

# 谐振型光纤陀螺克尔效应误差消除方法研究

姚 琼 胡永明 宋章启 谢元平

(国防科学技术大学光电科学与工程学院,长沙 410073)

**摘 要** 对采用方波频率调制数字闭环谐振型光纤陀螺中克尔效应的影响进行了深入的理论分析. 分析表明,由克尔效应引起的陀螺误差不仅与光纤环内两相反方向光束的光强差有关,而且还依赖于两路光波频率调制的调制幅度. 通过适当调节两光束的频率调制幅度,可有效地实现克尔效应误差的消除. 这种基于方波频率调制的克尔效应误差消除方法利用了方波调制的特点,通过调节调制幅度实现误差消除,无需额外光学元件,对强度调制器调制频率要求低,是数字谐振型光纤陀螺系统中消除克尔效应误差的有效方法.

**关键词** 谐振型光纤陀螺;克尔效应;误差消除;方波频率调制

**中图分类号** TN256 **文献标识码** A

## 0 引言

非线性光学克尔效应是光纤陀螺中一种严重影响陀螺性能的非互易效应. 在谐振型光纤陀螺(R-FOG)中,由于高相干光源的使用,无法像干涉型光纤陀螺(I-FOG)一样使用宽带光源消除寄生效应,克尔效应的影响更加严重,成为了降低 R-FOG 误差的主要障碍<sup>[1,2]</sup>.

在 I-FOG 研究中,曾提出用方波强度调制的方法来降低克尔非互易性<sup>[3]</sup>,这种方法同样可以用于 R-FOG,但由于要求调制频率等于光纤环的本征频率,对于光纤长度只有几米的 R-FOG 来说,本征频率高达几十兆赫兹,对调制频率要求很高,其所需的调制精确度也难以达到要求,因而这种方法在 R-FOG 中难以实现<sup>[4]</sup>. 文献[4]中提出一种通过对光强的缓慢正弦调制将克尔效应误差进行分离,并通过调整两路光波光强消除克尔误差的方法,这种方法需要在陀螺光路中加入光衰减器,增加了系统的复杂性和成本.

在实现闭环数字 R-FOG 中,采用方波频率调制是较为理想的调制方案. 文献[5]中对方波调制 R-FOG 提出通过调节方波调制幅度消除克尔效应的方法. 本文将对采用方波频率调制 R-FOG 中克尔效应的影响进行深入的理论分析,得到闭环 R-FOG 中克尔效应误差与调制幅度的关系,给出了这种基于方波频率调制的 R-FOG 克尔效应误差消除方法的理论基础. 这种方法与方波频率调制技术相结合,能有效的消除克尔效应的影响,对强度调制器要求低,易于实现,而且不需要在光路中加入附加光学器件.

## 1 方波频率调制 R-FOG 原理

图 1 为 R-FOG 原理结构图. 其工作原理类似于 F-P 腔<sup>[6,7]</sup>,激光器的输出光由光纤耦合器 C4 分为两束,两束光波分别经过频率调制器 FM1、FM2 和耦合器 C1、C2 后,由耦合器 C3 进入光纤环形谐振腔形成沿顺时针和逆时针传播的谐振光束,然后分别通过耦合器 C2、C1,由探测器 D2、D1 进行探测. 当光纤环形腔平面相对于惯性系转动时,由于 Sagnac 效应,顺时针和逆时针两路光的谐振频率产生与旋转角速度成正比的频移,通过检测谐振频率差即可确定旋转角速度.

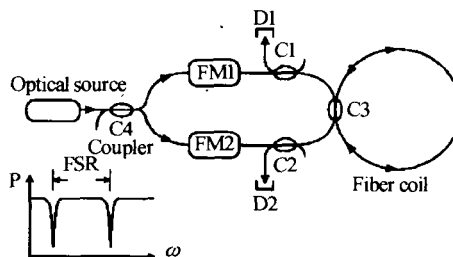


图 1 R-FOG 原理

Fig. 1 Schematic diagram of R-FOG

探测器上的光强可表示为<sup>[8]</sup>

$$I(\Psi) = [1 - \rho L(\Psi)] I_0 \quad (1)$$

其中

$$L(\Psi) = \frac{(1 - R_f)^2}{(1 - R_f)^2 + 4R_f \sin^2(\Psi/2)} \quad (2)$$

$\Psi$  为光波在光纤环中传播的相移,  $R_f$  是与环耦合器的耦合比、耦合器损耗和光纤环损耗有关的量. 当满足  $\Psi = 2m\pi$  时,  $L(\Psi) = 1$ , 发生谐振, 谐振深度为  $\rho$ . 设光纤环渡越时间为  $\tau_0$ , 定义  $FSR = \frac{1}{\tau_0}$ ,  $F =$

$\frac{\pi \sqrt{R_f}}{1 - R_f}$ ,  $\Gamma_c = \frac{FSR}{F}$  分别为谐振腔的自由谱宽、谐振精细度和谐振宽度. 设谐振中心频率为  $\nu_0$ , 满足

$2\pi\nu_0\tau_0 = 2m\pi$ , 将  $\Psi$  表示为  $\Psi = 2\pi\nu\tau$ , 当  $\frac{|\nu - \nu_0|}{\text{FSR}} \ll 1$  时, 由 FSR、 $F$ 、 $\Gamma_c$  代入式(2), 可得

$$L(\Psi) \approx L'(\nu - \nu_0) = \frac{(\Gamma_c/2)^2}{(\nu - \nu_0)^2 + (\Gamma_c/2)^2} \quad (3)$$

在 R-FOG 中, 为了检测两路光波的频率差, 需要对光波进行频率调制. 方波频率调制的原理如图 2. 设光波频率为  $\nu$ , 对光波加上幅度为  $\nu_m$ 、频率为  $f_m$  的方波频率调制, 则光波频率在  $\nu - \nu_m$  和  $\nu + \nu_m$  之间变化. 当光波频率在谐振中心频率处 ( $\nu = \nu_0$ , 实线所示) 时, 反射光强输出为直流; 当偏离谐振中心频率 ( $\nu \neq \nu_0$ , 虚线所示) 时, 反射光强将会出现方波形式的强度调制, 强度调制的频率与调制频率  $f_m$  相同, 幅度与谐振频率差呈线性关系, 将强度调制幅值作为谐振频率反馈误差信号, 即可以实现 R-FOG 的闭环信号处理.

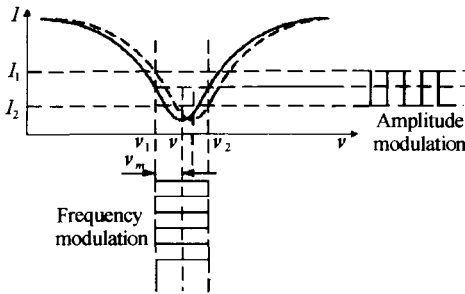


图 2 方波调制原理  
Fig. 2 Schematic diagram of square-wave frequency modulation

## 2 克尔效应误差的影响

以上分析没有考虑克尔效应的影响, 当考虑克尔效应时,  $\Psi$  中将包括由克尔效应引入的附加相移. 在 R-FOG 中, 设顺时针和逆时针的输入光强分别为  $u_R I_0$  和  $u_L I_0$ , 考虑非线性克尔效应的影响, 在环形谐振腔内两方向光束的光强分别为<sup>[9]</sup>

$$I_R(t, z) = \frac{\rho}{1 - t_f^2} L(\Delta_R + \theta_{KR}) e^{-\alpha_f z} e^{-\alpha_c} u_R I_0 \quad (4)$$

$$I_L(t, z) = \frac{\rho}{1 - t_f^2} L(\Delta_L + \theta_{KL}) e^{-\alpha_f(L-z)} e^{-\alpha_c} u_L I_0 \quad (5)$$

式中  $t_f$ ,  $\alpha_f$ ,  $\alpha_c$  分别为光纤环透射系数、光纤损耗和耦合器损耗,  $\Delta_R$  和  $\Delta_L$  分别为顺时针和逆时针光束绕光纤总长度一周的相移,  $\theta_{KR}$  和  $\theta_{KL}$  分别为由克尔效应引入的顺时针和逆时针光束的附加相移, 可表示为<sup>[9]</sup>

$$\theta_{KR} = \delta [u_R L(\Delta_R + \theta_{KR}) + 2u_L L(\Delta_L + \theta_{KL})] \quad (6)$$

$$\theta_{KL} = \delta [u_L L(\Delta_L + \theta_{KL}) + 2u_R L(\Delta_R + \theta_{KR})] \quad (7)$$

其中:  $\delta = \frac{2\omega\eta n_2}{cA(1-t_f^2)} \frac{1 - e^{-\alpha_f L}}{\alpha_f} \rho e^{-\alpha_f} I_0$ ,  $\eta$ 、 $A$ 、 $n_2$  和  $c$  分别为光纤的阻抗、光束传播的横截面积、克尔系数

和真空中的光速.

先讨论顺时针光束的情况. 设顺时针输入光波频率为  $\nu_R$ , 频率调制幅度为  $\nu_{mR}$ , 在采用方波频率调制的 R-FOG 中, 光波频率会在  $\nu_R - \nu_{mR}$  和  $\nu_R + \nu_{mR}$  之间变化, 则有

$$\Delta_R + \theta_{KR} = 2\pi(\nu_R \pm \nu_{mR})\tau_0 + \theta_{KR} = (2\pi\nu_R\tau_0 + \theta_{KR}) \pm 2\pi\nu_{mR}\tau_0 \quad (8)$$

对于闭环控制 R-FOG, R-FOG 的反馈控制将对输入光波频率进行控制, 使得谐振腔处于谐振状态, 这时输入光波频率应满足

$$2\pi\nu_R\tau_0 + \theta_{KR}^0 = 2m\pi \quad (9)$$

$\theta_{KR}^0$  为谐振时的  $\theta_{KR}$  值, 则式(8)变为

$$\Delta_R + \theta_{KR}^0 = 2m\pi \pm 2\pi\nu_{mR}\tau_0 \quad (10)$$

代入式(6), 可得谐振时的  $\theta_{KR}$  值为

$$\theta_{KR}^0 = \delta [u_R L(\pm 2\pi\nu_{mR}\tau_0) + 2u_L L(\pm 2\pi\nu_{mL}\tau_0)] \quad (11)$$

由式(3), 有

$$L(\pm 2\pi\nu_{mR}\tau_0) \approx L'(\pm \nu_{mR}) = L'(\nu_{mR}) \quad (12)$$

$$L(\pm 2\pi\nu_{mL}\tau_0) \approx L'(\pm \nu_{mL}) = L'(\nu_{mL}) \quad (13)$$

代入式(11)得

$$\theta_{KR}^0 = \delta [u_R L'(\nu_{mR}) + 2u_L L'(\nu_{mL})] \quad (14)$$

同理, 对逆时针光束有

$$\theta_{KL}^0 = \delta [u_L L'(\nu_{mL}) + 2u_R L'(\nu_{mR})] \quad (15)$$

对于闭环控制 R-FOG, 转速信号是由满足谐振条件时两路光波频率差决定的. 谐振时, 两路光波频率应满足  $2\pi\nu_R\tau_0 + \theta_{KR}^0 = 2m\pi$  和  $2\pi\nu_L\tau_0 + \theta_{KL}^0 = 2m\pi$ , 则由克尔效应所引起的频率检测误差为

$$\Delta\nu_{kerr} = \nu_R - \nu_L = \frac{1}{2\pi\tau_0} (\theta_{KL}^0 - \theta_{KR}^0) = \frac{\delta [u_R L'(\nu_{mR}) - u_L L'(\nu_{mL})]}{2\pi\tau_0} \quad (16)$$

从式(16)可以看出, 由克尔效应引起的陀螺误差不仅与光纤环内沿相反方向传播光束光强差的起伏(即分束比的起伏)有关, 而且还依赖于两路光波频率调制幅度的变化. 若两路光波频率调制幅度相同  $\nu_{mR} = \nu_{mL}$ , 当  $u_R \neq u_L$  时, 谐振腔中顺时针和逆时针之间存在光强差, 这时光学克尔效应将就不可避免的给 R-FOG 带来非互易的偏差漂移.

## 3 克尔效应误差消除

从式(16)中可以看出, 若能选择适当的  $\nu_{mR}$ ,  $\nu_{mL}$  使得满足  $u_R L'(\nu_{mR}) - u_L L'(\nu_{mL}) = 0$ , 就可使得  $\Delta\nu_{kerr} = 0$ , 消除克尔效应的影响. 将式(3)代入式(16)可得

$$u_R L'(\nu_{mR}) - u_L L'(\nu_{mL}) = \{(\Gamma_c/2)^2 \{u_R [(\nu_{mL})^2 + (\Gamma_c/2)^2] - u_L [(\nu_{mR})^2 + (\Gamma_c/2)^2]\} / [(\nu_{mR})^2 + (\Gamma_c/2)^2] - u_L [(\nu_{mL})^2 + (\Gamma_c/2)^2]\} / [(\nu_{mR})^2 + (\Gamma_c/2)^2] \quad (17)$$

若调节两方向光波的方波调制幅度,使满足

$$\frac{(\nu_{mR})^2 + (\Gamma_c/2)^2}{(\nu_{mL})^2 + (\Gamma_c/2)^2} = \frac{u_R}{u_L} \quad (18)$$

即可实现  $\Delta\nu_{\text{kerr}}=0$ .

为了消除克尔效应误差,可以将克尔误差  $\Delta\nu_{\text{kerr}}$  作为反馈控制量,调节两路光的方波调制深度  $\nu_{mR}$ ,  $\nu_{mL}$ ,当满足式(18)时, $\Delta\nu_{\text{kerr}}$ 反馈控制为0.但当陀螺处于动态时,克尔效应所引起的误差将和实际的陀螺转速信号混合在一起而无法区分.为了将克尔效应误差和陀螺转速区分开来,对光源光强进行频率为  $k$  低频调制<sup>[4,5]</sup>.为了避免光源低频调制后对陀螺信号探测的影响,要求调制频率  $k$  远低于陀螺方波调制频率而高于陀螺转速信号带宽.由于  $\delta \propto I_0$ ,  $\Delta\nu_{\text{kerr}} \propto I_0$ ,这时陀螺输出信号中将出现频率为  $k$  的谐波分量,谐波分量的大小正比于克尔效应误差.调节两路光波的方波调制深度  $\nu_{mR}$  和  $\nu_{mL}$ ,使频率为  $k$  的谐波分量为零,就可以消除克尔效应误差.

从上面的分析可以看出,这种基于方波频率调制的克尔效应误差消除方法充分利用了方波频率调制的特点,通过调整两路光波的频率调制幅度来实现误差的消除,而不需要在光路中加入光衰减器等光学器件,有效的简化了系统结构,减低了成本;另一方面,这种方法虽然同样需要对光源进行强度调制,但由于是光强的低频调制,对强度调制器的调制频率要求不高,是较易实现的.

## 4 结论

数字化是 R-FOG 的发展趋势之一,方波频率调制是实现 R-FOG 数字化的较为理想的频率调制方案.本文对采用方波频率调制 R-FOG 的克尔效应误差进行了理论分析.分析表明,由克尔效应所引起的陀螺误差不仅与光纤环内两相反方向光束的光强差有关,而且还依赖于两路光波频率调制的调制幅度变化.通过对光源光强进行低频调制,将克尔效应误差从陀螺信号中提取出来,误差信号作为反馈量,控制调节两路光束的频率调制幅度,可有效

实现克尔效应误差的消除.这种基于方波频率调制的克尔效应误差消除方法,充分利用了方波频率调制的特点,通过调整两路光波的频率调制幅度实现克尔误差消除,不需要附加光学器件,对强度调制器要求低,是数字 R-FOG 系统中消除克尔效应误差的有效方法.

## 参考文献

- 1 Lefevre H C. 光纤陀螺仪. 北京:国防工业出版社,2002. 1  
Lefevre H C. The Fiber-Optic Gyroscope. Beijing: National Defence Industry Press,2002. 1
- 2 Kazuo Hotate, Koichi Takiguchi. Drift reduction in an optical passive ring-resonator gyro. *Proceedings of SPIE*,1991,**1585**:116~127
- 3 Bergh R A, Lefevre H C, Shaw H J. Compensation of the optical Kerr effect in fiber-optic gyroscopes. *Optics Letters*,1982,**7**(6):282~284
- 4 Koichi Takiguchi, Kazuo Hotate. Method to reduce the optical Kerr-effect-induced bias in an optical passive ring-resonator gyro. *Photonics Technology Letters*,1992,**4**(2):203~206
- 5 Kazuo Hotate, Michiko Harumoto. Resonator fiber optic gyro using digital serrodyne modulation. *Journal of Lightwave Technology*,1997,**15**(3):466~473
- 6 毕卫红. 光纤 Fabry-Perot 干涉仪在传感应用中的数学模型. 光子学报,1999,**28**(8):744~747  
Bi W H. *Acta Photonica Sinica*,1999,**28**(8):744~747
- 7 康崇,王政平,黄宗军,等. 光纤 Fabry-Perot 谐振腔的精细度对相位灵敏度的影响. 光子学报,2005,**34**(3):428~430  
Kang C, Wang Z P, Huang Z J, et al. *Acta Photonica Sinica*,2005,**34**(3):428~430
- 8 Iwatsuki K, Hotate K, Higashiguchi M. Effect of rayleigh backscattering in an optical passive ring-resonator gyro. *Applied Optics*,1984,**23**(21):3916~3924
- 9 Katsumi Iwatsuki, Kazuo Hotate, Minoru Higashiguchi. Kerr effect in an optical passive ring-resonator gyro. *Journal of Lightwave Technology*,1986,**LT-4**(6):645~650

## Study on Kerr-Effect-Induced Bias Reduction Method for Resonator Fiber Optic Gyroscope

Yao Qiong, Hu Yongming, Song Zhangqi, Xie Yuanping

*School of Photoelectronics Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073*

Received date: 2004-06-25

**Abstract** The influence of Kerr effect to close-loop digital resonator fiber optic gyroscope based on square-wave frequency modulation was analyzed in theory. The results show that the Kerr-effect-induced bias relates to the light intensity difference between two inverse lightwaves, and the amplitudes of square-wave frequency modulation of these inverse lightwaves also affect it. Through proper adjustment to frequency modulation amplitude, the Kerr-effect-induced bias can be effectively reduced. This method for Kerr-effect-induced bias reduction utilizing the characteristic of square-wave frequency modulation, need without any additional optical devices, has low intensity modulation frequency requirement. And it is a effective method for Kerr-effect-induced bias reduction in close-loop digital R-FOG.

**Keywords** Resonator fiber optic gyroscope; Kerr effect; Bias reduction; Square-wave frequency modulation



**Yao Qiong** born in 1979, who is a doctoral student in School of Photoelectronics Science and Engineering, National University of Defense Technology. She received the B. S. degree in photoelectronic technology from National University of Defense Technology, in 2000. Now she focuses on the technology of fiber optic sensors.