

谐振式光纤陀螺全数字闭环方案的算法研究

沈庆 马慧莲 周柯江 金仲和

(浙江大学信息与电子工程系 杭州 310027)

摘要 谐振式光纤陀螺是一种基于光纤环形谐振腔 Sagnac 效应的新型惯性传感仪器。与现有的其他类型陀螺相比,具有很多性能上的优势。在此提出了一种基于 DSP 技术的全数字闭环方案,并为这种方案建立了数学模型。借助用 z 变换表示各个环节的离散传递函数,设计并优化了跟踪谐振频率的算法,并将此算法在 DSP 中实现。

关键词 谐振式光纤陀螺 DSP 技术 闭环跟踪算法

Study of Algorithm for All Digital Close-loop Resonator Fiber Optic Gyro

Shen Qing Ma Huilian Zhou Kejiang Jin Zhonghe

(Dept. of Information Science & Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract Resonator fiber optic gyro (R-FOG) is a new kind of inertial sensor based on Sagnac effect. Compared with other kinds of gyros, R-FOG has many advantages. Close-loop operation with digital signal processor (DSP) is presented. The mathematical model is established too. Using the Z-transform to describe the discrete transfer function for elements in the system, a frequency-tracking algorithm is designed and optimized, which has been realized in DSP.

Key words Resonator fiber optic gyro DSP Frequency-tracking algorithm

1 引言

谐振式光纤陀螺(Resonator Fiber Optic Gyro, R-FOG)是利用光学 Sagnac 效应实现对转动检测的一种高精度的惯性传感器^[1]。相比较于目前比较成熟的干涉式光纤陀螺(Interference Fiber Optic Gyro, I-FOG),仍处于研究中的 R-FOG 具有以下优点:(1)只需要 5~10m 的光纤环就能达到同等精度,这就大大减少了温度引起的漂移;(2)R-FOG 的光源是波长稳定的激光,这样就克服了 I-FOG 中使用超辐射发光二极管带来的波长不稳定因素;(3)R-FOG 的动态范围在同等精度下比 I-FOG 所能达到的动态范围更大;(4)易于小型化和集成化。正是这些优点大大推动了人们对 R-FOG 的研究^[2]。

为了达到更好的性能,R-FOG 一般工作在闭环条件下。文中利用数字相位调制技术和成熟的数字信号处理软、硬件,设计了基于 DSP 技术的全数字闭环方案,并建立了相应的数学模型。数字闭环方案相对于模

拟闭环方案,大大简化了电路的复杂性,使电路具有很高的灵活性和可移植性,同时克服了模拟电路引入的热漂移^[3]。

2 系统设计

图 1 给出了谐振式光纤陀螺的系统结构示意图。

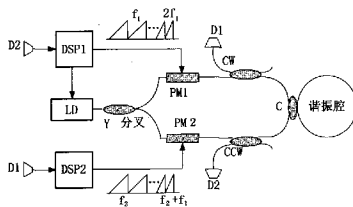


图 1 谐振式光纤陀螺系统结构示意图

激光器 LD 发出的窄线宽激光,耦合进一个集成光学芯片,这个芯片包括一个 Y 分叉和两个相位调制器

PM1、PM2。输出的两路光从相反方向经过耦合器 C 耦合进入由光纤绕成的谐振腔,根据两路光在谐振腔内的传播方向分别记为顺时针(CW, Clockwise.)光和逆时针(CCW, Counter-clockwise.)光。由 Sagnac 效应,当谐振腔相对于惯性参照系发生转动时,则谐振腔内 CW 和 CCW 传播方向的光束间将产生正比于旋转角速度 Ω 的谐振频率差:

$$\Delta F = F_r^{CW} - F_r^{CCW} = \frac{D}{n\lambda} \Omega \quad (1)$$

式中: F_r^{CW} 和 F_r^{CCW} 分别为 CW 和 CCW 光路的第 r (为整数) 次的谐振频率; D 是环形腔直径; n 是光纤折射率; λ 是真空中工作波长。

对相位调制器施加如图 1 所示的数字锯齿波可以实现光的频率调制功能。当数字台阶刷新时间 τ 等于光在谐振腔的渡越时间时,数字锯齿波与理想连续斜波的调制作用一样^[8-11]。每个数字台阶的高度 $\phi_n = 2\pi\tau$, 用这样的数字锯齿波驱动相位调制器,就等效于对输入光附加一个频移 f 。

交替改变锯齿波频率,可以实现光频率的周期变换。对 CCW 光路交替施加 f_1 和 $2f_1$ 的频移,重复频率为 p , 则 CCW 光路的等效频率为 $f_{LD} + f_1$ 与 $f_{LD} + 2f_1$ 交替变换,把这两个频率的平均值简称为“调制中心频率”,记为 f_{mid}^{CCW} , 有:

$$CCW: f_{mid}^{CCW} = f_{LD} + \frac{3}{2} f_1 \quad (2)$$

同理,对 CW 光路交替施加 f_2 和 $f_2 + f_1$ 的频移,重复频率为 q , 中心频率记为 f_{mid}^{CW} , 有:

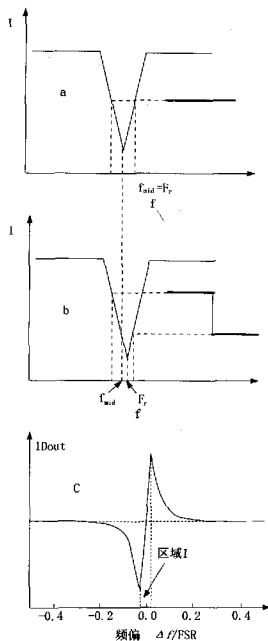
$$CW: f_{mid}^{CW} = f_{LD} + f_2 + \frac{f_1}{2} \quad (3)$$

频率交替变化的光经过谐振腔后,输出的将是功率周期变化的光信号,如图 2(a), (b)。图中 F_r 表示谐振腔的某个谐振频率点, f_{mid} 表示调制的中心频率。

利用光电探测器可以把光功率周期变化信号转换为电压方波信号,经过 A/D 转换和数字电路处理,输出反馈控制信号。对 CW 光路,靠调节调制频率实现 f_{mid} 对 F_r 的跟踪,最终实现“锁定”;对 CCW 光路,调节激光器的驱动电流实现“锁定”。最终,可以得到以下等式:

$$\begin{aligned} \Delta F &= F_r^{CW} - F_r^{CCW} = f_{mid}^{CW} - f_{mid}^{CCW} \\ &= f_2 - f_1 \end{aligned} \quad (4)$$

可见,调制频率差 $f_2 - f_1$ 就是反映陀螺转动信号。下面提出一组典型的实验参数^[5]: 光纤谐振腔长 $L = 5\text{m}$; 折射率 $n = 1.45$; 工作波长 1550nm ; 激光器输出功率为 5mW ; 光纤环直径 $D = 10\text{cm}$; 调制频率 $f_1 = 50\text{kHz}$; f_2 初始频率 $= f_1 = 50\text{kHz}$; CCW 调制重复频率 $p = 2.5\text{kHz}$; CW 调制重复频率 $q = 2.6\text{kHz}$ 。



(a) 调制中心频率与谐振频率相等
(b) 调制中心频率与谐振频率不等
(c) f_{mid} 与 F_r 的频偏对应方波幅度 ID_{out} 的关系^[10]
图 2 锯齿波相位调制下谐振腔的输出功率

3 数字控制算法分析

3.1 模型建立

检测出了方波的幅度,就可以根据这个幅度来反馈控制光路“锁定”。所谓锁定,就是使调制后光的中心频率 f_{mid} 与谐振频率 F_r 相等。CCW 和 CW 两路光的锁定过程都可以用图 3 所示的数学模型来统一分析。

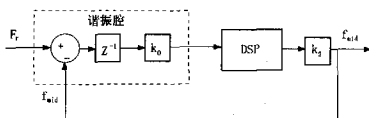


图 3 谐振式光纤陀螺控制环路的数学模型

这样的模型是在假设 f_{mid} 与 F_r 之差在线性范围内得到的,如图 2(c)中所示的区域 I。虽然这个区域在整个自由谱宽 FSR 中占的比例很小,但是由于陀螺闭环伺服在谐振点附近,所以大部分时间陀螺是工作在线性区内的。图 3 中, k_0 表示包括了调制曲线线性区域斜率和数字信号处理前的所有处理电路的增益。之所以加一个 z^{-1} 延迟是因为谐振频率差要经过一个调制重复周期 T_0 才能被检测到, k_2 是对反馈的线性抽象,通过调节激光器或调节调制频率来实现。

对于图 3 所示模型的经典的控制算法是一个积分控制^[4,6,8],如图 4 所示。这是 PID (Proportional-Integral-Derivative) 控制的一种特例。可以分析出,一个简单的积分控制就能实现较好的动态特性,且没有稳态误差。积分控制在数字域就是一个累加器^[5],图 4 中 k_1 是数字信号处理的附加增益。

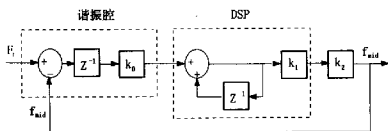


图 4 使用积分控制的环路数学模型

这样的环路开环传递函数为:

$$G_{open}(z) = k_0 k_1 k_2 \frac{z^{-1}}{1-z^{-1}} = k_0 k_1 k_2 \frac{1}{z-1} \quad (5)$$

闭环传递函数为:

$$G_{close}(z) = \frac{G_{open}(z)}{1+G_{open}(z)} = \frac{k_0 k_1 k_2}{z - (1 - k_0 k_1 k_2)} \quad (6)$$

$G_{close}(z)$ 有一个极点 $z = 1 - k_0 k_1 k_2$ 。系统稳定的条件是所有极点在 z 平面的单位圆内部,所以要求 $-1 < (1 - k_0 k_1 k_2) < 1$ 。即只需使 $0 < k_0 k_1 k_2 < 2$, 环路总是能稳定地“锁定”。

研究环路特性,可以考察系统的闭环单位阶跃响应,图 5 中是一些仿真结果。可见,当 $0 < k_0 k_1 k_2 < 1$ 时,“锁定”过程没有超调,但比较慢;当 $1 < k_0 k_1 k_2 < 2$ 时,

“锁定”过程更快,但有超调现象。

特别地,当 $k_0 k_1 k_2 = 1$ 时,对应的 $G_{close}(z) = z^{-1}$ 。表示仅需延迟一个控制周期 T_0 , 输出就能完全跟踪输入的变化。这可以理解为:精心设计环路 DSP 和驱动增益,使之为谐振腔谐振曲线斜率的倒数,从而使上一时刻的频率叠加在下一时刻的 f_{mid} 上,使环路“锁定”。当然,由于谐振曲线不是理想线性的,即使精确控制 $k_0 k_1 k_2 = 1$ 调节也可能花几个周期,但只要线性模型下能稳定,非线性情况下总是能“锁定”的。如图 6 所示。

对于频率落于谐振曲线线性区(区域 I)外的情况,用图 4 的线性模型来简化是不合适的。但是我们注意到,如此大的频率只是在系统启动初期才存在。在积分控制下,经过足够长的时间,图 4 中的数字积分算法总是能把激光频率拉入线性区,并“锁定”,这也正是闭环方案相对开环方案更优越的地方。如果希望上电后能在比较短的时间内“锁定”,可以加上附加判据(例如电压绝对值),判断出非线性区外时,直接附加一个大的频率偏移。

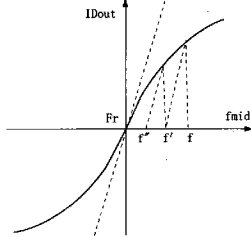


图 6 谐振曲线的非理想线性效应

3.2 延迟补偿

为了能提高检测能力,相关解调出的信号要经过数字滤波,对于通带内的信号相当于一个附加的延迟环节,可能会导致环路的不稳定。可以用图 7 所示的方法来补偿。环路的开环传递函数为:

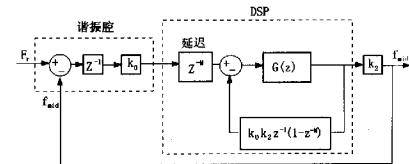


图 7 控制环路延迟补偿

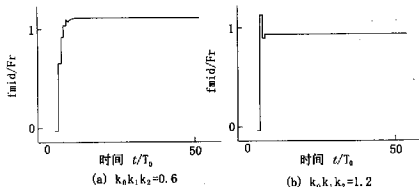


图 5 积分控制中的环路增益的影响

$$G_{\text{open}}(z) = \frac{k_0 k_1 G(z) z^{-(M+1)}}{1 + k_0 k_1 z^{-1} G(z) (1 - z^{-M})} \quad (7)$$

闭环传递函数为:

$$G_{\text{close}}(z) = \frac{G_{\text{open}}(z)}{1 + G_{\text{open}}(z)} = \frac{k_0 k_1 z^{-1} G(z)}{1 + k_0 k_1 z^{-1} G(z)} z^{-M} \quad (8)$$

式(8)等效于图8所示的闭环模型。

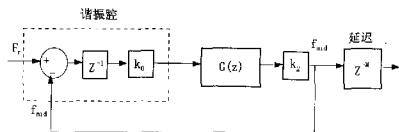


图8 经过延迟补偿后的等效环路

可以看到,延迟环节经过补偿被移到了环路后,也就是说,想要保证有延迟的环路能稳定“锁定”,只要保证没延迟的环路能稳定“锁定”即可,而没延迟的闭环稳定条件已经分析过了。

实际情况中,补偿的反馈系数不可能完全等于 $k_1 k_2$, 环路的动态特性和希望的结果有所不同。图9对这种情况进行了仿真。从图9的仿真结果中可以看出,当反馈系数和 $k_1 k_2$ 差别不太大时,不影响环路稳定性。仿真时,观察环路的阶跃响应。当然实际环路的输入信号是经过滤波的,不可能是如此“陡”的阶跃信号,但是通过观察环路的阶跃响应可以直观地了解环路的稳定性。

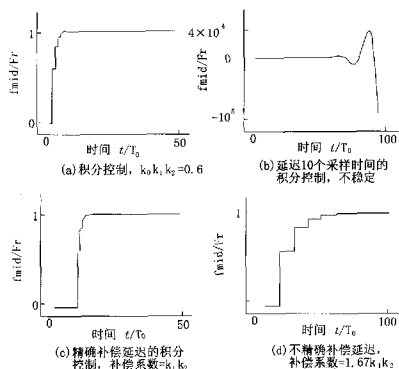


图9 延迟补偿的仿真

3.3 工作时段

当 R-FOG 工作时,如果两路光的“锁定”同时进

行,由于激光器的频率可能受 CCW 控制作用而处于调节中,CW 光路的“锁定”会受到影响。而且,由于两路光的调制重复频率有所不同,用算法补偿比较复杂。为了避免这个问题,可以选择 CW 光路的“锁定”动作发生在 CCW 光路“锁定”之后,这样做实际上是用“锁定”速度换取稳定性。当两路光都“锁定”时,数字电路对两路光的调制频差与陀螺转动角速度成正比。这个数字值可以输入 pc 机作为实验记录,也可以作为后续的姿态控制系统的输入信号。

4 结 论

文中提出了一种 R-FOG 的全数字闭环方案,在数学建模的基础上,分析了信号处理的算法及其时间特性,特别分析了环路的稳定性问题和延迟补偿问题。文中设计和分析的数字系统目前已在 DSP 上实现。

参考文献

- Hervé C. Lefèvre. 光纤陀螺仪. 张桂才,王巍译.北京:国防工业出版社,2002.4~23,157~167.
- Kazuo Hotate, Michiko Harumoto. Resonator fiber optic gyro using digital serrodyne modulation. Journal of Lightwave Technology, 1997,15:466~473.
- Kazuo Hotate, George Hayashi. Resonator fiber optic gyro using digital serrodyne modulation-method to reduce the noise induced by the backscattering and closed-loop operation using digital signal processing. 13th International Conference on Optical Fiber Sensors, 2000,104~107.
- H. C. Lefèvre, P. Martin, J. Morisse, P. Simonpiétri, P. Vivonot, H. J. Arditty. High dynamic range fiber gyro with all-digital signal processing. SPIE, Fiber Optic and Laser Sensor VIII, 1990,1367:72~80.
- 马慧莲,金仲和,丁纯,王跃林.谐振腔光纤陀螺信号检测方法的研究.中国激光,2004,31:1001~1005.
- 于海成.光纤陀螺数字信号处理中的算法分析与设计:[硕士学位论文].北京:北京航空航天大学,2003.
- 郭伟.谐振式光纤陀螺基础研究:[硕士学位论文].杭州:浙江大学,2003.
- Ralph A. Bergh. Simplified control theory for closed-loop fiber-optic gyroscopes. SPIE, Fiber Optic and Laser Sensor X, 1992,1795:126~134.
- Alan V. Oppenheim, Ronald W. Schaffer. 离散时间信号处理.第2版.刘树棠,黄建国,译.西安:西安交通大学出版社,2001.77.