

文章编号: 0258-7025(2009)06-1479-05

基于调相谱技术的谐振式光纤陀螺检测电路 数字化研究

彭 博 杨志怀 马慧莲 金仲和

(浙江大学信息与电子工程系, 浙江 杭州 310027)

摘要 谐振式光纤陀螺(R-FOG)是基于 Sagnac 效应产生的谐振频率差来测量旋转角速度的一种新型光学传感器。针对调相(PM)谱技术的 R-FOG 系统方案,研究了基于坐标旋转数字计算机(CORDIC)算法的数字同步检测电路。通过单片可编程逻辑器件(FPGA)可同时实现调制信号产生、同步解调以及信号处理,从而使 R-FOG 检测系统更加稳定、灵活。对基于 CORDIC 算法的频率合成技术和同步检测电路做了分析和测试。将设计的数字检测电路应用于 R-FOG 系统,完成了陀螺转动信号的观测。

关键词 光学传感器; 谐振式光纤陀螺; 调相谱技术; 坐标旋转数字计算机算法

中图分类号 TN629.1; TP212 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093606.1479

Digitalization of the Detection Circuit for Resonator Fiber Optic Gyro Based on the Phase Modulation Spectroscopy Technique

Peng Bo Yang Zhihui Ma Huilian Jin Zhonghe

(Department of Information Science and Electronic Engineering, Zhejiang University,
Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

Abstract Resonator fiber optic gyro (R-FOG) is a novel optical rotation sensor whose resonant frequency is changed due to the Sagnac effect. In R-FOG using phase modulation (PM) spectroscopy technology, a digital synchronous detection circuit based on the coordinate rotation digital computer (CORDIC) algorithm is studied. It can make the R-FOG system more stable and flexible using a single field programmable gate array (FPGA) to realize the modulation signal generation, synchronous demodulation and signal processing synchronously. The frequency synthesis technology and synchronous detection circuit based on CORDIC algorithm are analyzed and tested. Applying the digital synchronous detection circuit to the R-FOG system, the gyro rotation signal is observed successfully.

Key words optical sensor; resonator fiber optic gyro; phase modulation spectroscopy technique; coordinate rotation digital computer

1 引 言

谐振式光纤陀螺(R-FOG)是基于 Sagnac 效应产生的谐振频率差来测量旋转角速度的光学传感器^[1]。Sagnac 效应是一种非常微弱的效应,信号调制和检测技术具有非常重要的地位。基于 LiNbO₃ 相位调制器的调相(PM)谱技术的 R-FOG 系统^[2, 3]中,调制信号的产生和信号的同步解调是

检测系统的关键。通常采用信号发生器加模拟解调电路的方案来实现^[4]。检测电路的数字化可以克服模拟电路的 $1/f$ 噪声和温度漂移噪声等,使检测系统更加稳定、灵活,同时可以方便地应用数字信号处理的方法。Hotate 等^[5]提出了应用数字锯齿波相位调制的谐振式光纤陀螺数字检测方案。该方案中不理想锯齿波引入的 2π 复位噪声

收稿日期: 2008-08-04; 收到修改稿日期: 2008-12-26

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金(20060335064)资助项目。

作者简介: 彭 博(1985-),男,硕士研究生,主要从事传感器信号处理技术研究。E-mail: pb_zju@163.com

导师简介: 马慧莲(1975-),女,副教授,硕士生导师,主要从事集成光学器件和光学传感技术方面的研究。

E-mail: mahl@zju.edu.cn (通信作者)

是系统主要噪声源之一^[6]。采用坐标旋转数字计算机(CORDIC)^[7]算法,通过加/减、移位运算完成相位幅度转换,在高速的单片可编程逻辑器件(FPGA)中实时计算三角函数值,在FPGA芯片上集成调制信号的产生、信号的同步解调以及解调信号后续数字滤波处理等功能,实现了基于调相谱技术的R-FOG检测电路的数字化。利用研制的FPGA芯片,完成和R-FOG光路系统的联合调试,并顺利测试了陀螺转动信号。

2 基于调相谱技术的R-FOG

根据Sagnac效应,当光纤环形谐振腔(FRR)绕垂直于FRR所在平面的轴转动时,FRR内顺时针(CW)和逆时针(CCW)方向传播的光束会产生正比于旋转角速度 Ω 的谐振频率差^[1]

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

式中 F_r^{CW} 和 F_r^{CCW} 分别为CW和CCW光束的第 r (r 为整数)次谐振频率, D 为FRR直径, n 为光纤折射率, λ 为工作波长。

图1给出了基于调相谱检测技术的R-FOG的系统框图。光纤激光器(FL)发出的激光(频率为 f_c)经Y分支器分成功率相等的两束光,这两束激光分别经过相位调制器PM1和PM2,再由FRR耦合器 C_3 耦合进入谐振腔,形成CW和CCW的两束谐振光束,最后分别由耦合器 C_1 和 C_2 耦合到光电探测器(Photodiode)PD1和PD2。将相位调制器PM1和PM2的正弦波驱动信号设置成不同的频率 f_1 和 f_2 ,以减小背向散射的影响^[8]。CW和CCW方向的光波分别由PD1和PD2转化为电信号,通过FPGA进行正弦波幅度同步解调,其中CCW路解调信号通过反馈控制回路(FBC)控制激光器频率,将激光器频率锁定在FRR的CCW方向谐振频率上,CW路解调信号则给出了陀螺转动信号。

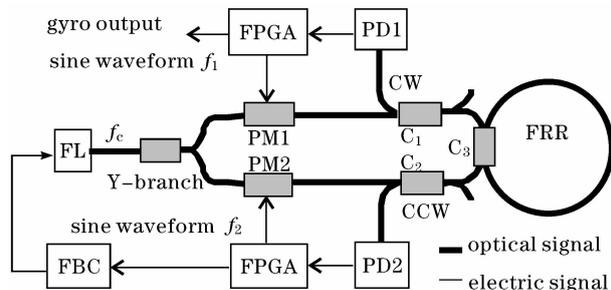


图1 调相谱检测技术的谐振式光纤陀螺系统框图

Fig. 1 R-FOG based on the PM spectroscopy technique

3 基于CORDIC算法的数字检测电路设计

CORDIC算法由J. E. Volder^[7]提出,主要用于三角函数、双曲函数以及其他一些基本函数的运算。该算法的基本原理如图2所示。向量 $V_i(x_i, y_i)$ 经过子角度 θ_i 旋转得到向量 $V_{i+1}(x_{i+1}, y_{i+1})$,其关系可表示为

$$\begin{cases} x_{i+1} = (x_i - y_i \cdot \tan \theta_i) \cdot \cos \theta_i, \\ y_{i+1} = (y_i + x_i \cdot \tan \theta_i) \cdot \cos \theta_i, \end{cases} \quad (2)$$

为了易于在FPGA中通过简单的加/减、移位运算实现CORDIC算法,旋转子角度 θ_i 可设为

$$\begin{cases} \theta_i = \delta_i \cdot \arctan(2^{-i}), \\ K_i = \cos \theta_i = \sqrt{\frac{1}{1+2^{-2i}}}. \end{cases} \quad (3)$$

式中 δ_i 取 ± 1 , $+1$ 表示逆时针旋转, -1 表示顺时针旋转。经过 N 次子角度旋转,校正因子 K 定义为

$$K = \prod_{i=0}^{N-1} K_i = \prod_{i=0}^{N-1} \sqrt{\frac{1}{1+2^{-2i}}}, \quad (4)$$

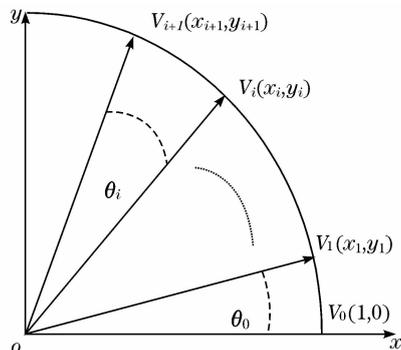


图2 CORDIC算法示意图

Fig. 2 Schematic diagram of CORDIC

通过 K 将初始单位向量预校正为 $V_0(K, 0)$,可以避免(2)式中每次子角度旋转操作中的幅度放大因子 $\cos \theta_i$ 。因此CORDIC算法的子角度旋转操作表示为

$$\begin{cases} x_{i+1} = x_i - \delta_i \cdot y_i \cdot 2^{-i}, \\ y_{i+1} = y_i + \delta_i \cdot x_i \cdot 2^{-i}, \\ z_{i+1} = z_i - \delta_i \cdot \arctan(2^{-i}), \end{cases} \quad (5)$$

其中 $x_0 = K, y_0 = 0, z_0$ 是预定要计算正弦值或余弦值的角度 θ ,当 $z_i > 0$ 或 $z_i < 0$ 时, δ_i 分别取为 ± 1 。当子角度旋转操作次数 N 为无限大时, x_N 和 y_N 分别等于 $\cos \theta$ 和 $\sin \theta$,从而实现了相位-幅度的转换。根据(3)式,子旋转角度之和的最大值 θ_{\max} 可表示为

$$\theta_{\max} = \sum_{i=0}^{\infty} \arctan(2^{-i}) \approx 1.7433 (99.9^\circ).$$

为使 CORDIC 算法角度计算范围覆盖 $\pm 180^\circ$ ，可增加两次 $i=0$ 的子角度旋转操作。修正后的 CORDIC 算法操作可以描述为

$$\begin{cases} x_{i+1} = x_i - \delta_i \cdot y_i, \\ y_{i+1} = y_i + \delta_i \cdot x_i, \\ z_{i+1} = z_i - \delta_i \cdot \arctan(2^0), \end{cases} \quad i \leq 2, \\ \begin{cases} x_{i+1} = x_i - \delta_i \cdot y_i \cdot 2^{-i+2}, \\ y_{i+1} = y_i + \delta_i \cdot x_i \cdot 2^{-i+2}, \\ z_{i+1} = z_i - \delta_i \cdot \arctan(2^{-i+2}), \end{cases} \quad i > 2, \quad (6)$$

增加了两次 $i=0$ 的子角度旋转操作后，校正因子 K 修正为

$$K = K_0^2 \cdot \prod_{i=0}^{N-1} K_i = \frac{1}{2} \cdot \prod_{i=0}^{N-1} \sqrt{\frac{1}{1+2^{-2i}}}. \quad (7)$$

图 3 给出了 CCW 光路数字同步解调系统框图。用正弦波产生模块产生施加在 PM1 的正弦波信号，同步解调模块解调光电探测器 PD2 处的输出信号。CORDIC 模块用于实现 (6) 式描述的相位-幅度转换功能。正弦波信号由一个累加器和一个 CORDIC 模块产生，频率控制字 (FCW) 用于控制正弦波的频率。正弦波调制信号和被解调信号之间的相位差可由相位控制字 (PCW) 控制。将低通滤波器 (LPF) 输出的解调信号通过反馈电路 (FBC) 调谐激光器频率锁定到 CCW 光路谐振频率上^[9]。ADC 表示模数转换器，DAC 表示数模转换器。

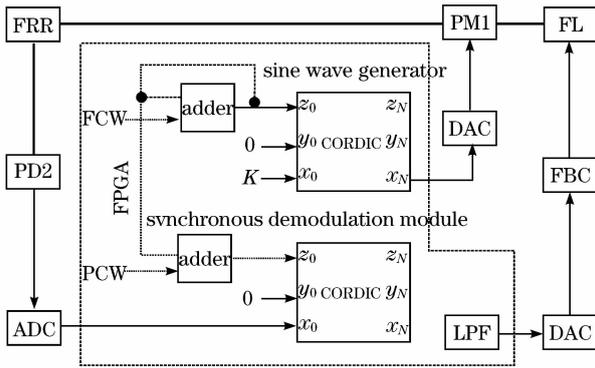


图 3 CCW 环路调制解调系统框图

Fig. 3 Modulation and demodulation block diagram of CCW

CORDIC 模块由若干个 Cordic_unit 操作单元组成，采用如图 4 所示的流水线结构，可以提高系统的运算速度。正弦波的幅度由常数 K 控制，频率由频率控制字 FCW 控制。通过流水线迭代运算，可以在每一个时钟周期得到一个相位累加值 (FCW 累

加) 对应角度的正弦值，正弦波的产生就是用得到的这组正弦值逼近出来的。

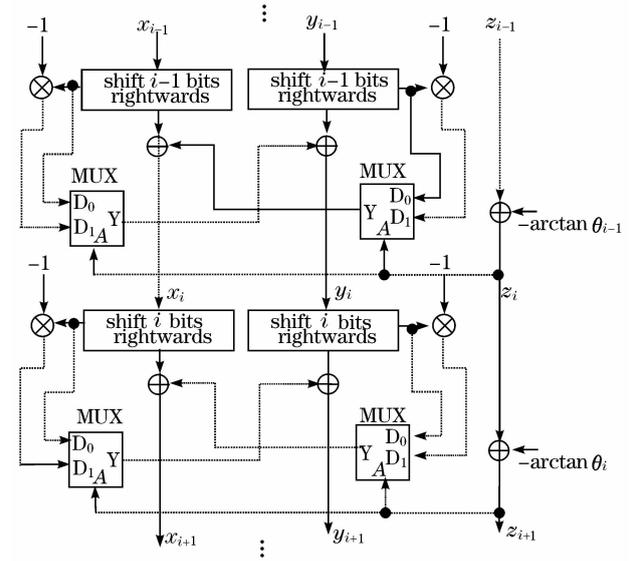


图 4 CORDIC 模块结构示意图

Fig. 4 Sketch map of CORDIC algorithm

在本设计中，采用的数据字长为 $n=16$ 位，采用 $N=18$ 次迭代运算，因而包含 18 个 Cordic_unit 单元。由于在 FPGA 中，对小数的表示相对于整数来说比较困难，且不利于计算，将 2π 相位映射为整数 $2^n - 1 (n=16)$ ，则累加相位 $\Delta\theta$ 映射为 $2\pi \cdot N_{FCW} / (2^n - 1)$ ，产生的正弦波频率可表示为

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{\Delta\theta}{2\pi \cdot \Delta t} = \frac{N_{FCW}}{2^n - 1} \cdot f_{\text{clk}}, \quad (8)$$

其中系统时钟 $f_{\text{clk}} = 40 \text{ MHz}$ 。同步解调模块也是采用 CORDIC 模块为核心 (与正弦波产生模块相比只是输入值上的差别)。要解调的信号由 x_0 输入，与 CORDIC 模块产生的同步正弦波相乘，从而进行解调。由于两路信号需要同步，而产生调制正弦波时 CORDIC 迭代运算的时延会引起两路信号的相位差，因此需要在输入 z_0 时加一个相位补偿值。相位补偿值的计算采用如下方法：

CORDIC 算法的 N 次迭代运算延时时为

$$\tau = N \cdot \tau_c, \quad (9)$$

其中 τ_c 为一次迭代运算所用时间，即一个系统时钟周期 $1/f_{\text{clk}}$ 。于是相位延迟为

$$\Delta\varphi = 2\pi f \cdot \tau = 2\pi N \cdot \frac{f}{f_{\text{clk}}}, \quad (10)$$

$\Delta\varphi$ 在程序中映射为

$$N_{PCW} = (2^n - 1) N \cdot \frac{f}{f_{\text{clk}}} = N \cdot N_{FCW}. \quad (11)$$

CORDIC 模块输出经过一个低通滤波器模块，

目的是滤除信号中的二倍频分量和噪声。设计中低通滤波器采用一阶无限冲击响应(IIR)滤波器,其传递函数为

$$H(z) = \frac{1}{A - (A-1)z^{-1}}, \quad (12)$$

其中设置 $A = 2^N$, 这样有利于在 FPGA 中实现, 不需要乘法器, 只需通过移位与加减运算即可实现 IIR 低通滤波。滤波器的截止频率可通过改变 N 的值来进行调整, 增大 N 则截止频率减小, 反之截止频率增大。

4 实验测试

为减小背向散射噪声影响, CCW 和 CW 采用了不同频率的正弦波调制, 调制频率 f_1 和 f_2 分别取 98 kHz 和 60 kHz。对激光器输出光频率进行扫描时, 用示波器观察 CCW 路的谐振曲线以及解调曲线情况, 如图 5 所示。

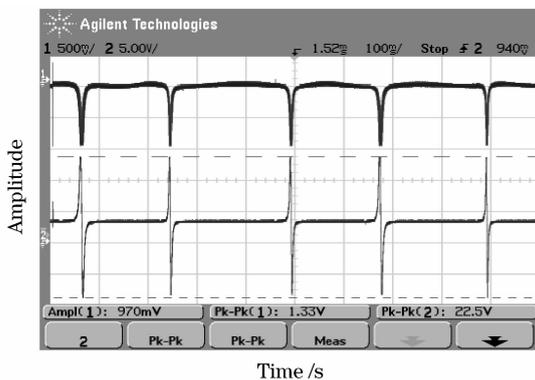


图 5 PM 施加调制信号后 CCW 谐振曲线和解调曲线
Fig. 5 Resonance and demodulation curves for CCW lightwaves with sine wave applied to PM

用 FPGA 解调信号通过反馈电路 FBC 反馈控制激光器输出光波频率大小, 使其锁定到 CCW 光路谐振频率上。图 6 给出了在不同转速下, CW 路的解调输出信号(大小)以及 CCW 路的 PD 输出信号。其中图 6(a)给出的是 $20^\circ/\text{s}$ 对应的转动输出信号, 图 6(b)给出的是 $1^\circ/\text{s}$ 对应的转动输出信号。由图可知, 该陀螺的标度因子约 $32 \text{ mV}/[^\circ/\text{s}]$ 。由图 6 所示的 PD 输出信号显示, 在不同转速下, 激光器的输出光频率均能较好地锁定在 CCW 路的谐振频率上。

5 结论

CORDIC 算法只需要加法器和移位器就可以

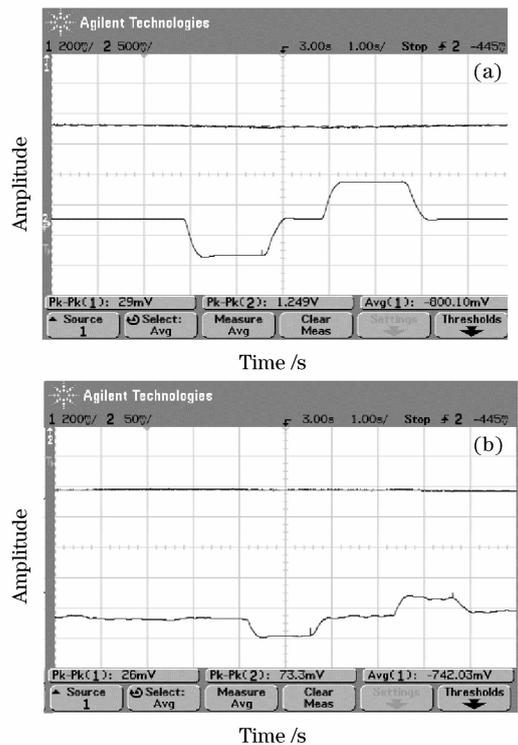


图 6 陀螺转动信号测试

Fig. 6 Observation of gyro rotation signal

(a) $20^\circ/\text{s}$; (b) $1^\circ/\text{s}$

实现三角函数的计算, 适合在 FPGA 中实现。基于 CORDIC 算法的同步检测电路可以由单片 FPGA 实现, 从而简化了检测电路, 使系统更加稳定、灵活。应用于基于调相谱技术的谐振式光纤陀螺系统, 顺利实现了检测电路数字化。

参 考 文 献

- 1 H. C. Lefvre. The Fiber-Optic Gyroscope [M]. Beijing: National Defence Industry Prss, 2002
- 2 Zhang Xulin, Ma Huilian, Ding Chun *et al.*. Analysis on phase modulation spectroscopy of resonator fiber optic gyro [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(11): 1529~1533
张旭琳, 马慧莲, 丁纯等. 谐振式光纤陀螺调相检测分析[J]. *中国激光*, 2005, **32**(11): 1529~1533
- 3 Xulin Zhang, Huilian Ma, Zhonghe Jin *et al.*. Open-loop operation experiments in a resonator fiber-optic gyro using the phase modulation spectroscopy technique [J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(31): 7961~7965
- 4 Yang Guidong, Ma Huilian, Zhang Xulin *et al.*. Design of high frequency lock-in amplifier applied in R-MOG [J]. *Chinese J. Sensors and Actuators*, 2005, **18**(4): 863~866
杨桂东, 马慧莲, 张旭琳等. 一种应用于谐振式微型光学陀螺的高频锁相放大器的设计[J]. *传感技术学报*, 2005, **18**(4): 863~866
- 5 K. Hotate, M. Harumoto. Resonator fiber optic gyro using digital serrodyne modulation [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(3): 466~473
- 6 L. K. Strandjord, G. A. Sanders. Effects of imperfect serrodyne phase modulation in resonator fiber-optic gyroscopes [C]. *SPIE*, 1994, **2292**: 272~282

7 J. E. Volder. The CORDIC trigonometric computing technique [J]. *IRE Transactions on Electronic Computers*, 1959, **V. EC-8** (3): 330~334

8 K. Iwatsuki, K. Hotate, M. Higashiguchi. Effect of Rayleigh backscattering in an optical passive ring-resonator gyro [J]. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(21): 3916~3924

9 Yang Zhihui, Ma Huilian, Zheng Yangming *et al.*. Frequency locking technique in digital closed-loop resonator fiber optic gyro [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(6): 814~819

杨志怀, 马慧莲, 郑阳明 等. 谐振式光纤陀螺数字闭环系统锁频技术[J]. *中国激光*, 2007, **34**(6): 814~819



为了进一步提高我国光学期刊的学术水平和论文质量,吸引和催生优秀稿件,鼓励和培育优秀作者,促进我国光学、激光科技事业发展,《光学学报》《中国激光》《中国光学快报》(英文版)特发起“光学期刊优秀论文评选活动”。在光学泰斗王大珩先生的支持下,本活动特命名为光学前沿——“大珩杯”光学期刊优秀论文评选活动。

光学前沿——首届“大珩杯”光学期刊优秀论文评选结果在中国光学学会 2008 年学术年会上隆重公布。中国光学学会秘书长倪国强宣读了入选论文名单,中国光学学会理事长周炳琨院士、副理事长徐至展院士等为上海光机所周军等入选论文的作者代表颁发了证书和奖金。

根据“大珩杯”光学期刊优秀论文评选活动评选办法,光学前沿——第二届“大珩杯”光学期刊优秀论文评选活动即将开始,欢迎广大作者提交论文信息,参与评选。评选规则请参考“大珩杯”光学期刊优秀论文评选办法。

编辑部将在 2009 年年底,对获奖作者进行表彰,并颁发证书和奖金。

主办单位:中国科学院上海光学精密机械研究所
联合主办单位:相干(北京)商业有限公司
 上海瀚宇光纤通讯技术有限公司
协办单位:高功率激光物理联合实验室
 江西连胜实验装备有限公司
 普爱纳米位移技术有限公司



时间安排:参评论文统计截止时间:2009 年 8 月 30 日。

论文作者提交申请材料时间:2009 年 7 月 1 日~9 月 30 日(论文被引的材料和论文所在项目或课题获奖的证明),请在中国光学期刊网上提交。

审核时间:2009 年 10 月 8 日~10 月 30 日。

详情请浏览:<http://www.opticsjournal.net/Daheng.htm>

咨询电话:021-69918426 段家喜 编辑 duanjiaxi@siom.ac.cn

光学期刊联合编辑部
2009-5-1