

具有中等精度的全数字闭环保偏光纤陀螺仪

张桂才 杨清生 林锡源 魏丽萍

(航天工业总公司13所 北京100854)

摘要 报道了一种采用Y分支多功能集成光路和全数字处理技术的具有中等精度的闭环保偏光纤陀螺。测试结果表明,零偏稳定性为 $0.4(^{\circ}/h)$,在整个 $\pm 300(^{\circ}/s)$ 的测量范围内,标度因数稳定性优于 800ppm 。该光纤陀螺仪结构简单,精度高,动态范围大,适合于捷联惯性组合导航系统的应用。

关键词 惯性仪表 闭环保偏光纤陀螺 Y分支多功能集成光路

1 引言

光纤陀螺(FOG)是一种以Sagnac效应为基础的新型全固态惯性仪表,其潜在精度几乎可以覆盖目前机电陀螺的大部分应用领域^[1]。对于战术级应用而言,不仅要求FOG体积小,重量轻,而且其零偏稳定性要达到 $0.1(^{\circ}/h)$,在一个大的动态范围内标度因数误差优于 100ppm 。从理论上讲,这存在一定难度,因为FOG的检测灵敏度与光纤线圈的几何尺寸成正比,光纤越长,精度越高,体积也势必增大。本文报道了一种采用Y分支多功能集成光路和高双折射光纤线圈等组成的全数字闭环光纤陀螺,表头直径为 70mm ,高 30mm 。与消偏式光纤陀螺相比,这种Y集成型FOG结构简单,元件数量和融接点数量均减少了一半,易于小型化;同时集成光路的退火质子交换波导和保偏光纤提供很好的偏振消光,降低了偏置漂移,确保陀螺有较高的精度。近期测试结果表明,FOG的零偏稳定性为 $0.4(^{\circ}/h)$,在整个 $\pm 300(^{\circ}/s)$ 的测量范围内,标度因数稳定性优于 800ppm 。

2 Y分支多功能集成光路(MFIOC)

全数字闭环光纤陀螺是光纤环的本征频率($f_m = 1/(2\tau)$, τ 为光纤环传输时间)上对光波进行调制,对于长度为 500m 的光纤线圈,调制频率达 200kHz ,采用PZT调制器是无法实现的。铌酸锂集成光学器件具有插入损耗小、驱动电压低、调制带宽大、易于大型化和批量生产等

优点,已成为研制中、高精度光纤陀螺的首选方案。Y分支多功能集成光路的结构如图1所示,共集成了一个偏振器、一个耦合器和两个相位调制器,具有较高的集成化程度。器件是在X切铌酸锂晶体上采用退火质子交换法(APE)制成,只传输TE模的偏振分量,本质上也是一种保偏器件,与其后端的高双折射(保偏)光纤线圈完全兼容。Y分支张角为 1.5° ;芯片端面被抛光成 10° 的倾角,以避免波导/光纤界面的背向反射光。MFIOC的主要性能指标见表1,封装尺寸为 $40 \times 10 \times 4 \text{mm}$ 。

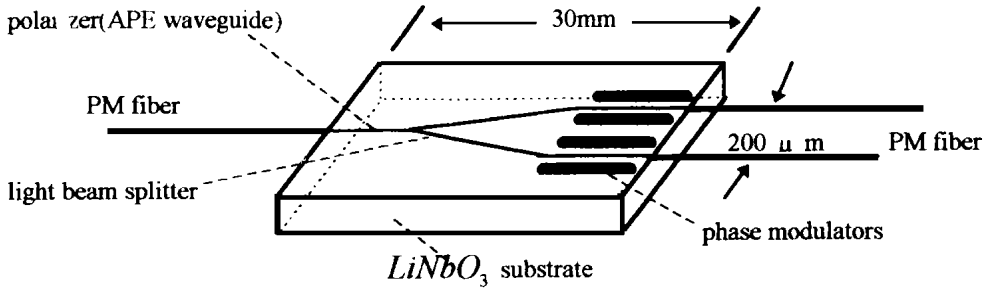


Fig. 1 Y-junction multi-function LiNbO_3 integrated optics circuit (MFIOC)

Table 1. MFIOC: performance and parameters

excess loss	7.5 dB
y-junction light splitting ratio	$50 \pm 3\%$
half-wave voltage	5.5 V
polarization cross coupling (pigtailed)	$< -30 \text{dB}$
residual intensity modulation ($V_{2\pi}$)	0.1%
back-reflection	$< -60 \text{dB}$
modulation bandwidth	$> 200 \text{MHz}$

退火质子交换铌酸锂波导的偏振消光比可达 -60dB ,有利于提高陀螺性能,是其它类型偏振器所不及的。这种波导与保偏光纤偏振主轴之间的对准误差 ξ 同样会产生偏振交叉耦合。比如, $\xi=5^\circ$ 时,偏振交叉耦合达 -20dB ,大于整个光纤线圈中成对的交叉耦合点产生的强度型偏振噪声。鉴于此,我们要求带尾纤的MFIOC的偏振交叉耦合指标优于 -30dB (即 $\xi < 2^\circ$)^[2]。

由于MFIOC与保偏光纤线圈之间的两个融接点位于Sagnac干涉仪两端的退偏区域外,融接点的偏振主轴对准误差 ξ 不产生振幅型偏振噪声^[3]。在设计光路时,我们使两个融接点至Y分支合光点的距离差大于光纤的退偏长度,则强度型偏振噪声也可以消除。因此,融接点不理想只造成FOG中主偏振波的传输功率衰减,且损耗为 $\alpha = 10 \log \cos^2 \xi$, ξ 较小时,损耗可以忽略不计。

3 闭环保偏FOG样机描述和最佳调相设计

闭环保偏FOG的“最简互易性”光学结构如图2所示,共由五个元件组成:

1) 光源。采用的是 $1.3 \mu\text{m}$ 超辐射发光二极管(SLD),输出功率为 $140 \mu\text{W}/100 \text{mA}$,谱宽(FWHM)约为 40nm 。

2) 3dB 光纤耦合器。用于将返回的光波信号引导至探测器。

3) Y 分支多功能集成光路。主要参数见表 1, 为提高调制效率和保持集成光学芯片的物理对称性(以减少二阶非线性效应), 其中两个调制器采用推挽方式工作。

4) 敏感线圈。是光纤陀螺的核心元件, 其性能直接限制了仪表的精度。为了降低背向瑞利散射、偏振态波动、法拉第地磁场效应等引起的非互易误差和温度漂移, 线圈采用保偏光纤 (PM 光纤) 和“四极”对称技术绕制而成。环圈的偏振(功率)交叉耦合为 -25dB 。

5) 探测器。为跨阻抗高灵敏度 PIN-FET 光接收组件, 响应度为 0.9A/W 。

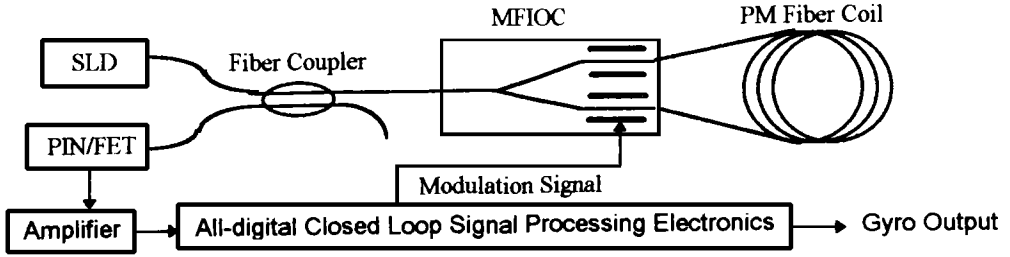


Fig. 2 All-digital closed loop polarization maintaining fiber optic gyro

整个光路的损耗达 26dB , 探测器接收的信号功率约为 300nW 。对应着 $\pm\pi$ 弧度的 Sagnac 相移, 陀螺的动态范围为 $\pm 320(^{\circ}/\text{s})$ 。

电路部分由两块尺寸很小的印刷线路板组成, 包括了前放、滤波、A/D 和 D/A 转换、数字逻辑处理、调制信号生成等全数字闭环处理技术的全部功能。

光纤陀螺开环输出的噪声水平对其闭环性能影响很大。在开环条件下, 光纤陀螺的探测器输出可以表示为:

$$P(t) = \frac{P_0}{2} \{ 1 + \cos[\varphi + \varphi(t) + \varphi(t - \tau)] \} \quad (1)$$

式中 τ 是光纤线圈的传输时间, φ 是旋转引起的 Sagnac 相移, 并有:

$$\varphi = \frac{2\pi DL}{\lambda c} \Omega \quad (2)$$

这里 D 、 L 分别是线圈直径和长度, c 是真空中光速, λ 是平均波长, Ω 是输入角速率。陀螺静止时, 输出信号是一条直线(非理想情况下常含有两倍本征频率的误差脉冲), 平均功率为 $0.5P_0(1 - \cos\varphi_m) = P_0 \cos^2(\varphi_m/2)$, 其中 φ_m 是调制方波的峰值相位; 当陀螺旋转时, 工作点发生移动, 输出变成一个与调制方波同频的方波信号, 其灵敏度正比于曲线在该点的斜率 $dP(t)/d\varphi$ 也即 $\sin\varphi_m$, 因而当 $\varphi_m = \pi/2$ 时可获得最大灵敏度。另一方面, 采用 SLD 的光纤陀螺的检测精度最终受光子散粒噪声限制, 该噪声正比于探测器接收的实际光功率, 亦即有:

$$\frac{\sigma_{shot}}{B} = \frac{hc/\lambda}{2} \cdot P_0 \cdot \cos \frac{\varphi_m}{2} \quad (3)$$

式中 B 为检测带宽, h 为普朗克常数, c 为真空中的光速, λ 是光源的中心波长。因而陀螺光路系统的信噪比正比于 $P_0 \sin(\varphi_m/2)$, 这说明理论上讲 $\varphi_m = \pi$ 时可获得最好的测试结果。

当光路中存在着与主波不相干的偏振交叉耦合波时, 光纤陀螺的输出增加了一项背景噪声, 与 Y 分支多功能集成光路偏振消光性能有关。此外, 由于探测器还有散粒噪声、热噪声及

放大器噪声等,在 $Q_0 = \pi$ 时获最好的测试结果是不可能的。不过当这些噪声特别小时,最佳工作点可能非常接近 π 。由于孤立地测量和评价各种噪声非常困难,我们在实际中利用自行研制的全数字处理电路,通过测量不同调相幅值时开环光纤陀螺的短期零偏稳定性来确定最佳幅值。因为闭环光纤陀螺的短期零偏稳定性也主要由这些噪声决定。实验证明,方波调制的最佳相位幅值为: $Q_0 = 2\pi/3$ 。

4 闭环保偏 FOG

参照国军标对光纤陀螺的零偏稳定性和标度因数性能进行测试。

图 3 是光纤陀螺的西-南-北-东四状态的测试结果。在南向和北向,陀螺敏感轴分别输入了 $+11.5(^\circ/h)$ 和 $-11.5(^\circ/h)$ 的地球自转分量。测得零偏稳定性(东向)为 $0.4^\circ/h(1\sigma)$,其中积分时间 $TS = 5s$,样本长度为 $35min$ 。

在陀螺的整个输入速率范围内,按国标 GB321 规定的 R5 公比递增系列,适当地选择其中 11 个速率档,测量标度因数。图 4 是整个动态范围内的标度因数稳定性。

测试结果为:标度因数非线性为 $746ppm$,不对称度为 $438ppm$ 。五次测量结果表明其重复性为 $631ppm$ 。最大旋转速率为 $\pm 300(^\circ/s)$,受速率转台最大速率限制(理论值应为 $\pm 320(^\circ/s)$)。上述测试中 2π 复位控制是通过实验方法调节的^[4]。

为了考察光纤陀螺在低转速时的标度因数线性度及是否有死区,将陀螺置于速率转台上,使其敏感轴与转台输入轴垂直,转台以 $0.5(^\circ/s)$ 的角速率转动,这样陀螺可以依次经过东、南、西、北四个状态(陀螺敏感轴输入角速率的跨越范围为 $+11.5(^\circ/h) \sim -11.5(^\circ/h)$,并经过 $0(^\circ/h)$ 的点)。测试曲线如图 5 所示,直观上得到下列结论:1)陀螺在 $0(^\circ/h)$ (敏感轴与东向或西向一致时)附近不存在死区;2)陀螺的阈值很小;3)低转速时的标度因数线性度也很好。

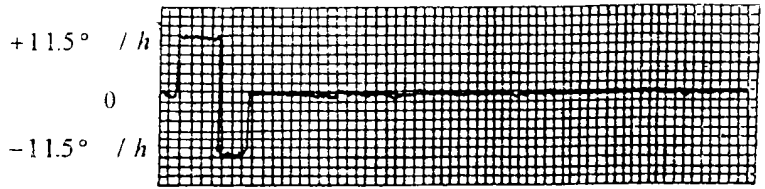


Fig. 3 Test result of bias stability of closed loop FOG

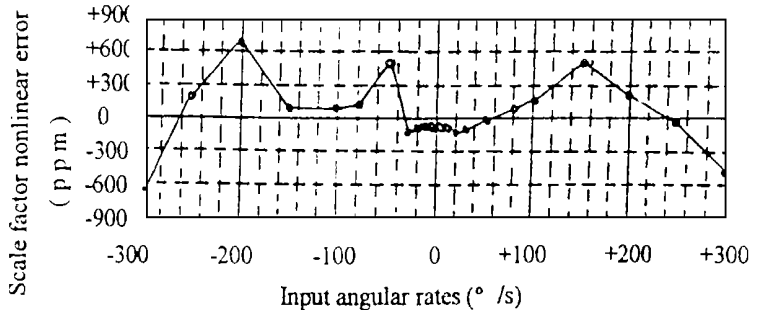


Fig. 4 Scale factor nonlinearity of closed loop FOG

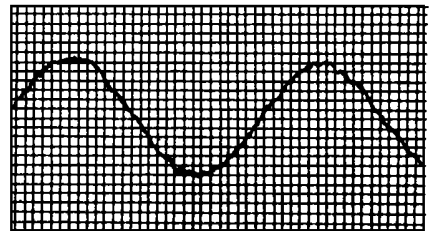


Fig. 5 Output curve of closed loop FOG in low rotation rates

5 限制光纤陀螺性能的因素分析

实验中发现, 光纤陀螺在开环和闭环两种工作状态下都能获得较好的零偏稳定性。闭环工作在一个大的动态范围内改善了光纤陀螺的标度因数稳定性, 但其残余误差仍不能忽视。由于构成纤芯和石英的热膨胀系数很小, 标度因数误差主要来源于调制通道的增益变化和光源平均波长的波动。

H. C. Lefevre 已经分析过, 不考虑其它因素的影响, 调制通道微小的增益变化 ϵ 对标度因数误差产生一种三阶效应(即 $\Delta S(t) \propto \epsilon^3$)^[5]。也就是说, 只要 D/A 转换器的位数足够产生合适的反馈相位阶梯以抵消旋转引起的 Sagnac 相移, 非理想的 2π 复位误差不会严重影响标度因数稳定性。实际上, 2π 复位不仅受调制增益控制, 还与光源的平均波长 λ 有关, 因而上述结论有一定的局限性。波长变化的存在不仅改变了阶梯高和 2π 复位, 而且还改变为 Sagnac 相移, 使调制通道的增益变化对标度因数的影响更加突出(已由三阶效应关系变为一阶效应关系)。鉴于此, 我们采用“四态”方波调制代替以往的方波调制, 通过提取出增益误差信号对调制器的功放增益进行控制。正在进行这方面的初步研究。

迄今为止, 有关波长控制的实用化报道还很少, 而且这种技术较为复杂, 成本也高。值得关注的是, 由于稀土掺杂石英的能级半导体能级稳定得多, 其波长稳定性可以达到几 ppm/°C (而 SLD 的波长变化的典型为 400ppm/°C)。我们认为, 采用宽带掺钕超荧光光纤光源(SFS)是实施波长控制技术的一种最佳选择。

6 结 语

光纤陀螺正逐渐成为惯性制导与测量领域的主流仪表, 集成化是研制中高精度、大动态范围光纤陀螺的一个必然途径。本文对采用 MFIOC 的闭环保偏光纤陀螺进行了研究, 测试结果表明, 零偏稳定性(1σ)为 0.4(°/h), 整个 ± 300 (°/s)的工作范围内, 标度因数线性度优于 800ppm。该方案综合了性能、结构、光学集成和全数字处理(电路成本低、尺寸小)等方面的优越, 适合于高精度的捷联组合导航系统的应用。

参 考 文 献

- 1 Greenspan R J. Inertial navigation technology from 1970- 1995. Navigation, 1996, 42(1) : 165 ~ 184
- 2 林锡源, 张桂才, 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
- 3 张桂才, 杨清生, 林锡源. 光纤陀螺的矩阵光学模型及其在误差分析中的应用. 光子学报, 1996, 25(Z1) : 125 ~ 132
- 4 杨清生, 张桂才, 林锡源. 全数字闭环光纤陀螺 2π 复位误差的实验研究. 光子学报, 1997, 26(Z1) : 138 ~ 142
- 5 Lefevre H C. High dynamic range fiber gyro with all-digital signal processing. Proc SPIE, 1990, 1367: 72 ~ 80

All-Digital Closed Loop Polarization Maintaining Fiber-Optic Gyro with Medium Precision

ZHANG Gui-Cai, YANG Qing-Sheng, LIN Xi-Yuan, WEI Li-Ping
(Beijing Institute of Control Devices, Beijing 100854)

Abstract

In this paper, a polarization maintaining fiber-optic gyro with Y-junction multi-function integrated optics circuit and all-digital closed loop signal processing electronics has been reported. Test results show that the bias stability is $0.4(\text{ }^\circ\text{h})$, and the scale factor linearity is better than 800ppm over the whole dynamic range of the FOG. This compact FOG is a very good candidate for high performance tactical grade applications.

Key words: Inertial device, Fiber-optic gyro, Y-junction integrated optics

张桂才 男, 1964 年出生, 毕业于北方交通大学, 硕士学位。现为航天工业总公司 13 所高级工程师, 从事光纤传感器研究工作。获中国运载火箭技术研究院科技进步一等奖一次、部科技成果三等奖一次。已在有关的专业刊物和全国性专业技术学术会议上发表论文 17 篇。