论 文

光子晶体光纤陀螺技术研究

王巍*, 李晶

北京航天控制仪器研究所, 北京 100854

* 通信作者. E-mail: yfwangwei@vip.sina.com

收稿日期: 2014–12–09; 接受日期: 2015–01–12; 网络出版日期: 2015–06–17

摘要 光子晶体光纤具有较小的温度系数、Kerr 系数、Verdet 系数和较好的抗辐照性能, 应用于光纤陀螺可提升陀螺实用精度, 减小陀螺的体积、质量. 本文从噪声、零偏漂移和标度因数特性 3 个方面, 阐述了光子晶体光纤陀螺的误差机理并进行了误差分析, 对比了光子带隙光纤和折射率导引光子晶体光纤应用于光纤陀螺的差异. 在此基础上, 研制了基于折射率导引光子晶体光纤的陀螺样机, 其测试结果表明: 相对于普通光纤陀螺, 光子晶体光纤陀螺的温度稳定性提升约 50%, 33 krad(Si) 的总剂量辐照条件下, 陀螺零偏漂移小于 $0.05^\circ/\text{h}(1\sigma)$, 该技术是未来光纤陀螺的重要发展方向.

关键词 光纤陀螺 光子晶体光纤 零偏漂移 偏振误差 噪声

1 引言

光纤陀螺是一种基于 Sagnac 效应的全固态陀螺, 是 21 世纪主流惯性仪表之一, 在寿命、可靠性、质量、体积和精度等多方面具有优势, 已广泛应用于海陆空天等领域. 光纤线圈是光纤陀螺的核心敏感部件, 对光纤陀螺的性能至关重要. 目前光纤线圈普遍采用熊猫型、领结型和椭圆包层等应力型保偏光纤, 光纤纤芯及应力区中的掺杂离子, 使光纤在温度、辐照等环境下的稳定性受到影响. 随着光子晶体光纤技术的发展, 光子晶体光纤陀螺成为提高陀螺环境适应能力的一个新的研究方向. 光子晶体光纤又称为多孔光纤, 由英国 Bath 大学的 Russell^[1] 于 1991 年提出, 一般由未掺杂的石英和空气孔构成, 其横截面上周期性排列着沿轴向均匀分布的空气孔. 根据导光机制的不同, 光子晶体光纤可分为两类: 折射率导引型光子晶体光纤 (total internal reflection photonic crystal fiber, TIR-PCF) 和光子带隙型光子晶体光纤 (photonic bandgap photonic crystal fiber, PBG-PCF), 前者也称为全内反射光子晶体光纤或实芯光子晶体光纤, 后者也称为空芯光子晶体光纤. 实芯光子晶体光纤的导光机制和普通光纤相同, 基于全内反射原理, 空芯光子晶体光纤的导光机制则是在光纤中形成带隙, 通过破坏纤芯位置的周期性形成缺陷, 光可以沿缺陷纵向传播. 光子晶体光纤可以通过几何结构设计实现双折射, 称为波导双折射, 典型的保偏光子晶体光纤端面结构如图 1 所示. 这两类波导型双折射光纤均具有抗辐照和温度稳定性好的特点, 后者由于光在空气中传输, 空气的折射率温度系数、Verdet 系数和 Kerr 系数均远小于石英, 因此采用光子晶体光纤作为光纤线圈材料, 是一种减小陀螺环境因素误差的有效技术方案.

光子晶体光纤陀螺和传统光纤陀螺一样可分为干涉型和谐振型两类. 由于光子晶体光纤耦合器还不成熟, 普通保偏光纤和光子晶体光纤的熔接损耗也很难满足谐振陀螺的要求. 文献 [1] 报道, 采用波

引用格式: 王巍, 李晶. 光子晶体光纤陀螺技术研究. 中国科学: 信息科学, 2015, 45: 869–877, doi: 10.1360/N112014-00389

图 1 典型保偏光子晶体光纤端面结构

Figure 1 Typical cross-section structures of polarization maintaining PCF. (a) TIR-PCF; (b) PBG-PCF

图 2 光子晶体光纤陀螺的基本组成

Figure 2 Configuration diagram of photonic crystal fiber optic gyroscope

长为 1550 nm 的激光器, 光纤线圈采用 0.9 m 的带隙光纤, 所实现的谐振腔精细度为 42. 文献 [2] 报道, 采用 235 m 的空芯光子晶体光纤, 干涉型光子晶体光纤陀螺的随机游走为 $0.015^{\circ}/h^{1/2}$. 文献 [3] 报道了采用实芯光子晶体光纤的干涉型开环陀螺, 光纤线圈的直径和长度乘积为 73.66 mm·km, 陀螺随机游走为 $0.01^{\circ}/h^{1/2}$, 漂移小于 $0.02^{\circ}/h$. 本文将开展干涉型光子晶体光纤陀螺的误差分析, 并进行实际测量和样机研制, 探讨其未来的发展前景.

2 光子晶体光纤陀螺的误差分析

光纤陀螺的误差一般可分为零偏误差和标度因数误差, 其中零偏误差又分为噪声和零偏漂移. 光子晶体光纤陀螺的基本组成如图 2 所示. 采用光子晶体光纤构成光纤陀螺的光纤线圈, 使陀螺的光路误差与普通光纤陀螺有显著差异, 误差分析如下.

2.1 噪声

光纤陀螺的噪声主要由光路噪声和信号检测噪声构成, 其中光路噪声为光纤陀螺的主要噪声源, 量级较大的是光源噪声和背向散射噪声.

(1) 光源噪声. 就高精度光纤陀螺普遍采用的掺铒光纤光源而言, 当工作电流大于阈值电流后, 相

对强度噪声远大于散粒噪声, 陀螺的噪声受限于光源的相对强度噪声. 相对强度噪声 σ_{RIN} 为 [4]

$$\sigma_{\text{RIN}} = P\sqrt{\Delta f \tau_c} = P\sqrt{\Delta f \lambda^2 / (\Delta \lambda \cdot c)}, \quad (1)$$

式中, τ_c 为光源的自相干时间, $\Delta \lambda$ 为光谱宽度, P 为光功率, c 为真空中的光速, Δf 为检测带宽. 可见, 相对强度噪声随功率的增加而增加, 但由于信号也与功率成正比, 因此相对强度噪声对陀螺的信噪比没有影响. 若光源波长为 1550 nm, 谱宽为 35 nm, 则 $\sigma_{\text{RIN}}/(P \cdot \sqrt{\Delta f})$ 为 $4.8 \times 10^{-7}/(\text{W} \cdot \text{Hz}^{1/2})$, 若陀螺的检测带宽为 100 Hz, 则 σ/P 为 $4.8 \times 10^{-6}/\text{W}$.

如果采用稳频的窄带激光器作为光源, 频率分量之间的随机拍频引起的附加噪声将大大减小, 有利于降低光源本身噪声, 但会引起较大的背向散射噪声.

(2) 背向散射噪声. Rayleigh 背向散射和传输光波具有相同的频率, 二者之间的干涉会产生寄生相位差, 背向散射的随机性造成干涉相位差的变化, 产生陀螺噪声, 其标准偏差为 [4]

$$\sigma \approx \alpha_R S P (L L_c)^{1/2}, \quad (2)$$

式中, α_R 为光纤背向散射系数, S 为光纤的恢复因子, L 为光纤线圈的长度, L_c 为光源的自相干长度. 对于一般光纤 $S = 10^{-3}$, 取 $L = 1000 \text{ m}$, 光源波长为 1550 nm, 谱宽为 35 nm, 若 $\alpha_R = 0.5 \text{ dB/km}$, 则背向散射引起的等效噪声 σ/P 为 $1.3 \times 10^{-7}/\text{W}$. 该值比光源的相对强度噪声小 1 个量级以上.

采用实芯光子晶体的光纤陀螺, 其背向散射噪声与普通光纤陀螺相当. 空芯光子晶体光纤的工艺难度较大, 背向散射系数比普通光纤大, 在 1550 nm 波长处的数值大小为 $1.58 \times 10^{-6}/\text{m}$ [5], 则 α_R 为 13.7 dB/km , $\sigma/P = 3.6 \times 10^{-6}/\text{W}$, 背向散射噪声与光源的相对强度噪声大小接近.

2.2 零偏漂移

影响光纤陀螺零偏漂移的因素包括 Shupe 效应、磁场 Faraday 效应、Kerr 效应及偏振误差等. 文献 [6] 报道, 空芯光子晶体光纤的 Verdet 系数约为普通光纤的 1/190; 空气折射率的非线性系数约比石英小 3 个量级 ($2.9 \times 10^{-23} \text{ m}^2/\text{W}$ vs. $3.2 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$), 从等效折射率的角度考虑, 文献 [7] 给出了光子带隙光纤的 Kerr 系数约为普通单模光纤的 1/250 ($4.4 \times 10^{-3} \text{ rad/W/km}$ vs. 1.1 rad/W/km); 文献 [2] 报道了光子带隙光纤陀螺的 Shupe 效应、磁场 Faraday 效应和 Kerr 效应均显著减小, 与普通光纤陀螺相比, 其 Shupe 系数减小为 1/6.5, 零偏磁场灵敏度减小为约 1/20, Kerr 效应误差减小为约 1/170. 采用实芯光子晶体光纤, Kerr 效应误差没有明显变化; 由于光纤的双折射相当, 且纤芯材料的 Verdet 系数相差很小, 零偏的磁场误差与普通光纤陀螺差别很小, 但也可通过光纤制备工艺将光纤扭转控制在较小的范围, 从而减小零偏的磁场误差; 与普通保偏光纤相比, 实芯光子晶体保偏光纤只是没有掺杂提高折射率的材料, 因此其纤芯折射率随温度变化与普通保偏光纤相当, 理论上温度变化产生的误差也没有明显差别. 以下主要分析偏振误差和背向散射误差.

(1) 偏振误差. 偏振误差主要取决于光纤的偏振保持能力. 虽然光子晶体光纤在理论上通过结构设计可以获得 10^{-3} 甚至更大的双折射, 但目前可以满足工程应用的光子晶体光纤的双折射尚较小. 取熊猫型保偏光纤 (PMF-01)、实芯保偏光子晶体光纤 (PMPCF-1550-02) 和空芯保偏光子晶体光纤 (HC-1550-PM-01) 各 5 m, 将其缠绕至直径 30 mm 的线轴上, 并将待测光纤与白光干涉仪输入端的保偏光纤对轴熔接, 测量其偏振保持能力.

图 3 给出了 3 种光纤的偏振交叉耦合测量结果. 可见, 实芯光子晶体光纤的偏振交叉耦合比普通保偏光纤小 5 dB 左右, 空芯光子晶体光纤由于保偏能力较弱, 偏振交叉耦合比实芯光子晶体光纤大

图3 光纤的偏振交叉耦合

Figure 3 Polarization cross coupling in fibers

10 dB 以上. 以振幅型偏振误差为例^[4]:

$$|\Delta\phi| < 2\varepsilon\sqrt{\rho_{in}\rho_{cr}}, \quad (3)$$

式中, ε 为陀螺光路所采用偏振器的振幅抑制比, ρ_{in} 表示光纤线圈输入端的偏振强度比, ρ_{cr} 为光纤线圈中一个消偏长度内的偏振交叉耦合强度. 依据目前器件及光纤的实际水平, 取 ε 为 -55 dB, ρ_{in} 为 -30 dB, ρ_{cr} 分别为 -55 dB(熊猫型保偏光纤)、-60 dB(实芯光子晶体光纤)、-45 dB(空芯光子晶体光纤), 对于工作波长为 1550 nm、光纤线圈直径为 100 mm、光纤长度为 1 km 的光纤陀螺, 振幅型偏振误差分别为 $0.0152^\circ/\text{h}$ 、 $0.0085^\circ/\text{h}$ 和 $0.0481^\circ/\text{h}$.

可见, 相比于熊猫型保偏光纤, 实芯光子晶体光纤的偏振误差较小, 空芯光子晶体光纤的偏振误差较大. 由于实芯光子晶体光纤内部的双折射为波导双折射, 而熊猫型保偏光纤的双折射为应力双折射, 当温度变化时, 波导双折射受应力变化较小, 因此, 实芯光子晶体光纤线圈中应力变化引起的偏振涨落较小.

(2) 背向散射误差. 背向散射是另一个影响陀螺零偏漂移的重要因素, 光纤线圈中部产生的背向散射强度为^[4]

$$P_{cb} = P_m(1 - 10^{-\alpha_R L_c/10})S, \quad (4)$$

即光源的相干长度和光纤损耗越小, 背向散射误差越小. 空芯光子晶体光纤的背向散射较大, 若取 $L_c = 60 \mu\text{m}$, $\alpha_R = 13.7 \text{ dB/km}$, 则背向散射相位误差上限为^[4]

$$\varphi_{bc} \approx 2 \frac{A_{cb}}{A_m} = 2 \sqrt{\frac{P_{cb}}{P_m}} = 2.8 \times 10^{-5} \text{ rad}. \quad (5)$$

可见采用空芯光子晶体光纤时, 背向散射引起的零偏漂移较大, 虽然可以通过本征频率调制进一步减小, 但由于受到分束器分光比误差的限制, 在高精度光纤陀螺中仍不容忽视. 实芯光子晶体光纤和普通保偏光纤的背向散射引起的陀螺漂移在采用宽带光源时基本可以忽略.

2.3 标度因数误差

光纤陀螺的标度因数是陀螺输出的数字量和输入角速度之间的比例因子^[4]:

$$K_{SF} = \frac{D_{FB}}{\Omega} = \frac{2\pi LD}{\lambda c} \cdot \frac{1}{K_{DA} \cdot K_M}, \quad (6)$$

图 4 光纤损耗谱导致的光波波长随温度变化

Figure 4 Temperature dependent wavelength variations arise from different fiber loss spectra

表 1 不同光纤陀螺误差对比

Table 1 Error comparison of different FOGs

	FOG error	Panda fiber	PBG-PCF	TIR-PCF
Noise	Backward scattering noise	$1.3 \times 10^{-7}/W$	$3.6 \times 10^{-6}/W$	$1.3 \times 10^{-7}/W$
Bias shift	Polarization error	$0.0152^{\circ}/h$	$0.0481^{\circ}/h$	$0.0085^{\circ}/h$
	Backward scattering phase error	$5.2 \times 10^{-6}rad$	$3.4 \times 10^{-5}rad$	$5.2 \times 10^{-6}rad$
Scale factor error	Wavelength stability	$0.3 \times 10^{-6}/^{\circ}C$	$1.9 \times 10^{-6}/^{\circ}C$	$0.2 \times 10^{-6}/^{\circ}C$

K_{DA} 是 D/A 转换器及其放大器的增益, $K_M = \pi/V_{\pi}$ 是 Y 波导的调制系数. 陀螺的标度因数误差与光纤线圈长度直径乘积 LD 、光波长、电路增益及电光调制系数相关. 光纤的差异只影响光波长, 因此这里仅讨论波长引起的标度因数误差.

光源若采用掺铒光纤光源, 则波长的稳定性约为 $1 \times 10^{-6}/^{\circ}C$. 光纤的损耗谱变化也会引起干涉光波的平均波长发生变化. 图 4 为在 $-40^{\circ}C \sim +70^{\circ}C$ 温度范围内测得的几类光纤的损耗谱, 被测光纤长度均为 5 m, 光源为高斯型掺铒光纤光源, 谱宽约为 7 nm.

从图 4 所示的测试测量结果可以看出, 熊猫型 (包层直径 125 μm) 保偏光纤和实芯保偏光子晶体光纤具有较好的波长稳定性, 变化量约为 $0.6 \times 10^{-7}/^{\circ}C$, 而空芯保偏光子晶体光纤的波长变化量高 1 个量级, 全温范围内变化量约为 $0.6 \times 10^{-6}/^{\circ}C$, 这可能与空芯光子晶体光纤 90% 的空气占空比使得其结构的温度稳定性较差有关. 若采用谱宽大于 35 nm 的宽谱光源, 则普通保偏光纤、实芯保偏光子晶体光纤及空芯保偏光子晶体光纤的波长稳定性分别为 $0.3 \times 10^{-6}/^{\circ}C$, $0.2 \times 10^{-6}/^{\circ}C$ 和 $1.9 \times 10^{-6}/^{\circ}C$.

可见, 若采用谱宽大于 35 nm 的宽谱光源, 实芯光子晶体光纤陀螺的标度因数稳定性具有较明显优势, 若采用谱宽 7 nm 左右的窄谱光源, 实芯光子晶体光纤陀螺和普通光纤陀螺的标度因数稳定性相当. 而空芯光子晶体光纤陀螺就目前达到的技术水平, 在该项指标上存在明显劣势, 光纤的制备工艺水平还有待突破.

综上所述, 在目前的条件下, 实芯光子晶体光纤引起的光纤陀螺误差较小, 与其他两种光纤的对比结果如表 1 所示.

图 5 光子晶体光纤陀螺样机
Figure 5 Photonic crystal fiber FOG

表 2 光子晶体光纤陀螺光路主要参数
Table 2 Main optical parameters of the photonic crystal fiber FOG

Devices	Main parameters
Er-doped fiber source	Mean wavelength: 1542 nm; Band width: 37 nm
SM fiber coupler	Splitting ratio: 50/50; Loss: <0.1 dB
PCF coil	Mean diameter: 64 mm; Height: 12 mm; Framework: titanium alloy
Y waveguide	Loss: 3.8 dB; Splitting ratio: 48.9/51.1; Pigtail fiber crosstalk: -36.7 dB
Detector	Band width: 10 MHz; Noise: 0.3 mV; Sensitivity: -50 dBm

图 6 光子晶体光纤陀螺零偏在不同温变率条件下的测试结果
Figure 6 Test result of PCF-FOG bias under different temperature gradients

3 光子晶体光纤陀螺样机研制及测试结果

3.1 样机研制

上文分析及测试结果表明目前光子带隙光纤陀螺的研究基础还较弱, 实芯光子晶体光纤具备工程应用的基础, 并具有一定的代表性. 本文采用 600 m 实芯保偏光子晶体光纤研制了陀螺样机, 见图 5, 光路的主要参数见表 2.

3.2 陀螺常规特性

(1) 零偏稳定性. 常温下陀螺零偏稳定性为 $0.02^{\circ}/h(1\sigma)$. 图 6 是陀螺零偏性能的测试图, 陀螺从常温以 $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的温度变化率升至 70°C , 然后以 $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$, $0.5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的温度变化率分别开始一个完整的温度循环, 最后降温至常温.

表 3 陀螺标度因数测试结果
Table 3 Test results of FOG scale factor

Temperature (°C)	Scale factor (LSB/°/S)	Compensated scale factor (LSB/°/S)
-40	37397.1	37413.6
-20	37402.5	37412.9
0	37408.0	37412.8
15	37412.5	37413.5
30	37416.1	37413.6
40	37418.4	37413.7
50	37419.8	37413.1
60	37421.7	37413.1
70	37423.5	37413.2
Mean	37413.29	37413.28
Repeatability ($\times 10^{-6}$, 1σ)	242.5	9.0

图 7 标度因数测试结果
Figure 7 Test results of temperature dependent scale factor variation

可见, 在不同的温度变化率下, 光子晶体光纤陀螺的零偏漂移量水平基本相同, 而普通光纤陀螺当温度变化率越大时, 零偏漂移越大. 其对温度变化率的敏感度约为普通光纤陀螺的 1/2.

(2) 标度因数. 表 3 是标度因数性能测试结果, 测试温度范围为 $-40^{\circ}\text{C}\sim+70^{\circ}\text{C}$. 图 7 是标度因数的温度补偿结果.

可见, 光子晶体光纤陀螺全温范围内陀螺标度因数重复性较好, 优于普通陀螺 2 倍以上.

3.3 磁场灵敏度特性

图 8 和表 4 是陀螺磁场灵敏度测试结果. 可见, 光子晶体光纤陀螺磁场灵敏度小于普通光纤陀螺的 1/5. 采用相同磁屏蔽后, 光子晶体光纤陀螺仍体现出优势.

3.4 抗辐照特性

对陀螺样机进行了 $\text{Co}^{60}\gamma$ 射线辐照试验, 剂量率为 0.083 rad/s , 总剂量为 33 krad(Si) , 辐照中陀螺的零偏和噪声如图 9 所示, 零偏和噪声变化量小于陀螺的设计精度 $0.05^{\circ}/\text{h}(1\sigma)$, 相比于普通光纤陀螺表现出了较强的抗辐照能力.

图 8 光子晶体光纤陀螺磁场灵敏度测试结果

Figure 8 Test results of magnetic field dependent bias variation. (a) X direction; (b) Y direction; (c) Z direction

表 4 陀螺零偏磁场灵敏度测试结果

Table 4 Test results of FOG magnetic field sensitivity

Direction	PCF-FOG			Panda fiber FOG		
	X	Y	Z	X	Y	Z
Without magnetic shield (°/h/Gs)	0.048	0.110	0.160	0.213	0.784	0.820
With magnetic shield (°/h/Gs)	0.001	0.005	0.006	0.007	0.017	0.014

图 9 辐照中陀螺输出变化

Figure 9 Radiation dependent bias variation

4 结论

光子晶体光纤的全石英结构特点决定了其具有显著的环境适应性优势, 尽管从原理而言, 采用空芯光子晶体光纤比采用实芯光子晶体光纤更能体现出光纤陀螺的优势, 但基于目前光纤技术发展水平, 采用实芯光子晶体光纤是较实用的方案. 本文研制了实芯光子晶体光纤陀螺样机, 测试结果表明,

其零偏温度稳定性优于普通光纤陀螺 50%, 标度因数温度条件下的重复性比普通光纤陀螺小 2 倍, 零偏磁场灵敏度约为普通光纤陀螺的 1/5. 目前, 实芯光子晶体光纤的优化设计、熔接、可靠性验证等工作均获得了较理想的研究成果, 其在光纤陀螺中的应用将逐步成熟.

参考文献

- 1 Russell P. Photonic crystal fibers: a historical account. IEEE LEOS Newsletter, 2007, 21: 11–15
- 2 Dignonnet M, Blin S, Kim H K, et al. Sensitivity and stability of an air-core fibre-optic gyroscope. Meas Sci Technol, 2007, 18: 3089–3097
- 3 Tawney J, Hakimi F, Willig R L, et al. Photonic crystal fiber IFOGs. In: Proceedings of OFS, Cancun, 2006. ME8
- 4 Wang W. The Technologies of Interferometric Fiber-Optic Gyroscope. Beijing: China Aerospace Press, 2010. 48–427 [王巍. 干涉型光纤陀螺仪技术. 北京: 中国宇航出版社, 2010. 48–427]
- 5 Wegmuller M, Légré M, Gisin N, et al. Experimental investigation of the polarization properties of a hollow core photonic bandgap fiber for 1550 nm. Opt Expr, 2005, 13: 1457–1467
- 6 He W, Terrel M A, Kim H K, et al. Measurements of the birefringence and Verdet constant in an air-core fiber. J Lightwave Technol, 2009, 27: 3194–3201
- 7 Dangui V, Dignonnet M J F, Kino G S. Laser-driven photonic-bandgap fiber optic gyroscope with negligible Kerr-induced drift. Opt Lett, 2009, 34: 875–877

Research on photonic crystal fiber optic gyroscope

WANG Wei* & LI Jing

Beijing Institute of Aerospace Control Devices, Beijing 100854, China

*E-mail: yfwangwei@vip.sina.com

Abstract Photonic crystal fiber (PCF) has numerous advantages, such as limited temperature dependence, small Kerr and Verdet coefficients, and high radiation hardness. By using PCF, a fiber optic gyroscope (FOG) with reduced size, low weight, and high precision can be realized. In this paper, the error mechanism of a photonic crystal fiber optic gyroscope (PCFOG) is studied and analyzed in terms of noise, bias shift, and scale factor. To improve FOG applications, the differences between photonic band gap fiber and refractive index guide PCF are investigated. Moreover, a FOG based on refractive index guide PCF is developed. The test results show that the PCFOG provides a 50% improvement in temperature stability compared with a conventional FOG, and that the bias shift is less than $0.05^\circ/\text{h}$ (1σ) under a total radiation dose of 33 krad (Si). Therefore, PCFOG technology represents an important development in FOG applications.

Keywords fiber optic gyroscope, photonic crystal fiber, bias shift, polarization error, noise

WANG Wei was born in 1966. He received his Ph.D. degree from the China Academy of Launch Vehicle Technology in 1998. Currently, he is a Senior Researcher of inertial navigation and optical fiber sensors. Dr. Wang is academician at the Chinese Academy of Sciences, as well as director of the Beijing Institute of Aerospace Control Devices at the Chinese Aerospace Science Corporation.

LI Jing was born in 1973. She received her Ph.D. degree from the China Academy of Launch Vehicle Technology in 2014. Currently, she is researching technology related to fiber-optic gyroscopes.