

# 利用信号相位匹配原理的声源方位估计实验研究<sup>\*</sup>

孙进才 肖卉 侯宏 赵俊渭 刘理 袁骏

(西北工业大学航海学院 西安 710072)

2005 年 4 月 8 日收到

2006 年 5 月 9 日定稿

**摘要** 为了验证信号相位匹配原理的正确性, 利用自制的 16 元线列阵, 在水库进行了声源定向实验研究。分析了信号相位匹配原理的方位估计性能, 并与 MUSIC 方法和常规波束形成方法的方位估计结果进行了比较; 实验表明: 由该原理定向的指向性半功率点开角是常规波束形成方法半功率点开角的  $1/4\sim 1/7$  和 MUSIC 方法的  $1/2\sim 1/3$ 。利用船舶航行噪声的多目标定向仿真和高分辨方位估计仿真结果表明: 信号相位匹配原理方位估计算法用于多目标方位估计和高分辨方位估计是可行的。  
PACS 数: 43.30, 43.60

## Experimental research for direction of arrival estimation based on signal phase matching principle

SUN Jincai XIAO Hui HOU Hong ZHAO Junwei LIU li YUAN Jun

(College of Marine Engineering, Northwestern Polytechnical University Xi'an 710072)

Received Apr. 8, 2005

Revised May 9, 2006

**Abstract** In order to verify the validity for signal phase matching principle, the experiments of DOA (Direction of Arrival) estimation are carried out at reservoir by using 16-sensor array. The performance of direction estimation by using signal phase matching principle was analyzed and compared with that by using MUSIC and Conventional Beamforming Methods (CBF). The results show that the DOA estimation performance was better than that obtained by MUSIC and CBF methods, and that the 3 dB beam width obtained by Least Squares Method for Signal Phase Matching principle (LSMSPM) and Singular Value Decomposition for Signal Phase Matching principle (SVDSPM) is  $1/4\sim 1/7$  as much as that obtained by CBF and  $1/2\sim 1/3$  by MUSIC methods and the LSMSPM and SVDSPM are available for DOA estimation of multi-sources and for the super-resolution DOA estimation.

## 引言

信号相位匹配原理是信号处理的新方法, 它在干扰抵消<sup>[1-3]</sup>、正弦信号参数估计<sup>[4-6]</sup>、时延估计<sup>[7]</sup>和目标的方位估计<sup>[8-11]</sup>等方面具有广泛的应用前景。目前已完成了利用信号相位匹配原理的源方位估计和时延估计的消声水池实验研究<sup>[12]</sup>。实验结果证明该原理的源方位估计具有阵尺度小, 超指向性和超增益的优越性。为了验证信号相位匹配原理的工程应用可行性, 进行接近实际应用环境条件

下的实验研究是必要的。

本文将通过在水库声源方位估计实验, 验证这一新原理方位估计算法的正确性, 并利用实验数据分析方位估计性能, 且与常规波束形成算法和 MUSIC 算法的方位估计性能比较, 实验结果验证了这一新算法的优越性。

## 1 实验概况

声源方位估计实验在水库进行。实验装置框图如图 1 所示。

\* 国家自然科学基金 (60272077)、航空科学基金 (02F53030) 和陕西省科学基金 (2002F17) 资助项目

实验时, 发射换能器与 16 元接收线列阵 (阵元间距 0.06 m) 在水库中安放正视图如图 2 所示。接收线列阵处的水深约为 10 m, 发射换能器处的水深约为 30 m。为使发射源和水平接收阵稳定, 船是锚泊的, 接收阵下系重物。

定向实验时声源发射信号频率分别为 6 kHz, 12 kHz 和 30 kHz, 相应的脉冲宽度分别为 50 ms, 330 ms 和 5 ms, 周期为 0.25 s 的 CW 信号。

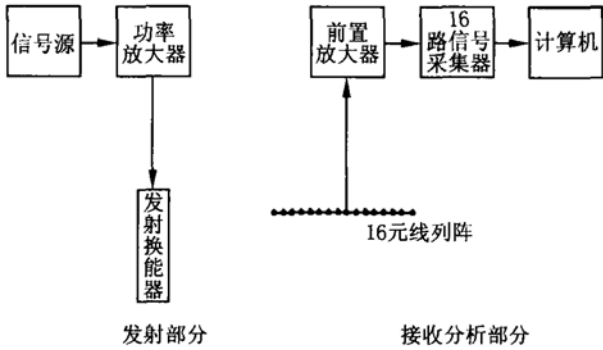


图 1 实验装置框图

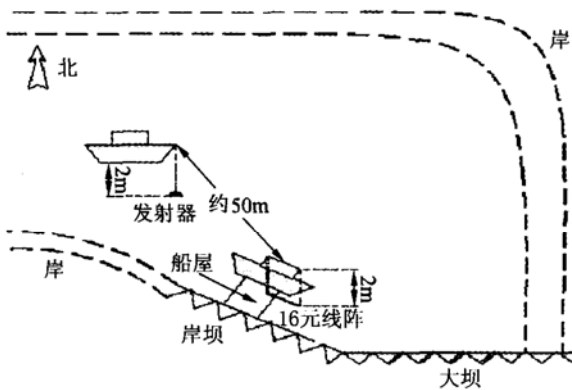


图 2 基阵和换能器安装正视图

## 2 声源定向算法 [8-11]

假设期望信号  $s(t)$  与背景噪声  $n(t)$  是线性相加的, 则传感器接收到的信号可表示为  $p(t) = s(t) + n(t)$ 。频域形式为:

$$|P(j\omega)|e^{j\psi} = |S(j\omega)|e^{j\alpha} + |N(j\omega)|e^{j\phi}, \quad (1)$$

其中  $|P(j\omega)|$ ,  $|S(j\omega)|$  和  $|N(j\omega)|$  为谱幅度;  $\psi$ ,  $\alpha$  和  $\phi$  为相位角, 它们都是  $\omega$  的函数。假设均匀线列阵由  $M$  个无方向性的阵元组成, 在远场条件下传感器输出信号的频域形式为:

$$|P_i(j\omega)|e^{j\psi_i} = |S(j\omega)|e^{j[\alpha - (i-1)\omega\tau]} + |N_i(j\omega)|e^{j\phi_i}, \quad (2)$$

$$i = 1, 2, \dots, M$$

其中  $i = 1, 2, \dots, M$ ,  $\tau = \frac{d}{c} \sin\theta$ ;  $\theta$  为基阵法线与信号到达方向之间的夹角;  $d$  为阵元间距,  $c$  为声速。

通过延时使线列阵对准信号, 即用  $e^{(i-1)j\omega\tau}$  乘式 (2) 两边, 可得:

$$|P_i(j\omega)|e^{j[\psi_i + (i-1)\omega\tau]} = |S(j\omega)|e^{j\alpha} + |N_i(j\omega)|e^{j[\phi_i + (i-1)\omega\tau]}, \quad (3)$$

根据信号相位匹配原理 [8,10] 的求解方法, 令  $|P_i(j\omega)|e^{j[\psi_i + (i-1)\omega\tau]} = P'_i$ , 将 (3) 式右边的  $S(j\omega)$  移至左边, 然后求模的平方得 (为了以下推导公式简洁, 将式中所有的  $j\omega$  省略)

$$|P'_i|^2 + |S|^2 - 2\text{Re}(P'_i)\text{Re}(S) - 2\text{Im}(P'_i)\text{Im}(S) = |N_i|^2. \quad (4)$$

用式 (4) 中第  $i (i = 1, 2, \dots, M)$  个方程两边分别减去第一个方程对应的两边得:

$$|P'_i|^2 - |P'_1|^2 = 2\text{Re}(P'_i - P'_1)\text{Re}(S) + 2\text{Im}(P'_i - P'_1)\text{Im}(S) + (|N_i|^2 - |N_1|^2). \quad (5)$$

令  $\delta_i = |N_i|^2 - |N_1|^2$ , 式 (5) 可写成矩阵形式:

$$P' = A \cdot S + \delta, \quad (6)$$

其中:

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

$$S = \begin{bmatrix} \text{Re}(S_1) \\ \text{Im}(S_1) \end{bmatrix}, \quad P' = \begin{bmatrix} |P'_2|^2 - |P'_1|^2 \\ |P'_3|^2 - |P'_1|^2 \\ \vdots \\ |P'_M|^2 - |P'_1|^2 \end{bmatrix}.$$

两种基于信号相位匹配原理的方位估计算法可以对公式 (6) 进行求解: 一种是最小二乘算法 (LSMSPM) [8], 另一种是奇异值分解算法 (SVDSPM) [11]。

## 3 定向实验结果分析

### 3.1 CW 信号定向结果

为了验证 LSMSPM 和 SVDSPM 算法的方位估计性能, 在以下的分析中, 同时给出了 MUSIC 方法和常规波束形成 (CBF) 算法估计结果以作比较。采集器对信号进行分段采集, 每段信号长度为 20 s, 当信号频率为 30 kHz 时, 采样频率为 102400 Hz, 其他信号频率时, 采样频率为 51200 Hz。空间搜索范围为  $-90^\circ \sim 90^\circ$ , 而 30 kHz 时的空间搜索范围为  $-90^\circ \sim 0^\circ$ 。搜索角步长为  $0.2^\circ$ 。FFT 数据长度为 4096。表 1 给出了信号频率分别为 6 kHz, 12 kHz 和 30 kHz 连续 20 个信号估计的平均方位及其方差。

表 1 信号的方位估计性能

信号频率	估计方位	估计方法			
		LSMSPM	MUSIC	SVDSPM	CBF
6 kHz	方位 (°)	-37.7	-38.2	-38.4	-38.3
	方差	0.363	0.019	0.012	0.029
12 kHz	方位 (°)	-38.4	-38.1	-38.7	-38.1
	方差	0.205	0.080	0.132	0.080
30 kHz	方位 (°)	-39.0	-38.6	-38.9	-38.8
	方差	0.007	0.006	0.023	0.006

表 2 给出了不同估计方法的空间谱指向性的半功率点开角及方差。

由表 1 和 2 可见, SVDSPM 方法的估计结果

是令人满意的。其空间谱指向性的半功率点开角约为 MUSIC 方法的 1/2~1/3, 是常规波束形成方法的 1/4~1/7。说明信号相位匹配原理方位估计算法具有超指向性。LSMSPM 算法的半功率点开角是常规波束形成算法的 1/3~1/6。但 SVDSPM 算法的稳健性好(见表 1 和 2 中的方差)。因为在水库实验中, 存在界面反射, SVDSPM 算法可能具有较好的抗多途干扰能力而 LSMSPM 算法则抗多途干扰能力较差(如图 3 和图 4)。但 30 kHz 时, LSMSPM 算法的半功率点开角约为 SVDSPM 算法的 2/3, 且估计方差小。真正原因尚待分析。

图 3、图 4 和图 5 分别给出了 6 kHz、12 kHz

表 2 空间谱指向性的半功率点开角

信号频率	半功率点开角	估计方法			
		LSMSPM	MUSIC	SVDSPM	CBF
6 kHz	半功率点开角 (°)	6.4	5.0	2.2	17.8
	方差	0.110	0.191	0.015	0.003
12 kHz	半功率点开角 (°)	1.58	3.6	1.3	8.5
	方差	0.228	0.024	0.005	0.001
30 kHz	半功率点开角 (°)	0.56	1.98	0.88	3.37
	方差	0.010	0.0001	0.019	0.0001

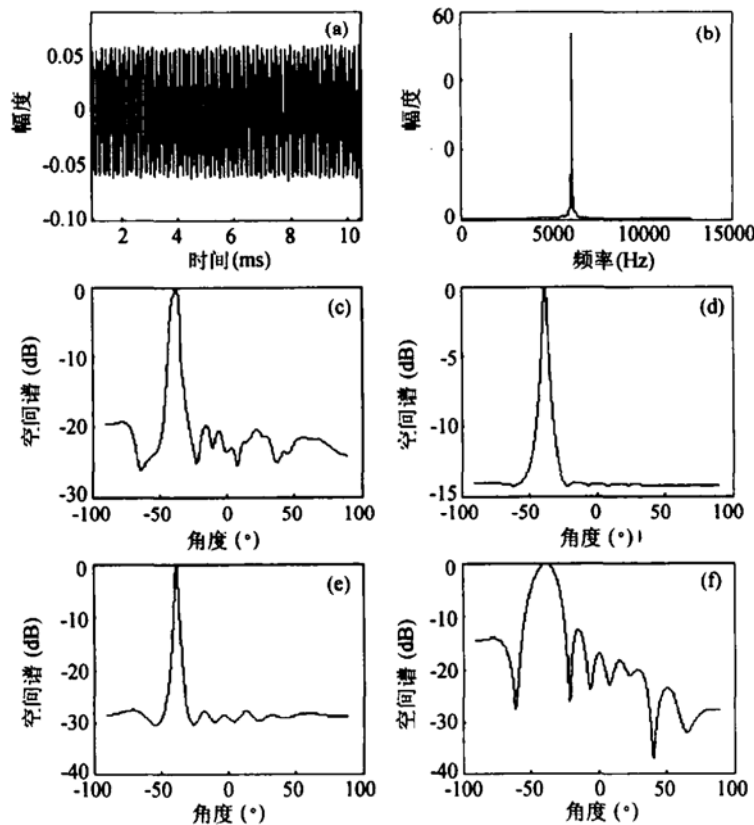


图 3 6 kHz CW 信号估计结果

(a) 信号; (b) 信号谱; (c) LSMSPM; (d) MUSIC; (e) SVDSPM; (f) CBF

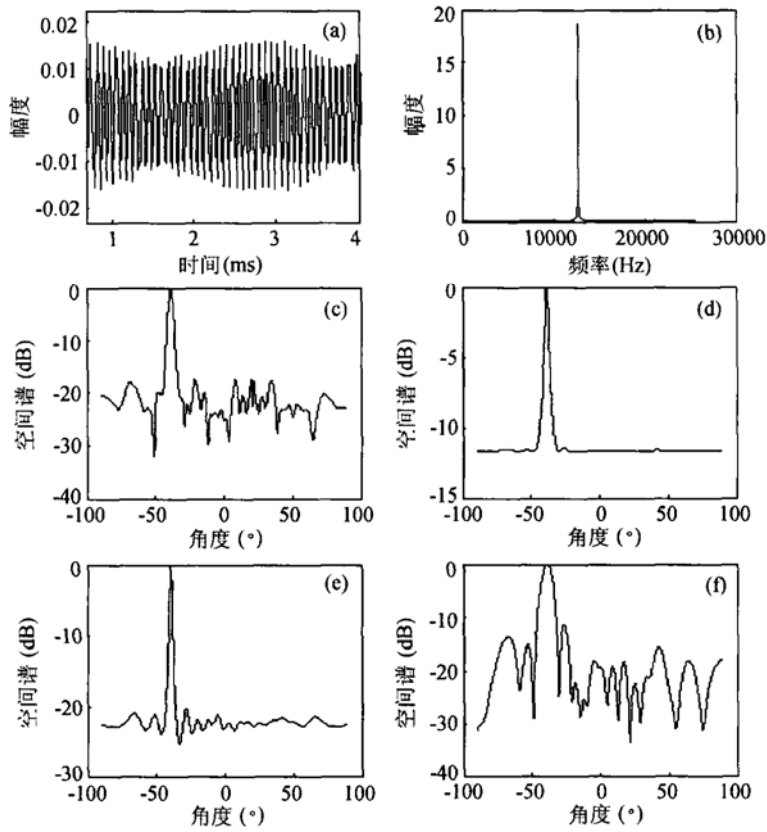


图 4 12kHz CW 信号估计结果

(a) 信号; (b) 信号谱; (c) LSMSPM; (d) MUSIC; (e) SVDSPM; (f) CBF

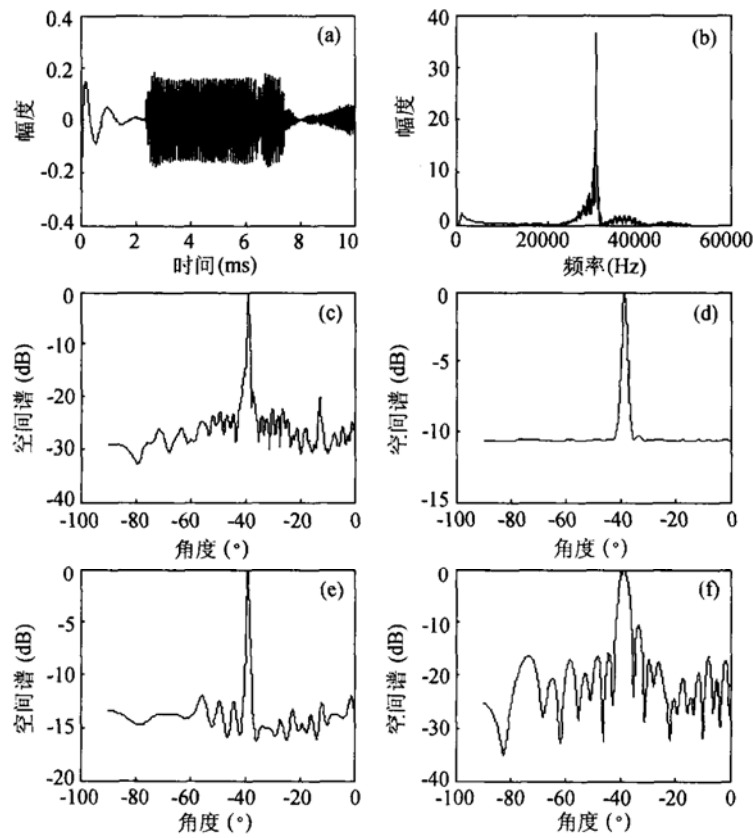


图 5 30 kHz CW 信号估计结果

(a) 信号; (b) 信号谱; (c) LSMSPM; (d) MUSIC; (e) SVDSPM; (f) CBF

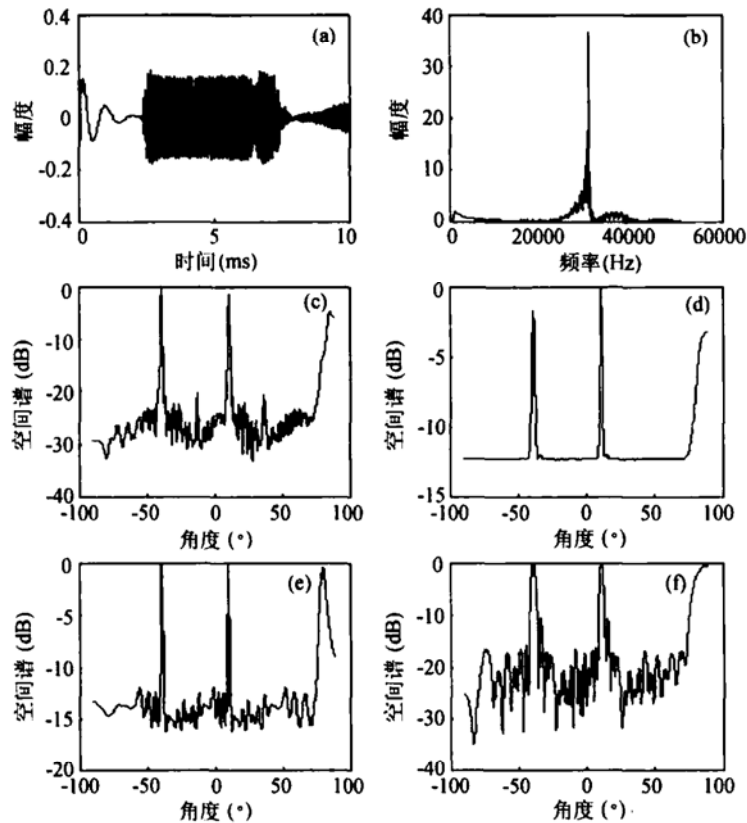


图 6 30kHz CW 信号估计结果

(a) 信号; (b) 信号谱; (c) LSMSPM; (d) MUSIC; (e) SVDSPM; (f) CBF

表 3 船舶噪声的方位估计

信号编号	估计方位	估计方法			
		LSMSPM	MUSIC	SVDSPM	CBF
0	方位 (°)	36.2	-0.6	39.4	39.2
1	方位 (°)	34.4	23.0	33.00	33.4
2	方位 (°)	23.80	14.2	26.2	25.8
3	方位 (°)	11.4	12.2	14.2	14.6
4	方位 (°)	-2.2	0.6	-0.2	0.4
5	方位 (°)	-12.8	-10.2	-13.4	-13.0
6	方位 (°)	-25.2	-16.4	-25.0	-24.8
7	方位 (°)	-32.2	-34.8	-32.4	-32.4
8	方位 (°)	-36.2	-24.4	-37.6	-38.4

和 30 kHz 的三种 CW 信号及其频谱和不同估计方法获得的空间谱。由图 3 和图 4 可见, SVDSPM 算法方位估计的“旁瓣”级低于 LSMSPM 算法的“旁瓣”级,也许是上述抗干扰性能分析的证明。但 30 kHz 时则相反。

图 3、图 4 和图 6 的空间搜索范围为  $-90^\circ \sim 90^\circ$ , 而图 5 的空间搜索范围为  $-90^\circ \sim 0^\circ$ 。因为根据信号相位匹配原理<sup>[1,2]</sup> 阵元间距必须小于最高频率的半波长才不会出现副极大(或不存在奇异峰),当频率为 30 kHz 时,阵元间距必须满足  $d < 0.025$  m。因为对于本实验阵,  $d = 0.06$  m,因此当在  $-90^\circ \sim 90^\circ$  范围搜索时,一定存在副极大<sup>[12]</sup>, MUSIC 和 CBF 算法

也不例外(如图 6 所示)。

### 3.2 船舶航行噪声的定向

船舶自右向左平行于基阵轴线作匀速运动,记录船舶辐射噪声。采样频率为 51200 Hz, FFT 数据长度为 4096。为了使定向结果稳定,进行宽带定向,频率范围为 10000~12500 Hz。

表 3 给出了 9 个时刻(时间间隔为 1 s),利用船舶航行时辐射噪声的定向结果。

由表 3 可见,若置信号数据编号 4 为  $0^\circ$ ,船是匀速运动,那么从正和负向方向估计的方位结果可见, SVDSPM 算法和 CBF 算法估计结果对称性是

令人满意的 (见图 7 所示), 而 MUSIC 在编号为 0、1、2、6 和 8 的估计结果是不能令人满意的, 原因是 MUSIC 算法的抗多途干扰的能力差。LSMSPM 估计结果也是令人满意的, 但 SVDSPM 估计的空间谱曲线比 LSMSPM 估计的光滑, 说明 LSMSPM 对不同频率估计的方向稳健性较差 (见图 8 所示)。图 8 是信号编号为 5 的方位估计空间谱。

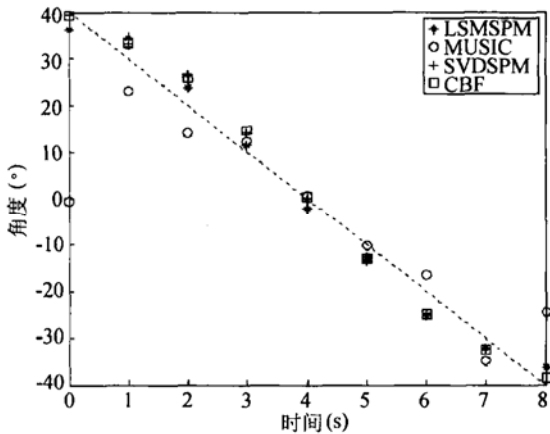


图 7 船舶运动方位历程

### 3.3 多目标定向仿真

将表 3 中时刻 2、3、4、5 和 6 的船噪声信

号相加后作为多目标定向的仿真信号, 然后利用带宽为 10000~12500 Hz 噪声定向, 定向结果如图 9 所示

由图 9 可见, LSMSPM 估计的空间谱曲线不够光滑, 说明方向估计稳健性差, 但 LSMSPM 和 SVDSPM 估计的方位与表 3 列出的结果的一致性都很好, CBF 算法的估计结果也是令人满意的, 但峰一峰值不如 SVDSPM 的尖锐, MUSIC 方法估计结果是不能令人满意的, 原因可能是 MUSIC 算法的抗多途干扰的能力差。

### 3.4 高分辨方位估计仿真

由表 2 可见, 当  $f = 12 \text{ kHz}$  时, LSMSPM 和 SVDSPM 算法获得的半功率点开角  $< 2^\circ$ , 而表 3 中时刻 7 和 8 中的方向角之差  $> 4^\circ$ 。因此可利用时刻 7 和 8 作为双目标高分辨方位估计的仿真信号。仿真结果如图 10 所示。

由图 10 可见, CBF 和 MUSIC 算法均无法区分两个目标, 但 LSMSPM 和 SVDSPM 可以有效地确定两个目标的方位  $(-33.8, -35.6$  和  $-33.2, -38.5)$ , 尤其是 SVDSPM 算法确定的目标方位与表 10 中时刻 7 和 8 确定的方位一致性是令人满意的 (相对偏差小于  $1^\circ$ )。

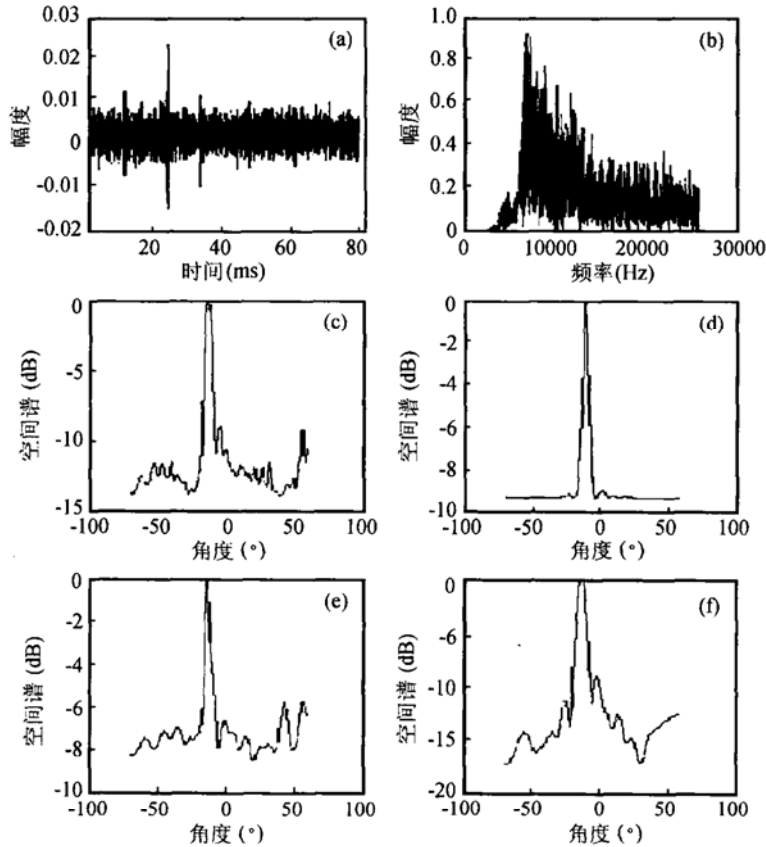


图 8 船舶噪声方位估计结果

(a) 信号; (b) 信号谱; (c) LSMSPM; (d) MUSIC; (e) SVDSPM; (f) CBF

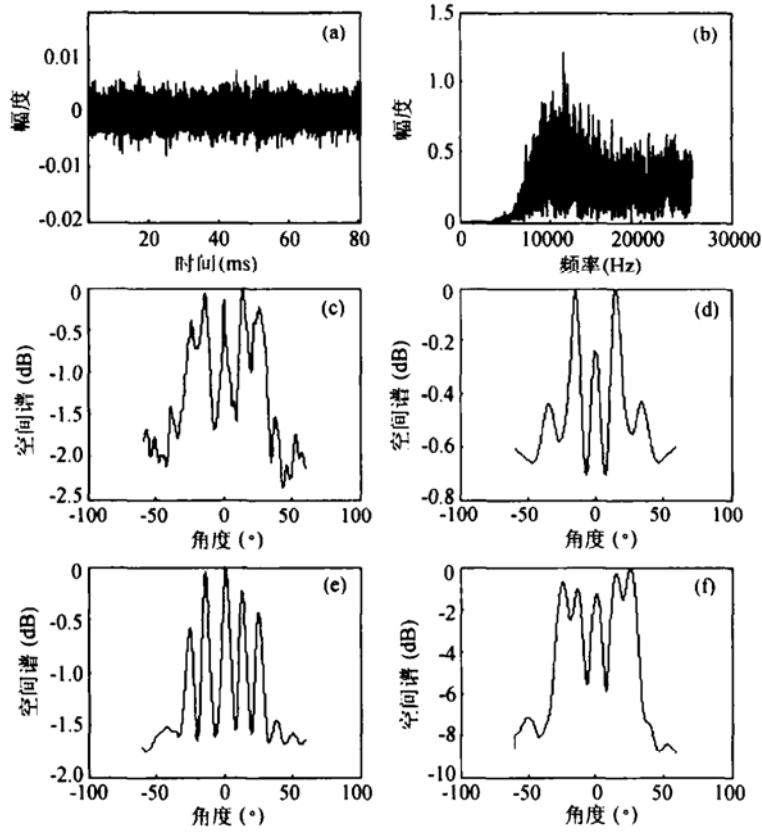


图 9 多目标定向仿真结果

(a) 信号; (b) 信号谱; (c) LSMSPM; (d) MUSIC; (e) SVDSPM; (f) CBF

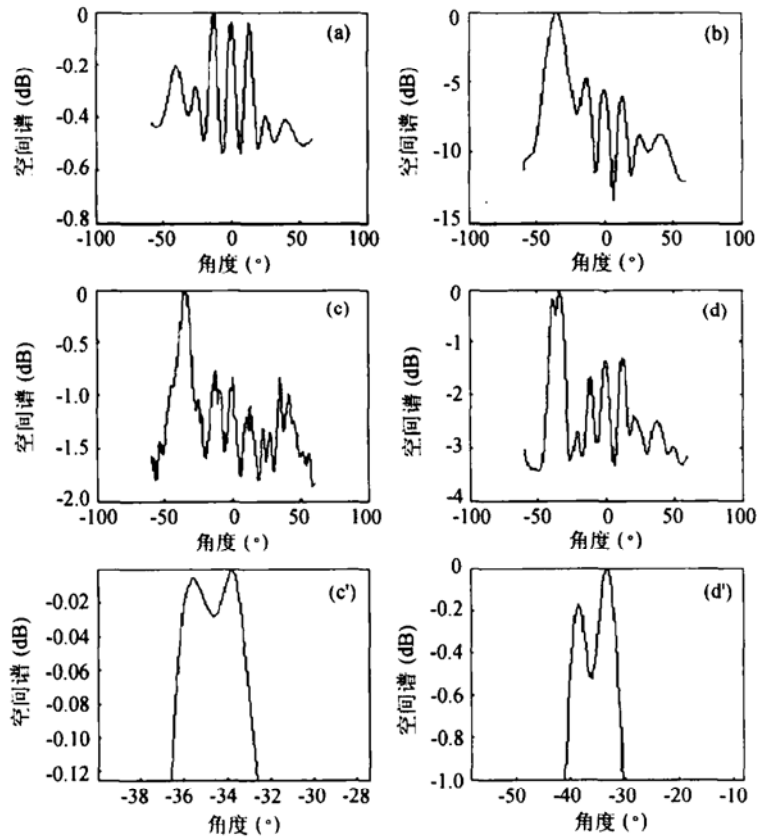


图 10 双目标高分辨方位估计仿真结果

(a) MUSIC; (b) CBF; (c) LSMSPM; (d) SVDSPM; (c') (c) 放大; (d') (d) 放大

## 4 结论

通过信号相位匹配原理的水库声源定向实验结果分析, 可得出如下结论:

(1) 证明了信号相位匹配原理的正确性, 由该原理发展的声源定向的最小二乘算法和奇异值分解算法是有效的。

(2) 信号相位匹配原理的定向算法具有超指向性, 由 SVDSPM 算法获得半功率点开角是常规波束算法的  $1/4 \sim 1/7$ , 且估计的稳定性好; 是 MUSIC 高分辨算法的  $1/2 \sim 1/3$ 。

(3) 船舶航行噪声的仿真结果说明利用 SVDSPM 和 LSMSPM 算法用于多目标定向和高分辨方位估计是可行的。

(4) 不同信噪比条件下 LSMSPM 和 SVDSPM 算法的方位估计尚待进一步分析和验证。

## 参 考 文 献

- 1 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. 声学学报, 2001; 26(6): 537—544
- 2 ZHU Weijie, SUN jincai, SUN Yiyuan. Principle and simulation of coherent interference suppression by a three-sensor array. *Chinese Journal of Acoustics*, 2002; 21(2): 110—123
- 3 朱维杰, 孙进才, 孙轶源. 一种抵消反射干扰的新方法. 信号处理. 2001; 17(4): 329—334
- 4 孙轶源, 朱维杰, 孙进才, 李志舜. 利用信号相位匹配原理的正弦信号参数估计. 自然科学进展, 2001; 11(11): 1216—1220
- 3 ZHU Weijie, SUN yiyuan, SUN Jincai, LI Zhishun. Parameter estimation of sinusoidal signals by using principle of signal matched-phase, *Progress in Natural Science*, 2002; 12(4): 301—304
- 5 孙进才, 朱维杰, 孙轶源, 刘理. 信号相位匹配原理的正弦信号参数的最小二乘估计. 自然科学进展, 2004; 14(10): 1204—1028
- 6 孙进才, 朱维杰, 肖卉, 孙轶源, 王慧慧. 基于信号相位匹配原理的广义相关时延估计. 自然科学进展, 2005; 15(1): 103—109
- 7 朱维杰, 孙进才. 多元阵列的信号相位匹配原理. 西北工业大学学报, 2002; 20(4): 642—646
- 8 孙进才, 朱维杰, 孙轶源. 利用小尺度阵的波达方向估计. 西北工业大学学报, 2003; 21(2): 152—155
- 9 孙进才, 朱维杰, 王惠刚, 肖卉. 多子阵信号相位匹配原理的信号最小二乘解. 哈尔滨工程大学学报, 2003; 24(4): 365—372
- 10 王惠刚, 李志舜, 孙进才. 基于信号相位匹配原理的稳健方位估计. 电子与信息学报, 2005; 27(2): 189—191
- 11 孙进才, 朱维杰. 信号相位匹配原理及其应用. 西安: 西北工业大学出版社, 2005
- 12 周福洪. 水声换能器及基阵. 北京: 国防工业出版社, 1984