

软件实现同步采样的频域误差分析

马宏忠¹ 李玉芬¹ 何 瑜²

(1. 河海大学电气工程学院 江苏 南京 210098 ; 2. 南京供电公司 江苏 南京 210008)

摘要 : 分析了同步误差产生的原因 , 导出同步误差引起信号频域分析误差的计算模型 , 并以标准正弦波信号、含有谐波干扰的信号(电力系统中的实际电流、电压信号) 为例 , 在频域中对软件实现同步采样的误差进行仿真计算与分析 . 结果表明 , 由于采样测量中存在同步误差 , 使信号频率发生偏移 , 信号幅值减小 , 信号泄漏增加 , 降低了微弱信号的分辨率 .

关键词 : 同步采样 ; 同步误差 ; 频谱分析

中图分类号 : TM930 文献标识码 : A 文章编号 : 1000-198X(2006)02-0212-04

用软件实现同步采样简单经济 , 已广泛应用于工频电参量测量中 . 近年来 , 国内外对用软件实现同步采样的问题进行了大量研究 . 文献 [1] 在时域内对信号进行分析 , 提出了减小同步误差的措施 . 文献 [2] 针对用软件测量交流电量有效值时产生的同步误差 , 推导了同步误差公式 , 并在时域内进行仿真 . 文献 [3] 讨论了非正弦周期信号同步采样测量误差的计算方法 . 文献 [4] 给出了 2 种改进的软件同步采样的实现方法 . 然而 , 关于同步误差的存在对被测信号频谱影响方面的研究很少 . 本文就软件实现同步采样产生的同步误差对被测信号频域内的影响进行分析 .

1 同步采样的频域误差分析

被测信号的周期 T_x 除以 1 周采样点数 N ($N > 3$ 的正整数) 得到采样间隔 T_s , 然后依次按该采样间隔采样 . 如果采样 N 点恰好为被测信号的一个周期 , 就是理想的同步采样 , 不存在同步误差^[1] . 但是在实际测量系统中 , 由于受微处理器晶振频率的限制 , 计数器的计数周期不能无限小 , 而信号周期和采样间隔均以计数器计数周期的倍数表示 , 其值为正整数 , 这样就会产生舍入误差 , 从而引起同步误差 ΔT . 其定义为

$$\Delta T = T_x - NT_s \tag{1}$$

式中 ΔT ——同步误差 ; T_x ——被测信号周期 ; N ——1 周采样点数 ; T_s ——采样周期 .

以测量系统中常用的 8031 单片机为例 , 将 ALE 信号 4 分频作为计数器的计数脉冲 , 设微处理器的晶振频率为 f_{osc} , 被测信号的频率为 f_x , 则同步误差 (用角度表示) 为

$$\Delta T = \left[1 - \left(\frac{24Nf_x}{f_{osc}} \right) \text{CINT} \left(\frac{f_{osc}}{24Nf_x} \right) \right] \times 360^\circ$$

式中 CINT 为四舍五入函数 .

可见 , 同步误差产生的根本原因是微处理器的晶振频率不能无限高 , 分辨率不能无限小 .

2 非整周期采样谐波分析的算法

根据以上分析 , 假设对被测信号 $f(x)$ 在 t_0 到 $t_0 + T_x$ 的区间上采样 , 采样周期为 $T_s = \frac{T_x}{N}$, 此时不存在同步误差 , T_s 为理想采样周期 . 按照该采样周期在区间 t_0 到 $t_0 + T_x$ 上采样 N 个数据 , 得到 $f(t_0)$, $f(t_0 + T_s)$, $\dots$, $f(t_0 + nT_s)$, $\dots$, $f(t_0 + (N-1)T_s)$ 共 N 个采样点 , 其中 $n = 0, 1, \dots, N-1$. 对这 N 个采样值按式 (2) 进行傅立叶变换 , k 为谱线序号 :

收稿日期 : 2005-06-15
基金项目 : 国家自然科学基金资助项目(50477010) ; 教育部高校优秀青年教师奖励计划资助项目
作者简介 : 马宏忠 (1962—) , 男 , 江苏如皋人 , 教授 , 博士 , 主要从事电力设备状态监测与故障诊断、测控技术等研究 .

$$F(k)=\sum_{n=0}^{N-1}f(t_0+nT_s)e^{-j(\frac{2\pi}{N})nk}$$

(2)

对同一被测信号 ,模拟存在同步误差 ΔT 的情况时 ,可以以不同的采样周期 T_1 采样被测信号 , T_1 是存在同步误差的实际采样周期 ,则同步误差 ΔT 满足

$$\Delta T=T_x-NT_1=NT_s-NT_1=N(T_s-T_1)$$

同样对这 N 个采样点进行傅立叶变换 ,则

$$F_1(k)=\sum_{n=0}^{N-1}f(t_0+nT_1)e^{-j(\frac{2\pi}{N})nk}$$

(3)

于是得到是否存在同步误差时频谱的差 $\Delta F(k)$:

$$\Delta F(k)=|F_1(k)|-|F(k)|$$

(4)

3 频域内的误差分析

以电力系统的主要电参量(基频为 50 Hz)为测量研究对象 ,分析同步误差对被测信号的频谱造成的影响 .设每个基频周期采样 64 点(为便于频谱分析 ,工程应用中通常每周采样 2 的整数次幂个点) ,所以采样频率 $f_s=3\,200\text{ Hz}$,采样周期 $T_s=0.3125\text{ ms}$.连续采样 100 个周期 ,并进行快速傅立叶变换(FFT) ,得到各种信号的频谱(本文以正弦波和梯形波为例) .为了分析存在同步误差时信号的频谱 ,取 $T_1=0.31\text{ ms}$,则 1 周期内将会存在 0.16 ms 的同步误差 .

将信号在无同步误差采样与含有同步误差采样条件下分别进行傅氏变换 ,并将存在同步误差时信号的频谱减去无同步误差时同一信号的频谱 ,在谱线的频率和幅值方面进行比较 .为了便于分析 ,本文信号的幅值均取为 100.

3.1 标准正弦信号的频谱

由式(4) ,基频时 $k=100$,则

$$\Delta F(100)=|F_1(100)|-|F(100)|$$

$$r_{F(100)}=\frac{\Delta F(100)}{F(100)}\times 100\% \approx 77\%$$

49.5 Hz 时($k=99$) , $r_{F(99)}\approx 6.5\%$.仿真结果如图 1 所示.

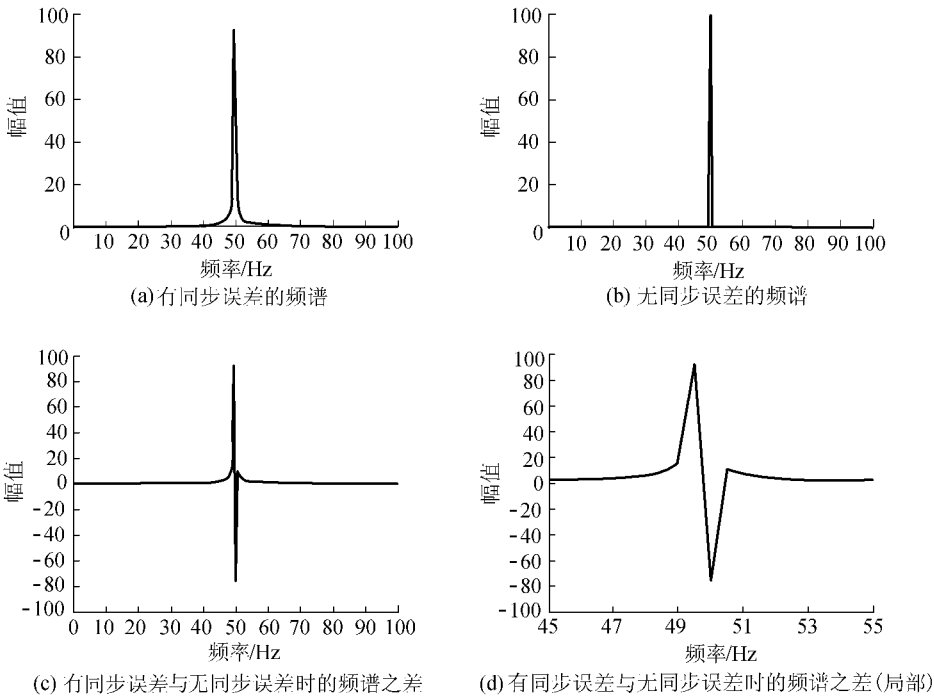


图 1 同步误差对正弦信号频谱分析影响

Fig.1 Influence of synchronous error on spectral analysis of sine signal

由图1可以看出,虽然在时域范围内同步误差不大,约为 $1/2$ 个采样周期,但在频域范围内却对信号的频谱造成了相对严重的泄漏,使得能量分散并造成表面的频谱偏移.50 Hz谱线在无同步误差时应为100,而存在仅0.8%的同步误差时,其谱线偏移到49.5 Hz左右,误差达6.5%.图1(d)为图1(c)中45~55 Hz的局部频谱.

3.2 正弦信号中存在谐波干扰时的频谱分析

电力系统中含有各种谐波,其中最主要的是5次、7次等奇次谐波.当三相不平衡时,还会有3次谐波(但是正常运行时理论上不存在3次谐波).一般情况下,7次谐波和其他高次谐波所占比例均没有5次谐波高,所以本文主要考虑存在5次谐波干扰的情况.

对基频幅值为100的正弦信号加一幅值为10、频率为5倍基频即250 Hz的5次谐波,则同步误差对频谱的影响如图2和表1所示.

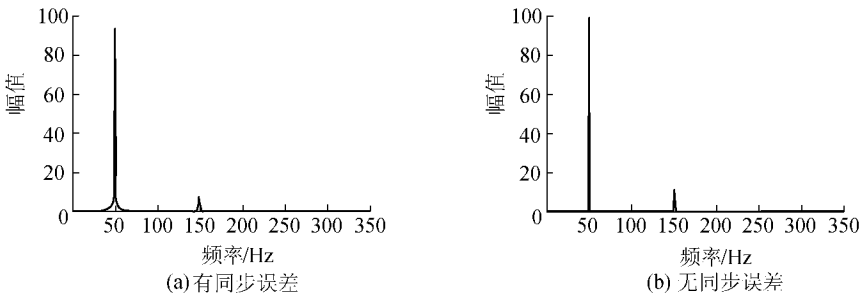


图2 存在谐波干扰时的正弦信号

Fig.2 Spectrum of sine signal with harmonic disturbances

表1 同步误差对频域分析的影响

Table 1 Influence of synchronous error on spectral analysis

被测信号	无同步误差 频谱值	无同步误差 谱线位置/Hz	存在0.8%的同步误差 频谱值	存在0.8%同步误差的 谱线位置/Hz	信号幅值 误差/%	频谱偏移 误差/%
基波	100	50	93.51	49.5	6.49	1.0
5次谐波	10	250	9.94	248.0	6.00	0.8

由图2和表1可以看出,存在同步误差时,5次谐波的频谱也受到严重的影响,不仅幅值减小,而且频谱也发生偏移.

同步误差使信号分析产生泄漏.虽然基频信号的泄漏对5次谐波的分析没有大的影响,但对于与基频信号频率非常接近的微弱信号的分析(如异步电动机转子绕组故障诊断中的特征信号频率在49 Hz左右),其影响是致命的^[5-8].

3.3 不同同步误差对基波谱线的影响

为得到不同同步误差对基波谱线的影响,以本文所用的标准正弦信号为例进行仿真,仿真结果见图3.

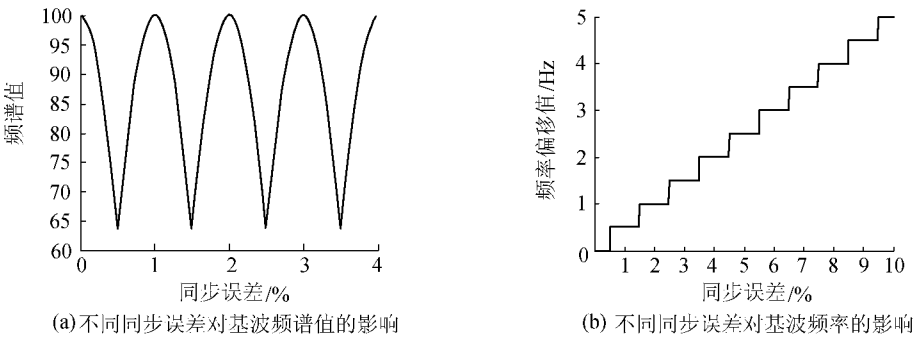


图3 不同同步误差对基波谱线的影响

Fig.3 Influence of different synchronous errors on spectral of fundamental wave

由图3可看出,随着同步误差的增大,基波谱线受到的影响也在增大,其中同步误差越大,基波频率的偏移就越大,而信号幅值却随着同步误差的增大呈周期性变化.如图3(a)所示,在同步误差为1%时,信号幅值

为 100 幅值没有误差,这是因为本文设定采样被测信号的 100 个周期无同步误差状态下,当同步误差为 1% 时,实际恰好为采样被测信号的 101 个周期,在幅值的计算上等价于同步误差。但从图 3(b)可以看出,此时的频率却偏移了 0.5 Hz。可见要同时减小同步误差对信号幅值及频率的影响,就必须减小同步误差。

4 工程应用

本文主要讨论周期信号的测量。在工程实际应用中,特别是电力系统监测中,所监测的信号基本上是周期性平稳信号。可先测量信号的周期,再根据信号周期及采样点数计算采样间隔。如果同步误差较大,可适当增加采样周期数(采样时间),使等效同步误差最小。

对非平稳信号,先测周期再计算采样间隔是不现实的。可以按一定的采样频率(如 6 450 Hz)一次适当多采样测量基频信号的几个周期,分析计算时从中截取采样点数,使计算长度尽可能为整周期或数个整周期,这样同步误差将很小。对于剧烈变化的暂态信号(非周期信号或周期变化不定的信号),本文的测量方法受到限制。

5 结 论

- a. 用软件实现同步采样一般会存在同步误差,造成被测信号的频谱泄漏,使得能量分散,严重时会造成基频偏移。
- b. 只有减小同步误差才能同时减小其对信号幅值及频率的影响。
- c. 在工程应用中,由于单片机存储容量较小,微处理器晶振频率不高,因此分析同步误差对被测信号频谱的影响具有现实意义。

参考文献:

[1] 马宏忠,胡虔生. 软件实现同步采样的误差分析[J]. 电工技术学报,1996,11(1):43-47.
[2] 梁志翔,邓祥曜. 波形采样法有效值测量的同步误差分析[J]. 重庆大学学报:自然科学版,1994,17(5):53-60.
[3] 胡虔生,杨存祥. 同步误差对非正弦周期电信号测量精度的影响[J]. 微特电机,1996(1):27-28.
[4] 裴云,王建,秦霆镐. 两种改进的软件同步采样实现方法的分析[J]. 电测与仪表,2000,37(9):5-7.
[5] 马宏忠,胡虔生,黄允凯,等. 感应电机转子绕组故障仿真与实验研究[J]. 中国电机工程学报,2003,23(4):107-112.
[6] 胡虔生,马宏忠. 非正弦周期信号测量同步误差研究[J]. 中国电机工程学报,2000,20(9):35-40.
[7] 沈国峰,王祁,张世平,等. 电力交流参数测量中非均匀采样问题的误差分析[J]. 仪器仪表学报,2003,24(S1):512-514.
[8] 王宾,潘贞存. 电网信号测量中非同步采样误差的分析与处理[J]. 现代电力,2003,20(1):22-26.

Frequency-domain error analysis of synchronous sampling realized by software

MA Hong-zhong¹, LI Yu-fen¹, HE Yu²
(1. College of Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Nanjing Power Supply Company, Nanjing 210008, China)

Abstract The causes of synchronous error were analyzed, and calculation models for the error of signal frequency-domain analysis induced by synchronous error were worked out. The frequency-domain calculation and analysis of the error of synchronous sampling by software were carried out based on a study of standard sine signal and sine signal with harmonic disturbances (the actual current and voltage signal in the power system). Simulated results show that synchronous error in sampling causes the error in frequency-domain analysis of signals, including the deviation of signal frequency and decrease of amplitude and increase of leakage of signals. These factors reduce the resolution of weak signals.

Key words synchronous sampling; synchronous error; spectral analysis