

干涉式光纤陀螺技术发展综述

邱嘉莹, 王磊*, 黄腾超, 舒晓武

浙江大学光电科学与工程学院光学惯性技术工程中心, 浙江 杭州 310027

摘要 自 20 世纪 70 年代以来, 伴随着光通信领域中光纤、光源和相位调制器等光学器件的逐渐应用和走向成熟, 具有独特优势的基于 Sagnac 效应的干涉式光纤陀螺 (IFOG) 技术得到了迅速发展。40 多年来, 该技术从实验室走向了陆海空天等各个领域。回顾了 IFOG 技术的发展过程。首先, 介绍了自 Sagnac 效应发现至实用化期间 IFOG 技术的探索历程。然后, 阐述了 IFOG 经典的最小互易光学结构与信号处理方案。接着, 梳理了 IFOG 技术在高精度、小型化和环境适应性等方面的研究现状。最后, 分析了该技术发展、应用的趋势和方向。

关键词 光纤光学; 光纤陀螺; 非互易相位差; 灵敏度; 标度因数

中图分类号 O436 文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1706004

Review of Development of Interferometric Fiber-Optic Gyroscopes

Qiu Jialuo, Wang Lei*, Huang Tengchao, Shu Xiaowu

Optical Inertial Technology Center, College of Optical Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang, China

Abstract Since the 1970s, the interferometric fiber-optic gyroscope (IFOG) technology based on the Sagnac effect, which boasts unique advantages, has developed rapidly with the increasing application and maturity of optical devices such as optical fibers, light sources, and phase modulators in optical communication. Over the past 40 years, this technology has moved from the laboratory to various practical fields such as land, sea, air, and space. This paper reviews the recent development of the IFOG technology. Firstly, the exploration process of this technology from the birth of the Sagnac effect to its practical applications is introduced. Secondly, the classical minimum reciprocity configuration of IFOGs and the signal processing scheme are described. Then, the research status of this technology in high precision, miniaturization, and application environment adaptability is summarized. Finally, the development and application trends of this technology are analyzed.

Key words fiber optics; fiber optic gyroscope; nonreciprocal phase difference; sensitivity; scale factor

1 引言

距 1976 年第一个干涉式光纤陀螺 (IFOG) 出现, 干涉式光纤陀螺技术已经经历了 40 多年的发展。得益于干涉式光纤陀螺全固态、可靠性高、配置灵活、寿命长、启动快和响应快等技术优点, 其精度已经覆盖了中低至超高精度, 应用遍布了陆海空天等各个领域。

光纤陀螺技术的发展可以追溯至 1913 年。法国科学家 Sagnac 在使用环形干涉仪研究以太问题时, 发现当载体旋转时, 在环形结构中相向传输的两束光之间的相位差发生了改变, 这种相对于惯性空间旋转而产生的光学现象被称为 Sagnac 效应^[1]。1963 年, Macek 和 Davis 等^[2]借助于 He-Ne 激光器构建了一个

方形的环形谐振腔, 验证了 Sagnac 效应。将光纤技术应用到陀螺仪中, 还依赖于通信领域中低损耗单模光纤的应用与推广。1967 年, 法国科学家 Pircher 和 Hepner 提出了用多匝光纤环进行绕制来增强 Sagnac 效应进而提高光纤陀螺灵敏度的设想^[3]。接着, 美国犹他大学 Vali 和 Shrothill^[4-5]用 10 m 和 960 m 两种长度的单模光纤制作了敏感环圈, 敏感环圈可与激光器、耦合透镜和分束器组成一个光纤陀螺系统, 并且观察到了转动引起的干涉条纹变化。至此, 干涉式光纤陀螺原理得到了验证, 随后进入了该技术的快速发展期。本文通过梳理干涉式光纤陀螺技术探索过程中的重要研究, 结合最小互易结构的原理, 归纳当前技术研究的热点和现状, 分析光纤陀螺的未来发展方向。

收稿日期: 2022-06-06; 修回日期: 2022-06-16; 录用日期: 2022-08-01

通信作者: hfptic@zju.edu.cn

2 探索阶段

一种新原理传感器在问世后,初期的研究工作集中在灵敏度探寻、误差源抑制等可用性探索中。非互易误差、响应线性度和稳定性是光纤陀螺中需要关注的几个点,直接影响其基本特性。这一时间的研究工作以国外科研机构为主导,主要有犹他大学、麻省理工学院、斯坦福大学、霍尼韦尔公司等。

2.1 非互易误差的抑制

在 Sagnac 效应中,载体旋转的角速度与两束相向传播光的相位差成正比。一般来说,两束光最小的相位差在 $10^{-8} \sim 10^{-9}$ rad 范围内。然而,光在光学系统传输中相位的累积值可达到 $10^9 \sim 10^{10}$ rad^[6]。光学系统细微的误差均会影响陀螺的测量精度和稳定性。这些误差包括了瑞利散射、背向反射、偏振、克尔效应、法拉第效应和温度等各种因素引起的相位误差,因无法与转动引起的相位差区分,故也被称为非互易相位差。20 世纪 70 年代至 80 年代,研究学者对光纤陀螺的各种非互易误差源进行了研究,并结合当时的新兴器件提出了多种形式的解决方案。

麻省理工学院 Davis 和 Ezekiel^[7]指出光纤陀螺的检测极限会受到散粒噪声的限制,结合相位检测、反馈

补偿技术和合适功率的光输入,光纤陀螺可达到理论测量精度。斯坦福大学 Culter 等^[8]研究了散射对测量精度的影响,认为入射光的背向散射是限制光纤陀螺检测精度的误差因素之一,采用脉冲光可以减小散射光的大小。关于温度引起的非互易性误差,Shupe^[9]于 1980 年分析了环境温度的影响机理,即环境温度引起光纤形变,两束相向传输的光经过形变区域的时间不同,产生相位误差,进而使光纤陀螺的性能劣化。将距离中心对称的光纤并排放置,可以抑制这种误差。这种热致非互易误差现象也被称为 Shupe 效应。Mohr^[10]于 1996 年提出了一种被广泛采用的光纤线圈绕制方法——四极对称绕制法,有效改善了由径向温度梯度引起的误差。

互易性结构设计的重要性在 Ulrich^[11]进行低漂移陀螺仪设计时得到了确认。如图 1(a)所示, Ulrich 在光学系统配置中使用了一个单模光纤滤波器,光学系统在反射模式下共用一个输入输出端口,搭建了一个由分立器件构成的光路最小互易性结构。结合信号偏置和偏振控制,在 0.3 s 陀螺测试时间内得到了 $0.01 (^{\circ})/s$ 的零偏稳定性。分立器件结构在应用时易受到振动等因素的影响,更具稳定性的全光纤一体化光纤陀螺方案由 Bergh 等^[12]在 1981 年第一次实现。如

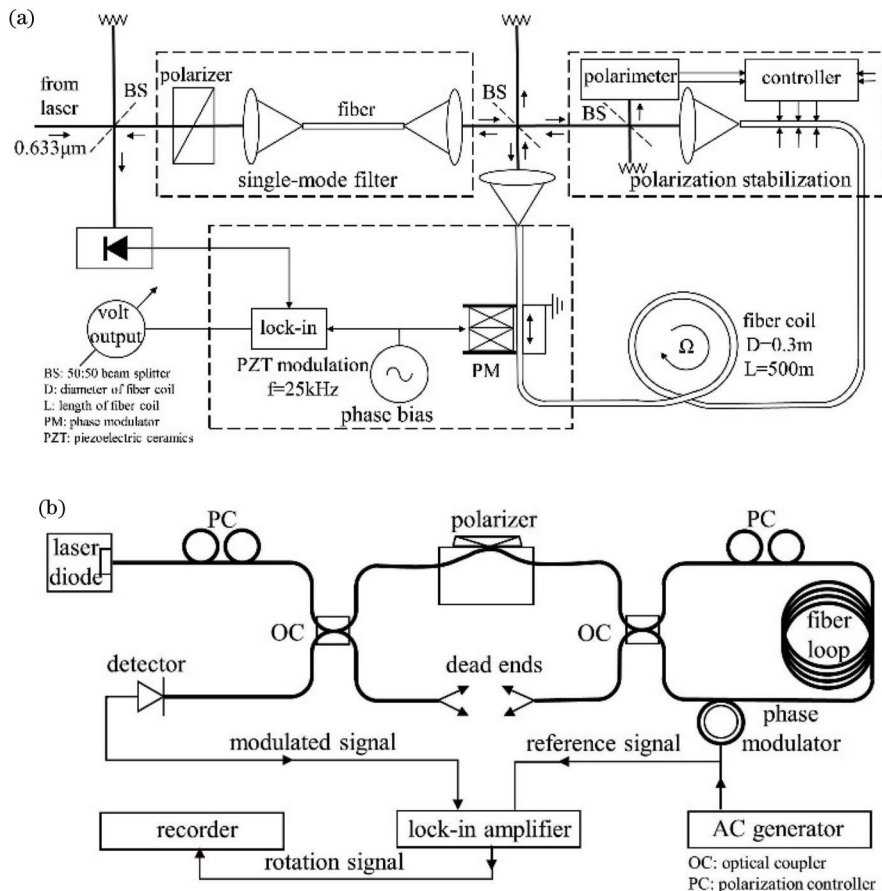


图 1 分立器件与全光纤的互易结构形式。(a)采用分立器件搭建的互易结构^[11]; (b)全光纤互易结构^[12]

Fig. 1 Reciprocal structure built with discrete devices and all-fiber reciprocal structure. (a) Reciprocal structure built with discrete devices^[11]; (b) all-fiber reciprocal structure^[12]

图 1(b)所示,陀螺的全部光路没有拼接,而是采用一根光纤搭建完成。搭建的系统在 30 s 积分时间下零偏稳定性可达到 $0.2 (^{\circ})/h$ 。

Ezeziel 等^[13]发现了克尔效应引起的非互易性强度噪声会使陀螺产生短时误差。经分析验证,光源使用超辐射发光二极管(SLD)或多模激光,能够有效抑制该类型的误差^[14]。1981年,Böhm 等^[15]第一次将超辐射发光二极管应用到光纤陀螺中,有效地抑制了瑞利散射、克尔效应等误差。除了克尔效应,光纤陀螺中偏振控制和偏振误差的存在,也会影响陀螺输出的稳定性。Pavlat 和 Shaw^[16]指出在光路中去偏振态传输可以保持良好的互易性能。随着基于应力双折射的保偏光纤的出现,Burns 等^[17]将保偏光纤应用到耦合器、相位调制器和光纤环中以控制光传输的偏振态,其样机精度可达到 $0.015 (^{\circ})/h$ 。

20 世纪 80 年代初,伴随着集成光学的发展,诞生了基于铌酸锂(LiNbO_3)晶体的 Y 型多功能集成相位器件,该器件将起偏/检偏、分束/合束和相位调制功能集成到了一个芯片上,响应速度快,线性度好。1984 年,Arditty 等^[18]设计制作了双 Y 型的集成芯片,并将其应用到了光纤陀螺中。陀螺噪声功率谱约为 $3.5 (^{\circ})/h^{1/2}$,可达到战术应用的精度要求。

2.2 信号调制与处理

互易性结构设计、宽带光源输入分别能有效抑制光路中共路和各种寄生效应产生的误差,但要成为实用化产品,光纤陀螺还需要通过信号调制与处理的方式改善线性响应与稳定性等问题^[19]。

1977 年,Cahill 和 Udd^[20]针对 Vali 和 Shrothill 搭建的系统存在的因干涉余弦响应而产生的线性度差问题,提出了相位清零的闭环锁零方案,通过检测干涉条纹,调整施加在压电陶瓷调制器上的频率,抵消了转动引起的相位差,达到了线性响应的目的。虽然该系统是用分立器件搭建的,但是其是一款真正意义上的工程化产品。

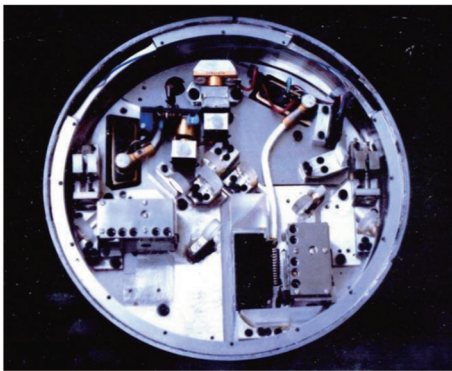


图 2 第一款工程化 IFOG^[21]
Fig. 2 First practical IFOG^[21]

光纤陀螺的调制方式和信号处理可以改变光纤陀螺的灵敏度、抑制电子交叉干扰和提高系统的稳定性。根据相位调制器的带宽不同,所选取的调制波形也有差异。例如:压电陶瓷带宽低,一般使用正弦波或三角

波调制;采用铌酸锂晶体制作的 Y 波导相位调制器具有带宽高、线性度好的特点,故其适合使用方波等阶梯波形。

方波调制和阶梯波相位反馈的形式构成了光纤陀螺的调制与第一闭环:方波调制的台阶表征了光纤陀螺工作点的深度大小;阶梯波的台阶高度表示反馈至光学回路的补偿相位大小^[6]。为了进一步提高光纤陀螺标度因数的稳定性,需要实时追踪补偿反馈通道的增益系数。这个增益系数与数模(D/A)输出通道的增益和 Y 波导的半波电压有关。Lefevre 等^[22]在上述闭环系统中增加了一个闭环控制,称为第二闭环,并根据调制序列的规律性,解算并追踪反馈通道的实时增益。

陀螺在低速率运动时,方波调制方式下阶梯波复位时间长,反馈通道增益存在追踪时间长的问题,这会影响到陀螺的精度与稳定性。1994 年,Lefevre 提出了四态调制——将方波调制的两个态($\varphi_0/2$ 、 $-\varphi_0/2$)变成了 $\varphi_0/2$ 、 $a\varphi_0/2$ 、 $-\varphi_0/2$ 和 $a\varphi_0/2$,其中:方波的调制振幅 φ_0 和系数 a 满足等式 $\cos \varphi_0 = \cos(a\varphi_0)$ 的要求,改善了阶梯波的复位频率。

光纤陀螺中电子交叉干扰、背向散射等现象的存在会引起零偏误差,特别是在低速率下表现为对角速度变化不敏感,产生“死区”。Mark 等提出了一种第一闭环与第二闭环正交解调序列的方法,用于解决光纤陀螺中电子交叉干扰引起的零偏误差。Trinkle 和 Goethals^[23]通过在调制信号中间歇地施加相位阶跃,实现反馈扩频调制,降低进入“死区”的可能性,减少了随机游走系数(ARW)。这些措施不仅使光纤陀螺具有良好的线性响应,还在一定程度上提升了光纤陀螺的抗干扰性能。

3 最小互易结构

图 3 是干涉式光纤陀螺的一种典型结构,包含最小互易的光学系统和信号调制解调架构。光学部分是一个 Sagnac 干涉仪,由宽谱光源、耦合器、Y 波导多功能集成光路、保偏光纤环和探测器组成。在干涉仪的输入端,输入光经过 Y 波导后被分成两束并过滤为唯一的传输模式,到达光纤环两个尾端上,顺时针和逆时针的光束在光纤环中传播一周后返回输入/输出端并产生干涉。良好的互易设置可以有效抑制、消除光路中的共路误差。虽然光路有微小的变化会使得输出光的相位发生改变,但是只要两束光所经历的改变是一致的,就不会改变干涉条纹的图样,进而不会产生测量误差^[6]。从图 3 可以发现:顺时针和逆时针的光束共同经历了一次耦合和一次直通;Y 波导具有起偏的功能;在由波导和光纤环组成的闭合回路中,采用保偏光纤控制输出过程中的偏振态。顺时针和逆时针光束经历的传播路径相同,固有时延一致,这种结构构成了一个最小互易系统。

信号调制解调的硬件链路主要由探测器、模数(A/D)转换器、D/A 转换器件和数字信号处理器等模块组成。调制解调的互易性要求施加在相向传播两束

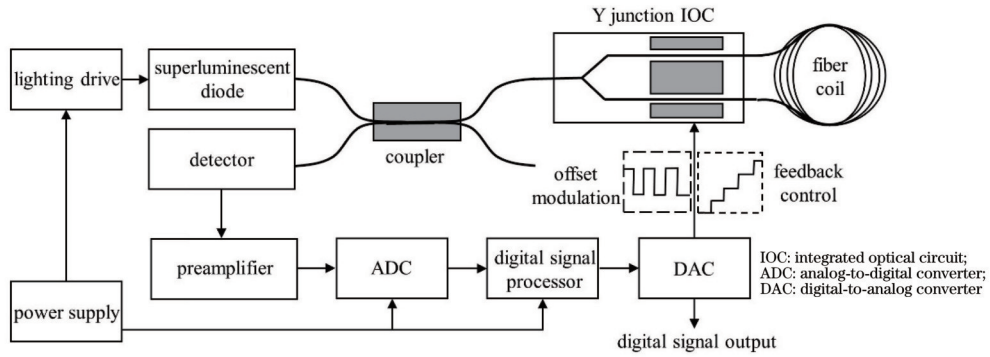


图 3 IFOG 典型结构

Fig. 3 Typical diagram of IFOG

光上的相位与幅度完全一致。结合干涉仪独特的时延特点,数字信号处理器可以产生特定时序的调制和反馈波形,实现偏置工作点设置、第一闭环反馈和第二闭环反馈。

当陀螺输入角速度为 Ω 时,顺时针和逆时针光束产生的相位差为

$$\phi_s = \frac{4\pi RL}{\bar{\lambda}c} \Omega, \quad (1)$$

式中: ϕ_s 为陀螺仪的旋转速率; $\bar{\lambda}$ 为光源的平均波长; R 为光纤环半径; L 为光纤环长度; c 为真空中的光速。为了让陀螺工作在响应灵敏度最大的工作点上,需要给干涉仪施加一个偏置相位。以方波调制为例,对相位调制器施加一个周期为 2τ (渡越时间 τ 为光在光纤环中传输一圈的时间) 的方波信号,对方波信号相邻半周期上探测器的响应信号求差,获得包含角速度信息的解调值 ΔD ,其表达式为

$$\Delta D = k_F I_0 \sin \phi_s, \quad (2)$$

式中: k_F 为电路的增益系数; I_0 为干涉光的光强。 ΔD 也称为光纤陀螺的开环输出。借助 Y 波导——电光调制器反馈一个台阶宽度为 τ 的阶梯波,台阶高度对应的反馈相位 $\Delta\phi_i$ 满足

$$\phi_s + \Delta\phi_i \approx 0. \quad (3)$$

陀螺始终工作在零位附近,保证了最大工作线性度,形成了第一闭环回路。图 4 所示为光纤陀螺数字阶梯波的叠加过程和复位过程。受限于调制器的信号范围和数字处理器中寄存器的有效位数,当调制的阶梯波不断升高或降低时,阶梯波会对应出现溢出或复位现象。由于反馈通道增益不稳定等因素的存在,故复位前后响应信号差异可表征增益的变化,可用于第二闭环实时跟踪增益系数变化,实现相位调制精度的精确控制。

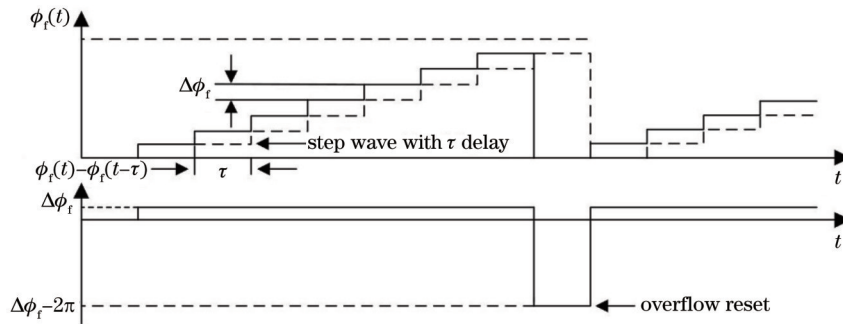


图 4 阶梯波叠加过程和复位过程

Fig. 4 Digital phase ramp with steps and resets

4 技术现状

在 20 世纪 90 年代后期,光纤陀螺的研究工作逐渐进入中高精度工程化阶段。随着工程化水平的提高,光纤陀螺的应用领域在不断拓宽。面对应用市场的需求,不仅需提高传感器本身的性能与可靠性,还需控制和降低产品成本。当前干涉式光纤陀螺的主要研究内容包括高精度、小型化、集成化和低成本等内容。

4.1 高精度的追求

高精度、超高精度的探索是传感器孜孜以求、永无止境的目标,提高精度本质上是提升灵敏度和信噪比。由第 3 章最小互易结构的介绍可知,提高光纤陀螺的灵敏度,可以通过改变光纤环尺寸和光源波长实现。受光纤通信窗口和器件的限制,系统光源波长可调范围有限。研究工作更多地集中在改变光纤环的尺寸和长度。Guattari 等^[24]以最佳角度随机游走为目标,探讨

了光纤陀螺中最优光纤长度的选择与不同类型光纤的传输损耗间的关系。一般地, 0.5 dB/km 的保偏光纤的最佳环长是 17.4 km, 0.2 dB/km 的单模光纤的最佳环长是 43.5 km。在地球物理测量等领域的应用中, 结构尺寸要求并不苛刻, 故采用大直径光学系统成为可能。此时的主要难点之一是大直径光纤环的加工制作, 绕制平台的运动精度和倾角等参数是控制其制作的关键因素^[25]。

光纤陀螺中主要噪声源有散粒噪声、相对强度噪声(RIN)和热噪声。RIN源于宽谱光源中不同频率分量随机拍频造成的光源功率涨落, 与光功率成正比且与谱宽平方根成反比^[26]。为了提高信号强度、光源功率和光谱的稳定性, 高精度光纤陀螺应用中普遍采用基于放大自发辐射(ASE)效应的掺铒光纤光源。这种光源兼具了激光的高功率和激光二极管(LED)的宽光谱的优点, 同时具有波长和稳定性好的优点, 但也会造成陀螺中RIN占比最大。高精度光纤陀螺信噪比的提升研究着重围绕RIN噪声的抑制工作展开。

Strandjord 和 Sanders^[27]于2003年提出一种从光源端抑制RIN的光路方案。该方案利用一个RIN强度探测器采集部分光源输出光, 并将探测器的输出反馈至光源调制器中以调控光源并使得输出光波动变小, 进而使得光源中不同频率的涨落波动变小。在光

纤陀螺光源端处理噪声的另一种方式是借助半导体光放大器工作在增益饱和区时光功率波动小的特点实现RIN的减小。Marazzi等^[28]和张桂才等^[29]在宽带掺铒光纤光源(SFS)后端接入半导体光放大器(SOA), 使得输出光源在不同频率点处噪声有近10 dB/Hz的下降。吴宛玲和那永林^[30]将类似方案应用到光纤陀螺中, 经对比发现, 光纤陀螺的角度随机游走系数从 $1.53 \times 10^{-4} (^{\circ})/h^{1/2}$ 降至 $8.7 \times 10^{-5} (^{\circ})/h^{1/2}$ 。然而, 由于系统额外引入了SOA器件, 故光学系统的输入光谱和稳定性会受到SOA器件特性的影响, 进而带来了不确定因素。

还有一种思路是采用检测相减, 达到减小RIN的目的。Moeller和Burns^[31]于1991年提出了电路相减法将信号光和参考光相减, 实现了RIN的抑制。如图5所示, 参考光与传输信号光的偏振状态相同, 此时陀螺信号输出是交流信号, 参考信号是直流信号。为了使两个信号具有相同强度的噪声分量来实现相减降噪, 系统中包含了一个平衡模块。参考光通过与陀螺敏感环相同长度的光纤延时环之后, 与信号光一起被检测并放大, 然后二者相减。Strandjord和Anson^[32]在Moeller和Burns提出的方案的基础上, 增加了光学频谱匹配模块, 解决了两个探测器接收到的光谱失配的问题。

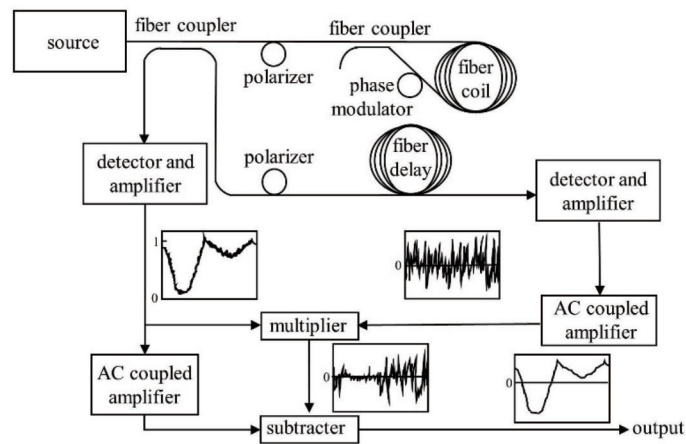


图5 电路相减法抑制RIN的示意图^[31]

Fig. 5 Schematic diagram of RIN suppression by circuit subtraction^[31]

Guattari等^[24]提出了光学噪声相加抑制RIN的方法。在光学方案中省略了延时器, 将参考信号通过耦合器死头引入到探测器中。该方案完全通过光路调整来实现信号光与参考光强度的相加。该方案中同样需考虑偏振和功率均衡的问题, 通过伺服系统控制调整深度来实现功率平衡。

量子光学的蓬勃发展也给陀螺的高精度探索带来了新的道路。2019年, Fink等^[33]首次提出了纠缠光子陀螺, 利用双光子纠缠态实现了德布罗意波长的减半, 其实验结果突破了海森伯极限。理论上, 相对散粒噪声极限可提高 $N^{1/2}$ 倍(N 为多光子纠缠态的光子数量)。如图6所示, 405 nm的激光经过周期极化KTiOPO₄(PPKTP)晶体的自发参量下转换过程后产

生双光子纠缠对, 双光子纠缠对经过光纤敏感环后, 利用二阶符合计数法对其进行探测。

光纤陀螺对精度不断追求的本质是追求噪声抑制, 提高探测极限。大功率、高稳定光源是系统首选。对于主要的噪声源——RIN, 相比通过SOA抑制光源功率波动的方式, 噪声相减的方案不存在因引入新的光学器件而影响传输光光谱和稳定性的问题。然而, 噪声相减方案的有效程度会受到信号光和参考光的匹配度, 以及信号处理方案的影响, 且较为复杂。量子光学及其测量技术为高精度探索开辟了一条全新的道路, 突破了传统检测方式的约束。国外0.0001~0.001 ($^{\circ})/h$ 量级的光纤陀螺产品已进入工程应用阶段^[34], 超高精度的研究尚处于实验室阶段。表1展示

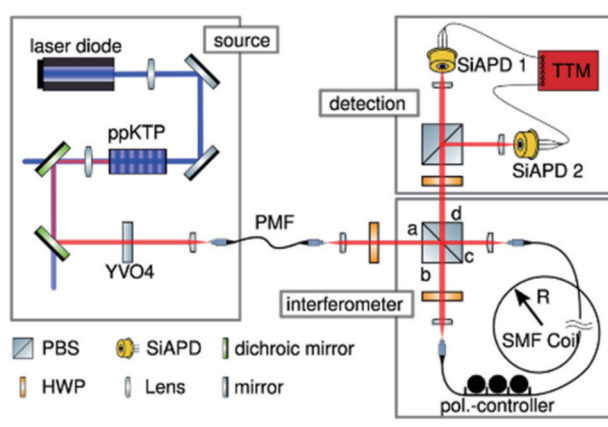


图 6 纠缠光子陀螺光路示意图^[33]

Fig. 6 Schematic diagram of optical setup of entanglement-enhanced optical gyroscope^[33]

了典型的高精度光纤陀螺产品,其中 D 为光纤环的直径。根据公开的文献和报道,目前 iXblue 的光纤陀螺

表 1 典型的高精度光纤陀螺产品

Table 1 Typical high precision fiber optic gyroscope products

Manufacturer	Product	Bias stability / $[(^{\circ}) \cdot h^{-1}]$	Scale factor error / 10^{-6}	Specification	Feature
Honeywell	HPSFOG ^[35]	2.0×10^{-4}	<10		Precise temperature control, efficient magnetic shielding, environmental error suppression for ultralong fiber coil
	Reference grade (prototype) ^[36]	3.0×10^{-5}		$D=68$ cm, $L=8$ km	
iXblue	Astrix200 ^[37]	5.0×10^{-4}	30	$D=20$ cm, $L=5$ km	Radiation hard optical components, RIN reduction
	Prototype ^[38]	1.5×10^{-5}		$D=18$ cm, $L=5$ km	
Opto-Link	SRS5000 ^[39]	8.0×10^{-5}	3	$D=24$ cm, $L=5$ km	Original polarization-maintaining fiber, high performance integrated optical component

4.2 环境适应性提升

面向工程应用,环境适应性的能力是影响产品的应用领域和范围的关键因素之一。随着研究的深入和工业基础水平的不断进步,各种解决方案和新型器件不断涌现出来,光纤陀螺的适应性和可靠性能力得到了进一步提升。

光纤环作为光纤陀螺的敏感单元,受瑞利散射、Shupe 效应、克尔效应和法拉第效应等特性的影响,会随环境的变化而改变,进而劣化了陀螺的性能。为了改善 Shupe 效应,在经典的四极对称绕制光纤环的基础上,衍生出八极绕制法、十六极绕制法,以及结合隔热设计的双柱和四柱绕法^[40],但是也带来了复杂的操作工艺。李绪友等^[41]提出了一种用四环设计光纤陀螺用光纤环制备方法。该方法的特点为:各环圈采用柱

型绕法,操作工艺简化;环与环之间无焊点,光纤中点两侧光纤关于中点所在的径向平面对称,具有较好的温度性能。

除了绕制方式,新的器件如光子晶体光纤(PCF),其一出现就被研究学者给予了很高的期望。这种光纤通过周期性的微结构孔能够实现高双折射、弱温度相关性等光学性能。2005年,斯坦福大学 Kim 等^[42]搭建研究了空芯光子晶体光纤(HC-PCF)陀螺,理论上空芯光子晶体光纤陀螺中克尔效应和瑞利散射为普通光纤的 $1/50 \sim 1/20$,同等光纤长度下温度导致的 Shupe 误差为普通光纤的 $1/5 \sim 1/4$,与磁致法拉第误差成正比的光纤范德瓦耳常数较普通光纤低 $2 \sim 3$ 个数量级。之后,他们还在这个平台提出了激光光纤陀螺的方案^[43],通过相位调制器对激光光源施加伪随机调制以

实现光源输出谱宽的展宽,并获得了激光光源带来的优异的光谱稳定性。搭建的系统的零偏为 $0.03 (^{\circ})/h$,热漂移减小为普通光纤的 $10/65$,克尔效应减小为普通光纤的 $1/170$,法拉第效应减小为普通光纤的 $1/90$ 。

结构上的特点还给予了光子晶体优异的抗辐照性能,不会因存在如保偏光纤类似的掺杂应力区,而导致在辐照环境下传输损耗增大的问题。北京航空航天大学 and 北京航天控制仪器研究所在光子晶体光纤陀螺上较早开展了应用工作。徐小斌等^[44]通过光子晶体光纤耦合器和波导与光纤环直接耦合等方式,研制出了基于实芯光子晶体光纤的陀螺,零漂优于 $0.001 (^{\circ})/h$,该产品于 2020 年被应用于卫星控制中。基于空芯光子晶体光纤制作的样机的零漂稳定性约为 $0.4 (^{\circ})/h$ 。

面向空间的探索是人类活动外延的需求。与陆海空应用环境不同的是,空间用光纤陀螺需承受宇宙辐射所带来的威胁,抗辐照设计是主要研究内容之一。面向空间应用的光纤陀螺一般也代表了各研究机构高精度光纤陀螺的水平。霍尼韦尔公司研制了用于卫星、战略潜艇和哈勃望远镜姿态稳定等领域的高精度光纤陀螺。第一款空间应用产品 SPIRIT IMU^[36]采用了冗余设计和抗辐照强化设计,战略级的空间产品指向精度优于 10 nrad ,偏置不稳定性在 $2 \times 10^{-4} \sim 6 \times 10^{-4} (^{\circ})/h$ 范围内。诺格公司研制的 FOG2500^[45]的抗辐照能力达到了 100 krad 。iXblue 公司 Astrix^[37]系列产品中掺铒光纤和保偏光纤进行了特殊处理,掺杂了铈和磷等元素,通过了辐照总剂量为 300 krad 、质量能量为 60 MeV 、粒子注量为 $1.8 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 的质子辐照实验测试。Opto-Link 公司也公布了其在空间应用产品 VOBIS^[46]的在轨性能,ARW 优于 $0.005 (^{\circ})/h^{1/2}$ 。

光纤陀螺是一个光电混合、微弱信号检测的传感器,该系统存在模拟端电学调制信号耦合至检测端造成的串扰问题和光学信号过零引起的尖峰脉冲问题等。这些问题会影响传感器零偏、零漂等性能,甚至会产生“死区”,影响光纤陀螺的环境适应性。针对尖峰脉冲问题,王巍^[45]指出可以采用带有时域滤波功能的低噪声检测电路,来有效抑制检测信号尖峰并消除随之存在的“振铃”,进而改善信号信噪比。虽然四态调制提高了第二闭环效率,但是由于四态调制的调制信号与相应的解调信号之间的相关性强,故电子串扰仍然很明显。随机调制通过施加伪随机调制波形降低调制信号与解调信号之间的相关性来抑制串扰误差,但随机调制序列解调周期长,故会减小陀螺动态范围,增大随机噪声^[47]。因此,构造多态调制序列,通过调制序列和解调序列之间的关系,推算出不同调制深度下消除串扰的最佳调制序列,能很好地解决不同调制深度下的“死区”问题^[48]。

研究人员陆续提出了六态、八态和十六态等多态调制方式。Zhang 等^[49]在一个调制周期内,施加了 6 个状态的偏置。理论上,结合过调制技术,在特定调制深

度下,六态调制可以消除串扰。张云浩^[50]在此基础上,针对振动所致的光纤陀螺非互易误差,提出了一种十六态调制解调方法,在抑制串扰误差的同时,可以抑制光强波动带来的误差。

因敏感回路长、干涉信号微弱,光纤陀螺易受因环境改变而产生的非互易误差或干扰导致的信噪比下降等问题影响。环境适应性提升涉及的控制因素多,工程应用中需综合考虑费效比,多种措施共同应用。

4.3 小型化与集成化

小型化、低成本是传感器的不懈追求,也是面向市场和竞争的选择。光纤陀螺的灵敏度与光纤环的尺寸有关。直径和有效面积小的光纤环的精度有限,在其他传感器相比时,不具备明显优势。得益于细径化保偏光纤技术,光纤环的弯曲损耗低且绕制的光纤环的半径小。文献^[51]中细径保偏光纤包层从常规的 $125 \mu\text{m}$ 减小到了 $40 \mu\text{m}$ 。此外,脱骨架是光纤环的发展趋势^[52]。没有了环骨架的约束,光纤环可以在光纤的弯曲半径内实现绕制,从有骨架走向无骨架设计,形成了内径为 15 mm 、长度为 220 m 的光纤环组件^[53]。这些措施有效且大幅地减小了光纤陀螺的体积。结合系统级的惯性测量单元或组合的应用特征,多轴集成、光源和处理器等复用技术进一步简化了系统的冗余度。

面向单元级的集成,电路系统级封装(SIP)和专用集成电路(ASIC)等^[54]技术的应用,减小了电路的复杂性和体积,改善了电磁兼容性,提高了可靠性。Zhang 等^[55]将光纤陀螺部分单元模块封装在一个器件中,包含了前放电路和 A/D 转换电路。

集成光学技术的发展推动了光学器件与模块的集成化,可以将光纤陀螺中光源、耦合器、Y 波导等有源与无源器件集成到一起,构建集成微系统^[56]。早在 1983 年,Lawrence 等就提出了将光源、耦合器、Y 波导和敏感环集成在一个硅片上的想法。2011 年,美国 GENER8 公司采用端面直接耦合工艺将光源、耦合器、相位调制器和探测器芯片集成封装在一起^[57]。

尚克军等^[56]通过十六极对称绕制超细径($60 \mu\text{m}/100 \mu\text{m}$)光纤获得了微型化敏感环,由光源、探测器和耦合器封装一体的集成光学芯片和 SIP 封装的微型检测电路等组件构成了一个微型光纤陀螺,整机外形尺寸为 $35 \text{ mm} \times 35 \text{ mm} \times 35 \text{ mm}$,零偏不稳定性达到了 $0.072 (^{\circ})/h$ 。为进一步缩小敏感环圈的体积,Liu 等^[58]于 2020 年在 SiO_2 波导上完成了 2.14 m 长光纤环圈的制作,测得的陀螺零偏为 $7.32 (^{\circ})/h$ 。然而,这种集成光纤环尺寸受限,难以达到更高精度水平。

光纤陀螺小型化依赖于每种部件的小型化。电路系统采用专用电路或 SIP 封装方式,技术途径成熟。光学系统侧重于有源光学器件与无源光学器件的片上集成,具有可操作性。体积占比最大的光纤环是限制体积进一步压缩的主要因素。在干涉式光纤陀螺的方案架构下,灵敏度与环的有效面积有关。片上制作光纤环不具备明显优势,超细径光纤的使用仍是主要

手段。

5 结束语

独特的技术优势给干涉式光纤陀螺带来了广阔的应用环境和机遇。几十年来,光纤陀螺逐步替代各个领域中的机械陀螺和激光陀螺,成为了重要的惯性器件。然而,新兴的传感器如微机械(MEMS)陀螺和半球谐振陀螺也陆续开始在工业自动化、消费级等领域中替代光纤陀螺。近年来,一批专利保护陆续到期,更多公司将参与到光纤陀螺的研制、生产与竞争中,未来光纤陀螺的研究将会在如下两方面中继续深耕。

1) 低成本、小型化

低成本、小型化是降低成本、提高市场占有率的有效手段之一。目前市场上光纤陀螺种类、样式各异,且核心光电部件价格较为昂贵。随着市场竞争的日益激烈和成本空间的不断压缩,光纤陀螺产品和器件逐渐型谱化,器件制作与生产工艺会得到进一步优化。小型化技术探索将在现有干涉式光纤陀螺方案上,从单陀螺光电部件和单元封装集成技术延伸至组合级、系统级的光电分离、功能复用等小型化、全光型和全数字惯性系统产品,形成分米级光纤陀螺系统产品,推动产业更新与应用。厘米级的探索则需借助其他原理。谐振式光学陀螺一直被认为是实现小型化的有力手段。2020年,Lai等^[59]搭建了硅基单片布里渊集成光学陀螺的样机,谐振腔直径为3.6 cm,零偏稳定性达到了3.6 (°)/h,能够检测到地球自转角速度,是谐振陀螺、也是小型化光学陀螺发展的一个里程碑。

2) 超高精度

光纤陀螺在深空、深海和地理信息测量等应用需求的牵引下,将持续追寻精度的延伸。与激光陀螺不同,光纤陀螺在噪声和偏置稳定性等方面,不受系统设计方案的约束,理论上能够达到标准量子极限 $[10^{-5} (\text{°})/\text{h}]$ 量级。与量子光学和量子传感技术结合后,光纤陀螺灵敏度有望突破传统约束,甚至接近海森伯极限 $[10^{-11} (\text{°})/\text{h}]$ 量级。光纤光子纠缠陀螺^[60]、非线性光纤 Sagnac 干涉方案陆续涌现出来^[61],都为精度提升提供了理论支撑。超高精度依赖于特种材料和新型器件的应用。得益于量子通信技术的发展,量子纠缠光子源已有十二光子纠缠态制备成功的报道。然而,光源、探测器等核心器件整体水平尚不成熟,需同步开展研究。

经过 40 多年的发展,干涉式光纤陀螺在解决非互易误差、稳定性和环境适应性等一系列问题后,形成了不同类型和精度的产品,产品种类多,应用范围广,市场较为成熟。中低精度产品竞争激烈,低成本、小型化和高可靠是保持干涉式光纤陀螺优势的主要要素。借助集成光电子技术和量子传感技术的进步,光纤陀螺在高集成度和高精度方面仍有广阔的发展空间。

参 考 文 献

[1] Lefèvre H C. The fiber-optic gyroscope, a century after Sagnac's experiment: the ultimate rotation-sensing

technology? [J]. *Comptes Rendus Physique*, 2014, 15 (10): 851-858.

- [2] Macek W M, Davis D T M. Rotation rate sensing with traveling-wave ring lasers[J]. *Applied Physics Letters*, 1963, 2(3): 67-68.
- [3] 范梓涵. 多功能集成光学器件对光纤陀螺温度零偏漂移的影响研究[D]. 北京: 中国运载火箭技术研究院, 2021. Fan Z H. Research on the influence of multifunctional integrated optical component on the temperature bias drift of fiber optic gyroscope[D]. Beijing: China Academy of Launch Vehicle Technology, 2021.
- [4] Vali V, Shorthill R W. Ring interferometer 950 m long [J]. *Applied Optics*, 1977, 16(2): 290-291.
- [5] Vali V, Shorthill R W. Fiber ring interferometer[J]. *Applied Optics*, 1976, 15(5): 1099-1100.
- [6] Lefevre H C. *The Fiber-Optic Gyroscope* [M]. 3rd edition. Boston: Artech House, 2022.
- [7] Davis J L, Ezekiel S. Techniques for shot-noise-limited inertial rotation measurement using a multiturn fiber Sagnac interferometer[J]. *Proceedings of SPIE*, 1978, 0157: 131-136.
- [8] Cutler C C, Newton S A, Shaw H J. Limitation of rotation sensing by scattering[J]. *Optics Letters*, 1980, 5 (11): 488-490.
- [9] Shupe D M. Thermally induced nonreciprocity in the fiber-optic interferometer[J]. *Applied Optics*, 1980, 19 (5): 654-655.
- [10] Mohr F. Thermo-optically induced bias drift in fiber optical Sagnac interferometers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1996, 14(1): 27-41.
- [11] Ulrich R. Fiber-optic rotation sensing with low drift[J]. *Optics Letters*, 1980, 5(5): 173.
- [12] Bergh R A, Lefevre H C, Shaw H J. All-single-mode fiber-optic gyroscope with long-term stability[J]. *Optics Letters*, 1981, 6(10): 502-504.
- [13] Ezekiel S, Davis J L, Hellwarth R W. Intensity dependent nonreciprocal phase shift in a fiber optic gyroscope[M]//Ezekiel S, Arditty H J. *Fiber-optic rotation sensors and related technologies*. Springer series in optical sciences. Heidelberg: Springer, 1982, 32: 332-336.
- [14] Bergh R A, Culshaw B, Cutler C C, et al. Source statistics and the Kerr effect in fiber-optic gyroscopes[J]. *Optics Letters*, 1982, 7(11): 563-565.
- [15] Böhm K, Marten P, Petermann K, et al. Low-drift fibre gyro using a superluminescent diode[J]. *Electronics Letters*, 1981, 17(10): 352-353.
- [16] Pavlath G A, Shaw H J. Birefringence and polarization effects in fiber gyroscopes[J]. *Applied Optics*, 1982, 21 (10): 1752-1757.
- [17] Burns W K, Moeller R P, Villarruel C A, et al. Fiber-optic gyroscope with polarization-holding fiber[J]. *Optics Letters*, 1983, 8(10): 540-542.
- [18] Arditty H J, Bettini J P, Bourbir Y, et al. Integrated-optic fiber gyroscope: progresses towards a tactical application[J]. *Proceedings of SPIE*, 1984, 0514: 321-328.

- [19] Lefevre H C. Comments about fiber-optic gyroscopes[J]. Proceedings of SPIE, 1988, 0838: 86-97.
- [20] Cahill R F, Udd E. Phase-nulling fiber-optic laser gyro [J]. Optics Letters, 1979, 4(3): 93-95.
- [21] Udd E. A personal tour of the fiber optic Sagnac interferometer[J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7316: 73160R.
- [22] Lefevre H C, Martin P, Morisse J, et al. High-dynamic-range fiber gyro with all-digital signal processing[J]. Proceedings of SPIE, 1991, 1367: 72-80.
- [23] Trinkle W J, Goethals W. Fiber optic gyroscope dead band error suppression: US20150022819[P]. 2015-01-22.
- [24] Guattari F, Moluçon C, Bigueur A, et al. Touching the limit of FOG angular random walk: challenges and applications[C]//2016 DGON Inertial Sensors and Systems (ISS), September 20-21, 2016, Karlsruhe, Germany. New York: IEEE Press, 2016.
- [25] de Toldi E, Lefèvre H, Guattari F, et al. First steps for a Giant FOG: searching for the limits[C]//2017 DGON Inertial Sensors and Systems (ISS), September 19-20, 2017, Karlsruhe, Germany. New York: IEEE Press, 2017.
- [26] 黄冬. 高精度光纤陀螺仪的研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2019.
Huang D. Research on high precision fiber optic gyroscope[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2019.
- [27] Strandjord L K, Sanders G A. Relative intensity noise controller for fiber light sources: US20030128365[P]. 2003-07-10.
- [28] Marazzi L, Boletti A, Parolari P, et al. Relative intensity noise suppression in reflective SOAs[J]. Optics Communications, 2014, 318: 186-188.
- [29] 张桂才, 林毅, 马林. 采用半导体光放大器抑制 SFS 相对强度噪声 [J]. 中国惯性技术学报, 2015, 23(1): 107-110.
Zhang G C, Lin Y, Ma L. Using semiconductor optical amplifier to suppress the relative intensity noise of superfluorescent erbium-doped fiber source[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2015, 23(1): 107-110.
- [30] 吴宛玲, 那永林. 基于 SOA 的光纤陀螺相对强度噪声抑制研究[J]. 导航定位与授时, 2018, 5(4): 89-93.
Wu W L, Na Y L. Research on relative intensity noise suppression of fiber optic gyroscope based on the SOA [J]. Navigation Positioning and Timing, 2018, 5(4): 89-93.
- [31] Moeller R P, Burns W K. 1.06- μm all-fiber gyroscope with noise subtraction[J]. Optics Letters, 1991, 16(23): 1902-1904.
- [32] Strandjord L K, Anson S A. Spectral balancing system and method for reducing noise in fiber optic gyroscopes: US7586619[P]. 2009-09-08.
- [33] Fink M, Steinlechner F, Handsteiner J, et al. Entanglement-enhanced optical gyroscope[J]. New Journal of Physics, 2019, 21(5): 053010.
- [34] 王巍, 于海成, 冯文帅. 高精度光纤陀螺仪技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2021.
Wang W, Yu H C, Feng W S. High precision fiber optic gyroscope technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2021.
- [35] Mead D T, Mosor S. Progress with interferometric fiber optic gyro at Honeywell[J]. Proceedings of SPIE, 2020, 11405: 1140509.
- [36] Sanders G A, Sanders S J, Strandjord L K, et al. Fiber optic gyro development at Honeywell[J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9852: 985207.
- [37] Paveau A, Cros G, Masson S, et al. Robustness of Astrix Fiber Optic Gyros in space radiative environment [J]. CEAS Space Journal, 2019, 11(2): 219-227.
- [38] Lefevre H C, Steib A, Claire A, et al. The fiber optic gyro 'adventure' at Photonics, iXsea and now iXblue[J]. Proceedings of SPIE, 2020, 11405: 1140505.
- [39] Korkishko Y N, Fedorov V A, Prilutskiy V E, et al. Highest bias stability fiber-optic gyroscope SRS-5000 [C]//2017 DGON Inertial Sensors and Systems (ISS), September 19-20, 2017, Karlsruhe, Germany. New York: IEEE Press, 2017.[LinkOut]
- [40] 张岳. 高精度光纤陀螺光纤环绕制方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2020.
Zhang Y. Research on the fiber coil winding method of high precision FOG[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2020.
- [41] 李绪友, 张岳, 李昊宇, 等. 一种四环设计光纤陀螺用光纤环制备方法: CN109737947A[P]. 2019-05-10.
Li X Y, Zhang Y, Li H Y, et al. Method for preparing four-ring designed fibre optic ring for fibre optic gyro: CN109737947A[P]. 2019-05-10.
- [42] Kim H K, Digonnet M J F, Kino G S. Air-core photonic-bandgap fiber-optic gyroscope[J]. Journal of Lightwave Technology, 2006, 24(8): 3169-3174.
- [43] Digonnet M J F, Chamoun J N. Recent developments in laser-driven and hollow-core fiber optic gyroscopes[J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9852: 985204.
- [44] 徐小斌, 王晓阳, 高福宇, 等. 光子晶体光纤陀螺技术及其首次空间试验[J]. 中国惯性技术学报, 2021, 29(1): 1-7.
Xu X B, Wang X Y, Gao F Y, et al. Photonic crystal fiber-optic gyroscope technology and its first space experiment[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2021, 29(1): 1-7.
- [45] 王巍. 光纤陀螺在宇航领域中的应用及发展趋势[J]. 导航与控制, 2020, 19(S1): 18-28.
Wang W. Application and development tendency of fiber optic gyroscope in space[J]. Navigation and Control, 2020, 19(S1): 18-28.
- [46] Korkishko Y N, Fedorov V A, Prilutskiy V E, et al. Space grade fiber optic gyroscope: R&D results and flight tests[C]//2016 DGON Inertial Sensors and Systems (ISS), September 20-21, 2016, Karlsruhe, Germany. New York: IEEE Press, 2016.
- [47] 霍海涛. 干涉式光纤陀螺死区机理研究与抑制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019.
Huo H T. The mechanism research and inhibition methods of IFOG dead zone[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2019.

- [48] 吕嫣然, 马家君, 黄月锐涵, 等. 消除数字闭环光纤陀螺串扰的多态调制方法[J]. 中国激光, 2022, 49(7): 0706003.
Lü Y R, Ma J J, Huang Y R H, et al. Elimination of crosstalk from digital closed-loop fiber optic gyroscopes via polymorphic modulation method[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(7): 0706003.
- [49] Zhang C X, Zhang S B, Pan X, et al. Six-state phase modulation for reduced crosstalk in a fiber optic gyroscope[J]. Optics Express, 2018, 26(8): 10535-10549.
- [50] 张云浩. 光纤陀螺非互易相移误差机理分析与抑制方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2021.
Zhang Y H. Research on non-reciprocal phase drift error of fiber-optic gyroscope and suppressing method[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2021.
- [51] 隋宁波, 徐天聪, 王琦, 等. 光纤陀螺用细径保偏光纤的最新研究进展[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2021(2): 8-11.
Sui N B, Xu T C, Wang Q, et al. Recent research progress of fine polarization maintaining fibers for FOG[J]. Optical Fiber & Electric Cable and Their Applications, 2021(2): 8-11.
- [52] 苑立波, 童维军, 江山, 等. 我国光纤传感技术发展路线图[J]. 光学学报, 2022, 42(1): 0100001.
Yuan L B, Tong W J, Jiang S, et al. Road map of fiber optic sensor technology in China[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(1): 0100001.
- [53] 傅军, 常扬, 宁治文. 光纤陀螺小型化技术研究进展[J]. 传感器与微系统, 2020, 39(7): 1-4, 7.
Fu J, Chang Y, Ning Z W. Research progress on miniaturization technology of fiber-optic gyroscope[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2020, 39(7): 1-4, 7.
- [54] 李健壮, 李搏, 黄晓宗. 基于高密度集成技术的光纤陀螺信号处理电路设计[J]. 工业控制计算机, 2020, 33(7): 67-68.
Li J Z, Li B, Huang X Z. Small volume digital closed-loop fiber optic gyroscope signal processing circuit[J]. Industrial Control Computer, 2020, 33(7): 67-68.
- [55] Zhang C X, Song N F, Li L J, et al. Fiber optic gyro R and D at Beihang university[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8421: 842105.
- [56] 尚克军, 雷明, 向强, 等. 一种基于集成光学芯片的微小光纤陀螺[J]. 中国惯性技术学报, 2020, 28(5): 650-653.
Shang K J, Lei M, Xiang Q, et al. An integrated optical chip based miniature fiber optic gyroscope[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2020, 28(5): 650-653.
- [57] 尚克军, 雷明, 李豪伟, 等. 集成化光纤陀螺设计、制造及未来发展[J]. 中国惯性技术学报, 2021, 29(4): 502-509.
Shang K J, Lei M, Li H W, et al. Design, manufacturing and future development of the integrated fiber optic gyroscope[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2021, 29(4): 502-509.
- [58] Liu D N, Li H, Wang X, et al. Interferometric optical gyroscope based on an integrated silica waveguide coil with low loss[J]. Optics Express, 2020, 28(10): 15718-15730.
- [59] Lai Y H, Suh M G, Lu Y K, et al. Earth rotation measured by a chip-scale ring laser gyroscope[J]. Nature Photonics, 2020, 14(6): 345-349.
- [60] 阮驰, 张昌昌, 尹飞, 等. 光纤光子纠缠增强陀螺的现状与认知[J]. 导航与控制, 2021, 20(4): 9-23.
Ruan C, Zhang C C, Yin F, et al. Cognition and superficial view of entanglement-enhanced optical gyroscope[J]. Navigation and Control, 2021, 20(4): 9-23.
- [61] 王巍, 桑建芝, 李明飞, 等. 非线性光纤 Sagnac 干涉仪精度分析研究[J]. 导航与控制, 2020, 19(S1): 41-47.
Wang W, Sang J Z, Li M F, et al. Research on precision analysis of nonlinear optical fiber Sagnac interferometer[J]. Navigation and Control, 2020, 19(S1): 41-47.

约稿专家简介:



黄腾超(1979—), 博士, 教授/博士生导师, 浙江大学求是青年学者。1996年考入浙江大学光电信息工程学系信息工程(光电)专业学习, 2000年6月本科毕业并获学士学位; 之后硕博连读光学工程专业博士学位, 2005年毕业并获博士学位。2019年至今, 任浙江大学光学惯性技术工程中心主任、南京惯性技术学会副理事长、《中国惯性技术学报》编委和《应用光学》青年编委。长期从事光学惯性和精密光学检测技术方面的教学和科研工作, 主要研究方向包括光纤陀螺与系统、精密光学非接触测量技术等。曾获军队科技进步奖一等奖与二等奖、省部级科技进步奖一等奖与二等奖, 以及国家高技术研究发展计划“先进个人”等多项荣誉。在国内外期刊发表论文数十篇, 主持基金项目3项, 包括国家重点研发计划、装备预研教育部联合基金和浙江省自然科学基金。E-mail: huangtengchao@zju.edu.cn。