

DOI: 10.7667/PSPC170449

# 基于改进泰勒加权最小二乘法的相量测量算法

曹磊<sup>1</sup>, 赵庆生<sup>1</sup>, 王旭平<sup>1</sup>, 郭尊<sup>2</sup>

(1. 太原理工大学电力系统运行与控制山西省重点实验室, 山西 太原 030024;  
2. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206)

**摘要:** 大部分相量测量算法将信号相量作为一个静态模型, 因此对电网中经常发生的电压幅值和相角波动特别敏感。基于标准频率下动态相量模型的泰勒加权最小二乘法(Taylor Weighted Least Squares, TWLS)不仅提供了相量值, 还提供了相量导数值, 可以提高对电网动态状况的监测。在此基础上, 提出了一种基于基波频率值的改进泰勒加权最小二乘法。首先用非线性最小二乘法得到基波频率值。然后介绍了基于测量基波频率值的改进泰勒加权最小二乘法推导过程, 并对该算法所涉及的窗函数、数据窗长度和泰勒多项式阶数进行分析选择。最后采用不同的信号模型和实际数据来检验算法的性能。仿真结果表明: 提出的改进泰勒加权最小二乘法的测量精度满足要求。

**关键词:** 动态相量模型; 相量测量; 泰勒加权最小二乘法; 窗函数; 相量导数

## A phasor measurement algorithm based on improved Taylor weighted least squares

CAO Lei<sup>1</sup>, ZHAO Qingsheng<sup>1</sup>, WANG Xuping<sup>1</sup>, GUO Zun<sup>2</sup>

(1. Shanxi Key Laboratory of Power System Operation and Control, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**Abstract:** Most phasor measurement algorithms consider signal phasors as a steady-state model, so they are very sensitive to voltage amplitude and angle fluctuations that often occur in modern power grids. Taylor Weighted Least Squares (TWLS) algorithm relies on a dynamic phasor model at nominal frequency. The algorithm not only provide the phasor values but also give its derivatives to improve the dynamic monitoring of the power grid. On this basis, an improved TWLS method based on fundamental frequency is proposed. First, the fundamental frequency is obtained by nonlinear least squares method. Then, the derivation process of the TWLS algorithm based on the calculated fundamental frequency is introduced, and the window function, the length of the data window and Taylor polynomial order involved in the algorithm are analyzed and selected. Finally, different signal models and actual data are used to test the performance of the algorithm. The simulation results show that the accuracy of the improved TWLS algorithm meets the requirements of synchronized phasor measurement.

This work is supported by National Natural Science Foundation for Young Scholars (No. 51505317) and Natural Science Foundation of Shanxi Province (No. 201601D102039).

**Key words:** dynamic phasor model; phasor measurement; Taylor weighted least squares algorithm; window function; phasor derivative

## 0 引言

随着未来非线性负载和微型分布式发电的发展以及新能源需求(例如: 电动汽车)的增加, 将对电网监测和保护技术的要求越来越高。同步相量测量

技术作为广域测量系统的核心技术, 同步相量测量算法的精度将直接影响到广域测量系统的应用效果<sup>[1]</sup>。

目前, 常见的相量测量算法有离散傅里叶变换(Discrete Fourier Transform, DFT)算法<sup>[2-3]</sup>、卡尔曼滤波法<sup>[4-5]</sup>、泰勒加权最小二乘法<sup>[6-8]</sup>等。其中, DFT算法虽然能较好地抑制谐波, 在稳态情况下具有很高的测量精度, 但实际的电力系统是一个复杂的系

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目资助(51505317); 山西省自然科学基金项目资助(201601D102039)

统, 基于静态相量模型的 DFT 算法会由于系统的动态特性导致测量精度明显下降。目前研究中, 一些学者提出了有关基于动态相量模型的算法<sup>[6-11]</sup>。其中, 泰勒加权最小二乘法可以改善 DFT 算法的不足, 而且还可以计算出相量的导数值。文献[6]讲解了动态相量的概念, 对泰勒加权最小二乘法进行了理论推导。文献[7]提出采用窗函数提高测量精度, 但仿真信号模型均基于标准频率, 未对频率发生偏移时的情况进行分析。

考虑到频率发生偏移时的情况, 本文提出了基于基波频率值的改进泰勒加权最小二乘法。中外学者提出了许多有关频率跟踪的算法<sup>[12-14]</sup>。其中, 非线性最小二乘法<sup>[12]</sup>收敛速度快、跟踪精度高, 因此本文将其作为频率跟踪算法。另外, 文献[6-8]均未对 TWLS 算法的泰勒多项式阶数进行分析, 本文对泰勒多项式阶数以及窗函数、数据窗长度进行了分析选择。最后, 通过仿真验证了算法的有效性。

## 1 改进 TWLS 算法

由文献[6]可知, 电网动态信号  $s(t)$  可表示为

$$\mathbf{S} = [s((-N_h + r)t_s) \cdots s((-n + r)t_s) \cdots s(rt_s) \cdots s((n + r)t_s) \cdots s((N_h + r)t_s)]^T$$

$$\mathbf{B} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} (-N_h)^K E(-N_h) & (-N_h)^{K-1} E(-N_h) & \cdots & E(-N_h) & E(N_h) & \cdots & (N_h)^{K-1} E(N_h) & (N_h)^K E(N_h) \\ \vdots & \vdots \\ (-n)^K E(-n) & (n)^{K-1} E(-n) & \cdots & E(-n) & E(n) & \cdots & (n)^{K-1} E(n) & (n)^K E(n) \\ \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 & 1 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots \\ (n)^K E(n) & (n)^{K-1} E(n) & \cdots & E(n) & E(-n) & \cdots & (n)^{K-1} E(-n) & (n)^K E(-n) \\ \vdots & \vdots \\ (N_h)^K E(N_h) & (-N_h)^{K-1} E(-N_h) & \cdots & E(N_h) & E(-N_h) & \cdots & (N_h)^{K-1} E(-N_h) & (N_h)^K E(-N_h) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{P} = [\bar{p}_{rk} \quad \bar{p}_{r(k-1)} \quad \cdots \quad \bar{p}_{r0} \quad p_{r0} \quad \cdots \quad p_{r(k-1)} \quad p_{rk}]^T$$

式中: 矩阵  $\mathbf{S}$  表示采样信号序列; 矩阵  $\mathbf{B}$  中  $E(n) = e^{-j(n+r)2\pi f_s t_s}$ , 其中  $n \in [-N_h, \dots, 0, \dots, N_h]$ ;

矩阵  $\mathbf{P}$  中  $p_{rk} = p^{(k)}(t_r) / (k!(f_s)^k)$ , 其中  $k \in [0, 1, \dots, K]$ ,  $\bar{p}_{rk}$  为  $p_{rk}$  的共轭相量。

根据最小二乘法, 式(3)可以解得

$$\mathbf{P} = (\mathbf{B}^H \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^H \mathbf{S} \quad (4)$$

式中,  $\mathbf{H}$  表示共轭转置。

由文献[7]可知, 可利用窗函数减小测量误差。采用窗函数  $W$ , 可将式(3)改写为

$$\mathbf{W} \mathbf{S} \approx \mathbf{W} \mathbf{B} \mathbf{P} \quad (5)$$

$$s(t) = a(t) \cos(2\pi f_1 t + \varphi(t)) + \eta(t) = \operatorname{Re}\{p(t)e^{j2\pi f_1 t}\} + \eta(t) \quad (1)$$

式中:  $f_1$  为基波频率值, 由非线性最小二乘法跟踪得到;  $p(t) = a(t)e^{j\varphi(t)}$  为动态相量,  $a(t)$  和  $\varphi(t)$  分别为基波信号幅值和相角;  $\eta(t)$  为干扰信号。用  $K$  阶泰勒多项式来表示动态相量  $p(t)$ , 参考时间设为  $t_r$ , 可表示为

$$p_k(t) = p(t_r) + p'(t_r)\Delta t + p''(t_r)\frac{\Delta^2 t}{2!} + \cdots + p^{(K)}(t_r)\frac{\Delta^K t}{K!}, \quad |\Delta t| \leq \frac{T_1}{2} \quad (2)$$

式中:  $T_1$  为采样时间;  $\Delta t = t - t_r$ 。

现以采样频率  $f_s$  对信号进行采样, 采样间隔为  $t_s = 1/f_s$ , 采样点数为奇数可表示为  $N_1 = 2N_h + 1$ , 对应采样时间为  $T_1$ , 参考时间与零时刻对应点数为  $r = t_r/t_s$ 。

将式(1)用矩阵形式可近似表示为

$$\mathbf{S} \approx \mathbf{B} \mathbf{P} \quad (3)$$

式中:

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} w(-N_h) & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & w(-N_h + 1) & & \\ \vdots & & & \vdots \\ 0 & & \cdots & w(N_h) \end{bmatrix}$$

根据最小二乘法, 式(5)可以解得

$$\mathbf{P} = (\mathbf{B}^H \mathbf{W}^H \mathbf{W} \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^H \mathbf{W}^H \mathbf{W} \mathbf{S} \quad (6)$$

由式(6), 相角  $\varphi(t_r)$ 、幅值  $a(t_r)$ 、相角变化率  $\varphi'(t_r)$ 、幅值变化率  $a'(t_r)$ 、综合矢量误差  $TVE(t_r)$  分别可表示为

$$\varphi(t_r) = \angle p_{r0} \quad (7)$$

$$a(t_r) = |p_{r0}| \quad (8)$$

$$\varphi'(t_r) = \frac{\text{Im}\{p_{r1}e^{-j\varphi(t_r)}\}}{t_s a(t_r)} \quad (9)$$

$$a'(t_r) = \text{Re}\{p_{r1}e^{-j\varphi(t_r)}\} f_s \quad (10)$$

$$TVE(t_r) = \frac{|p_{r0} - \hat{p}_{r0}|}{|\hat{p}_{r0}|} \quad (11)$$

式中,  $\hat{p}_{r0}$  为  $t_r$  时刻对应的实际基波相量。

算法流程如下。

1) 由非线性最小二乘法得基波频率值  $f_1$ 。

2) 将  $f_1$  值代入式(3), 得矩阵  $\mathbf{B}$ 。

3) 由采样信号矩阵  $\mathbf{S}$  和矩阵  $\mathbf{B}$ , 根据式(6)得矩阵  $\mathbf{P}$ 。

4) 由矩阵  $\mathbf{P}$  中的元素, 根据式(7)~式(11)可分别得到相角、幅值、相角变化率、幅值变化率和综合矢量误差值。

## 2 参数选择

算法中所涉及的参数包含三个方面: 窗函数、数据窗长度和泰勒多项式阶数。用表 1 中信号作为测试信号进行仿真分析, 表中  $R_n$  为信噪比为 50 dB 的零均值高斯白噪声。

表 1 测试信号  
Table 1 Test signals

编号	信号
A	$1 \cos(2\pi 48t + \pi/4) + R_n$
B	$1 \cos(2\pi 48t + \pi/4) + 0.1 \cos(2\pi 144t)$
C	$1 \cos(2\pi 48t + \pi/4) + 0.1 \cos(2\pi 144t) + 0.1 \cos(2\pi 240t)$
D	$1 \cos(2\pi 52t + \pi/4) + 0.1 \cos(2\pi 156t) + R_n$
E	$(1 + 0.1 \cos(2\pi 5t)) \cos(2\pi 49t)$
F	$(1 + 0.1 \cos(2\pi 5t)) \cos(2\pi 49t) + 0.1 \cos(2\pi 147t)$
G	$1 \cos(2\pi 51t + 0.1 \cos(2\pi 5t)) + R_n$

### 2.1 窗函数

选择合适的窗函数能够有效地提高相量测量精度。本文对在矩形窗、汉宁窗和海明窗三个窗函数下仿真结果 TVE 值进行对比, 其中算法所用数据窗长度为 2 个周期, 泰勒多项式阶数为 2 阶。

如表 2 所示, 信号为 D 时, 采用矩形窗函数, TVE 值大于 0.001, 不满足相关要求<sup>[15]</sup>; 对于汉宁窗和海明窗而言, 采用海明窗相量测量结果误差更小, 本文选择海明窗作为窗函数。

### 2.2 数据窗长度

数据窗长度与相量测量精度、计算量都密切相关, 选择合适的数据窗长度显得尤为重要。本文的采样频率  $f_s = 2000$  Hz, 所用窗函数为海明窗, 泰勒多项式阶数为 2 阶。

表 2 不同窗函数对相量测量的影响。

Table 2 Influence of the different window function on the phasor measurement

信号	矩形窗(TVE%)	汉宁窗	海明窗
A	0.275 2	0.297 1	0.287 2
B	0.148 1	0.148 4	0.069 1
C	0.657 8	0.149 1	0.074 5
D	1.451 3	0.343 3	0.330 8
E	0.016 4	0.006 2	0.002 9
F	0.531 8	0.162 5	0.077 6
G	0.292 7	0.321 2	0.279 3

如表 3 所示, 数据窗长度越长测量精度越高。测试信号为 B、C、D 和 F 时, 数据窗长度小于 1.5 周期, TVE 值不满足相关要求<sup>[15]</sup>; 数据窗长度大于等于 1.75 周期时, TVE 值均在相关要求以内。数据窗长度为 2 周期与 1.75 周期时相比, TVE 值减小, 但收敛时间慢了 5 ms, 增加了计算量。数据窗长度为 1.75 周期时, TVE 值均在 0.004 以内, 完全满足相关要求。故本文所选的数据窗长度为 1.75 周期。

表 3 不同数据窗长度对相量测量的影响

Table 3 Influence of the different data window length on the phasor measurement

信号	1 周期(TVE%)	1.25 周期	1.5 周期	1.75 周期	2 周期
A	1.154 8	0.494 6	0.413 2	0.301 3	0.287 2
B	40.407	9.020 7	1.862 9	0.266 4	0.069 1
C	41.115	9.370 8	1.897 5	0.269 2	0.075 4
D	25.346	4.851 2	1.065 3	0.353 6	0.330 8
E	0.018 5	0.015 1	0.011 1	0.006 6	0.002 9
F	39.803	8.458 7	1.697 1	0.183 6	0.077 6
G	0.982 6	0.483 5	0.335 8	0.291 3	0.279 3

### 2.3 泰勒多项式阶数

动态相量  $p(t)$  的泰勒多项式阶数与相量测量精度密切相关, 下面在不同泰勒多项式阶数  $K$  下进行测量。其中算法所用窗函数为海明窗, 数据窗长度为 1.75 个周期。

如表 4 所示, 信号含有噪声时, 测量精度会随

表 4 不同泰勒多项式阶数对相量测量的影响

Table 4 Influence of the different orders of Taylor polynomials on the phasor measurement

信号	$K=2$ (TVE%)	$K=3$	$K=4$
A	0.301 3	0.317 5	1.542 7
B	0.266 4	0.520 6	42.564
C	0.269 2	0.577 6	43.395
D	0.353 6	0.408 8	8.947 6
E	0.063 5	0.024 5	0.022 1
F	0.183 6	0.384 2	0.384 5
G	0.291 3	0.295 6	0.304 3

着  $K$  值的变大而降低。由信号 B、C 测量结果对比可说明加入五次谐波对测量精度影响很小。由信号 E、F 测量结果对比可说明加入谐波改变了  $K$  值与测量精度的关系。下面用公式进行说明。

电网中谐波通常以奇次为主, 设信号模型为

$$\begin{aligned} x(t) &= a(t) \cos(2\pi f_1 t + \varphi(t)) + b \cos(6\pi f_1 t + \varphi_b) + \\ & c \cos(10\pi f_1 t + \varphi_c) = \\ \operatorname{Re}\{ & (a(t)e^{j\varphi(t)} + be^{j(4\pi f_1 t + \varphi_b)} + ce^{j(8\pi f_1 t + \varphi_c)})e^{j2\pi f_1 t} \} = \\ \operatorname{Re}\{ & p(t)e^{j2\pi f_1 t} \} \end{aligned} \quad (12)$$

式中:  $a(t)$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $\varphi(t)$ 、 $\varphi_b$ 、 $\varphi_c$  分别为基波、三次谐波、五次谐波的幅值和相角;  $f_1$  为频率追踪结果。动态相量  $p(t)$  在  $t_r$  处,  $K$  阶泰勒多项式可表示为

$$\begin{aligned} p_k(t) &= a(t_r)e^{j\varphi(t_r)} + be^{j(4\pi f_1 t_r + \varphi_b)} + ce^{j(8\pi f_1 t_r + \varphi_c)} + \\ & p'(t_r)\Delta t + \dots + p^{(K)}(t_r)\frac{\Delta^K t}{K!}, \quad (13) \\ & |\Delta t| \leq T_1/2 \end{aligned}$$

此时 TWLS 算法中  $p_{r0}$  可表示为:

$p_{r0} = a(t_r)e^{j\varphi(t_r)} + be^{j(4\pi f_1 t_r + \varphi_b)} + ce^{j(8\pi f_1 t_r + \varphi_c)}$ 。其中,  $a(t_r)e^{j\varphi(t_r)}$  对应于基波, 其他两项由谐波产生。虽然信号中谐波含量很小, 但在一定范围内, 可能随着  $K$  值的增大使得  $p_{r0}$  计算更加准确, 反而降低了  $a(t_r)e^{j\varphi(t_r)}$  的精度。为了使  $K$  值的选择更有说服力, 假设电网信号为

$$\begin{aligned} y1 &= 1 \cos(2\pi f t + \pi/4) + 0.1 \cos(6\pi f t + \beta) \\ y2 &= (1 + 0.1 \cos(2\pi 5t)) \cos(2\pi f t) + 0.1 \cos(6\pi f t + \beta) \end{aligned} \quad (14)$$

式中:  $f$  为基波频率;  $\beta$  为谐波初相角。算法中数据窗长度为 1.75 周期, 窗函数为海明窗。

图 1 为信号  $y1$  的相量测量结果图。基波频率在 45~55 Hz 内变化, 谐波相角在  $0 \sim 2\pi$  内变化,  $K=2$  时 TVE 值均在 0.007 5 以内, 满足相关要求, 而  $K=3$  时最大 TVE 值大于 0.01, 不满足相关要求。

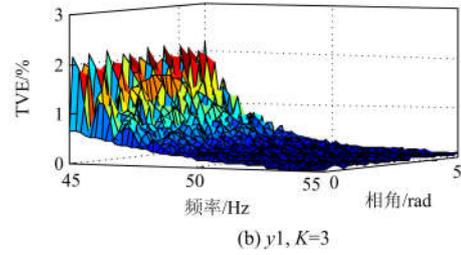
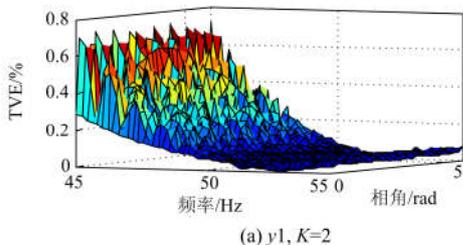


图 1 相量测量结果

Fig. 1 Phasor measurement results

图 2 为信号  $y2$  的相量测量结果图。基波频率在 45~55 Hz 内变化, 谐波相角在  $0 \sim 2\pi$  内变化,  $K=2$  时 TVE 值均在 0.007 以内, 满足相关要求, 而  $K=3$  时最大 TVE 值大于 0.01, 不满足相关要求。综合表 4 以及信号  $y1$  和  $y2$  的相量测量结果, 本文所选泰勒多项式阶数为 2 阶。

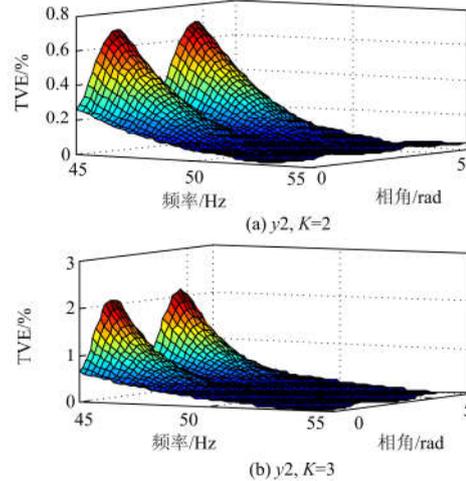


图 2 相量测量结果

Fig. 2 Phasor measurement results

### 3 算法仿真

#### 3.1 稳态信号测试

为了验证本文算法在信号频率偏移时的有效性, 将本文算法(以下简称改进 TWLS 算法)和文献 [7] 所用的 TWLS 算法(以下简称 TWLS 算法)进行对比。

假设测试信号数学模型为

$$y_k = \cos(2\pi f k T_s + \pi/4) + 0.05 \cos(6\pi f k T_s) + R_n \quad (15)$$

式中:  $f = 50.5$  Hz 表示基波频率;  $T_s = 1/f_s$  为采样间隔, 其中采样频率  $f_s = 2000$  Hz;  $R_n$  为信噪比为 50 dB 的零均值高斯白噪声。

图 3 为两算法相量测量结果对比图。相角对比图中, TWLS 算法对应曲线呈倾斜直线是因为频率偏移导致, 而本文算法可以精确地测出相角值, 其

误差在  $0.2^\circ$  以内, 满足相关要求<sup>[15]</sup>。两算法幅值测量值几乎一样, 最大误差值均在 0.002 左右, 满足相关要求。

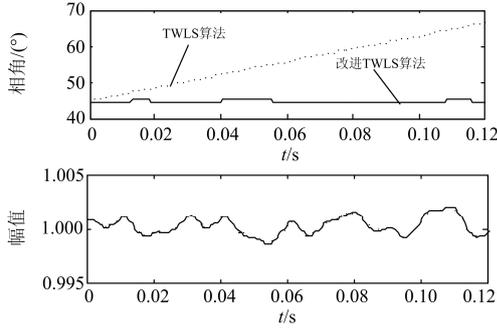


图 3 相量测量结果

Fig. 3 Phasor measurement results

图 4 为两算法相量导数测量结果对比图。TWLS 算法相角导数值在  $\pi$  左右波动, 对应于频率偏移量乘以  $2\pi$ 。本文算法基于基波频率值, 故相角导数值在 0 左右波动, 波动范围为 0.3 以内。幅值导数值波动范围为 0.4 以内。

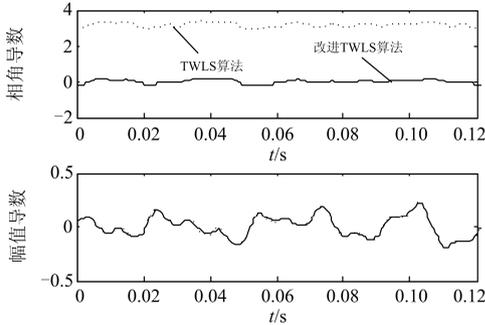


图 4 相量导数测量结果

Fig. 4 Phasor derivatives measurement results

### 3.2 振荡信号测试

为了验证本文算法在振荡信号下的有效性, 将本文算法(以下简称改进 TWLS 算法)和 DFT 算法在不同信号模型下进行对比。

#### 3.2.1 幅值调制模型

假设测试信号数学模型为

$$y_k = (1 + 0.1 \cos(2\pi f_1 k T_s)) \cos(2\pi f_2 k T_s + \pi/4) + 0.05 \cos(2\pi f_2 k T_s) + R_n \quad (16)$$

式中: 调制频率  $f_1$  为 5 Hz; 基波频率  $f_2$  为 50 Hz; 调制幅值是基波幅值的 10%;  $T_s = 1/f_s$  为采样间隔, 其中采样频率  $f_s = 2000$  Hz;  $R_n$  为信噪比为 60 dB 的零均值高斯白噪声。

图 5 为两算法相量测量结果对比图。由图 5(a), DFT 算法最大相角误差值接近  $0.3^\circ$ ; 而改进 TWLS

算法最大相角误差值在  $0.1^\circ$  以内, 满足相关要求<sup>[15]</sup>。图 5(c)为图 5(b)中 0.2 s 处的放大图, 可见改进 TWLS 算法对应曲线相比 DFT 算法更为光滑, 其波峰、波谷时刻幅值误差均在 0.002 以内, 满足相关要求。

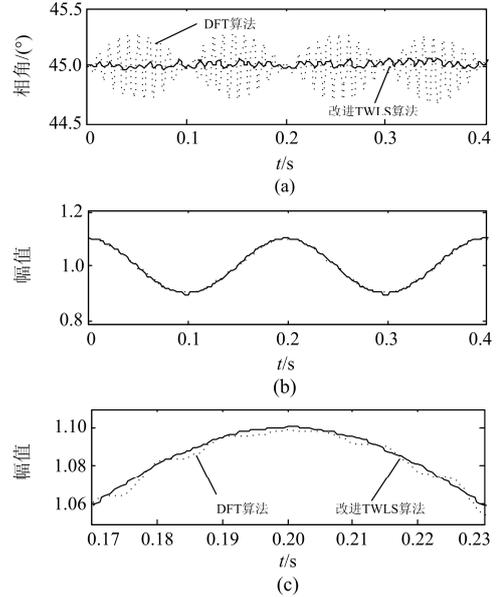


图 5 相量测量结果

Fig. 5 Phasor measurement results

图 6 为改进 TWLS 算法相量导数测量结果图。相角导数值在 0 左右波动, 波动范围为 0.15 以内。幅值导数值对应曲线函数约为  $y_k = \pi \sin(10\pi k T_s)$ , 符合假设信号模型。

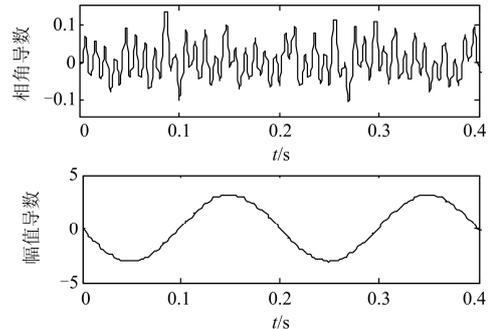


图 6 相量导数测量结果

Fig. 6 Phasor derivatives measurement results

#### 3.2.2 相角调制模型

假设测试信号数学模型为

$$y_k = \cos(2\pi f_2 k T_s + 0.1 \cos(2\pi f_1 k T_s)) + 0.05 \cos(2\pi f_2 k T_s) + R_n \quad (17)$$

式中: 调制频率  $f_1$  为 5 Hz; 基波频率  $f_2$  为 50 Hz; 调制幅值是基波幅值的 10%;  $T_s = 1/f_s$  为采样间隔, 其中采样频率  $f_s = 2000$  Hz;  $R_n$  为信噪比为 60 dB 的零均值高斯白噪声。

图 7 为两算法相量测量结果对比图。图 7(b)为图 7(a)中 0.2 s 处的放大图, 可见改进 TWLS 算法对应曲线相比 DFT 算法更为光滑, 其波峰、波谷时刻相角误差均在  $0.1^\circ$  以内, 满足相关要求。由图 7(c), DFT 算法最大幅值误差接近 0.005; 而改进 TWLS 算法最大幅值误差在 0.002 以内, 满足相关要求。

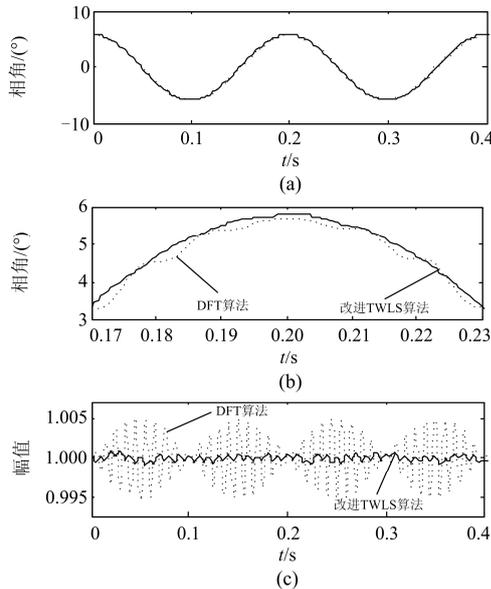


图 7 相量测量结果

Fig. 7 Phasor measurement results

图 8 为改进 TWLS 算法相量导数测量结果图。相角导数值对应曲线函数约为  $y_k = \pi \sin(10\pi k T_s)$ , 符合假设信号模型。幅值导数值在 0 左右波动, 波动范围为 0.15 以内。

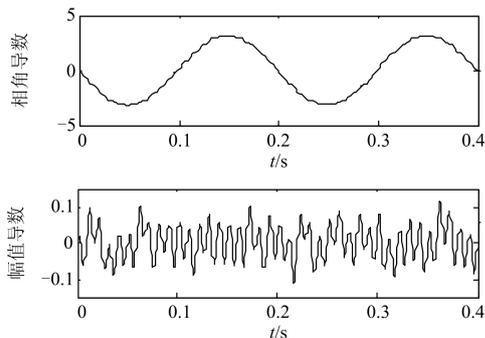


图 8 相量导数测量结果

Fig. 8 Phasor derivatives measurement results

### 3.3 实际信号测试

本文以某市 500 kV 线路发生 C 相故障时的数据来验证算法的实用性。

图 9(a)为 C 相故障录波数据曲线图。图 9(b)、图 9(c)分别为相角和幅值测量结果图, 图中曲线发生变化的点与图 9(a)中相一致。例如, 图 9(a)电压

在 0.064 s 处发生暂降, 图 9(b)、图 9(c)均在 0.046 s 处开始响应, 在 0.081 s 处收敛, 整个响应延迟时间为 0.035 s。图 9(c)中幅值测量值和图 9(a)实际值相一致。综上, 说明本文算法能够很好地跟踪信号的变化。

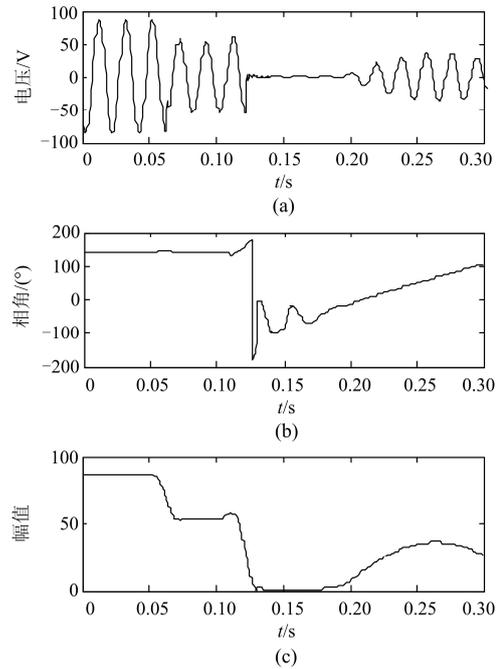


图 9 实际数据测试

Fig. 9 Actual data tests

## 4 结论

1) 改进 TWLS 算法中加入海明窗和选择二阶泰勒多项式可以有效地提高相量测量精度; 在保证测量精度的情况下, 选用 1.75 周期的数据窗长度可以缩短收敛时间。

2) 当信号频率发生偏移时, TWLS 算法无法精确计算相角值, 而本文提出基于基波频率的改进 TWLS 算法能够显著提高相角测量精度。

3) 当信号发生振荡时, 本文改进 TWLS 算法相比 DFT 算法相量测量精度有明显提高, 而且本文算法还计算出了相量导数值。

4) 实际数据测试说明本文算法能够很好地跟踪信号的变化。本文算法等效时间窗为 35 ms, 若不满足部分继电保护的要求, 可通过增大采样频率和减小数据窗长度改善。

## 参考文献

- [1] 何江, 周京阳, 王明俊. 广域相量测量技术在智能电网中的应用[J]. 电网技术, 2009, 33(15): 16-19.  
HE Jiang, ZHOU Jingyang, WANG Mingjun. Application

- of wide area phasor measurement technology in smart grid[J]. Power System Technology, 2009, 33(15): 16-19.
- [2] 谢运华, 赵庆生, 郭贺宏, 等. 基于高精度测频的修正 DFT 相量及功率测量算法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(12): 23-28.  
XIE Yunhua, ZHAO Qingsheng, GUO Hehong, et al. A modified DFT of phasor and power measurement algorithm based on high precision frequency measurement[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(12): 23-28.
- [3] 张晓莉, 许勇, 刘慧海, 等. 一种提高同步相量测量装置动态性能的新算法及其测试研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(18): 48-54.  
ZHANG Xiaoli, XU Yong, LIU Huihai, et al. Research of a new algorithm to improve dynamic performance for phasor measurement unit and test verification[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(18): 48-54.
- [4] KHODAPARAST J, KHEDERZADEH M. Least square and Kalman based methods for dynamic phasor estimation: a review[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 1-18. DOI: 10.1186/s41601-016-0032-y.
- [5] 吴智利, 赵庆生, 陈惠英, 等. 低频采样下基于卡尔曼滤波的同步相量测量算法的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(15): 94-99.  
WU Zhili, ZHAO Qingsheng, CHEN Huiying, et al. A Kalman-filter based phasor measurement algorithm under low sampling frequency[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(15): 94-99.
- [6] DE LA O SERNA J A. Dynamic phasor estimates for power system oscillations[J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2007, 56(5): 1648-1657.
- [7] PLATAS-GARZA M A, DE LA O SERNA J A. Dynamic phasor and frequency estimates through maximally flat differentiators[J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2010, 59(7): 1803-1811.
- [8] PREMIERLANI W, KASZTENNY B, ADAMIAK M. Development and implementation of a synchrophasor estimator capable of measurements under dynamic conditions[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(1): 109-123.
- [9] MAI R K, HE Z Y, FU L, et al. A dynamic synchrophasor estimation algorithm for online application[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(2): 570-578.
- [10] PETRI D, FONTANELLI D, MACII D. A frequency domain algorithm for dynamic synchrophasor and frequency estimation[J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2014, 63(10): 2330-2340.
- [11] ROSCOE A J, ABDULHADI I F, BURT G M. P and M class phasor measurement unit algorithms using adaptive cascaded filters[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(3): 1447-1459.
- [12] CHUDAMANI R, VASUDEVA K, RAMALINGAM C S. Real-time estimation of power system frequency using nonlinear least squares[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(3): 1021-1028.
- [13] 吴梓亮, 李银红, 李明, 等. 一种基于修正相角差的傅氏测频算法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(13): 111-117.  
WU Ziliang, LI Yinhong, LI Ming, et al. Fourier frequency measurement algorithm based on modified phasor angle difference[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(13): 111-117.
- [14] 麦瑞坤, 何正友, 何文, 等. 电力系统频率的自适应跟踪算法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(16): 73-78.  
MAI Ruikun, HE Zhengyou, HE Wen, et al. Adaptive frequency tracking algorithm for power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(16): 73-78.
- [15] 电力系统同步相量测量装置检测规范: GB/T 26862—2011[S]. 北京: 中华人民共和国质量监督检验检疫总局, 2011.  
Test specification for synchrophasor measurement unit for power systems: GB/T 26862—2011[S]. Beijing: General Administration of Quality Supervision Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, 2011.

收稿日期: 2017-03-28; 修回日期: 2017-07-21

作者简介:

曹磊(1992—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统运行与控制; E-mail: 871282077@qq.com

赵庆生(1969—), 男, 通信作者, 博士、副教授, 主要研究方向为电力系统运行与控制、电力系统建模与仿真。

E-mail: zhaogs1996@163.com

(编辑 周金梅)