

基于多采样率的复合频率信号频率计设计

曹洪龙, 胡剑凌, 邵雷, 蔡文锋

(苏州大学 电子信息学院, 江苏 苏州 215006)

摘要: 研究一种 20 Hz~20 kHz 双频复合频率的信号频谱在工程技术领域中具有重要应用意义; 在对复合频率信号频谱理论分析的基础上, 采用了一种多采样率计算复合频率信号频谱的方法, 该方法在采用高采样率采集样本进行 FFT 变换频谱估计的基础上, 利用降采样率的方法再进行一次 FFT 变换频谱分析, 然后结合频谱混叠时信号的频域特征利用预估计的频谱信息计算出高分辨率的频谱信息; 该方法计算量适中, 可以满足实时性要求; 利用 TI 公司的 TMS320F28234 DSP 作为处理器构建了一个复合频率信号频率计, 可以采集输入的复合频率信号并进行多采样率的频谱分析, 经测试该频率计可以实时发送复合频率信号的频谱信息到上位机, 频率分辨率达到 2 Hz。

关键词: 多采样率; 频率计; 降采样 FFT 算法

Composite Frequency Signal Cymometer Based on Multi Sampling Rate

Cao Honglong, Hu Jianling, Shao Lei, Cai Wenfeng

(School of electronics and information engineering, Soochow University, Suzhou 215006, China)

Abstract: Signal spectrum analysis was widely applied in the field of engineering technology, and it is very important to analyze the frequency spectrum of composite frequency signal. A new method of spectrum analysis using multi sampling rate was presented, which had high frequency resolution and low computing complexity. The spectrum of 20 Hz~20 kHz composite frequency signal was estimated by FFT algorithm using high sampling rate, and refined by down sampling the signal and FFT algorithm. A composite frequency signal cymometer based on TMS320F28234 was designed to sample the composite frequency signal which spectrum was analyzed by multi-sample-rate method, and the results were send to PC in real time which frequency resolution is 2Hz.

Key words: multi sampling rate; cymometer; desample FFT algorithm

0 引言

随着数字技术发展, 频谱分析技术在工程技术领域被广泛应用。其主要运用傅里叶变换将时间域信号变换成频率域信号, 对信号的频域特征进行理论分析。在嵌入式系统应用中主要采用快速傅立叶变换 (FFT) 算法和 DSP 芯片实现, 为各种频域问题提供了一种统一、经济、集成的解决方法^[1]。

在 20 Hz~20 kHz 频率范围内的双频复合频率信号频谱分析应用中, 由于双频信号频率跨度范围很大 (接近 20 kHz), 根据 FFT 算法特性, 该复合信号频谱在检测实时性和精度方面存在矛盾, 解决该问题的一般方法是采用频率量程分档的方式^[2-3], 即通过设定档位降低每次检测的频率范围, 根据档位选择适合的采样频率和 FFT 点数进行频谱分析。该方法需要用户通过多次切换量程才能得到准确的分析结果, 操作复杂, 实时性低。本文提出一种基于 DSP 的多采样率频谱分析方法, 可以实时进行复合信号的频谱分析, 并得到较高的频率分辨率。

1 多采样率的频谱分析原理

1.1 多采样率的频谱分析基本原理

设采样频率为 f_s , 对于时域信号 $x(t) = \sin(2\pi f_0 t)$, 其频谱如图 1 所示。

将该时域信号 $x(t)$ 数字化后, 其对应的数字信号数学表达式如式 (1) 所示, 对应的数字频谱如图 2 所示^[4-5]。

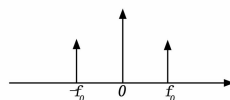


图 1 $x(t)$ 频谱

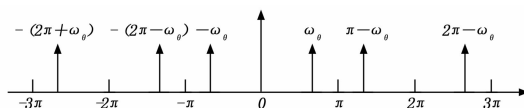


图 2 $x(n)$ 数字频谱

$$x(n) = \sin(2\pi n(f_0/f_s)) = \sin\omega_0 n \quad (1)$$

由图 2 可知, $x(t)$ 经 f_s 数字化后生成 $x(n)$ 的数字频谱, 以 π 为频带宽度。从 0 开始将其数字频谱进行划分, 用 k 表示划分的频带区域, 可以划分为以下 3 种情况。

(1) 基带信号频谱, 频率计算公式见式 (2)。

(2) 奇数带频谱, 即 k 为奇数时对应的频谱, 频率计算公式见式 (3)。

(3) 偶数带频谱, 即 k 为偶数时对应的频谱, 频率计算公式见式 (4)。

$$f_0 = \omega_0(f_s/2\pi) \quad (2)$$

$$f_0 = (k\pi + \pi - \omega_0)(f_s/2\pi) \quad k = 1, 3, 5, 7, 9, \dots \quad (3)$$

$$f_0 = (k\pi + \omega_0)(f_s/2\pi) \quad k = 2, 4, 6, 8, 10, \dots \quad (4)$$

根据式 (2) ~ (4) 可知, 在 FFT 点数 N 不变的情况下, 可以采用降采样率的方法提高频率分辨率。其思路是首先选择高采样率 f_1 , 对双频复合信号进行采样, 并对其数字信号进行 N 点 FFT 变化, 由频率分辨率 f_1/N 可知其频率分辨率较低, 但可以初步确定其频率范围。然后将采样率降为 f_2 , 在

收稿日期: 2013-09-21; 修回日期: 2014-01-10。

基金项目: 苏州大学 2013 年高等教育教学改革研究课题 (5731502513)。

作者简介: 曹洪龙 (1976-), 男, 黑龙江双城人, 讲师, 硕士, 主要从事信号与信息处理方向的研究。

N 不变的情况下进行 FFT 变换, 将得到较高的频率分辨率, 并可以根据高采样率的先验知识利用公式 2~4 计算出信号的高精度频率, 其频率分辨率提高 f_1/f_2 倍。

1.2 双频复合信号的多采样率频谱分析方法

假设双频信号数字化表示为 $x(n) = \sin\omega_0 n + \sin\omega_1 n$, 采用 1.1 节所述多采样率频谱分析方法首先需要选定高采样频率 f_1 和 低采样频率 f_2 。在本系统中, 由于信号频率范围在 20~20 kHz 范围内, 选择 $f_1=50$ kHz 作为高采样频率, 双频信号频率位于其基带频谱内; 然后选择 $f_2=2$ kHz 进行降采样, 信号频率位于 $k=0, 1, 2, \dots, 25$, 带宽为 1 kHz 的频带内。可以在高采样率下先计算出两个信号频率对应的低采样率时频带号 k , 然后再根据式 (2)~(3) 计算出信号的实际频率, 其频率分辨率为 f_2/N , 提高频率分辨率 25 倍。双频复合信号的多采样率频谱分析具体采用下面的步骤进行分析。

步骤 1: 以 50 kHz 为采样频率采集 1024 点样本, 然后对 1024 个样本进行 FFT 计算, 确定频率 ω_0 和 ω_1 , 频率分辨率为 50 kHz/1024 \approx 50 Hz, 可以用来确定其在降采样率 $f_2=2$ kHz 下的频带号 k , 存在以下两种情况。

(1) $|\omega_0 - \omega_1| < \pi/25$, 即 k 值相同, 两个信号频率在同一块里;

(2) $|\omega_0 - \omega_1| > \pi/25$, 即 k 值不同 (记作 k_1 和 k_2), 两个信号的频率在不同的块里。

步骤 2: 在采样率 50 kHz 不变的情况下, 每 25 个样本抽取 1 个样本进行降采样, 即采样频率 $f_2=2$ kHz, 抽取 1 024 个点, 采用 FFT 变换进行频谱分析, 得到两个基带频率 ω_0^1 和 ω_1^1 。此时频率分辨率为 2 kHz/1 024 \approx 2 Hz。如需提高频率分辨率, 可以抽取更多的点数, 但将增加时间和空间的复杂度。

(1) 当 $|\omega_0 - \omega_1| < \pi/25$ 时, 根据 k 值和 ω_0^1 和 ω_1^1 可以直接用式 (2)~(4) 计算出两个信号的频率 ω_0^* 和 ω_1^* ;

(2) $|\omega_0 - \omega_1| > \pi/25$, 根据 k_1, k_2 和 ω_0^1, ω_1^1 计算出 $\omega_0^{k_1}, \omega_0^{k_2}, \omega_1^{k_1}, \omega_1^{k_2}$, 其中存在两个真值为 ω_0^*, ω_1^* 和两个伪值, 可以采用能量判别的方法将 $\omega_0^{k_1}, \omega_1^{k_1}, \omega_0^{k_2}, \omega_1^{k_2}$ 分为两组, 一组为高能量组, 一组为低能量组。然后根据 ω_0, ω_1 的能量信息, 将高能量组两个频率与 ω_0, ω_1 中高能量的频率做差比较, 使其差值绝对值小的频率即为真值, 另一个为伪值舍掉。同理, 将低能量组中两个频率与 ω_0, ω_1 中低能量的频率做差比较, 取使差值绝对值小的作为真值, 从而确定两个信号的频率 ω_0^* 和 ω_1^* 。

2 复合频率信号频率计设计

2.1 硬件设计方案

根据复合频率信号频率计参数需求, 采用图 3 所示的硬件原理图进行复合频率计的研发设计。该频率计主要由处理器模块、串口通信模块、键盘人机交互模块、信号采集模块和电源供电模块构成。其中处理器选用德州仪器公司的 TMS320F28234 DSP, 该 DSP 具有 32 位 C28x™ 内核, 拥有 300MFLOPS 的处理速度, 并自带 12 位 AD 转换器, 可以直接采集输入的复合频率信号。同时 TMS320F28234 DSP 自带 SCI 串口、定时器及 GPIO 等片上外设模块。本系统中为了精确 AD 的采样频率, 采用定时器中断的方法来读取 AD 的采样值。采集的复合频率信号利用 Ping_Pong 缓冲区进行存储, 先利用 50 kHz 采样 1024 点进行 FFT 变换, 确定两个频率的 k 值, 然后再降采样率为 2 kHz 采样 1024 点进行 FFT 变换, 确定复合频率信号的两个频率值, 通过 SCI 串口发送给计算机中的频谱分析软件进行显示。用户可以通过键盘输入进行人机交互, 控制该频率计是否进行复合频率信号的频谱分析。信号采

集模块前端需加入 RC 电路构成的抗混叠滤波器, 保证在高采样率下满足采样定理。

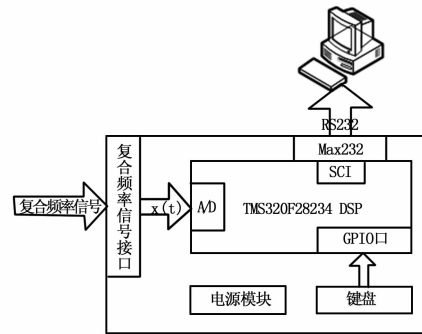


图 3 硬件系统框图

2.2 软件设计方案

基于多采样率的复合频率信号频率计软件设计主要包括 DSP 程序设计和上位机应用程序设计两部分。其中 DSP 程序采用图 4 所示的流程图进行设计, 上位机程序采用图 5 所示的流程图进行设计。

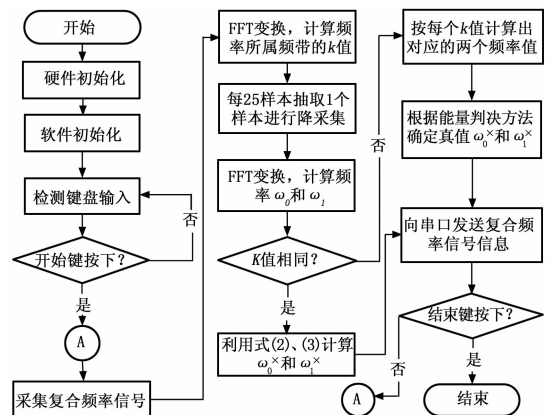


图 4 DSP 程序流程图

如图 4 系统上电后首先进行硬件和软件初始化, 然后等待用户通过键盘输入。如果开始键被按下, 则该频率计开始采集复合频率信号, 采集 1024 点后进行 FFT 变换, 确定两个频率对应的 k 值, 同时每 25 个样本抽取 1 个样本进行降采样, 采用低采样率采集 1024 点进行 FFT 变换, 计算出在低采样率下的基带频率 ω_0, ω_1 , 然后根据 1.2 中 k 值是否相同的原则计算并确定两个信号的频率 ω_0^* 和 ω_1^* , 并通过串口向上位机发送频率 ω_0^* 和 ω_1^* 的相关信息。当结束键被按下时, 系统结束复合频率信号的采集和频谱分析, 等待用户其它的键盘命令输入。

如图 5 所示, 上位机程序运行后首先进行系统初始化, 然后等待串口数据。当接收到系统有效的串口数据后, 上位机软件根据接收的复合频率信号的频率和幅度信息更新界面显示, 实时给出频率计测量的结果。

3 试验结果与分析

试验采用两个矢量信号发生器发生两个正弦频率信号, 并叠加成一个复合频率信号输入到复合频率计。复合频率计实时检测输入复合频率信号的频谱信息, 结果通过串口传送给计算机中运行的上位机程序进行频率信息的显示。当手动调节信号发生器发生的正弦信号时, 上位机界面上实时显示调节后的信号频谱信息。表 1 中显示了实测的部分结果, 表明采用多采样率方法后频率在 20 Hz~20 kHz 的频率范围内该频率计测量精

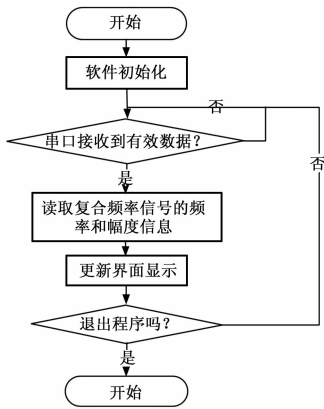


图 5 上位机程序流程图

度可以达到 2 Hz，可辨识的两个频率差理论上要求 2 Hz 以上（与实测相符合）。

4 结论

对于 20 Hz~20 kHz 的频带范围内的双频正弦信号叠加而成的复合频率信号进行频谱分析，采用多采样率频谱分析方法可以实时进行高精度的频谱分析。具体方式是先用高采样率采集样本进行 FFT 频谱的预估计，然后降采样率抽取采集的复合频率信号样本再进行 FFT 频谱分析，此时信号频谱发生混叠，可以利用高采样率的预估计频率计算其在混叠频谱中频带位置 k 值，然后利用式 (2) ~ (4) 计算出其真值，该值具有较高的频率分辨率。同时，该算法在 TI 公式的 TMS320F28234 DSP 处理器构建的复合频率信号频率计上实现，经测试达到

（上接第 1995 页）

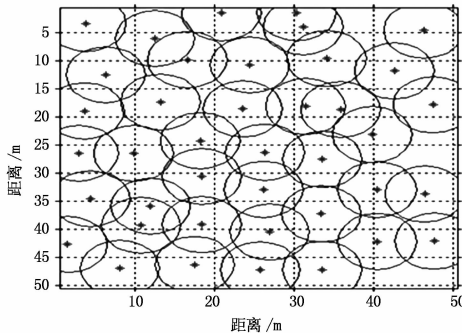


图 4 GSFLA 算法优化后节点分布图

5 结束语

GSFLA 算法不仅具有良好的全局搜索能力和较快的收敛速度，而且还具有一定实际应用价值。在 6 个经典测试函数的测试结果中，GSFLA 算法在 5 个函数上测试结果优于其他算法，并且测试结果都有大幅度的提高，另一个测试函数结果也仅比其中一种算法略差。在无线传感器网络覆盖优化的应用中，GSFLA 算法比其他两种算法得到了更大覆盖率，使无线传感器网络节点的分布更加均匀。

参考文献:

[1] 莫桂江. 蚁群一遗传算法的无线传感器网络路径优化 [J]. 微电子学与计算机, 2011, 28 (9): 139-142.

[2] 王 焱, 孙雁鸣, 佟维妍. 基于遗传算法的露天矿边坡检测传感网

表 1 复合频率信号频率计应用测试结果表

| 信号 (Hz) | | 测量值 (Hz) | | 误差 | | | |
|---------|--------|----------|--------|-------|------|-------|------|
| 信号 f1 | 信号 f2 | 信号 f1 | 信号 f2 | 信号 f1 | | 信号 f2 | |
| | | | | Hz | % | Hz | % |
| 114 | 126 | 113 | 125 | 1 | 0.87 | 1 | 0.79 |
| 466 | 277 | 466 | 277 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 906 | 717 | 906 | 716 | 0 | 0 | 1 | 0.14 |
| 1 896 | 1 360 | 1 896 | 1 361 | 0 | 0 | 1 | 0.07 |
| 2 717 | 2 562 | 2 718 | 2 562 | 1 | 0.04 | 0 | 0 |
| 6 352 | 5 471 | 6 353 | 5 472 | 1 | 0.02 | 1 | 0.02 |
| 10 204 | 9 527 | 10 207 | 9 529 | 3 | 0.03 | 2 | 0.02 |
| 10 862 | 9 023 | 10 865 | 9 025 | 3 | 0.03 | 2 | 0.02 |
| 14 142 | 13 879 | 14 146 | 13 882 | 4 | 0.03 | 3 | 0.02 |
| 20 000 | 21 | 20 000 | 21 | 0 | 0 | 0 | 0 |

理论分析的频率分辨率而且实时性满足要求。

参考文献:

[1] 董翠英. 基于 DSP 的全相位 FFT 频率计设计 [J]. 制造业自动化, 2012, 34 (7): 138-140.

[2] 谭进怀. 智能化语音频率计的研制 [J]. 计算机测量与控制, 2004, 12 (12): 1240-1243.

[3] 凌振宝, 叶剑峰, 孙正光. 多功能数字频率计的设计与研究 [J]. 吉林大学学报 (信息科学版), 2011, 29 (4): 376-382.

[4] 郑君里, 应启珩, 杨为理. 信号与系统 (下册) (第二版) [M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.

[5] 俞一彪, 孙 兵. 数字信号处理—理论与应用 (第二版) [M]. 南京: 东南大学出版社, 2011.

[6] 徐 琴, 王 旭, 孙文远. 虚拟力导向的无线传感器网络覆盖策略 [J]. 计算机工程与设计, 2012, 33 (3): 890-894.

[7] Wang X, Wang S, Ma J. Dynamic deployment optimization in wireless sensor networks [J]. Lecture Notes in Control and information Sciences, 2006, 344: 182-187.

[8] 王 巍, 彭 力. 基于改进的粒子群算法的移动传感器网络自组织 [J]. 计算机工程与设计, 2009, 30 (3): 654-659.

[9] Li J, Li K, Zhu W. Improving sensing coverage of wireless sensor networks by employing mobile robots [A]. International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), [C]. 2007, 899-903.

[10] 屈 巍, 等. 基于遗传算法的无线传感器网络覆盖控制优化策略 [J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(11): 2476-2479.

[11] Eusuff M M, Lansey K E. Optimization of Water Distribution Network Design Using Shuffled Frog Leaping Algorithm [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2003, 129 (3): 210-225.

[12] 赵鹏军, 刘三阳. 求解复杂函数优化问题的混合蛙跳算法 [J]. 计算机应用研究, 2009, 26 (7): 2435-2437.

[13] 刘悦婷. 带有选择和自适应变异机制的混合蛙跳算法 [J]. 计算机工程, 2012, 38 (23): 206-210, 218.

[14] Elbeltagi E, Hegazy T, Grierson D. Comparison Among Five Evolutionary-based Optimization Algorithms [J]. Advanced Engineering Informatics, 2005, 19 (1): 43-53.

[15] 韩春延. 基于距离的无线传感器网络覆盖洞修复方法 [J]. 传感器与微系统, 2013, 32 (4): 91-94.

[16] 叶 苗, 王宇平. 基于方差概率模型和进化计算的 WSN 定位算法 [J]. 软件学报, 2013, 24 (4): 859-872.