

宽谱光源相对强度噪声及对闭环光纤陀螺影响研究

索鑫鑫¹ 杨远洪^{1,2} 杨明伟¹ 马海全³ 张 斌³

¹ 精密光机电一体化技术教育部重点实验室北京航空航天大学, 北京 100191
² 惯性技术国防科技重点实验室北京航空航天大学, 北京 100191
³ 中航工业西安飞行自动控制研究所, 陕西 西安 710065

摘要 宽谱光源相对强度噪声(RIN)的定量评估及其对光纤陀螺(FOG)性能的影响机理是进一步提高 FOG 精度的关键问题。搭建实验测试系统对 4 种不同谱型、不同偏振态宽谱光源的 RIN 进行了独立测试,基于 3 种不同等效谱宽定义分别计算 4 种宽谱光源的 RIN,通过对比确定了基于功率加权平均谱宽的强度噪声计算模型;在此基础上,对 FOG 的随机游走系数(RWC)模型进行了修正。搭建光电分离式高精度 FOG 实验系统,采用 4 种光源,分别测试了 FOG 的 RWC,同时利用修正模型估算了 RWC,实测值与估算值吻合较好。结果表明,光源的功率加权平均等效谱宽和偏振度是影响宽谱光源 RIN 的主要因素,该研究为光源 RIN 的评估和高精度 FOG 的优化设计提供了重要的理论和实践依据。

关键词 光纤陀螺;相对强度噪声;功率加权平均谱宽;随机游走系数

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0605009

Relative Intensity Noise Characteristic of Broadband Sources and its Effect on Performance of Closed-Loop Fiber Optic Gyroscope

Suo Xinxin¹ Yang Yuanhong^{1,2} Yang Mingwei¹ Ma Haiquan³ Zhang Bin³

¹ Key Laboratory on Precision Opto-Mechatronics Technology of Ministry of Education, Beihang University, Beijing 100191, China
² National Key Laboratory on Inertial Technology, Beihang University, Beijing 100191, China
³ AVIC Xi'an Flight Automatic Control Research Institute, Xi'an, Shaanxi 710065

Abstract The accurate evaluation of relative intensity noise (RIN) of broad-band sources and its effect mechanism on a fiber optic gyroscope (FOG) are key factors to further improve the performance of FOGs. An intensity noise measurement system is constructed and RINs of four sources with different spectral shapes and degree of polarizations are tested. Then the RINs are calculated with three different effective bandwidths and the accurate RIN model is confirmed by employing the power weighted average (PWA) bandwidth. Based on this research, the random walk coefficient (RWC) model of FOG is modified. A photoelectric detachment high precision FOG is constructed, and the RWC of FOG is tested with four broadband sources and calculated by using the modified model. It is shown that the calculation results are consistent with the experiment results. This indicates that the power weighted average bandwidth and the degree of polarization are key factors determining the RIN of broadband sources and this research is of great value in evaluating the RIN characteristics of different sources and designing high performance FOGs.

Key words fiber optic gyroscope; relative intensity noise; power weighted average bandwidth; random walk coefficient

OCIS codes 270.2500; 060.2800; 060.2340

收稿日期: 2013-12-19; **收到修改稿日期**: 2013-01-14

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ040815)、创新团队发展计划(IRT1203)

作者简介: 索鑫鑫(1986—),男,博士研究生,主要从事掺铒光纤光源技术方面的研究。

E-mail: suoxinxin111111@163.com

导师简介: 杨远洪(1969—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤传感技术及激光技术方面的研究。

E-mail: yhyang@buaa.edu.cn(通信联系人)(中国光学学会会员号: S040420656S)

1 引 言

光纤陀螺是一种用来测量旋转角速度的惯性技术传感器,具有灵敏度高、无转动部件、体积小、寿命长、启动快、动态范围大等优点,其主要性能参数包括随机游走、零偏稳定性和标度因数等。在应用于光纤陀螺系统的各种光源中,使用宽谱光源可以有效减小背向瑞利散射、背向反射、偏振交叉耦合、克尔效应以及各种环境噪声所带来的系统相干误差,因此,超荧光光纤光源(SFS)和超发光二极管(SLD)被普遍应用于干涉型光纤陀螺系统中^[1-5]。

随着国内外对光纤陀螺研究的不断深入,宽谱光源的相对强度噪声(RIN)成为限制高精度光纤陀螺最小检测灵敏度的主要原因。光源 RIN 的表现形式为白噪声,在陀螺性能指标中用随机游走系数(RWC)来表征。陀螺的主要性能参数中,RWC 是由白噪声产生的随时间增加而增加的陀螺仪输出误差系数,反映陀螺系统的噪声水平,代表光纤陀螺的精度^[6-12]。Morkel 等^[1]测试了宽谱光源的 RIN,给出了光源 RIN 的计算模型;Yurek 等^[2-3]研究了光纤光学系统用宽谱光源的 RIN 特性,指出系统的测量极限由光源 RIN 决定;Burns 等^[4]实验研究了不同宽谱光源的 RIN 特性并将噪声理论模型应用于光纤陀螺随机游走的计算中,结果表明理论计算值和实验值之间存在较大误差。宽谱光源的强度噪声与光源光谱特性密切相关,然而目前对不同类型、不同光谱形状宽谱光源 RIN 特性的研究还不够深入,相关模型尚不能准确地用来评估不同宽谱光源的 RIN 特性,因此需要对宽谱光源 RIN 的评估方法及其对陀螺性能的影响进行深入研究,建立严格准确的噪声计算模型,进而确定光源噪声对光纤陀螺的影响机理。

本文全面分析了宽谱光源的噪声特性,设计了直接噪声测试方法实现了宽谱光源 RIN 的测试,测试光源包括一种部分偏振超辐射发光二极管和三种不同输出谱型的超荧光光纤光源。测试结果表明,

RIN 与光源谱宽、光谱形状和偏振特性密切相关,综合这些因素,提出了基于光源功率加权平均谱宽的 RIN 计算模型,该模型能比较准确地描述不同宽谱光源的 RIN 特性。将这 4 种宽谱光源应用于相同参数的闭环光纤陀螺,分别测量并利用上述噪声计算模型计算了陀螺系统的 RWC,计算结果与实际测试值吻合较好。

2 宽谱光源相对强度噪声及实验测试

光源强度噪声源于光源的附加噪声,这种附加噪声由宽谱光源各傅里叶分量之间拍频引起,可表示为^[13-14]

$$\langle \Delta i_{\text{RIN}}^2 \rangle = \frac{(1 + \alpha^2) \cdot \langle i \rangle^2 \cdot \Delta f}{\Delta \nu_{\text{eff}}}, \quad (1)$$

式中 α^2 为光源偏振度, $\langle i \rangle$ 为到达探测器的平均光电流, Δf 为信号带宽, $\Delta \nu_{\text{eff}}$ 为光源有效的光谱带宽。当宽谱光源应用于光纤陀螺时,附加噪声以 RIN 的形式影响陀螺的噪声性能,即 RWC。由(1)式,宽谱光源 RIN 可以表示为

$$f_{\text{RIN}} = \frac{\langle \Delta i_{\text{RIN}}^2 \rangle}{\langle i \rangle^2 \cdot \Delta f} = \frac{(1 + \alpha^2)}{\Delta \nu_{\text{eff}}} = \frac{(1 + \alpha^2) \cdot \bar{\lambda}^2}{c \Delta \lambda_{\text{eff}}}, \quad (2)$$

式中 $\bar{\lambda}$ 为光源的平均波长, $\Delta \lambda_{\text{eff}}$ 为光源的有效谱宽, c 为真空中的光速。为了测量光源的 RIN,设计搭建了如图 1 所示的噪声直接测量装置。测试系统中,待测光源由低噪声直流驱动源驱动,输出光通过衰减器进入集成光电探测器;衰减器用于调节到达探测器的光功率参数,避免探测器饱和或响应度非线性。New focus 1544-A 探测器为低噪声大带宽探测器,集成光电探测和前放功能,探测器跨阻增益 \mathcal{R} 为 1000 V/A,带宽为 12 GHz;Agilent 34401A 高精度数字电压表用来检测探测器输出的平均直流(DC)电压信号,Agilent N9020A 频谱分析仪用来检测探测器输出的信号噪声频谱。

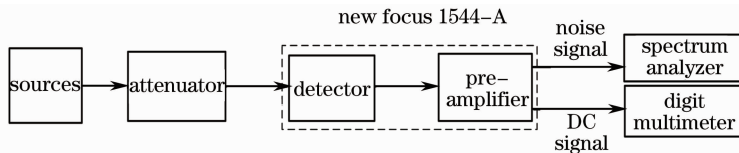


图 1 宽谱光源相对强度噪声测试系统

Fig. 1 RIN measurement setup of broadband sources

图 1 噪声测试系统中,探测器输出的噪声实际包含热噪声、散粒噪声和光源强度噪声,输出噪声功率为

$$P_D = (\langle \Delta i_{\text{th}}^2 \rangle + \langle \Delta i_{\text{sh}}^2 \rangle + \langle \Delta i_{\text{RIN}}^2 \rangle) \cdot \mathcal{R} = \frac{\Delta V^2}{\mathcal{R}}, \quad (3)$$

单位带宽内噪声相对平均光电流平方的比值可表示为

$$\frac{(\langle \Delta i_{th}^2 \rangle + \langle \Delta i_{sh}^2 \rangle + \langle \Delta i_{RIN}^2 \rangle)}{\langle i \rangle^2 \cdot \Delta f} = \frac{\Delta V^2}{\langle V \rangle^2 \cdot \Delta f}, \quad (4)$$

式中 $\langle i \rangle$ 为探测器上的平均光电流信号, $\langle \Delta i_{th}^2 \rangle$ 、 $\langle \Delta i_{sh}^2 \rangle$ 、 $\langle \Delta i_{RIN}^2 \rangle$ 分别表示热噪声、散粒噪声和强度噪声, $\langle V \rangle$ 表示数字电压表检测到的平均直流电压信号, ΔV 表示频谱分析仪检测到的噪声电压信号, Δf 为信号带宽。研究表明^[10]: 对于一个频率线宽为 $\Delta\nu$ 的宽谱光源, 当到

达探测器光功率较小 ($\langle i \rangle < 2e\Delta\nu$, e 为电子电量) 时, 热噪声和散粒噪声在系统测试噪声中占主导地位; 当到达探测器光功率大于微瓦量级 ($\langle i \rangle > 2e\Delta\nu$) 时, 光源强度噪声在系统测试噪声中占主导地位。这样, 图 1 所示的噪声测试系统, 在保证达到探测器上的光功率足够大的条件下, 测得的噪声相对平均光电流平方的比值将为光源 RIN, 可得^[13-14]

$$f_{RIN} = \frac{\langle \Delta i_{RIN}^2 \rangle}{\langle i \rangle^2 \cdot \Delta f} = \frac{\Delta V^2}{\langle V \rangle^2 \cdot \Delta f} = \left(\frac{V_1^2 - V_2^2}{\langle V \rangle^2 \cdot \Delta f} \right) = \left[\frac{(S_{p1} - S_{p2})R}{\langle V \rangle^2 \cdot \Delta f} \right], \quad (5)$$

式中 S_{p1} 为光源经测试系统后的噪声功率谱, S_{p2} 为测试系统本底噪声功率谱; Δf 为频谱仪的测试带宽, 在微弱信号的检测中, 较低的测试带宽可以提高信号测量精度, 实验系统中设置测试带宽为 100 kHz; R 为频谱仪输入电阻, 实验系统 R 为 50 Ω 。

目前, 光纤陀螺中使用的宽谱光源种类较多, 实验中选用 3 种不同谱型 SFS 光源和 1 种部分偏振

SLD 光源作为研究对象进行了 RIN 特性测试。图 2 为 4 种光源的输出光谱, 由光谱分析仪 Yokogawa AQ6370 测量得出, 其主要特征参数如表 1 所示。表 1 中 4 种宽谱光源的偏振度由实验测得, 测量过程中分别将 4 种宽谱光源接入偏振分析仪 Thorlabs PAX5710, 得到 3 种 SFS 光源的偏振度均为 0.01, SLD 光源偏振度为 0.4。

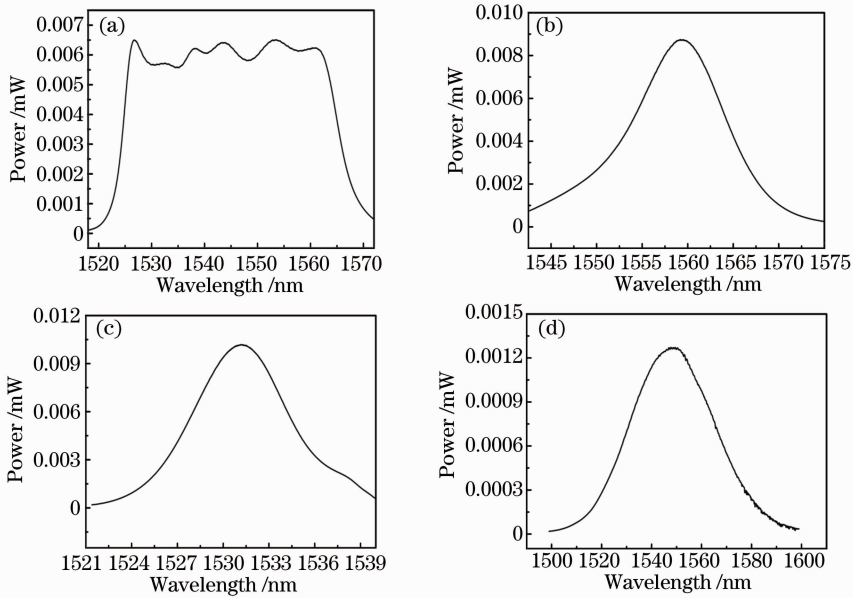


图 2 宽带光源光谱

Fig. 2 Optical spectra of broadband sources

表 1 测试光源的主要参数

Table 1 Main characteristics of the broadband sources under test

Sample number	Source type	Mean wavelength /nm	3 dB bandwidth/ nm	Power / mW	Degree of polarization	Measured RIN / (dB/Hz)
(a)	SFS	1545	41.6	10.6	0.01	-127.6
(b)	SFS	1558	11.7	10.3	0.01	-124.2
(c)	SFS	1531	7.3	10.9	0.01	-121.7
(d)	SLD	1548	39.8	3.6	0.4	-127.2

噪声测试过程中,调节衰减器使4种宽谱光源到达探测器的光功率均约为 $50\ \mu\text{W}$,此时热噪声和散粒噪声的影响可以忽略,分别记录频谱分析仪检测到的不同宽谱光源噪声谱 S 和数字电压表检测到的平均直流电压 $\langle V \rangle$,由(5)式可得到宽谱光源RIN谱。如图3所示,在低频范围内,频谱仪输出噪声主要受“ $1/f$ ”噪声影响,显示值较大,频率大于2 MHz后,光源噪声谱平坦,频谱曲线反映光源的RIN特性。4种宽谱光源RIN的测试值如表1所示。SFS(a)光源和SLD(d)谱宽较宽,RIN较小。

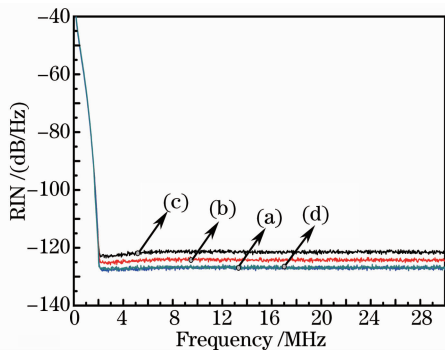


图3 4种宽谱光源相对强度噪声谱

Fig. 3 RIN curves of the four broadband sources

3 宽谱光源相对强度噪声计算模型研究

由于强度噪声是由宽谱光源各傅里叶分量之间拍频引起的附加噪声,理论上,光源中任何影响光谱分量间拍频强度的特征参量均会对强度噪声造成影响。(1)式中, α^2 表示了光源偏振度对强度噪声的

贡献,文献[15]从理论上研究了光谱形状对RIN的影响,但由于实际的光源谱型不会是理想的高斯、三角或矩形,文献[15]中的理论模型需要进一步统一。

为了解决这个问题,本文采用目前使用较多的3种光源谱宽定义,即3 dB谱宽、均方根(RMS)谱宽和功率加权平均(PWA)谱宽分别计算4种样品光源的谱宽,并以计算的谱宽代入(2)式估算RIN,以寻求其中的相关性。3 dB谱宽为光源功率谱中半极大值点所对应的光谱宽度,是应用中最普遍的定义;RMS谱宽^[16]为一种以特定高斯或洛伦兹谱型为目标拟合的谱宽;在光纤陀螺系统中通常采用PWA谱宽^[17]来描述光源的光谱特性。RMS谱宽称作光源的均方根谱宽,计算公式为

$$\Delta\lambda = \sqrt{\frac{\sum p_i \times (\lambda_i - \lambda_c)^2}{\sum p_i}} \quad (6)$$

光源PWA谱宽考虑到光源光谱各细分波段的功率权重,计算公式为

$$\Delta\lambda = \frac{(\sum P_i \times \Delta\lambda_i)^2}{\sum P_i^2 \times \Delta\lambda_i} \quad (7)$$

式中中心波长 $\lambda_c = \sum P_i \times \lambda_i / \sum P_i$; $P_i, \lambda_i, \Delta\lambda_i$ 分别表示宽谱光源功率谱上第 i 个光谱细分波段对应的功率、波长和谱宽。

基于图2中不同光源的光谱测试数据,分别计算了4种光源3 dB谱宽、RMS谱宽和PWA谱宽,利用(2)式计算得到各种谱宽下的光源RIN值,如表2所列。

表2 光谱宽度和对应的RIN计算值

Table 2 Spectrum bandwidth and the corresponding RIN

Sample number	Source type	3 dB bandwidth /nm	RMS bandwidth /nm	PWA bandwidth /nm	Calculated RIN / (dB/Hz)		
					3 dB bandwidth	RMS bandwidth	PWA bandwidth
(a)	SFS	41.6	25.6	45.9	-127.2	-125.1	-127.6
(b)	SFS	11.7	13.4	21.6	-121.6	-122.2	-124.3
(c)	SFS	7.3	6.8	12.0	-119.7	-119.4	-121.9
(d)	SLD	39.8	33.5	59.8	-125.5	-124.8	-127.3

从表2中可看出,在考虑4种宽谱光源的偏振度、有效谱宽的情况下,采用PWA谱宽时,RIN的计算值与测试值吻合得较好。这表明,在宽谱光源RIN的计算中,采用PWA谱宽作为光源有效谱宽结合光源的偏振度值,可以准确地评估宽谱光源的RIN特性。

4种宽谱光源中,SLD光源具有最宽的PWA谱宽,然而由于其发出的光是部分偏振光,不同光谱成

分相拍的强度较高,因此,尽管SLD光源PWA谱宽最宽(59.8 nm),其RIN的测量值仍略大于无偏振的SFS光源(谱宽45.9 nm)。这可能是光纤陀螺中采用高偏SLD光源难以获得高精度的原因之一。

4 宽谱光源相对强度噪声对光纤陀螺随机游走影响的研究

在高精度光纤陀螺中,到达探测器的光功率均

在几十微瓦量级,陀螺噪声由光源 RIN 决定。定义噪声等效角速度为陀螺的噪声极限,将光源 RIN 计

算模型(2)式应用于陀螺 RWC 计算模型^[18]中,陀螺 RWC 修正模型可表示为

$$f_{\text{RWC}} = 60 \cdot \frac{180}{\pi} \cdot \frac{\bar{\lambda}c}{2\pi LD \sin \phi_0} \sqrt{\frac{4K_B T}{R' \eta^2 I_0^2} + \frac{2e(1 + \cos \phi_0)}{\eta I_0} + (1 + \alpha^2) \frac{(1 + \cos \phi_0)^2 \cdot \lambda^2}{c \Delta \lambda_{\text{eff}}}}, \quad (8)$$

式中 f_{RWC} 为陀螺角度 RWC,单位为 $(^\circ)/\sqrt{\text{h}}$ 。 $\bar{\lambda}$ 为宽谱光源的平均波长, L 为光纤环长度, D 为光纤环直径, K_B 为玻尔兹曼常数, T 为热力学温度, R' 为探测器跨阻, η 为探测器响应度, ϕ_0 为陀螺偏置相位, I_0 为到达探测器的光功率。

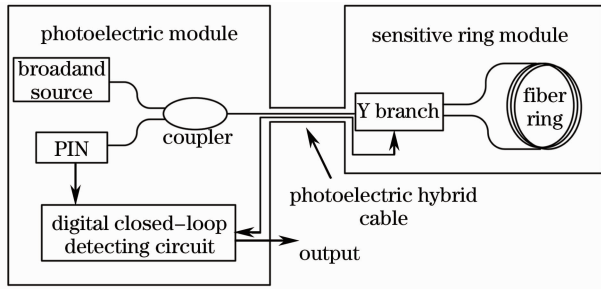


图4 光电分离式高精度光纤陀螺实验系统原理图

Fig. 4 Schematic diagram of photoelectric detachment high precision fiber optic gyroscope system

为了测试4种光源RIN对光纤陀螺RWC的影响,搭建了光电分离式高精度光纤陀螺实验系统,如图4所示。实验系统分为敏感环路组件和光电组件,这两部分通过光电混合缆连接;其中敏感环路组件包括光纤环和Y波导调制器,光纤环直径为12 cm,光纤环长度为1 km;光电组件包括宽谱光源、探测器(PIN)、耦合器和全数字闭环检测电路,探测器响应度为0.92 A/W,跨阻为200 kΩ。实验系统所用光源为4种宽谱光源,光纤传感环路光反馈不会对光源输出特性造成影响;实验中,设定偏置相位 $\phi_0 = \pi/2$,4种光源分别以光纤熔接的方式接入陀螺光路,通过控制熔接损耗,调节到达探测器光功率 I_0 约为 $50 \mu\text{W}$ 。测试采样间隔1 s,待陀螺稳定后记录零偏数据,有效测试时间2 h,采用Allan方差分析方法计算了光纤陀螺的随机游走,RWC测试值和基于(8)式的估算值如表3所示。

表3 RWC的测试值和模型估算值

Table 3 Measured and calculated RWC values

Sample number	Source type	Measured RWC / $[^\circ)/\text{h}^{1/2}]$	Calculated RWC / $[^\circ)/\text{h}^{1/2}]$
(a)	SFS	9.5×10^{-4}	9.0×10^{-4}
(b)	SFS	14.5×10^{-4}	13.1×10^{-4}
(c)	SFS	18.6×10^{-4}	17.0×10^{-4}
(d)	SLD	9.6×10^{-4}	9.3×10^{-4}

由表3可以看出陀螺RWC的估算值与实验值吻合较好,修正模型能比较准确地估算光纤陀螺的随机游走。

5 结 论

通过实验和模型计算研究了光纤陀螺用宽谱光源的RIN及其对光纤陀螺随机游走的影响,获得了宽谱光源RIN的通用计算模型,并对光纤陀螺RWC的评估模型进行了修正。确定了宽谱光源加权平均谱宽及光源偏振度与其RIN的定量关系,为光纤陀螺中RWC的估算提供了可信的数学模型。研究作为高精度光纤陀螺光源的选取和系统设计提供了重要的理论和实践依据。

参 考 文 献

- 1 P R Morkel, R I Laming, D N Payne. Noise characteristics of high-power Er doped-fiber superluminescent sources[J]. Electron Lett, 1990, 26(2): 96-98.
- 2 A Yurek, H Taylor, L Goldberg, *et al.*. Quantum noise in superluminescent diodes[J]. J Quantum Electron, 1986, 22(4): 522-527.
- 3 M Tur, E Shafir, K Blotekjaer. Source-induced noise in optical systems driven by low-coherence sources [J]. J Lightwave Technol, 1990, 8(2): 183-189.
- 4 W K Burns, R P Moeller, A Dandridge. Excess noise in fiber gyroscope sources[J]. IEEE Photon Technol Lett, 1990, 2(8): 606-608.
- 5 Haipeng Yu, Wenyuan Xu, Chunxi Zhang. Relative intensity noise reduction in superfluorescent fiber source based on semiphysical simulation[C]. ICEOE, 2011. 399-402.
- 6 Jian Mi, Chunxi Zhang, Zheng Li, *et al.*. Bias phase and light power dependence of the random walk coefficient of fiber optic gyroscope[J]. Chin Opt Lett, 2006, 4(7): 379-381.
- 7 R C Rabelo, R T de Carvalho, J Blake. SNR enhancement of intensity noise-limited FOGs[J]. J Lightwave Technol, 2000, 18(12): 2146-2150.
- 8 Herve Lefevre. The Fiber-Optic Gyroscope [M]. Boston London: Artech House, 1993. 21-23.
- 9 Zhang Guicai. The Principles and Technologies of Fiber-Optic Gyroscope[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007. 179-208.
- 张桂才. 光纤陀螺原理与技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007. 179-208.
- 10 Yonggang Zhang, Honggang Chen, Tao Li, *et al.*. Pre-estimate relative intensity noise subtraction performance of FOG by using signal cross correlation [C]. International Conference on Information and Automation, 2011. 768-771.
- 11 R P Moeller, W K Burns, N J Frigo. Open-loop output and scale factor stability in a fiber-optic gyroscope [J]. J Lightwave

- Technol, 1989, 7(2): 262-269.
- 12 Xiyi Huang, Naveen Sarma, Kevin Mark Killian, *et al.*. Optical Signal Noise Reduction for Fiber Optical Gyroscopes[P]. U S Patent: 5898496, 1999.
- 13 Sunghwan Shin, Utkarsh Sharma, Haohua Tu, *et al.*. Characterization and analysis of relative intensity noise in broadband optical sources for optical coherence tomography[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2010, 22(14): 1057-1059.
- 14 Sunghwan Shin. Characterization and Comparison of Optical Source Relative Intensity Noise and Effects in Optical Coherence Tomography[D]. Illinois: College of the University of Illinois, 2010. 21-26.
- 15 D Baney, W Sorin. Broadband frequency characterization of optical receivers using intensity noise[J]. Hewlett-Packard J, 1995, 46(1): 6-12.
- 16 AQ6370 Optical Spectrum Analyzer User's Manual[S]. Japan: Yokogawa Electric Corporation, 2006. App-7.
- 17 Shen Tong. Research on Key Technology of Superflourent Fiber Source for Engineering Application [D]. Beijing: Beihang University, 2008. 10-12.
申彤. 工程型掺铒光纤光源关键技术研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2008. 10-12.
- 18 Wang Wei. The Technologies of Interferential Fiber-Optic Gyroscope[M]. Beijing: China Aerospace Press, 2010. 62-63.
王巍. 干涉型光纤陀螺仪技术[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2010. 62-63.

栏目编辑: 王晓琰