

## 基于 DSP 的悬浮转子微陀螺数字幅度解调\*

周海军, 黄晓刚, 张卫平, 陈文元

(上海交通大学 微纳科学技术研究院 薄膜与微细加工教育部重点实验室  
微米/纳米加工国防实验室, 上海 200030)

**摘 要:** 在悬浮转子微陀螺中输出的角度检测信号为一经过幅度调制的调幅波形, 为了使用数字信号处理器(DSP)读取调制波形中的低频有用信号, 需要开发一种数字解调系统。介绍了一种能应用于悬浮转子微陀螺信号检测的基于 DSP 的数字滤波自相关算法及其实现, 使用 D/A 和异步串行口将解调所得信号输出。使用经低频调制的 20 kHz 载波信号进行了实验。实验结果表明: 该系统可响应的低频角度变化为 25 Hz, 能够满足悬浮转子陀螺信号检测和后续控制的要求。

**关键词:** 数字幅度解调; 数字信号处理器; 微陀螺

**中图分类号:** V241.5      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-9787(2007)11-0036-03

## Digital amplitude demodulation for micro gyroscope with levitated rotor based on DSP\*

ZHOU Hai-jun, HUANG Xiao-gang, ZHANG Wei-ping, CHEN Wen-yuan

(Key Laboratory of Thin Film and Micro Fabrication Technology, Key Laboratory of State Defense Micro-Nano Fabrication, Research Institute of Micro-Nano Technology, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

**Abstract:** The angle variation signal for the micro gyroscope with levitated rotor, which is an amplitude modulated waveform, comprises carrier and angle variation signal. A digital modulation system is needed to demodulate the low-frequency signal in the modulated waveform using digital signal processor (DSP). A digital filter autocorrelation algorithm based on DSP, which can detect the output signal of the micro gyroscope with levitated rotor, is presented. It also shows how to achieve the algorithm. The demodulated signal is outputted by digital-to-analog converter and the asynchronous serial interface. The system is tested by a 20 kHz carrier sine wave modulated by low-frequency sine wave signal. The result shows that the system can response to low-frequency angle change of 25 Hz. So it can meet the demand of detecting the signal and the following control of the micro gyroscope with levitated rotor.

**Key words:** digital amplitude demodulation; digital signal processor(DSP); micro gyroscope

### 0 引言

在目前正在开发的微陀螺中采用差分电容的结构<sup>[1,2]</sup>, 并使用高频载波信号将陀螺信号输出, 经过前置放大、带通滤波、同步解调和低通滤波<sup>[3]</sup>来实现对陀螺信号的解调输出。但是, 由于在模拟信号中使用同步解调时需要提供同频率的载波信号来对其进行相乘, 从而容易造成频率误差和相位误差<sup>[4]</sup>, 以及模拟放大器等器件的温度漂移和不稳定, 影响和限制了微陀螺信号检测精度的提高。随着数字信号处理技术的发展和 DSP 芯片性能的提高, 可以使用 DSP 芯片来实现微陀螺信号的检测。本文使用 SEED-DEC2812 开发模板来开发一种能用于对悬浮转子微

陀螺<sup>[5]</sup>进行信号检测的方法及其实现。

### 1 数字幅度解调系统原理与组成

#### 1.1 系统组成

该数字幅度解调系统主要是在 SEED-DEC2812 开发模板上进行开发的, 系统框图如图 1, 主要包括: 经陀螺信号调

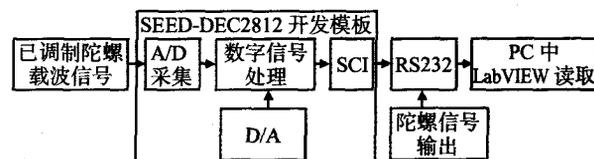


图 1 系统组成框图

Fig 1 Block diagram of system constitution

收稿日期: 2007-04-26

\* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60402003); 武器装备预研基金资助项目(9140A 09020706JW0314); 总装“十一·五”预研计划资助项目

制的载波信号、A/D 采集、DSP 中进行解调的数字信号处理以及将解调所得信号通过 D/A 通道输出和使用串口 SCI 经 RS232 串口输送给 PC 机。在 PC 机中使用 LabVIEW 来读取与显示数据。

### 1.2 自相关原理

在该实验中,调制后的信号表示为

$$y(t) = x(t) \sin \omega_c t, \quad (1)$$

式中  $x(t)$  为调制信号;  $\sin \omega_c t$  为载波信号;  $\omega_c$  为载波频率。做自相关运算后得到

$$y^2(t) = x^2(t) \sin^2 \omega_c t = x^2(t) (1 - \cos 2\omega_c t) / 2. \quad (2)$$

可以看到,式(2)的输出  $y^2(t)$  包括直流分量和高频分量,通过低通滤波后可以得到直流分量,即为有用信号的幅值。

在 DSP 中采用自相关算法来实现数字信号滤波处理,自相关算法的数学公式为

$$R_{xx}(0) = \frac{1}{N} y^2(0) + \frac{1}{N} y^2(1) + \dots + \frac{1}{N} y^2(N-1), \quad (3)$$

式中  $R_{xx}(0)$  为自相关运算所得结果;  $N$  为 DSP 中 A/D 转换时采样的点数;  $y(k)$  为采样点的数值 ( $k=0, 1, \dots, N-1$ )。

## 2 系统实现

### 2.1 A/D 数据采集

以 TI 的新一代 DSP 中的代表 TMS320F2812 作为信号处理器,它是硬件部分的核心,其主频为 150 MHz,内部自带 12 位 16 通道 A/D,转换时间为 80 ns,量程为 0~3 V。在实验中,使用 Agilent 33220A 型函数发生器提供载波信号和用于代表陀螺信号的低频调制信号,并使用 CCS2000 作为开发软件。该 A/D 具有多种触发方式:软件触发、EVA 和 EVB,在这里使用软件触发方式通过中断对数据进行连续采集 200 个点,由于 A/D 转换为 12 位的,而 DSP 中保存的数据为 16 位的,采样后所得数据自动左移 4 位,进行左对齐。采集后使用 CCS 软件中的实时图形显示功能显示的图形如图 2 所示。开发程序由 C 语言和汇编语言混合编写,并通过仿真器把编译好的程序烧入 DSP 芯片。

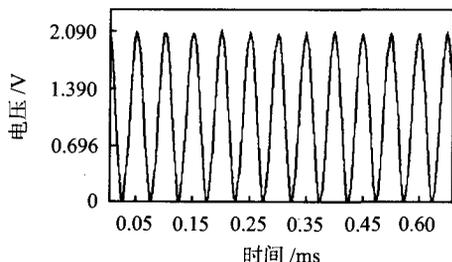


图 2 A/D 数据采集图

Fig 2 Sampling diagram of A/D signal data

从图中可以看出:对 20 kHz 的载波信号进行采集时能够获得很好的效果,在 200 个点中包括了约 12 周期的信号,每个周期采样了 16 个点左右。载波角频率  $\omega_c = 2\pi \times 20 \times 10^3 \text{ rad/s} = 4\pi \times 10^4 \text{ rad/s}$ , 采样频率  $\omega_s = 64\pi \times 10^4 \text{ rad/s}$ ,  $\omega_s > 2\omega_c$ , 满足采样定理的要求,采样误差可以忽略。

### 2.2 DSP 解调软件

具体实现过程:在中断采集程序中,采集做了直流偏置的已调制信号的 200 个点后,对这 200 个点的数值求取平均值,并将每个值减去平均值,使得信号去除直流偏置,这时信号恢复为一个正常的经过调制信号调制的载波信号。对每个数据进行自乘运算,亦即自相关运算,最后,再对自相关运算得到数据求平均,去除  $\cos 2\omega_c t$  部分,实现低通滤波。用这 200 个点中的相应的  $x^2(t)/2$  的平均值近似表示该时间段的调制信号。由于载波信号的频率远远高于调制信号,这里载波信号的频率是调制信号频率的 1000 倍,因此,这个近似值能够很好地表示调制信号的对应值,并且,载波信号与调制信号频率比越高,越能更好地解调出调制信号。数字解调的软件流程图如图 3 所示。

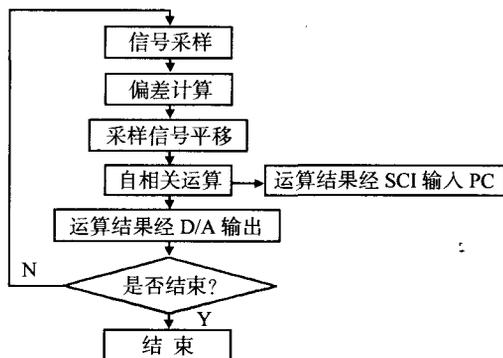


图 3 数字解调软件流程图

Fig 3 Flow chart of software for digital demodulation

### 2.3 D/A 输出

SEED-DEC2812 模板上使用了一片 DAC7724 做模拟量输出,DAC7724 为 4 通道,12 位分辨率,±10 V 信号量程,建立时间 10 μs,±15 V 供电的 D/A 转换器。它内部有 2 级锁存,先将数据锁存到缓冲器中,然后再锁存到输出寄存器,实现多通道同时输出。由于 DAC7724 采用 2 级缓冲,在程序中,先向第一级缓冲中写入一个无关数,而后,再将所要输出的数据输入到第 2 级缓冲中。因使用正弦载波信号,故使用第 0 通道 D/A 数据输出口 DA\_PORT0 输出调制信号。图 4 给出了经 D/A 通道输出的波形图。

### 2.4 串行口 SCI 输出

为了更好地掌控陀螺的运行状态,使用 SEED-DEC2812 模板上的串行接口 SCI 通过 RS232 来实现将数据输入的 PC 机中,并使用 LabVIEW 软件<sup>[6,7]</sup>显示数据。

利用 LabVIEW 中的串行通信函数 visa resource name, visa configure serial port, visa open, visa set I/O buffer size, visa read, visa close 来采集串口中输入的数据,由于 visa 中读取的数据为与每个字节数据相对应的 ASCII 码值,故使用 string to Byte array 函数来实现 ASCII 码值到实际数值的转换,再通过 index array 和 formula node 函数来实现字节数到可视化的十进制数的 chart 图形显示。在 DSP 中数据为 16 进制的,设置串口一帧传送 8 bits,由于 TMS320F2812 开发

板上的 SCI 为双缓冲的,故先向串行发送缓冲寄存器中输入数据的低 8 bits,而后将高 8 bits 同时写入缓冲寄存器。高 8 bits 的输入通过右移 8 位的位操作来实现。

2.5 实验结果

图 4 给出了调制幅度为 50%、调制频率为 25 Hz 与 60 Hz 的调制信号调制的载波信号经过自相关数字滤波处理后得到波形图,图的上部分为已调制的载波信号,图的下部分为解调后得到的调制信号。从图中可以看出:调制频

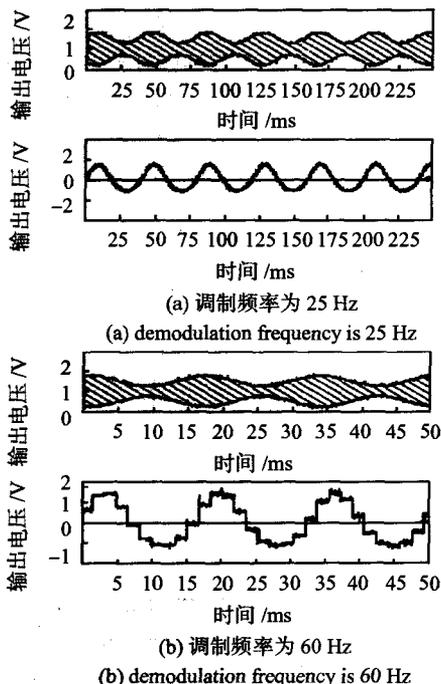


图 4 不同调制频率下解调后的 D/A 输出波形  
Fig 4 D/A output waveforms demodulated by different demodulation frequency

率为 25 Hz 时,解调所得信号良好,而当频率增加为 60 Hz 时,解调所得信号明显失真。

3 结论

在 25 Hz 的调制信号调制下,使用自相关算法可以很好地解调出调制信号,能够满足对于悬浮转子陀螺的信号检测的需要。采用了自相关的数字解调,相对模拟乘法器来讲,不需要另外产生同频率的解调信号,简化了解调的难度。而且,使用 DSP 进行数字解调能够很好地应用于嵌入式系统中。最后,通过串口将解调好的数据输入 PC 机,并使用 LabVIEW 来读取调制信号,能实时直观地掌握悬浮转子陀螺的运行情况,实现实时的陀螺运行情况监控。

参考文献:

[1] 黄晓刚,刘武,邵诗逸,等.磁悬浮转子微陀螺电容结构设计[J].传感器与微系统,2006,25(1):41-43.  
[2] Lotters J C, Olthius J C, Veltink P H, et al, A sensitive differential capacitance to voltage converter for sensor applications[J]. IEEE Trans Instrum Meas F, 1999(48):89-96.  
[3] 刘武,黄晓刚,邵诗逸,等.磁悬浮转子微陀螺的电容检测系统分析和实现[J].测控技术,2006,25(1):1-4.  
[4] 余新平.频率误差和相位误差在同步解调中的失真分析[J].江汉石油学院学报,2003,25(3):131-132.  
[5] 崔峰,苏宇峰,张卫平,等.静电悬浮转子微陀螺及其关键技术[J].中国惯性技术学报,2005,13(6):61-67.  
[6] 王克峰,吴森,曹永欣. NI FP-2010 与 DSP 串口通信的研究[J].计算机技术与发展,2006,16(7):227-229.  
[7] 逯颖.基于 LabVIEW 的串行通信接口设计与实现[J].现代电子技术,2006,232(17):123-124.

作者简介:

周海军(1984-),男,江西崇仁人,硕士研究生,从事 MEMS 信号检测与控制研究。

(上接第 35 页)

叶片式风力计测量实际流量作为网络输出的学习目标。

试验过程:取不同的 8 种初始温度,分别为 5, 15, 25, 40, 50, 60, 70, 80 °C, 设定 5 种不同的鼓风机转速。经试验取得 40 组数据,随机选取 32 组数据训练样本,另外 8 组数据作为测试样本。网络训练采用批处理方式,目标误差设为  $E=1 \times 10^{-6}$ ,经过多次迭代后,得到网络的权系数,从而建立测量系统的预测模型。其后,利用测试样本来检验学习好的网络的泛化能力,结果如图 4 所示。

从网络的输出结果可以看出:网络输出与现场实测数据之间的平均绝对误差为 2%,最大绝对误差不大于 10%,满足设计需求。

4 结论

本文介绍了热敏电阻式流量传感器的原理,并将人工神经网络软测量方法应用于流量传感器的在线测量。试验结果表明:最大误差在 10% 以内,具有较高的精度和测试效率的特点,并且,实现简单,成本较低,为此类设备的研制提供了一种新的方法和思路。

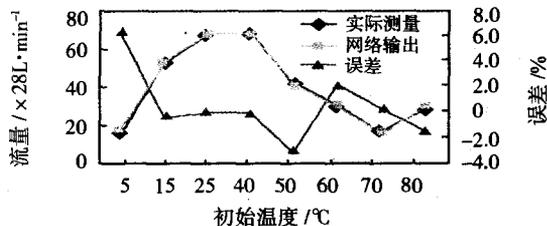


图 4 仿真结果(测试样本)  
Fig 4 Simulation results (testing swatch)

参考文献:

[1] 王兵团.平面曲线离散点集拐点的快速查找算法[J].北方交通大学学报,2001(12):85-87.  
[2] 孟立凡.传感器原理及技术[M].北京:兵器工业出版社,1997:128-130.  
[3] Hagan M T, Demuth B H. Neural network design[M]. Boston: PWS Publishing Company, 1996:12-24.

作者简介:

侯晓(1971-),男,上海人,工程师,硕士研究生,主要从事计算机测控技术等方面的研究。