

# 一种新型谐振干涉式光纤陀螺的原理分析

曾雪飞\* 陈海燕 刘永智

(电子科技大学 宽带光纤传输与通信系统技术国家重点实验室 成都 610054)

**【摘要】**提出了一种新型的谐振干涉式光纤陀螺,推导了光强透过率表达式与谐振式,对再入式光纤陀螺的旋转探测灵敏度进行了比较,并进行了系统方案设计,理论分析表明,3 m长的保偏光纤有源谐振干涉式陀螺可以获得优于 $22^\circ/\text{h}$ 的理论分辨率。

**关键词** 谐振干涉式光纤陀螺; 光纤传感器; 掺铒光波导放大器

中图分类号 TN253 文献标识码 A

## Theoretical Analysis of Novel Resonant-Interferometric Optical Fiber Gyroscope

Zeng Xuefei Chen Haiyan Liu Yongzhi

(State Key Laboratory of Broadband Optical Fiber Transmission and Communication Networks, UEST of China Chengdu 610054)

**Abstract** A novel resonant-interferometric fiber optical gyroscope is proposed in the paper, the formula of optical intensity transmittance of the RIFOG's is deduced, the sensitivity of the rotation of the REFOG, RFOG and the RIFOG is compared. The system scheme of the RIFOG is designed, and as shown by the theoretical analysis, the system with 3-meter-length of polarization maintaining fiber ring-resonator and optical amplifier in it can get theoretical resolution better than  $22^\circ/\text{h}$ .

**Key words** resonant-interferometer fiber optical gyroscope; optical fiber sensor; erbium-doped waveguide amplifier

光纤陀螺是一种非常重要的角速率传感器件,具有寿命长、启动快、精度高、耗电少、动态范围宽等优点,在航空航天、武器导航等领域起到了极为关键的作用<sup>[1-3]</sup>。当前光纤陀螺主要采用干涉式光纤陀螺(IFOG)<sup>[3]</sup>、谐振式光纤陀螺(RFOG)两种方案<sup>[4]</sup>。干涉式光纤陀螺相对比较成熟,为了提高系统探测精度降低噪声,采用了超辐射发光光源(SLD)及长达数百米的保偏光纤线圈,同时也带来了系统体积重量较大,系统稳定性降低、成本较高的缺点。谐振式光纤陀螺采用循环光束之间的多波干涉的原理,可以在较短的光纤中获得较高的探测精度,使需要高相干光源 $\Delta u < 100$  kHz、低损耗的保偏耦合器<sup>[4]</sup>,而且高相干光源也引入了较强的后向反射散射噪声。在此之后又提出了一种再入式光纤陀螺(REFOG)<sup>[5-7]</sup>,该种陀螺采用低相干光源(SLD),利用光在谐振腔中相向传输的光传输相同圈数后出射干涉的原理,获得较高的输出曲线精细度,通过光放大器有源放大可获得较高的探测灵敏度,缺点是输出中包含了大量无转动信息(直接通过耦合器未进入谐振腔)的光,使其在无源情况下探测灵敏度较低,即使是在有源情况下,由于增益饱和也给光放大器带来了负担。而且采用SLD始终是陀螺方案中的一种折中,但该器件存在工艺技术较复杂、输出功率较低(一般 $< 150 \mu\text{W}$ )、价格昂贵、光源稳定性差等缺点,特别是限制了多轴系统中光源复用方案系统精度的提高<sup>[8]</sup>。

2002年11月30日收稿

\* 男 24岁 博士生 主要从事光纤传感技术、集成光学技术方面的研究

鉴于此, 本文提出了一种放宽光源相干特性要求的单模激光器的谐振干涉陀螺方案。

## 1 基本原理

谐振干涉式陀螺采用相干光源, 但是对光源相干特性的要求大大降低, 这样可以使用一般的商用DFB器件作为激光光源。谐振干涉式陀螺原理如图1所示, 图中采用了透射式环形谐振腔结构, 利用透射光束之间的相互干涉获得所需要的输出曲线。CC、CC'为3 dB耦合器,  $k_1$ 、 $k_2$ 与 $g_1$ 、 $g_2$ 分别表示耦合器CC<sub>1</sub>、CC<sub>2</sub>的光强耦合系数与耦合损耗。设 $C_m = \sqrt{1-k_{mn}}$ 、 $B_m = \sqrt{k_{mn}}$ 、 $A_m = \sqrt{1-g_{mn}}$  ( $mn = 1, 2$ )且 $C = C_1C_2$ 、 $B = B_1B_2$ 、 $A = A_1A_2$ 则获得

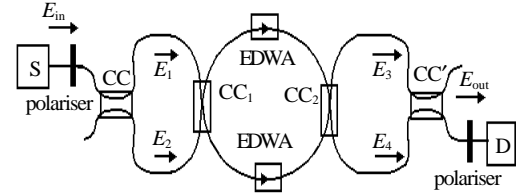


图1 谐振干涉式陀螺原理图

$$E_3 = E_1 A B a_1 \sum_{m=1}^{\infty} (A C a_1^2)^{m-1} \exp \left\{ j \left[ \mathbf{j} \left( t - \frac{\mathbf{t}}{2} \right) - \mathbf{j} \left( t - \frac{2m-1}{2} \mathbf{t} \right) \right] \right\} \quad (1)$$

$$E_4 = E_2 A B a_2 \sum_{n=1}^{\infty} (A C a_2^2)^{n-1} \exp \left\{ j \left[ \mathbf{j} \left( t - \frac{\mathbf{t}}{2} \right) - \mathbf{j} \left( t - \frac{2n-1}{2} \mathbf{t} \right) \right] \right\} \quad (2)$$

$$E_{\text{out}} = \frac{1}{\sqrt{2}} (E_3 + E_4) \quad (3)$$

式中  $m, n=1, 2, 3, \dots$  表示光在谐振腔中传输圈数

$$\mathbf{a}_1 = \exp \left\{ \frac{1}{2} [-\mathbf{a}_0 L + j(\mathbf{b} L + \mathbf{f}_{sm})] \right\} \quad (4)$$

$$\mathbf{a}_2 = \exp \left\{ \frac{1}{2} [-\mathbf{a}_0 L + j(\mathbf{b} L - \mathbf{f}_{sm})] \right\} \quad (5)$$

式中  $\mathbf{a}_1$ 、 $\mathbf{a}_2$  分别表示逆时针和顺时针方向传输的光在环形谐振腔中传输  $\frac{L}{2}$  的长度后, 光的损耗相移因子。

式中  $L$  为光纤谐振腔长度,  $\mathbf{b}$  表示光的传播常数,  $2\mathbf{f}_{sm}$  为旋转造成的Sagnac相移。得到

$$T_{\text{out}}(\mathbf{f}_{sm}) = \frac{\langle E_{\text{out}}^* E_{\text{out}} \rangle}{\langle E_{\text{in}}^* E_{\text{in}} \rangle} = \frac{1}{4} \left\{ \left( \frac{1}{h_1} + \frac{1}{h_2} \right) \left[ +2 \frac{\cos \mathbf{f}_{sm} - 2ACd |\mathbf{a}_1|^2 \cos(\mathbf{b}L) + A^2 C^2 |\mathbf{a}_1|^4 d^2 \cos \mathbf{f}_{sm}}{h_1 h_2} \times \right. \right. \\ \left. \left[ d^2 + (1-d^2) \frac{1}{h_3} (1 - A^2 C^2 |\mathbf{a}_1|^4 \cos 2\mathbf{f}_{sm}) \right] - 4A^2 C^2 |\mathbf{a}_1|^4 (1-d^2) \times \right. \\ \left. \left. \left( \frac{\sin^2 \mathbf{f}_{sm} \cos \mathbf{f}_{sm} - A^2 C^2 |\mathbf{a}_1|^4 d^2 \cos \mathbf{f}_{sm} \sin^2 \mathbf{f}_{sm}}{h_1 h_2 h_3} \right) \right\} B^2 A^2 |\mathbf{a}_1|^2 \quad (6)$$

式中  $h_1 = |1 - ACd\mathbf{a}_1^2|^2$ 、 $h_2 = |1 - ACd\mathbf{a}_2^{*2}|^2$ 、 $h_3 = |1 - A^2 C^2 \mathbf{a}_1^2 \mathbf{a}_2^{*2}|^2$ ,  $d$  为光源相干因子<sup>[9]</sup>, 由于式(6)较复杂, 选择  $\mathbf{b}L = 2k\pi$  作为偏置可以得到谐振干涉式陀螺在无源情况下的输出曲线如图2所示。经透射式结构的谐振腔与反射式谐振腔相比, 光在谐振腔中需要通过两个耦合器, 耦合器上都有损耗, 所以被认为输出曲线的精细度和输出振幅相对较小, 但是采用透射式结构不存在反射式谐振腔中用于探测器分光探测的耦合器, 光功率利用率是反射式谐振腔的4倍。谐振干涉式陀螺的输出曲线实际上有两部分组成, 1) 是谐振腔相向传输的光透射部分的光强之和; 2) 是两相向传输的光的透射部分的互相干; 第一部分光的特性和传统的谐振式陀螺的输出特性相同, 随着相干系数的降低输出光振幅和精细度都迅速劣化, 而第二部分光的输出精细度主要通过系统损耗特性决定, 输出幅值受到光源相干因子的影响, 所以较前者而言受到光源相干系数的影响较小。

## 2 数值分析与讨论

### 2.1 灵敏度分析

由图2可看到与其他结构的陀螺一样，谐振干涉式陀螺的输出曲线在零相移处的灵敏度低，所以需要引入一个偏置相移，使得系统工作更为有效。灵敏度定义为

$$S(f_{sm}) = \left| \frac{\partial T_{out}(f_{sm})}{\partial f_{sm}} \right| \tag{7}$$

$$S_{max} = S(f_{smopt}) \tag{8}$$

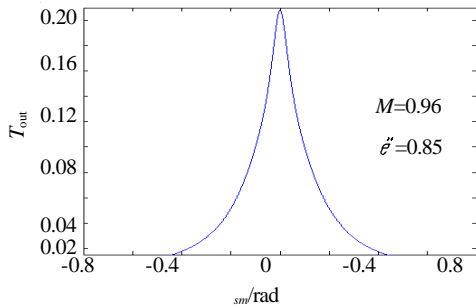


图2 谐振干涉式陀螺输出曲线

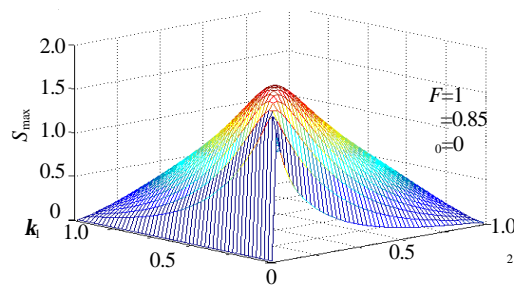


图3 谐振干涉式陀螺的灵敏度分析

与再入式陀螺的无源腔类似，输出曲线的精细度的提高和输出幅值的增加是矛盾的，只能通过参数优化获得较高的灵敏度。谐振干涉式陀螺的灵敏度如图3所示，图中分析了 $F=1$ 、 $d=0.85$ 情况下所对应不同 $k_1$ 、 $k_2$ 参数时最大灵敏度曲线。再入式陀螺的灵敏度如表1所示，系统参数

$$F = A \exp(-a_0 L) \tag{9}$$

表1 谐振干涉式陀螺的灵敏度分析

系统参数	谐振干涉式				谐振(透射式)		再入式
	$F=1$ $d=0.85$	$F=0.977$ $d=0.85$	$F=0.955$ $d=0.85$	$F=0.977$ $d=0.99$	$F=0.977$ $d=0.99$	$F=0.977$ $d=0.85$	$F=0.977$ $d=0$
$S_{max}$	2.13	1.47	1.15	5.20	2.42	0.18	0.23
$S_{max}$ 时耦	$k_1=0.075$	$k_1=0.164$	$k_1=0.21$	$k_1=0.056$	$k=0.03$	$k=0.08$	$k=1$
合系数	$k_2=0.075$	$k_2=0.164$	$k_2=0.21$	$k_2=0.056$			
$f_{smopt}/rad$	$\pm 0.047$	$\pm 0.115$	$\pm 0.155$	$\pm 0.038$	$\pm 0.028$	$\pm 0.13$	$\pm 0.666$

根据表1可得出以下结论：

1) 在其他条件相同的情况下，谐振式、谐振干涉式、再入式三种陀螺中，谐振干涉式陀螺的灵敏度是最高的。

2) 和谐振式陀螺类似，随着系统损耗减小、光源相干系数的增加，谐振干涉式陀螺的灵敏度增加，其输出曲线受光源相干系数 $d$ 影响相对谐振式陀螺较小<sup>[5]</sup>。放宽了谐振干涉式陀螺对光源的影响。

3) 当系统取得最大灵敏度时 $k_1=k_2$ 。

谐振干涉式、谐振式、再入式陀螺三者在无源情况下的灵敏度曲线如图4所示。从图中可知，耦合系数无论如何取值谐振干涉式陀螺的灵敏度都比另外两种陀螺探测灵敏度高。

根据以上的分析得知，尽管在无源情况下谐振式陀螺的灵敏度相对较高，但是要想通过数米的光纤线圈实现对中低精度角速度探测，这样的灵敏度还是较小，这是由于输出曲线的精细度的提高和输出幅值的增加是矛盾的。解决这一矛盾的方法一方面是提供增益放大，另一方面适当增大耦合器耦合系数 $k$ ，以增加输出幅值，通过增益补偿的方式，弥补较大的耦合系数带来的系统输出损耗，使得 $M$ 趋近于1，保证输出的精细度。设增益系数为 $g$ 保证式(1)、式(2)收敛，应满足

$$AC \exp(-a_0 L) g < 1 \tag{10}$$

两种陀螺系统在有源放大的情况下灵敏度比较如图5所示, 从图中得知谐振干涉式陀螺在有源情况下其灵敏度也远高于再入式陀螺, 体现了优越性。

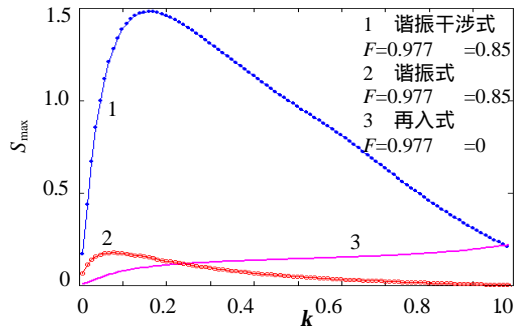


图4 无源情况下三种陀螺的灵敏度比较

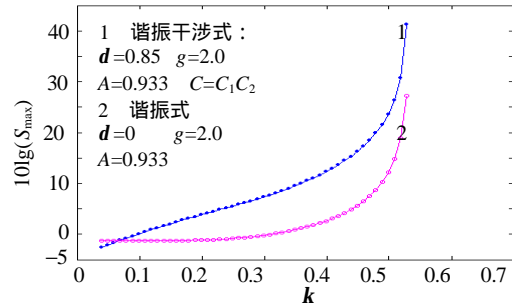


图5 两种陀螺系统在有源情况下灵敏度比较

### 2.2 系统设计实例

系统的分辨率决定于系统的噪声等效功率, 在有源放大谐振干涉的系统中, 分辨率主要决定于光放大器噪声, 对于放大器噪声的分析将另文研究, 假设系统噪声等效功率为  $P_s = 1 \mu\text{W}$ , 系统设计如表2所示, 这样可计算系统分辨率为

$$W_{\min} = \frac{P_s}{P_{\text{in}}} \frac{CI}{S 4\pi RL} \tag{11}$$

根据表2采用普通DFB光源, 在3 m长的保偏光纤内加入低成本低增益的光放大器可以获得  $22^\circ/\text{h}$ 角速率的分辨率, 实现了中低精度的角速率探测。系统构成都采用成熟的器件, 因为价格便宜、成本低、灵敏度高。

表2 系统设计实例

器件与系统	特性	参数
光源	DFBLD $P_{\text{in}}=1.5 \text{ mW}$ $\Delta n = 20 \text{ MHz}$ (高斯分布)	$P_{\text{in}} = 1.5 \text{ mW}$ $d = 0.85^{[9]}$
保偏光纤	长度3 m损耗2 dB/km	$a_0 = 0.23/\text{km}$
耦合器	2个保偏光纤耦合器 耦合损耗0.4 dB	$k_1 = 0.12$ $k_2 = 0.12$
EDWA	两个双向泵浦低增益低成本 光放大器净增益0.8 dB	$A = 0.91$ $g = 1.2$
谐振干涉式陀螺系统	$f_{\text{smopt}} = \pm 0.01 \text{ rad}$ $P_s = 1 \mu\text{W}$ $S = 160/\text{rad}$	$W_{\min} = 22^\circ/\text{h}$

### 3 结论

本文提出一种新型的谐振干涉式光纤陀螺技术方案, 该方案结合了传统的谐振式光纤陀螺(RFOG)及再入式光纤陀螺(REFOG)的优点, 利用谐振多光束的再相干效应, 提高了系统灵敏度, 放宽了光源光谱线宽的要求, 增加了光功率利用率。结合光放大器可在较短光纤中实现中低精度角速率探测, 通过系统设计, 采用了3 m长的保偏光纤有源环形腔, 获得了优于  $22^\circ/\text{h}$ 的理论精度。

(下转第308页)

## 参 考 文 献

- [1] Nayo W, Ken-Ichi K. A 10 Gb/s optical code division multiplexing using 8-chip optical bipolar code and coherent detection[J]. IEEE Journal of Lightwave Technology,1999,17(10):1 758-1 765
- [2] Kavehrad M, Zaccarin D. Optical code division multiplexed systems based on spectral encoding of noncoherent sources[J]. IEEE Journal of Lightwave Technology,1995,13(3):534-545
- [3] Dennis T, Young Y F. Measurements of BER performance for bipolar encoding of an SFS.[J]IEEE Journal of Lightwave Techno.,1999,17(9):1 542-1 546
- [4] Nguyen L, Dennis T, Aazhang B, *et al.* Experimental demonstration of bipolar codes for optical spectral amplitude CDMA communication. [J]IEEE Journal of Lightwave Technology,1997,15(9):1 647-1 653
- [5] Yao S X, Jack F, Logan R, *et al.* Limitations on pulse power,pulse width,and coding mask misalignment in a fiber OCDMA system[J]. IEEE Journal of Lightwave Technology,1993,11(6):837-846
- [6] Marc M,Wefers,Keith A.Programmable phase and femtosecond pulse shaping[J]. Optical Lett.,1993,18(23):2 032-2 034
- [7] 刘国骊,刘文东,周浩强,等. 光CDMA编解码器的误差分析.[J]光通信研究, 2001, 103(1): 38-40

编辑 孙晓丹

-----  
(上接第303页)

## 参 考 文 献

- [1] Sanders G A, Liu R Y, Laskoskie C, *et al.* Fiber optic gyros for space ,marine and aviation applications. SPIE, 1996, 2837: 61-71.
- [2] Malvern A R. Progress towards fiber optic Gyro Production Proc. SPIE, 1991,1585: 42-47
- [3] Liu R Y, wailly T E, Olson M, *et al.* A miniaturized, low-cost IFOG for tactical weapon application[C]. SPIE, 1996
- [4] Kazuo H .Passive and active resonator fiber optic gyros[C]. SPIE, 1997
- [5] Yu A, Siddiqui A S. Theory of a novel high sensitivity optical fiber gyroscope[J]. IEEE. Proc. J. Optoelectronics, 1993, 140(2): 150-156
- [6] Hu Zhaoyang , Zhang Yanshen, Tang guoan. Re-entrant fiber optic rotation sensor with active ring resonator using semiconductor optical amplifier[J]. Electronics Letters. 1999, 35(25): 226-227
- [7] Farhadiroshan M. Optical fiber resonator rotation sensor using a low coherence source[C]. SPIE,1986
- [8] Jin W, Culshaw B. Multiplexing of fiber optic gyroscopes[C]. SPIE, 1996
- [9] 胡宗福, 钱景仁, 沈会明. 光源的特性对光纤环形腔有效精细度的影响[J]. 光学学报, 1997, 17(5): 609-613

编辑 刘文珍