

基于 DSP 的开环光纤陀螺的原理及其关键技术*

刘方楠, 隆冰, 李江涛

(重庆邮电大学 光电工程学院, 重庆 400065)

摘要:介绍了基于 DSP 技术的开环光纤陀螺。开环光纤陀螺以 Sagnac 效应为基础, 是一种新型的全固态陀螺仪, 由于其具有潜在的良好的性价比, 与数字信号处理芯片 DSP 接口简单等优点而倍受青睐, 一经出现就受到世界各国的高度重视, 已经成为新一代中低精度制导系统、国防装备中的理想惯性器件。

关键词:光纤陀螺; DSP; 开环控制

中图分类号: TN248

文献标识码: A

文章编号: 1673-825X(2007)增-0028-04

Principle and key technology of open-loop fiber optical gyroscope based on DSP

LIU Fang-nan, LONG Bing, LI Jiang-tao

(College of Optoelectronic Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, P. R. China)

Abstract: An open-loop fiber optic gyroscope (FOG) using DSP technique is presented. The open-loop fiber optic gyroscope is a new kind of gyroscope with unique entirely solid state and is based on the effect of Sagnac. With its advantage of having latent and best function/price ratio and easily interface to the digital signal processing device, it has been highly valued and noticed by the countries all over the world. Now it has been an ideal inertial instrument of a new generation with middle and low precision used to navigation system and national defence.

Key words: fiber optical gyroscope; DSP; open-loop control

0 引言

光纤陀螺是基于 Sagnac 效应的光学陀螺, 是以激光为光源, 用光纤构成环形光路来检测正反两束光随光纤环转动而引起的相位差, 由此计算出惯性空间的转动速度^[1]。自 1976 年, 美国 Utah 大学的 Vali 和 Shorthill R. W. 提出光纤陀螺的设想并进行光纤陀螺演示实验以来^[2], 经过 20 多年的努力, 光纤陀螺得到了迅速的发展, 出现了多种类型和结构的光纤陀螺方案, 并已广泛应用于军事和民用领域。

1 应用背景

和普通的机械陀螺相比, 光纤陀螺具有以下优点: (1) 无运动部件, 仪器牢固, 耐冲击和加速度; (2) 结构简单, 零部件少, 成本低; (3) 启动时间短, 检测灵敏度和分辨率高; (4) 动态范围宽; (5) 输出信号可直接为数字信号, 与其它仪器接口方便; (6)

寿命长, 输出信号稳定; (7) 体积小, 便于集成。同时与激光陀螺相比光纤陀螺将几百甚至上千米的光纤绕成光纤环, 增加了检测光路, 提高了灵敏度和分辨率, 而且节省了相当多的成本。因此光纤陀螺在国防装备、航空航天、以及民用等领域都有着非常广泛的应用, 如炮弹制导、飞机和车载导航系统、雷达天线稳定及寻北装置等。尤其在国防领域, 光纤陀螺作为惯性武器系统最关键的元件, 有着不可替代的作用。惯性技术作为武器系统的重要信息源和核心技术之一, 对提高部队快速机动能力、实施精确打击、提高自我生存能力具有重要作用。光纤陀螺及其系统由于具有很多优点, 代表了未来中高精度惯性器件和惯性系统的发展趋势, 它的使用将使得武器平台在高技术局部战争中发挥更大的效能, 对我国国防装备整体性能的提高发挥巨大作用。

光纤陀螺可分为闭环陀螺(集成光纤陀螺)和开

* 收稿日期: 2007-04-15

作者简介: 刘方楠 (1982-), 男, 黑龙江哈尔滨人, 硕士研究生, 主要从事光纤通信研究以及相关的硬件电路设计。E-mail: liufangnan2001@126.com

环陀螺全光纤陀螺(全光纤陀螺)2种^[1]。闭环陀螺的成本高,属于中高精度陀螺;开环光纤陀螺与闭环结构相比,具有结构简单、成本低的优点,是目前国际上重点研究的光纤传感器之一。

2 开环光纤陀螺理论分析

2.1 系统框架

传统的开环光纤陀螺的信号处理方式是模拟的,它是一个解析法近似。因此,我们设计了基于DSP的光纤陀螺的数字信号处理系统和方法,其电路简单、功耗小、易于集成、线性度高、标度因子和偏置稳定,并提供了更灵活的设计规则,易于与外部数字处理器接口,可靠性高,重复性好,数据采集过程中不需人工操作,用软件完成的控制和补偿算法可以很容易的调试和修改,以适应不同的应用场合。开环光纤陀螺有两大部分组成:光学部分和控制回路部分。光学部件包括光源 SLD,光探测器,耦合器,偏振器,PZT 相位调制器,光纤线圈环;控制回路部分按功能可分为:解调、滤波、数字信号处理器、调制信号发生器和控制电路等,其工作原理是 Sagnac 效应,反馈执行器件是相位调制器,传感器为光电探测器。开环光纤陀螺原理框图见图 1。

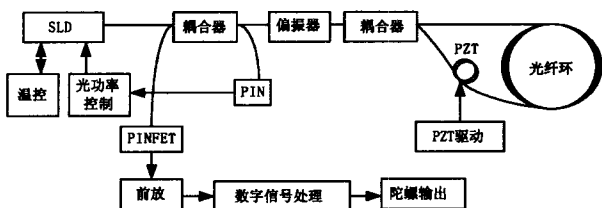


图 1 开环光纤陀螺原理框图

2.2 理论分析

开环光纤陀螺光学部分是一个 Sagnac 干涉仪,其干涉输出信号为:

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

(1) 式中, I_0 为光纤陀螺干涉光强; ϕ_s 为 Sagnac 相移 ($\phi_s = K \cdot \Omega$, Ω 为输入角速度, K 为陀螺标度因数); $\phi_m \sin(\omega_m t)$ 为压电陶瓷相位调制器产生的正弦相位调制, ϕ_m 为相位调制深度, ω_m 为正弦调制频率。用 Bessel 函数展开(1)式,得到:

$$I = I_0 [1 + \cos\phi_s J_0(\phi_m)] + I_0 \cos\phi_s \cdot$$

$$2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n}(\phi_m) \cos(2n\omega_m t) +$$

$$I_0 \sin(\phi_s) \cdot 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n-1}(\phi_m) \sin((2n-1)\omega_m t) \quad (2)$$

可见,陀螺输出信号中包含各次谐波分量,奇次谐波幅度与 $\sin(\phi_s)$ 成正比,偶次谐波幅度与 $\cos(\phi_s)$ 成正比。一般有 $1 < \phi_m < 3$, 因此信号中高于 7 次的高次谐波幅度可以忽略不计而只考虑低频分量^[1,3]。利用数字信号处理方法从信号中提取 1 次、2 次、3 次、4 次谐波幅度分别为:

$$S_1 = I_0 J_1(\phi_m) K_1 \sin(\phi_s) \quad (3)$$

$$S_2 = I_0 J_2(\phi_m) K_2 \cos(\phi_s) \quad (4)$$

$$S_3 = I_0 J_3(\phi_m) K_3 \sin(\phi_s) \quad (5)$$

$$S_4 = I_0 J_4(\phi_m) K_4 \sin(\phi_s) \quad (6)$$

假设 $K_1 = K_2 = K_3 = K_4$, Sagnac 相移可根据(7)式得出:

$$\phi_s = \arctan \sqrt{\frac{3}{2} \cdot \frac{S_3(S_1 + S_3)}{S_2(S_2 + S_4)}} \quad (7)$$

利用这种解调方法求 Sagnac 相移,可以消除由外部温度变化引起的光强漂移或压电陶瓷老化等原因引起的调制深度变化,得到的结果与光强以及调制深度无关^[4]。但由于 $S_3 \propto \sin(\phi_s)$ 且 $S_3 < S_1$, 因此在低转速时, S_3 的测量易受噪声干扰,由(7)式计算得到的陀螺漂移和灵敏度性能指标下降,为此采用 1 次、2 次、4 次谐波幅度进行计算

$$\tan(\phi_s) = \frac{J_2(\phi_m) S_1}{J_1(\phi_m) S_2} \quad (9)$$

$$\phi_s = \arctan \left[\frac{J_2(\phi_m) S_1}{J_1(\phi_m) S_2} \right] \quad (10)$$

其中调制深度 ϕ_m 由(11)式算出

$$J_2(\phi_m) / J_4(\phi_m) = S_2 / S_4 \quad (11)$$

开环光纤陀螺数字信号处理流程图如图 2 所示。

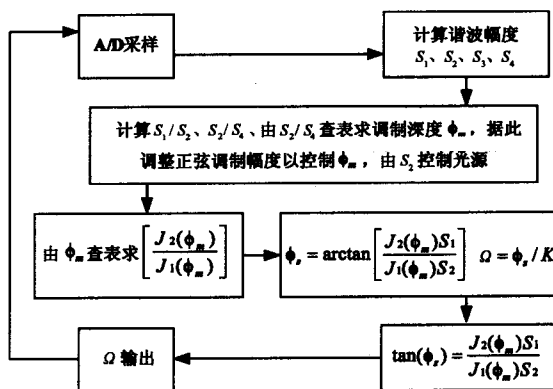


图 2 开环光纤陀螺数字信号处理流程图

2.3 数字信号处理设计

开环光纤陀螺数字处理系统方框图如图 3 所示。用于光纤陀螺的电路控制系统包括数字信号处理器和由 DSP 控制的数字合成器 DDS, 它提供了时钟频率 f_c , 该频率为光纤传感器的调制器驱动频率的整倍数。时钟频率可由分频器产生步阶选择, 遵守下面的频率关系, $f_{Nm} = N \times f_m$, 其中 f_m 是 PZT 相位调制器的驱动频率。第 2 个分频器对合成频率 f_{Nm} 进行 N 分频产生 PZT 调制频率 f_m 。合成频率 f_{Nm} 还可用为 A/D 转换器提供时钟频率, 因而调制频率的基波和 3 次谐波的采样可以用 N 个连续的 A/D 转换得到。光探测器探测光纤陀螺输出的光通过一个低通滤波器以消除噪声起伏交叠和混杂, 高于 4 次谐波的高次谐波的振幅明显低于较低次谐波的振幅。温度传感器用来探测陀螺的温度特性, 来自温度传感器的信号和来自探测器的信号一起进入复用器, 混合后的信号提供给 DSP 作为输入信号。由于温度传感器有着较低的采样速率, 需要使用一个单独的 A/D 转换器。

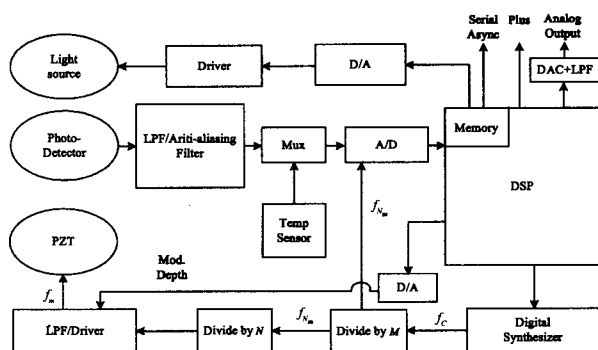


图 3 开环光纤陀螺数字处理系统方框图

电流驱动源为陀螺光源提供电流。由于光源的效率随温度而变化, 且陀螺中的光损耗也有小的变化, 导致光源驱动电流随温度的变化而变化, 所以用 DSP 来控制光源驱动电流, 由 D/A 变换器将 DSP 的数字控制信号转换成模拟控制信号。光源调制深度可以在 D/A 变换器的输出端得到, 将其提供给驱动器以调节 PZT 调制器的调制深度。由 DSP 来提供代表光纤陀螺速率的输出信号可以以各种形式, 比如: 串行异步方式和 / 或脉冲输出^[5,6]。

3 开环光纤陀螺信号处理的难点

3.1 动态范围

对于开环光纤陀螺, 一般其标度因素 K 为 0.1

~ 0.5 。例: 光纤长度 $L = 100$ m, 光纤环直径 $D = 60$ mm, 光源波长 $\lambda = 1.31 \mu\text{m}$, 则 $k = 2\pi LD/\lambda c \approx 0.1$ 。假设开环光纤陀螺应用时的角速度范围为 $1^\circ/\text{h} \sim 500^\circ/\text{s}$, 则相应的 Sagnac 最小相移为 $10^{-6} \sim 10^{-7}$ rad, 最大相移接近 $\pi/2$ rad, 因此一次谐波幅度 S_1 变化范围为 $10^6 \sim 10^7$ 。要在 $10^6 \sim 10^7$ 动态范围内准确测量各次谐波幅度, 有 2 种解决办法: 一是采用高精度 A/D, 其转换位数至少为 21 位; 二是采用可编程增益放大器以降低对 A/D 的要求, 但这种方法对标度因素线性度有很大影响。开环光纤陀螺压电陶瓷调制频率一般在 $50 \sim 100$ kHz 之间, 因此 4 次谐波频率为 $200 \sim 400$ kHz, 这样对 A/D 采样也提出了较高要求。通过对系统进行仿真, 采样频率为基频 8 倍时候的时域和频域图, 波形基本没有失真 (见图 4), 而采样频率为基频 4 倍时候已经失真, 这个时候只能看到基频 (见图 5)。

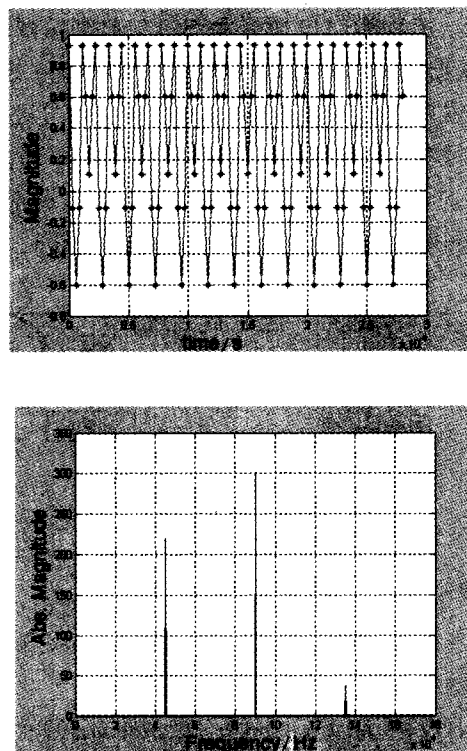


图 4 采样频率为 8 倍基频时域图、频域图

3.2 调制非线性对陀螺的影响

在理想情况下, 压电陶瓷调制中只包含调制频率 ω_m 的正弦波, 但实际上由于调制源与压电陶瓷的非线性, 调制中会有寄生的 2 次谐波, 该 2 次谐波使得陀螺解调中有一个非零的偏置, 如果寄生的 2 次谐波不稳定, 则零偏也不稳定^[7,8]。对寄生的 2 次谐波的基本要求是其幅度比基频调制幅度小 120

dB,要满足这一点是非常困难的。

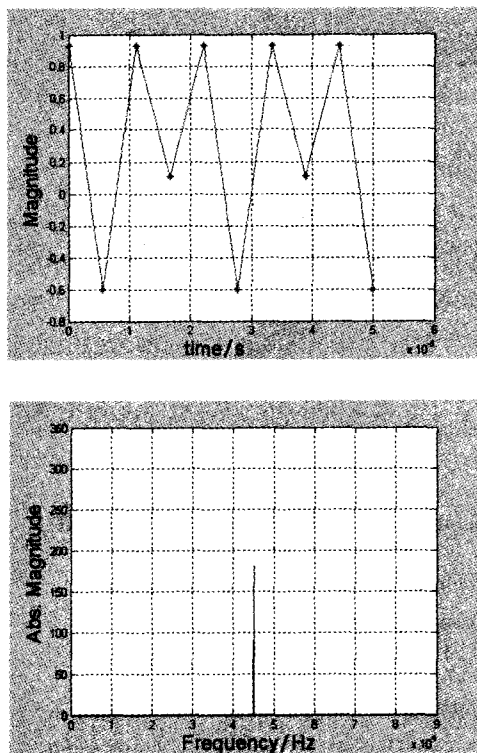


图5 采样频率是基频4倍时候的时域图、频域图

3.3 谐波提取算法

提取 S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 次谐波幅度可以采用 FFT 算法,但是由于静态时 S_1 与 S_2 、 S_4 的幅度相差很大,只要 FFT 中存在很小的谱泄漏,就会严重影响 S_1 的测量精度,必须对算法进行改进。

4 结论

低成本的开环光纤陀螺由于其独特的技术优势和价格优势有着广泛的军事和民用需求。采用先进的数字信号处理技术,可以使开环光纤陀螺在大的动态范围前提下进一步提高精度^[9]。经过多年研究,我国已经在光纤、集成光学器件、无源器件等关键技术取得明显进展,并且完成了全保偏闭环光纤

陀螺、低精度开环陀螺仪及光学反馈光纤陀螺等多种研制方案。目前光纤陀螺正在进行工程化攻关研究,主要解决工程化过程中存在的问题,如系统结构优化、零启动、热平衡、温度影响、长时间工作的稳定性、信噪比等。可以说基于 DSP 的开环光纤陀螺技术有着非常重要的研究价值和广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 张桂才,王巍. 光纤陀螺仪[M]. 北京:国防工业出版社,2002.
- [2] GRONAU Yuval, TUR Moshe. Digital Signal Processing For An Open-Loop Fiber-Optic Gyroscope[J]. Applied Optics,1995,34(25):5 849-5 853.
- [3] 常胜利,陈哲,胡永明. 用于光学相位检测的数字信号处理系统[J]. 半导体学报,1999,20(3):201-204.
- [4] 谢元平,宋章启,姚琼. 相位调制非线性对开环光纤陀螺工作点测量与信号解调的影响[J]. 中国激光,2004,31(7):848-850.
- [5] BOEHM K, PETERMANN K. Signal processing schemes for the fiber-optic gyroscope: Fiber optic gyros: Proceedings of the Tenth Anniversary Conference, Cambridge, MA, Sept. 24-26, 1986 [C]. Bellingham, WA, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, c1987:36-44.
- [6] SANDER G A, SZAFRENINEC B, LIU R Y, et al. Fiber optic gyros for space, marine and aviation [J]. SPIE, 1996, 2837:61-71
- [7] 常胜利,宋章启,孙俊. 实用型光纤陀螺系统工作点的选定和稳定技术的研究[J]. 应用激光,2002,22(4):385-388.
- [8] 牟旭东. 开环光纤陀螺数字解调的实现与探讨[J]. 压电与声光,2000,22(6):360-362.
- [9] 宋章启,谢元平,姚琼,等. 开环光纤陀螺的研究与应用进展[J]. 光学技术,2005,31(9):426-429.