

## Real Time Data Acquisition and Processing of the Revolution-Modulation North-Finder \*

BAI Yunchao<sup>1,2\*</sup>, JIANG Qingxian<sup>1,2</sup>, LIU Siwei<sup>1,2</sup>

(1. Xi'an Research Institute of Surveying and Mapping, Xi'an 710054, China; 2. China State Key Laboratory of Geo-Information Engineering, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** This paper designs a special system of data acquisition and processing based on FPGA&DSP. The north-seeking algorithm is separately executed in the core of DSP chip, and FPGA perform real time data acquisition, buffering and processing. Experiments and application show that the system works in real time and steadily with anticipating precision. The precision of north seeker attains 30" in 4 minutes.

**Key words:** north finder; data acquisition; rotation-modulation; DSP; FPGA

EEACC: 7230

doi:10.3969/j.issn.1004-1699.2013.07.011

## 基于 DSP 及 FPDA 的旋转调制式陀螺寻北仪的研制 \*

白云超<sup>1,2\*</sup>, 蒋庆仙<sup>1,2</sup>, 刘思伟<sup>1,2</sup>

(1. 西安测绘研究所, 西安 710054; 2. 地理信息工程国家重点实验室, 西安 710054)

**摘 要:** 设计了基于 DSP 处理器和 FPGA 为核心的连续旋转调制式陀螺寻北仪, FPGA 完成数据的采集、存储及逻辑控制, DSP 完成寻北解算。实际应用效果表明, 该系统具有数据采集实时性、可靠性高, 寻北解算速度快、精度高等优点, 采用该系统研制的寻北仪在 4 min 内寻北精度达到 30"。

**关键词:** 寻北仪; 数据采集; 旋转调制; DSP; FPGA

中图分类号: U666.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2013)07-0955-03

陀螺寻北仪是依靠测量地球自转角速度在其敏感轴上的分量实现寻北的一种仪器, 在导弹、火炮发射、舰船惯性导航、制导、车载定位定向系统等国防高科技领域得到了广泛的应用<sup>[1-2]</sup>。目前的寻北仪普遍采用二位置法、三位置法、四位置法等多位置寻北解算方法。这些方法的不足是寻北时间较长, 能达到的寻北精度不高。为了进一步提高寻北精度, 缩短寻北时间, 近年来兴起了动态连续旋转调制寻北法。其优点是通过连续转动使陀螺的常值漂移、随机漂移受到周期性调制, 通过积分得到消除或减弱, 因而可显著提高寻北精度<sup>[3-7]</sup>。

在连续旋转寻北方法中, 为了实现快速、高精度寻北, 在转台连续旋转的过程中, 要求数据采集处理单元具有较高的运行速度, 能实时采集、处理惯性测量单元的输出数据, 完成寻北解算。一般的单片机较难实现, 而单独采用 DSP, 又存在频繁中断数据处理程序的运行, 减弱了系统运算能力, 采集速度受限等不足。本文根据项目方案的具体实际要求, 设计了一种 DSP+FPGA 构成的低成本连续旋转寻北仪系统, 由 FPGA 控制 A/D 转换和数据存储, DSP 运行寻北

算法, 最大限度的提高系统的信号采集和处理能力, 具有速度快, 精度高, 稳定性好, 结构灵活, 外围电路简单, 易于移植与扩展, 通用性较强等优点<sup>[8-9]</sup>。

### 1 寻北原理及解算方法

设地理坐标系为东北天坐标系; 旋转台坐标系  $X$  轴指向光栅零位,  $Y$  轴指向光栅  $90^\circ$  方向,  $Z$  轴指向旋转轴; 测量坐标系  $X$  轴指向加速度计 1,  $Y$  方向指向加速度计 2,  $Z$  轴指向旋转轴; 惯性测量坐标系相对于台体坐标系只有绕  $Z$  轴的转角  $\alpha$ , 可由圆光栅测量得到; 当地地理纬度为  $L$ ; 寻北仪台体在地理坐标系下的俯仰角、横滚角、航向角分别为  $\theta$ 、 $\gamma$ 、 $\phi$ 。考虑陀螺漂移, 文献[10-11]给出了陀螺  $y$  轴感测的角速度的数学模型为

$$\omega_y = -K[(-\cos\gamma\sin\phi + \sin\gamma\sin\theta\cos\phi)\cos L - \sin\gamma\cos\theta\sin L]\Omega_e\sin\alpha + K(\cos\theta\cos\phi\cos L + \sin\theta\sin L)\Omega_e\cos\alpha + \varepsilon(t) \quad (1)$$

由式(1)可知陀螺输出与台体的姿态角、航向角、陀螺敏感轴相对台体的旋转角及地理纬度有关, 其中  $K$  为陀螺的标度因数,  $\varepsilon(t)$  为陀螺漂移, 姿态角可利

用加速度计测量得到<sup>[12]</sup>。其原理为设两只加速度计测量值分别为 $(g_x^m, g_y^m)$ , 变换到台体坐标系  $b$  后, 坐标系  $b$  中  $x$  轴、 $y$  轴上的分量为

$$\begin{cases} g_x^b = g_x^m \cos\alpha - g_y^m \sin\alpha \\ g_y^b = g_x^m \sin\alpha + g_y^m \cos\alpha \end{cases} \quad (2)$$

则可以得到姿态角 $(\theta, \gamma)$

$$\begin{cases} \theta = \sin^{-1}(g_y^b/g) \\ \gamma = \sin^{-1}(-g_x^b/g/\cos\theta) \end{cases} \quad (3)$$

为了获得较高的寻北精度和较快的寻北速度, 可利用各种最优滤波算法进行解算。这里介绍一种实时递推最小二乘求解方法<sup>[13]</sup>。具体过程如下。

因为式(1)是关于航向角和纬度的非线性方程, 需先将非线性方程在初值点泰勒展开, 得到式(4), 即

$$\omega_g^m - f(\phi_0, L_0) = \left. \frac{\partial f}{\partial \phi} \right|_{(\phi_0, L_0)} (\phi - \phi_0) + \left. \frac{\partial f}{\partial L} \right|_{(\phi_0, L_0)} (L - L_0) + \varepsilon \quad (4)$$

因此可令

$$\begin{aligned} Z_k &= \omega_g^m(k) - f(\phi_0, L_0, \alpha_k) \\ H_k &= \begin{bmatrix} \left. \frac{\partial f}{\partial \phi} \right|_{(\phi_0, L_0, \alpha_k)} & \left. \frac{\partial f}{\partial L} \right|_{(\phi_0, L_0, \alpha_k)} & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5)$$

$$X_k = [\phi - \phi_0 \quad L - L_0 \quad \varepsilon]^T = [\Delta\phi \quad \Delta L \quad \varepsilon]^T$$

可得近似的线性方程为

$$Z_k = H_k X_{k-1} + N_k \quad (6)$$

采用递推最小二乘法可以求得 $[\Delta\phi \quad \Delta L \quad \varepsilon]^T$ , 然后有 $[\phi \quad L \quad \varepsilon]^T = [\phi_0 \quad L_0 \quad 0]^T + [\Delta\phi \quad \Delta L \quad \varepsilon]^T$  (7)

可见采用该寻北方案, 在转台以稳定的角速率旋转的过程中, 需要系统不断间断地同时采集陀螺仪敏感轴( $y$ )和  $x, y$  两个轴上两个加速度计的输出信号, 运用最优滤波算法, 实时解算出真北方位, 这就对数据采集与处理系统的性能提出了较高的要求。

## 2 数据采集与处理电路的设计

采用 DSP 微处理 (TMS320C6713) 和 FPGA (EP2C8T144) 芯片组成核心控制电路, 完成对陀螺仪、加速度计输出信号的采样、数据处理等功能, 如图 1 所示。

研制的寻北仪采用动调陀螺仪敏感地球自转角速率的水平分量, 加速度计敏感地球重力分量, 其输出为模拟的电压或电流信号, 首先需要对信号进行调理和转换。为了保证对陀螺仪和两个加速度计输出信号的转换、采集的精度和速度, 采用了 16 bit 高速 A/D 转换电路 ADS8319IB, 其转换速率为 500 k/s, INL 最大  $\pm 1$  bit, 采样率 100 K 时 SNR 达到 93 dB, 功耗小于

18 mW, 数据输出为 SPI 串行接口, 外围电路简单。EP2C8T144 实现对 A/D 转换芯片的控制和数据的采集。EP2C8T144 具有 8 K 个逻辑单元, 165.8 KB 的嵌入式 RAM, 2 个系统时钟管理锁相环, T144 封装的芯片最大可达 86 个 IO 接口<sup>[14]</sup>。本系统利用 FPGA 实现的功能主要包括三路 SPI 接口 A/D 数据采集、FIFO、码盘脉冲信号的倍频、转台位置的记录以及计算机指令的解译控制等。利用 EP2C8T144 在本系统中设计两个软 FIFO, 作为 DSP 接收数据的缓存, 这样可以减少外部对 DSP 的中断次数, 提高 DSP 处理的效率。A/D、FIFO 等设备的时钟由 DSP 控制 FPGA 来产生, DSP 通过 EMIF 接口把采样速率通知 FPGA, FPGA 则根据这个信息用锁相环将晶振的时钟进行分频, 然后提供给 A/D、FIFO。A/D、FIFO 由同一时钟控制, 这种同步关系保证了采集的同步性和通信的稳定性。

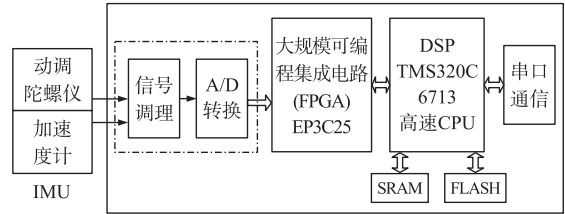


图 1 数据采集系统的组成示意图

在 DSP 芯片选型时首先考虑要满足系统对运算速度、精度的要求, 同时又要达到系统体积小、功耗低和成本便宜的目的。本方案选用了 C6000 系列中一款浮点型处理器 TMS320C6713 作为系统的微处理器芯片, 其适合于系统运算处理器的关键性能特点是: 最高可达 300 MHz 的时钟频率; 存储资源足够大; 丰富的片上外设资源<sup>[15]</sup>。

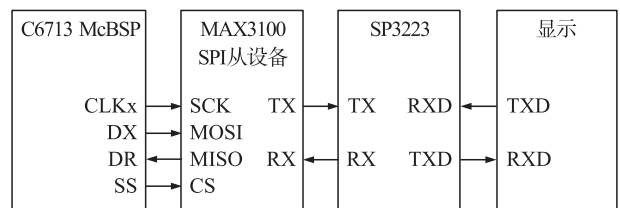


图 2 DSP 异步数据传输原理图

EMIF 接口是 6000 系列 DSP 以并行总线方式访问外部设备的唯一途径, 本系统中 SDRAM, Flash ROM、FIFO 都是通过 EMIF 与 DSP 进行通信的。C6713 的地址空间被分为四个部分: CE0、CE1、CE2、CE3。本系统将 CE0 作为 SDRAM 的寻址空间, CE1 作为 Flash ROM 的寻址空间, CE2 作为 FIFO 与 DSP 之间数据信息的寻址空间, CE3 作为 DSP 与 FPGA 间控制信息的寻址空间。

由于 TMS320C6713 本身没有异步串口, 不能与

PC 直接进行通讯。这里采用 MAX3100 实现 TMS320C6713 与 PC 机或其他设备之间的异步数据传输,其原理如图 2 所示。

### 3 样机测试结果

采用零偏稳定性为  $0.03^\circ/\text{h}$  的动调陀螺仪,分辨率为  $5 \times 10^{-6} g_n$  的加速度计设计了自动调陀螺寻北仪的样机,转台的转速设定为  $5 \text{ rot}/\text{min}$ ,利用所设计的数据采集与处理系统,采集了连续旋转条件下动调陀螺仪实际输出数据,如图 3 所示。陀螺输出数据为较光滑的正弦曲线,无断点、突变部分,证明采用该系统采集数据,无明显的漏采、采空、错采现象,采集效果良好,达到了设计的目的。

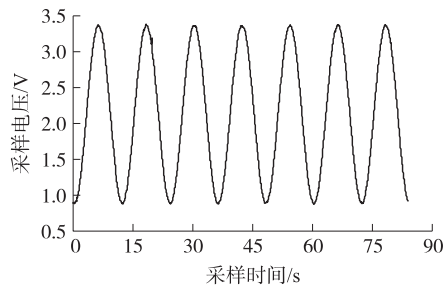


图3 采集的陀螺仪输出信号

在 Code Composer (c6000) 集成开发环境中用 C 和汇编混合编程开发系统软件编写了递推最小二乘寻北算法,并将其移植到 TMS320C6713 系统中运行,来实时解算真北方位角。设计的系统在寻北仪转台旋转一整圈(大约 12 s)时,输出一个真北方位角的解算结果,表 1 为六次重复启动陀螺仪后,实际纪录的系统 4 min 时的寻北结果。

表1 寻北结果(°)

寻北次数	寻北结果(1)	寻北结果(2)
1	131°54'20"	162°36'20"
2	131°54'56"	162°35'36"
3	131°55'08"	162°36'12"
4	131°54'48"	162°36'46"
5	131°55'24"	162°35'49"
6	131°55'10"	162°36'03"
方位角	131°54'57"	162°36'06"
中误差	22.2"	23.9"



白云超(1975-),男,硕士,四川省汉源县人,工程师,主要从事惯性定向技术研究,byc2253@sina.com。

测试结果表明样机达到了寻北时间 4 min,寻北精度优于  $30''$  ( $1\delta$ ) 的精度水平,表明采用 TMS320C6713 构成计算机系统计算速度快,解算结果精度高。

### 4 结论

本文研制的连续旋转调制寻北仪,采用了一种 DSP+FPGA 构成的低成本数据采集与处理系统,具有采集速度快、可靠性高,寻北精度高,成本低等优点,可快速、可靠地采集陀螺仪和加速度计的输出数据,实时、高精度地解算出真北方位,寻北精度优于  $30''$ ,具有工程实际应用价值。

#### 参考文献:

- [1] 王世光,王振军. 陆用定位定向与寻北技术应用现状[J]. 战术导弹控制技术,2010,27(2):14-17.
- [2] 李刚,黄勇,周静,等. 光纤陀螺寻北仪四位置转位机构设计及其控制[J]. 压电与声光,2010,32(4):558-560,564.
- [3] Sung-Jin Kim, Sang-Sik Lee, Yong-Soo Kwon. Dynamic North-Finding Scheme Based on a Fiber Optic Gyroscope[J]. Proceeding of SPIE,1997,3087:126-136.
- [4] Insoo S Kim, Yohee Kim. Dynamic Scheme North Finder Using a Fiber Optic Gyroscope[J]. Proceeding of SPIE,1996,2895:228-236.
- [5] Rogers R M. IMU in Motion Alignment without Benefit of Attitude Initialization[J]. Journal of Institute of Navigation,1997,44(3):301-311.
- [6] 张思将,秦石乔,王省书. 连续旋转式激光陀螺寻北仪研究[J]. 航空兵器,2006,(1):12-15.
- [7] 刘东波,刘建业,赖际舟. 基于光纤陀螺的单周快速动态寻北算法研究[J]. 传感器与微系统,2007,26(11):61-64.
- [8] 任磊,宋凝芳,董全林. 光纤陀螺寻北仪数据采集单元的设计与实现[J]. 电子测量技术,2008,31(5):120-122,147.
- [9] 张凌峰,王化祥. 基于 FPGA 和 DSP 的电阻层析成像数据采集系统[J]. 传感技术学报,2011,24(7):1011-1016.
- [10] 徐海刚,郭宗本. 旋转式光纤陀螺寻北仪研究[J]. 压电与声光,2010,32(1):38-41.
- [11] 蒋庆仙,白云超,马小辉,等. 基于抗差估计的快速动态寻北算法[J]. 传感技术学报,2013,26(1):43-48.
- [12] 白云超,李学琴,马小辉,等. 采用旋转调制技术的高精度陀螺寻北方案[J]. 惯性技术学报,2010,18(4):421-421.
- [13] 白云超. 实时递推最小二乘算法在连续旋转寻北中的应用[C]//惯性技术发展动态论文集,2012,8:190-194.
- [14] Cyclone II device handbook. Altera. 2005:17-19.
- [15] TMS320C6113 data sheet. Texas Instrument,2005:1-18.