

文章编号: 0253-2239(2001)03-0363-04

再入式光纤角速率传感器的研究*

李芙英¹⁾ 胡朝阳²⁾ 田 伟²⁾

1), 清华大学电机工程系, 北京 100084
2), 清华大学精密仪器系, 北京 100084

摘要: 对新型再入式光纤角速率传感器进行了理论分析与实验研究, 推导了它的光强透过率、灵敏度以及极限分辨率的解析表达式, 分析了环形谐振腔中定向耦合器的耦合比与灵敏度以及极限分辨率的关系, 并依据理论分析, 研制了采用长度为 200 m 环形谐振腔的再入式光纤角速率传感器的实验装置。实验结果表明, 这一实验装置具有 0.2 (°/h) 的常值漂移以及优于 0.1 (°/h) 的零偏稳定性(10 s 积分时间和 10 min 采样样本长度)。

关键词: 再入式光纤角速率传感器; 环形谐振腔; 反射镜

中图分类号: TN253 文献标识码: A

1 引 言

当前, 光纤角速率传感器主要分两种: 萨尼亚克干涉型光纤角速率传感器和谐振腔型光纤角速率传感器。前者需要使用长达几百米到几公里的保偏光纤和宽谱光源^[1]; 而后者虽然缩短了光纤长度, 但为获得高的灵敏度, 需要采用高相干长度光源, 以及复杂的频率跟踪和控制系统。本文提出的新型再入式光纤角速率传感器由环形谐振腔、低相干长度光源和高性能反射镜组成, 它采用更短的光纤, 通过多圈干涉效应, 可获得比相同长度敏感环的干涉型光纤角速率传感器更高的灵敏度^[2]。因为它采用低相干长度光源, 所以它具有干涉型光纤角速率传感器和谐振腔型光纤角速率传感器的优点, 但又不同于谐振腔型光纤角速率传感器。低相干长度光源可以减小瑞利背散射和克尔效应产生的测量误差^[3]。通过将反射镜置于环形谐振腔中方向耦合器的一个输出端上, 使得从环形谐振腔中出射的光波可被反射再次进入该腔中, 这样就实现了光波在环形谐振腔中多圈传输的效应。

2 基本原理

2.1 结构

再入式光纤角速率传感器的结构如图 1 所示。反射镜位于耦合器 C₂ 的一个输出端上, 从而光波可

在环形谐振腔中以顺时针和逆时针两个方向传播; 所采用的光源的相干长度远远小于环形谐振腔的长度^[4]。

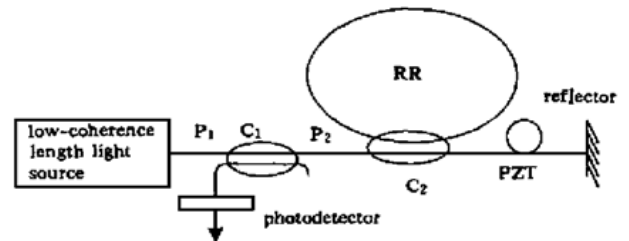


Fig. 1 Structure of the proposed RE-FORS

进入 P₁ 口的光波通过耦合器 C₁ 部分进入 P₂ 口, 然后又通过耦合器 C₂ 进入环形谐振腔中。在环形谐振腔中逆时针方向传播的光被 C₂ 耦合出, 入射到反射镜上。入射到反射镜上的光又会被耦合回到环形谐振腔中。同时, 通过耦合器 C₂ 直接入射到反射镜上的光也会被反射镜反射, 耦合进入环形谐振腔中。由于光源的相干时间远远小于光在环形谐振腔中的传播渡越时间, 因而只有传播相同圈数的两束反向光波对才能干涉, 进一步可得到转动引起的非互易相移。

2.2 灵敏度和极限分辨率的分析

以下公式是根据环形谐振腔的光路理论以及文献[5]的思路推导得来的。由于再入式光纤角速率传感器采用了保偏光纤和保偏光纤耦合器, 为简化分析, 可忽略光纤偏振态的影响。输入光强 E₁ 和输出光强 E'₁ 的关系为

$$E'_1 = \frac{1}{2} E_1 r \left[\alpha^2 t_c^2 - \alpha t_c t_0 \sum_{m=1}^{\infty} R_f^m e^{j[\alpha(t+m\tau) + m\phi_s]} - \right]$$

* “九五”预研重点项目(8.7.1.7)

收稿日期: 1999-07-27; 收到修改稿日期: 1999-12-16

$$\alpha_c t_0 \sum_{n=1}^{\infty} R_f^n e^{j\phi(t+n\tau)-n\phi_s} + t_0^2 \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} R_f^{m+n} e^{j\phi(t+m\tau+n\tau)+m\phi_s-n\phi_s} \quad (1)$$

其中,

$$t_0 = \frac{t_c(1-\alpha^2)}{\alpha}, R_f = t_c t_f \alpha,$$

r 为反射镜的幅值反射系数; α 和 t_c 分别为耦合器 C_2 的幅值耦合比和幅值透过系数; t_f 为环形谐振腔的幅值透过系数; ϕ_s 和 τ 分别为环形谐振腔中的非互易相移和光波渡越时间; m 和 n 分别为环形谐振腔中的光波在顺时针和逆时针方向上传播的次数。(1) 式中的第一项表示再入式光纤角速率传感器输出光强的直流分量; 第二项表示首先耦合进环形谐振腔中逆时针传播, 然后再入射到反射镜上的出射光强; 第三项表示首先入射到反射镜上, 然后再耦合进环形谐振腔中顺时针传播的出射光强; 第四项表示在环形谐振腔中既逆时针传播, 又顺时针传播的出射的出射光强。由于选择其相干长度远远小于环形谐振腔长度的光源, 将有^[5]

$$\langle e^{-j\phi(t+m\tau)-m\phi_s} e^{j\phi(t+n\tau)-n\phi_s} \rangle = \begin{cases} 0, & m \neq n \\ 1, & m = n \end{cases} \quad (2)$$

其中, $\langle \cdot \rangle$ 表示集合平均。再进一步定义光强透过率 $T(\phi_s)$ 为进出口的输出和输入光强的比值

$$T(\phi_s) = \frac{\langle E_1^* E_1' \rangle}{\langle E_1^* E_1 \rangle} = a + b \left[(2\eta + \eta^2 p) + (1 + \eta^2 p - 2\eta q) \frac{2\eta - \Gamma \sin^2 \phi_s}{1 + \Gamma \sin^2 \phi_s} \right], \quad (3)$$

其中,

$$\begin{aligned} a &= \alpha^4 t_c^4 r^2, & b &= t_c^4 r (1 - \alpha^2)^2, \\ \eta &= \frac{R_f^2}{1 - R_f^2}, & p &= \alpha^{-4} (1 - \alpha^2)^2, \\ q &= \alpha^{-2} (1 - \alpha)^2, & \Gamma &= \frac{4R_f^2}{(1 - R_f^2)^2}. \end{aligned}$$

灵敏度 $S(\phi_s)$ 可表示为

$$S(\phi_s) = \left| \frac{dT(\phi_s)}{d\phi_s} \right| = \left| b(1 + \eta^2 p - 2\eta q) \frac{(1 + 2\eta) \Gamma \sin 2\phi_s}{1 + \Gamma \sin^2 \phi_s} \right|. \quad (4)$$

如果引进一个优化的非互易相移 $\phi_{s,opt}$, 可实现 $S(\phi_s)$ 的最大化。因此对(4) 式微分并令结果等于零, 得到

$$\phi_{s,opt} = \frac{1}{2} \arccos \left[\frac{\sqrt{9\Gamma^2 + 4\Gamma + 4} - \Gamma - 2}{2\Gamma} \right]. \quad (5)$$

极限分辨率 $\delta \Omega$ 可表示为^[6]

$$\delta \Omega = \frac{\lambda c}{2\pi RL} \frac{\sqrt{h\nu}}{\sqrt{\eta_d \tau_i}} \frac{\sqrt{T(\phi_{s,opt})}}{\sqrt{P_{in}}}, \quad (6)$$

其中, λ 为光源的中心波长, c 为真空中的光速, R L 分别为环形谐振腔的半径和长度, h 为普朗克常数, ν 为光源的中心频率, η_d 为光电探测器的量子效率, τ_i 为测量的积分时间, P_{in} 为系统的输入光功率。

2.3 设计

随着环形谐振腔的长度以及耦合器 C_2 的耦合比的变化, 灵敏度的变化趋势如图 2 所示。显然, 对于固定长度的环形谐振腔, 通过调整耦合比的大小, 可以获得更高的灵敏度。当环形谐振腔的长度为 200 m, 耦合器的插入损耗系数为 0.1 dB 时, 最优耦合比大约为 0.75。

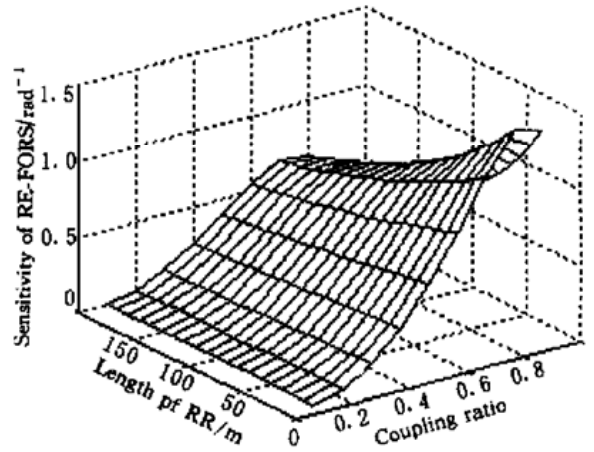


Fig. 2 Variation of the sensitivity with coupling ratio and length of ring resonator

另外为了提高再入式光纤角速率传感器的分辨率, 需要更长的环形谐振腔并对耦合器 C_2 的耦合比进行优化。例如图 3 所示, 为了实现优于 $0.02(^{\circ}/h)$ 的分辨率, 耦合器 C_2 的耦合比将为 0.5。可见, 在选择最优耦合比时应针对光强透过率、灵敏度和极限分辨率进行综合考虑。这里, 为了确保最大的灵敏度, 耦合比被选作 0.75。

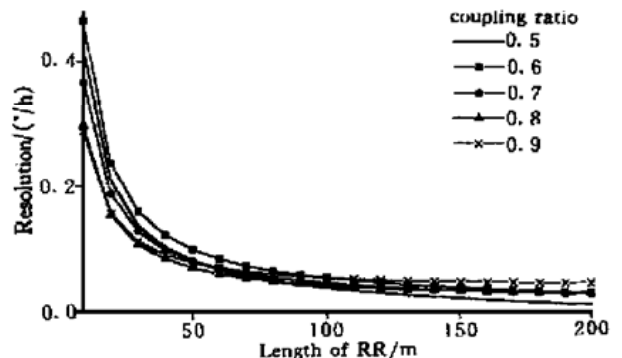


Fig. 3 Relationship between resolution and coupling ratio and length of ring resonator

3 实验研究

3.1 实验装置

再入式光纤角速率传感器的实验装置如图 4 所示。环形谐振腔由长度大约为 200 m 的保偏光纤绕制在直径为 80 mm 的骨架上而成, 传播损耗系数为 2 dB/km。光源选用相干长度大约为 50 μm 、输出功率约为 100 μW 、波长为 1.3 μm 的超辐射发光二极管(SLED)。可见, 光源的相干长度比环形谐振腔的长度小好几个数量级。耦合器 C_1 选用耦合比为 0.5 的保偏光纤耦合器, C_2 选用耦合比为 0.75 的保偏光纤耦合器。 C_1 未使用的一个输出端的尾纤盘成直径大约为 5 mm 的环, 用于减小光反射。反射镜既可采用光纤环形反射镜, 也可采用一端镀高反膜(HR)的保偏光纤。在本实验装置中, 选用了—个—端镀高反膜的自聚焦透镜, 其功率反射率大于 70%。

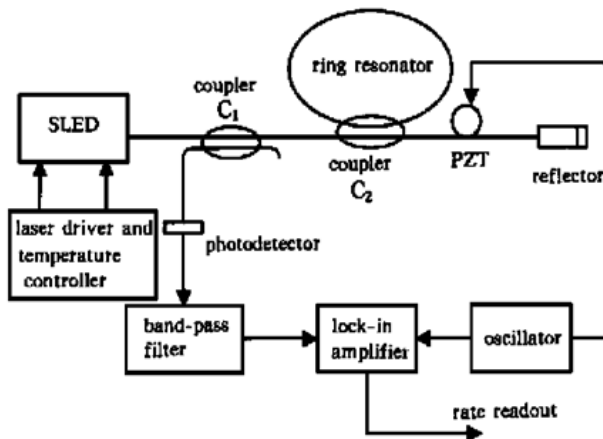


Fig. 4 Experimental setup for RE-FORS

为获得最大灵敏度, 采用类似于干涉型光纤角速率传感器中的压电陶瓷(PZT)作为相位调制器, 提供动态非互易相移。实验中, 加在压电陶瓷上的调制频率为 40 kHz, 调制电压峰峰值为 3.2 V。锁相放大器用来解调光电探测器输出的一次谐波分量, 这样, 就可以获得转速信号。

再入式光纤角速率传感器最重要的特征是, 通过在环形谐振腔中加入光放大器, 部分补偿光在其中传播一圈的损耗, 从而可实现分辨率的有源增强, 进一步提高系统的性能^[6]。

3.2 测试结果

实验中, 测试了再入式光纤角速率传感器实验装置的标度因数和零偏稳定性。这个装置被固定在转台上, 其敏感轴垂直于转台的转动轴。首先, 再入式光纤角速率传感器的敏感轴指向正北, 对于北纬

40 度处, 地球转速的水平分量大约为 10.5 ($^{\circ}/\text{h}$)。然后转台以 30 度的间隔从北向南转动, 记录输入速度和再入式光纤角速率传感器的读出数据如图 5 所示。

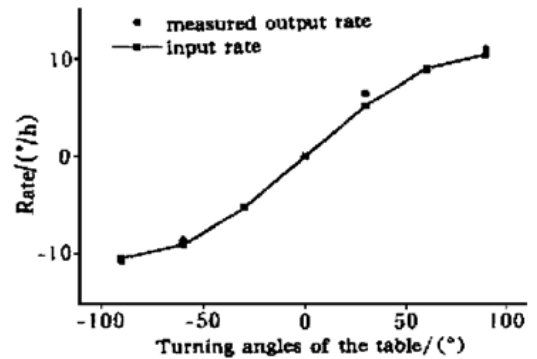


Fig. 5 Input rate versus measured output of setup

再入式光纤角速率传感器实验装置的标度因数为 0.7 ($^{\circ}/\text{hmB}$), 常值零偏为 0.2 ($^{\circ}/\text{h}$)。采用 10 s 的积分时间以及 10 min 的采样样本长度, 得到的随机漂移曲线如图 6 所示。经计算, 随机漂移稳定性优于 0.1 ($^{\circ}/\text{h}$)。

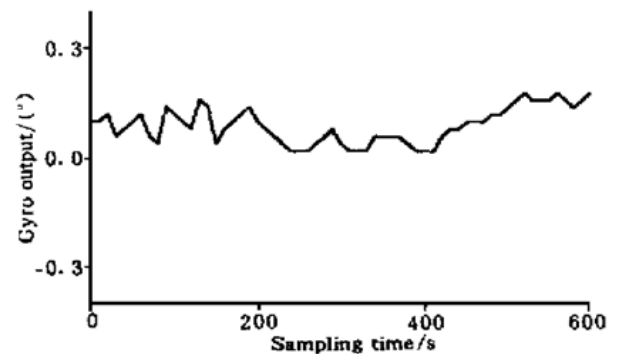


Fig. 6 The drift curve of setup

结论 从理论和实验上研究了采用环形谐振腔和低相干长度光源的再入式光纤角速率传感器, 多圈干涉效应可提高系统的灵敏度; 对灵敏度和极限分辨率公式进行了推导, 这些公式为设计再入式光纤角速率传感器提供了理论基础。

在实验中, 验证了通过解调光电探测器输出信号的相移可以获得转动方向; 通过采用机械方法改变反射镜的反射率, 也验证了反射镜在系统中的作用; 无论相位调制器放置在环形谐振腔中, 还是放在环形谐振腔和反射镜之间, 获得的实验结果是相似的。这一结果验证了这两种调制方法对再入式光纤角速率传感器具有相同的作用。

参 考 文 献

- [1] Giallorenzi T G, Bucaro J A, Dandridge A *et al.*. Optical fiber sensor technology. *IEEE Trans. Microwave Theory & Tech.*, 1982, **30**(4): 472~ 511
- [2] Farhadiroushan M, Giles I P, Youngquist R C. Optical fibre resonator rotation sensor using a low coherence source. *Proc. SPIE*, 1986, **791**: 178~ 184
- [3] Bergh R A, Lefevre H C, Shaw H J. Overview of fiber optic gyroscopes. *J. Lightwave Technol.*, 1984, **LF2**(2): 91~ 97
- [4] Booyesen A, Swart P L, Spammer S J *et al.*. New ring resonator gyroscope utilizing a double cavity and a low coherence length source. *Proc. SPIE*, Fiber Optic and Laser Sensors XI. 1993, **2070**: 225~ 233
- [5] Yu A, Siddiqui A S. Theory of a novel high sensitivity optical fiber gyroscope. *IEE Proc. J. Optoelectronics*, 1993, **140**(2): 150~ 156
- [6] Motoichi O, Satohiko A. Using a 1.5- μm DFB InGaAsP laser in a passive ring cavity-type fiber gyroscope. *Appl. Opt.*, 1987, **26**(3): 464~ 473

Study of Reentrant Fiber Optical Rotation Sensor

Li Fuying¹⁾ Hu Zhaoyang²⁾ Tian Wei²⁾

Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084
Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084

(Received 27 July 1999; revised 16 December 1999)

Abstract: A novel reentrant fiber optical rotation sensor (RE-FORS) is designed and demonstrated. The analytic equations of the optical transmittance, the phase sensitivity and the resolution of RE-FORS were deduced. The contribution to the sensitivity and the resolution of RE-FORS the coupling ratio of the resonator coupler was estimated. According to the theoretical considerations of the sensitivity and the resolution, the setup for investigating RE-FORS with 200-meter-length of ring resonator (RR) was developed. As shown by the test results, the RE-FORS setup has the constant bias of 0.2($^{\circ}$ /h) and the variance of random drift rate better than 0.1($^{\circ}$ /h) (the integration time of 10 s and the sampling length of 10 min were used).

key words: reentrant fiber optical rotation sensor; ring resonator; reflector