

# 信号相位匹配原理的低空目标测向实验

肖 卉<sup>1,2</sup>, 孙进才<sup>2</sup>, 袁 骏<sup>3</sup>

(1. 空军雷达学院雷达兵器运用工程实验室, 武汉 430019; 2. 西北工业大学航海学院, 西安 710072;  
3. 海军工程大学电子工程学院, 武汉 430033)

**摘要:** 利用自行设计的圆柱阵和圆台阵, 对基于信号相位匹配原理的奇异值分解(SVDSPM, Singular Value Decomposition Based on Signal Phase Matching Principle)算法的低空测向性能进行了外场实验研究。分析了在圆柱阵和圆台阵两种条件下, SVDSPM 算法的空间谱以及均值、绝对误差、方差、均方根误差等方位估计的统计误差, 并与 CBF (Conventional Beamforming)和 MUSIC (Multiple Signal Classification)算法的性能进行了比较。实验结果表明, 利用圆柱阵和圆台阵两种阵型, SVDSPM 方法的指向性均较为尖锐。与 CBF 和 MUSIC 算法相比, SVDSPM 算法对俯仰角估计的均方根误差最小, 圆柱阵时为 1.9°, 圆台阵时为 3.3°。

**关键词:** 低空目标; 圆柱阵; 圆台阵

中图分类号: TN911.7

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2010)-03-0243-05

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2010.03.001

## Experiment on SVDSPM algorithm for DOA estimation of low altitude target

XIAO Hui<sup>1,2</sup>, SUN Jin-cai<sup>2</sup>, YUAN Jun<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Radar Armament and Utilization Engineering, Air Force Radar Academy, Wuhan 430019, China;

2. College of Marine Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

3. Electronic Engineering College, Navy Engineering University, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** In order to verify the validity of SVDSPM (Singular Value Decomposition Based on Signal Phase Matching Principle) algorithm, the experimental research on DOA (direction of arrival) estimation of low altitude target is carried out by using the existing cylinder array and frustum of a cone array. The experiments and results are explained and discussed with the following two topics: (1) SVDSPM algorithms using the cylinder array and the frustum of a cone array; (2) analyses of experimental results. The results show that: (1) SVDSPM algorithm can give sharp directivity and low side lobe; (2) compared with MUSIC (Multiple Signal Classification) and CBF (Conventional Beamforming), SVDSPM is more efficient in low altitude target estimation. With SVDSPM using the cylinder array, the bias of azimuth is 1.9 degree. With SVDSPM using the frustum of a cone array, the bias of elevation is 3.3 degree.

**Key words:** low altitude target; cylinder array; frustum of a cone array

## 1 引言

声测定位技术是利用声学电子装置接收目标声场信息以确定目标声源位置的技术, 是一种重要的军事侦察手段, 可分为被动定位技术和主动定位技术。被动声定位属于辐射源无源定位, 它具有作用距离远, 隐蔽性能好等特点。近年来, 由于武装直升机等现代兵器提高了低空突防能力, 因此利用被动声测技术, 精确估计远程低空目标的方位成为防御系统中新的研究热点<sup>[1]</sup>。

信号相位匹配原理<sup>[2-4]</sup>的 SVDSPM 算法是基于

阵列对准信号波达方向时, 不同阵元的接收信号中的期望信号同相, 而干扰(由于不在信号方向)和随机噪声(由于相位是随机的)不同相的假设条件下的一种信号处理方法。仿真结果表明, 将线列阵的 SVDSPM 算法用于空中目标测向是可行的<sup>[5]</sup>。然而对于低空目标, 由于平面阵垂直方向无尺度, 算法的测向精度仍然较低。因此本文自制了三维实孔径的圆柱阵和圆台阵, 通过实验分析 SVDSPM 算法的低空测向性能, 并与 CBF 和 MUSIC 两种算法进行了比较。结果表明 SVDSPM 算法可以精确估计低俯仰角目标方位, 且具有较强的稳定性, 对解决目前低空防御问题具有重要的意义。

## 2 SVDSPM 算法

假设  $N$  个麦克风任意布放在三维空间, 各传感

收稿日期: 2009-03-05; 修回日期: 2009-05-05

基金项目: 国家自然科学基金(60672136)

作者简介: 肖卉(1980-), 女, 陕西西安人, 博士, 讲师, 研究方向为阵列信号处理。

通讯作者: 肖卉, E-mail: xiaohui\_nwpu@163.com

器的坐标为  $(x_1, y_1, z_1), \dots, (x_N, y_N, z_N)$ ，由文献[6]可知，在远场条件下，声波到达坐标原点 O 与到达各阵元的时延可表示为：

$$\tau_i = -(x_i \sin\theta \cos\varphi + y_i \sin\theta \sin\varphi + z_i \cos\theta) / c \quad (i=1, \dots, N) \quad (1)$$

对于如图 1、2 所示的圆柱阵和圆台阵，其阵元在圆环上均匀分布，因此时延可以表示为：

$$\tau_i = -\{d_i \sin\theta \cos[\varphi - (i-1)\pi/2] + h_i \cos\theta\} / c \quad (i=1, \dots, 24) \quad (2)$$

其中  $d_i$  为圆环半径， $h_i$  为立体阵层高， $T$  为目标， $\varphi$  为目标方位角， $\theta$  为目标俯仰角。

则第  $i$  个阵元的接收信号为：

$$p_i(t) = s(t - \tau_i) + n_i(t) \quad (i=1, \dots, 24) \quad (3)$$

其中  $n_i(t)$  为第  $i$  个阵元的加性噪声。

将式(3)作傅式变换后信号的频域表示为：

$$|P_i(\omega)| \exp(j\psi_i) = |S(\omega)| \exp[j(\alpha - \omega\tau_i)] + |N_i(\omega)| \exp(j\beta_i) \quad (4)$$

其中  $\psi_i$ 、 $\alpha$ 、 $\beta_i$  分别为接收的信号、期望信号和噪声的相位。

根据信号相位匹配原理，只有信号空间相位相同时，才可由式(4)求解信号  $S$  的实部与虚部。因此用  $\exp(j\omega\tau_i)$  ( $i=1, \dots, 24$ ) 分别乘以式(4)两边得：

$$|P_i(\omega)| \exp[j(\psi_i + \omega\tau_i)] = |S(\omega)| \exp(j\alpha) + |N_i(\omega)| \exp[j(\beta_i + \omega\tau_i)] \quad (5)$$

根据文献[3]得到矩阵形式：

$$AS = P + \mathcal{E} \quad (6)$$

其中， $A = 2 \cdot \begin{bmatrix} \text{Re}(P'_2 - P'_1) & \text{Im}(P'_2 - P'_1) \\ \text{Re}(P'_3 - P'_1) & \text{Im}(P'_3 - P'_1) \\ \vdots & \vdots \\ \text{Re}(P'_N - P'_1) & \text{Im}(P'_N - P'_1) \end{bmatrix}$

$$S = \begin{bmatrix} \text{Re}(S) \\ \text{Im}(S) \end{bmatrix}$$

$$\mathcal{E} = \begin{bmatrix} |N_2|^2 - |N_1|^2 & |N_3|^2 - |N_1|^2 & \dots & |N_N|^2 - |N_1|^2 \end{bmatrix}^T$$

$$P = \begin{bmatrix} |P_2|^2 - |P_1|^2 & |P_3|^2 - |P_1|^2 & \dots & |P_N|^2 - |P_1|^2 \end{bmatrix}^T$$

$$P'_i = |P_i(\omega)| \exp[j(\psi_i + \omega\tau_i)] \quad i=1, \dots, N$$

根据文献[4]，SVDSPM 算法的方位估计判别准则为：

$$E_1 = 1 / \text{Tr}(AA^T) \quad (7)$$

其中  $\text{Tr}(\cdot)$  定义为矩阵的迹，即定义为矩阵的对角线元素之和。

### 3 实验验证

#### 3.1 实验概况

空间声源定位实验于 2007 年 8 月在西北工业大学长安校区操场进行。实验场地如图 3 所示。实验期间天气晴朗，环境总体比较安静，周围工地偶尔有噪声影响。信号为逆风传播，实验期间风速较高时，对接受信号有影响。

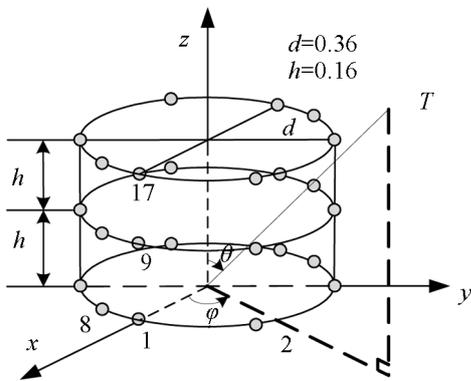


图 1 圆柱阵  
Fig.1 Cylinder array

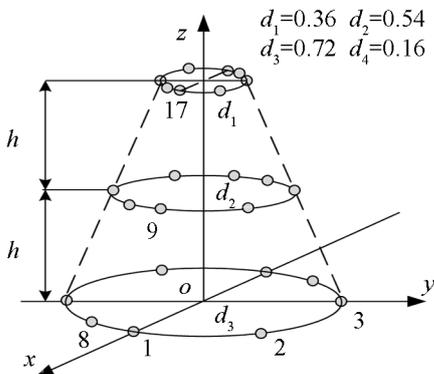


图 2 圆台阵  
Fig.2 Frustum of a cone array

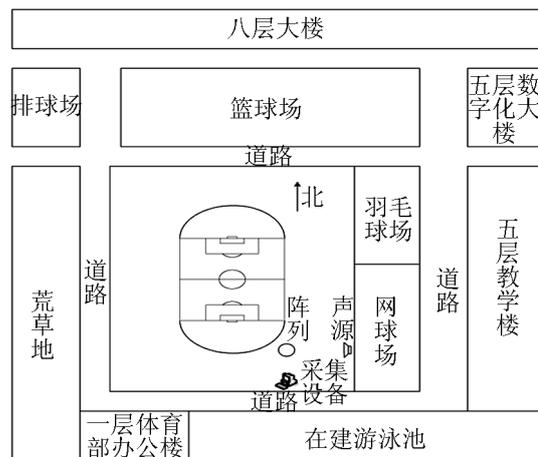


图 3 实验场地示意图  
Fig.3 Experimental field

为尽量避免反射等环境影响，声源位置选在操场一角，声传播方向上空间开阔，无较大障碍物；采集系统与声源、基阵之间的距离足够远，且不位

于声传播主轴方向, 从而保证基阵附近不存在较大的反射物体。

### 3.2 实验仪器

实验仪器包括: Agilent 33220A 信号发生器两台, 声望 302 一台, B&K 功放一个, 惠威扬声器两个, 麦克风 24 个, 24 通道 PXI 多通道数据采集系统一套, 笔记本电脑一台, 以及连接线若干。组成的发射和接收系统如图 4 所示, 上半部分为发射系统, 下半部分为接收系统。

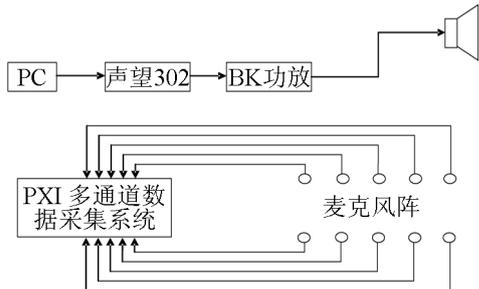


图4 实验系统示意图  
Fig.4 Experimental system

图 5~7 分别是实验中采用的声源、采集仪器以及麦克风阵的实物图。

由于本次实验目的是验证算法对低空目标的测向性能, 因此实验中扬声器固定在梯子上, 位于麦克风阵方位角  $\varphi=48^\circ$ 、俯仰角  $\theta=85^\circ$  处。

实验中共采用了圆柱阵和圆台阵两种阵型, 如图 6、7 所示。麦克风阵的支架是专门根据本次实验要求设计制作的, 由支撑杆和不同尺寸的圆盘组成, 可自由拼装拆卸。支撑杆上开有用于固定的小孔, 圆盘可以依照实验需要固定在不同的高度。圆盘上开有安装麦克风的小孔, 安装孔以多圆环的形式均匀排列。改变麦克风插入的孔位以及圆盘时, 基阵的阵型就发生变换。24 个麦克风插在不同高度



图5 作为声源的扬声器实物图  
Fig.5 Source of low altitude



图6 基阵与实验仪器实物图  
Fig.6 Experimental array and instruments



图7 基阵实物图  
Fig.7 Experimental array

相同半径的三张圆盘上即可以形成圆柱阵, 插在不同高度不同半径的三张圆盘上形成圆台阵。使用圆盘可减小地面反射影响。

### 3.3 实验参数

实验共采用 24 个麦克风, 排列成如图 1、2 所示的圆柱阵和圆台阵, 基阵尺寸与图中一致。声源位于方位角  $\varphi=48^\circ$ 、俯仰角  $\theta=85^\circ$  的低俯仰角处, 发射  $f=500\text{Hz}$  的单频信号。采样频率  $f_s=20480\text{Hz}$ 。搜索范围: 方位角  $0^\circ\leq\varphi\leq360^\circ$ , 俯仰角  $0^\circ\leq\theta\leq90^\circ$ 。

## 4 实验结果

### 4.1 圆柱阵测向结果

圆柱阵采集数据的归一化功率谱如图 8 所示。可以看出, 直流噪声幅度较大, 而信号的幅度较低。因此在数据处理时进行了去直流成分的预处理。CBF、MUSIC 和 SVDSPM 算法的空间谱如图 9~11 所示。

由图 9~11 可以看出, 三种算法均能估计出低空目标的方位。但三种算法中 SVDSPM 算法的旁瓣较少, 旁瓣级较低, 主副瓣比较大, 同时指向性较为尖锐。

在上述阵型及实验条件下进行 20 次独立实验, 分别得到 CBF、MUSIC 和 SVDSPM 算法的方位估计统计结果, 如表 1 所示。

由表 1 可见, 三种算法均能较准确估计低空目标的方位, 同时三种算法对方位角和俯仰角估计的均方根误差都在  $2.6^\circ$  以下。其中 SVDSPM 算法对方位角估计的均方根误差在三种算法中最小, 对俯仰角估计的均方根误差与 CBF 算法相同, 仅  $1.9^\circ$ 。因而采用圆柱阵对低空目标进行测向时, SVDSPM

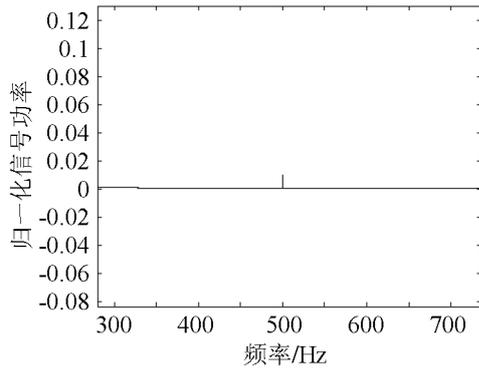


图8 归一化信号功率谱  
Fig.8 Power spectrum of signal

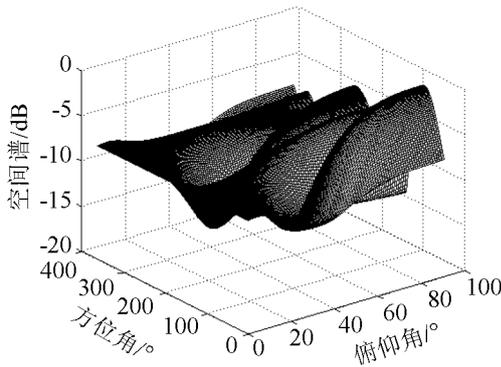


图9 CBF算法的空间谱  
Fig.9 Spatial spectrum of CBF

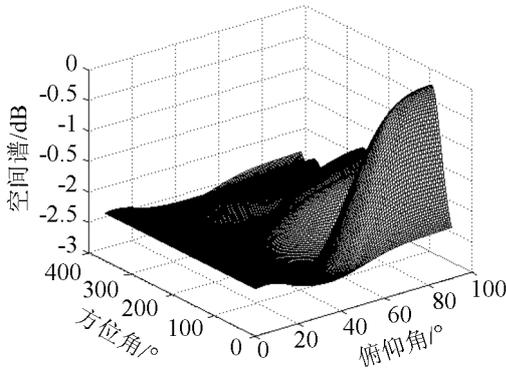


图10 MUSIC算法的空间谱  
Fig.10 Spatial spectrum of MUSIC

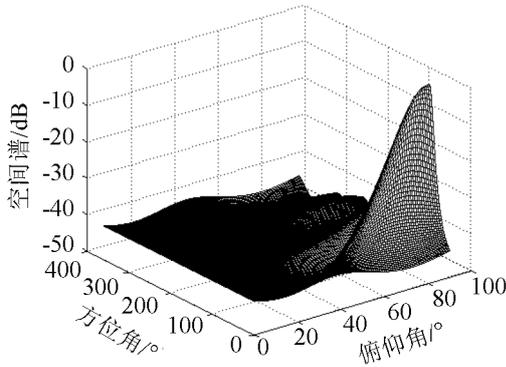


图11 SVDSPM算法的空间谱  
Fig.11 Spatial spectrum of SVDSPM

表1 圆柱阵条件下三种算法方位估计结果

Table 1 The results of three algorithm using cylinder array

算法	均值/°		绝对误差/°	
	方位角	俯仰角	方位角	俯仰角
CBF	47.8	86.9	0.2	1.9
MUSIC	47.1	87.6	0.9	2.6
SVDSPM	47.9	86.9	0.1	1.9
算法	方差/°		均方根误差/°	
	方位角	俯仰角	方位角	俯仰角
CBF	0.4	0.3	0.4	1.9
MUSIC	0.4	0.5	0.9	2.6
SVDSPM	0.3	0.4	0.3	1.9

算法可以较为精确地估计目标方位。

#### 4.2 圆台阵测向结果

利用圆台阵采集的数据其归一化功谱如图 12 所示。CBF、MUSIC 和 SVDSPM 算法的空间谱如图 13~15 所示。

可以看出，三种算法均能估计出低空目标方位。相对 CBF 算法，MUSIC 算法和 SVDSPM 算法的指向性更为尖锐。

进行 20 次独立实验，分别得到 CBF、MUSIC 和 SVDSPM 算法的方位估计统计结果，如表 2 所示。

由表 2 可见，对于俯仰角为 85°的目标，CBF

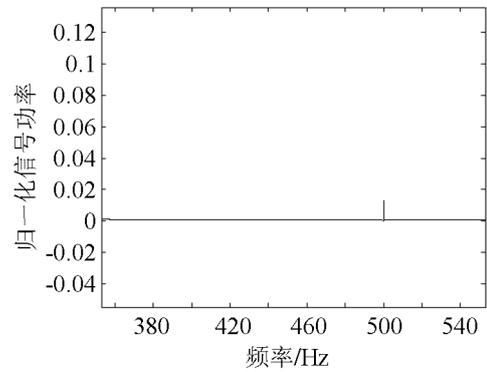


图12 归一化信号功率谱  
Fig.12 Power spectrum of signal

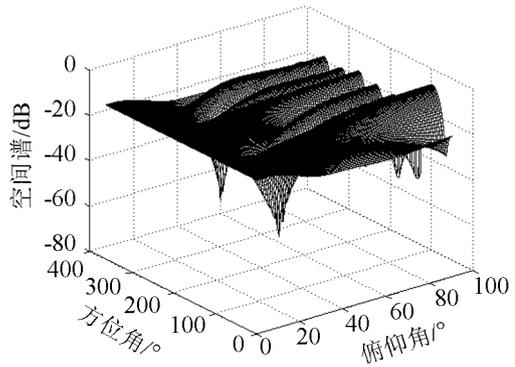


图13 CBF算法的空间谱  
Fig.13 Spatial spectrum of CBF

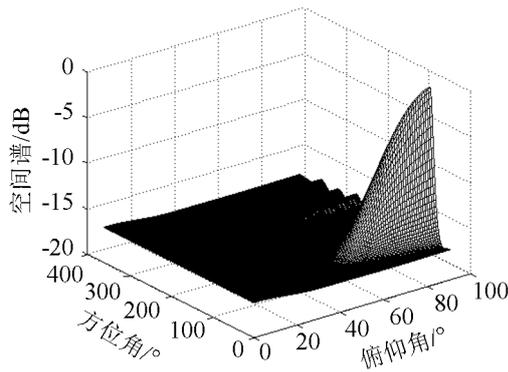


图 14 MUSIC 算法的空间谱  
Fig.14 Spatial spectrum of MUSIC

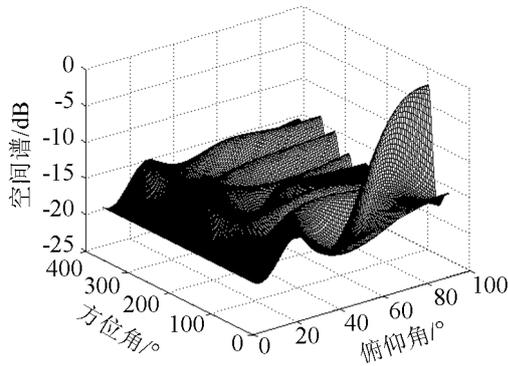


图 15 SVDSPM 算法的空间谱  
Fig.15 Spatial spectrum of SVDSPM

和 MUSIC 两种算法估计结果的均方根误差都为 5°, 均达到搜索范围的边界, 因此不能确定出目标的方位。而 SVDSPM 算法对方位角估计的均方根误差为 1°, 对俯仰角估计的均方根误差为 3.3°, 可以较为准确地估计目标方位。因此, 采用圆台阵对低空目标测向时, SVDSPM 算法是有效的。与圆柱阵测向结果的对照表明, SVDSPM 算法的适用性广泛, 低空测向性能稳定, 具有较高的工程应用价值。

### 5 结论

通过基于信号相位匹配原理 SVDSPM 算法的立体阵声源定向实验结果分析, 可得出如下结论。

- (1) 利用圆柱阵时, 与 CBF、MUSIC 算法相比, SVDSPM 算法的指向性尖锐, 旁瓣少, 主副瓣比较大, 对俯仰角估计的均方根误差仅为 1.9°。
- (2) 利用圆台阵时, 在 CBF 和 MUSIC 算法失

效的情况下, SVDSPM 算法仍能较为精确地估计出低空目标的方位。SVDSPM 算法对方位角估计的均方根误差为 1°, 对俯仰角估计的均方根误差为 3.3°。

表 2 圆台阵条件下三种算法方位估计结果  
Table 2 The results of three algorithm using frustum of a cone array

算法	均值/°		绝对误差/°	
	方位角	俯仰角	方位角	俯仰角
CBF	48	90	0	5
MUSIC	48	90	0	5
SVDSPM	49	88.2	1	3.2

算法	方差/°		均方根误差/°	
	方位角	俯仰角	方位角	俯仰角
CBF	0	0	0	5
MUSIC	0	0	0	5
SVDSPM	0.2	0.5	1	3.3

(3) SVDSPM 算法的低空测向性能与有关参数的关系尚待深入研究。

### 参 考 文 献

- [1] 王昭. 小基阵高精度声测被动定位的研究[D]. 博士学位论文, 西安: 西北工业大学, 1999.  
WANG Zhao. Researches on high precision acoustic passive localization of small size array[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 1999.
- [2] 孙进才, 朱维杰, 孙轶源. 利用三元阵的相干干扰抵消原理及仿真研究[J]. 声学学报, 2001, 26(6): 57-544.  
SUN Jincai, ZHU Weijie, SUN Yiyuan. Principle and simulation of coherent interference suppression by a three-sensor array[J]. Acta Acustica, 2001, 26(6): 57-544.
- [3] 朱维杰, 孙进才. 多元阵列的信号相位匹配法[J]. 西北工业大学学报, 2002, 20(4): 642-646.  
ZHU Weijie, SUN Jincai. On ensuring effectiveness of signal phase-matching of multisensor array[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2002, 20(4): 642-646.
- [4] 王惠刚, 李志舜, 孙进才. 基于相位匹配原理的稳健方位估计[J]. 电子与信息学报, 2005, 27(2): 189-193.  
WANG Huigang, LI Zhishun, SUN Jincai. A robust criterion for direction of arriving estimation based on phase matched theory [J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2005, 27(2): 189-193.
- [5] 孙进才, 严光洪, 候宏, 等. 双平行线列阵的方位估计及声探测盲区分析[J]. 西北工业大学学报, 2008, 26(2): 152-157.  
SUN Jincai, YAN Guanghong, HOU Hong et al. An algorithm based on singular value decomposition for signal phase matching(SVDSPM) and sound detection blind area analysis[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2008, 26(2): 152-157.