

一种基于微波谐振测量 Sagnac 效应的新方案

吴穹 于晋龙 王菊 王文睿 贾石 黄港宾 黑克非 李丽娟

A new scheme of measuring Sagnac effect based on microwave resonant

Wu Qiong Yu Jin-Long Wang Ju Wang Wen-Rui Jia Shi Huang Gang-Bin Hei Ke-Fei Li Li-Juan

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 044205 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.044205

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.044205>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I4>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于辅助电介质层的棱镜表面等离子体共振效应研究

Study of prism surface plasmon resonance effect based on dielectric-aided layer

物理学报.2014, 63(3): 034207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.034207>

仅用一根局部微结构长周期光纤光栅实现温度与弯曲曲率的同时测量

Simultaneous measurement of temperature and bending-curvature using a single local micro-structured longperiod fiber grating

物理学报.2014, 63(2): 024206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.024206>

基于光纤气泡和纤芯失配的 Mach-Zehnder 干涉液体折射率传感器

In-fiber Mach-Zehnder interferometer based on fiber core etched air-bubble and core diameter mismatch for liquid refractive index sensing

物理学报.2013, 62(21): 214209 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.214209>

基于侧漏型光子晶体光纤高灵敏度宽线性范围弯曲传感器的研究

Curvature sensor based on side-leakage photonic crystal fiber with high sensitivity and broad linear measurement range

物理学报.2013, 62(19): 194209 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.194209>

契形结构光纤表面等离子体共振传感器研究

Development of fiber-optic surface plasmon resonance sensor based on tapered structure probe

物理学报.2013, 62(12): 124207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.124207>

一种基于微波谐振测量 Sagnac 效应的新方案*

吴穹 于晋龙 王菊[†] 王文睿 贾石 黄港腴 黑克非 李丽娟

(天津大学电子信息工程学院, 光纤通信实验室, 天津 300072)

(2014年7月4日收到; 2014年9月15日收到修改稿)

目前光学陀螺的主要工作原理是 Sagnac 效应, 如何提高 Sagnac 效应的测量精度是提高陀螺精度的一个重要研究课题. 传统的光学陀螺利用光短波长的特性来提高检测精度. 但考虑到微波的相位(频率)检测精度远高于光波的相位(频率)检测精度, 如果能够利用微波实现 Sagnac 效应的检测, 就能得到比光学陀螺更高的检测精度, 从而为实现高精度的微波陀螺提供了可能. 利用基于光电振荡器的光载微波结构实现了微波 Sagnac 效应的检测. 实验结果证明了微波检测 Sagnac 效应的可行性, 为将来实现高精度的微波谐振陀螺打下基础.

关键词: 光电振荡器, Sagnac 效应, 微波谐振陀螺

PACS: 42.81.Pa, 42.60.Da, 84.30.Ng

DOI: 10.7498/aps.64.044205

1 引言

Sagnac 效应是 1913 年由法国的 Sagnac^[1] 首次提出, 他采用了一个环形的干涉仪, 揭示了同一光路中两束相向传播的光之间的光程差与干涉仪旋转速度的解析关系, 并且证明了在干涉仪旋转时, 两束相向传播的光会产生一个相位差. 后来随着光纤损耗的下降, Sagnac 效应在光纤中的应用得到了重视. 1967 年, 法国的 Pircher 和 Hepner 提出可以采用多匝光纤线圈通过多次循环来增强 Sagnac 效应. 1976 年, 这个想法得到了验证, 从而极大地推动了光纤陀螺的发展^[2,3].

按照光学工作原理划分, 光纤陀螺可分为谐振式光纤陀螺、干涉式光纤陀螺和受激布里渊散射式光纤陀螺三种. 1977 年, 麻省理工学院的 Ezekiel 和 Balsamo^[4] 首次提出了谐振式光纤陀螺. 与干涉式光纤陀螺相比, 谐振式光纤陀螺可达到同样的灵敏度, 其需要的光纤或波导长度要短得多, 特别适合于微型光学陀螺, 代表将来陀螺小型化的发展趋势.

光纤谐振陀螺通过测量由 Sagnac 效应引起的正反两个方向谐振的频差, 来得到陀螺旋转的角速度 Ω , 所以谐振式光纤陀螺的发展很大程度上取决于对由 Sagnac 效应引起的这一频率差的检测精度. 由于光的载波频率非常高, 无法直接检测光波的频率或相位变化, 所以, 目前的光学谐振陀螺对 Sagnac 效应的检测大多通过光学拍频(光学谐振陀螺)的方式来实现. 然而, 光学结构的非互易性、光的强度噪声、光源的线宽和偏振干扰等都会对检测精度产生影响^[5-9]. 其中, 光源线宽表征了光源相位噪声的大小, 光源相位噪声使光波的相干长度降低, 干涉的分辨率下降. 对光纤谐振陀螺而言, 由于是两个谐振光的干涉, 谐振光的线宽决定了其可检测的拍频精度, 这就限制了光学谐振陀螺精度的进一步提高^[10-15].

具体而言, 谐振式陀螺是基于 Sagnac 效应引起的谐振频率的变化来检测角速度. 角速度与谐振频率之间的关系满足下式:

$$\Delta f = \frac{4S}{\lambda L} \Omega, \quad (1)$$

式中, λ 为谐振波波长, L 为谐振腔长度, S 为谐振

* 国家重点基础研究发展计划(批准号: 2012CB315704)、高等学校博士学科点专项科研基金(批准号: 20120032130010)和国家自然科学基金(批准号: 61205061, 61405142, 61427817)资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: wangju@tju.edu.cn

腔面积, Ω 为旋转角速度. 定性分析 (1) 式, 从对旋转角速度 Ω 的检测精度上看, 波长越小, 同样的旋转角速度导致的谐振频率变化就越大, 在同样频率检测精度下对旋转角速度的精度就越高. 从这方面来看, 光波的波长更占优势 (例如: 光波长在微米量级, 微波信号的波长为厘米到毫米量级, 光波长的优势为 10^{-4} 量级), 这也是传统的谐振陀螺采用光学谐振的主要原因.

从另一个思路考虑, 如果能够单纯地提高对 Δf 的检测精度, 同样可以提高陀螺的精度, 而微波对 Δf 检测精度远高于光波的检测精度. 从这点来看, 微波是有优势的. 具体而言, Δf 的检测精度受到谐振腔输出微波信号线宽的限制. 目前, 光学谐振陀螺对 Sagnac 效应的检测大多通过光学拍频或者干涉 (光学谐振陀螺) 的方式来实现, 而线宽又决定了拍频/干涉的检测精度. 由于光源的线宽 (大于 10^2 Hz) [16] 远大于光电振荡器的线宽 (10^{-6} Hz) [17] (微波检测的优势为 10^{-8}), 所以, 从这个角度出发, 理论上利用微波检测 Sagnac 效应的精度要比光波高.

要充分利用微波的频率检测精度实现高精度的陀螺, 就要求微波谐振的线宽非常小, 这在很长一段时间内成为限制微波陀螺发展的一个重要因素. 近年来, 随着一种具有超窄线宽、超低噪声等特性的微波谐振器——光电振荡器 (OEO) 的出现, 为微波谐振陀螺的实现提供了一种可能 [18].

基于上述分析, 本文利用 OEO 的光载微波结构来验证 Sagnac 效应, 试验中通过检测 OEO 的微波振荡频率变化来测量 Sagnac 效应. 由于 OEO 具有积累放大特性, 这提高了对光纤环旋转角速度 Ω 检测的精度. 而与传统的光学拍频或干涉法检测光学频差/相位的方式比较, 微波陀螺可直接检测微波谐振频率, 从而大大减小了偏振扰动和强度噪声对测量的影响.

2 理论分析

2.1 OEO 的积累放大作用

OEO 是由光源、强度调制器、长光纤、光电探测器、微波滤波器和微波放大器构成的一个正反馈环路, 如图 1 所示. 它利用调制器以及光纤低损耗的特性将连续光变为稳定的、频谱干净的射频/微波信号. OEO 起振时的基频 f_0 由环路的总延时

决定:

$$f_0 = \frac{c}{nL}, \quad (2)$$

式中, c 为光速, n 为介质折射率, L 为 OEO 环路的总腔长.

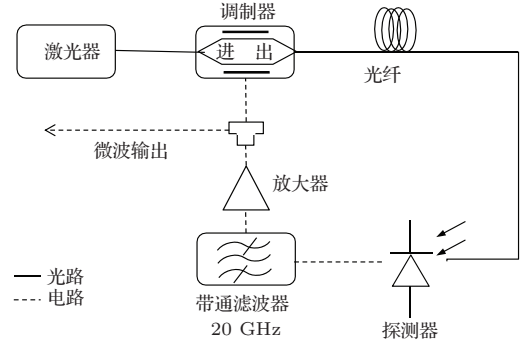


图 1 OEO 原理示意图

OEO 通过谐振腔中的微波滤波器选出高次谐波分量 (几十 GHz) 形成微波振荡, 振荡频率需满足:

$$f = mf_0, \quad (3)$$

式中 m 为正整数 ($10^5 - 10^6$). 由于 OEO 的积累放大作用, OEO 高次振荡频率的变化与总环路长度 L 的变化密切相关. 例如, 设光纤长度为 2 km, 由 (2) 式可知, 振荡器的基频 $f_0 = 100$ kHz (计算时 $c = 3 \times 10^8$ m/s, $n = 1.5$, $L = 2$ km), 微波滤波器 (中心频率为 20 GHz, 带宽为 30 MHz) 选择高次振荡频率 f 为 20 GHz 左右, 则 $m = 2 \times 10^5$. $1 \mu\text{m}$ 的腔长变化引起的基频变化约为 5×10^{-5} Hz, 这一变化用普通的仪器很难检测. 但是, 高次谐波的振荡频率 (20 GHz) 为基频的 2×10^5 倍, 经过正整数 m 的积累放大, 腔长的微小变化 ($1 \mu\text{m}$) 在高次谐波 (20 GHz) 处引起的频率变化约为 10 Hz, 这用一般的仪器是很容易检测到的. 由此可见, 经过积累放大, 光子微波振荡器对谐振腔的光程十分敏感, 这也为利用 OEO 结构检测 Sagnac 效应提供了条件.

2.2 基于 OEO 结构验证 Sagnac 效应的理论模型分析

Sagnac 效应揭示了同一光路中两束相向传播的光之间的光程差与其旋转速度的解析关系. 根据相对论原理, 光在运动介质中传播的速度 v , 在静止坐标系中观察时存在以下关系:

$$v = \frac{c}{n} + V \left(1 - \frac{1}{n^2} \right), \quad (4)$$

式中, V 为介质的运动速度, n 为介质的折射率.

假设 OEO 中用于 Sagnac 效应检测的光纤长度为 L , 这些光纤被绕成 N 匝半径为 R 的圆形光路, 如图 2 所示. 光源发出的光分成两部分, 分别由正反两个方向注入到光路中. 如果光路静止, 那么两束光将同时回到出发点 A ; 如果此圆形光路以角速度 Ω 沿顺时针方向转动, 两路到达出发点 (此时出发点为 B 而不是 A) 的时间是不同的, 对于顺时针方向的光, 其到达时间 t_1 为

$$t_1 = (2\pi NR + R\Omega t_1) / \left[\frac{c}{n} + R\Omega \left(1 - \frac{1}{n^2} \right) \right]. \quad (5)$$

同理, 求得逆时针方向的光到达 B 点的时间 t_2 为

$$t_2 = (2\pi NR - R\Omega t_2) / \left[\frac{c}{n} - R\Omega \left(1 - \frac{1}{n^2} \right) \right]. \quad (6)$$

此时, 两束光到达的时间差 Δt 为^[19]

$$\Delta t = t_1 - t_2 \approx \frac{4\pi nNR^2\Omega}{c^2}, \quad (7)$$

(7) 式用到了 $c^2 \gg (R\Omega/n^2)$ 的条件.

两束光的等效光程差 ΔL 为

$$\Delta L = \frac{c\Delta t}{n} = \frac{4\pi nNR^2\Omega}{c}. \quad (8)$$

可以认为顺时针的光在光纤环以角速度 Ω 顺时针转动时比静止时的光程增加了 $\Delta L/2$, 相反逆时针的光比静止时的光程减小了 $\Delta L/2$.

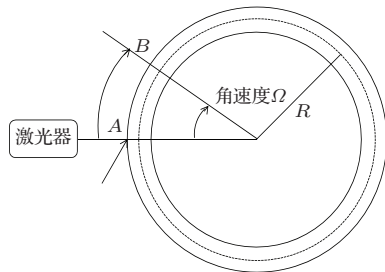


图 2 Sagnac 光纤环示意图

对 OEO 而言, Sagnac 效应同样会引起环长的微小变化, 假设 OEO 中用于检测 Sagnac 效应的光纤长度为 L , 其余环路部分的光纤和微波延时等效长度为 L' .

静止时, OEO 振荡频率 f_1 为

$$f_1 = mf_0 = \frac{mc}{n(L + L')}, \quad (9)$$

其中 n 为光纤折射率. 则沿顺时针方向以角速度 Ω 转动时的等效腔长变为 $L + L' + \Delta L$, 此时的振荡频率 f_2 为

$$f_2 = mf'_0 = \frac{mc}{n(L + L' + \Delta L)}, \quad (10)$$

式中, ΔL 为与静止时相比, 光纤环以角速度 Ω 顺时针转动时由 Sagnac 效应引起的等效腔长变化; f'_0 为光纤环以角速度 Ω 顺时针转动时 OEO 起振时的基频.

将 (9) 和 (10) 式代入下式中可以得到转台转动引起的频率漂移 Δf 为

$$\begin{aligned} \Delta f = f_1 - f_2 &= \frac{mc\Delta L}{n(L + L')(L + L' + \Delta L)} \\ &\approx \frac{mc\Delta L}{n(L + L')^2} = \frac{mLR}{(L + L')^2}\Omega, \end{aligned} \quad (11)$$

其中 $\Delta L \ll (L + L')$.

可见, 当检测 Sagnac 效应的光纤环以角速率 Ω 顺时针转动时 OEO 的振荡频率的变化量与 Ω 成正比, 通过检测 Δf 可以得出角速度 Ω .

3 实验结果与分析

基于 OEO 结构验证 Sagnac 效应的实验结构如图 3 所示. 图 3 中激光器产生波长为 1549.3 nm 的光经过偏振控制器 PC1 后进入马赫-曾德尔型电光强度调制器. 经过电光调制器的信号进入光纤拉伸器和半径为 0.25 m、总长为 2 km 的光纤环进入偏振分束器. 在这里, 光纤拉伸器的作用是为了调节腔长, 保证 OEO 振荡频率的稳定性. 经过偏振分束器的光被分成偏振态正交的两路, 其中一路加入 80 m 长的普通单模光纤, 这样就实现了光域双偏振态双环路, 可以有效地抑制边模. 两个偏振控制器 (PC2 和 PC3) 用来调制两个正交偏振态的光, 使其分别对准偏振合束器的光轴进入偏振合束器. 两路光经过偏振合束器合在一起后进入光电探测器, 实现光电信号的转换, 经过光电转换后的微波信号依次经过低噪声放大器、20 GHz 带通滤波器和微波功率放大器后驱动光电调制器. 其中经过带通滤波器的微波信号经过一个功分器分为两部分: 一部分作为微波输出, 另一部分进入到腔长控制模块, 通过腔长控制模块控制光纤拉伸器实现腔长的控制, 使 OEO 输出的微波信号稳定在固定的频率上. 本方案利用双环双偏振态结构来抑制 OEO 的边模. 由于 80 m 长的普通单模光纤的加入, 使得两个环长分别对应两个不同的基频, 有满足这两个基频公倍数的频率才能起振, 增大了起振模式之间的间隔, 从而保证在带通滤波器的通带范围内 OEO 单模 (单一频率) 起振^[20].

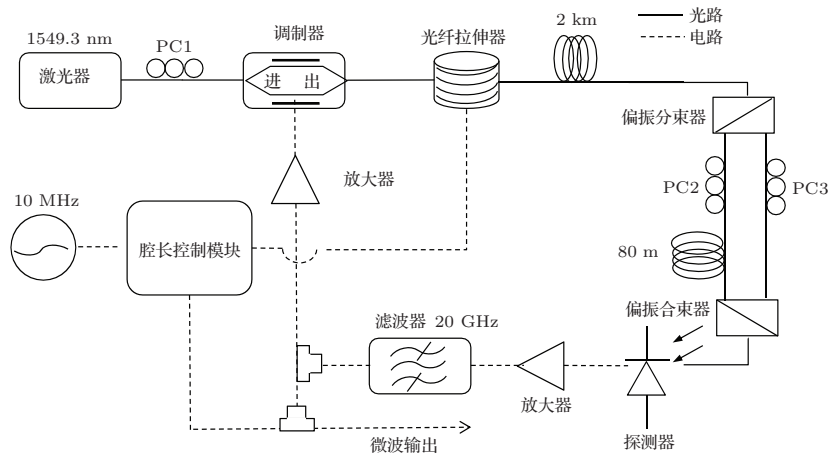


图3 基于OEO结构验证Sagnac效应的实验结构

实验中,当频谱分析仪的分辨率带宽很小时,扫描时间变得很长,所以没办法实时反映Sagnac效应引起的频率变化;而由于腔长控制模块有跟踪锁相功能,通过控制光纤拉伸器改变腔长来补偿因为Sagnac效应引起的腔长变化. 所以通过检测腔长控制模块输出的电压 V_{ctrl} 也可以推算出Sagnac效应带来的频率变化 Δf , 实验测得光纤拉伸器的压控灵敏度 Kd 为1.6 kHz/V, 即

$$\Delta f = V_{ctrl} \cdot Kd.$$

整个实验装置放在一个转台上,该转台分别以0.2和0.3 Hz的频率来回转动,旋转范围为 $\pm 45^\circ$,转台的角速度呈正弦连续变化. 当转台以0.2 Hz的频率转动时,转台角速度变化范围为0—1.0 rad/s,最大角速度为1.0 rad/s,根据(11)式理论计算可知,此时由于Sagnac效应引起的OEO振荡频率的变化为0.2 Hz,而频率变化的最大值为23.6 Hz. 同样地,当转台以0.3 Hz的频率转动时,转台角速度变化范围为0—1.5 rad/s,最大角速度为1.5 rad/s,对应的OEO振荡频率的变化为0.3 Hz,最大变化量为35.0 Hz.

图4和图5分别为转台以频率0.2和0.3 Hz转动时所测得的OEO振荡频率的变化. 图中黑色虚线为转台转动时的角速度 Ω 变化曲线,蓝色实线为实验测得的由于Sagnac效应引起的OEO振荡频率的变化,红色虚线为实验值的拟合曲线. 从图4和图5可以看出,实际测得的OEO振荡频率的变化为一正弦变化的曲线,并且频率和已知的转台的旋转频率相同,当转台以0.2 Hz的频率转动时,OEO振荡频率的变化幅值为25.0 Hz,而转台以0.3 Hz的频率转动时幅值为36.0 Hz,这与理论

计算值基本一致.

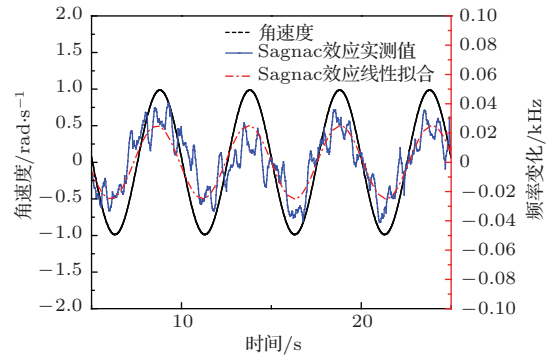


图4 转台以频率0.2 Hz转动时OEO振荡频率的变化

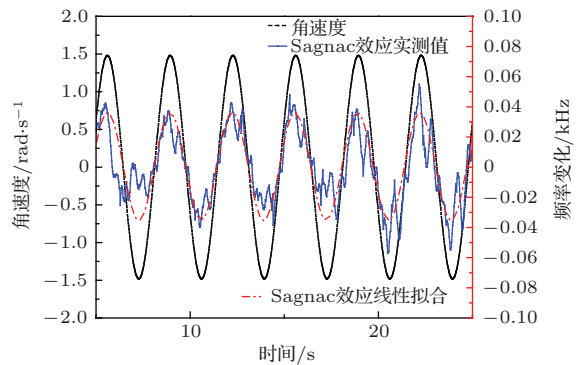


图5 转台以频率0.3 Hz转动时OEO振荡频率的变化

从图4和图5可以看出,外界环境以及内部干扰对系统的影响会对测量带来干扰,从而影响检测精度. 其中光纤中的偏振干扰可以等效为光纤腔长的扰动,所以必然会带来谐振信号噪声的增加以及线宽的展宽. 同时由于偏振效应的不对称性,会破坏系统的互易性. 在进一步提高精度时这是一个必须考虑的问题,而在下一步的工作中,拟采用保偏

光纤代替普通单模光纤来降低偏振效应对检测精度的影响.

4 结 论

本文利用一种基于OEO结构的光载微波系统对Sagnac效应进行了验证. 该方案利用积累放大的原理, 将由Sagnac效应引起的OEO基频的微小变化, 在OEO的高次谐波处得到放大, 从而便于检测. 理论上计算了转台旋转角速度和OEO振荡频率变化之间的关系. 并且在转台旋转频率分别为0.2和0.3 Hz的情况下进行了实验验证. 此方案可利用微波信号检测精度高的优势, 为进一步提高Sagnac效应的检测精度提出了一种新的思路, 而且也为实现新型的基于OEO结构的微波谐振陀螺提供了可能.

参考文献

- [1] Sagnac G 1913 *C. R. Acad. Sci.* **157** 708
- [2] Leeb W R, Schiffner G, Scheitere E 1979 *Appl. Opt.* **18** 1293
- [3] Vali V, Shorthill R W 1976 *Appl. Opt.* **15** 1099
- [4] Ezekiel S, Balsamo S R 1977 *Appl. Phys. Lett.* **30** 478
- [5] Cutler C C, Newton S A, Shaw H J 1980 *Opt. Lett.* **11** 488
- [6] Wang C S, Cheng W H, Hwang C J, Burns W K, Moeller R P 1982 *Appl. Phys. Lett.* **41** 587
- [7] Lin S C, Giallorenzi T G 1979 *Appl. Opt.* **18** 915
- [8] Goldberg L, Taylor H F, Weller J F 1982 *Electron. Lett.* **9** 353
- [9] Song N F, Zhang C X, Jin J 2007 *Chin. Phys.* **16** 735
- [10] Ma H L, Jin Z H, Ding C, Wang Y L 2003 *Chin. J. Lasers* **30** 731 (in Chinese) [马慧莲, 金仲和, 丁纯, 王跃林 2003 中国激光 **30** 731]
- [11] Ni J S, Zhao Y J, Wang C, Peng G D, Liu T Y, Chang J, Sun Z H 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 084205 (in Chinese) [倪家升, 赵燕杰, 王昌, 彭刚定, 刘统玉, 常军, 孙志慧 2012 物理学报 **61** 084205]
- [12] Yoshihiro O 1982 *Appl. Opt.* **21** 4316
- [13] Yoshihiro O 1985 *J. Lightwave Technol.* **3** 378
- [14] Zhang L M, Zhou S H, Zhao H, Zhang K, He J P, Zhang D Y, Zhu C, Li Y, Wang X F, Zhang H B 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 134205 (in Chinese) [张利明, 周寿桓, 赵鸿, 张昆, 郝金坪, 张大勇, 朱辰, 李尧, 王雄飞, 张浩斌 2014 物理学报 **63** 134205]
- [15] Tian H T, Li M, Jin J, Song N F, Zhang C X 2008 *Chin. Phys. B* **17** 573
- [16] Thomas J P, Eric A S 1993 *Opt. Lett.* **18** 1241
- [17] Yao X S, Maleki L 1996 *J. Opt. Soc. Am. B* **13** 1725
- [18] Yao X S, Maleki L 1994 *Electron. Lett.* **30** 1525
- [19] Arditty H J, Lefevre H C 1981 *Opt. Lett.* **6** 401
- [20] Jiang Y, Yu J L, Wang Y T, Zhang L T, Yang E Z 2007 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **19** 807

A new scheme of measuring Sagnac effect based on microwave resonant*

Wu Qiong Yu Jin-Long Wang Ju[†] Wang Wen-Rui Jia Shi Huang Gang-Bin
Hei Ke-Fei Li Li-Juan

(Optical Fiber Communication Lab, School of Electronic and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

(Received 4 July 2014; revised manuscript received 15 September 2014)

Abstract

The main principle of the existing optical gyroscope is based on the Sagnac effect. How to improve the measurement accuracy of the Sagnac effect is an important research topic of improving the gyro accuracy. The traditional optical gyro uses the short wavelength characteristic of light to improve the detection accuracy. But when considering the fact that the detection accuracy of the microwave phase/frequency is much higher than that of light wave phase/frequency, if the microwave can be used to detect the Sagnac effect, the detection accuracy higher than optical gyro accuracy can be obtained, which makes it possible to achieve high-accuracy microwave gyro. The Sagnac effect is detected by using the optoelectronic oscillator based light-carrying microwave structure. Experimental results prove the feasibility of detecting Sagnac effect by using microwave, which lays the foundation for realizing the high-precision microwave resonant gyroscope in the future.

Keywords: optoelectronic oscillator, Sagnac effect, microwave resonant gyroscope

PACS: 42.81.Pa, 42.60.Da, 84.30.Ng

DOI: 10.7498/aps.64.044205

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2012CB315704), the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Institution of Higher Education of China (Grant No. 20120032130010), and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61205061, 61405142, 61427817).

[†] Corresponding author. E-mail: wangju@tju.edu.cn