

Y波导温致半波电压特性对谐振式光纤陀螺的影响

苏政澄 李俊 吴凡 蓝士祺 闫博

Effect of temperature-induced half-wave voltage characteristics of Y-waveguide modulator on resonant fiber optic gyroscope

SU Zhengcheng, LI Jun, WU Fan, LAN Shiqi, YAN Bo

引用本文:

苏政澄, 李俊, 吴凡, 等. Y波导温致半波电压特性对谐振式光纤陀螺的影响[J]. 应用光学, 2024, 45(2): 461–466. DOI: 10.5768/JAO202445.0208003

SU Zhengcheng, LI Jun, WU Fan, et al. Effect of temperature-induced half-wave voltage characteristics of Y-waveguide modulator on resonant fiber optic gyroscope[J]. Journal of Applied Optics, 2024, 45(2): 461–466. DOI: 10.5768/JAO202445.0208003

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0208003>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

Y波导调制器残余强度调制研究

Residual intensity modulation of Y-waveguide modulator

应用光学. 2017, 38(6): 974–978 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0605002>

谐振式光纤陀螺背向散射噪声抑制研究

Research on backscatter noise suppression for resonator fiber optic gyro

应用光学. 2018, 39(2): 290–294 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0208002>

高精度光纤陀螺零位误差的磁温特性研究

Research on magnetic temperature characteristics of zero error on high precision fiber-optic gyro

应用光学. 2020, 41(1): 220–227 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0108001>

基于阵列波导光栅的边缘滤波温度解调系统

Edge filter temperature demodulation system based on arrayed wave-guide grating

应用光学. 2021, 42(5): 898–905 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0503004>

毛细管内嵌微球谐振腔的温度传感特性研究

Temperature sensing characteristics of a microsphere resonator embedded in a capillary

应用光学. 2021, 42(5): 926–931 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0508001>

非线性光波导中基波和二次谐波的模场分布研究

Analysis of mode field distribution for fundamental and second harmonic light waves in nonlinear optical waveguide

应用光学. 2017, 38(2): 231–236 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0202005>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2024) 02-0461-06

Y 波导温致半波电压特性对谐振式 光纤陀螺的影响

苏政澄, 李 俊, 吴 凡, 蓝士祺, 闫 博

(西安飞行自动控制研究所 飞行器控制一体化技术国防科技重点实验室, 陕西 西安 710076)

摘 要: 针对基于宽谱光源的谐振式光纤陀螺 (resonant fiber optic gyroscope, RFOG) 中 Y 波导调制器半波电压的温度影响, 开展了 Y 波导温致半波电压特性对谐振式光纤陀螺系统标度因素的影响规律模型, 模型表明: Y 波导调制器的温致半波电压特性会导致基于宽谱光源的谐振式光纤陀螺系统的标度因素发生变化。搭建了用于宽谱光源的 Y 波导调制器半波电压测试系统, 系统测试精度达 1 mV。实验测试了全温范围内 Y 波导的温致半波电压特性在基于宽谱光源的谐振式光纤陀螺系统的影响, 测试结果表明: Y 波导调制器的半波电压与温度呈线性负相关; Y 波导调制器的温致半波电压特性导致基于宽谱光源的谐振式光纤陀螺系统的标度因素的最大相对变化误差为 1266.01×10^{-6} 。

关键词: Y 波导调制器; 谐振式光纤陀螺; 宽谱光; 温度; 半波电压

中图分类号: TN253; V241.62+2

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202445.0208003

Effect of temperature-induced half-wave voltage characteristics of Y-waveguide modulator on resonant fiber optic gyroscope

SU Zhengcheng, LI Jun, WU Fan, LAN Shiqi, YAN Bo

(National Key Laboratory of Science and Technology on Aircraft Control, AVIC Xi'an Flight Automatic Control Research Institute, Xi'an 710076, China)

Abstract: Aiming at the temperature effect of half-wave voltage of Y-waveguide modulator on resonant fiber optic gyroscope (RFOG) based on broad spectrum light source, the effect of temperature-induced half-wave voltage characteristics of Y-waveguide modulator on RFOG was studied. The effect law model of voltage characteristics on scaling factors of RFOG system based on broad spectrum light source was established. The model shows that the temperature-induced half-wave voltage characteristics of Y-waveguide modulator will lead to the change of the scaling factor of RFOG system based on broad spectrum light source. A half-wave voltage measurement system of Y-waveguide modulator used for broad spectrum light source was established, and the measurement accuracy of the system reached 1 mV. The influence of the temperature-induced half-wave voltage characteristics of Y-waveguide in the full temperature range in RFOG system based on broad spectrum light source was tested by experiment. The test results show that the half-wave voltage of Y-waveguide modulator is linearly and negatively correlated with temperature. The temperature-induced half-wave voltage characteristics of the Y-waveguide modulator result in a maximum relative variation error of 1266.01×10^{-6} in the scale factor of the RFOG system based on the broad spectrum light source.

Key words: Y-waveguide modulator; resonant fiber optic gyroscope; broad-spectrum light; temperature; half-wave voltage

收稿日期: 2023-07-03; 修回日期: 2023-09-11

基金项目: 装备预研基金项目 (61409230217)

作者简介: 苏政澄 (1998—), 男, 硕士, 主要从事惯性传感器技术研究。E-mail: 18609290013@163.com

引言

基于宽谱光源的谐振式光纤陀螺是一种基于Sagnac效应的转动传感器,其结合了干涉式光纤陀螺和窄线宽谐振式光纤陀螺的优势,有效降低了基于窄线宽光源的谐振式光纤陀螺系统中的光学噪声^[1-4],且相较于当前使用的光纤陀螺,同体积下具有更高的理论精度^[5]。Y波导调制器是基于宽谱光源的谐振式光纤陀螺的重要元件之一,其半波电压的稳定性将直接影响陀螺输出特性。光波长和工作温度是影响Y波导半波电压稳定性的主要因素,因此,研究Y波导的温致半波电压特性对基于宽谱光源的谐振式光纤陀螺系统的影响,对提高陀螺精度与环境适应性具有重要意义。翁仓杰等^[6]人分析了在干涉式光纤陀螺系统中,Y波导半波电压特性对调制相位漂移的影响,但基于宽谱光源的谐振式光纤陀螺的检测原理是基于频率特性,与干涉式光纤陀螺差异较大,因此结论并不完全适用;杨福铃等^[7]人建立了Y波导半波电压与工作波长和温度的数学模型,并设计了一种基于4台阶波调制的半波电压测试系统,但仍服务于干涉式光纤陀螺系统,且测试系统设计复杂,在常规实验室条件中难以实现。

针对以上问题,本文在已有的相关研究基础上^[8],建立了基于宽谱光源的谐振式光纤陀螺系统特性随Y波导温致半波电压特性的变化规律模型。针对基于宽谱光源的谐振式光纤陀螺系统,进行了全温范围内的Y波导温度测试实验,准确获得了Y波导的温致半波电压特性对基于宽谱光源的谐振式光纤陀螺系统特性的影响规律,验证了理论模型,为陀螺设计指标参数的优化和实际应用中半波电压的控制补偿提供参考。

1 理论模型

Y波导半波电压定义为相位调制器输出光相位变化时所施加的电压大小,用来表征Y波导调制器的相位调制能力。前期相关研究表明,当入射光为窄线宽光时,Y波导半波电压与工作波长的关系^[9-13]可表示为

$$U_{\pi} = \frac{\lambda_0}{n_e^3(\lambda, T) \gamma_{33}(\lambda, T) \Gamma(\lambda)} \cdot \frac{d}{l} \quad (1)$$

式中: λ 为光波长; T 为工作温度; l 为波导区长度; d 为电极间等效距离; Γ 为电光重叠积分因子; n_e 、 γ_{33} 分别为铌酸锂晶体的非寻常光折射率和电光系数。

当入射光为宽谱光时,Y波导半波电压是由其

所有波长共同作用决定的,可对各个波长对应的半波电压进行加权平均,表示为^[14]

$$\overline{U_{\pi}} = \frac{\int P(\lambda) U_{\pi}(\lambda) d\lambda}{\int P(\lambda) d\lambda} \quad (2)$$

式中: $P(\lambda)$ 为光功率; $U_{\pi}(\lambda)$ 为半波电压。由于Y波导电光系数 γ_{33} 、非寻常光折射率 n_e 、调制电极的长度 l 及间距 d 等与温度相关,Y波导半波电压呈明显的温度相关性,在光纤陀螺的典型工作范围($-40\text{ }^{\circ}\text{C} \sim +70\text{ }^{\circ}\text{C}$)以内,Y波导半波电压与温度成线性关系,相关性系数为负,可用如下数学模型表示^[15]:

$$U_{\pi} = k_T * T + b_T \quad (3)$$

式中: k_T 为模型的斜率,即温度相关性系数; b_T 为模型直线的截距,即 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的半波电压。

基于宽谱光源的谐振式光纤陀螺是一种基于Sagnac效应的转动传感器,当光纤环形谐振腔以角速度 Ω 转动时,Sagnac效应会使得顺、逆时针传输的光的谐振频率产生频差 f_{sag} ,从而导致陀螺系统输出光强发生变化,光强误差信号 e 与转动角速度 Ω 之间的关系可表示为^[16]

$$e = 2(P|_{f_{\text{mod}}}) \frac{4A}{n\lambda L} \Omega \quad (4)$$

式中: A 为光纤谐振环面积; n 为光纤折射率; λ 为真空光波长; L 为光程长度; P 为陀螺输出的光功率信号。陀螺输出的光功率大小与频率相关,其相关性如图1中实线所示,陀螺工作在不同频率时对应的光功率强度不同。 f_{mod} 为陀螺工作点对应的移频量,令相关性系数 $K=2(P|_{f_{\text{mod}}})$,图1中虚线为 $K \cdot f_{\text{mod}}$ 响应曲线,可以发现,存在最佳工作移频量,使得误差信号 e 与转动角速度 Ω 之间的响应最敏感,因此建议将基于宽谱光源的谐振式光纤陀螺的工作点选取在 e 与 Ω 之间响应最敏感的位置。

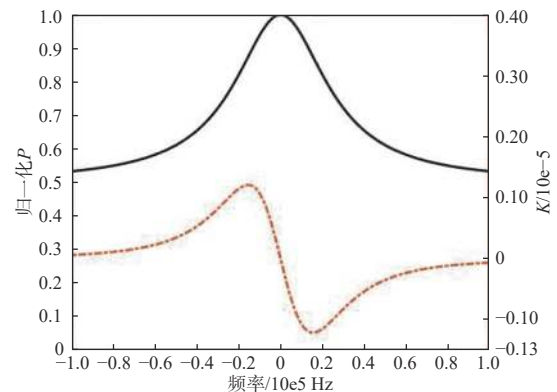


图1 $K \cdot f_{\text{mod}}$ 关系曲线

Fig. 1 Relationship curves between K and f_{mod}

Y波导在基于宽谱光源的谐振式光纤陀螺系统中主要用于分光和移频调制。Y波导通过线性相位调制来实现移频, 线性相位调制信号可表示为

$$v(t) = kt \quad (5)$$

式中 k 为相位调制信号的斜率。设输入 Y 波导光场幅值为 E_0 , 频率为 f_0 , 在初始相位为 0 时, Y 波导输出光场可表示为

$$E_{\text{out}} = E_0 \exp[j2\pi(f_0 + \frac{k}{2U_\pi})t] \quad (6)$$

由式(6)可知, Y波导通过线性相位调制实现的移频量 $f_{\text{mod}} = k/(2U_\pi)$ 。由于线性调制电压不能无限增加, 因此将其变为锯齿波信号实现移频^[17-19]。设锯齿波复位幅值为 $2U_\pi$, 周期为 $1/f_s$ 时, 移频量 f_{mod} 可表示为

$$f_{\text{mod}} = \frac{k}{2U_\pi} = \frac{2U_\pi f_s}{2U_\pi} = f_s \quad (7)$$

式中 f_s 即为实际移频量。由式(3)知, Y波导的本征半波电压受到温度影响, 此时由 Y波导施加的实际移频量应表示为

$$f_{\text{mod}} = \frac{U}{b_T + k_T \cdot T} f_s \quad (8)$$

式中 U 为工作时实际施加在 Y 波导调制端的电压。由式(7)可知, 在陀螺工作时, 实际的移频量会随着温度的变化发生偏移。此时, 在基于宽谱光源的谐振式光纤陀螺系统中, 误差信号 e 与角速度 Ω 的关系应表示为

$$e = 2 \left(P \left| \frac{U}{b_T + k_T \cdot T} f_s \right. \right) \frac{4A}{n\lambda L} \Omega \quad (9)$$

可以发现, 在陀螺工作时, Y波导的温致半波电压特性会对锯齿波调制技术中的移频量产生影响, 从而影响实际工作时的工作点漂移, 导致标度因素发生变化, 降低陀螺性能。

2 实验验证

考虑宽谱光源相干长度极短, 人为搭建的常规 M-Z 干涉仪两臂误差无法满足宽谱光源的相干长度范围, 故参考 Sagnac 干涉仪原理^[20], 设计搭建了一套用于宽谱光源的 Y 分支光学调制器半波电压测试系统, 原理图如图 2 所示。其中宽谱光源采用可放大自发辐射(ASE)光源, 所用 Y 波导为中电 44 所生产的 GC15YB5513 型号, 工作波长为 $1550 \text{ nm} \pm 25 \text{ nm}$, 电极间距约为 $6 \mu\text{m}$, 波导区长度约为 14 mm 。将 Y 波导放置于可调节温箱中, 通过信号发生器

向 Y 波导的一臂提供满足环路渡越频率要求的锯齿波工作电压, 观测示波器和频谱仪上一二阶谐波分量的抑制情况, 分别记录一次谐波最大二次谐波最小以及一次谐波最小二次谐波最大时的电压峰峰值, 两者差值即为当前温度下对应的半波电压值。

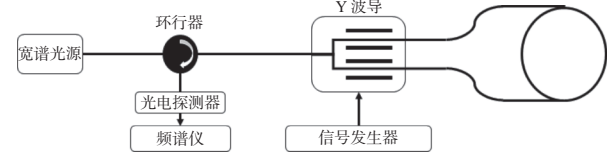
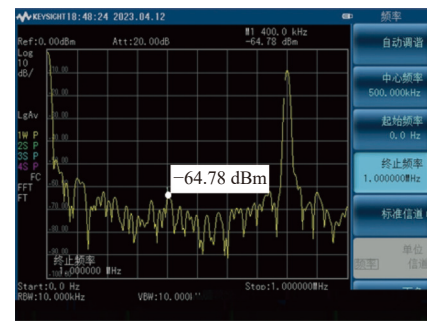


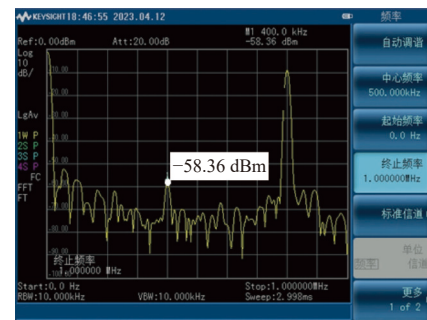
图 2 宽谱光源半波电压测试系统

Fig. 2 Half-wave voltage measurement system for broad spectrum light source

在实验过程中, 由于实验条件限制, 所用光纤环的渡越频率为 400 kHz , 但所用信号发生器的锯齿波工作频率最高只有 200 kHz , 无法满足实验需求, 故设计使用 200 kHz 的占空比为 50% 的三角波工作电压, 图 3 为实际测试时频谱仪的显示结果, 通过调试工作电压的幅值使一次谐波最小二次谐波最大时结果如图 3(a)所示, 一次谐波为 -64.78 dBm , 将工作电压改变 1 mV , 结果如图 3(b)所示, 一次谐波变为 -58.36 dBm , 与未改变前有明显差异, 故认为该测试系统测量精度达 1 mV 。



(a) 工作电压 8.984 V



(b) 工作电压 8.985 V

图 3 测试系统测试结果

Fig. 3 Test results of test system

为了验证该测试系统的可靠性,同时测试了室温下窄线宽光源对应的半波电压值,分别取 2 组测试结果 3 次测量后的平均值,如表 1 所示,表中理论计算值分别由式(1)、式(2)求得。结果表明,窄线宽光源和宽谱光源对应的室温下测试结果与理论计算值产生的相对误差几乎一致,由此认为,该测试系统下宽谱光源对应的 Y 波导半波电压测试值较为准确,满足测试需求。

表 1 宽谱光源与窄线宽光源半波电压测试结果

Table 1 Half-wave voltage test results for broad spectrum light source and narrow linewidth light source

光源类型	中心波长/nm	实际测量值/V	理论计算值/V	相对误差/%
窄线宽光源	1550	3.995	4.003	0.19
宽谱光源	1550(1531~1566)	3.992	3.985	0.17

利用图 2 的测试系统,实验测试了光纤陀螺典型工作范围($-40\text{ }^{\circ}\text{C}\sim+70\text{ }^{\circ}\text{C}$)以内的 11 组数据,以 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为间隔,测试结果如图 4 所示。图 4 中圆圈为实际测试数据,每点表示该温度下测试 5 次取平均值的数据,直线为式(3)的拟合直线,图 4 中方程为拟合表达式,由拟合结果可得该 Y 波导半波电压温度相关性系数 $k_T=-0.0023\text{ V}/^{\circ}\text{C}$ 。

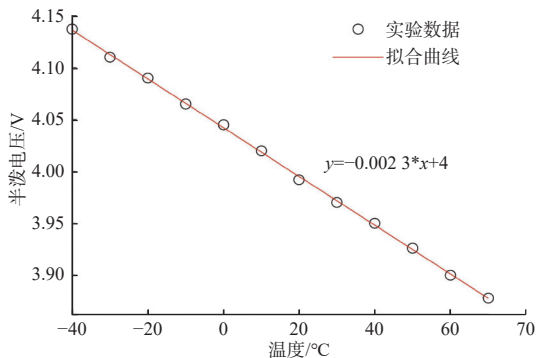


图 4 半波电压与温度关系

Fig. 4 Relationship between half-wave voltage and temperature

图 5 为 Y 波导的温致半波电压特性对宽谱光源的谐振式光纤陀螺影响的测试系统示意图,其中谐振腔长 1 km ,耦合器分光比为 $98:2$,FPGA 用于向 Y 波导施加工作电压,采集陀螺系统输出信号并将其输入上位机,上位机负责信号处理以及系统参数设定。

将由图 2 系统测试所得的 Y 波导半波电压温度相关性系数代入式(9),可得标度因素随温致半波电压特性的变化曲线,同时利用图 5 系统进行陀

螺工作状态下 Y 波导的全温测试。理论仿真结果与测试结果如图 6 所示,其中实线为理论仿真曲线,圆圈表示当前温度实际测试数据。由图 6 可知,以 Y 波导 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的本征半波电压为工作电压时,系统实际工作环境的温度升高或者降低都会导致标度因素减小,降低陀螺系统的敏感性,且在光纤陀螺的典型工作范围($-40\text{ }^{\circ}\text{C}\sim+70\text{ }^{\circ}\text{C}$)之内,高温影响更明显,以 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的标度因素值为基准,温度引起的最大相对变化误差为 1266.01×10^{-6} 。

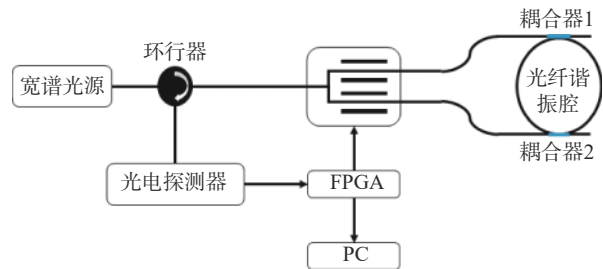


图 5 温致半波电压特性的陀螺测试系统

Fig. 5 System for testing influence of temperature-induced half-wave voltage characteristics on gyro

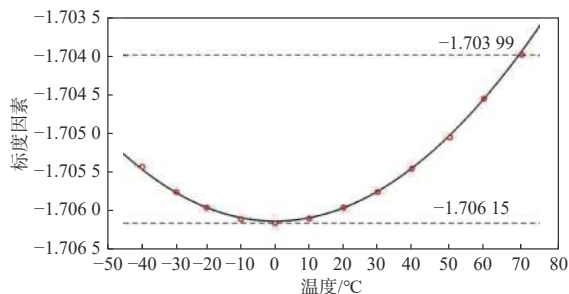


图 6 标度因素与温度关系

Fig. 6 Relationship between scale factor and temperature

3 结论

本文研究了 Y 波导半波电压的温致特性,设计搭建了一套用于宽谱光源的 Y 波导半波电压测试系统,结构简便且系统测试精度满足 1 mV 的需求。利用该测试系统标定了所用 Y 波导的温度相关性系数,建立了 Y 波导的温致半波电压特性对基于宽谱光源的谐振式光纤陀螺系统标度因素的影响规律模型,实验测试了 Y 波导温致半波电压特性对基于宽谱光源的谐振式光纤陀螺系统特性的影响。实验结果表明,温度的升高和降低都会导致其标度因素变小,进而导致陀螺敏感性降低,且在光纤陀螺的典型工作范围($-40\text{ }^{\circ}\text{C}\sim+70\text{ }^{\circ}\text{C}$)以内高温的影响更明显,光纤谐振腔为 1 km 时,最

大相对变化误差约为 1266.01×10^{-6} , 实验结果与理论模型相符, 验证了 Y 波导温致半波电压特性对基于宽谱光源的谐振式光纤陀螺系统标度因素的影响模型的正确性。本文结论可以对基于宽谱光源的谐振式光纤陀螺设计指标参数的优化, 以及实际应用中温致陀螺系统特性的精确建模提供参考。

参考文献:

- [1] 刘霜, 李汉钊, 刘路, 等. 激光器频率噪声功率谱密度测试技术及在谐振式光纤陀螺中的应用[J]. 光学学报, 2021, 41(13): 1306010.
LIU Shuang, LI Hanzhao, LIU Lu, et al. Laser frequency noise power spectral density measurement technology and its application to resonant optical fiber gyroscope[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(13): 1306010.
- [2] 李汉钊, 钱伟文, 刘路, 等. 谐振式光纤陀螺角度随机游走的分析与优化[J]. 中国激光, 2021, 48(9): 0901002.
LI Hanzhao, QIAN Weiwen, LIU Lu, et al. Analysis and optimization of angle random walk of resonant fiber optic gyroscope[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(9): 0901002.
- [3] 邱嘉莹, 王磊, 黄腾超, 等. 干涉式光纤陀螺技术发展综述[J]. 光学学报, 2022, 42(17): 136-145.
QIU Jialuo, WANG Lei, HUANG Tengchao, et al. Review of development of interferometric fiber-optic gyroscopes[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(17): 136-145.
- [4] 胡旭东. 光纤陀螺相对强度噪声建模及抑制方法研究[D]. 北京: 航天科工集团第二研究院, 2022.
HU Xudong. Research on modeling and reduction method of relative intensity noise of fiber optic gyroscope[D]. Beijing: The Second Academy of CASIC, 2022.
- [5] ZHAO S, LIU Q, LIU Y, et al. Navigation-grade resonant fiber-optic gyroscope using ultra-simple white-light multi-beam interferometry[J]. Photonics Research, 2022, 10(2): 542-549.
- [6] 翁苍杰, 杨德伟, 郑远生, 等. Y波导调制器半波电压及调制相位漂移研究[J]. 半导体光电, 2017, 38(2): 161-163.
WENG Cangjie, YANG Dewei, ZHENG Yuansheng, et al. Research on half-wave voltage and phase drift of y-waveguide modulator[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2017, 38(2): 161-163.
- [7] 杨福铃, 杨远洪, 曹耀辉, 等. Y分支光学调制器半波电压与波长和温度相关性研究[J]. 中国激光, 2016, 43(6): 0606002.
YANG Fuling, YANG Yuanhong, CAO Yaohui, et al. Correlation of wavelength and temperature with the half-wave voltage for Y branch optical modulator[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(6): 0606002.
- [8] 刘颖, 李言, 姬忠校, 等. 光纤陀螺用Y波导半波电压稳定性的研究[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(2): 449-453.
LIU Ying, LI Yan, JI Zhongxiao, et al. Research on the half-wave voltage stability of Y waveguide in FOG[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(2): 449-453.
- [9] FUJIWARA T, KAWAZOE T, MORI H. Temperature dependence of the half-wave voltage in Ti: LiNbO₃ waveguide devices at 0.83 μm [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1990, 29(12A): L2229-L2231.
- [10] 李金洋, 逯丹凤, 祁志美. 铌酸锂波导电光重叠积分因子的波长依赖特性分析[J]. 物理学报, 2014, 63(7): 321-327.
LI Jinyang, LU Danfeng, QI Zhimei. Analyses of wavelength dependence of the electro-optic overlap integral factor for LiNbO₃ channel waveguides[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(7): 321-327.
- [11] ZELMON D E, SMALL D L, JUNDT D. Infrared corrected sellmeier coefficients for congruently grown lithium niobate and 5 mol. % magnesium oxide-doped lithium niobate[J]. JOSA B, 1997, 14(12): 3319-3322.
- [12] YONEKURA K, JIN L H, TAKIZAWA K. Measurement of dispersion of effective electro-optic coefficients r_{e13} and r_{e33} of nondoped congruent LiNbO₃ crystal[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2008, 47(7): 5503-5508.
- [13] 黄禾. 光纤陀螺仪用集成光波导Y分支相位调制器的设计与制作[D]. 成都: 电子科技大学, 2004: 20-28.
HUANG He. Design and manufacture of branch optic waveguide phase modulator for fiber optic gyroscope[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2004: 20-28.
- [14] 陈和宇, 郑月, 王夏霄, 等. 平均波长对光纤陀螺标度因数的影响[J]. 中国激光, 2019, 46(3): 0306002.
CHEN Heyu, ZHENG Yue, WANG Xiaoxiao, et al. Influence of mean wavelength on scale factor of fiber optic gyroscope[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(3): 0306002.
- [15] 毛献辉. 环形干涉光纤传感器若干关键问题研究[D].

- 北京: 清华大学, 2005: 40-43.
- MAO Xianhui. Research on some key techniques of fiber optic ring interferometric sensor[D]. Beijing: Tsinghua University, 2005: 40-43.
- [16] 郭伟. 谐振式光纤陀螺的基础研究 [D]. 浙江: 浙江大学, 2003: 10-11.
- GUO Wei. Study of resonance fiber optic gyroscope[D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2003: 10-11.
- [17] 卢霄. 双路闭环谐振式光纤陀螺数字信号检测系统的设计与实现[D]. 浙江: 浙江大学, 2014.
- LU Xiao. Design and implementation of digital signal processor for double closed-loop RFOG[D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2014.
- [18] JOHNSON L M, COX III C H. Serrodyne optical frequency translation with high sideband suppression[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1988, 6(1): 109-112.
- [19] 蒋治国, 胡宗福. 谐振型光纤陀螺的灵敏度分析[J]. *中国激光*, 2017, 44(7): 0706001.
- JIANG Zhiguo, HU Zongfu. Analysis on sensitivity of resonant fiber optic gyro[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(7): 0706001.
- [20] 郑祥亮, 孙权社, 韩忠, 等. 基于Sagnac干涉仪的光纤长度测量方法[J]. *光学学报*, 2017, 37(1): 0106003.
- ZHENG Xiangliang, SUN Quanshe, HAN Zhong, et al. Fiber length measurement method based on Sagnac interferometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(1): 0106003.