

文章编号:1009 - 671X(2002)11 - 0033 - 03

# 基于 DSP 的全数字闭环光纤陀螺检测

李 建,王 怡,王俊峰

(哈尔滨工程大学 信息与通信工程学院,黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘 要:**介绍了一种基于 DSP 和可编程逻辑器件的全数字光纤陀螺闭环检测方案——数字相位斜坡技术,讨论了采用该方案的电路设计具体问题。很好地解决了标度因子线性度及大的动态范围等问题。<sup>①</sup>

**关 键 词:**DSP;闭环控制;零差检测;数字相位斜坡反馈

**中图分类号:**TN29 **文献标识码:**A

## Detection of All - digital Closed - loop Fiber Optical Gyroscope Based on DSP

LI Jian, WANG Yi, WANG Jun - feng

(College of Information and Communication Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

**Abstract:** A new type of all - digital closed - loop FOG detection scheme named digital phase ramp feedback based on DSP and programmed logic device was introduced. Then a detailed analysis of its design was given. The scheme can solve problems such as scale factor error and dynamic range effectively.

**Key words:** DSP; closed - loop control; homodyne detection; digital phase ramp feedback

### 0 引 言

光纤陀螺是一种新型角速度敏感元件,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。自 1976 年 Vali 和 Shortthill 首次报道了光纤陀螺后,近 20 年来,人们对光纤陀螺中存在的物理现象已经理解清楚,一些关键技术问题已经解决。

所谓光纤陀螺(FOG)指的是一种基于光学 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。

采用集成光波导技术的全光纤陀螺已经很好地解决了诸如零漂及零偏等问题。目前,对光纤陀螺的研究主要集中在提高标度因子的线性度和动态范围上,以期满足惯性导航的应用,其主要手段是构成闭环光纤陀螺。闭环光纤陀螺的基本原

理是在光纤中人为地引入一非互易的补偿相移,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。这时,陀螺的动态范围取决于引入补偿相位的器件性能,较之开环陀螺,闭环光纤陀螺扩大了线性动态范围,提高了偏置稳定性。在电路实现上,根据选用的解调手段和进行相位调制的控制波形的不同,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  $2\pi$  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,因此随着超大

① 收稿日期:2002 - 04 - 08

作者简介:李 建(1978 - ),男,哈尔滨工程大学信息与通信工程学院硕士研究生,主要研究方向:光纤通信和数字信号处理。

规模数字集成电子技术的发展,新的高性能光纤陀螺普遍采用数字闭环检测系统,其代表技术就是数字相位斜坡技术(digital phase ramp technique)。可以说采用集成光波导技术的全光纤陀螺和基于 DSP 的数字闭环检测是光纤陀螺的发展方向。

## 1 光纤陀螺全数字闭环检测系统方案原理与分析

### 1.1 基本结构

高性能闭环光纤陀螺仪的基本结构由光路和电路组成,与开环陀螺相似,如图 1 所示。

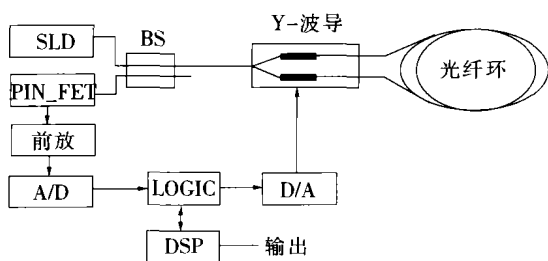


图 1 全数字闭环光纤陀螺

图中,BS 是保偏分束器,光源 SLD 为超发射二极管,PIN-FET 为光电转换器。相位调制器采用集成光学器件(LiNbO<sub>3</sub>) 铌酸锂相位调制器,波导中的光波以光相移的形式采集信号并把此相移转换成两束光之间的相位差,回路中耦合器再把相位差信号转换成光功率的变化,探测器探测到这种变化并把它转换成电信号,再经数字处理去调制调相器。

### 1.2 方波偏置

闭环光纤陀螺方案的实现以集成光纤相位调制器的输出相位与输入电压呈线性关系为基础,为了获得最大的光纤陀螺相位灵敏度,必须对其进行  $\pm \pi/2$  的相位偏置,以使其输出为相移的正弦函数。数字相位斜坡技术采用动态的方波偏置来获得所需的  $\pm \pi/2$  相位偏置。如果电压加在 LiNbO<sub>3</sub> 相位调制器上,由于调制器控制的光路部分折射率发生变化,折射率的变化时的光路中传播的光相位发生变化,即

$$\Psi(t) = KV(t) \quad (1)$$

式中, $\Psi(t)$  是引起的非互易相移, $K$  是相位调制常数(典型值为 1 rad/V), $V(t)$  是所加的电压值,

取波导的下一支为调相器,沿着光路逆时针传播的光立即通过调相器(PM),另一条顺时针传播的光在受到 PM 作用之前必须通过整个光路,因此环路对顺时针方向传播的光来说,其作用就像一个延时器,它的延时时间为  $\tau$ 。在传播期间,两条光路之间产生一个相移

$$\Delta\Psi(t) = K[V(t) - V(t - \tau)] \quad (2)$$

从式(2)可以看出,恒定的电压  $V(t) = V$  不能产生相移。

用连续的峰—峰值为  $\pi/2$  的方波来驱动时,可以使两束光之间的相位差被偏置于  $\pm \pi/2$ ,如图 2(a),图 2(b)是在这种情况下,具有恒定输入角速度  $\Omega$  的光纤陀螺工作过程,输入的角速度可以通过解调光电检测器信号得到: $\Omega = K_1(I_1 - I_2)$ ,式中  $I_1, I_2$  分别为  $\pm \pi/2$  偏置时光电检测器的输出电流; $K_1$  为与  $\pm \pi/2$  偏置时光探测器的静态接收光功率、响应度及陀螺标度因子相关的常数。

### 1.3 闭环控制的实现

探测器的输出经 A/D 转换及数字解调输出后的信号即为由调相器产生的非互易相移在抵销 Sagnac 相移的误差量。由此误差量进行两次数字积分所产生的相位阶梯波即可用于闭环控制。如图(3)所示,恒定的角速度将产生恒定阶距的相位阶梯波,由于光纤圈的延迟作用,使得在正反两方向传播的光波之间引入一恒定的相移,此相移用以补偿 Sagnac 相移,从而使系统工作于零差状态,即

$$\Phi_e = K_s - \Delta\Phi_m = 0 \quad (3)$$

式中  $K_s$  为信号相移,由 Sagnac 效应而产生的相移; $\Delta\Phi_m$  是由阶梯波反馈引入的非互易相移,即阶梯波的阶距。当  $\Omega$  发生变化时,由于式(3)不再成立,从而产生一误差信号,这将改变阶距的大小,通过反馈环路的作用,最终使趋于零。由高速数字处理器 DSP 解调误差信号产生阶距大小,再由逻辑电路 FPGA 的阶梯波产生器经 D/A 反馈至调相器。

由于不可能在一个方向上产生阶梯波形,因此必须设置复位。检测器的输出是相位的周期函数,在相位检测器的输出端,与相位变化  $2\pi + \Delta\Phi_m$  相关的电压变化与  $\Delta\Phi_m$  相同。具体则可以通过数字电路的溢出而得到。

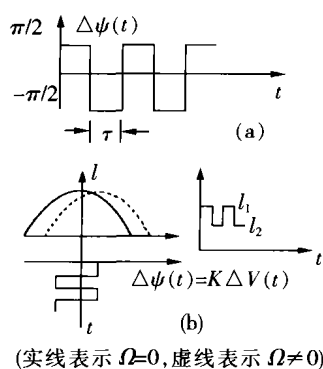


图 2 方波偏置

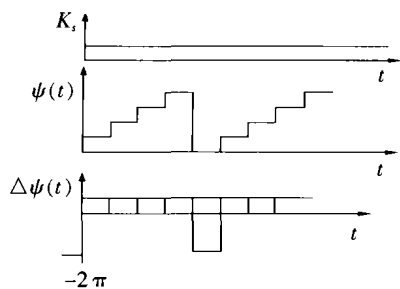


图 3 数字相位斜坡原理

## 2 电路实现

在闭环电路检测系统中,信号检测由前置放大、A/D、DSP、逻辑器件、D/A 及输出部分组成,采用数字信号处理器和逻辑门阵列实现数字解调、滤波、反馈控制。各个部分功能如图 4 所示。

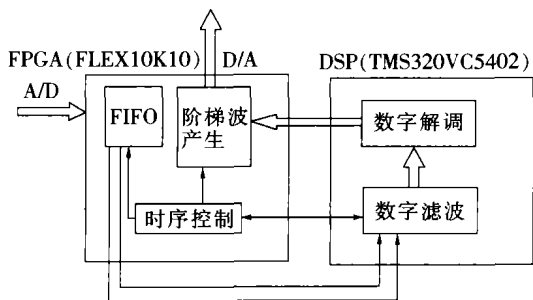


图 4 电路功能方框

在此方案中,A/D、D/A 的位数要有一个合适的选择,通常导航级光纤陀螺的动态范围高达 140 dB,相当于 24 bit 二进制数字。如果用数字闭环时,很容易产生这样一种感觉:认为需要一个高达 24 位的 A/D 来减少最低有效位(LSB)的死区,这样大的位数是不可能的。但幸运的是这并不影响到实际检测,因为 A/D 的采样率一般在 MHz 范围,对应的模拟带宽很宽,它产生的是一个非常重要的白噪声。信号处理理论证明,用稍小于噪声  $\delta$  的 LSB 对模拟信号进行量化就足够了,经数字积分可得到与模拟滤波相同的噪声衰减率,而不存在任何死区和寄生偏差。对于 D/A 位数,只需保证由于 D/A 的有效字长而产生的误差落于正弦响应曲线的线性部分,且 A/D 的位数足以覆盖此线性部分即可。在此方案中采用了 8 位 A/D 和 10 位 D/A。

## 3 结束语

利用高速数字处理器和逻辑门阵列来完成电检测系统,对于光纤陀螺的集成化、小型化非常有利。DSP 作为中心控制和计算的核心器件,运算速度快,算法实现容易,适合做滤波运算和实时控制。在采用较低位数 A/D、D/A 的情况下,可实现陀螺信号检测所需要的大动态范围及高的检测灵敏度。对于更深一步的研究将集中于噪声分析和信号处理的高速实现。

## 参 考 文 献

- [1] 杨培根. 光电惯性技术[M]. 北京:兵器工业出版社,1999.
- [2] 王 巍,张惟叙. 数字式光纤陀螺检测系统研究[J]. 惯导与仪表,1993,5:44-48.