

基于 DSP 的闭环光纤陀螺研究

范磊, 姚琼, 谢元平, 宋章启

(国防科技大学理学院光电工程系, 湖南 长沙 410073)

摘 要: 提出了一种基于 DSP 的全数字闭环光纤陀螺设计方案。文中对该闭环光纤陀螺的 A/D、D/A 等部分间的时序逻辑进行了设计和实现。讨论一种通过反馈调整 D/A 的基准电压来实现对 2π 复位不准确的控制。给出几个重要参数的测定方法和实验结果。

关键词: 光纤陀螺; 闭环控制; DSP; 2π 复位控制

中图分类号: TN253;O318

文献标识码: A

文献编号: 1006-1231(2005)02-0059-03

Research of Close-loop Fiber Optic Gyros Based on DSP

FAN Lei, YAO Qiong, XIE Yuan-ping, SONG Zhang-qi

(College of Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: An all digital close-loop fiber optic gyroscope system based on DSP was presented. The time sequence and logic between each part of FOG was discussed and designed. The method of controlling 2π malreduction by adjusting V_{REF} of A/D was discussed. The measurement method of several important parameters were presented.

Key words: fiber optic gyroscope; close-loop; DSP; 2π reset

1 引 言

光纤陀螺是一种新型的角速度敏感元件, 与激光陀螺相比, 光纤陀螺无闭锁, 易于微型化, 可用于不同精度应用场合, 而保持较高的性能价格比。光纤陀螺 (FOG) 是一种基于光学 Sagnac 效应的角速度测量装置。和传统的机械陀螺相比, 光纤陀螺的优点是: 无运动部件, 不存在 g 灵敏度; 尺度小、质量轻、功耗低; 线性度好、动态范围大、灵敏度高。由于光纤陀螺的固有响应是正弦曲线, 而所需的陀螺仪速率响应信号应是线形的, 解决这个问题的办法是采用闭环信号处理的方法。闭环光纤陀螺的基本原理是在光纤中人为地引入一个非互易的补偿相移, 以抵消由于光纤环转动产生的 Sagnac 相移, 补偿相移与 Sagnac 大小相等、方向相反, 光纤陀螺始终工作在灵敏度最高的零相位点附近, 陀螺的输出信号 (转速) 可以从补偿相移中获得。闭环陀螺又分为模拟闭环陀螺和全数字闭环陀螺。模拟闭环光纤陀螺采用锯齿波反馈来实现相位补偿, 它要求锯齿波具有非常短并且稳定的回扫时间, 以提高标度因数稳

定性和线性度, 但在电路实现上, 由于锯齿波的回扫时间和斜坡的非线性及 2π 复位精度的影响, 导致光纤陀螺标度因数的线性度和稳定性受到了限制, 随着集成电子技术的发展, 新的高性能光纤陀螺普遍采用全数字闭环检测系统, 其最大“魅力”是运用数字逻辑和 D/A 转换器, 对任何台阶值产生一个合适的同步复位。避免了模拟斜坡所需要的稳定的回扫时间问题。

2 数字阶梯波闭环调制原理

由 Sagnac 原理, 光纤陀螺输出信号为 $I = I_0(1 + \cos \Delta\phi)$, 当 $\Delta\phi = 0$ 时, 从光电探测器上检测到的光强得到最大值, 但考虑到在 0° 附近, 余弦曲线对应的线形度差, 应加上 $V_{\pi/2}$ 电压, 使得陀螺工作在线形度最佳的正交工作点上, 实际设计中选择加上方波调制信号的方法。在图 1 中 $\Delta\tau$ 为光纤环的渡越时间, 即光经过光纤环一周的时间, $\Delta\tau = nl/c$, 对于 1000 m 长的光纤, 约为 $5 \mu\text{s}$, 本征频率为 200 K, 所需要的调制频率就为 100 K, 如此高的调制

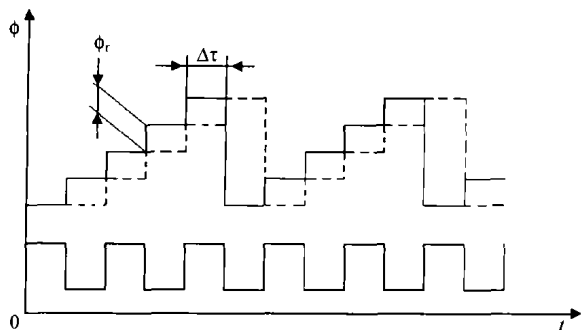


图 1 台阶和复位与方波偏置调制同步的数字相位斜波
Fig.1 Digital oblique wave with step and reset hole in square wave

频率, PZT 无法实现, 一般采用铌酸锂集成光学器件。

采用图 1 所示的阶梯波调制时, 归一化的信号输出为

$$S(t) = 1 + \cos(\phi_s + \Delta\phi_{m1} + \Delta\phi_{m2}) \quad (1)$$

式中 ϕ_s 为转速信号产生的相移, $\Delta\phi_{m1}$ 、 $\Delta\phi_{m2}$ 分别为方波调制信号和阶梯波调制信号所产生的相移。当阶梯高度为 ϕ_r 时, 在递增阶段有

$$\Delta\phi_{m2} = \phi_{1cw} - \phi_{2cw} = \phi_r \quad (2)$$

在复位阶段有

$$\Delta\phi_{m2} = \phi_r - 2\pi \quad (3)$$

调制方波信号为偏置信号, 取 $\Delta\phi_{m1} = \pm\pi/2$, 叠加在阶梯波上。在方波的正半周期, 对应的采样信号为

$$S_+(t) = 1 + \sin(\phi_s + \phi_r) \quad (4)$$

在方波的负半周期, 对应的采样信号为

$$S_-(t) = 1 - \sin(\phi_s + \phi_r) \quad (5)$$

这时系统具有最大灵敏度, 通过 (4)、(5) 两式计算得

$$S(t) = [S_+(t) - S_-(t)]/2 = \sin(\phi_s + \phi_r) \quad (6)$$

通过反馈调节 ϕ_r 抵消 Sagnac 相移 ϕ_r , 则就可得出 ϕ_r 与 Ω 一一对应的线形关系。

3 硬件系统的设计

如图 2 所示, 系统以 DSP 为控制核心, 在 DSP 与 D/A1 间加锁存器使 D/A1 输出稳定的调制阶梯波, D/A1 采用中断方式, 每个中断周期刷新 D/A1

的输出电压, 采用外部电压基准, 由 D/A2 给出。通过反馈调节 D/A2 输出电压来精确控制 2π 复位。A/D 与 DSP 间加 FIFO 使得系统在调制时期由 FIFO 完成采样任务。A/D、D/A、FIFO 时钟由定时器 TOUT 提供, 根据 A/D、D/A 的性能, 通过分频确定每个调制周期的采样点数, FIFO 使能读时间由 DSP 的 I/O 口控制, 这使得调制与相应的采样有稳定的对应关系。

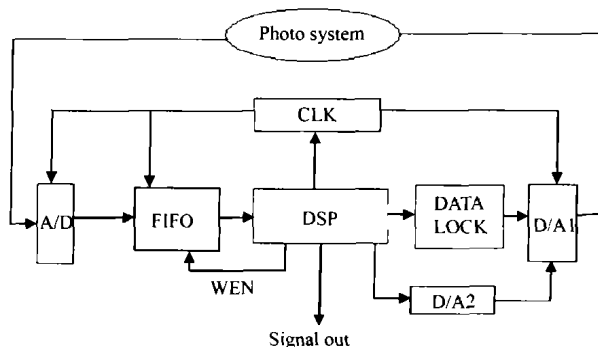


图 2 硬件系统设计

Fig.2 Design of hardware system

4 2π 复位精度的控制

利用 DSP 的进位标志位 C 来给每次 D/A1 输出作一标记 0(未产生复位) 或 1(产生复位), 存储到数据存储器。由于采样信号与相应的调制有准确的一一对应的关系, 因此可以准确地找出处于复位时期前后的相应的采样信号。设每半周期采样 2 点, 则采样信号为

$$S(t) = S_0(t_0), S_0(t_1), S_0(t_2), S_0(t_3), S_0(t_4) \dots$$

$$S_1^+(t_n), S_1^+(t_{n+1}), S_1^-(t_{n+2}), S_1^-(t_{n+3}) \dots (7)$$

$S_1^+(t_n), S_1^+(t_{n+1}), S_1^-(t_{n+2}), S_1^-(t_{n+3})$ 即为复位前后对应的采样信号, 则 D/A1 的下一基准电压为

$$V'_{REF} = V'_{D/A2} = V_{D/A2} + K \sum [S_1^+(t_n) + S_1^+(t_{n+1}) - S_1^-(t_{n+1}) - S_1^-(t_{n+2})] \quad (8)$$

根据上面的设计实际产生出图 3 的调制阶梯波以及相应的标志 (图 4), 由图 4 可见调制阶梯波的每次复位都被准确地标记出来。



图 3 实际产生的调制阶梯波

Fig.3 Step wave for modulation

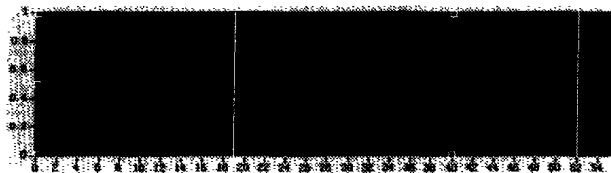


图 4 读标志数据存储器所得复位标记结果

Fig.4 Readout reset mark from data accumulator

5 参数确定

5.1 波导调制器半波电压

波导调制器的半波电压的精确测定是保证系统标度因子线形的关键,也是方波的偏置电压和复位电压的依据。由于陀螺的输出信号是 COS 的函数,所以给其加一任意幅度的 1:1 调制方波信号(图 5A),其输出有两种情况: 1) 方波的幅度大于或者小于半波电压,此时陀螺的输出信号为一方波(占空比不一定为 1),如图 5B。2) 方波的幅度等于半波电压,此时陀螺的输出信号基本为一条直线。

测定半波电压的方法为通过逐渐增大 D/A1 的输出使调制方波幅度由小逐渐增大。使用 A/D 采样陀螺的输出信号,分析采样数据,做数学处理,当采样数据方差最小时,此时的 D/A1 的输出电压就为半波电压。测定结果表明所使用的波导调制器的半波电压为 3.230 V。

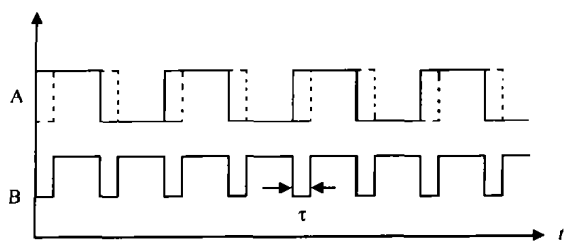


图 5 加方波调制信号与陀螺输出信号

Fig.5 Square wave and output after modulation

5.2 光纤环的渡越时间 τ

光纤环的渡越时间 τ 的确定是信号检测系统的基础,它决定阶梯波调制信号的阶梯宽度以及采样的时钟频率。光纤环的渡越时间 τ 理论上可由光纤

的长度计算得到,但是在实际的绕制过程中很难精确控制光纤环的长度。测量的方法是先粗略估计光纤环长度计算其渡越时间,设定 DSP 定时器的中断频率输出半周期远大于估计渡越时间的方波。图 5B 为调制方波的幅度远小于半波电压时,在数字存储示波器上看到的陀螺输出信号。改变 DSP 定时器的中断频率(半周期始终要远大于估计渡越时间)来改变方波的频率,可以发现输出信号的频率也同样随着改变,但是其低电平始终保持不变。此宽度就为光纤环的渡越时间 τ ,因此可以确定阶梯波的每一阶梯宽度为 τ 。

实际测定中通过多次改变定时器中断频率,多次取平均得到 τ 为 3.36 μs 。

6 结束语

采用数字阶梯波调制的数字闭环方案具有系统实现方便、重复性好的优点。DSP 作为控制与计算核心计算速度快、控制功能强的特点,加入 FIFO 缓存使系统在加调制时完成自动采样,并使每个采样点都与相应的调制一一对应,存储 DSP 进位标志 C 来准确找出 2π 复位对应的前后采样点,通过第二个 D/A 转换器来反馈调节产生阶梯波所用 D/A 的基准电压,从而精确控制 2π 复位。给出准确测量几个重要参数的方法。

参考文献:

- [1] Lefe're Herve' C, 著, 张桂才, 王 巍, 译. The Fiber-Optic Gyroscope[M]. 北京: 国防工业出版社.
- [2] Kim B Y, Lefe're Herve' C, Bergh R A, et al. Response of fiber gyros to signals introduced at the second harmonic of the bias modulation frequency[J]. *SPIE Proceeding*, 1983, **425**:86~89.
- [3] Kim B Y, Shaw H J. Gate phase-modulation approach to fiber-optic gyroscope with linearized scale factor[J]. *Optics Letters*, 1984, **9**:375~377.
- [4] Paclath G A. Closed-loop fiber optic gyros[J]. *SPIE*, 1996, **2837**:47~60.

作者简介: 范 磊 (1981-), 男, 安徽霍邱人, 国防科技大学光纤技术教研室在读硕士, 从事光纤传感方面研究。