

# 基于 DFT 的高精度相量测量的新算法

王超,汪芳宗

(三峡大学 电气信息学院 湖北 宜昌 443002)

**摘要** 在传统的离散傅里叶算法的基础上提出了一种新的相量测量算法。首先,对纯基波信号,该算法利用 2 个数据窗的 DFT 变换数据推导出了一个关于频率偏移的方程,解此方程后可以求出基波信号的频率、幅值及相位的精确解,在推导过程中无任何近似误差,有效减小计算量的同时提高了测量的精确性;接着,为了提高谐波情况下测量的精度,利用采样起点间隔半个信号周期的 DFT 变换数据进行谱泄漏抵消,然后用前面的方法进行相量测量,通过跟踪采样频率,进而再次测量,最后,分别对存在谐波和噪声的情况进行了仿真。结果表明,该算法在各种情况下具有测量精度高的优点。

**关键词** 相量测量;DFT 变换;谱泄漏

中图分类号:TM934

文献标识码:A

文章编号:1001-1390(2009)06-0013-04

## A High-Precision Algorithm for Phasor Measurement Based on DFT

WANG Chao, WANG Fang-zong

(College of Electrical Engineering & Information Technology, China Three Georges University,  
Yichang 443002, Hubei, China)

**Abstract** A new phasor measurement approach based on conventional DFT algorithm has been proposed. Firstly, with the fundamental signal, the equation of frequency deviation can be obtained by using of data derived from DFT of two data windows in the proposed approach. Hence, the accurate frequency, amplitude and phase of fundamental signal can be obtained after solving this equation, and there is no any approximate error in the process of derivation of the proposed approach in which the operation amount can be effectively reduced and the measurement accuracy is improved. Then, in order to improve the measurement accuracy with harmonics, it is applied by counteracting the spectrum leakage of data derived from DFT of two data windows which stagger about half period of signal, the same algorithm of measure phasor, tracking of sampling frequency, and measuring again. Finally, signals with harmonics and noises are simulated respectively, and the results show high accuracy of this algorithm in all these situations.

**Key words** phasor measurement, discrete Fourier transform, spectrum leakage

### 0 引言

相量一直是反映电力系统运行特性的重要依据,近几年基于全球定位系统(GPS)、数字信号处理技术以及电力通信技术的快速发展,被广泛应用的广域测量系统(Wide Area Measurement System, WAMS)中的同步相量测量单元(PMU)已能够实现在线测量电力系统中的相量,进而监控电网的动态运行,确保了电力系统的稳定运行。

相量测量包括频率、相角、幅值的测量,以相角测量和频率测量为主。国内外学者提出了多种相量测量算法<sup>[1-7]</sup>,目前,电力系统中应用最广泛的相量测量方

法主要是基于离散傅里叶变换(Discrete Fourier Transform, DFT)算法<sup>[8]</sup>。当电网处于额定工频时,DFT 算法具有良好的性能,相量测量结果十分准确。但当电网基频偏离额定频率时,传统 DFT 算法的测量结果将产生较大的误差。

为了得到高精度的测量值,迄今为止,已有很多文献在传统的 DFT 算法基础上提出了一些改进方法<sup>[9-11]</sup>,本文在仔细分析了 DFT 变换后,针对减小测量误差,提出了一种高精度 DFT 相量测量算法,其基本思路是对信号进行 2 次数据窗采样,然后对获得的 2 个等长度的序列进行 DFT 变换,从而推导出了一个关于频率

偏移的方程，解此方程后可以求出基波信号的频率、幅值及相位的精确解。为了提高谐波情况下测量的精度，利用采样起点间隔半个信号周期的 DFT 变换数据谱泄露抵消，然后进行相量测量，采样频率跟踪，进而再次测量，使信号在有谐波、噪声的情况下仍能准确测量相量。

### 1 算法的基本原理

#### 1.1 频率的测量

电力系统中电压、电流的信号常用余弦形式表示，假设原始的信号中只有基波，系统的额定基频表示为  $f_0$ ，信号的幅值，频率，初相角分别为  $A$   $f_1$   $\theta$ ，则信号为：

$$x(t) = A \cos(2\pi f_1 t + \theta) \quad (1)$$

当信号偏离额定频率时，频率偏差  $d$  表示为：

$$d = f_1 / f_0 - 1 \quad (2)$$

信号的采样间隔为  $T_s$ ，一个数据窗采样  $N$  点，则将  $x(t) = A \cos(2\pi f_1 t + \theta)$  离散化后，表示为：

$$x(n) = A \cos(2\pi f_1 T_s n + \theta) \\ = A \cos[2\pi(1+d)n/N + \theta]$$

对上式进行 DFT 变换得到：

$$X_1 = \sum_{n=0}^{N-1} A \cos[2\pi(1+d)n/N + \theta] e^{-j\frac{2\pi}{N}n} \\ = \frac{A \sin \pi d}{2 \sin \frac{\pi d}{N}} e^{j(\theta + \pi d - \frac{\pi d}{N})} + \frac{A \sin \pi d}{2 \sin \frac{2\pi + \pi d}{N}} e^{-j(\theta + \pi d - \frac{2\pi + \pi d}{N})} \quad (3)$$

接下的分析中为了方便表示，令  $a = \sin \pi d / \sin \frac{\pi d}{N}$ ，

$$b = \sin \pi d / \sin(\frac{2\pi + \pi d}{N}) \quad \varphi = \theta + \pi d - \frac{\pi d}{N}$$

，则式(3)可以表示为：

$$X_1 = \frac{A}{2} [a \cos \varphi + b \cos(2\pi/N - \varphi)] + \\ j \frac{A}{2} [a \sin \varphi + b \sin(2\pi/N - \varphi)] \quad (4)$$

经过时间  $\Delta t = p T_s$  后的被测信号可以表示为：

$$y(t) = A \cos(2\pi f_1 t + \theta + \delta) \quad (5)$$

式中  $\delta = 2\pi f_1 p T_s = 2\pi f_0(1+d)p T_s$ ， $p=1, 2, \dots$ 。

同理将  $y(t)$  进行 DFT 变换后为：

$$Y_1 = \frac{A}{2} [a \cos(\varphi + \delta) + b \cos(2\pi/N - \varphi - \delta)] +$$

$$j \frac{A}{2} [a \sin(\varphi + \delta) + b \sin(2\pi/N - \varphi - \delta)]$$

用  $R(X)$   $R(Y)$   $I(X)$   $I(Y)$  分别表示  $X_1$   $Y_1$  的实部和

虚部，按下式合并后且令：

$$k_1 = I(Y) - R(X) \sin \delta - I(X) \cos \delta \\ = -A b \cos(2\pi/N - \varphi) \sin \delta \quad (6)$$

$$k_2 = R(Y) - R(X) \cos \delta - I(X) \sin \delta \\ = A b \sin(2\pi/N - \varphi) \sin \delta \quad (7)$$

$$k_3 = R(Y) - R(X) \cos \delta - I(X) \sin \delta \\ = -A a \sin \varphi \sin \delta \quad (8)$$

$$k_4 = I(Y) - R(X) \sin \delta - I(X) \cos \delta \\ = A a \cos \varphi \sin \delta \quad (9)$$

又可由式(6) (7) (8) (9)得到：

$$k_1^2 + k_2^2 = A^2 b^2 \sin^2 \delta \quad (10)$$

$$k_3^2 + k_4^2 = A^2 a^2 \sin^2 \delta \quad (11)$$

通过式(10)和式(11)可以得：

$$(k_3^2 + k_4^2) \times b^2 = (k_1^2 + k_2^2) \times a^2 \quad (12)$$

将  $\delta = 2\pi f_0(1+d)p T_s$  带入式(6) (7) (8) (9)后，则式(12)中  $k_1$   $k_2$   $k_3$   $k_4$   $a$   $b$  都是关于  $d$  的代数式，显然，这是一个未知数为  $d$  的方程。通过牛顿迭代法可以求解此方程而得到准确的频率偏移值  $d$ 。将已求出的  $d$  代入式(2)中就可以得到精确的信号频率值。牛顿迭代法本身即是一种快速的求解方法，若选取的初值与实际解越接近，则迭代过程越快，实际中，电力系统的频率偏移不会很大，这样恰好可以满足解与初值的关系而快速得到结果，另外，现在有很多的牛顿改进法可以加快迭代过程，使得求解越来越快，从而能够保证算法的实时性。

#### 1.2 幅值和相角的测量

在前面已求出频率偏移值后，按下面分类求出幅值和相角。

(1) 若解出的  $d$  为零时

显然这种情况是属于频率不发生偏移，故此时幅值和相位可直接用  $x(t)$  的 DFT 变换值按下式求：

$$A = \frac{2}{N} \sqrt{R^2(X) + I^2(X)} \quad \tan \theta = I(X) / R(X)$$

(2) 若解出的  $d$  不为零时

将求出的频率偏移  $d$  代入式(6)(7)求出  $k_1$   $k_2$ 。

由式(10)可以得到：

$$A = \frac{\sqrt{k_1^2 + k_2^2}}{|b \sin \delta|} = \frac{\sqrt{k_1^2 + k_2^2}}{|\sin \pi d \sin \delta|} \left| \sin\left(\frac{2\pi + \pi d}{N}\right) \right| \quad (13)$$

将已求出的  $d$  带入式(13)就得到了幅值。

在这种频率偏移的情况下求解相角，须先将得到的  $d$  值代入式(8)和式(9)中求出  $k_3$   $k_4$ 。

(a) 如果计算出  $k_4=0$  时，显然，此时  $k_3$  不会同时为

0,由式(8)和式(9)得:

$$\frac{k_4}{k_3} = \frac{\cos\varphi}{\sin\varphi} = \frac{\cot\theta\cot(\pi d - \pi d/N) - 1}{\cot\theta + \cot(\pi d - \pi d/N)} = 0$$

所以:

$$\cot\theta = \tan(\pi d - \pi d/N) \quad (14)$$

(b)如果计算出 $k_4 \neq 0$ 时,由式(8)和(9)得:

$$\frac{k_3}{k_4} = \frac{\sin\varphi}{\cos\varphi} = \frac{\tan\theta + \tan(\pi d - \pi d/N)}{1 - \tan\theta \tan(\pi d - \pi d/N)}$$

所以:

$$\tan\theta = \frac{-k_3/k_4 - \tan(\pi d - \pi d/N)}{1 - k_3/k_4 \tan(\pi d - \pi d/N)} \quad (15)$$

将前面求出的频率偏移 $d$ 带入式(14)或(15)中,求出相角 $\theta$ 。需要注意的是,实际的 $\theta \in [0, 360]$ ,故直接利用三角函数求出的 $\theta$ 需要变换一下,将已求得 $\theta$ 和 $d$ 带入 $a\cos\varphi\sin\delta$ 中,若与 $k_4$ 异号,则 $\theta = \theta + 180^\circ$ ;若同号,且 $\theta$ 为负数,则 $\theta = \theta + 360^\circ$ 。

从上述推导的公式可以看出,本方法是基于 $X_1$ 和 $Y_1$ 这2个DFT数据进行测量计算。在计算量不大的前提下,求出了信号幅值、频率、初相角,而且结果都是十分准确的信号实际值,除了计算机存在的解方程精度误差外,并没有任何其它的近似误差。

## 2 算法的改进

实际工程中应用的DFT算法只能对有限长度的信号进行变换,而理论分析的傅里叶变换是对整个时域信号的变换,也就是对时域信号进行截断,截断就会造成能量泄漏,该泄漏就叫频谱泄漏。如果采样是同步的,泄漏频谱在整数次谐波点上的幅值为零,则不会造成对基频相量的测量误差。但是如果采样是非同步时,泄漏频谱在整数次谐波点上的幅值不为零,这时泄漏频谱将引起对基频相量的分析误差。

对含有谐波的信号表示为:

$$x(t) = A_0 + \sum_{k=1}^M A_k \cos(2k\pi f_1 t + \theta_k)$$

一个数据窗的时间长度为 $T_0 = 1/f_0$ ,对信号截断后进行傅里叶变换可以得到:

$$X(kf_0) = \frac{A_k}{2} W(-dkf_0) e^{j\theta_k} + \frac{A_k}{2} W(2kf_0 + dkf_0) e^{-j\theta_k} + \sum_{m=0, m \neq k}^M \frac{A_m}{2} [W(kf_0 - mf_1) e^{j\theta_m} + W(kf_0 + mf_1) e^{-j\theta_m}] \quad (16)$$

式中 $M$ 为最高次谐波次数; $A_m$ 、 $\theta_m$ 为第 $m$ 次谐波的幅值、相位角。当 $k=1$ 时,第一项是基波的正频部分的复振幅乘以代表短程谱泄露的实衰减因子 $W(f)$ :

$$W(f) = \frac{\sin\pi f/f_0}{\pi f} e^{-j\pi f/f_0}$$

第二项是基波的负频量在 $kf_0$ 处产生的长程谱泄漏,求和括号里各项为谐波在 $kf_0$ 处产生的长程谱泄漏<sup>[12]</sup>。

若将采样数据窗向后移动半个信号周期( $0.5T_0$ )后再进行傅里叶变换,同理可以得到:

$$X'(kf_0) = e^{jk\pi(1+d)} \left\{ \frac{A_k}{2} W(-dkf_0) e^{j\theta_k} + \frac{A_k}{2} W(2kf_0 + dkf_0) e^{-j\theta_k} \right\} + \sum_{m=0, m \neq k}^M \frac{A_m}{2} e^{jm\pi(1+d)} [W(kf_0 - mf_1) e^{j\theta_m} + W(kf_0 + mf_1) e^{-j\theta_m}] \quad (17)$$

将式(16)和(17)按下式进行计算,且 $k=1$ :

$$\begin{aligned} X(f_0) - e^{-j\pi d} X'(f_0) &= A W(-df_0) e^{j\theta} + A W(2f_0 + df_0) e^{-j\theta} + \\ &\sum_{m=0, m \neq k}^M \sum_{m-1=\text{偶数}} (-1)^{1-m} \frac{A_m}{2} [W(f_0 - mf_1) e^{j\theta_m} + W(kf_0 + mf_1) e^{-j\theta_m}] \end{aligned}$$

可见有一部分的谱泄漏已抵消,忽略相消后剩余谐波的谱泄漏,则可以得到:

$$X(f_0) - e^{-j\pi d} X'(f_0) \approx A W(-df_0) e^{j\theta} + A W(2f_0 + df_0) e^{-j\theta}$$

显而易见,得到的结果是信号只含基波时相应傅里叶变换的2倍值。故从上述可以推导出,针对含谐波信号时,为了减小频谱泄漏,将信号进行DFT变换得到 $X_1$ 和 $Y_1$ 后,再分别相应求出信号在半个周期后( $0.5T_0$ )的DFT变换 $X'_1$ 和 $Y'_1$ ,用式(18)和(19)进行谱泄漏抵消,即:

$$\bar{X}_1 = 0.5(X_1 - e^{-j\pi d} X'_1) \quad (18)$$

$$\bar{Y}_1 = 0.5(Y_1 - e^{-j\pi d} Y'_1) \quad (19)$$

再将 $\bar{X}_1$ 和 $\bar{Y}_1$ 按照信号无谐波时的算法进行相量测量。若是要求含谐波时信号的相量测量值更加的精确,则可以采用频率跟踪的方法<sup>[13]</sup>,其步骤如下:

(1)确定第 $q$ 次采样的采样间隔 $T_s$ ,即:

$$T_s = E[1/(Nf_{1(q-1)})]$$

式中 $E[\cdot]$ 表示小数位只能取到定时器最小定时单位, $f_{1(q-1)}$ 为上一次的频率计算值,第一次的 $f_{11} = f_0$ 。

(2)按 $T_s$ 采样后进行DFT变换,代入式(18)和(19)得到 $\bar{X}_1$ 和 $\bar{Y}_1$ 。

(3)将 $\bar{X}_1$ 和 $\bar{Y}_1$ 按式(13)、(2)求出频率 $f_{1(q)}$ ,再按式(13)、(14)或(15)求出幅值和相位。

(4)按频率 $f_{1(q)}$ 求出下一次的采样间隔 $T_s$ ,重复上述步骤直到达到测量精度要求。

## 3 仿真结果及分析

因为无谐波时,本算法的测量值只存在求方程的精度误差,整个推导过程从理论上并没有误差,以至

于求解出的相量值精度很高，可以完全等于实际值，故在此不进行仿真。本文只对信号中含有谐波和噪声的情况分别进行仿真。

仿真中额定频率为 50Hz，采样数  $N$  为 32，两序列间隔时间中设定  $p=1$ ，被测电压信号为：

$$x(t) = \cos(2\pi f_1 t + 30^\circ) + \sum_{k=2}^{10} \frac{1}{10k} \cos[k(2\pi f_1 t + 30^\circ)]$$

其中，基波频率为  $f_1=52\text{Hz}$ ，仿真结果见表 1。

表 1 信号中含谐波时的仿真结果

Tab.1 Simulated results of phasor measurement

跟踪次数	测量频率/Hz	测量幅值/V	测量相位/°
1	51.8344	0.9988	30.9000
2	51.9960	0.9999	30.0278
3	52.0000	1.0000	30.0002
4	52.0000	1.0000	30.0000

从结果中可以看到，测量算法精度很高，随着跟踪次数的增加，相量的测量值越来越精确，第 4 次跟踪结束后，测量误差几乎为 0。因此，证明了本算法的高精度性。

当被测电压信号中含有随机噪声，表示为：

$$x(t) = \cos(2\pi f_1 t + 30^\circ) + \sum_{k=2}^{10} \frac{1}{10k} \cos[k(2\pi f_1 t + 30^\circ)] + \gamma$$

式中  $\gamma$  为 50dB 的零均值的高斯白噪声，基波频率为  $f_1=52\text{Hz}$ ，测量仿真结果见表 2。

表 2 信号中含噪声时的仿真结果

Tab.2 Simulated results of phasor measurement for a signal with noise

跟踪次数	测量频率/Hz	测量幅值/V	测量相位/°
1	51.8567	0.9999	30.7999
2	51.9252	1.0008	30.3138
3	52.0491	0.9996	29.8013
4	51.9966	1.0000	30.0051

可以看到，第 4 次跟踪结束后，测量结果很好，说明了该算法对噪声有较好的抑制作用。

#### 4 结论

对于纯基波信号，本文提出了一种简单精确的、仅基于 2 个数据窗的 DFT 的相量测量方法，原理简单，更重要的是计算精度很高，而且易于实现。针对谐波时提出了改进的算法，每周期采样数只需要增加  $0.5N$ （本文仿真中为 16），计算量也很小，测量结果精度高。最后通过仿真说明了信号中存在谐波和噪声时，本算法有很好的测量效果，验证了该算法的高效性。

#### 参 考 文 献

- [1] 闵勇,丁仁杰,韩英铎,周正.自适应调整采样率的相量在线测量算法研究[J].电力系统自动化,1998,22(10):10-13.
- MIN Yong,DING Ren-jie,HAN Ying-duo et al.Research on a new online phasor measurement approach based on adaptive sampling interval technique[J].Automation of Electric Power Systems,1998,22(10):10-13.
- [2] Sidhu T S,Sachdev M S.An iterative technique for fast and accurate measurement of power system frequency [J].IEEE Transactions on Power Delivery,1998,13(1):109-115.
- [3] Yang J Z,Liu C W.A precise calculation of power system frequency and phasor[J].IEEE Transactions on Power Delivery,2000,15(2):494-498.
- [4] 吴杰康,龙军,王辑祥.基于数字微分算法的电力参数快速准确估算[J].继电器,2004,32(17):1-5.
- WU Jie-kang, LONG Jun,WANG Ji-xiang.An algorithm for parameter estimation of power system based on numerical differentiation[J].Relay,2004,32(17):1-5.
- [5] 麦瑞坤,何正友,薄志谦.基于泰勒展开模型的同步相量估计新算法[J].电力系统自动化,2008,32(12):22-26.
- MAI Rui-kun, HE Zheng-you, BO Zhi-qian.Research on Synchrophasor Estimation Algorithm Based on Taylor Expansion [J].Automation of Electric Power Systems,2008,32(12):22-26.
- [6] 江道灼,孙伟华,陈素素.电网相量实时同步测量的一种新方法[J].电力系统自动化,2003,27(15):40-44.
- JIANG Dao-zhuo,SUN Wei-hua,CHEN Su-su.A new method of real time and synchronous measurement on power network phase parameters [J].Automation of Electric Power Systems,2003,27(15):40-44.
- [7] Sidhu T S.Accurate measurement of power system frequency using a digital signal processing technique [J].IEEE Trans on Instrumentation and Measurement,1999,48(1):75-81.
- [8] IEEE Working Group Report.Synchronized sampling and phasor measurement for relaying and control [J].IEEE Trans on Power Delivery,1994,9(1):442-452.
- [9] 王茂海,孙元章.基于 DFT 的电力系统相量及功率测量新算法[J].电力系统自动化,2005,29(2):20-24.
- WANG Mao-hai,SUN Yuan-zhang.A DFT-based method for phasor and power measurement in power systems [J].Automation of Electric Power Systems,2005,29(2):20-24.
- [10] 禹永植,张忠民,席志红.基于傅里叶变换的高精度频率及相量算法[J].电网技术,2007,31(23):83-86.
- YU Yong-zhi,ZHANG Zhong-min,XI Zhi-hong.A High-Precision Algorithm for Frequency and Phasor Based on Fourier Transform[J].Power System Technology,2007,31(23):83-86.
- [11] 胡海兵,祁才君,吕征宇.一种基于非同步采样的 FFT 算法[J].中国电机工程学报,2004,24(12):13-17.
- HU Hai-bing,QI Cai-jun,LV Zheng-yu.A novel FFT algorithm for asynchronous sample [J].Proceedings of the CSEE,2004,24(12):13-17.
- [12] 张介秋,梁昌洪,陈砚圃.提高谐波参量测量精度的谱泄漏相消算法[J].电子学报,2005,33(9):1614-1617.
- ZHANG Jie-qiu,LIANG Chang-hong,CHEN Yan-pu et al.Spectral Leakage Canceling Algorithm for Improving (下转第 20 页)



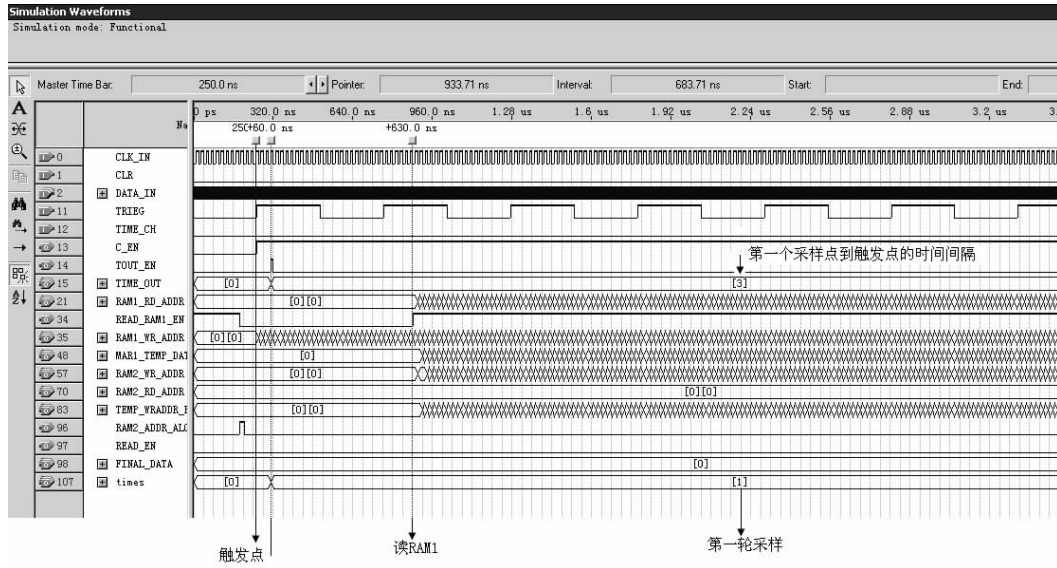


图 9 整体仿真结果

Fig.9 Simulation results of top-module

算,通过以上介绍的等效采样原理,对其地址进行计算实现采样值的内插,完成等效采样过程<sup>[7]</sup>。对 RAM 2 的读、写操作模块如图 8 所示。

对以上两个模块合起来进行功能仿真,其结果如图 9 所示。

#### 4 结束语

通过对随机等效采样模块功能的分析,按照自下而上的方法,完成各个子模块的设计,最终完成顶层模块的设计并给出仿真结果,实现了实时采样 50M,等效采样 1.6G 的要求,该模块应用于高带宽数字示波器的前端数据采集系统中,取得了很好的效果。

#### 参考文献

[1] 张国礼. 基于随机采样的高速数据采集系统设计[D]. 西安电子科技大学, 2005.  
ZHANG Guo-li. Design of High-speed Data Acquisition System Based on the Principle of Random Equivalent Sampling[D]. Xidian University, 2005.

[2] 蔡花梅, 等. 随机等效采样技术及其关键技术研究 [J]. 电子质量, 2006, (7): 5-6.  
CAI Hua-mei etc. The Design of Random-equivalent Sampling System and Key Techniques Analysis[J]. Electronics Quality, 2006 (7) 5-6

[3] Phadke A G, Pickett B, et al. Synchronized Sampling and Phasor

Measurements for Relaying and Control [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1994, 9(1): 442-452.

[4] 庞晓晖. 高速数据采集系统的设计与实现[J]. 仪器仪表学报, 2000, 21(3): 297-299.

PANG Xiao-hui. The Design and Implementation of High Speed Data Acquisition System [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2000, 21(3): 297-299

[5] 王诚, 等. Altera FPGA/CPLD 设计[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2005.

[6] 石明江. 100MHz 数字存储示波器等效采样的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2006 26-30.

SHI Ming-jiang. Research of 100MHz bandwidth equivalent sampling Digital Storage Oscilloscope. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2006 26-30.

[7] Meyer, Baese. Digital Signal Processing with Field Programmable Gate Arrays[M]. Berlin: Springer Verlag, 2004.

#### 作者简介:

金星(1961-) 男, 汉族, 中国地质大学(武汉)机电学院副院长, 教授, 主要从事控制理论与智能仪器、高频电源等方面的研究。

Email: tail2oo01@163.com

黄伟(1982-) 男, 汉族, 中国地质大学(武汉)机械与电子信息学院在读硕士研究生, 机电一体化专业, 主要从事智能仪器与仪表的研究。

收稿日期 2008-11-10

(常会敏 编发)

(上接第 16 页)

Precision of Harmonic Analysis [J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(9): 1614-1617.

[13] 王柏林. 频谱小偏差校正新方法[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(20): 46-49.

WANG Bo-lin. Novel Small Synchronous Error Correction Method in Spectrum Analysis [J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(20): 46-49.

#### 作者简介:

王超(1983-) 女, 硕士研究生, 主要研究方向为数字信号处理及其应用。Email: wangchaodream@163.com

汪芳宗(1966-) 男, 博士, 教授, 主要研究方向为电力系统分析与控制。

收稿日期 2008-11-15

(田春雨 编发)