

全数字处理的低成本光纤陀螺系统研究

邱宝良, 李安琪, 肖文, 蒋小刚

(北京航空航天大学仪器与光电工程学院, 北京 100083)

摘要: 提出了一种基于 DSP 的全数字处理方案代替传统的模拟方案。利用多次谐波分析、高阶 FIR 滤波器进行数字滤波等数据处理方法, 消除了由相位调制器 PZT 的温度不稳定性所引入的干扰, 并扩大了系统的动态范围, 提高了测量精度。

关键词: 光纤陀螺; 数字信号处理; 动态范围; 开环

中图分类号: U666.1

文献标识码: A

Low-cost FOG System of All-digital Signal Processing

QIU Bao-liang, LI An-qi, XIAO Wen, JIANG Xiao-gang

(School of Instrument Science & Opto-electronics Engineering, Beijing University of Astronautics and Aeronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: An all-digital signal processing method based on DSP is presented. Harmonic components analysis method and FIR filter is used to process the gyroscope's signal. It can eliminate the disturbances due to the temperature instability of PZT, and widen the dynamic range and improve measurement precise of the system.

Key words: FOG; digital signal processing; dynamic range; open-loop

0 引言

光纤陀螺作为一种全固态的角速度传感器件具有其自身独特的优点。1976 年, 美国 Utah 大学的 Vali 和 Shorthill R.W. 首次提出光纤环形干涉仪的模型, 它标志着第二代光学陀螺——光纤陀螺的诞生。经过近 30 年的发展, 光纤陀螺已经开发出从低精度到高精度不同系列的相关产品, 并在各个领域得到了广泛应用。目前从信号处理方案的不同可以将光纤陀螺划分为闭环方案和开环方案。

采用光路闭环的方案基本原理是在光路中引入针对调制信号的反馈, 使系统相位工作点始终保持在线性度较好的偏置位置附近, 由此可以解决大动态范围测量的问题, 但相应的结构较为复杂且成本较高。开环方案的光纤陀螺系统直接从探测器的电信号解算出光纤陀螺的 Sagnac 相移, 具有结构简单、成本较低等优点, 但存在测量动态范围有限的缺点。针对低成本、工程化的实用型中低精度光纤陀螺在广大军用和民用市场上的巨大前景, 应用开环方案并降低成本将是推广应用光纤陀螺的关键。

光纤陀螺的信号处理电路不同会使系统性能有较大的差异。传统的开环方案采用模拟的信号处理方式, 存在着电路固有零漂难以克服、线性化输出不理想的缺点。本文提出一种全数字开环信号处理方案, 极大地提高了系统的性能, 并且结构简单, 硬件要求低, 对中低精度光纤陀螺的工程化有重要的实践意义。

收稿日期: 2005-01-06

作者简介: 邱宝良 (1977—), 男, 北京航空航天大学研究生, 研究方向为微弱信号检测及其数字处理。

1 全数字开环处理方案原理

光纤陀螺的设计采用最小结构的开环方案，如图 1 所示。选用压电陶瓷 (PZT) 调制器，基于 PZT 相位调制器带宽的限制，采用正弦信号调制来实现光路的非互易相位偏置。为有效降低成本，探测器采用光电转换 (PIN) 电路代替了价格较为昂贵的 PINFET。探测器 PIN 的输出为 nA 级，说明 PIN 的输出信号是一个非常微弱的信号，再加上光路系统和电路系统本身包含不可避免的噪声和干扰 (如光源噪声、模数串扰等)，用常规方法不可能实现对其精确检测，必须运用微弱信号检测的方法。

光电转换电路的时域信号输出为：

$$I(t) = I_0 \{1 + \cos[\phi_s + \phi_e \sin(\omega_m t)]\} \quad (1)$$

ϕ_e 为 PZT 调制器的调制深度：

$$\phi_e = 2K_p v_m \sin(\omega_m \tau / 2) \quad (2)$$

式(1)中， I_0 是与检测电路有关的常量； ϕ_s 为

Sagnac 相移， $\phi_s = 2\pi LD\Omega/C\lambda$ ；设 Sagnac 系数 $K = 2\pi LD/C\lambda$ ，其中 L 为光纤长度， D 为光纤环直径， C 为光速， λ 为通过光纤的光波长， Ω 为光纤环轴向旋转角速度；通过获得 ϕ_s 的信息，可以得到 Ω 。式(2)中， K_p 是与 PZT 各参数有关的量， v_m 为 PZT 的驱动电压的幅度， ω_m 为 PZT 驱动电压的频率， τ 为激光在光纤环中的渡越时间。由于材料本身的性质， K_p 表现出温度不稳定性，这是陀螺信号输出的最主要误差源，因此在陀螺工作温度范围之内选择和稳定 ϕ_e 是本方案的一个重要研究内容。

式(1)的贝赛尔函数展开形式为：

$$I(t) = I_0 [1 + J_0(\phi_e) \cos \phi_s + 2 \sum_{i=1}^{\infty} J_{2i-1}(\phi_e) \sin \phi_s \sin((2i-1)\omega_m t) + 2 \sum_{i=1}^{\infty} J_{2i}(\phi_e) \cos \phi_s \cos((2i)\omega_m t) + \dots] \quad (3)$$

其中， $J_n(\phi_e)$ 为第一类 n 阶贝赛尔函数。

式(3)说明开环光纤陀螺在某一转动角速度下，其输出由一个直流量和无穷个多次谐波分量组成。

本方案通过检测各次谐波的幅值，并进行相关解算得到 Ω ，来实现对 PZT 的稳定性的控制。光路部分采用较为典型的设计。通过理论分析可知，如果陀螺检测的动态范围为 $10(^{\circ})/h$ 到 $100(^{\circ})/h$ ，那么一次谐波幅值的动态范围将达到 10^5 以上。对如此大动态范围的信号进行提取是本信号检测方案要解决的一个问题。

2 全数字信号处理的设计

信号处理电路系统如图 2 所示。在模拟电路的前放部分，采用多级放大的方法来实现光电转换信号的低噪声放大，将该信号放大至适合 A/D 转换器的量程。有两路放大输出，其中一路针对小转速时基频谐波分量过小而采用有源带通滤波放大。这种分档方法有效地解决了开环方案检测动态范围有限的问题。数字电路部分选用以 DSP 为核心器件的数字处理电路，该检测电路系统最大程度

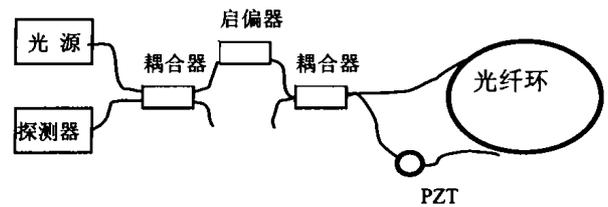


图 1 最小结构的开环 FOG

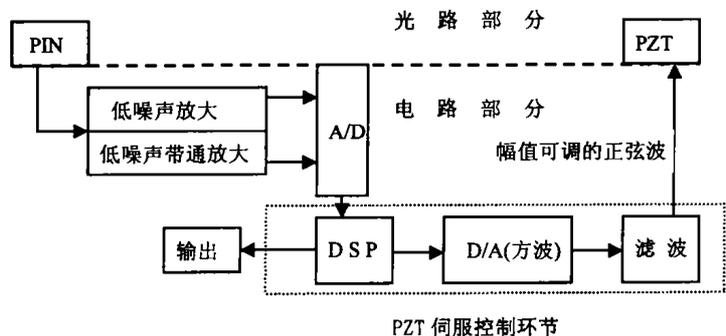


图 2 信号处理电路

地减少了元器件个数,相应减少了外围器件对信号检测所带来的影响,且在一定程度上降低了检测电路的成本。

DSP 信号处理软件部分采用 FIR 数字滤波器,共 128 阶,通带衰减小于 0.001 dB,阻带衰减达到 80 dB 以上。可借助 MATLAB 软件设计出所需要的滤波器,如图 3。FIR 滤波器可以严格地做到线性相位;同时由于调制信号可以由 DSP 来控制,因此可以做到使采样信号相位保持稳定。另外,所设计的 FIR 滤波器为非递归结构,在有限字长的运算条件下,不会出现极限振荡等不稳定现象。

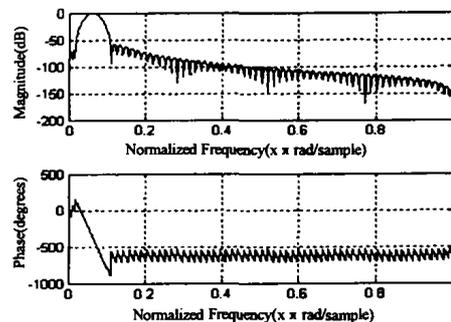


图3 FIR 数字滤波器的频幅特性

2.1 谐波幅值信号的提取

通过数字滤波器得到 1、2 和 4 次谐波的幅值。进行数据采样首先要满足奈奎斯特采样定律,也就是采样频率应该大于信号频率的 2 倍以上;对于采集正弦信号,则采样频率应当是信号频率的 4 倍以上。在本系统中除了要考虑采样的正确性以外,还要考虑其它一些要求,所以本方案采样频率设定为 4 次谐波频率的 8 倍。这样对于 4 次谐波信号,采样频率应当是调制频率的 32 倍频率以上。A/D 对两路放大信号同时采样并由 DSP 进行相关处理。

由式(3),经正弦调制的陀螺输出信号,其 1、2、4 次谐波及其幅值分别为: $S_1 = 2I_0 J_1(\phi_e) \sin \phi_s$, $S_2 = 2I_0 J_2(\phi_e) \cos \phi_s$, $S_4 = 2I_0 J_4(\phi_e) \cos \phi_s$,

根据 Bohm 方法,由 $\frac{S_1}{S_2} = \frac{J_1(\phi_e)}{J_2(\phi_e)} \tan \phi_s$ 可知, $\phi_s = \arctan\left(\frac{S_1}{S_2} \cdot \frac{J_2(\phi_e)}{J_1(\phi_e)}\right)$ 为解算 ϕ_s 的运算式。

该方案能在一定程度上抵消检测系统的检测误差和干扰,有利于提高测量精度。由于 S_1 的动态范围很大,很难在一路信号中对其进行滤波提取。 S_2 和 S_4 的动态范围不大,一路信号检测完全没有问题。A/D 对两路放大信号同时采样,通过软件滤波及相关手段获取 S_1 、 S_2 和 S_4 。

2.2 对 PZT 调制深度的监控

系统采用电路闭环的检测方案来稳定 PZT 的调制深度 ϕ_e 。由式(2),用调节 v_m 来实现稳定调制深度,以补偿 PZT 的温度误差。在系统运行时,通过检测 2 次和 4 次谐波信号来实现对调制深度的监控。

由 $W_1 = S_2/S_4 = J_2(\phi_e)/J_4(\phi_e)$ 可知, W_1 是一个仅与调制深度有关的量,可以将 W_1 作为 ϕ_e 的输入监控点,采用增量式数字 PID 调节器来实现对 PZT 稳定性的控制。

由 DSP 控制 D/A 发出的相位可控方波,其方波幅值由 PID 控制器来控制,经过带通滤波来获得调制正弦波 v_m ,这样就实现了对 PZT 调制深度 ϕ_e 稳定性的控制。这种方法突破了由 D/A 发出可控高电平,再结合开关产生方波的数字控制方法,一方面使得调制波的质量大为提高,并减少了干扰源,另一方面又可以使采样和调制波实现严格的相位调协。

本方案的一个很重要问题是对调制深度的选择。经理论分析,调制深度在 2.5 左右可以使 1、2、4 次谐波的幅值在陀螺动态范围内尽可能接近,也就是使随机误差对检测的影响最小,此外还降低了对软硬件的要求,有利于对陀螺信号的检测。

3 实验数据分析

用于实验研究的陀螺敏感光纤长度 $L=500$ m,光源为 SLD,工作波长为 $\lambda=1.3 \mu\text{m}$, Sagnac 系数 K 约为 0.3。由于基频幅值在输出信号中能量极低(尤其在输入转动角速度较低的情况下),并且 FIR 滤

波器自身也有局限性,实际滤波结果与实际幅值并不完全吻合的。但在各自允许的动态范围内对滤波结果进行数据处理后,两路均可以实现线性化输出(如图4),分别是大转速和小转速输入时检测系统的输出。在DSP内部采用软件分档的处理方案。对输出结果根据最小二乘拟合,采用分段线性化进行线性化修正,可以实现全量程的线性化数字量输出。实验证明这样可以取得很好的效果,如图5。

实验用光纤陀螺的动态范围为 $\pm 100(^{\circ})/s$,零偏稳定性达到 $10(^{\circ})/s$,标度因数非线性度小于 10^{-3} 的量级。

4 结论

结合分档方法的全数字处理方案有效地解决了开环方案动态范围局限性带来的难题,并克服了PZT温度敏感性给开环系统引入的测量误差。目前实验陀螺还存在零偏较大、零漂有待减小的问题,需进一步改善信号处理电路,如对低噪声放大电路、电路抗干扰等进行优化。对于数字信号的处理也在做进一步研究,解决好这些问题将进一步提高陀螺的性能。

参考文献:

- [1] Bohm K, Petermann K. Signal processing schemes for the fiber-optic gyroscope[A]. Fiber Optic Gyros, Proc. SPIE[C], 1986, Vol.719: 36-44.
- [2] 常胜利. 实用中低精度光纤陀螺的信号处理设计[J]. 激光杂志, 2002, (3).
- [3] 孙圣和. 光纤陀螺全数字信号处理技术研究[J]. 仪器仪表学报, 2000, (6).
- [4] 杨远洪. 开环FOG中PZT调制器的在线研究[J]. 北京航空航天大学学报, 1999, (6).

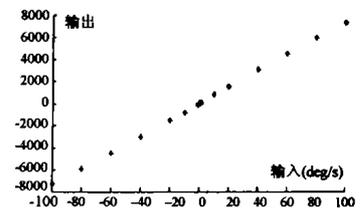
(上接第30页)

7 结论

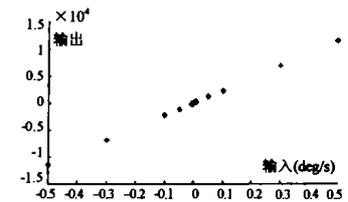
本文描述了一个用于惯测组合姿态估计的扩展卡尔曼滤波器。该滤波器利用加速度计和磁强计的数据有效补偿了陀螺漂移引起的姿态误差。需要指出的是该滤波器只适用于载体没有线加速度的情况。因此在IMU应用中,需要先根据加速度计的输出,判断载体的状态。如果载体是静止或者没有线加速度,则使用此滤波器计算姿态,否则直接使用陀螺输出数据计算姿态,而不使用此滤波器。

参考文献:

- [1] Rios J A, White E. Fusion filter algorithm enhancements for a MEMS GPS/IMU[A]. ION Meeting Proceedings[C], San Diego, California, January 2002.
- [2] Gebre-Egziabher D, Hayward R C, Powell J D. A low cost GPS/inertial attitude heading reference system[A]. Proceedings of PLANS '98[C], Rancho Mirage, CA, April 1998.
- [3] Foxlin E. Inertial head-tracker sensor fusion by a complementary separate-bias Kalman filter[A]. Proceedings of VRAIS '96, IEEE[C], 1996: 185-194.
- [4] Marins J L, Yun X, Bachmann E R, et al. An extended Kalman filter for quaternion-based orientation estimation using MARG sensors[A]. Proceedings of the 2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems[C], Maui, Hawaii, USA, Oct. 2001.
- [5] Vaganay J, Aldon M J, Fourinier A. Mobile robot attitude estimation by fusion of inertial data[A]. Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation[C], 1993.
- [6] Miller R B. A new strapdown attitude algorithm[J]. Journal of Guidance, 1983. 6(4): 289-291.
- [7] Azor R, Bar-Itzhack I Y, Deutschmann J K, et al. Angular-rate estimation using delayed quaternion measurements[J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 2001, 24(3): 436-443.



(a) 大转速时



(b) 小转速时

图4 未拟合时的输出

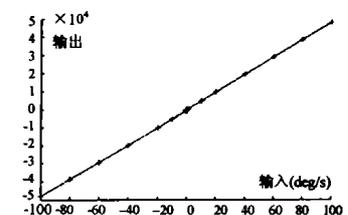


图5 拟合后的开环陀螺的输出