

文章编号: 0253-2239(2008)05-0846-06

双环形腔并联瑞利后向散射式光纤陀螺

刘艳磊 苑立波 周 爱

(哈尔滨工程大学理学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 基于单环后向瑞利散射式光纤陀螺原理,提出了一种双环形腔并联的瑞利后向散射式光纤陀螺仪新结构。利用两个 2×2 单模光纤耦合器,建立了并联双环形腔瑞利后向散射式光纤陀螺仪的理论模型,给出了信号表达式。利用优化的环长和分光比两结构参量,分析了瑞利后向散射式光纤陀螺仪信号的输出特性。选择双环的长度分别为 1500 m 和 1078 m, 2×2 光纤耦合器的耦合系数分别为 95.23% 和 94.88% 构建了测试系统,用光时域反射计(OTDR)对不同转速所探测到的后向瑞利散射信号进行测量,验证了这种新结构的可行性。同单环后向瑞利散射式光纤陀螺仪相比,双环的采用,增加了测试的有效数据,使其更有利于识别,提高了测量转速的精度。

关键词 传感器; 光纤陀螺仪; 瑞利后向散射; 双环形腔; 光时域反射计(OTDR)

中图分类号 TP212 文献标识码 A

Two-Ring-Resonator in Parallel Combined Rayleigh Backscattering Fiber Optic Gyroscope

Liu Yanlei Yuan Libo Zhou Ai

(College of Science, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract A novel two-ring-resonator in parallel combined Rayleigh backscattering fiber optic gyroscope (RBFog) is proposed based on the single ring scheme. The theoretical model of the two-ring combined RBFog is established by using two 2×2 fiber star coupler. The expression of detection signal intensity is deduced. The output signal characteristics are analyzed by optimizing the structure parameters of the two-ring cavity lengths and coupling ratios. The experimental system is constructed with cavity lengths of 1500 m and 1078 m at coupling ratios of 95.23% and 94.88% respectively. Rayleigh backscattering signals are measured at different rotation rate by OTDR. Feasibility of the novel structure is validated. Compared with single-ring RBFog, the two-ring system increases measuring effective data, and is propitious to recognize, and the measuring precision is improved.

Key words sensor; fiber optic gyroscope; Rayleigh backscattering; two-ring-resonators; optical time domain reflectometer (OTDR)

1 引 言

随着光纤陀螺器件水平和设计水平的提高,光纤陀螺技术得到了很大的发展^[1,2]。其具有结构简单、动态范围大、启动时间短、反应快、抗振动冲击能力强、精度高、成本低、质量轻、功耗低、易于集成化等特点,受到许多国家特别是各国海、陆、空三军的高度重视^[3,4]。

基于单模光纤环形腔的后向散射特性, A.

Kung 等^[5]于 1997 年首次提出了瑞利后向散射式光纤陀螺方案。2007 年,文献[6]分析了不同腔长的两个后向散射环串接时的陀螺特性。在此基础上,本文提出了一种双环形腔并联的瑞利后向散射式光纤陀螺仪新结构。

2 工作原理

双环形腔并联的瑞利后向散射式光纤陀螺仪的

收稿日期: 2007-09-07; 收到修改稿日期: 2007-11-12

基金项目: 国家自然科学基金(60577005)资助课题。

作者简介: 刘艳磊(1979—),女,回族,辽宁人,讲师,博士研究生,主要从事光纤传感器方面的研究。

E-mail: liuyanleilyl@126.com

导师简介: 苑立波(1962—),男,黑龙江人,教授,博士生导师,主要从事智能结构方面的研究。

E-mail: lbyuan@vip.sina.com

工作原理是建立在单模光纤环形腔中的瑞利后向散射信号对转动的响应特性基础上的^[5],该新结构利用 2 个单模光纤 2×2 耦合器组成并联双环,其基本

结构如图 1 所示。

单环后向瑞利散射式光纤陀螺的输出强度为^[5]

$$I(z) = I_{in} R(z) (1 - k)^2 \xi^2 (k\xi)^{z/L-3/2} \exp(-\alpha z) \times \frac{k\xi \sin^2 \left[\beta L \frac{n}{c_0} \chi v \left(\frac{z}{L} + \frac{1}{2} \right) \right] + \sin^2 [\beta L (n/c_0) \chi v (z/L - 1/2)]}{[\beta L (n/c_0) \chi v]^2}, \quad (1)$$

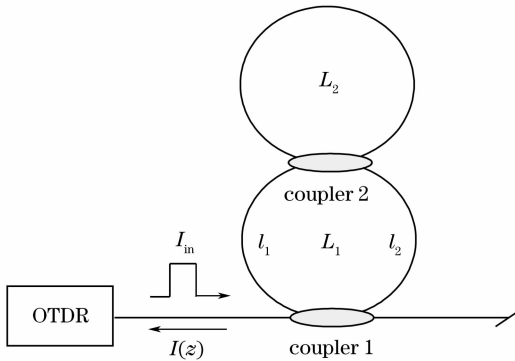


图 1 利用 2 个光纤 2×2 耦合器组成并联双环瑞利后向散射式光纤陀螺的基本结构

Fig. 1 Experimental setup of the two-ring combined in parallel Rayleigh back scattering gyroscope by using two 2×2 fiber star coupler

式中 c_0 为真空中的光速, n 为光纤媒质的折射率, χ 为斐索 (Fizeau) 牵引系数, I_{in} 为光时域反射计 (OTDR) 输入的探测光脉冲强度, β 为传播常量, k 为耦合器的强度耦合系数, ξ 为光纤耦合器的附加损耗, $R(z)$ 为瑞利后向散射的光强系数, α 为光纤衰减系数, L 为光纤环形腔长, z 为光信号总的传输距离, v 为光纤环转动线速度。使用瑞利后向散射的光纤陀螺仪的光纤环形腔长可取几百米, 可增加由于环旋转引起的萨尼亚克相移^[7]。

设两个光纤环形腔腔长分别为 L_1 、 L_2 , 且 $L_1 =$

$l_1 + l_2$, 两个单模光纤 2×2 耦合器的耦合系数分别为 k_1 、 k_2 , 附加损耗分别为 ξ_1 、 ξ_2 , 耦合器 1 的偏振损耗分别为 η_{11} 、 η_{12} , 耦合器 2 的偏振损耗分别为 η_{21} 、 η_{22} 。经光纤 2×2 耦合器 1 探测光脉冲强度被分成两部分。其中一部分进入环形腔 1, 强度为 $(1 - k_1) \xi_1 \eta_{12} I_{in}$, 在环形腔 1 传输了 l_2 的距离, 进入耦合器 2。直接进入环形腔 2 的光脉冲强度为 $(1 - k_1) \xi_1 \eta_{12} (1 - k_2) \xi_2 \eta_{22} I_{in} \exp(-\alpha l_2)$, 进入环形腔 2 总的探测光脉冲包括直接经 2×2 耦合器 2 耦合到环形腔 2 的光脉冲和在环形腔 1 中传播多圈后又耦合到环形腔 2 的光脉冲, 环形腔 2 中的总的探测光脉冲在散射点产生瑞利后向散射, 一部分经耦合器 1 直接传回到光时域反射计, 另一部分在环形腔 1 中传播多圈后回到光时域反射计。进入环形腔 1 总的探测光脉冲包括直接经 2×2 耦合器 1 耦合到环形腔 1 的光脉冲和耦合到环形腔 2 并在其中传播多圈后又耦合到环形腔 1 的光脉冲, 环形腔 1 中的总的探测光脉冲在散射点产生瑞利后向散射, 经耦合器 1 回到光时域反射计。光时域反射计探测到的散射信号强度为环形腔 1 和环形腔 2 散射信号的非相干叠加。

直接进入环形腔 1 的探测光脉冲在散射点产生瑞利后向散射, 传回到光时域反射计的光信号强度为

$$I_{11}(z) = I_{in} R(z) (1 - k_1)^2 \xi_1^2 \eta_{12}^2 (k_1 \xi_1 \eta_{11} k_2 \xi_2 \eta_{21})^{z/L_1-3/2} \exp(-\alpha z) \times \frac{k_1 \xi_1 \eta_{11} k_2 \xi_2 \eta_{21} \sin^2 \left[\beta L_1 \frac{n}{c_0} \chi v \left(\frac{z}{L_1} + \frac{1}{2} \right) \right] + k_2^2 \xi_2^2 \eta_{21}^2 \sin^2 [\beta L_1 (n/c_0) \chi v (z/L_1 - 1/2)]}{[\beta L_1 (n/c_0) \chi v]^2}. \quad (2)$$

进入环形腔 2 的探测光脉冲强度为

$$I'_{in} = I_{in} (1 - k_1) \xi_1 \eta_{12} (1 - k_2) \xi_2 \eta_{22} \exp(-\alpha l_2) \sum_{p=0}^{\infty} (k_2 \xi_2 \eta_{21} k_1 \xi_1 \eta_{11})^p \exp(-\alpha p L_1) = \frac{(1 - k_1) \xi_1 \eta_{12} (1 - k_2) \xi_2 \eta_{22} \exp(\alpha l_1)}{\exp(\alpha L_1) - k_2 \xi_2 \eta_{21} k_1 \xi_1 \eta_{11}} I_{in}, \quad (3)$$

式中 p 为光在环形腔中传播的圈数。

环形腔 2 中瑞利后向散射信号回到光时域反射计的强度为

$$I_2(z) = \frac{(1-k_1)\xi_1\eta_{12}(1-k_2)\xi_2\eta_{22}}{\exp(\alpha L_1) - k_2\xi_2\eta_{21}k_1\xi_1\eta_{11}} \times \frac{(1-k_1)\xi_1\eta_{12}\exp(2\alpha l_1)}{\exp(\alpha L_1) - k_2\xi_2\eta_{21}k_1\xi_1\eta_{11}} \times \\ I_{in}R(z)(1-k_2)\xi_2\eta_{22}(k_2\xi_2\eta_{21})^{z/L_2-3/2}\exp(-\alpha z) \times \\ \frac{k_2\xi_2\eta_{21}\sin^2\left[\beta L_2\frac{n}{c_0}\chi v\left(\frac{z}{L_2} + \frac{1}{2}\right)\right] + \sin^2\left[\beta L_2(n/c_0)\chi v(z/L_2 - 1/2)\right]}{[\beta L_2(n/c_0)\chi v]^2}. \quad (4)$$

I'_{in} 在环形腔 2 中传输多圈后,耦合到环形腔 1 中的信号强度为

$$I''_{in} = I'_{in}(1-k_2)\xi_2\eta_{22}\exp(-\alpha L_2)\sum_{p=0}^{\infty}(k_2\xi_2\eta_{21})^p\exp(-\alpha pL_2) = \\ \frac{(1-k_1)\xi_1\eta_{12}(1-k_2)\xi_2\eta_{22}\exp(\alpha L_1)}{\exp(\alpha L_1) - k_2\xi_2\eta_{21}k_1\xi_1\eta_{11}} \frac{(1-k_2)\xi_2\eta_{22}}{\exp(\alpha L_2) - k_2\xi_2\eta_{21}} I_{in}. \quad (5)$$

I''_{in} 在环形腔 1 中发生瑞利后向散射,传回到光时域反射计的光信号强度为

$$I_{12}(z) = R(z)k_1\xi_1\eta_{11}(1-k_1)\xi_1\eta_{12} \frac{(1-k_1)\xi_1\eta_{12}(1-k_2)\xi_2\eta_{22}}{\exp(\alpha L_1) - k_2\xi_2\eta_{21}k_1\xi_1\eta_{11}} \cdot \frac{(1-k_2)\xi_2\eta_{22}}{\exp(\alpha L_2) - k_2\xi_2\eta_{21}} I_{in} \times \\ (k_1\xi_1\eta_{11}k_2\xi_2\eta_{21})^{z/L_1-3/2}\exp(-\alpha z) \times \\ \frac{k_1\xi_1\eta_{11}k_2\xi_2\eta_{21}\sin^2\left[\beta L_1\frac{n}{c_0}\chi v\left(\frac{z}{L_1} + \frac{1}{2}\right)\right] + k_2^2\xi_2^2\eta_{21}^2\sin^2\left[\beta L_1(n/c_0)\chi v(z/L_1 - 1/2)\right]}{[\beta L_1(n/c_0)\chi v]^2}. \quad (6)$$

环形腔 1 中瑞利后向散射信号回到光时域反射计的强度为

$$I_1(z) = I_{11}(z) + I_{12}(z) = \left[(1-k_1)\xi_1\eta_{12} + \frac{(1-k_1)\xi_1\eta_{12}(1-k_2)\xi_2\eta_{22}}{\exp(\alpha L_1) - k_2\xi_2\eta_{21}k_1\xi_1\eta_{11}} \frac{(1-k_2)\xi_2\eta_{22}}{\exp(\alpha L_2) - k_2\xi_2\eta_{21}} k_1\xi_1\eta_{11} \right] \times \\ I_{in}R(z)(1-k_1)\xi_1\eta_{12}(k_1\xi_1\eta_{11}k_2\xi_2\eta_{21})^{z/L_1-3/2}\exp(-\alpha z) \times \\ \frac{k_1\xi_1\eta_{11}k_2\xi_2\eta_{21}\sin^2\left[\beta L_1\frac{n}{c_0}\chi v\left(\frac{z}{L_1} + \frac{1}{2}\right)\right] + k_2^2\xi_2^2\eta_{21}^2\sin^2\left[\beta L_1(n/c_0)\chi v(z/L_1 - 1/2)\right]}{[\beta L_1(n/c_0)\chi v]^2}. \quad (7)$$

光时域反射计探测到的总的光信号强度为

$$I(z) = I_1(z) + I_2(z). \quad (8)$$

3 参量优化模拟

为了选择合适的参量构建测量系统,使测量结果接近最优,有利于在测试之后对实验结果进行处理,对图 1 所示的光纤陀螺仪模型进行参量优化模

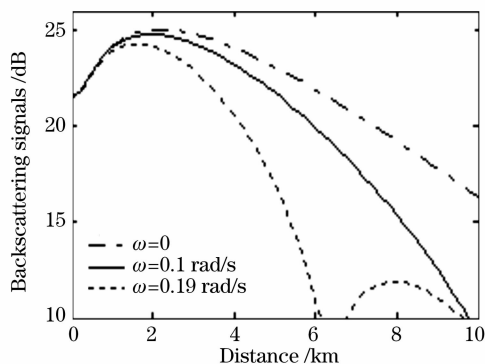


图 2 在不同转速情况下,双环 L_1 和 L_2 并联的仿真结果.

Fig. 2 Simulation results of the two-ring resonator in parallel with L_1 and L_2 at different rotation rate

拟,模拟时选择的基本参量如表 1 所示。

选择表 1 中的参量,光纤环形腔的转速 ω 分别为 0 rad/s, 0.1 rad/s, 0.19 rad/s 时,瑞利后向散射信号的强度如图 2 所示。

表 1 模拟的参量数据表

Table 1 Parameters of simulation data sheet

Parameters	Value
Attenuation of optical fiber α / (dB/km)	1.5625
Wavelength of light λ / nm	1310
Refractive index of single mode fiber n	1.468
Propagation constant β / μm^{-1}	7.036
Coupling coefficient of the fiber coupler 1 k_1 / %	95.23
Coupling coefficient of the fiber coupler 2 k_2 / %	94.88
Cavity length of fiber ring 1 L_1 / m	1500
Cavity length of fiber ring 2 L_2 / m	1078
Excess loss of fiber coupler 1 ξ_1 / dB	0.05
Excess loss of fiber coupler 2 ξ_2 / dB	0.05
Polarization degree loss of fiber coupler 1 η_1 / dB	0.01
Polarization degree loss of fiber coupler 1 η_2 / dB	0.03
Polarization degree loss of fiber coupler 2 η_1 / dB	0.01
Polarization degree loss of fiber coupler 2 η_2 / dB	0.03
Vacuum velocity of light c_0 / (m/s)	3×10^8
Fizeau drag first-order correction factor χ	0.536
Radius of fiber ring R / m	0.08

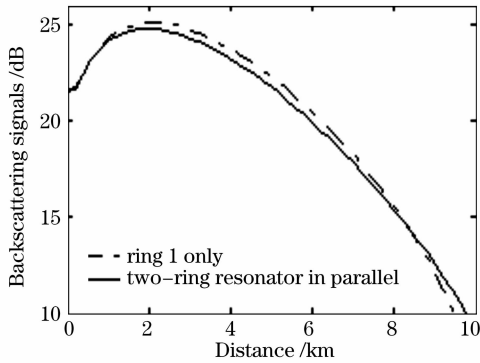


图3 在转速为 0.1 rad/s 的情况下, 只有单环 L_1 和双环 L_1 和 L_2 并联的仿真结果

Fig. 3 Simulation results of ring 1 only and two-ring resonator in parallel with L_1 and L_2 at rotation rate 0.1 rad/s

光纤环形腔的转速 ω 为 0.1 rad/s 时, 对比只有光纤环 L_1 和双环并联瑞利后向散射信号的强度曲线如图 3 所示。

由仿真结果可知, 当陀螺仪进行旋转时, 由于相对论效应, 光纤环形腔内顺时针方向传播的探测光信号与逆时针方向传播的瑞利后向散射光信号的速度将发生改变, 从而导致光时域反射计获得的光纤环形腔内的后向散射曲线波形包络发生变化, 根据 (8) 式对光时域反射计获得的曲线进行拟合计算及插值处理, 可以获得陀螺仪旋转的角速度信息。比较单环 L_1 和双环 L_1 和 L_2 并联的仿真结果可知, 在一定的动态范围内, 双环的测试距离要大于单环。因此, 在测量远距离处 (大于 10 km) 的散射强度时, 双环并联的光纤陀螺仪可以给出更精确的值; 在一定的测试距离范围内, 双环的采用, 增加了所测试的后向散射光信号强度的有效数据, 可提高计算转速的精度。

3.1 分光比优化模拟

选择耦合器的耦合系数分别为 $k_1 = 0.9523$, $k_2 = 0.9488$; $k_1 = 0.8264$, $k_2 = 0.8166$; $k_1 = 0.6742$, $k_2 = 0.6826$ 。光纤环形腔的转速 $\omega = 0.1 \text{ rad/s}$, 环形腔长 $L_1 = 1.500 \text{ km}$, $L_2 = 1.078 \text{ km}$, 瑞利后向散射信号的强度曲线如图 4 所示。

由仿真结果可知, 耦合器的分光比发生变化时, 仅曲线的陡峭程度发生变化, 曲线的形状基本没有发生变化。连接光纤环的耦合端分得的光强越多, 瑞利后向散射信号的强度曲线相对平坦。在一定的动态范围内, 选择耦合系数大的光纤耦合器可以增加测试距离。光时域反射计最大的动态范围为 30 dB , 得到的散射信号的强度曲线越平坦, 光信号

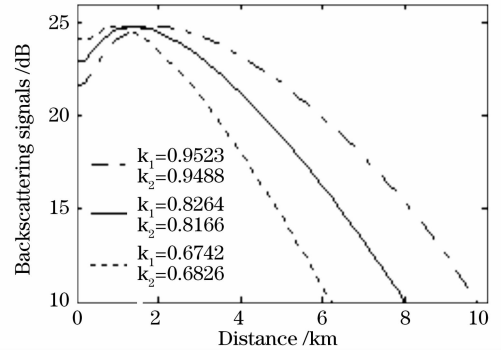


图4 不同分光比时双环 L_1 和 L_2 并联的仿真结果

Fig. 4 Simulation results of the two-ring resonator in parallel with L_1 and L_2 at different coupling ratio

强度的有效数据越多, 越有利于对测试数据进行处理。因此, 选择耦合系数分别为 95.23% 和 94.88% 的 2×2 光纤耦合器来构建测试系统, 得到的后向散射光信号强度的有效数据相对多些。

3.2 环形腔长优化模拟

选择耦合器的耦合系数分别为 $k_1 = 0.9523$, $k_2 = 0.9488$, 光纤环形腔的转速 $\omega = 0.1 \text{ rad/s}$, 双光纤环形腔长度分别为 $L_1 = 1.260 \text{ km}$, $L_2 = 0.623 \text{ km}$; $L_1 = 1.500 \text{ km}$, $L_2 = 1.078 \text{ km}$; $L_1 = 2.050 \text{ km}$, $L_2 = 1.420 \text{ km}$, 瑞利后向散射信号的强度如图 5 所示。

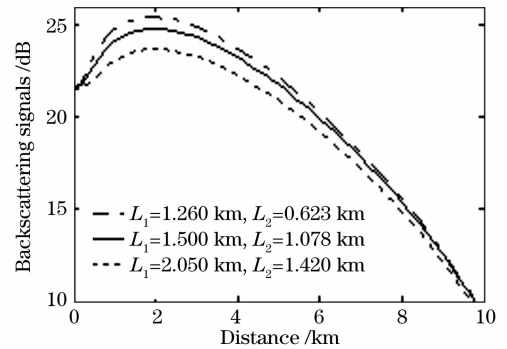


图5 不同环长时, 双环 L_1 和 L_2 并联的仿真结果

Fig. 5 Simulation results of the two-ring resonator in parallel with L_1 and L_2 with different cavity length of fiber ring

由仿真结果可知, 光纤的环形腔长发生变化时, 曲线的陡峭程度发生变化。光纤环形腔长度越长时, 瑞利后向散射信号的强度曲线越平坦。在固定的散射信号强度探测范围内, 光纤环长度的长短对扫描距离的影响不大。而光纤环的长短决定了单模光纤的使用量, 从原料角度考虑, 选择 1 km 左右的光纤环来构建测试系统, 可以达到测量的目的。

4 测量系统和测试结果

双环形腔并联的瑞利后向散射式光纤陀螺仪的装置如图 6 所示。



图 6 并联双环瑞利后向散射式光纤陀螺的实验装置
Fig.6 Experimental setup of the two-ring combined in parallel Rayleigh back scattering gyroscope

测量系统包括步进电机驱动器,转台,光纤环形腔(2 个), 2×2 光纤耦合器(2 个),单膜光纤,AV3662A 型光时域反射计(OTDR)。

测量系统中双环的长度分别为 1500 m 和 1078 m, 2×2 光纤耦合器 1 和 2 的分光比分别为 95.23%:4.77%和 94.88%:5.12%,附加损耗皆为 0.05 dB,光纤耦合器 1 和 2 的偏振损耗皆为 0.01 dB 和 0.03 dB,光纤环的直径为 16 cm,双环被固定在步进电机控制器的控制转台上。实验中光时域反射计的测量波长为 1310 nm,脉冲宽度为 4000 ns,量程为 10 km。调节步进电机的转速 ω 取值分别为 0 rad/s、0.1 rad/s、0.19 rad/s,光时域反射计追踪得到的后向散射信号的强度如图 7 所示。

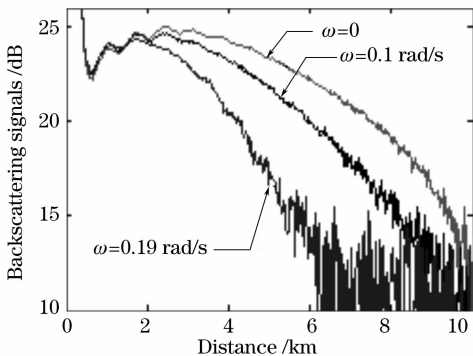


图 7 在不同转速情况下,光时域反射计探测双环 L_1 和 L_2 并联的强度曲线

Fig.7 Optical time domain reflectometer traces of the two-ring resonator in parallel with L_1 and L_2 at different rotation rate

光纤环形腔的转速 ω 为 0.1 rad/s 时,只有光纤环 L_1 和双环并联瑞利后向散射信号的强度曲线如图 8 所示。

从实验结果可以看出,光时域反射计追踪得到的后向散射信号的强度与理论上计算得到的强度曲

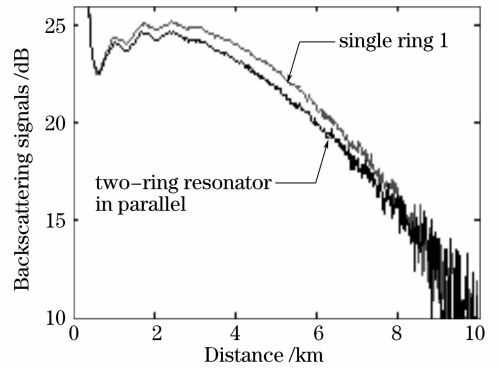


图 8 在转速为 0.1 rad/s 的情况下,光时域反射计探测单环 L_1 和双环 L_1 和 L_2 并联的强度曲线

Fig.8 Optical time domain reflectometer traces of ring 1 only and two-ring resonator in parallel with L_1 and L_2 at rotation rate =0.1 rad/s

线完全一致,因此,在未知转速的情况下,测得后向散射信号的强度曲线,可以用理论上推导的瑞利后向散射信号的强度表达式来计算转速。

同时,从单环 L_1 和双环 L_1, L_2 并联的测量比较结果可知,理论上对双环并联的光纤陀螺仪优越性的分析是正确的。在一定的测试距离范围内,双环的采用,增加了所测试的后向散射光信号强度的有效数据,可提高计算转速的精度。

图 9 给出了测量得到的转速值同实际的转速值的比较曲线。由图 9 可知,双环并联的光纤陀螺仪测量的最大误差为 3.19%,最小误差为 0.26%,单环的测量最大误差为 6.23%,最小误差为 0.99%。证明了双环并联瑞利后向散射式光纤陀螺仪测量转速的可行性,与单环情况相比较其测量精度有一定的改进。

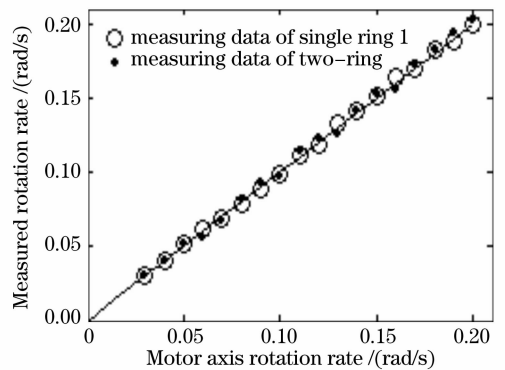


图 9 (8)式获得的测量转速同实际转速的比较

Fig.9 Measured rotation rate using fitting of expression Eq.(8) versus the actual rotation rate

5 结 论

通过仿真得出, 光纤耦合器的分光比与光纤环形腔的长度均对瑞利后向散射信号的输出强度产生影响, 即对旋转角速度 ω 的测量产生影响, 同时光纤耦合器的分光比的影响要大一些。

实验对不同转速对应的瑞利后向散射信号的程度进行测量, 用数值计算获得测量转速, 得到了实验和理论相一致的结果。

利用双环形腔并联构成的瑞利后向散射式光纤陀螺仪, 其输出特性曲线与单环的相比有一定的差别。双环的采用, 可以更精确的测量出远距离处的散射强度; 并且在一定的测试距离范围内, 增加了测试的有效数据, 使其更有利于识别, 提高了测量转速的精度。

参 考 文 献

- 1 Mi Jian, Zhang Chunxi, Li Zheng *et al.*. Effect of polarization interference on fiber optic gyro performance [J] *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(8): 1140~1144
- 2 Zhang Xulin, Ma Huilian, Ding Chun *et al.*. Optical Kerr effect in phase modulation spectroscopy resonator fiber optic gyro[J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(6): 815~818
- 3 张旭琳, 马慧莲, 丁纯等. 谐振式光纤陀螺调谐检测技术中的光克尔效应[J]. *中国激光*, 2006, **33**(6): 815~818
- 3 Herve C. Lefevre. *The Fiber-Optic Gyroscope* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2004. 170~172
- 3 Herve C. Lefevre. 光纤陀螺仪 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2004. 170~172
- 4 Zhu Ruipin, Liu Yuxin, Chen Yabing *et al.*. Key technologies of IFOG[J]. *Modern Defence Technology*, 2004, **32**(1): 43~48
- 4 朱蕊蘋, 刘玉昕, 陈娅冰等. 干涉型光纤陀螺仪的关键技术[J]. *现代防御技术*, 2004, **32**(1): 43~48
- 5 A. Kung, J. Budin, L. Thevenaz *et al.*. Rayleigh fiber optic gyroscope[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1997, **9**(7): 973~975
- 6 Libo Yuan, Zhihai Liu, Jun Yang. Rayleigh backscattering fiber optic rotation sensor based on combined two-ring-resonator[J]. *Sensors and Actuators A*, 2007, (136): 216~220
- 7 A. Kung, J. Budin, L. Thevenaz *et al.*. Optical fiber ringresonator characterization by optical time-domain reflectometry[J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(2): 90~92