

doi: 10.7690/bgzd.2022.03.001

## 时变环境对信源数估计及盲源分离的影响分析

王川川, 汪亚, 王华兵

(电子信息系统复杂电磁环境效应国家重点实验室, 河南 洛阳 471003)

**摘要:** 针对信号来波方向突变、源信号个数及信号样式发生变化, 对辐射源个数估计及盲源分离(blind source separation, BSS)结果的影响进行分析。源信号个数的估计采用基于信息论准则的估计方法, 采用自适应盲分离算法进行信号盲分离。实验结果表明: 混合矩阵发生突变时, 使用接收数据进行信源数估计, 无法正确估计信源数; 当混合矩阵未发生突变, 而信号样式发生突变时, 源数估计算法能准确估计来波方向数; 若混合矩阵不变, 在某一来波方向信号样式的改变, 对信号的盲分离不会产生不利影响, 可将该来波方向不同的信号样式分开; 若混合矩阵不变, 阵列接收信号中信号个数的改变, 对信号分离结果没有明显的不利影响。分析结果表明: 该研究对评估信源数估计算法和盲源分离算法在实际环境中的应用效果具有一定参考价值。

**关键词:** 时变环境; 信源数估计; 盲源分离; 信息论准则; 自适应盲分离

**中图分类号:** TP274 **文献标志码:** A

## Influence Analysis of Time-varying Environment on Source Number Estimation and Blind Source Separation

Wang Chuanchuan, Wang Ya, Wang Huabing

(State Key Laboratory of Complex Electromagnetic Environment Effects on Electronics and Information System, Luoyang 471003, China)

**Abstract:** The influence of the sudden change of the direction of arrival (DOA), the number of source signals and the signal pattern on the estimation of the number of emitters and the results of blind source separation (BSS) are analyzed. The number of source signals is estimated based on the information theory criterion, and the adaptive blind separation algorithm is used to separate the signals. The experimental results show that when the mixing matrix mutates, the number of sources cannot be estimated correctly by using the received data, and when the mixing matrix does not mutate, but the signal pattern mutates, the number of sources estimation algorithm can estimate the number of DOA accurately; If the mixing matrix does not change, the change of the signal mode in a certain direction of arrival will not have a negative impact on the blind separation of the signal, and the signal modes in different directions of arrival can be separated; if the mixing matrix does not change, the change of the number of signals in the array receiving signal will not have a significant negative impact on the signal separation results. The analysis results show that the study has a certain reference value for evaluating the application effect of the source number estimation algorithm and the blind source separation algorithm in the actual environment.

**Keywords:** time-varying environment; source number estimation; blind source separation; information theoretic criterion; adaptive blind separation

### 0 引言

盲源分离(BSS)是信号处理领域中一个重要的研究方向, 在特征提取、生物医学信号处理、通信系统、水声信号处理、图像处理、语音信号处理等领域获得了广泛应用<sup>[1-3]</sup>。代表性的算法是独立分量分析(independent component analysis, ICA)。

在盲源分离算法应用研究中, 多数都假设源信号个数是已知的, 且观测信号个数等于源信号个数。实际上辐射源数目多数情况下未知, 且等于观测天线数目的情况极少。在应用盲源分离算法前, 须事

先进行源数的估计工作。源数估计一直是盲源分离和空间谱估计领域的研究热点和难点<sup>[4]</sup>。

现有盲源分离算法一般只考虑源信号本身的非平稳特性, 没有考虑混合过程的非平稳特性<sup>[5]</sup>。在电子侦察实际过程中, 信号混合过程或辐射源信号是时变的, 源信号或侦察接收机在运动平台上的源信号个数及信号样式发生变化等。另外, 数据采集时间长、数据量大, 也会导致接收数据中含有时变数据的可能。针对时变环境对于信源数估计及盲源分离的影响, 以及如何避免不利影响进而正确实现

收稿日期: 2021-11-03; 修回日期: 2021-12-28

基金项目: 国家 973 项目(613319)

作者简介: 王川川(1985—), 男, 河南人, 博士, 助理研究员, 从事盲信号处理、复杂电磁环境效应研究。E-mail: Wangchuan1083@126.com。

信源数估计及信号分离的研究,目前极为不足。Li H 等<sup>[6]</sup>针对信源数动态变化对盲源分离算法稳定性的影响进行了分析。Xu D H 等<sup>[7]</sup>分析了时变环境下自然梯度盲源分离算法不能很好收敛的原因。阳小燕等<sup>[8]</sup>针对大型旋转机械故障诊断中,故障源数动态变化对盲源分离的影响,采用四阶累积量矩阵估计动态故障源数,然后选择相应的盲分离算法进行信号盲分离。李爱丽<sup>[9]</sup>针对源信号和混合矩阵随时间变化情况下的欠定盲源分离问题,提出了改进的时变欠定盲分离混合矩阵估计算法,适用于观测信号为 2 维的情形。黄知涛等<sup>[5]</sup>对动态环境对于盲源分离算法的挑战进行了分析。

综合上述文献分析可知:在时变环境的主要情形,即信源数突变、信号来波方向突变、信号样式突变对于信源数估计、盲源分离算法的影响方面,现有研究还存在缺项,尤其是信号来波方向突变对信号样式突变的影响。

笔者期望在时变环境对信源数估计和盲源分离的影响方面进行更全面的研究,时变环境要素涵盖信源数突变、信号来波方向突变(即混合矩阵发生突变)、信号样式突变的主要情形,对于评估信源数估计算法及盲分离算法在时变环境下的应用效果具有较好的参考价值。

### 1 均匀线阵模型

对于辐射源个数估计和盲源分离算法的研究基于均匀的线型天线阵列(uniform linear array, ULA),其结构如图 1 所示。ULA 的天线阵元数为  $M$ ,且相邻阵元间的距离为  $d(d < \lambda_{\min}/2, \lambda_{\min} = c/f_{\max})$ ,其中  $\lambda_{\min}$  为接收信号的最短波长; $c$  为光速; $f_{\max}$  为接收信号的最大载波频率。

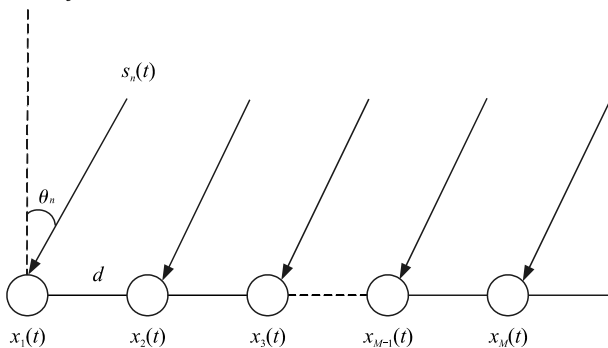


图 1 均匀线阵

假设  $K$  个远场信号从方向  $\theta_1, \dots, \theta_K$  入射到由  $M$  个传感器组成的阵列上,  $t$  采样时刻阵列观测信号为:

$$X(t) = \sum_{k=1}^K a(\theta_k) s_k(t) + w(t) = A(\theta) s(t) + w(t) \quad (1)$$

其中,  $X(t) = [X_1(t), X_2(t), \dots, X_M(t)]^T$  (上标 T 表示转置) 为阵列观测信号向量;  $a(\theta_k)$  为阵列方向向量;  $A(\theta) = [a(\theta_1), a(\theta_2), \dots, a(\theta_K)]$  为方向向量构成的矩阵;  $\theta = [\theta_1, \dots, \theta_K]^T$  为信号的来波角度参数向量;  $s(t) = [s_1(t), \dots, s_K(t)]^T$  为入射信号向量;  $w(t) = [w_1(t), \dots, w_M(t)]^T$  为加性噪声向量; 采样时刻  $t=1, 2, \dots, N$ ,  $N$  为信号采样数。式(1)所示的阵列观测信号模型的基本假设条件如下:

- 1) 入射信号为相互独立的窄带平稳信号,满足均值  $E\{s(t)\} = 0$ 、协方差矩阵  $E\{s(t)s^H(t)\} = \text{diag}\{p_{s_1}, p_{s_2}, \dots, p_{s_K}\} = P_s \in R^{K \times K}$ , 其中  $p_{s_k}$  为第  $k$  个信号的功率;
- 2) 阵列观测信号向量中叠加噪声为加性高斯白噪声,与信号独立;
- 3) 入射信号数同时小于阵元数和样本数,即  $K < \min(M, N)$ ;
- 4) 信号在理想空间传播,阵列传感器具有全向一致性。

针对电子侦察中信号时变环境的实际情况,主要分析 2 类情况对信源数估计和信号盲分离的影响,分别是在数据采集过程中:辐射源或侦察平台快速运动导致的混合矩阵  $A$  发生了改变,但辐射源信号样式和数量无变化;辐射源和侦察平台位置无明显变化,即混合矩阵  $A$  没有变化,但辐射源信号样式或数量发生改变。

仿真实验依托 DELL9020MT 型计算机进行,仿真软件采用 Matlab R2010a。

### 2 时变环境对信源数估计的影响

采用基于信息论准则的 7 种信源数估计方法,分别为 AIC 法<sup>[10]</sup>、MDL 法<sup>[11]</sup>、基于对角加载的 AIC 法<sup>[10,12]</sup>、基于对角加载的 MDL 法<sup>[10,12]</sup>、HQ 法<sup>[13]</sup>、RSVD 法<sup>[14]</sup>、改进的 BIC 法<sup>[15]</sup>,噪声环境为高斯白噪声环境。实验条件设置为:

- 1)  $s_1$  为 BPSK 信号,码元宽度为  $10/31 \mu\text{s}$ ,载波频率为 10 MHz;
- 2)  $s_2$  为 CW 信号,脉冲宽度为  $15 \mu\text{s}$ ,载波频率为 10 MHz;
- 3)  $s_3$  为 LFM 信号,脉冲宽度为  $10+10 \cdot \text{rand}(1) \mu\text{s}$ ,起始频率为 10 MHz,调频带宽为  $10/[1+\text{rand}(1)] \text{MHz}$ ;
- 4)  $s_4$  为 FSK 信号,13 位巴克码,码元宽度为

10/13  $\mu\text{s}$ ，两码元处的频率分别为 25 和 50 MHz；

5)  $s_5$  为 MPSK 信号，弗朗克编码方式，脉冲宽度为 10  $\mu\text{s}$ ，码元宽度为 0.4  $\mu\text{s}$ ，载波频率为 50 MHz；

6)  $s_6$  为 NLFM 信号，脉冲宽度为  $20+32 \cdot \text{rand}(1)$   $\mu\text{s}$ ，起始频率为 10 MHz，调频带宽为  $6+4 \cdot \text{rand}(1)$  MHz。

混合矩阵  $A$  由随机函数  $\text{rand}$  产生，混合矩阵生成所用公式中的  $I$  为单位矩阵。采样频率为 120 MHz，信号采样点数为  $N$ ，混合信号叠加高斯白噪声，信噪比变化范围为  $-20 \sim 20$  dB，步长为 2 dB，在每个信噪比上进行 200 次 Monte Carlo 仿真。

## 2.1 混合矩阵对估计结果的影响

阵列天线阵元数  $M=10$ ，信号个数  $K=4$ ，源信号为  $s_1 \sim s_4$ 。

实验 1：信号接收过程中，混合矩阵未发生变化， $A=I_{M \times K}-2 \cdot \text{rand}(M, K)$ 。7 种信源数估计算法的实验结果如图 2 所示。

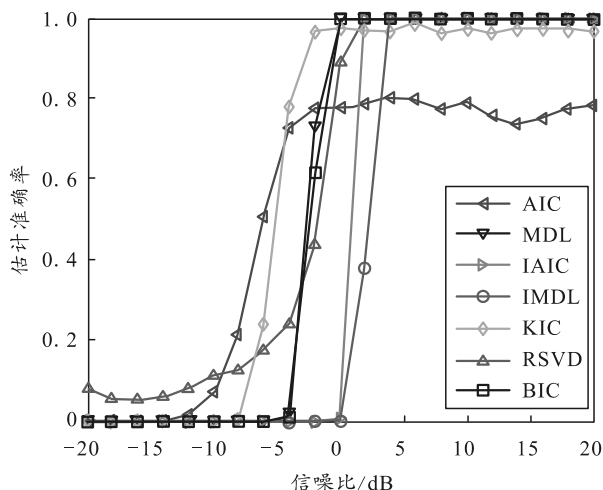


图 2 混合矩阵不变情况下信源数估计结果

从上图可以看出：在高斯白噪声条件下，信号接收过程中，若混合矩阵和信号都不发生改变，SNR 大约 4 dB 时，除 AIC 算法外，其他算法都能以 100% 的概率准确估计得到信源数。即使信噪比较高，AIC 算法仍不能以 100% 的概率实现信源数估计，这是因为 AIC 准则得到的估计不是信源数的一致性估计，而是真实值的过估计，仿真实验也验证了这一点，AIC 法有时估计的信源数为 5，而实际为 4。

实验 2：在信号接收过程中，混合矩阵发生变化，在接收信号的前一半采样时间，混合矩阵为  $A_1=I_{M \times K}-2 \cdot \text{rand}(M, K)$ ，后一半采样时间，混合矩阵为  $A_2=I_{M \times K}-\text{rand}(M, K)$ 。混合矩阵的变化，导致信号接收中混合信号也发生了变化。信源数估计算法的

实验结果如图 3 所示。

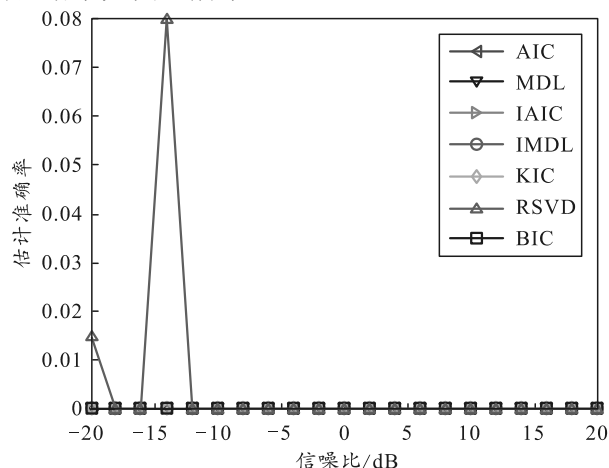


图 3 混合矩阵突变情况下信源数估计结果

由上图可知：在信号接收过程中，混合矩阵发生突变时，即使混合信号的信噪比较高，使用接收数据进行信源数估计，也无法正确估计信源数。

## 2.2 混合矩阵未发生改变，辐射源信号发生改变

阵列天线阵元数  $M=10$ ，信号来波方向为 5 个。

实验 1：在信号接收过程中，混合矩阵未发生变化，即信号来波方向未突变， $A=I_{M \times K}-2 \cdot \text{rand}(M, K)$ ，这里  $K$  为信号来波方向个数。源信号有 2 组，第 1 组：在采样点 1 至  $T/4$  处，辐射源信号为  $s_1, s_2, s_3, s_4, s_5$ ；采样点  $0.25T+1$  至  $T/2$  处，辐射源信号为  $s_1, s_3, s_4, s_5$ ；在采样点  $0.5T+1$  至  $T$  处，辐射源信号为  $s_1, s_2, s_3, s_4$ 。信源数估计算法的实验结果如图 4 所示。第 2 组：在采样点 1 至  $T/4$  处，辐射源信号为  $s_2, s_3, s_4, s_5$ ；采样点  $0.25T+1$  至  $T/2$  处，辐射源信号为  $s_1, s_3, s_4, s_5$ ；在采样点  $0.5T+1$  至  $T$  处，辐射源信号为  $s_1, s_2, s_3, s_4$ 。信源数估计算法的实验结果如图 5 所示。

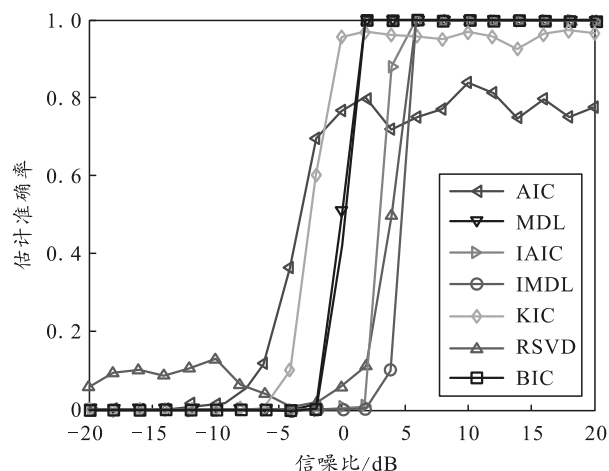


图 4 信号数突变情况下信源数估计结果 (实验 1)

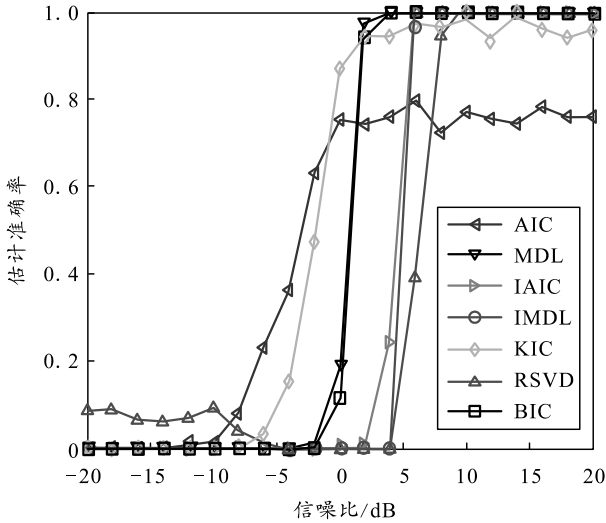


图 5 信号数突变情况下信源数估计结果(实验 2)

从图 4—5 中可看出：当信号的来波方向、信号样式无突变时，在信号接收过程中，信号个数变化不会影响信源数估计结果，在适当信噪比条件下，7 种算法都能较好地实现信源数估计。

实验 2：在信号接收过程中，混合矩阵未发生变化，即信号来波方向未突变， $A=I_{M \times K}-2 \cdot \text{rand}(M, K)$ ，这里  $K$  为信号来波方向个数。在采样点 1 至  $T/2$  处，辐射源信号为  $s_1, s_2, s_3, s_4, s_5$ ；在采样点  $0.5T+1$  至  $T$  处，辐射源信号为  $s_1, s_2, s_3, s_4, s_6$ 。上述信号样式的突变，表示某一波方向信号样式发生了突变，原因为同一辐射源信号样式的变化，或不同辐射源的交替开机等。信源数估计算法的实验结果如图 6 所示。

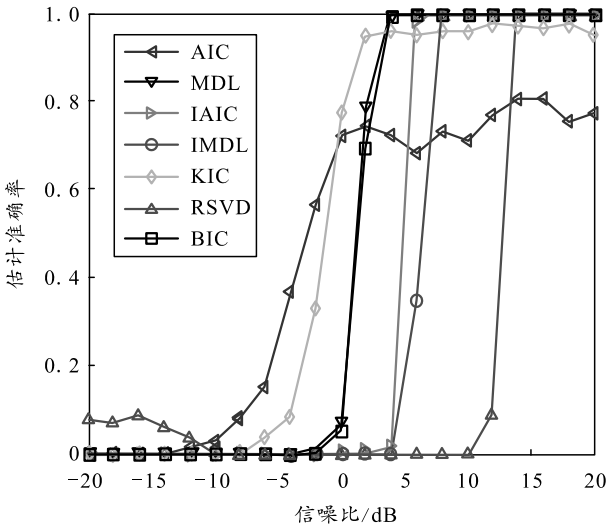


图 6 信号样式突变情况下信源数估计结果

由上图可看出：当混合矩阵未发生突变，即信号来波方向未突变，而信号样式发生突变的情况下，在信噪比合适的条件下，7 种算法都能准确实现 5

个来波方向的估计，但是否能准确估计得到信源数，则另要具体分析。若某来波方向信号样式的改变，是由于该方向同一辐射源信号样式的改变引起的，则在信源数估计中，忽略将该来波方向信号样式的变化，估计得到的来波方向数即为辐射源数。若某来波方向信号样式的改变，是由于该方向不同辐射源发射信号引起的，则在信源数估计中，忽略该来波方向信号样式的变化，估计得到的来波方向数将不是真实的辐射源数。具体而言，在后一种情况下，若同一来波方向或 2 个辐射源的来波方向十分接近，使得阵列无法分辨开这 2 个辐射源，则信源数估计将出现错误。这不是信源数估计算法本身的错误，而是信号来波方向的接近，导致信号的导向矢量产生了相似性，即混合矩阵的某些列向量不再是统计独立的关系，而是产生了相关性，不再满足信源数估计的条件要求。

### 3 时变环境对信号盲分离的影响

#### 3.1 自适应盲分离算法

自适应盲分离算法可随着观测数据的陆续取得而逐步更新处理器参数，使处理所得结果趋于期望结果。在线自适应盲分离算法可应用于非平稳环境。在线自适应盲分离典型算法是信息最大化算法 (Infomax)<sup>[16]</sup> 和扩展的信息最大化算法 (ExInfomax)。在线 Infomax 算法的迭代公式为：

$$\Delta W(t) = \mu [I - \phi(y(t))] y^T(t) W(t) \quad (2)$$

在线自适应 Infomax 很容易由经典的迭代公式得到，但在线 ExInfomax 算法不像在线 Infomax 算法那样简单。因为 ExInfomax 算法需对峭度进行自适应在线估计，这需要根据新增加的样本进行递归更新。ExInfomax 的自适应在线公式为：

$$\Delta W(t) = \mu [I - K \tanh(y(t))] y^T(t) - y(t) y^T(t) W(t) \quad (3)$$

$$K = \text{diag}\{\text{sign}(\text{kurt}(y(t)))\} \quad (4)$$

式中  $K$  为由信号峭度的符号组成的对角阵，其元素为 1 或 -1。峭度如式(4)所示。为了得到峭度的更新公式，只需得到二阶矩和四阶矩更新公式即可。令  $m_2^t(y_i), m_4^t(y_i), m_2^{t-1}(y_i), m_4^{t-1}(y_i)$  分别为第  $i$  个通道  $t$  时刻和  $t-1$  时刻信号的二阶矩和四阶矩，则相应的更新公式为：

$$m_4^t(y_i) = \frac{1}{t} \sum_{\tau=1}^t y_i^4(\tau) = \left(1 - \frac{1}{t+1}\right) m_4^{t-1}(y_i) + \frac{1}{t+1} y_i^4(t) \quad (5)$$

$$m_2^t(y_i) = \frac{1}{t} \sum_{\tau=1}^t y_i^2(\tau) = \left(1 - \frac{1}{t+1}\right) m_2^{t-1}(y_i) + \frac{1}{t+1} y_i^2(t) \quad (6)$$

$$\text{kurt}_i^t(y_i) = \frac{m_4^t(y_i)}{[m_2^t(y_i)]^2} - 3。 \quad (7)$$

### 3.2 时变环境对信号盲分离的影响

采用基于在线自适应的 ExInfomax 算法进行信号盲分离实验。所用的辐射源信号同第 2.2 节。混合矩阵  $A$  由随机函数 rand 产生, 采样频率为 120 MHz, 信号采样点数为  $N$ , 混合信号叠加高斯白噪声。

#### 3.2.1 混合矩阵的影响

阵列天线阵元数  $M=5$ , 信号个数  $K=5$ , 源信号为  $s_1 \sim s_5$ 。

实验 1: 混合矩阵  $A$  发生改变, 辐射源信号样式和数量无变化。

在信号接收过程中, 混合矩阵发生变化, 在接收信号的约前一半采样时间, 混合矩阵为  $A_1=I_{M \times K} \cdot 2 \cdot \text{rand}(M, K)$ , 其中约后一半采样时间, 混合矩阵为  $A_2=I_{M \times K} \cdot \text{rand}(M, K)$ 。混合矩阵的变化, 导致信号接收中混合信号也发生了变化。针对 SNR=20 dB 的接收信号, 盲分离实验结果如图 7—8 所示。

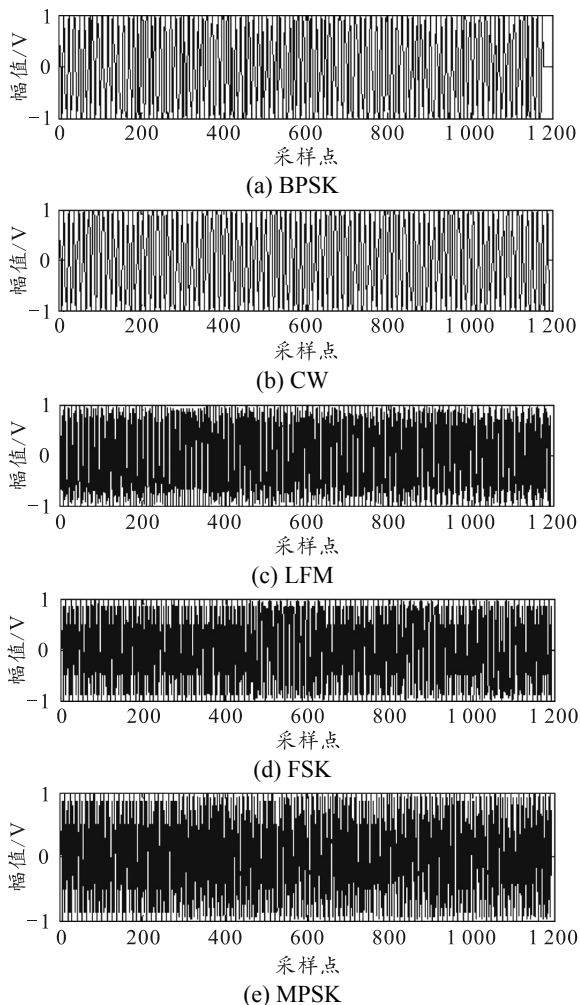


图 7 混合矩阵发生突变情况下辐射源信号时域波形

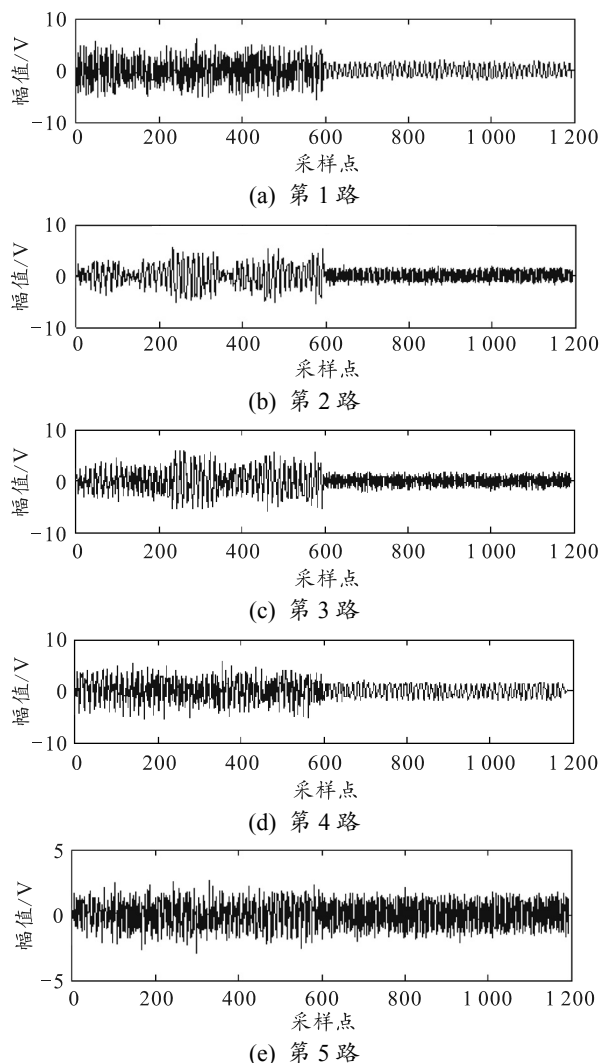


图 8 混合矩阵发生突变情况下分离信号时域波形

各路分离信号和辐射源信号的相似系数矩阵为:

		辐射源信号				
分离信号		-0.1831	0.3804	0.4303	-0.3980	-0.2320
		<b>0.3129</b>	-0.4420	0.1725	-0.1230	-0.1319
		-0.1672	<b>0.4658</b>	-0.0057	0.3340	<b>0.2403</b>
		0.0714	-0.3888	<b>-0.4831</b>	-0.1493	0.1248
		0.0742	-0.1865	-0.2922	<b>-0.8059</b>	0.0386

从该矩阵看出: 第 5 路分离信号与第 4 个辐射源信号相似度较高, 表示第 4 个辐射源信号实现了正确分离; 其他几路分离信号与源信号的相似系数值很小, 表示其他几个辐射源信号未实现正确分离。

从分离信号的时域波形可看出: 在混合矩阵发生突变的时刻, 即第 601 个采样点时刻, 分离信号时域波形也发生了信号幅值、样式的突变, 表明混合矩阵的改变对信号分离影响极大, 在混合矩阵发生突变的情况下, 必须采取措施识别此突变时刻,

然后再应用盲分离算法实施信号分离，是保证信号分离效果的直接选择。

### 3.2.2 辐射源信号突变的影响

实验 1：信号样式突然改变。

阵列天线阵元数  $M=7$ ，信号个数  $K=5$ ，混合矩阵为  $A=I_{M \times K} \cdot 2 \cdot \text{rand}(M, K)$ 。

在约前半采样点处，辐射源信号为  $s_1, s_2, s_3, s_4, s_5$ ；在约后半采样点处，辐射源信号突变为  $s_1, s_2, s_3, s_4, s_6$ 。这种突变，在实际情况中可能是同一辐射源信号样式的变化，也可能是同一或十分接近的来波方向的不同辐射源交替发射信号。针对  $\text{SNR}=20 \text{ dB}$  的接收信号，盲分离实验结果如图 9—11 所示。

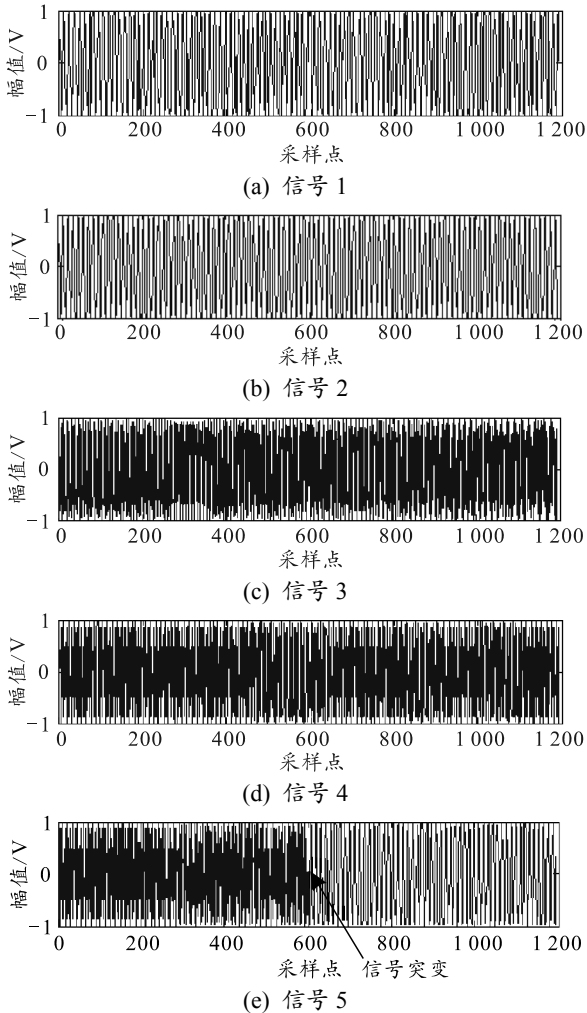
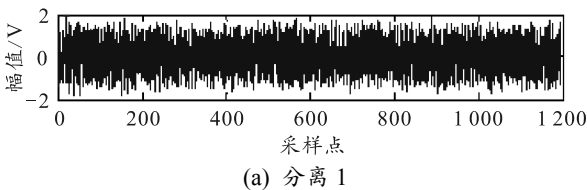


图 9 信号样式突变情况下辐射源信号时域波形



(a) 分离 1

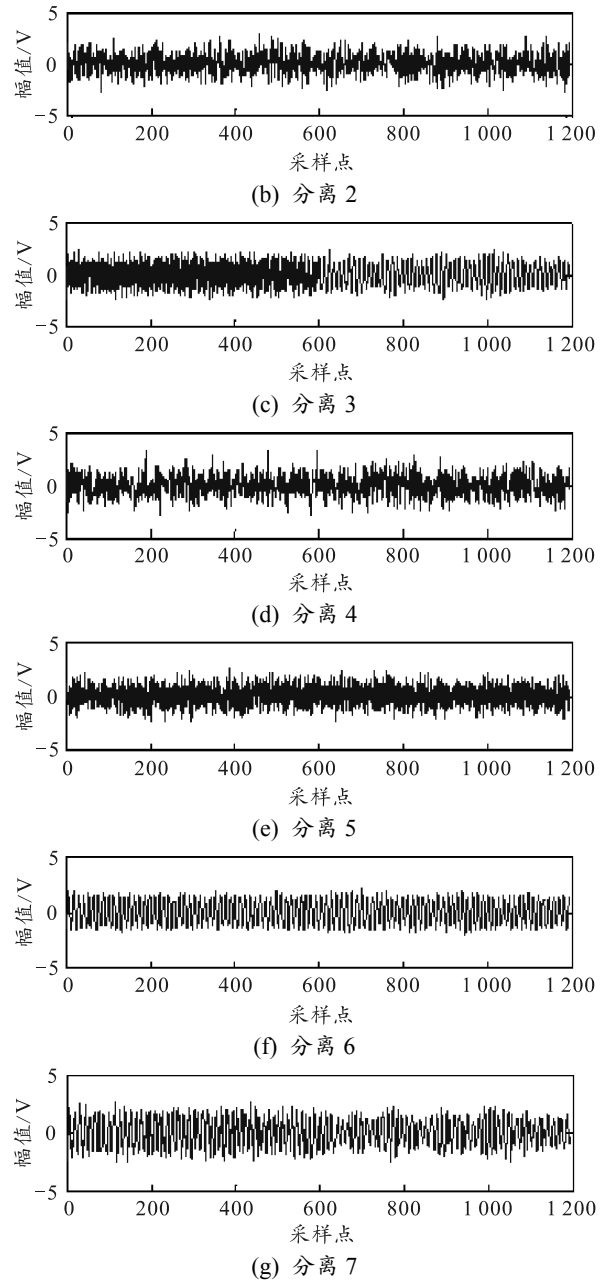
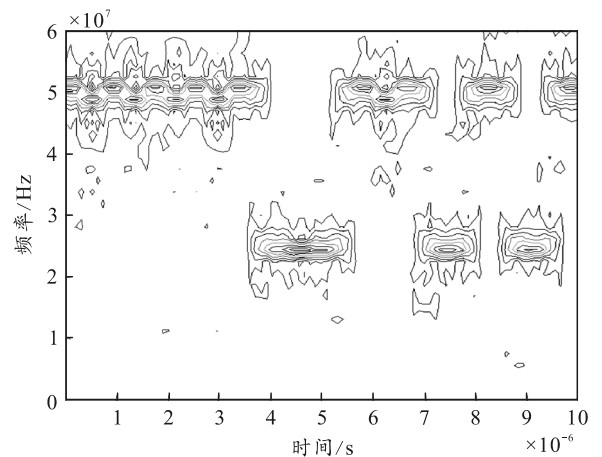


图 10 信号样式突变情况下分离信号时域波形



(a) 第 1 路分离信号 STFT 时频

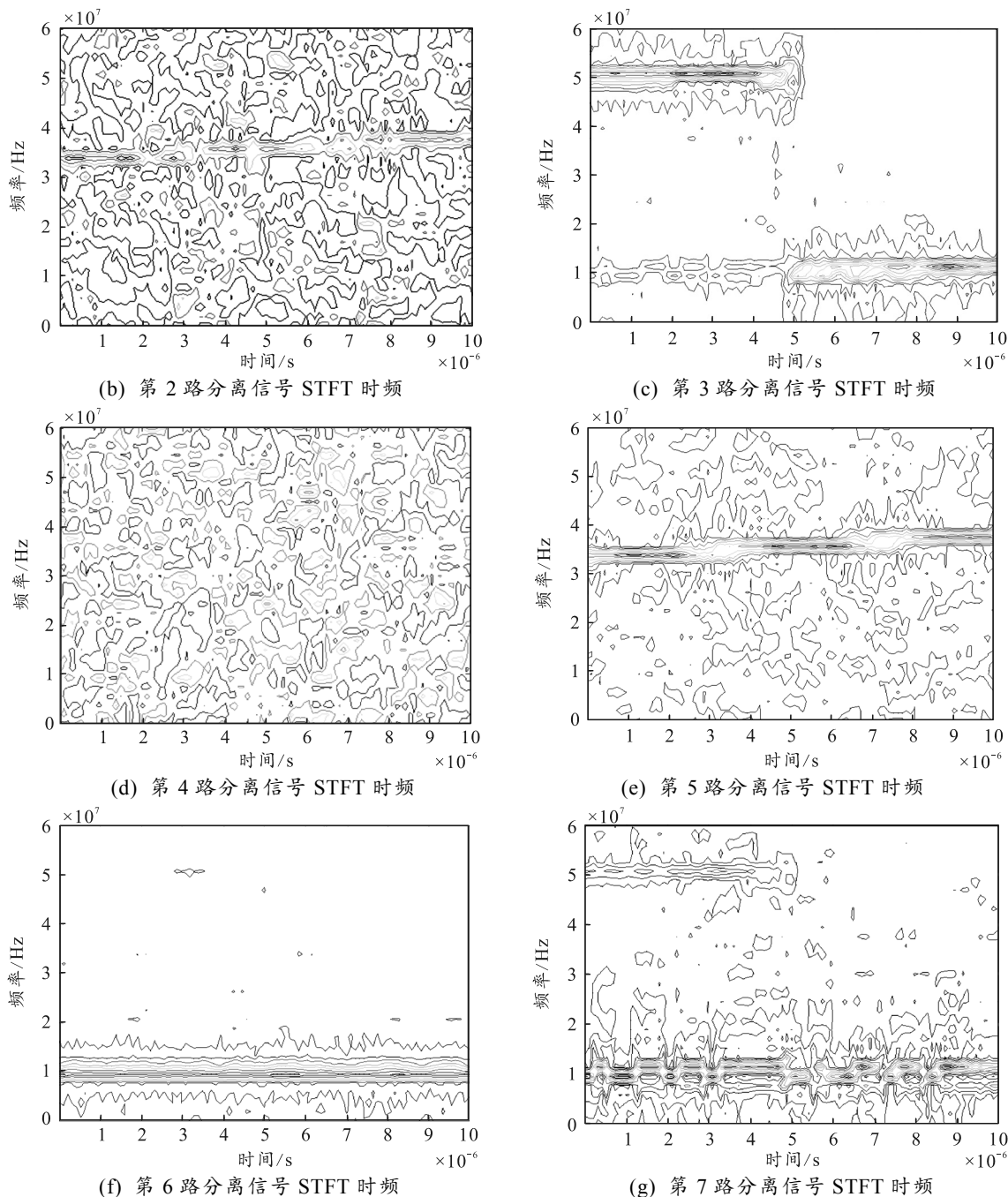


图 11 分离信号 STFT 时频

各路分离信号和源信号的相似系数矩阵为：

		辐射源信号				
分离信号		-0.0043	0.0188	0.0500	<b>-0.9755</b>	-0.0584
		0.0680	-0.0104	-0.5112	0.0075	-0.0937
		-0.0678	0.0415	-0.0203	-0.0696	<b>-0.9459</b>
		0.1119	0.1111	-0.0382	0.1887	0.0976
		-0.0664	-0.0021	<b>0.8460</b>	0.0638	-0.0719
		-0.2146	<b>-0.9741</b>	-0.0290	0.0018	0.1217
		<b>-0.9045</b>	-0.1563	-0.0573	-0.0559	-0.1507

从分离信号和源信号的相似系数矩阵可看出：

第 7 路分离信号和第 1 个源信号相似，第 6 路分离信号和第 2 个源信号相似，第 5 路分离信号和第 3 个源信号相似，第 1 路分离信号和第 4 个源信号相似，第 3 路分离信号和第 5 个源信号相似，表示 5 路源信号得到了正确分离。第 2 路分离信号和第 3 个源信号相似系数最大为 -0.5112，不能看作相似信号，但第 2 路分离信号和第 4 路分离信号的时频波形很相似，都与第 5 个源信号的时频波形相似，都可看作第 5 个源信号的相似信号。

第 3 路分离信号和第 5 个源信号的时频波形很

相似, 在采样时刻, 第 3 路分离信号的时频图发生了变化, 约前一半采样时刻其信号样式为 MPSK, 约后一半采样时刻其信号样式为 NLFM。

通过实验分析初步得出结论: 在信号接收过程中, 若只有信号样式发生突变, 则采用自适应在线分离算法进行信号分离后, 可检测到信号样式的突变时刻, 表示对信号分离没有本质影响, 对于信号的识别很有利。

实验 2: 辐射源信号个数变化, 信号样式和混合矩阵不变。

阵列天线阵元数  $M=5$ , 信号个数  $K=5$ , 源信号为  $s_1 \sim s_5$ , 混合矩阵为  $A=I_{M \times K} \cdot 2 \cdot \text{rand}(M, K)$ 。

在信号接收过程中, 辐射源信号样式没有改变, 信号时有时无, 即接收到的辐射源信号个数发生变化。该突变在实际情况中可能是某一辐射源信号不再发射信号。针对  $\text{SNR}=20 \text{ dB}$  的接收信号, 盲分离实验结果如图 12—13 所示。

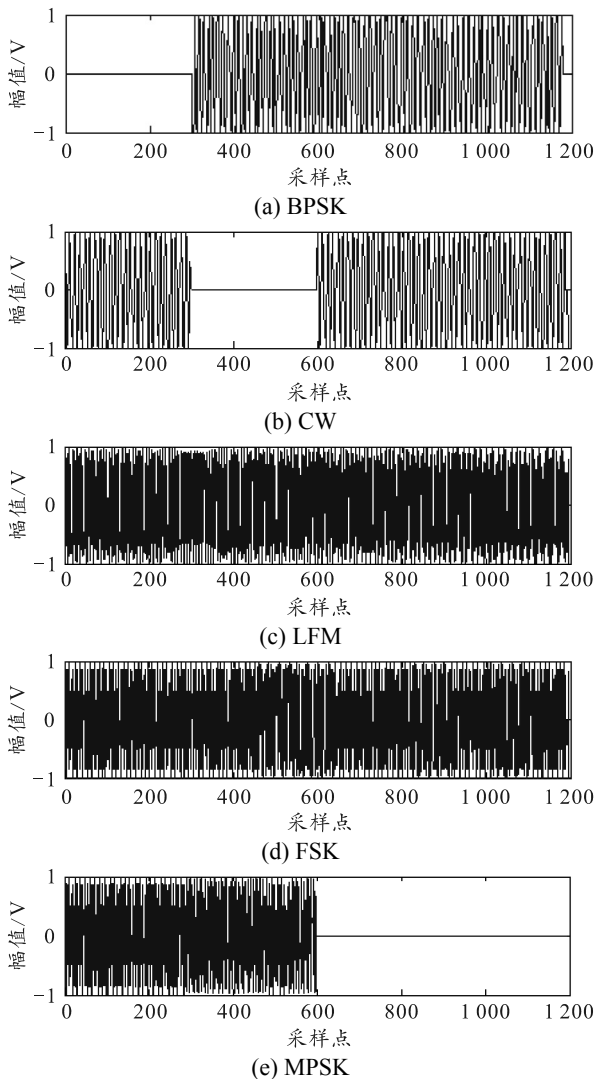


图 12 信号个数突变情况下辐射源信号时域波形

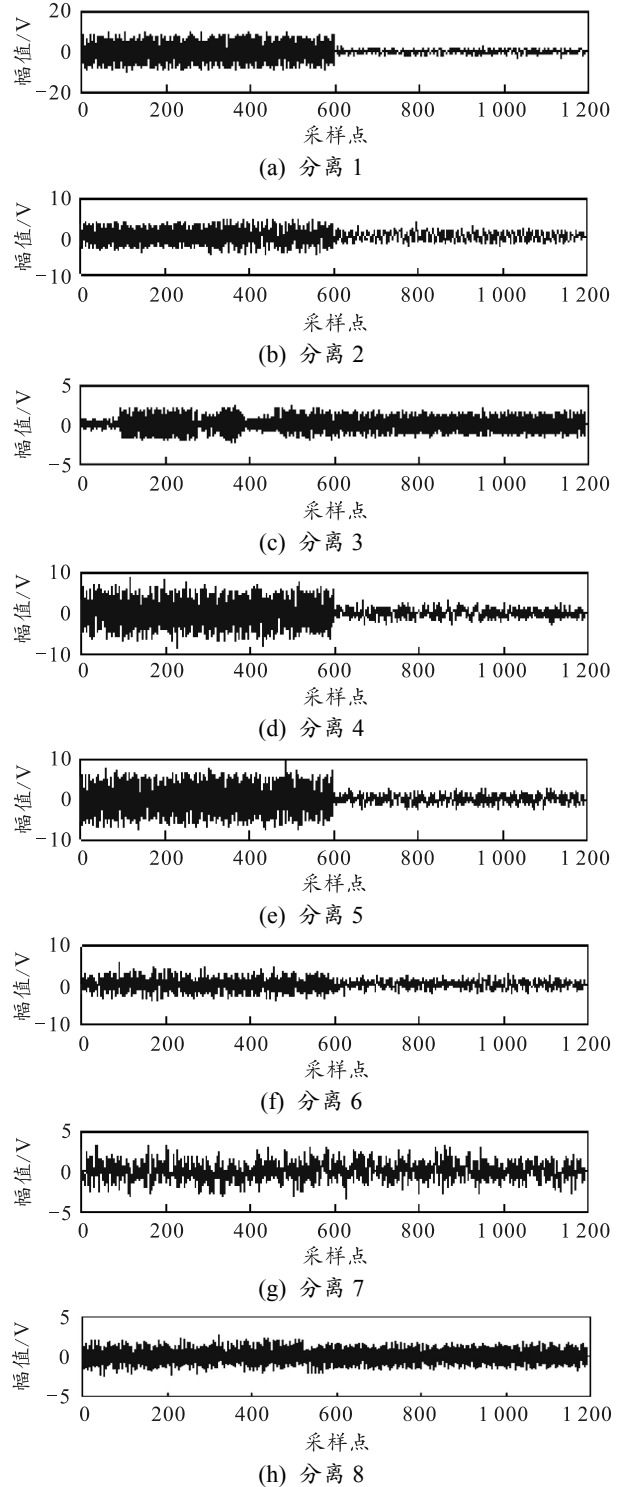


图 13 信号个数突变情况下分离信号时域波形

各路分离信号和源信号的相似系数矩阵为:

		辐射源信号				
分离信号		-0.0171	<b>0.9878</b>	0.0095	-0.0097	0.0126
		0.0523	-0.0051	0.0115	0.1346	<b>0.9809</b>
		<b>-0.8932</b>	0.1340	0.0525	0.0734	0.0095
		-0.0303	0.0291	0.0043	<b>0.9478</b>	0.0098
		0.0164	0.0174	<b>-0.9550</b>	0.0314	-0.0468



从相似系数矩阵看, 5 个源信号都被正确地分离了出来, 表明源信号个数的变化对于接收数据信号分离没有明显的不利影响。

#### 4 结论

针对电子侦察实际过程中, 信号来波方向变化、源信号个数及信号样式发生变化, 对辐射源个数估计及盲源分离结果的影响进行了实验分析, 取得如下结论:

1) 在信号接收过程中, 信号来波方向变化导致混合矩阵发生突变时, 即使混合信号的信噪比较高, 使用接收数据进行信源数估计, 也无法正确估计信源数。

2) 当混合矩阵未发生突变, 即信号来波方向未突变, 而信号样式发生突变的情况下, 源数估计算法能够准确到来波方向数, 但是否能准确估计得到信源数, 则另需具体分析。若某来波方向信号样式的改变, 是由于该方向同一辐射源信号样式的改变引起的, 则在信源数估计中, 忽略该来波方向信号样式的变化, 估计得到的来波方向数即为辐射源数。若某来波方向信号样式的改变, 是由于该方向不同辐射源发射信号引起的, 则在信源数估计中, 忽略该来波方向信号样式的变化, 估计得到的来波方向数将不是真实的辐射源数。具体而言, 在后一种情况下, 若同一来波方向或 2 个辐射源的来波方向十分接近, 使得阵列无法分辨开这 2 个辐射源, 则信源数估计将出现错误。

3) 若混合矩阵不变, 在某一来波方向信号样式的切换, 对信号的盲分离不会产生本质上不利的影 响。可借助分离后信号的时频图, 检测到信号样式切换的时刻, 从而将某一来波方向不同的信号样式分开。

4) 若混合矩阵不变, 在某一来波方向信号的时 有时无, 即阵列接收信号中信号个数的改变, 对于 信号分离结果没有明显的不利影响。

#### 参考文献:

[1] 王川川, 贾锐, 曾勇虎, 等. 基于盲源分离算法的混叠电磁信号分离研究[J]. 电光与控制, 2018, 25(2): 16-19.

[2] 王川川, 曾勇虎, 付卫红, 等. 一种最大密度检测欠定混合矩阵估计算法[J]. 西安电子科技大学学报, 2019, 46(1): 106-111.

[3] WANG C C, JIA R. A Source Signal Recovery Method for Underdetermined Blind Source Separation based on Shortest Path[J]. Applied Computational Electromagnetics Society Journal, 2020, 35(4): 406-414.

[4] WANG C C, ZENG Y H, WANG L D. Source Enumeration Method Combining Gerschgorin Circle Transform and Generalized Bayesian Information Criterion in Large-scale Antenna Array[J]. Applied Computational Electromagnetics Society Journal, 2020, 35(7): 758-769.

[5] 黄知涛, 王翔, 彭耿, 等. 欠定盲源分离理论与技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2017: 1-10.

[6] LI H, SHEN Y H, XU K. Neural Network with Momentum for Dynamic Source Separation and its Convergence Analysis[J]. Journal of Networks, 2011, 6(5): 791-798.

[7] XU D H, YANG D D, MA H G, et al. Adaptive Blind Source Separation with Dynamical Changing Source Number[C]. Proceedings of the 2nd International Conference on Computer Science and Electronics Engineering, 2013: 1200-1204.

[8] 阳小燕, 唐一科, 周雄. 动态故障源数估计的自适应盲源分离方法[J]. 振动测试与诊断, 2013(2): 290-293.

[9] 李爱丽. 欠定盲源分离混合矩阵估计算法的研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.

[10] MAX M, KAILATH T. Detection of signals by information theoretic criteria[J]. IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing, 1985, 33(2): 387-392.

[11] WAX M. Detection and localization of multiple sources via the stochastic signals model[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1991, 39(11): 2450-2456.

[12] 甄佳奇. 超分辨测向理论及其性能优化技术[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2018: 33-39.

[13] 张小飞, 李建峰, 徐大专, 等. 阵列信号处理及 Matlab 实现[M]. 北京: 电子工业出版社, 2020: 50-52.

[14] 杨俊杰. 盲信号分离算法分析及其在网络安全技术中的研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2017.

[15] 成玮, 张周锁, 何正嘉. 采用信息理论准则的信号源数估计方法及性能对比[J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(8): 38-44.

[16] 陈豪, 周治宇, 白琳, 等. 盲信号分离技术及应用[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2018: 78-91.