

文章编号: 1671-1041(2005)01-0016-02

光纤陀螺技术研究

关炳新, 赵颖

(六九一六仪器厂 惯性研究室, 河北 廊坊 065000)

摘要: 介绍光纤陀螺原理、集成光器件及相关检测技术。

关键词: 光纤陀螺; 闭环检测; 相关检测; DSP

中图分类号: V241.5 文献标识码: A

The research of fiber optic gyros

GUAN Bing-xin, ZHAN Ying
(Factory of instrument No.6916,
Hebei Langfang 065000)

Abstract: This paper deals with the basic operation principle of fiber optic gyros, integrated optic device and the technique of correlative detect.

Key words: Fiber Optic Gyros (FOG); closed loop detect; correlative detect; DSP

1 引言

早期的陀螺是全机械式的。自从 1913 年法国科学家 George Sagnac 发现 Sagnac 效应的光学现象以来, 人们一直在致力于研制光学陀螺, 以克服机械式陀螺的不足, 并研制出了环形激光陀螺, 但其在低角速度时存在自锁现象, 为了克服这一缺憾, 1976 年美国人 V.Vali 和 R.Shortbill 报告了他们利用 Sagnac 效应研制的光纤陀螺实验系统, 从而为光学陀螺的发展开辟了全新的领域。光纤陀螺是一种完全静止型、纯光学的陀螺, 它解决了环形激光陀螺的自锁现象, 有非常高的分辨率, 可广泛应用于飞机、舰船、火箭、卫星、汽车、石油钻探以及机器人系统等方面的摇摆检测、方位检测、自动稳定及自动操纵, 有着巨大的发展前景和应用潜力。

在 20 世纪 80 年代中期, 光纤陀螺已得到了长足的发展, 干涉式光纤陀螺已经解决了短期噪声、长期漂移、标度因子的线性度及稳定度等方面的技术问题。研究重点正转向工程实用化。

2 基本工作原理

干涉型光纤陀螺的工作原理是基于 Sagnac 效应。来自光源的光被光分/合器分成两束, 分别从光纤环的两端耦合进光纤环, 沿顺时针、逆时针方向传播, 从光纤环两端出来的两束光, 再经过光分/合器叠加产生干涉。当光纤环处于静止状态时, 从光纤环出来的两束光的光程差为零; 当光纤环以角速度 Ω 旋转时, 顺时针、逆时针方向传播的两束光的光程差 ΔL 可表示为: $\Delta L = 2LR\Omega/c$; 相位差 $\Delta \varphi$ 可表示为: $\Delta \varphi = 4\pi \Omega LR/c\lambda$ (L 为光纤环长度、 R 为光纤环半径、 c 为光速、 λ 为光波长), 这样便可通过检测相位差 $\Delta \varphi$ 来获得角速度 Ω 的值。

干涉型光纤陀螺的输出是上升的余弦响应, 为了获得高灵敏度, 必须采取调制/解调技术来实现偏置, 从相位调制器引入一个非互易性的相移反馈形成闭环系统以抵消由旋转产生的 Sagnac 相移, 并使陀螺始终工作在零点。常规的模拟解调技术存在严重的偏置漂移, 而全数字处理技术则提供了理想途径, 因为数字电路不存在电流、电压波动和温度变化引起的偏置漂移, 而且易于实现电路的小型化和集成化。

3 光纤陀螺全数字闭环检测系统分析

图 1 所示为数字化光纤陀螺闭环系统的框图, 光学部分由光源、耦合器、光纤线圈、多功能集成光器件和光电探测器组成。多功能集成光器件中包括偏振器和相位调制器。调制信号和反馈的相位零化信号之和由相位调制器引入光纤线圈中; 偏振器的作用是将光路中具有相同偏振态的导波取出, 以减少由于偏振态不同所带来的误差。光纤陀螺输出信号由光电探测器将光信号转换成电信号并输出。

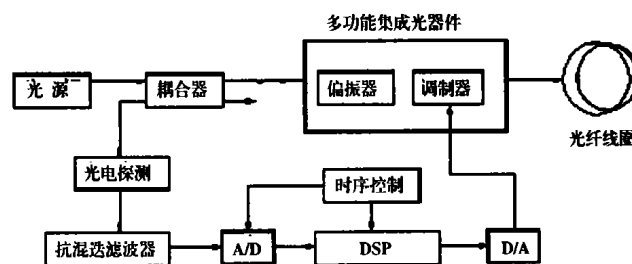


图 1 数字化光纤陀螺闭环系统框图

信号处理部分由抗混迭滤波器、时序控制、信号处理单元 DSP、A/D 和 D/A 等部分组成。为了避免采样后混迭, 必须采用抗混迭滤波器将所需频带以外的频带滤除。时序控制电路完成信号处理部分的同步工作。信号处理单元由 DSP 及其外围芯片组成, 主要完成信号的频谱分析、数字解码、数字调制和相位零化等功能, 这部分的原理框图如图 2 所示。

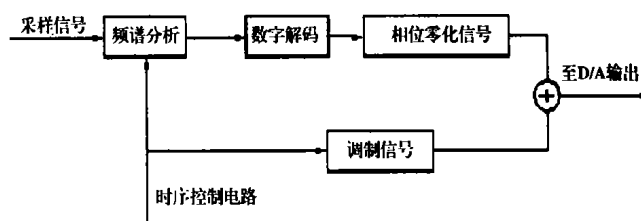


图 2 信号处理单元原理图

3.1 相关检测的基本理论

同步相关检测是光纤陀螺信号检测的主要技术, 采用这种测试方法可以在很大程度上提高输出的信噪比。实现同步相关检测的仪器称为锁相放大器, 数字闭环光纤陀螺的检测电路就是一种数字锁相放大器。

同步相关检测技术建立在信息论和随机过程的理论上, 是从强噪声中提取弱信号的重要手段。如果被测信号的重复周期或频率确定, 就可在接收端发出一个周期与发送信号相同的“干净的”本地信号, 将本地信号与混有噪声的输入信号进行相关就能提高电路的抗干扰性能。

设输入信号

$$f_1(t) = s_1(t) + n(t) \quad (1)$$

本地信号为

$$f_2(t) = s_2(t) \quad (2)$$

则互相关函数为

收稿日期: 2004-08-11

$$\begin{aligned}
 R_{12}(\tau) &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T f_1(t) f_2(t-\tau) dt \\
 &= \lim_{T \rightarrow \infty} \left[\frac{1}{2T} \int_{-T}^T s_1(t) s_2(t-\tau) dt + \frac{1}{2T} \int_{-T}^T n(t) s_2(t-\tau) dt \right] \\
 &= R_{s_1 s_2}(\tau) + R_{ns_2}(\tau) = R_{s_1 s_2}(\tau)
 \end{aligned}$$

可以看出：由于随机噪声的平均值为零，信号与噪声的互相关函数为零，因此互相关接收只有信号与本地信号的相关输出，去掉了噪声项，因此它的输出信噪比高。

3.2 数字锁相放大器设计

锁相放大器就是利用互相关原理设计的一种同步相关检测仪，一般用于检测周期的正弦或方波信号。它由相关器、信号通道、参考通道组成。

在数字闭环光纤陀螺中，被测信号是直流信号，需进行调制，调制后的被测信号为 $I=I_0(1+\sin\varphi_0)$ ，式中描述的是一个叠加在直流 I_0 上的振幅为 $I_0\sin\varphi_0$ 的方波信号，由信号傅立叶变换则有：

$$F(n\omega_0) = \frac{I_0 \sin \varphi_0}{2} \left(\frac{\sin \frac{n}{2} \pi}{\frac{n}{2} \pi} \right)$$

说明调制后的输出信号只含有奇次谐波分量，且 $2n+1$ 次谐波的含量是基波的 $1/2n+1$ 。

信号通道由滤波器及放大器组成。当检测正弦波时，信号通道为带通或低通滤波器，可使噪声限制在基波等效噪声带宽内，提高信噪比。但对于方波信号，在滤掉噪声的同时也滤掉了方波中的谐波分量，因而不能改善输出信噪比，因此，信号通道应设计为低噪声、高增益、宽带宽的前置放大器。

3.3 A/D 变换的量化位数

通常导航级光纤陀螺的动态范围高达 140dB，相当于 24bits 二进制数字。当采用数字闭环方案时，一般认为需要一个 24 位的 A/D 转换器来减小最低位 (LSB) 的死区。而经过分析并不需要如此高位数的 A/D 转换器。因为 A/D 转换器的采样频率在 MHz 范围，对应的模拟带宽很宽，它是一个重要的白噪声。信号处理理论证明，用小于噪声值 σ 的 LSB 对模拟信号进行量化就足够了，经数值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。例如，噪声的典型值为 $10^{-6}\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$ ，即相关光功率值为 $10^{-6}\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$ ，如果模拟带宽为 1MHz，则值 σ 变成 $\pi/2$ 偏置功率的 10^{-3} ，也就是说要转换整个动态范围功率的模拟量而没有任何死区，用 11 位 A/D 就可以。

由于方案中的 A/D 转换及数字解调只关心信号的交流量，而与 $\pi/2$ 偏置得直流流量无关，因此可以偏离直流模拟量，而只对交流量进行量化、解调，从而不可以进一步降低对 A/D 转换器位数的要求。于是整个系统的数字位数可由 A/D 和 D/A 两部分共同分担，只需保证由于 D/A 转换的有效字长而产生的误差落于正弦相应曲线的线性部分，且 A/D 转换的位数足以覆盖此线性部分即可，而不必对 A/D 和 D/A 都提出太高要求。

3.4 光纤陀螺的集成光学器件

集成光学是由 Miller 在 1969 年首先提出，集成光学的基础是导波光学。目前集成光学器件主要是无机晶体，如 LiNbO_3 、 LiTaO_3 等；还有半导体量子阱、超晶格新型材料，如：GaAs 及其它 III - V、II - VI 族化合物；以 Si 及其氧化物为基底的集成光路的研究也十分活跃。

无机晶体中 LiNbO_3 晶体具有大的电光、声光及非线性光学系数，材料的化学性能稳定，晶体生长成本低且易长出大尺寸的单晶

等优点而广泛用于制造各种光波导器件，成为集成光学最常用的无机介电晶体材料。目前在 LiNbO_3 晶体上制备光波导的通常方法有两种：一种是十分成熟的钛扩散工艺，另一种是较成熟的质子交换技术。

自 1982 年 Jackel 首次报道了用质子交换制备 LiNbO_3 波导以来，国内外对质子交换 LiNbO_3 波导进行了广泛的理论和实验研究。与成熟的钛扩散技术相比，质子交换技术不但简便、快捷，而且用它制备的 LiNbO_3 波导具有较小的波导损耗、较强的抗光损伤能力、较大的异常光折射率增量 Δn_e ，较强的光能量控制能力；而且由于质子交换只引起异常光折射率增加，而寻常光折射率会略有减小，这意味着 X 切和 Y 切 LiNbO_3 波导只传输 TE 模，Z 切 LiNbO_3 波导只传输 TM 模，因此与 $\text{Ti}:\text{LiNbO}_3$ 相比，质子交换 LiNbO_3 波导容易实现偏振传输。此外，由于质子交换是一低温过程，人们发现用纯质子源制备的 LiNbO_3 波导仍存在一些严重的问题：如电光系数下降、传输损耗仍偏高、折射率分布不稳定。但采用合适的缓冲质子源或对交换后的波导再进行退火处理（简称 APE 波导），上述问题有可能得到解决。与采用缓冲质子源相比，退火工艺不但可以减少波导的制作时间和降低难度，而且能对折射率分布进行设计，从而构造模场分布。

美国光子技术联合公司 (UTP) 是具有代表性的铌酸锂 (LiNbO_3) 集成光器件生产制造商，它目前为光纤陀螺提供的 1300nm 波长质子交换 Y 分支铌酸锂光波导器件主要技术指标为：

插入损耗 (芯片)	2.0dB ~ 2.5dB
插入损耗 (带尾纤)	2.5dB ~ 3.5dB
分光比 (芯片)	48/52
分光比 (带尾纤)	47/53
偏振消光比 (芯片)	>70dB
偏振串音 (带尾纤)	<-35dB
光背向反射	<-65dB
半波电压	4.0V ~ 4.5V
强度调制	0.02% ~ 0.05%

光子技术联合公司 (UTP) 的铌酸锂光波导器件有完整的可靠性保障，它按照美国军标 MIL45208 和 ISO9000 实施其质量控制程序。

4 结束语

全数字光纤陀螺信号处理技术具有简单、灵活、误差小的特点。该技术消除了使用模拟电路引起随机漂移的弊端。采用 DSP 芯片，极大地提高了信号的实时处理速度。采用数字化、微型计算机技术和集成光学器件是光纤陀螺走向实用的关键一步，在采用较低的 A/D、D/A 转换位数的情况下，可以实现陀螺信号检测所要求的大动态范围及高的检测灵敏度，并在零漂及标度因子线性度等方面具有其他方案无法比拟的优点。●

参考文献

- [1] Herve C.Lefevre. The Fiber-Optic Gyroscope. 国防工业出版社, 2002.
- [2] 刘瑞复, 史锦珊. 光纤传感及其应用 [M]. 机械工业出版社, 1987.
- [3] 王巍, 张惟叙. 数字式光纤陀螺检测系统研究. 惯导与仪表, 1993.
- [4] 牟琼. 光纤陀螺的研究现状和发展趋势. 半导体光电, 1994,15(2):112 ~ 116
- [5] 林锡源, 张佳才, 杨清生, 魏丽萍. 全数字闭环光纤陀螺噪声分析和光路设计探讨. 导航, 1997,34(2):75 ~ 82
- [6] 曹泽煌. 集成光学干涉仪光纤陀螺. 半导体光电, 1995,16(3):214
- [7] 吕宗祺. 光纤陀螺. 航空电子技术, 1995,(4):35 ~ 42

作者简介：关炳新，男，六九一六仪器厂工程师；赵颖，女，六九一六仪器厂工程师。