 3° , 两者强度相等. 图 3 是信噪比 (加性高斯白噪声) 为 -3 dB, 快拍数为 8192 时, 4 种方法 (MVDR 方法、MUSIC 方法、BSS + MVDR 方法和 BSS + MUSIC 方法) 得到的方位空间谱随阵元数的变化; 图 4 是阵元数为 32, 快拍数为 8192 时, 4 种方法得到的方位空间谱随信噪比的变化; 图 5 是阵元数为 32, 信噪比为 -3 dB 时, 4 种方法得到的方位空间谱随快拍数的变化; 图 6 是阵元数为 48, 采样频率 25 kHz、信噪比为 -3 dB、快拍数为 25000 时, 阵列前四元水听器接收信号及相应谱; 图 7 是 MVDR 方法、BSS + MVDR 方法恢复的两目标信号与真实信号对比, 恢复的目标信号谱与真实信号谱的相关系数分别示于图中. 由于目标信号的恢复主要来源于盲源分离结果, 因此 BSS + MUSIC 方法恢复的目标信号与 BSS + MVDR 方法恢复的目标信号一致, 文中没有画出。

从上面宽带信号的分析结果, 可以得出如下结论:

1) 信噪比为 -3 dB、快拍数为 8192 条件下, 完成分辨方位差为 4° 的两目标时, 盲源分离与高分辨融合的方法比单独的高分辨方位估计 MVDR、MUSIC 方法需要的阵元数较少, MVDR 方法在 38 阵元时分辨出两目标, 其中一个目标的方位估计存在误差, 当阵元数增加至 58 时能无误差地分辨两目标, 而 BSS + MVDR 方法在 30 个阵元时分辨出两目标, 其中一个目标的方位估计存在误差, 当阵元数增加至 56 时能无误差地分辨两目标; MUSIC 方法在 24 阵元时分辨出两目标, 其中一个目标的方位估计存在误差, 当阵元数增加

至 58 时能无误差地分辨两目标, 而 BSS + MUSIC 方法在 22 个阵元时分辨出两目标, 其中一个目标的方位估计存在误差, 当阵元数增加至 56 时能无误差地分辨两目标.

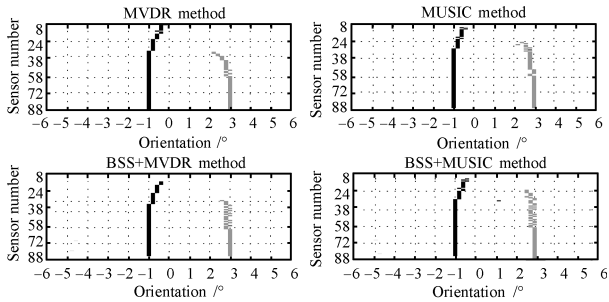


图 3 方位空间谱随阵元数的变化

Fig. 3 Orientation spatial spectrum varies with sensor number

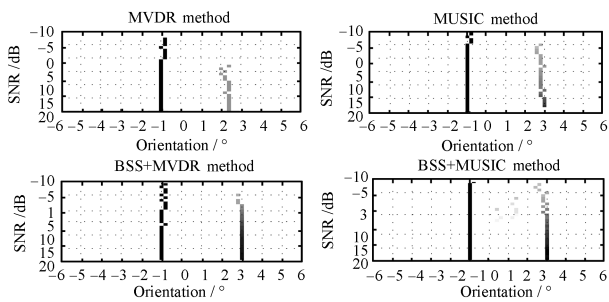


图 4 方位空间谱随信噪比的变化

Fig. 4 Orientation spatial spectrum varies with SNR

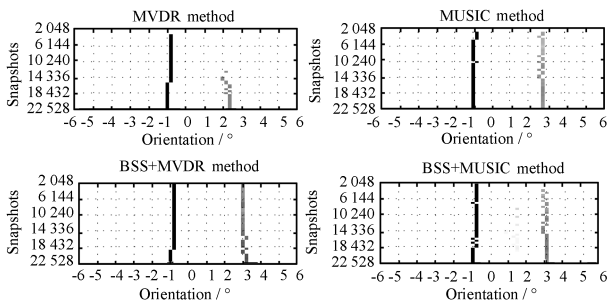


图 5 方位空间谱随快拍数的变化

Fig. 5 Orientation spatial spectrum varies with number of snapshots

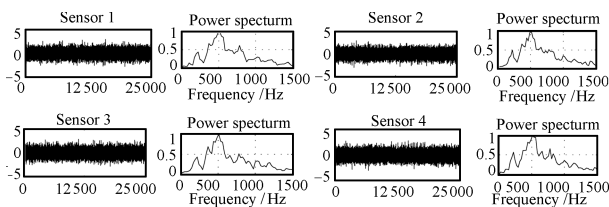


图 6 阵列前四元水听器接收信号及相应谱

Fig. 6 Receipt signal and power spectra of the foremost four sensors

2) 在阵元数为 32, 快拍数为 8192 时, 要想无误差地分辨出两目标, MVDR 方法基本上不可能, 其中一个目标的方位估计总存在误差, MUSIC 方法则需要信噪比在 15 dB 以

上, 而 BSS + MVDR 方法需要信噪比在 1 dB 以上, BSS + MUSIC 方法需要信噪比在 3 dB 以上.

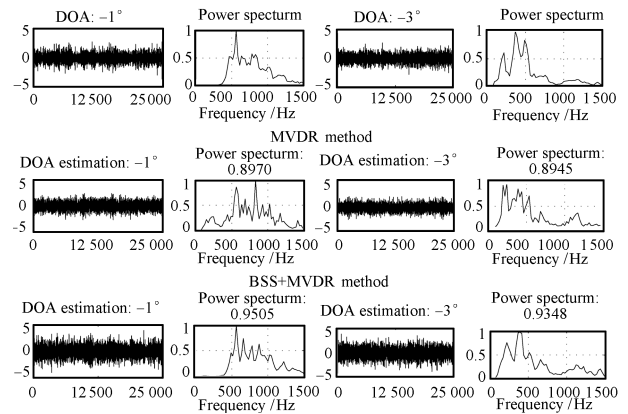


图 7 真实信号、波束输出信号及相应谱

Fig. 7 Real signal, beam output signal and corresponding power spectra

3) 在阵元数为 32, 信噪比为 -3 dB 时, 分辨方位差 4° 的两目标, MVDR 方法在快拍数大于 14336 时虽然能分辨出两个目标, 但其中一个目标的方位估计总存在误差, 盲源分离与高分辨融合的方法在快拍数变化过程中基本上能分辨出两个目标, 而且精度上优于 MUSIC 方法.

4) 在阵元数 48, 信噪比 -3 dB, 快拍数 25000 时, 从图 7 对目标信号的恢复结果可看出, 所提出的方法不仅能对目标方位进行估计, 还能对相应方位的目标信号进行很好的恢复, 并且优于 MVDR 方法, 这对于目标特征提取、目标识别具有非常重要的意义.

3.2 海上实测数据

试验海区位于东经 121°33' ~ 121°42', 北纬 38°46' ~ 38°52' 的主航道附近, 海区平均水深 46 米, 声传播速度约 1500 米/秒. 海区地形复杂, 水流急, 过往船只多, 离岸近、干扰源多, 属典型的复杂海区. 接收阵列由 28 个水听器等间隔组成, 阵元间隔 0.225 米, 接收阵列深度约 20 米. 水听器接收信号经信号调理机后到 Sony sir1000i 录音机磁带记录, 整个记录数据期间, 接收船一直辅机发电, 有较大噪声. 试验时目标船在大约 5.3 公里的距离沿正横经过接收船, 目标船相对接收船基阵的 GPS 方位历程如图 8 所示. 同时, 目标船运动时在视觉范围内还发现有渔船目标运动, 而且渔船先于目标船经过接收船正横.

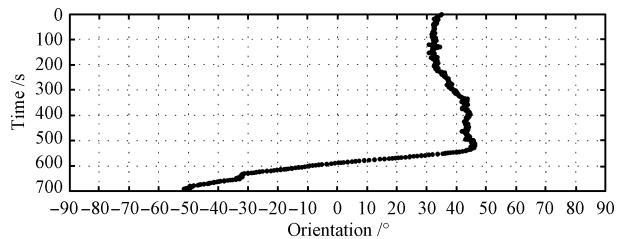


图 8 目标船相对接收船基阵的 GPS 方位历程

Fig. 8 GPS orientation course of the target ship corresponding to the receipt array

图 9 是宽带 MVDR 方法、BSS + MVDR 方法和 BSS + MUSIC 方法估计得到的二维方位历程.

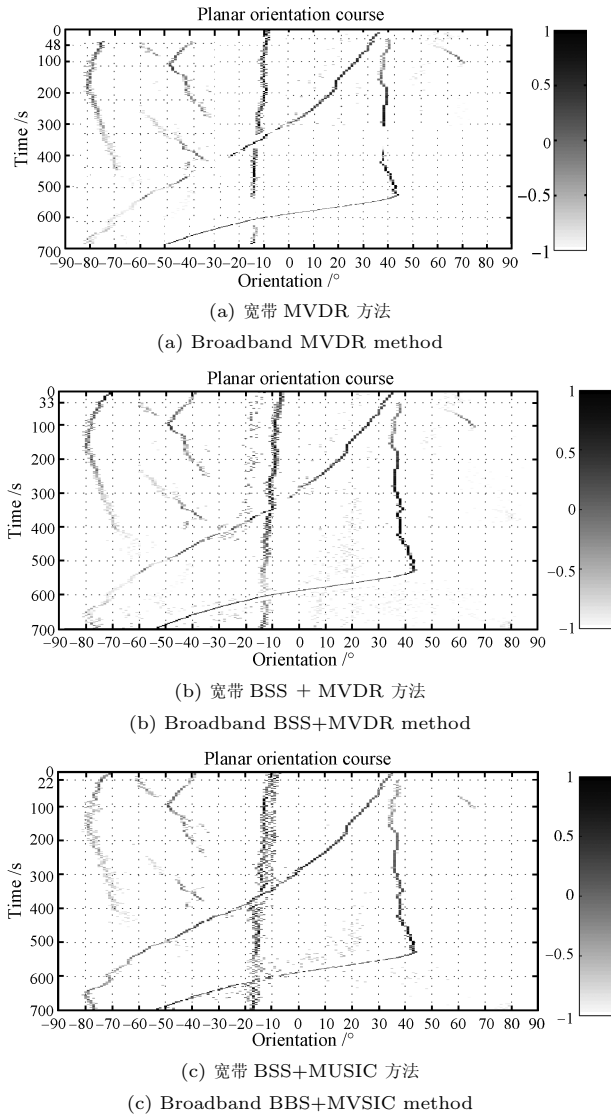


图9 宽带 MVDR 方法、BSS + MVDR 方法和 BSS + MUSIC 方法方位估计的二维历程

Fig. 9 Estimation planar orientation course using the broadband MVDR, BSS+MVDR, and BSS+MUSIC methods

由图9可以看出, 宽带 MVDR 方法、BSS + MVDR 方法和 BSS + MUSIC 方法都对目标船方位进行了很好的估计, 但盲源分离与高分辨融合的方法明显提高了弱目标信号(如目标船)空间谱强度, 而且比 MVDR 方法提前发现了目标船, 宽带 BSS + MVDR 方法在第 33 秒时发现目标船, BSS + MUSIC 方法在第 22 秒时发现目标船, MVDR 方法则需要第 48 秒后才能跟踪上目标船, 且空间谱值较弱. 另外, 对 3 种方法得到的 -10° 左右目标进行听音发现, 可判为接收船辅机声源.

4 结论

本文提出的盲源分离与高分辨融合的方法在目标方位估计、波形恢复方面都表现出了很好的性能, 能在不知道目标

源个数的情况下准确估计出目标的方位及相应方位上的目标信号, 优于单独的高分辨方法. 海上实测数据也验证了盲源分离与高分辨融合完全可应用于实际海洋背景下, 且优于常规的 MVDR 方法, 能够检测更弱的目标.

References

- 1 Domochowski J, Benesty J, Affes S. Direction of arrival estimation using the parameterized spatial correlation matrix. *IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, 2007, **15**(4): 1327–1339
- 2 Schmidt R O. Multiple emitter location and signal parameter estimation. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1986, **34**(3): 276–280
- 3 Capon J. High resolution frequency wavenumber spectrum analysis. *Proceedings of the IEEE*, 1969, **57**(8): 1408–1418
- 4 Qi Chong-Ying, Zhang Yong-Shun, Chen Xi-Hong, Han Ying. Algorithm on high resolution DOA estimation under condition of unknown number of signal sources. *Journal on Communications*, 2005, **26**(3): 58–63
(齐崇英, 张永顺, 陈西宏, 韩颖. 一种未知信源数的高分辨 DOA 估计算法. *通信学报*, 2005, **26**(3): 58–63)
- 5 Coviello C M, Sibil L H. Blind source separation and beamforming: algebraic technique analysis. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2004, **40**(1): 221–235
- 6 Choi S, Cichocki A, Park H M, Lee S Y. Blind source separation and independent component analysis: a review. *Neural Information Processing*, 2005, **6**(1): 1–57
- 7 Pedersen M S, Larsen J, Kjems U, Parra L C. A survey of convolutive blind source separation methods. *Springer Handbook on Speech Processing and Speech Communication*. Berlin: Springer, 2006. 1–34
- 8 Kang Chun-Yu, Zhang Xin-Hua, Han Dong. A kind of method for direction of arrival estimation based on blind source separation. *Acta Automatica Sinica*, 2008, **34**(10): 1324–1326
(康春玉, 章新华, 韩东. 一种基于盲源分离的 DOA 估计方法. *自动化学报*, 2008, **34**(10): 1324–1326)
- 9 Hu Hong-Ying, Ma Xiao-Jiang. Signal denoising based on local-wave decomposing method. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2006, **37**(1): 118–120, 135
(胡红英, 马孝江. 基于局域波分解的信号降噪算法. *农业机械学报*, 2006, **37**(1): 118–120, 135)

康春玉 海军大连舰艇学院讲师. 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 Lecturer 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. 主要研究方向包括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.)