

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.03.012

计及源数估计的盲源分离技术在 GIS 局部放电监测中的应用

崔杨柳¹, 马宏忠¹, 姜 宁², 李 凯², 陈冰冰², 王春宁², 许洪华²

(1. 河海大学能源与电气学院, 南京 211100; 2. 江苏省电力公司南京供电公司, 南京 210008)

摘要: 为解决气体绝缘开关设备可能同时存在多个局放源并且源个数未知的实际问题,文中提出在对气体绝缘开关设备中局放源进行源数估计的前提下再对混合信号进行盲源分离的方法。对不考虑传感器噪声和考虑传感器噪声的两类情形,分别利用零空间法与特征值分解法对其进行源数估计,采用估计结果,运用快速独立分量法对信号进行盲源分离。分析研究信噪比对盲源个数估计以及盲源分离效果的影响,为避开盲源分离存在反相与幅值不定的缺陷,运用相关系数法检验分离效果,分离结果说明了盲源个数估计及盲源分离方法在对多局放源激发的混合特高频信号的分离中具有一定的实用性及可行性。

关键词: 气体绝缘开关设备(GIS); 特高频(UHF); 盲源个数估计; 盲源分离

Application of Blind Source Separation Technology with Estimate of Source Number in Partial Discharge of GIS

CUI Yangliu¹, MA Hongzhong¹, JIANG Ning², LI Kai², CHEN Bingbing²,
WANG Chunling², XU Honghua²

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;
2. Nanjing Power Supply Company, Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210008, China)

Abstract: To solve the problem that there can be several partial discharge(PD) sources and the number of sources is unknown in gas insulated switchgear, the paper proposed a method to separate the mixed signals based on the estimate of source number. The zero-space method is used to estimate the source number when there is no sensor noise and eigenvalue-decomposition method is used to estimate the source number when there is sensor noise. Use the FASTICA to separate the blind sources after the source number is estimated. Research the influence of SNR to the results of blind source separation. Correlation coefficients are used to test separating results in order to avoid the presence of blind source separation. The results of the separation indicate that estimate of source number and blind source separation are useful and practical in ultra high frequency(UHF) signals separation.

Key words: gas insulated switchgear(GIS); ultra high frequency(UHF); estimate of blind source number; blind source separation

0 引言

气体绝缘开关设备(gas insulated switchgear, GIS)是目前高压系统中应用最为广泛的电气设备之一。GIS 占地面积小、可靠性与稳定性高,并且检修周期长,故障率较低^[1-2],可是一旦 GIS 发生故障,其影响范围大,维修周期较长,因此有必要对 GIS 加强状态

监测与故障诊断^[3-5]。目前,国内外已有一些针对 GIS 的监测技术,如超声波法、振动法、化学法、光学法、特高频法(ultra high frequency, UHF)等。局部放电作为可检测的故障前期征兆,成为 GIS 绝缘缺陷/故障监测的重要参量。文[6]中研究了引起 GIS 局部放电的原因;文[7]中研究 4 类局部放电特高频信号的数学模型;文[8]中研究局部放电故障的识别、故障的定位;文[9]中研究超声波在 GIS 中局部放电的监测等。

收稿日期:2015-10-14; 修回日期:2015-11-27

基金项目:江苏省电力公司科技项目资助(J2015054)。

Project Supported by the Key Science and Technology Project of Jiangsu Province Electric Power Company(J2015054).

对局部放电的监测以特高频法的研究相对成熟,而目前特高频技术在 GIS 中的应用大多集中在数学建模、故障识别与定位等方面,且大多针对单一绝缘故障。对某些时刻多个局部放电同时发生的情况鲜有涉及,而此时特高频传感器采集到的将是混合信号,若直接对这种混合的特高频放电信号(混合特高频信号)进行分析,很难对 GIS 存在的绝缘缺陷与故障进行识别,因此有必要对混合信号进行盲源分离(blind source separation, BSS)研究,然后对分离后的信号进行分析。文[10-11]中都尝试在 GIS 中对局部放电产生的特高频信号进行盲源分离,在已知盲源个数的情况下,有很好的分离效果。但实际问题是混合信号的放电源个数并不知道,在源数未知时,难以对实际信号做出准确的盲源分离。而现有的研究文献都是基于已知源信号个数的情况下进行盲源分离,有悖于实际情况。

文中从实际情况出发,将盲源个数估计应用到特高频信号的盲源分离中,系统地介绍了盲源分离技术在 GIS 中的应用,并且利用相关系数分析分离结果,为 GIS 的模式识别及故障定位奠定了基础。

1 GIS 局部放电特高频混合信号数学模型

GIS 中的局部放电特高频信号可以用高斯函数近似模拟^[7,12]:

$$f(x) = \sum_{i=1}^n a_i e^{-\frac{(x-b_i)^2}{c_i^2}} \quad (1)$$

式(1)中: a_i 为波峰的数值; b_i 为波峰对应横坐标 x 的值; c_i 代表波峰的陡度; n 为放电脉冲极值的个数。GIS 中的特高频信号由局部放电时的电流脉冲激发产生,并近似在同轴波导系统中传播^[13-15],最终为 UHF 传感器所捕获,特高频信号在传播过程中会受到各种噪声的干扰。为简化模型,文中将噪声分为信号源噪声与传感器噪声。

信号混合模型^[16]:

1) 不考虑传感器噪声;

$$X = AS \quad (2)$$

2) 考虑传感器噪声。

$$\begin{cases} x_i(t) = \sum_{j=1}^n [a_{ij} \tilde{S}_j(t - \tau_j) + n_j(t)] \\ X = AS + N_o \end{cases} \quad (3)$$

式(2)、(3)中: $\tilde{S}_j = S_j + n_s$, $\tilde{S} = S + N_s$; S 为源信号; A 为混合矩阵; X 为传感器采集到的混合信号; N_s 为信号源噪声, N_o 为传感器噪声。

2 盲源个数识别方法

2.1 忽略传感器噪声

设 $\tilde{s}(t) = [\tilde{s}_1(t), \tilde{s}_2(t), \dots, \tilde{s}_n(t)]^T$, $x(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_m(t)]^T$, $x(t) = A\tilde{s}(t)$, 其中: $\tilde{s}(t)$ 为源信号; $x(t)$ 为 m 维观测矢量; X 为的线性组合; A 为混合矩阵,源信号相互独立,有 $\text{rank}[\tilde{s}(t)] = n$, 且

$$\text{rank}[x(t)] = \text{rank}[A\tilde{s}(t)] = \text{rank}[\tilde{s}(t)] = n \quad (4)$$

故在不考虑传感器噪声的盲源分离中,观测信号的个数不少于源信号的个数,且源信号数据矩阵行满秩,则未知信号源个数 n 与观测信号数据矩阵 X 的秩相等^[17]。

2.2 考虑传感器噪声

在考虑传感器噪声的情况下,设独立源个数小于传感器个数,且源信号数据矩阵行满秩,则未知信号源个数 n 与混合信号数据矩阵 X 的自相关矩阵的主特征值数相等。

定义:

$$\begin{aligned} \Phi_x' &= \frac{XX^T}{N-1} = \frac{(A\tilde{S} + N_o)(A\tilde{S} + N_o)^T}{N-1} = \\ &= \frac{A\tilde{S}\tilde{S}^T A + A\tilde{S}N_o^T + N_o\tilde{S}^T A^T + N_oN_o^T}{N-1} = \\ &= \Phi_x + \Phi_{N_o} + \frac{A\tilde{S}N_o^T + N_o\tilde{S}^T A^T}{N-1} \end{aligned} \quad (5)$$

式(5)中, N 为采样数据长度,对高斯白噪声,与源信号相互独立,则有 $\Phi_{N_o} = \sigma^2 I$, $\tilde{S}N_o^T/(N-1) = 0$, $N_o\tilde{S}^T/(N-1) = 0$, $\Phi_x' = \Phi_x + \sigma^2 I$, 若 Φ_x 的 m 个特征值 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_n > \lambda_{n+1} = \lambda_{n+2} = \dots = \lambda_m = 0$, Φ_x' 的 m 个特征值为 $\mu_1 = \lambda_1 + \sigma^2$, $\mu_2 = \lambda_2 + \sigma^2 \dots \mu_n = \lambda_n + \sigma^2 \dots \mu_m = \sigma^2$, 则有 $\mu_1 \geq \mu_2 \geq \dots \geq \mu_m$, 不妨称 n 为临界点。因此,在信噪比足够高的情况下,有 $\mu_i (i=1, 2, \dots, n)$ 的值远远大于 σ^2 , μ_n 远远大于 μ_{n+1} ^[18]。为方便源个数的估计,设 $k_1 = \mu_2/\mu_1$, $k_2 = \mu_3/\mu_2 \dots k_{n-1} = \mu_n/\mu_{n-1} \dots k_{m-1} = \mu_m/\mu_{m-1}$, 由于 μ_n 远远大于 μ_{n+1} , 因此 k_n 逼近于零,从而可以选择最逼近于零的 k_i 作为源数估计的依据,即若 k_i 最逼近于零,认为源信号的个数为 i , 故存在噪声时的混合样本自相关矩阵 Φ_x' 的主特征值为 n , 即与信号源的个数相等^[19]。需要指出的是,该方法对传感器噪声有一定要求,当传感器噪声较大时,随着 σ^2 的增大,最小的 k_i 不一定会出现在 n 处。

3 FASTICA 算法

FASTICA 算法^[20]基于非高斯性最大化原理,使

用固定点迭代理论寻找 $W^T x$ 的非高斯性最大值,该算法采用牛顿迭代算法对观测变量 x 的大量采样点进行批处理,以最大化负熵作为目标函数,每次从观测信号中分离出一个独立成分通过最大化负熵得到 $W(W=B^T)$ 的学习过程,其目标函数

$$J(y) \approx \sum_{i=1}^p k_i \{E[G_i(y)] - E[G_i(\nu)]\}^2. \quad (6)$$

式(6)中: k_i 为正常数; ν 为一个具有零均值和单位方差的高斯随机变量; G 为一个非平方的非线性函数。

具体实施步骤:

- 1) 令 $n=0$, 初始化权值向量;
- 2) $n=n+1$;
- 3) 对 ω 进行调整:
 $\omega(n+1) = E\{Xg[\omega^T(n)X]\} - E\{g'[\omega^T(n)X]\}\omega(n)$;
- 4) 归一化处理 $\omega(n+1) = \omega(n+1)/\|\omega(n+1)\|$;
- 5) 如果算法没有收敛,则转到第3)步;
- 6) 算法收敛,求出一个独立成分: $y_i = \hat{S}_i = \omega X$ 。

4 算法验证

根据第1、2部分所介绍的内容,形成盲源分离在GIS局放特高频信号分离中的应用步骤,文中主要考虑信号源个数估计及盲源分离两部分,GIS中UHF信号近似在同轴波导系统中传播,因此用于盲源分离的混合信号通过同一盆式绝缘子上周向安装的UHF传感器采集,见图1。

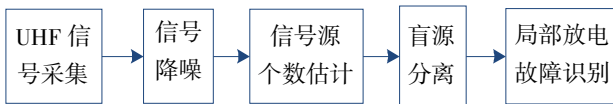


图1 盲源分离步骤

Fig. 1 Process of blind source separation

4.1 源信号构建

文中以文[7]中所介绍的UHF信号数学模型为例,应用高斯函数建立各绝缘故障的数学模型:

$$f_1(x) = 0.200 2e^{-\frac{(x-4 852)^2}{435.3^2}} + 0.186 3e^{-\frac{(x-4 444)^2}{215.2^2}} - 0.932 8e^{-\frac{(x-3 998)^2}{719.2^2}} + 0.361 3e^{-\frac{(x-6 097)^2}{769.7^2}} - 0.347 5e^{-\frac{(x-5 767)^2}{119^2}}; \quad (7)$$

$$f_2(x) = 0.285 8e^{-\frac{(x-4 305)^2}{39.6^2}} + 0.233 2e^{-\frac{(x-4 531)^2}{97.7^2}} + 0.111 7e^{-\frac{(x-4 762)^2}{104.1^2}} - 0.956 5e^{-\frac{(x-3 998)^2}{19.1^2}} - 0.045 4e^{-\frac{(x-6 181)^2}{211.8^2}}; \quad (8)$$

$$f_3(x) = 0.975 7e^{-\frac{(x-4 000)^2}{23.2^2}} + 0.767 9e^{-\frac{(x-5 298)^2}{521.2^2}} + 0.775 0e^{-\frac{(x-6 661)^2}{606.1^2}} + 1.104 0e^{-\frac{(x-5 951)^2}{591.9^2}} - 1.542 0e^{-\frac{(x-5 981)^2}{1 006.0^2}}; \quad (9)$$

$$f_4(x) = 1.010 0e^{-\frac{(x-3 998)^2}{30.3^2}} + 0.058 8e^{-\frac{(x-5 156)^2}{358.2^2}} + 0.898 1e^{-\frac{(x-4 368)^2}{177.9^2}} - 1.073 0e^{-\frac{(x-4 358)^2}{201.4^2}} + 0.023 2e^{-\frac{(x-7 225)^2}{152.5^2}}. \quad (10)$$

式(7)~(10)中: $f_1(x)$ 为高压导体金属突出物缺陷; $f_2(x)$ 为自由微粒缺陷; $f_3(x)$ 为金属污染物缺陷; $f_4(x)$ 为气隙缺陷。

由上述数学模型构建的参考信号见图2。

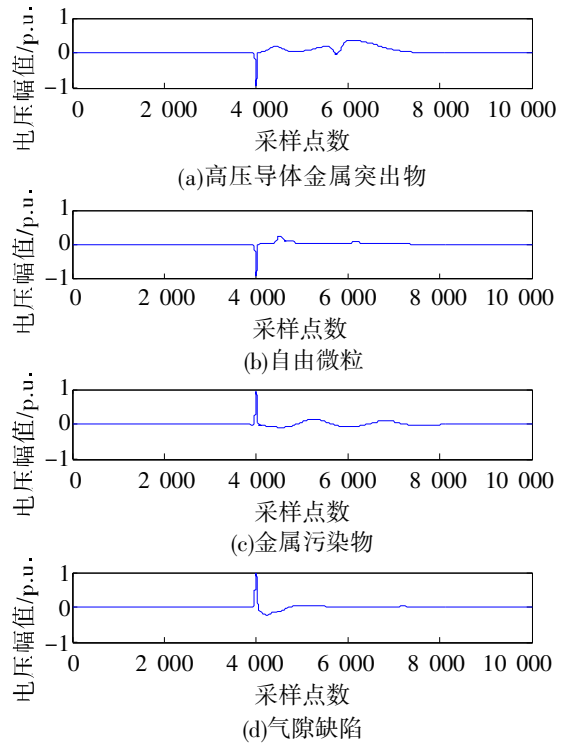


图2 参考信号

Fig. 2 Waveforms of reference signals

仿真模型说明: 实际的多源局放可能是同种缺陷构成的多局放源,也可能是不同缺陷构成的多局放源,各缺陷可能同时放电,也可能有一定的时间差,因此为使文中所用仿真模型能够较为全面地覆盖实际情况,笔者在4类常见绝缘缺陷中任选3类,分别为金属污染物缺陷、高压导体金属污染物缺陷以及气隙缺陷,其中高压导体金属突出物缺陷与气隙缺陷的放电时刻相一致,同时用两个气隙缺陷来模拟同类缺陷下的不同局放源。

在信号源处对源信号染噪形成文中的模拟信号见图3。

4.2 忽略传感器噪声

4.2.1 混合信号分离之例1

以前3个源信号为例,对3类染噪后的源信号进行随机线性瞬时混合,该3个信号源的4个随机混合信号见图4。

源个数估计: 根据式(4),有 $\text{rank}(X)=3$, 故认为信

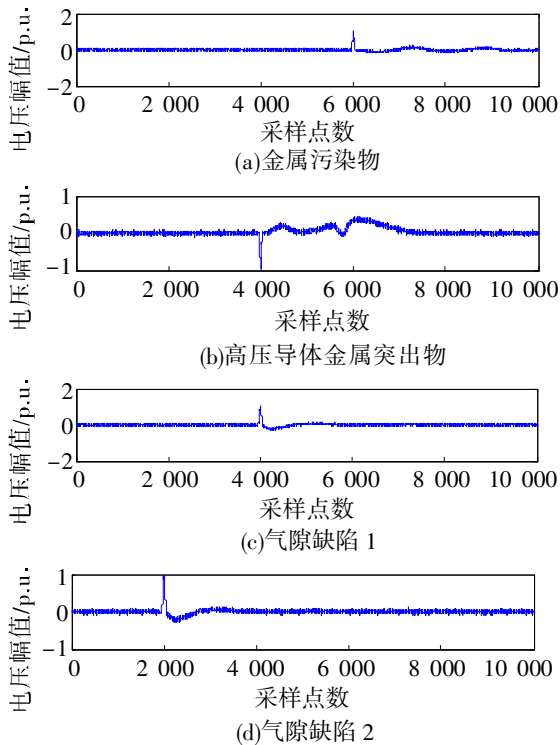


图3 信号源染噪后的波形

Fig. 3 Waveforms of reference signals with source noises

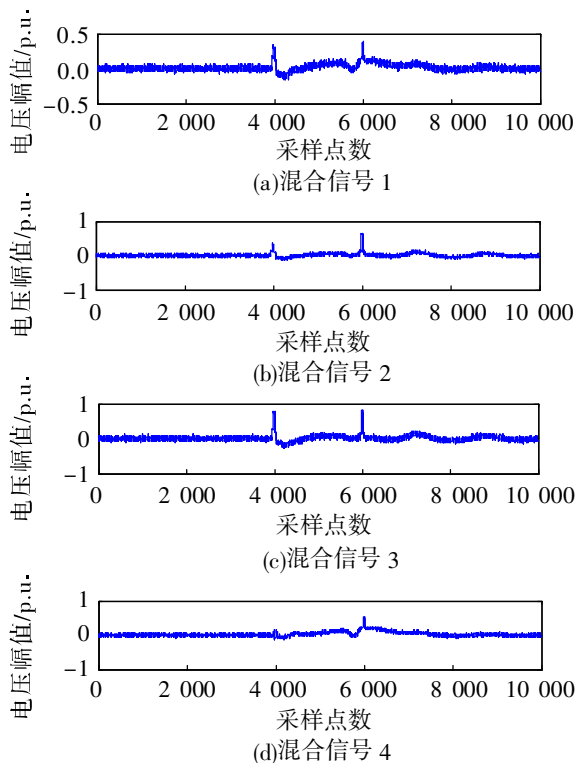


图4 3个源信号的混合波形

Fig. 4 Waveforms of mixed signals of three sources

号源个数为3, 任意选取其中3个混合信号, 应用FASTICA, 分离结果见图5。

计算解混信号与参考信号的相似系数, 其中解混信号1与金属污染物波形的相似系数为95.91%, 解混信号2与气隙缺陷波形的相似系数为84.83%,

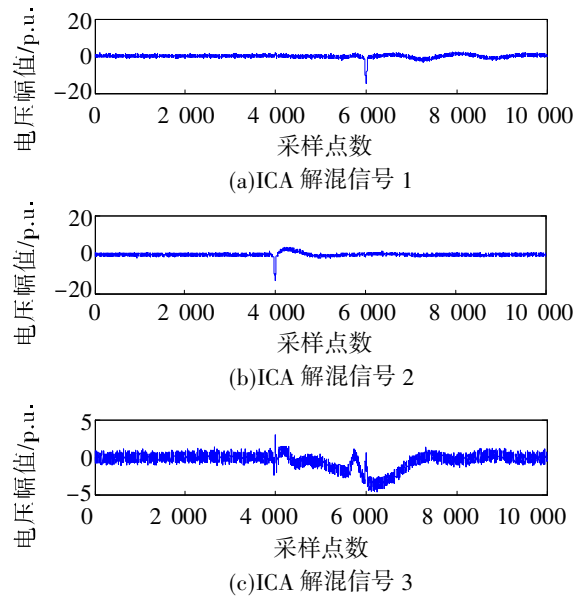


图5 分离后的波形

Fig. 5 Waveforms of BSS

解混信号3与高压导体金属突出物波形的相似系数为99.37%, 与原信号的匹配度很高。

4.2.2 混合信号分离之例2

以4个源信号为例, 对4个源信号线性瞬时混合, 该4个信号源的4个随机混合信号见图6。

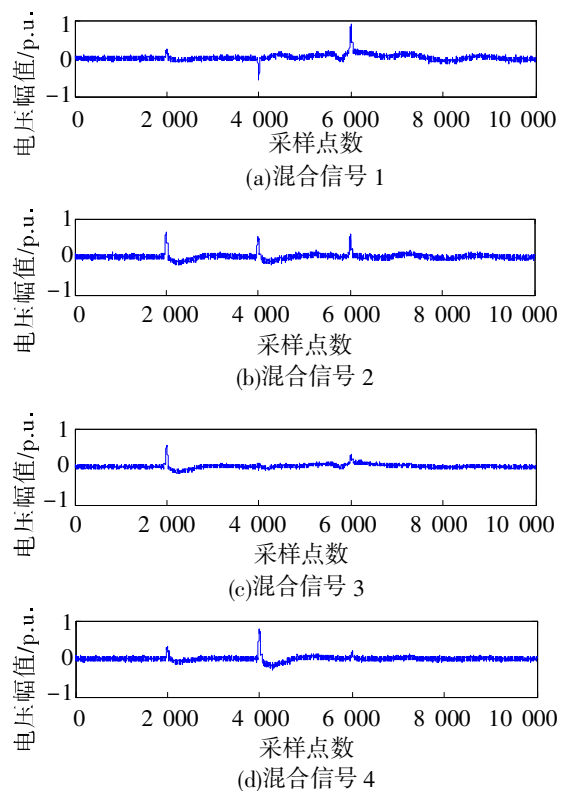


图6 4个源信号的混合波形

Fig. 6 Waveforms of mixed signals of four sources

源个数估计: 根据式(4), 有 $\text{rank}(X)=4$, 故认为信号源个数为4, 对图中4个混合信号, 应用FASTICA, 分离结果见图7。

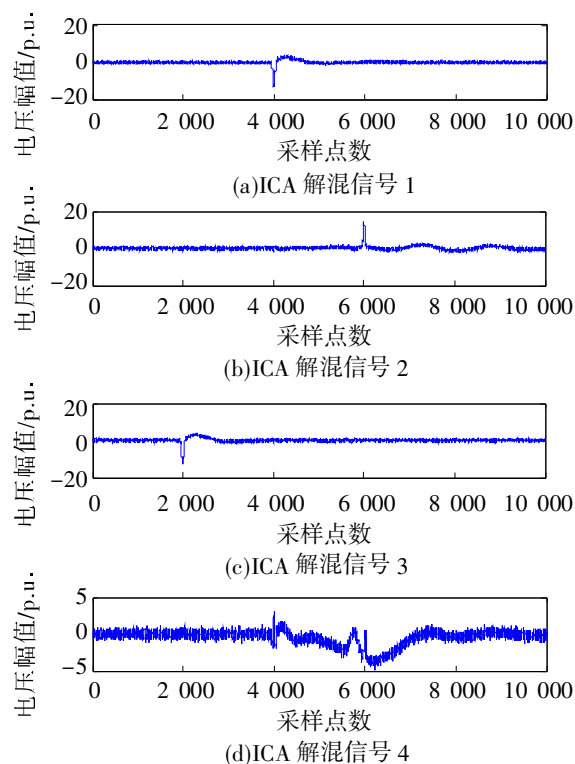


图7 分离后的波形

Fig. 7 Waveforms of BSS

计算解混信号与参考信号的相似系数,其中解混信号1与高压导体金属突出物缺陷波形的相似系数为95.92%,解混信号2与气隙缺陷波形的相似系数为84.85%,解混信号3与金属污染物缺陷波形的相似系数为99.38%,解混信号4与气隙缺陷波形的相似系数为99.99%。从相似系数可以看出,盲源分离后的信号与原信号的相似系数能够达到80%以上,与混合前的信号具有较高的一致性,有较好的盲源分离效果,可以作为故障识别的基础。

4.3 考虑传感器噪声

为考虑传感器噪声的影响,在对含信号源噪声的源信号进行线性随机混合的基础上,对混合后的信号进行染噪,并分析不同大小的传感器噪声对源数估计的影响,以信噪比来衡量噪声大小。在不同信噪比下,运用特征值分解法对源个数进行估计,根据2.2所述,计算自相关矩阵的特征值 λ_i 及相应的 k_i ,3个源信号时的特征值见表1;4个源信号时的特征值见表2;源信号数的估计情况见图8。从图8可以看出,在信噪比大于40 dB时,信号源个数估计结果与实际相一致。

从表1、2来看,在信噪比大于40 dB时, k 值具有较大的区分度,临界点处 k 值远小于其他 k 值,此时的源数估计有较大的可靠性。当信噪比较低时,信号受干扰较大,导致临界点处的 k 值不能接近于零或者保持最小,由此估计的源数相对模糊,可靠性较差。

表1 不同信噪比下观测矩阵的特征值(三信号源)

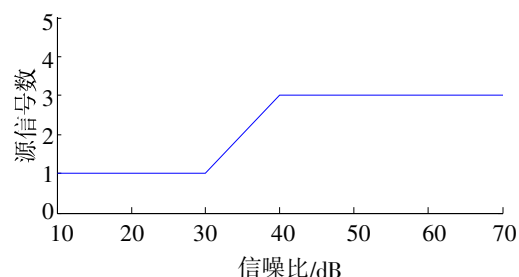
Table 1 Eigenvalues of observed matrix with different SNR(three original sources)

参数	10 dB	20 dB	30 dB	40 dB	50 dB	60 dB	70 dB
λ_1	1 351.1	315.6	401.4	246.7	274.9	222.9	283.3
λ_2	1 057.9	125.2	70.6	31.8	61.7	29.8	28.4
λ_3	1 031.2	116.2	13.2	17.5	10.0	23.7	1.17
λ_4	1 013.800	101.100	10.300	1.000	0.100	0.010	0.001
λ_5	979.700	98.200	10.100	1.000	0.100	0.010	0.001
k_1	0.78	0.40	0.17	0.13	0.23	0.13	0.10
k_2	0.97	0.92	0.18	0.55	0.16	0.80	0.04
k_3	0.98	0.87	0.78	0.05	0.01	0.00	0.00
k_4	0.96	0.97	0.98	1.00	1.00	1.00	1.00

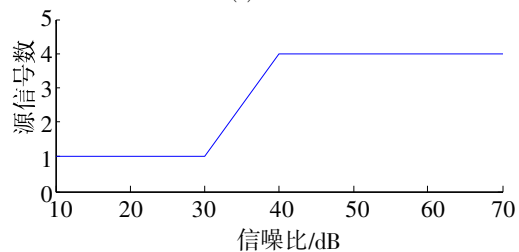
表2 不同信噪比下观测矩阵的特征值(四信号源)

Table 2 Eigenvalues of observed matrix with different SNR(four original sources)

参数	10 dB	20 dB	30 dB	40 dB	50 dB	60 dB	70 dB
λ_1	1 277.7	464.1	449.8	308.8	222.1	319.9	329.4
λ_2	1 051.7	130.1	41.7	56.9	30.6	46.5	118.8
λ_3	1 027.4	114.2	24.5	37.3	12.9	18.5	19.2
λ_4	991.8	111.0	18.4	26.1	9.4	7.5	6.7
λ_5	980.100	97.600	10.200	1.000	0.001	0.010	0.001
k_1	0.820	0.280	0.100	0.180	0.320	0.140	0.360
k_2	0.980	0.870	0.580	0.660	0.180	0.400	0.160
k_3	0.970	0.970	0.750	0.700	0.320	0.400	0.350
k_4	0.990	0.880	0.550	0.040	0.010	0.001	0.000



(a)三信号源



(b)四信号源

图8 源数估计

Fig. 8 Estimate of original source number

3个信号源与4个信号源时盲源分离后的信号与参考信号的最高相似系数分别见图9、10。图10中的线1代表放电时刻滞后的气隙缺陷,线2代表

放电时刻超前的气隙缺陷。从图 10 中可以看出,在信噪比大于 40 dB 时,分离后的信号与参考信号的最高相似度达到 80% 以上,并且与故障模拟信号的故障类别相一致,可以认为此时的分离结果是可靠的,从而说明源数估计的正确性,同时也反映传感器噪声对信号的分离有一定的影响,当噪声超过一定限值时,将无法正确盲源分离。

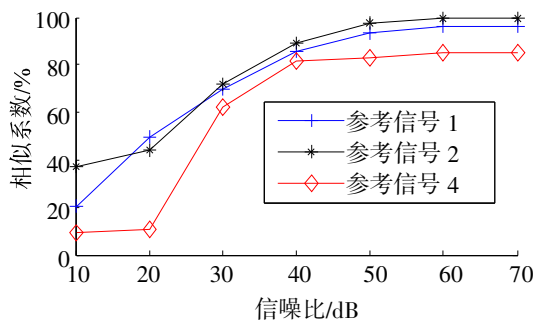


图 9 3 信号源盲源分离后的相似系数

Fig. 9 Similarity coefficients of different SNR

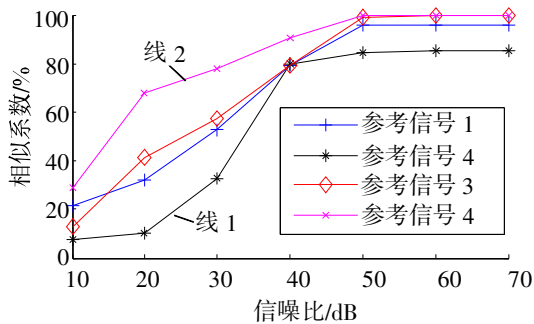


图 10 4 信号源盲源分离后的相似系数

Fig. 10 Similarity coefficients of different SNR

5 结论

1) 信号源个数估计是盲源分离的基础,在实际应用中,对未知信号源个数的情况,首先需要进行源数估计;

2) 零空间法在不考虑传感器噪声的情况下,能够准确的估计源信号个数,且计算简单;在考虑传感器噪声的情况下,可以用特征值分解法进行源数估计,但需考虑采集信号的信噪比;

3) 传感器噪声对信号源数估计有较大影响,从文中的分析计算来看,对 GIS 特高频信号而言,当信噪比高于 40 dB 时,信号源个数估计具有较高的可靠性,当信噪比低于 40 dB 时,噪声对特高频信号的影响较大,此时源数估计的可靠性较差;

4) 在 GIS 中,在源个数准确估计的前提下,对多 UHF 传感器采集的特高频信号运用盲源分离技术,能够有效分离出原信号,为后续的模式识别与故障定位奠定基础。

参考文献:

- [1] 罗学琛. SF₆ 气体绝缘全封闭组合电器(GIS)[M]. 北京:中国电力出版社,1999.
- [2] 刘泽洪. 气体绝缘金属封闭开关设备(GIS)质量管理与控制[M]. 北京:中国电力出版社,2011.
- [3] 李娟,李明,金子惠. GIS 设备局部放电缺陷诊断分析[J]. 高压电器,2014, 50(10):85-90.
LI Juan, LI Ming, JIN Zihui. Some methods for diagnosis of GIS partial discharge defects[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(10): 85-90.
- [4] 左亚芳. GIS 设备运行维护及故障处理[M]. 北京:中国电力出版社,2013.
ZUO Yafang. Operation maintenance and troubleshooting of GIS[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2013.
- [5] 邓永辉. 高压开关设备典型故障案例汇编(2006—2010 年)[M]. 北京:中国电力出版社,2013.
- [6] 司良奇. GIS 绝缘缺陷特征图谱及其识别技术研究[D]. 上海:上海交通大学,2013.
SI Liangqi. Study on fingerprint of insulation defects in GIS and its pattern recognition method [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013.
- [7] 周倩,唐炬,唐铭,等. GIS 内 4 种典型缺陷的局部放电超高频数学模型构建[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(8):99-105.
ZHOU Qian, TANG Ju, TANG Ming, et al. Mathematical model of four typical defects for UHF partial discharge in GIS[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(8): 99-105.
- [8] 陈宏福. 超声波法检测 GIS 局部放电的研究[J]. 上海:上海交通大学,2008.
CHEN Hongfu. Study on ultrasonic-based method to detect partial discharge in GIS[J]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2008.
- [9] ONO M, MATSUYAMA Y, OTAKA, et al. Experience of GIS condition diagnosis using partial discharge monitoring by UHF method[C]//International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis. Beijing, China: IEEE, 2008: 1108-1110.
- [10] 唐炬,孟庆红,王存超,等. 局部放电混合信号的盲分离[J]. 高电压技术, 2010, 36(4):821-827.
TANG Ju, MENG Qinghong, WANG Cunchao, et al. Blind separation of partial discharge mixing signals[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(4):821-827.
- [11] 云玉新. 基于 FastICA 算法的 GIS 混合局放信号分离及模式识别[J]. 高电压技术, 2014, 40(3):853-860.
YUN Yuxin. Separation and pattern recognition strategies of GIS PD mixing signals based on fast Independent component analysis[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40 (3): 853-860.

- [12] 王 辉,郭志红,云玉新,等. GIS 四种缺陷局放 UHF 信号标定技术研究[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(21): 7-13.
WANG Hui, GUO Zhihong, YUN Yuxin, et al. Research of UHF calibration technique for four kinds of partial discharge defects in GIS[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(21): 7-13.
- [13] 刘君华,郭灿新,姚 明,等. 局部放电电磁波在 GIS 中传播路径的分析[J]. 高电压技术,2009,35(5):1044-1048.
LIU Junhua, GUO Canxin, YAO Ming, et al. Analysis on the propagation routes of electromagnetic waves of partial discharge in GIS[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(5): 1044-1048.
- [14] 王建生,邱毓昌,赵有斌,等. 气体绝缘开关中电磁波的传播特性[J]. 电网技术,1999,23(9):1-3.
WANG Jiansheng, QIU Yuchang, ZHAO Youbin, et al. Propagation characteristics of electromagnetic waves in GIS[J]. Power System Technology, 1999, 23(9): 1-3.
- [15] 刘君华,姚 明,黄成军,等. GIS 中局部放电电磁波的模式特性[J]. 高电压技术,2009,35(7):1654-1660.
LIU Junhua, YAO Ming, HUANG Chengjun, et al. Characteristics of PD EM-wave modes in GIS [J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(7): 1654-1660.
- [16] 海韦里恩. 独立成分分析[M]. 周宗潭,董国华,译. 北京: 电子工业出版社,2007.
HYVARINEN A. Independent component analysis [M]. ZHOU Zongtan, DONG Guohua, Translated. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2007.
- [17] 李伟渊. 盲源分离中独立源个数估计方法的研究[D]. 天津: 天津大学,2009.
LI Weiyan. Research on approach of estimating the number of Independent sources in blind source separation [D]. Tianjin: Tientsin University, 2009.
- [18] 张洪渊,贾 鹏,史习智. 确定盲分离中未知信号源个数的奇异值分解法[J]. 上海交通大学学报,2001,35(8): 1155-1158.
ZHANG Hongyuan, JIA Peng, SHI Xizhi. Determination of the number of source signals in blind source separation by singular value decomposition[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2001, 35(8): 1155-1158.
- [19] 冶继民. 信号源数目未知与变化时的盲信号分离方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学,2005.
YE Jimin. Study on blind source separation with unknown and dynamically changing source number[D]. Xi'an: Xidian University, 2005.
- [20] 余先川,胡 丹. 盲源分离理论与应用[M]. 北京: 科学出版社,2011.
YU Xianchuan, HU Dan. Theory and application of blind source separation[M]. Beijing: Science Press, 2011.
- 崔杨柳(1990—),男,硕士研究生,研究方向为电气设备状态监测与故障诊断。
马宏忠(1962—),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为电气设备状态监测与故障诊断、新能源发电等。

(上接第 73 页)

- [18] ENNIS J, YANG Xiaohui, Mac DOUGALL F, et al. High energy density capacitor characterization[C]//26th International Conference on Power Modulator Symposium and High-Voltage Workshop. San Francisco, SUA: IEEE, 2004: 68-71.
- [19] TORTAI H J, BONIFACI H, DENAT A. Insulating properties of some liquids after an electrical arc[J]. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, 2002, 9(1): 3-9.
- [20] 李国庆,彭 石,张少杰,等. 变压器与并联电容器的铁磁谐振分析[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(9):26-32.
LI Guoqing, PENG Shi, ZHANG Shaojie, et al. Analysis of ferromagnetic resonance between transformer and shunt capacitor[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(9): 26-32.
- [21] 陈秋南,韦 钢,卢 炜,等. 基于超级电容器控制策略的含风电微电网电压波动的抑制[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(16):96-102.
CHEN Qiunan, WEI Gang, LU Wei, et al. An approach to suppress voltage fluctuation in micro-grid with wind power based on super capacitor control strategy[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(16): 96-102.
- [22] LIN Fuchang, DAI Xin, LI Jin, et al. On the failure mechanism of metallized polypropylene pulse capacitors [C]//Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Victoria, Canada: IEEE, 2000: 592-595.
- [23] LIN Fuchang, DAI Xin, YAO Zonggan, et al. Research on electrode-end contact degradation of metallized polypropylene capacitors[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2003: 39(1): 353-356.
- 李 化(1979—),女,副教授,博士研究生导师,主要研究方向包括脉冲功率技术、高储能密度介质技术、过电压与绝缘配合等。