

无源谐振腔激光陀螺实验系统的研制

肖贵遐 金星

(国防科技大学应用物理系, 长沙, 410073)

摘要: 报道了采用反射型谐振腔结构的无源谐振腔激光陀螺系统。在实验室环境下, 取得了漂移稳定性 1.7deg/h 的性能。指出了引起陀螺漂移的误差因素, 并提出进一步改善陀螺测量精度的措施。

关键词: 激光陀螺 谐振腔 谐振频率

The research of a passive resonator gyroscope system

Xiao Guixia, Ding Jingxing

(Department of Appl. Phys., National University of Defense Technology, Changsha, 410073)

Abstract: A passive resonator laser gyroscope system composed of a reflective ring cavity is reported in this paper. The structure of the passive resonator is different from ordinary passive resonator: (1) there is only one lens in ring cavity to decrease the total loss of the cavity and to obtain much narrow resonative line width; (2) the intensity of the reflective light and the transmission light are minimum and maximum at the resonant centre respectively, so the SNR of reflective light can be greater than the SNR of transmission light; (3) the structure of the system is the compatible with passive resonator optical fiber gyroscope. The system has advanced performance, and its stability of drift is 1.7degree/hour in lab environment. The major reason causing drift is noise and closed loop control error in control circuit.

Key words: laser gyroscope resonator resonance frequency

引 言

目前, 在惯性制导领域, 最具发展潜力的精密惯性转动传感器当属利用 Sagnac 效应^[1] 研制得的光学陀螺。光学陀螺具有各种形式, 如有源谐振腔激光陀螺、无源谐振腔激光陀螺以及光纤干涉仪陀螺等。70 年代末出现的无源谐振腔激光陀螺^[2] 由于环形腔内无增益介质, 因而不存在有源谐振腔激光陀螺中由气体流动、磁场感应等与增益介质有关的效应引起的零点偏

五、结 论

运用显微光学原理与 CCD 技术结合, 实现了光波强衰场中悬浮颗粒的图像放大传输和形状大小的精密检测。实践证明了其正确和可靠。

参 考 文 献

- 1 王永仲. 新光学的计算机设计. 北京: 科学出版社, 1993: 293

作者简介: 王 晓, 男, 1971 年 11 月出生。硕士, 博士研究生。从事光电子技术学习和研究。

收稿日期: 1996-10-26

差漂移。它的这一潜在优势很具吸引力^[3],特别是用光纤与集成波导元件代替其中的分立光学元件后^[4],能使它克服调整困难、抗环境干扰能力差及体积不易缩小等缺点,成为真正小型化的完全固态陀螺。在此报道了我们最近进行的反射型结构的无源谐振腔激光陀螺系统的研究工作。

一、工作原理

根据 Sagnac 效应, 环形谐振腔顺时针和反时针方向的谐振频率 $\Delta\nu$ 正比于环形腔绕垂直其平面的转轴旋转的角速度 Ω :
$$\Delta\nu = [(4A)/(\langle L \rangle \lambda)] \Omega \quad (1)$$

式中, A 为环形腔包围的面积, $\langle L \rangle$ 为环形腔静止时一圈的光程, λ 为光在真空中的波长。通过测量谐振腔顺时针和反时针方向的谐振频率差, 就可求得环形腔的旋转角速度, 对角速度进行积分, 则可进一步求得环形腔的转动角度, 这就是谐振腔激光陀螺的基本工作原理。

二、实验系统

无源环形谐振腔激光陀螺是通过跟踪和探测环形谐振腔的谐振频率来工作的, 如图 1 所示。从单频激光器输出的光被分光镜分成两束, 每一束光在经过声光晶体移频器 (A/O) 后沿一方向输入环形腔。主反馈回路通过相敏调节环形腔的腔长, 使谐振腔的顺时针谐振频率与顺时针传播光 (CW) 谐振频率一致; 次反馈回路也通过相敏调节反时针传播光 (CCW) 频率, 使 CCW 光频率与谐振腔的反时针方向的谐振频率一致。

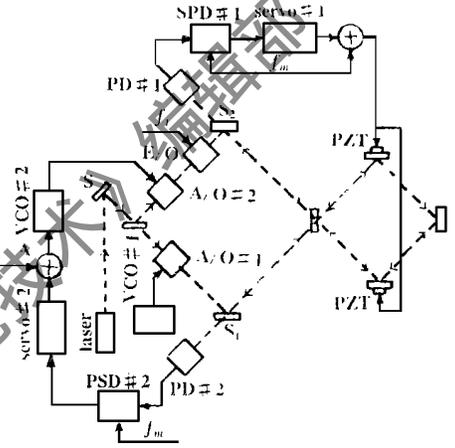


Fig. 1 Schematics of the passive resonant cavity laser gyroscope

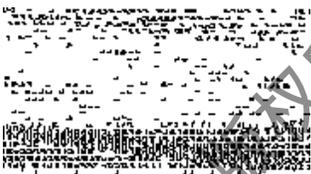


Fig. 2 Picture of the passive resonant cavity gyroscope setup

我们的实验装置如图 2 所示。光源是 0.4mW 的单频 He-Ne 红外激光器, 输出 S 偏振光。声光晶体移频器是中心频率为 100MHz, 可调谐带宽为 1MHz 的布拉格衍射元件, 约有 20% 的能量衍射到一级衍射波上。声光晶体在光路中不仅仅是作移频器用, 它还起着隔离器的作用, 免除从谐振腔反射出来的光束回输进激光光源。谐振腔是边长为 8cm, 谐振线宽约 0.3MHz 的方形环形腔, 除输入输出镜是部分透射镜外, 其余三个腔镜均为全反射镜。两个平面反射镜分别固定在两个压电陶瓷转换器 (PZT's) 上用作腔长对称调节。反馈回路的工作过程如下: 一频率为 f_m , 幅度为 A_m (Hz) 的信号经过 PZT's 调制腔长, 探测器 PD# 1 接收谐振腔的 CW 反射光束, 其输出被相敏解调器 PSD# 1 在频率 f_m 处解调, 然后经过主反馈回路 SERVO# 1 驱动 PZT's 改变腔长, 使谐振腔的顺时针谐振频率锁定到 CW 光频率 $\nu + \nu_1$ (ν 为激光器输出频率, ν_1 为 A/O# 1 的一级衍射频率)。探测器 PD# 2 接收谐振腔的 CCW 反射光束, 其输出被相敏解调器 PSD# 2 解调, 然后经过次反馈回路 SERVO# 2 驱动压控振荡器 VCO# 2 来改变 A/O# 2 的衍射频率 ν_2 , 使 CCW 光频率 $\nu + \nu_2$ 锁定到谐振腔的反时针谐振频率。若为了消除 CW 和 CCW 光所共

有的残留噪声效应, PD# 2 的输出与 PD# 1 的输出差分后才送入 PSD# 2。

我们的实验装置在结构上与普遍采用的无源谐振腔激光陀螺的结构^[5]有所不同, 如图 1 所示, S_1 和 S_2 都为半分光镜, 输入输出为同一个镜, PD# 1 和 PD# 2 接收的是谐振腔的反射光而不是透射光。采用这种结构有几个优点: (1) 环形腔只有一个透射镜, 降低了整个谐振腔的损耗, 使谐振腔线宽变窄。

(2) 由于谐振腔的反射光强在谐振中心为极小值, 而透射光强在谐振中心为极大值, 如图 3 所示, 只要谐振腔输入片的透射率与谐振腔的总损耗适当匹配, 在稳频时反射光的信噪比就大于透射光的信噪比。(3) 这种结构与无源谐振腔光纤陀螺的结构完全兼容, 只需用光纤或集成波导元件代替分立元件, 这种结构的装置就成为无源谐振腔光纤陀螺, 在无源谐振腔激光陀螺中得出的结论基本可移植到谐振腔光纤陀螺中。

三、实验结果

首先, 我们估算图 2 所示实验系统的光子散粒噪声极限测量精度。无源谐振腔激光陀螺中的由光子散粒噪声引起的转速漂移为^[6]:

$$\Omega_{SN} = [(3 - 3\lambda\langle L \rangle \Gamma_e) / (16A\rho)] [1 - 2/3\rho] B / (\eta N_e)]^{1/2} \quad (2)$$

式中, Γ_e 和 ρ 分别为谐振腔的谐振宽度和谐振深度, B 为噪声频率带宽, η 为光探测器的量子效率, N_e 为单位时间输入谐振腔内的光子数。上式表明, 反射型无源谐振腔激光陀螺的散粒噪声极限灵敏度与谐振腔的谐振宽度和谐振深度有着密切关系, Γ_e 越小, ρ 越大, 极限灵敏度越高。谐振腔的损耗决定 Γ_e 的大小, 损耗越低, Γ_e 越小; 而 ρ 则不然, 它取决于透射片的透射率与谐振腔总损耗之间的匹配程度^[6]。

我们测得谐振腔四个片子的总损耗为 1.2×10^{-3} , 透射片的透射率为 0.3×10^{-3} , 经计算得谐振腔的谐振宽度 Γ_e 应为 0.225MHz, 谐振深度 ρ 为 0.64。而我们用锯齿波扫描法(如图 4 所示)实际测得谐振宽度 Γ_e 为 0.29MHz, 基模的谐振深度 ρ 为 0.3。前者是由于谐振腔受到一定污染以及光路不一定通过片子上最低损耗点等原因, 致使谐振腔的损耗增加, 谐振宽度变宽。后者是由于入射模与环形谐振腔之间存在失调, 致使入射基模的一部分能量耦合到谐振腔的高阶横模上^[7], 从而导致基模的谐振深度下降。谐振腔的输入光强为 $10\mu\text{W}$, 光探测器的量子

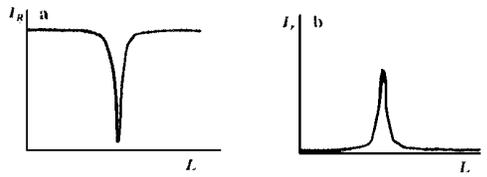


Fig. 3 The reflective intensity I_R (a) and the transmitted intensity I_T (b) of passive resonant cavity as a function of cavity length L

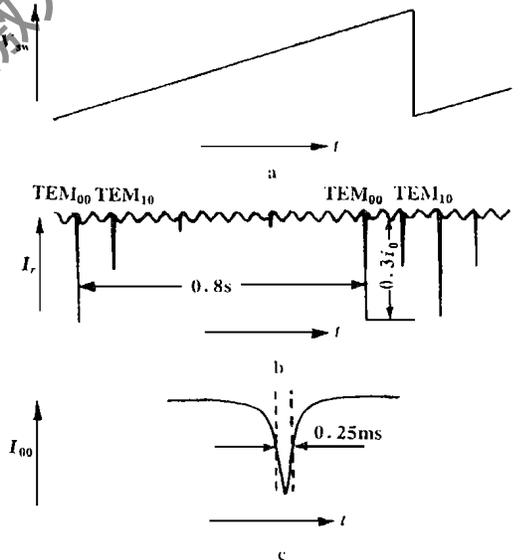


Fig. 4 Measurement of resonance depth and width by sawtooth-wave scan
a—sawtooth-wave scan voltage on PZT b—reflective intensity output of ring cavity c—resonance curve of TEM₀₀ mode

污染以及光路不一定通过片子上最低损耗点等原因, 致使谐振腔的损耗增加, 谐振宽度变宽。后者是由于入射模与环形谐振腔之间存在失调, 致使入射基模的一部分能量耦合到谐振腔的高阶横模上^[7], 从而导致基模的谐振深度下降。谐振腔的输入光强为 $10\mu\text{W}$, 光探测器的量子

转换效率 η 为 0.3, 当采样时间为 1min 时, 由 (2) 式可算出本陀螺系统的光子散粒噪声极限测量精度 Ω_{SN} 约为 0.074deg/h。

图 5 所示为我们在 6h 的时间间隔内测得的陀螺的拍频输出, 取样时间为 1min。图中的数据显示, 陀螺在零点有一固定偏差存在, 平均值为 50.9Hz, 相当于 83deg/h 的转速。拍频偏差的有效值涨落为 1.06Hz, 相当于 1.7deg/h 的零漂。

四、误差分析

我们的测量结果与陀螺的理论极限性能有较大的差距, 说明系统中除了光子散粒噪声外还存在其它误差因素。这些误差因素包括光路中谐振腔的失调、腔镜背散射^[9]以及入射光偏振态的改变, 电路中相敏检波的不完善、各种噪声以及闭环控制误差^[6]。由谐振腔的失调产生的高阶横模, 对作为稳频基准的基模存在频率牵引效应, 从而使实际跟踪和探测到的频率偏离基模谐振频率, 不同的顺时针和反时针的失调最终导致陀螺的拍频偏差及漂移。由于我们采用的是反射型结构的谐振腔, 由高阶横模引起的偏差漂移非常小, 在我们的系统中不足 0.01Hz。腔镜背散射从理论上讲会引起闭锁效应, 但锁区非常小^[6], 而且可通过加相位调制或频率调制消除掉, 如在图 1 所示的反时针输入光路中加 E/O 调制器或在 VCO# 中加调制信号(图中 A 点所示)。在我们目前的测量精度下, 引起陀螺漂移的主要误差因素是电子回路中存在的噪声与闭环系统控制误差。要进一步改善陀螺的性能, 最关键的工作就是提高电路控制系统的检测与控制精度。

五、结 论

至此, 我们已完成了无源谐振腔激光陀螺实验室系统的研制, 取得漂移稳定性 1.7deg/h 的性能。由于采用的是反射型环形谐振腔, 完全模拟了光纤谐振腔陀螺结构, 所以我们的工作无疑为光纤谐振腔陀螺的研究打下了理论和实验基础。

作者衷心感谢国防科技大学高伯龙教授对本项工作的指导。

参 考 文 献

- 1 Sagrac G. Cmppt Rend, 1913; 157: 708
- 2 Ezekiel S, Balsamo S R. A P L, 1977; 30: 478
- 3 Tehrani M M, Hoschette, J A. Proc Soc Photo Opt Instrum Engng, 1983; 412: 234
- 4 Meyer R E, Ezekiel S, Stowe D W *et al.* Opt Lett, 1983; (8): 644
- 5 Zarinetchi F, Meyer R E, Sanders G A *et al.* Proc Soc Photo—Opt Instrum Engng, 1984; 478: 122
- 6 肖贵遐. 无源谐振腔激光陀螺的研究. 国防科技大学博士论文, 1996: 77
- 7 肖贵遐, 丁金星. 激光杂志, 1996; 17: 128
- 8 肖贵遐. 中国激光, 1996; A23: 203
- 9 肖贵遐. 中国激光, 1996; A23: 376

* * *

作者简介: 肖贵遐, 女, 1968年2月出生。博士。现在第一军医大学生物医学工程系从事教学及医疗仪器的研究工作。

收稿日期: 1996-12-31

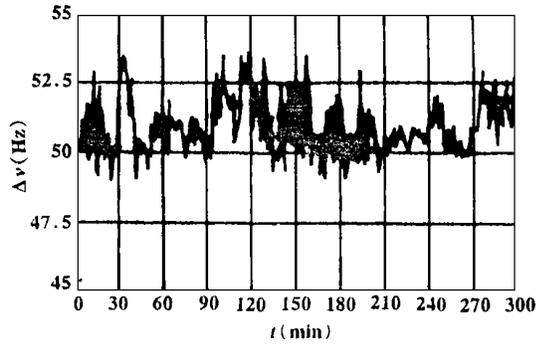


Fig. 5 Beat—frequency output of passive cavity gyroscope vs time with 1 minute sample time