

基于CCF-TLS-ESPRIT算法的 低频振荡在线辨识*

胡楠[†] 李兴源 李宽 覃波

(四川大学电气信息学院, 成都 610065)

(2013年10月16日收到; 2013年12月6日收到修改稿)

低频振荡在线辨识需用到广域测量系统 (WAMS) 的采集信号, 而 WAMS 采集的信号中常伴有高斯白噪声, 经过常规的低通滤波处理后会产​​生高斯色噪声, 从而影响辨识的精度. 针对在线辨识中的色噪声问题, 提出以互相关函数 (CCF) 来代替实测信号, 从而抑制色噪声, 并结合总体最小二乘-旋转不变技术参数估计 (TLS-ESPRIT) 算法进行模态辨识. 仿真结果表明, CCF-TLS-ESPRIT 算法能够有效辨识出色噪声环境中的系统低频振荡模态, 并具有一定的效率.

关键词: 广域测量技术, 互相关函数, 总体最小二乘-旋转不变技术参数估计, 高斯色噪声

PACS: 84.30.Jc, 84.71.-b

DOI: 10.7498/aps.63.068401

1 引言

随着全国电网的互联, 区域间低频振荡会直接影响区域间的功率交换, 制约联络线传输能力^[1,2]. 传统的低频振荡模态分析方法计算量大, 只适合离线分析^[3]. 随着广域测量系统 (WAMS), 尤其是相量测量单元 (PMU) 在电力系统中的广泛应用, 使低频振荡在线辨识得到实现^[4].

近年来, 快速傅里叶变换 (FFT)^[5]、卡尔曼滤波^[6] 以及希尔伯特-黄变换 (HHT)^[7-12] 等量测方法应用很广. FFT 与卡尔曼滤波不能有效提取振荡的衰减特征. 而 HHT 能提取低频振荡频率和衰减系数并且可自适应处理非线性、非平稳信号, 但此算法采用经验模态分解 (EMD), 复杂度高, 不适合在线辨识; 且 EMD 分解存在模态混叠现象, 对于多模态存在的实际系统不太实用.

主流的模态辨识算法可分为两类: 线性预测方法和子空间旋转不变方法. Prony 以及改进的 Prony 算法属于线性预测方法^[13-15]. 矩阵束 (M-

P) 算法以及各种 ESPRIT 算法属于子空间旋转不变方法^[16-19]. 线性预测方法在低信噪比的情况下, 性能会有所下降^[15,20], 而子空间旋转不变方法在运算效率和抗噪声性能方面更具优势.

电力系统的测量、传输环节通常都会引入噪声干扰, 主要来源于系统负荷的随机变化. 考虑采样误差及计算的截断误差, 可将这些误差看成高斯白噪声. PMU 采集信号中的高斯白噪声经低通滤波处理后, 会形成高度相关的高斯有色噪声. 高斯有色噪声的存在会产生估计偏差, 从而影响低频振荡模态辨识的精度. 目前, 电力系统模态辨识一般都是通过自带的奇异值分解进行噪声的消除, 这种情况对有色噪声的估计并不足, 尤其对低信噪比情况下的噪声处理能力有限. 文献^[21]采用 EMD 进行信号滤波后再采用其他算法进行模态辨识. EMD 滤波其实是根据标准差筛选本征模态函数 (IMF) 分量进行滤波的, 而 IMF 分量事先是不确定的, 故噪声信号也可能无法确定; 其次, 严格的筛选条件会导致算法时间过长和过筛等问题; 再者, 噪声尤其是有色噪声的影响使前文所述的模态混叠现象

* 国家自然科学基金重点项目 (批准号: 51037003) 和国家电网公司大电网重大专项 (批准号: SGCC-MPLG027-2012) 资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: zenco_2@163.com

更加无法解决. 因此, 基于EMD滤波的低频振荡在线辨识算法实用性不强. 文献[22]利用四阶混合平均累计量(FOMMC)来抑制高斯色噪声的影响, 从而在线辨识出低频振荡模态信息, 具有使用价值, 但高阶相对低阶混合累积量牺牲了一定的算法性能, 增加了算法复杂度.

互相关函数[23,24]可以在低信噪比和有色噪声的环境中估计出信号模型, 并且对数据的长度以及复杂度的要求均没有四阶混合平均累计量高.

本文采用互相关函数(CCF)来抑制高斯色噪声的影响, 在此基础上通过总体最小二乘-旋转不变技术参数估计(TLS-ESPRIT)算法来在线辨识出低频振荡模态信息. 通过构建测试信号, 对CCF-TLS-ESPRIT算法性能特性进行测试. 而四机两区域系统、实际电网数据以及Hypersim混合仿真平台的辨识结果验证了算法的性能.

2 CCF-TLS-ESPRIT 算法

2.1 电力系统低频振荡信号模型

电力系统低频振荡信号可表示为

$$X(t) = \sum_{m=1}^{m=Q} B_m e^{\alpha_m t} \cos(2\pi f_m t + \phi_m), \quad (1)$$

式中, Q 为假设的信号模式数, B_m 为振幅, α_m 为阻尼因子, f_m 为频率, ϕ_m 为初始相位. 进一步表示为指数模型:

$$X(t) = \sum_{m=1}^{m=2Q} R_m e^{p_m t}, \quad (2)$$

式中, $p_m = 2\pi f_m j \pm \alpha_m$, $R_m = \frac{1}{2} B_m e^{\pm j\phi}$.

由此可得两个不同时刻的有限长信号指数模型:

$$x(n) = \sum_{i=1}^m a_i e^{p_i n} \quad (n = 0, 1, 2, \dots, N_1 - 1), \quad (3)$$

$$y(m) = \sum_{j=1}^m b_j e^{p_j m} \quad (m = 0, 1, 2, \dots, N_2 - 1). \quad (4)$$

2.2 互相关函数

对于离散平稳随机过程 $X(t)$ 的两个无限长序列 $\{x(n)\}$ 和 $\{y(n)\}$, 其互相关函数定义为

$$R_{xy}(\tau) = E(x(n)y^*(n+\tau))$$

$$= \sum_{n=N_0}^{+\infty} x(n)y^*(n+\tau), \quad (5)$$

其中, $N_0 = \max(0, -\tau)$, τ 为整数.

把(3)式代入(5)式, 可得:

$$R_{xy}(\tau) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M a_i b_j^* e^{p_j^* \tau} \frac{[e^{(p_i+p_j^*)N_0}]}{1 - e^{(p_i+p_j^*)}}, \quad (6)$$

$\tau < 0$ 时,

$$R_{xy}(\tau) = a_i \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M \frac{b_j^*}{1 - e^{(p_i+p_j^*)}} e^{-p_j^* \tau}, \quad (7)$$

$\tau \geq 0$ 时,

$$R_{xy}(\tau) = b_j^* \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M \frac{a_i}{1 - e^{(p_i+p_j^*)}} e^{p_j^* \tau}. \quad (8)$$

可见, τ 为正整数和负整数时, $x(n)$ 和 $y(n)$ 的互相关函数与原始信号具有相同衰减指数模型.

进一步, 针对有限长序列 $\{x(n)\}$ 和 $\{y(n)\}$, 可得其互相关函数表达式为

$$R'_{xy}(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{n=S_1}^{S_2} x(n)y^*(n+\tau). \quad (9)$$

类似于四阶自相关函数的协方差估计子, 可取 $S_1 = \max(0, -\tau)$:

$$S_2 = \min(N-1-\tau_{\max}, N-1+\tau_{\max}-\tau),$$

$$N = \min(N_1, N_2), \quad 0 < \tau \leq \tau_{\max}.$$

S_1, S_2 的取值可保证不引入额外的极点分量, 把(3)式代入(9)式, 可得:

$$R'_{xy}(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M a_i b_j^* e^{\delta_j^* \tau} \times \frac{[1 - e^{(\delta_i+\delta_j^*)(N-\tau_{\max})}]}{1 - e^{(\delta_i+\delta_j^*)}}. \quad (10)$$

由(3)与(10)式可知, $R'_{xy}(\tau)$ 与 $x(n)$ 具有相同的模态数、频率和衰减因子, 同时, 幅值也是 a_i 的某个数值的倍数. 因此, 可用互相关函数代替实测数据进行模态辨识.

2.3 互相关函数对噪声的处理

平稳采样序列 $\{x(n)\}$ 和 $\{y(m)\}$ 受噪声污染后的非平稳混合过程可表示为

$$\tilde{x}(n) = x(n) + w(n) = \sum_{i=1}^m a_i e^{p_i n} + w(n), \quad (11)$$

$$\tilde{y}(m) = y(m) + v(m) = \sum_{i=1}^m b_j e^{p_j m} + v(m), \quad (12)$$

其中, $w(n)$ 和 $v(m)$ 是相互独立的噪声, 可以是高斯白噪声, 也可以是高斯有色噪声, 对电力系统, 其统计分布为零均值.

把 (11) 和 (12) 式代入 (9) 式, 可得:

$$\begin{aligned} \tilde{R}_{xy}(\tau) &= R_{xy}(\tau) + \rho(\tau) + R_{wv}(t), \quad (13) \\ \rho(\tau) &= \frac{1}{N} \sum_{n=S_1}^{S_2} x(n)w^*(m+\tau) \\ &\quad + \frac{1}{N} \sum_{n=S_1}^{S_2} v(n)y^*(m+\tau) \\ &= E[x(n)w^*(m+\tau)] + E[v(n)y^*(m+\tau)] \\ &\approx E[x(n)]E[w^*(m+\tau)] \\ &\quad + E[v(n)]E[y^*(m+\tau)] \\ &= 0, \end{aligned}$$

其中, $R_{wv}(t) = 0$, 故,

$$\tilde{R}_{xy}(\tau) \approx R_{xy}(\tau). \quad (14)$$

可见, 振荡信号中的高斯噪声能够被有效抑制, 且互相关序列保留了原信号的极点信息.

2.4 CCF-TLS-ESPRIT 算法

TLS-ESPRIT 算法如文献 [16, 17] 所示, 其主要思想是实测数据组成的向量经旋转后得到新的向量, 且保持两种向量对应的信号子空间的不变性, 通过求旋转算子的广义特征值来求取信号极点.

可利用互相关函数代替电力系统实测有限长信号, 使其对高斯色噪声不敏感. CCF-TLS-ESPRIT 算法主要步骤如下:

- 1) 去除实测信号的均值, 保留振荡分量;
- 2) 对信号的不同采样序列, 求取其互相关函数 $R_{xy}(\tau)$;
- 3) 利用互相关函数 $R_{xy}(\tau)$ 形成 Hankel 矩阵,

$$Y = \begin{bmatrix} R_{xy}(1) & R_{xy}(2) & \cdots & R_{xy}(L+1) \\ R_{xy}(2) & R_{xy}(3) & \cdots & R_{xy}(L+2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{xy}(\tau_{\max}-L) & R_{xy}(\tau_{\max}-L+1) & \cdots & R_{xy}(\tau_{\max}) \end{bmatrix}_{(\tau_{\max}-L) \times (L+1)},$$

$\tau_{\max}$, N 取值如 1.2 节所示, $L = N/3 \sim N/2$;

4) 对矩阵 Y 进行奇异值分解, 按照奇异值范数 $K(i) = \left[\frac{\sigma_1^2 + \sigma_1^2 + \cdots + \sigma_i^2}{\sigma_1^2 + \sigma_1^2 + \cdots + \sigma_k^2} \right]^{1/2}$ 得到有效秩, 生成信号子空间 V_S 和噪声子空间 V_N ;

5) V_S 删除第一行和第二行, 剩下的矩阵分别为 V_1 , V_2 , 由 $V_2 = V_1 \Psi$ 得到旋转算子 Ψ ; 对 $[V_1, V_2]$ 进行奇异值分解得到右特征向量 P ,

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{bmatrix};$$

6) 计算 $P_{12}P_{22}^{-1}$ 的特征根得到信号的频率、衰减系数;

7) 进一步利用总体最小二乘法求出信号的幅值和初相位.

2.5 不同算法计算量分析

在此比较 TLS-ESPRIT, CCF-TLS-ESPRIT, FOMMC-TLS-ESPRIT 三种算法的时间复杂度.

TLS-ESPRIT 算法本身含有两次 Hankel 矩阵奇异值分解过程, 计算量较大, 故辨识的时间窗不可取太长. 因三种算法均含有 TLS-ESPRIT 算法过程, 在同等时间窗的前提下, 可考虑比较 CCF 与 FOMMC 算法的计算量.

$$f_{\text{CCF}} = (N - \tau_{\max})(\tau_{\max} + 1), \quad (15)$$

$$f_{\text{FOMMC}} = (\tau_{\max} + 1)[6(N - \tau_{\max}) + 2]. \quad (16)$$

可见, CCF 与 FOMMC 算法的渐近时间复杂度是相差不大的, 然而 FOMMC 计算量明显大于 CCF 算法, 因此低频振荡在线辨识 FOMMC 计算时间也大于 CCF 算法.

3 电力系统模态在线辨识

PMU 在高速采样的过程中会伴随高频噪声, 对低频振荡模态辨识造成极大干扰, 因此, 需对低频振荡模态频率以外的高频分量进行滤波. 通常

在数据处理之前应用低通滤波器对实测数据进行滤波.

本文基于高速采样频率 100 Hz 设计了五阶巴特沃兹低通滤波器, 滤波器幅频与相频特性波特如图 1 所示.

反映电力系统随机性以及动态误差的高斯白噪声, 经过低通滤波器处理后会转换成高斯有色噪声. 高斯有色噪声的存在会对电力系统实测信号的在线测量造成极大干扰. 本文利用 CCF 对高斯色噪声进行抑制, 并结合 TLS-ESPRIT 算法进行低频振荡在线辨识, 以提高在线辨识的精度. 电力系统低频振荡在线辨识的步骤如图 2 所示.

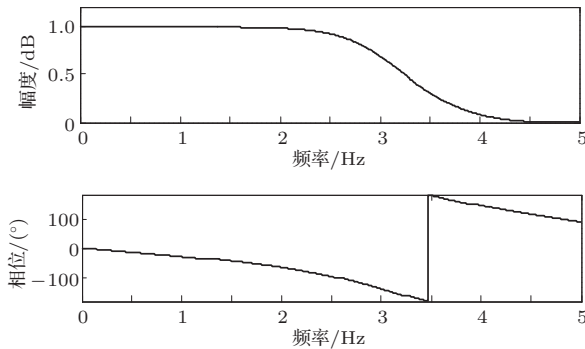


图1 低通滤波器波特图

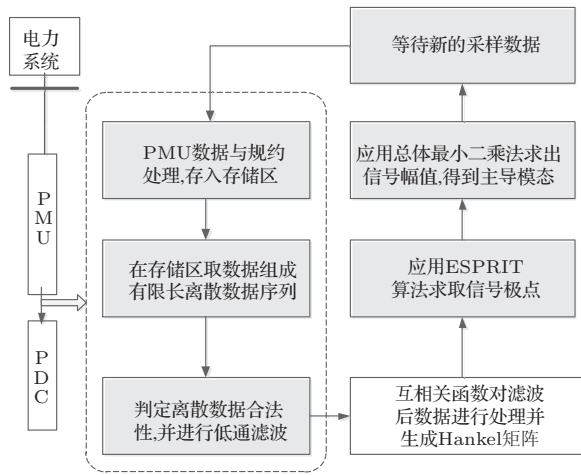


图2 电力系统模式在线辨识

4 算例仿真

4.1 四机两区域算例

本文选取四机两区域系统作为电力系统仿真算例, 扰动设为交流线路 AC5 三相短路, 持续 0.05 s. 取本系统两区域间的交流联络线 AC7 的功率振荡信号作为辨识信号.

首先对联络线 AC7 功率信号进行无噪声辨识, 为便于比较 CCF 与 FOMMC 算法的性能, 分别采用 TLS-ESPRIT, FOMMC-TLS-ESPRIT, CCF-TLS-ESPRIT 算法进行辨识, 取幅值最大的模式, 如表 1 所示.

表1 不加噪声辨识结果

辨识算法	频率/Hz	衰减因子	阻尼比
TLS-ESPRIT	0.4827	-0.0584	0.0193
	0.9651	-0.1249	0.0206
FOMMC-TLS-ESPRIT	0.4828	-0.0584	0.0193
	0.9656	-0.1235	0.0203
CCF-TLS-ESPRIT	0.4826	-0.0577	0.0190
	0.9637	-0.1231	0.0203

由表 1 可知, 此系统有一个弱阻尼的区间振荡主振模式, 除此以外, 还有一个 0.96 Hz 的弱阻尼非主振模式. 在无噪声干扰下, 三种算法辨识的精度差别不大.

对联络线 AC7 的功率信号叠加 15 dB 的高斯白噪声, 并经过第 3 节所示的低通滤波器进行滤波, 辨识时间窗为 10 s. 原始信号、含噪信号以及 CCF-TLS-ESPRIT 算法的拟合信号如图 3 所示.

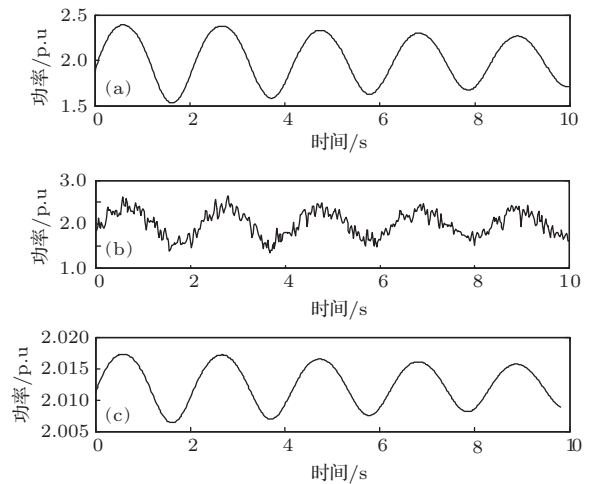


图3 联络线 AC7 功率信号图

由图 3, CCF-TLS-ESPRIT 能够在高斯色噪声环境下的采集信号中准确拟合出原始信号的模式信息. 拟合信号相对原始信号, 除幅值减小了若干倍以外, 其余信息均未发生改变.

采用 TLS-ESPRIT, FOMMC-TLS-ESPRIT, CCF-TLS-ESPRIT 算法分别对含有高斯色噪声的功率信号进行辨识, 蒙特卡罗仿真次数为 500, 结果如表 2 所示. 三种算法的运算时间如图 4 所示.

表2 含高斯色噪声辨识结果

辨识算法	频率/Hz	衰减系数	阻尼比
TLS-ESPRIT	0.4868	-0.1109	0.0362
	0.9804	-0.4946	0.0800
FOMMC-TLS-ESPRIT	0.4827	-0.0584	0.0193
	0.9683	-0.1157	0.0190
CCF-TLS-ESPRIT	0.4822	-0.0604	0.0199
	0.9667	-0.1162	0.0191

由表2可知, TLS-ESPRIT算法受色噪声影响较大, 色噪声下辨识结果与无噪声时相差较多, 尤其是非主振模态的辨识存在较大误差. 而FOMMC-TLS-ESPRIT与CCF-TLS-ESPRIT算法受色噪声影响很小, 辨识结果与无噪声时接近. 又结合图4可看出, TLS-ESPRIT虽然运算时间最短, 但其在色噪声环境下精度不高, 不如其余两种算法. 而CCF-TLS-ESPRIT算法运算时间比FOMMC-TLS-ESPRIT算法短, 具有运算效率的优势.

要提高系统阻尼, 首先需抑制系统的主振模态振荡, 取母线BUS8为相角参考点, 取各发电机母线与其相对相角为CCF-TLS-ESPRIT的辨识信号, 生成各发电机主振模态图, 如图5所示.

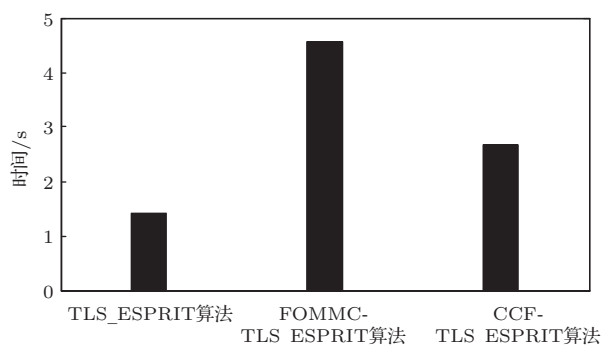


图4 三种算法运算时间比较

由图5可知, 两区域内的发电机 G1, G2与G3, G4振形相反、振幅接近. 可考虑在每台发电机上配置PSS 来抑制系统的弱阻尼区间振荡. PSS的设置

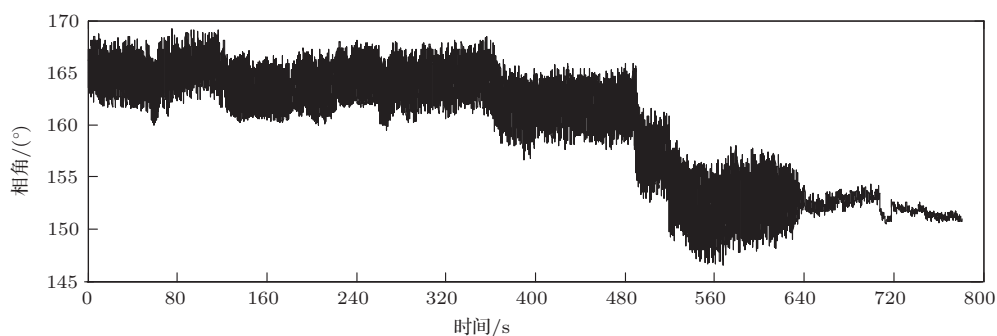


图7 电压相角实测信号图

计方法采用传统的留数法, 效果如图6所示.

可见, 在有效在线辨识出系统低频振荡模态的基础上, 合理配置PSS能有效提高系统阻尼.

4.2 实际系统仿真校验

根据上一节的浙江电网内部低频振荡, 重新取样. 采用母线00FM2相对02434的电压相角信号作为辨识信号, 采样时间为0.04 s, 取样时间段为7:31:00—7:43:59, PMU实测电压相角数据如图7所示.

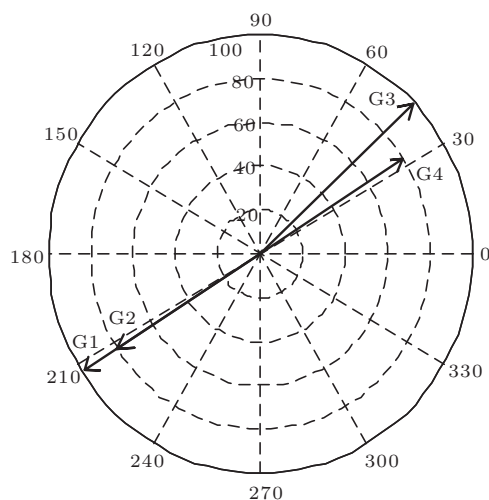


图5 主振模态图

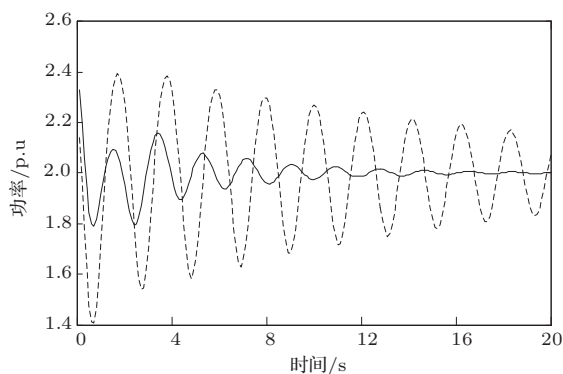


图6 配置PSS前后的信号图

由图7, 浙江电网X1母线00FM2发生超过1 min的强迫振荡, 在强迫振荡的稳态阶段分别取两段数据窗, 分别为数据窗1和数据窗2, 其时间均为10 s, 采样时间为0.04 s, 数据窗1的取样时间段为7:32:10—7:32:19, 数据窗2的取样时间段为7:37:50—7:37:59. 分别采用FOMMC-TLS-ESPRIT以及CCF-TLS-ESPRIT算法对其辨识.

采用CCF-TLS-ESPRIT算法进行时间窗1与时间窗2的辨识与重构的图形如图8和图9所示.

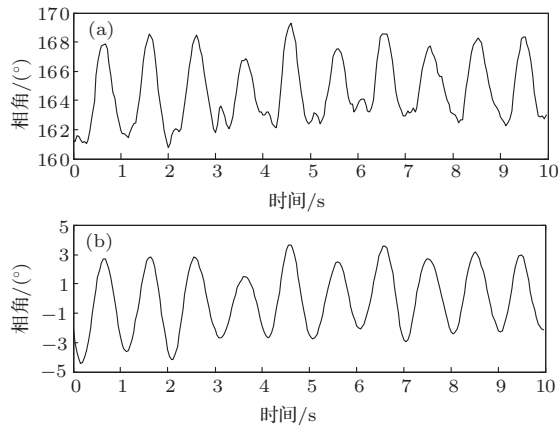


图8 数据窗1重构图 (a) 实测信号; (b) CCF-TLS-ESPRIT 重构信号

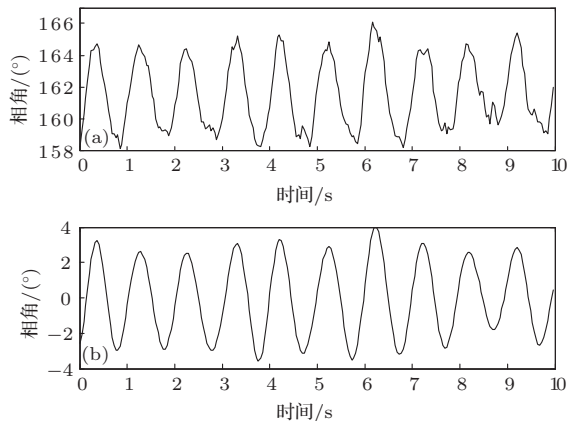


图9 数据窗2重构图 (a) 实测信号; (b) CCF-TLS-ESPRIT 重构信号

由图8和9可知, 对噪声影响发生畸变的实测波形, CCF-TLS-ESPRIT算法能够有效从噪声环境中重构出发生畸变的实际信号波形.

FOMMC-TLS-ESPRIT和CCF-TLS-ESPRIT两种算法对数据窗1, 2的辨识结果如表3和表4所示.

由表3和表4可知, CCF-TLS-ESPRIT和FOMMC-TLS-ESPRIT算法均能有效辨识出1.01—1.02 Hz左右的强迫振荡主振模态, 而浙江电网内部秦山机组与北仑机组振荡频率与此吻合. CCF-TLS-ESPRIT和FOMMC-TLS-ESPRIT

算法运算时间如图10所示.

表3 数据窗1 辨识结果

辨识算法	幅值	频率/Hz	衰减系数	阻尼比
CCF-TLS-ESPRIT	2.6097	1.0233	0.0164	-0.0026
	0.1622	0.7290	0.0649	-0.0142
FOMMC-TLS-ESPRIT	225.3	1.0188	0.0253	-0.0039
	11.2	0.7205	0.0750	-0.0156

表4 数据窗2 辨识结果

辨识算法	幅值	频率/Hz	衰减系数	阻尼比
CCF-TLS-ESPRIT	3.1770	1.0174	-0.0233	0.0036
	0.3203	0.6119	-0.2663	0.0691
FOMMC-TLS-ESPRIT	252.8	1.0159	-0.0272	0.0042
	18.6	0.6213	-0.2359	0.0603

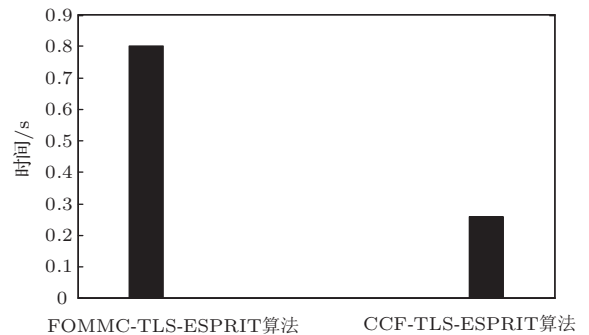


图10 两种算法运算时间比较

4.3 混合仿真平台仿真校验

进一步检验CCF-TLS-ESPRIT算法的性能, 基于Hypersim混合仿真软件, 在2013年华中等值电网模型上设置川渝电网内部洪沟板桥线路单回线路故障. 取川渝与华中电网间的联络线张家坝-恩施功率信号进行辨识. Hypersim平台较高的采样频率对计算量会造成较大负担, 可将数据输出间隔由0.00066 s改变为0.066 s. Hypersim平台输出的含有噪声的数据辨识与重构如表5和图11所示.

以上可看出, CCF-TLS-ESPRIT能够有效从噪声污染的采样信号中辨识出系统的主要模态, 并重构出信号模型.

根据模态辨识结果, 采用向上直流进行直流附加控制. 采用直流附加控制后张家坝-恩施的功率信号辨识与重构结果如表6和图12所示.

可见, 系统阻尼增强后, CCF-TLS-ESPRIT也能够准确辨识并重构出噪声环境下的信号.

表5 张家坝-恩施信号辨识结果

辨识算法	频率/Hz	阻尼比/%	衰减系数
CCF-TLS-ESPRIT	0.3454	6.82	-0.1483
	0.9249	6.85	-0.3992
	0.6615	5.29	-0.2200

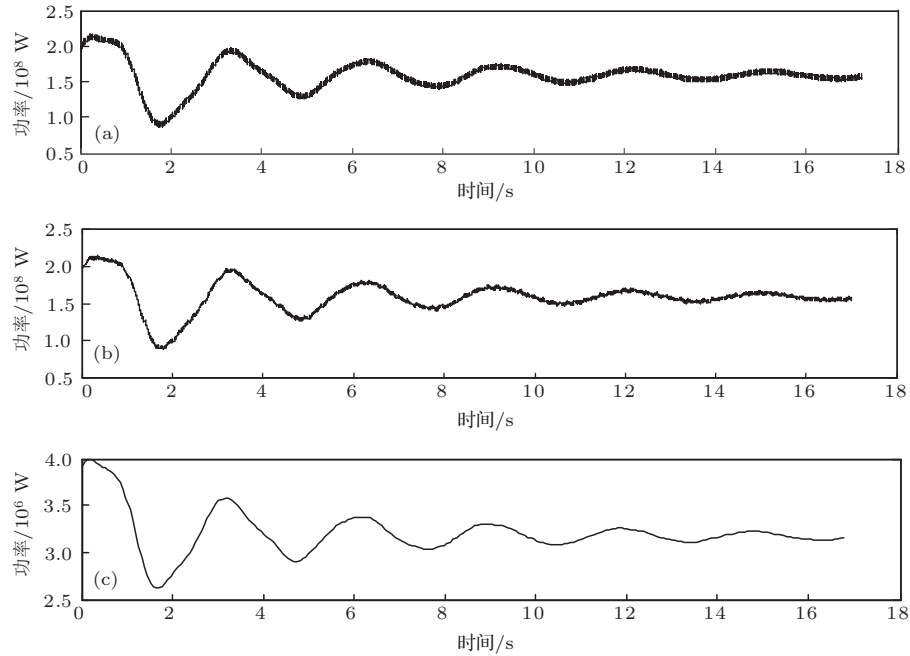


图11 张家坝-恩施信号重构图 (a) 原始信号; (b) 改变采样频率后信号; (c) 拟合信号

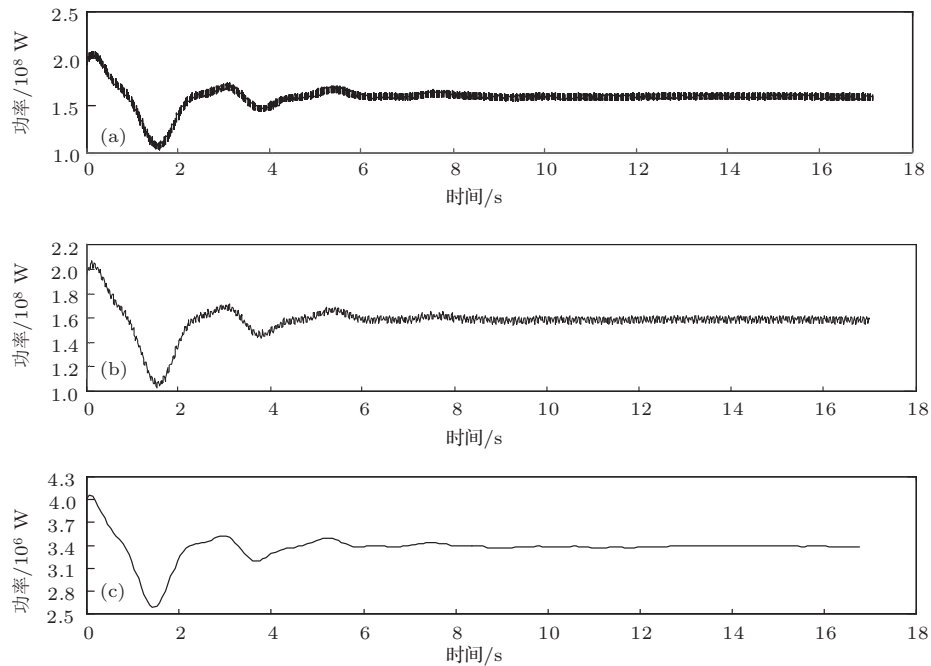


图12 直流附加控制后信号重构图 (a) 原始信号; (b) 改变采样频率后信号; (c) 拟合信号

表6 直流控制后信号辨识结果

辨识算法	频率/Hz	阻尼比/%	衰减因子
CCF-TLS-ESPRIT	0.4010	24.81	-0.6454
	0.9317	6.98	-0.4094
	0.6822	7.25	-0.3116

5 结 论

电力系统低频振荡在线采集信号中含有的高斯白噪声在常规低通滤波后会产生高斯色噪声, 针对高斯色噪声影响辨识精度的问题, 提出互相关函数与总体最小二乘-旋转不变技术参数估计的算法, 能够有效抑制高斯色噪声的影响.

基于广域测量系统的低频振荡在线辨识是电力系统的热点问题, 而噪声问题是制约在线辨识的难点问题, 互相关函数与总体最小二乘-旋转不变技术参数估计相结合的算法能够快速、准确辨识出色噪声环境下电力系统低频振荡的模式, 为系统的安全稳定分析及抑制措施提供有效依据.

参考文献

- [1] Kundur P 1994 *Power System Stability and Control* (1st Ed.) (New York: McGraw-Hill Inc) pp320–353
- [2] Ni Y X, Chen S S, Zhang B L 2002 *Dynamic Power System Theory and Analysis* (Beijing: Tsinghua University Press) p212–228 (in Chinese) [倪以信, 陈寿孙, 张宝霖 2002 动态电力系统的理论和分析 (北京: 清华大学出版社) 第 212—228 页]
- [3] Wang L, Semlyen A 1990 *IEEE Trans. Power Syst.* **5** 635
- [4] Ju P, Xie H, Meng Y J 2005 *Proceedings of the CSEE* **25** 56 (in Chinese) [鞠平, 谢欢, 孟远景 2005 中国电机工程学报 **25** 56]
- [5] Girgis A A, Ham F M 1980 *IEEE Trans. Aeros. Electron. Syst.* **16** 434
- [6] Korba P, Larsson M, Rehtanz C 2003 *Proceedings of 2003 IEEE Conference on Control Applications Istanbul, Turkey, IEEE*, 2003 p183–188
- [7] Vittal V, Heydt G T, Messina A R 2008 *IEEE Trans. Power Syst.* **23** 1408
- [8] Yang Y F, Wu Y F, Ren X M, Qiu Y 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 3778 (in Chinese) [杨永锋, 吴亚锋, 任兴民, 裘焱 2010 物理学报 **59** 3778]
- [9] Yang Y F, Wu Y F, Ren X M, Qin W Y, Zhi X Z, Qiu Y 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 3742 (in Chinese) [杨永锋, 吴亚锋, 任兴民, 秦卫阳, 支希哲, 裘焱 2009 物理学报 **58** 3742]
- [10] Yang Y F, Ren X M, Qin W Y, Wu Y F, Zhi X Z 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 3742 (in Chinese) [杨永锋, 任兴民, 秦卫阳, 吴亚锋, 支希哲 2009 物理学报 **58** 3742]
- [11] Zhang X Q, Liang J 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 050505 (in Chinese) [张学清, 梁军 2013 物理学报 **62** 050505]
- [12] Li T Y, Xie J A, Zhang F Y, Li X C 2007 *Proceedings of the CSEE* **27** 79 (in Chinese) [李天云, 谢家安, 张方彦, 李晓晨 2007 中国电机工程学报 **27** 79]
- [13] Trudnowski D J 1999 *IEEE Trans. Power Syst.* **14** 226
- [14] Liu H C, Li X Y 2002 *Proceedings of the CSEE* **22** 54 (in Chinese) [刘红超, 李兴源 2002 中国电机工程学报 **22** 54]
- [15] Kumaresan M R, Tufts D W 1982 *IEEE Trans. Acoustics Speech and Signal Process.* **30** 833
- [16] Hua Y B, Sarkar T K 1991 *IEEE Trans. on Signal Process.* **39** 892
- [17] Wang Y J, Yu J L 2007 *Proceedings of the CSEE* **27** 12 (in Chinese) [王宇静, 于继来 2007 中国电机工程学报 **27** 12]
- [18] Rouquette S, Najim M 2001 *IEEE Trans. Signal Process.* **49** 237
- [19] Zhang J, Xu Z, Wang F 2007 *Automation of Electric Power Systems* **31** 84 (in Chinese) [张静, 徐政, 王峰 2007 电力系统自动化 **31** 84]
- [20] Jin H M, He W P, Zhang W, Feng A X, Hou W 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 129202 (in Chinese) [金红梅, 何文平, 张文, 冯爱霞, 侯威 2012 物理学报 **61** 129202]
- [21] Li T Y, Zhu L, Song L et al. 2009 *Trans. China Electrotech. Soc.* **24** 38 (in Chinese) [李天云, 祝磊, 宋莉, 等 2009 电工技术学报 **24** 38]
- [22] Hou W B, Liu T Q, Li X Y 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 3531 (in Chinese) [侯王宾, 刘天琪, 李兴源 2010 物理学报 **59** 3531]
- [23] Wang D W, Su Y, Ma X Y 2005 *Acta Elec. Sin.* **33** 1015 (in Chinese) [王党卫, 粟毅, 马兴义 2005 电子学报 **33** 1015]
- [24] Xu L X, Wang B H 1993 *J. Tsinghua Univ.* **33** 68 (in Chinese) [徐立新, 王伯翰 1993 清华大学学报 (自然科学版) **33** 68]

On-line identification for low frequency oscillation based on CCF-TLS-ESPRIT algorithm^{*}

Hu Nan[†] Li Xing-Yuan Li Kuan Qin Bo

(School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

(Received 16 October 2013; revised manuscript received 6 December 2013)

Abstract

On-line identification for low frequency oscillation needs to measure signals which couple with white Gaussian noise from wide area monitoring systems (WAMSs). Processed by low pass filter, white Gaussian noise can turn into colored Gaussian noise, so the accuracy of oscillatory identification would be reduced. To solve the problem of colored Gaussian noise, in this paper we propose a cross-correlation-function (CCF) method that could reduce the influence of colored Gaussian noise. Combined with TLS-ESPRIT algorithm, CCF-TLS-ESPRIT could identify oscillatory modes in the environment of colored Gaussian noise rapidly. The simulation results show the effectiveness of the proposed method.

Keywords: wide area monitoring systems, cross-correlation-function, TLS-ESPRIT, colored Gaussian noise

PACS: 84.30.Jc, 84.71.-b

DOI: 10.7498/aps.63.068401

^{*} Project supported by the Key Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51037003), and the State Grid Corporation of China, Major Projects on Planning and Operation Control of Large Scale Grid (Grant No. SGCC-MPLG027-2012).

[†] Corresponding author. E-mail: zenco_2@163.com