

## 高精度光纤旋转地震仪研究及应用

李帅, 杨远洪\*, 李良祯, 王孺沫

北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100191

**摘要** 基于光纤陀螺(FOG)的光纤旋转地震仪(FORS)对平动不敏感,兼具低噪声、高灵敏度和便携等优点,特别适用于行星地震学中三维旋转分量的观测。基于偏光干涉理论建立了消偏 FOG 中 Sagnac 干涉仪环路(SIA)的输出光谱模型,揭示了消偏 FOG 的误差机理,提出并验证了在 SIA 中增加高频相位调制的噪声抑制技术。设计了基于差分消偏光纤陀螺的高精度 FORS,研制出 BHFORS-3C 型三轴高精度旋转地震仪,三轴自噪声均小于  $4.5 \text{ nrad}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Hz}^{-\frac{1}{2}}$ 。通过长期现场观测,获得了大量地震三维旋转观测数据,并进行了模型分析和研究。研制的旋转地震仪已具备现场应用条件,为行星地震学六分量观测和地震活动的精准分析提供了重要支撑。

**关键词** 测量; 光纤陀螺; 旋转地震仪; 行星地震学; 自噪声

**中图分类号** V241.5

**文献标志码** A

**DOI:** 10.3788/CJL202249.1904004

## 1 引言

行星地震学是通过监测行星地质运动,反演其内部结构、揭示其运动规律以及确定其是否宜居的新兴学科<sup>[1]</sup>。传统的地震仪仅能观测地质运动的三个平动分量,不能获得行星内部结构的完整信息,因此还需要测量地质运动的三个旋转分量,实现六个基本分量的完整观测。对地震旋转运动的系统性研究始于 20 世纪 70 年代<sup>[2-3]</sup>,早期一般通过在不同位置设置多个平动地震仪,根据平动观测量推算旋转分量<sup>[4-6]</sup>,现在大都用陀螺仪实现旋转分量的直接测量。为了实现高精度的地理旋转量测量,大型激光陀螺(RLG)被提出。已有的大型 RLG 系统<sup>[7-16]</sup>包括 G0<sup>[8]</sup>、G-ring<sup>[9]</sup>、GINGERINO<sup>[12]</sup>和 UG-2<sup>[14]</sup>等,其中 UG-2 大型 RLG 系统的谐振腔周长为 121.4 m,自噪声为  $7.8 \times 10^{-12} \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Hz}^{-\frac{1}{2}}$ <sup>[17]</sup>,达到了地理环境噪声极限。大型 RLG 系统只能在固定站点进行测量,主要用于科学实验研究。

基于光纤陀螺(FOG)<sup>[18-19]</sup>的光纤旋转地震仪(FORS)对平动不敏感,兼具低噪声、高灵敏度和便携等优点,特别适用于行星地震学中三维旋转分量的观测,是光纤陀螺的重要应用方向。波兰研究者研发了适用于地震观测的 FORS 完备系统<sup>[20-22]</sup>,并进行了许多观测验证实验<sup>[23-26]</sup>。2016 年,研究者研制出最新型的 FOSREM 系列 FORS<sup>[27-29]</sup>,自噪声为  $20 \text{ nrad}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Hz}^{-\frac{1}{2}}$ 。法国研究者于 2016 年公开了其

超低噪声 FORS 研发计划<sup>[30]</sup>;同年发布了首款商用三轴 FORS 产品 BlueSeis-3A<sup>[31-32]</sup>,其已被用于实际的地震观测<sup>[33]</sup>;在 2019 年又发布了商用单轴 FORS 产品 BlueSeis-1C<sup>[34]</sup>,其自噪声优于  $5 \text{ nrad}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Hz}^{-\frac{1}{2}}$ 。国内多家单位近年来也开展了 FORS 研究:研究者针对远震源和近震源观测需求,分别研制出大型单轴高精度 FORS<sup>[35]</sup>和便携式三轴 FORS<sup>[36]</sup>,其中高精度 FORS 的自噪声达到  $5.2 \text{ nrad}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Hz}^{-\frac{1}{2}}$ ;研究者于 2021 年报道了一款应用于世界时测量的单轴大型高精度 FOG<sup>[37]</sup>,自噪声达到  $1.52 \text{ nrad}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Hz}^{-\frac{1}{2}}$ 。目前,FORS 被认为是地理三维旋转分量观测的理想仪器,其对精度、自噪声等参数提出了近极限的要求。但 FORS 也是一种民用的系统,对成本也有明确的要求。同时满足低成本和高性能是实用高精度 FORS 研发的最大挑战。

本文基于偏光干涉理论建立了消偏 FOG 中 Sagnac 干涉仪环路(SIA)的输出光谱模型,从新的角度揭示了消偏陀螺的误差和噪声机理,提出并验证了在 SIA 中增加高频相位调制的噪声抑制技术。结合前期研究成果,设计了基于差分消偏光纤陀螺的高精度 FORS,研制出 BHFORS-3C 型三轴高精度 FORS,三轴自噪声均小于  $4.5 \text{ nrad}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Hz}^{-\frac{1}{2}}$ 。通过多地长期的现场地震观测,获得了大量三维地震旋转数据,并对其特性进行了初步分析,为行星地震学六分量

收稿日期: 2022-05-19; 修回日期: 2022-06-13; 录用日期: 2022-06-22

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC1503703)、国家自然科学基金(61227902, U1637106)、创新团队发展计划(IRT1203)

通信作者: \*yhyang@buaa.edu.cn

观测和地震活动的精准分析提供了重要的支撑。研究和实地观测结果表明,研制的 BHFORS-3C 型三轴高精度 FORS 在成本、精度、自噪声、可靠性和环境适应性等方面都具有明显的优势,已具备现场应用条件。

## 2 消偏光纤陀螺误差机理和噪声抑制技术

典型的消偏 SIA 如图 1(a)所示,其中 MIOC 为多功能集成光学电路。该系统由两个消偏器和单模光纤环组成,其中消偏器 1 由长度为  $L_1$  和  $L_2$  的保偏光纤以偏振夹角  $\theta_{12}$  ( $\approx 45^\circ$ ) 熔接构成,消偏器 2 由长度为

$L_3$  和  $L_4$  的保偏光纤以偏振夹角  $\theta_{34}$  ( $\approx 45^\circ$ ) 熔接构成,保偏光纤的双折射率为  $\Delta n$ 。将单模光纤环等效为单个低双折射率单元,设消偏器 1 与单模光纤环的偏振夹角为  $\theta_{1s}$ ,消偏器 2 与单模光纤环的偏振夹角为  $\theta_{2s}$ ,单模光纤环长度为  $L_s$ ,等效双折射率为  $\Delta n_s$ 。对于消偏 SIA,传统的分析方法通过推导光纤环传递函数的方法获得其输出模型,得到光谱调制谱形,并认为只要消偏器有足够的长度,就可消除调制、得到好的性能<sup>[38]</sup>。实际上,由多段保偏光纤和单模光纤组成的光纤环路形成了典型的 Sagnac 偏光干涉仪<sup>[39]</sup>,其输出谱的调制是这个偏振干涉仪的输出干涉信号,其顺/逆时针光<sup>[40]</sup>可表示为

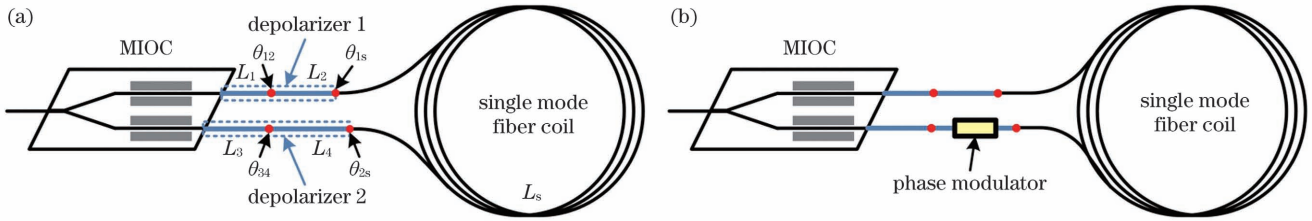


图 1 消偏 SIA 示意图。(a)插入相位调制器前;(b)插入相位调制器后

Fig. 1 Schematics of depolarized SIA. (a) Before inserting phase modulator; (b) after inserting phase modulator

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_{\text{cw}} = & \mathbf{P} \cdot \mathbf{D}(L_3, \Delta n) \cdot \mathbf{R}(\theta_{34}) \cdot \mathbf{D}(L_4, \Delta n) \cdot \mathbf{R}(\theta_{2s}) \cdot \mathbf{D}_s(L_s, \Delta n_s) \cdot \mathbf{R}(\theta_{1s}) \cdot \\ & \mathbf{D}(L_2, \Delta n) \cdot \mathbf{R}(\theta_{12}) \cdot \mathbf{D}(L_1, \Delta n) \cdot \mathbf{P} \cdot \mathbf{E}_{\text{in}}/2 \cdot \exp(j\varphi/2), \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_{\text{ccw}} = & \mathbf{P} \cdot \mathbf{D}(L_1, \Delta n) \cdot \mathbf{R}(\theta_{12}) \cdot \mathbf{D}(L_2, \Delta n) \cdot \mathbf{R}(\theta_{1s}) \cdot \mathbf{D}_s(L_s, \Delta n_s) \cdot \mathbf{R}(\theta_{2s}) \cdot \\ & \mathbf{D}(L_4, \Delta n) \cdot \mathbf{R}(\theta_{34}) \cdot \mathbf{D}(L_3, \Delta n) \cdot \mathbf{P} \cdot \mathbf{E}_{\text{in}}/2 \cdot \exp(-j\varphi/2), \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{E}_{\text{in}}$ 表示入射线偏振光; $\mathbf{R}(\theta_{34})$ 、 $\mathbf{R}(\theta_{2s})$ 、 $\mathbf{R}(\theta_{1s})$ 、 $\mathbf{R}(\theta_{12})$ 分别表示偏振夹角为 $\theta_{34}$ 、 $\theta_{2s}$ 、 $\theta_{1s}$ 、 $\theta_{12}$ 的旋转矩阵; $\mathbf{P}$ 表示理想的起偏器矩阵; $\mathbf{D}(L_i, \Delta n)$ 表示长度和双折射率分别为 $L_i$ 和 $\Delta n$ 的保偏光纤矩阵, $i=1, 2, 3, 4$ ; $\mathbf{D}_s(L_s, \Delta n_s)$ 表示长度和双折射率分别为 $L_s$ 和 $\Delta n_s$ 的单模光纤环矩阵; $\varphi$ 为旋转引起的 Sagnac 相移。消偏 SIA 输出的光强为

$$I_{\text{out}}(\lambda) = (\mathbf{E}_{\text{cw}} + \mathbf{E}_{\text{ccw}})^* \cdot (\mathbf{E}_{\text{cw}} + \mathbf{E}_{\text{ccw}}), \quad (3)$$

式中: $*$ 表示共轭; $\lambda$ 表示光波长。为简化分析,设

$\theta_{12} = \theta_{34} = 45^\circ$ ,消偏 SIA 输出干涉信号可表示为

$$I_{\text{out}}(\lambda) = \frac{1}{2} I_{\text{in}}(\lambda) (1 + \cos \varphi) \times M(\lambda), \quad (4)$$

式中: $I_{\text{in}}(\lambda)$ 为输入到消偏 SIA 的光源光谱; $M(\lambda)$ 是与光波长 $\lambda$ 相关的偏光干涉调制因子。设 $\varphi = 0$ ,则式(4)变为

$$I_{\text{out}}(\lambda) = I_{\text{in}}(\lambda) \times M(\lambda), \quad (5)$$

其中:

$$\begin{aligned} M(\lambda) = & \frac{1}{2} + \frac{1}{4} \sin(2\theta_{1s}) \sin(2\theta_{2s}) \cos [2\pi(\Delta n L_2 + \Delta n L_4) / \lambda] + \\ & \frac{1}{4} \sin(2\theta_{1s}) \sin(2\theta_{2s}) \cos [2\pi(\Delta n L_2 - \Delta n L_4) / \lambda] - \\ & \frac{1}{2} \cos^2 \theta_{1s} \cos^2 \theta_{2s} \cos [2\pi(\Delta n L_2 + \Delta n L_4 + \Delta n_s L_s) / \lambda] - \\ & \frac{1}{2} \sin^2 \theta_{1s} \sin^2 \theta_{2s} \cos [2\pi(\Delta n L_2 + \Delta n L_4 - \Delta n_s L_s) / \lambda] + \\ & \frac{1}{2} \cos^2 \theta_{1s} \sin^2 \theta_{2s} \cos [2\pi(\Delta n L_2 - \Delta n L_4 + \Delta n_s L_s) / \lambda] + \\ & \frac{1}{2} \sin^2 \theta_{1s} \cos^2 \theta_{2s} \cos [2\pi(\Delta n L_2 - \Delta n L_4 - \Delta n_s L_s) / \lambda]. \end{aligned} \quad (6)$$

可以看出,消偏 SIA 的输出光谱  $I_{out}(\lambda)$  是  $I_{in}(\lambda)$  被  $M(\lambda)$  调制过的谱形,是多个调制周期的叠加,且调制周期随消偏器中多段保偏光纤和单模光纤环的长度、双折射率的变化而变化。为展示式(5)描述的光谱特征,进行了初步仿真,主要仿真参数如表 1 所示,仿真

结果如图 2 所示,仿真输入光谱是中心波长为 1560 nm、谱宽为 64 nm 的高斯光谱,输出光谱在高斯光谱的包络下呈现明显的调制特性,体现出多周期调制信号叠加的拍频特征。

表 1 主要的仿真参数

Table 1 Main simulation parameters

Parameter	Fiber length / m					Birefringence		Splice angle / (°)			
	$L_1$	$L_2$	$L_3$	$L_4$	$L_s$	$\Delta n$	$\Delta n_s$	$\theta_{12}$	$\theta_{34}$	$\theta_{1s}$	$\theta_{2s}$
Value	2.3	9.2	4.6	18.4	3000.0	$5 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-6}$	45	45	40	50

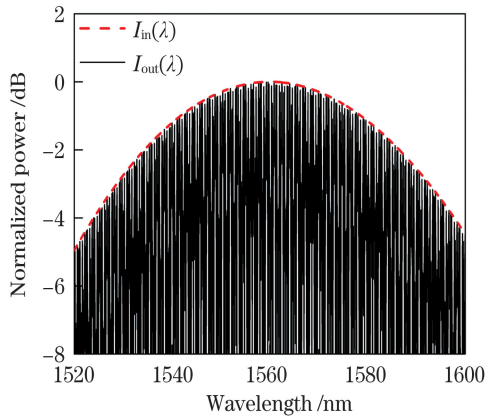


图 2 仿真得到的消偏 SIA 的输出光谱

Fig. 2 Output spectrum of depolarized SIA obtained by simulation

从式(5)可以看出,这种由偏振模式干涉引起的光谱调制信号是很不稳定的,是消偏光纤陀螺噪声大的主要原因。另外,调制光谱的波动也会带来明显零漂和标度误差。为了抑制消偏陀螺的噪声和漂移,本文提出了一种基于高频相位调制的光谱调制消除技术。如图 1(b)所示,在消偏 SIA 中消偏器的一段保偏光纤中插入相位调制器并施加高频调制信号,实现式(5)中各调制项相位的快速变化,以减小光谱调制度,抑制光谱调制引起的噪声和误差。当额外施加的调制信号频率为本征频率偶数倍时,光纤环延迟产生的顺/逆时针调制信号之差为零,不会引入非互易相移。实际工作时,附加的调制信号频率取远大于本征频率的偶数倍频,可以进一步消除额外相位调制的影响。在施加偶数倍本征频率正弦波调制并消去高频项后,式(6)可改为

$$\begin{aligned}
 M(\lambda) = & \frac{1}{2} + \frac{1}{4} \sin(2\theta_{1s}) \sin(2\theta_{2s}) J_0(C) \cos [2\pi(\Delta n L_2 + \Delta n L_4) / \lambda] + \\
 & \frac{1}{4} \sin(2\theta_{1s}) \sin(2\theta_{2s}) J_0(C) \cos [2\pi(\Delta n L_2 - \Delta n L_4) / \lambda] - \\
 & \frac{1}{2} \cos^2 \theta_{1s} \cos^2 \theta_{2s} J_0(C) \cos [2\pi(\Delta n L_2 + \Delta n L_4 + \Delta n_s L_s) / \lambda] - \\
 & \frac{1}{2} \sin^2 \theta_{1s} \sin^2 \theta_{2s} J_0(C) \cos [2\pi(\Delta n L_2 + \Delta n L_4 - \Delta n_s L_s) / \lambda] + \\
 & \frac{1}{2} \cos^2 \theta_{1s} \sin^2 \theta_{2s} J_0(C) \cos [2\pi(\Delta n L_2 - \Delta n L_4 + \Delta n_s L_s) / \lambda] + \\
 & \frac{1}{2} \sin^2 \theta_{1s} \cos^2 \theta_{2s} J_0(C) \cos [2\pi(\Delta n L_2 - \Delta n L_4 - \Delta n_s L_s) / \lambda], \quad (7)
 \end{aligned}$$

式中:  $J_0(C)$  为第一类 0 阶 Bessel 函数;  $C$  为相位调制深度。  $J_0(C)$  的第一个零点为 2.405, 即当  $C = 2.405$  时,理论上可完全消除光谱调制。

为验证上述技术,采用 3000 m 长的单模光纤环搭建了消偏 SIA 实验系统,用光谱分析仪记录了施加高频相位调制前后消偏 SIA 的输出光谱,归一化处理后的结果如图 3 所示,中心波长处的调制度从调制前的 7.31 dB 减小至调制后的 0.19 dB。采

用带额外相位调制器的消偏 SIA 搭建了完整光纤陀螺实验装置并进行了测试,施加调制前后的 Allan 方差曲线如图 4 所示,角度随机游走由调制前的  $1.7 \times 10^{-7} \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-\frac{1}{2}}$  减小至调制后的  $6.1 \times 10^{-8} \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-\frac{1}{2}}$ , 零偏不稳定性由调制前的  $5.3 \times 10^{-9} \text{ rad/s}$  减小到调制后的  $2.1 \times 10^{-9} \text{ rad/s}$ , 由光谱调制导致的噪声和零漂得到了有效抑制。

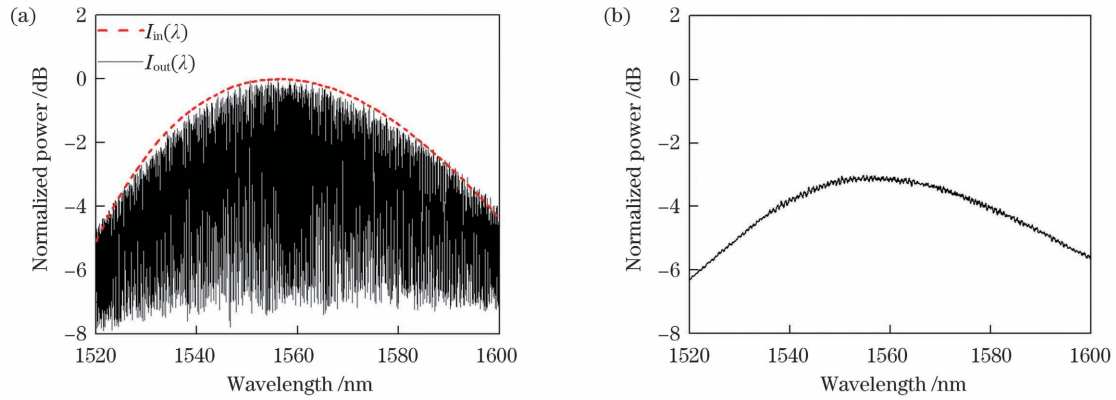


图 3 实测的消偏 SIA 输出光谱。(a)施加调制前;(b)施加调制后

Fig. 3 Measured output spectra of depolarized SIA. (a) Before modulation; (b) after modulation

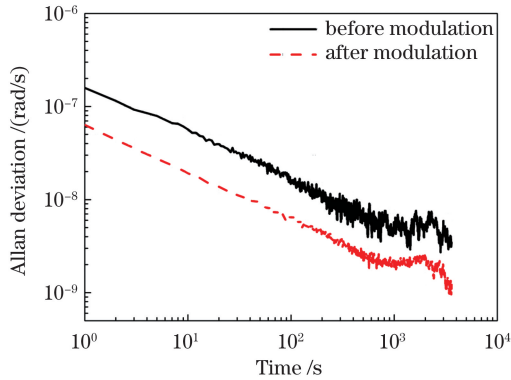


图 4 施加调制前后的 Allan 方差曲线

Fig. 4 Allan deviation curves before and after modulation

### 3 差分消偏高精度光纤旋转地震仪的研制

高精度地震旋转量测量的基本要求是最小可测旋转速率至少为  $10^{-7}$  rad/s<sup>[41]</sup>。为达到高精度和低噪声,在 FORS 中一般采用长光纤和大环,外加噪声抑制措施。如果采用保偏光纤,光纤及绕环费用将非常高,导致光纤旋转地震仪的价格昂贵。另外,如果增加 SIA 光纤长度和直径,由环境因素引起的误差也会增加。尽管用于高精度地震测量的台站环境稳定,但由 Shupe 效应引起的温度漂移误差<sup>[42-43]</sup>和由 Faraday 效

应引起的磁场敏感性误差<sup>[44]</sup>仍是主要的误差和噪声源。本课题组前期对 Y 波导的色散特性进行了研究,发现 Y 波导可在很宽的波长范围内正常工作<sup>[45]</sup>,其半波电压( $V_{\pi}$ )与波长的关系如图 5 所示。在此基础上,本课题组提出了双光源差分光纤陀螺(DFOG)<sup>[46-48]</sup>,在同一个 SIA 中设计了两个独立工作的等效光纤陀螺(FOG1 和 FOG2),检测信号的差分作为输出。由于共用同一个 SIA,由温度和磁场引起的共模误差在差分运算后能被有效抑制<sup>[47-48]</sup>,测试的典型 DFOG 轴向和径向的磁场灵敏度如图 6 所示。

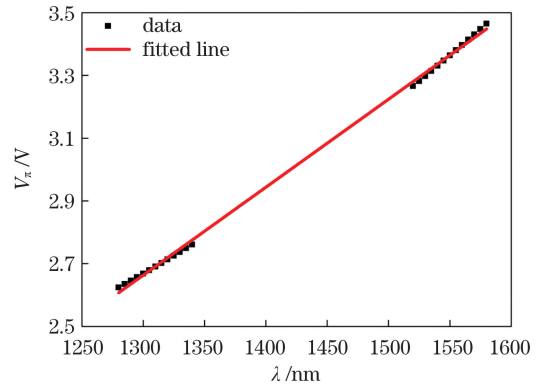


图 5 Y 波导  $V_{\pi}$  与波长  $\lambda$  的关系曲线

Fig. 5  $V_{\pi}$  versus  $\lambda$  of Y-type waveguide

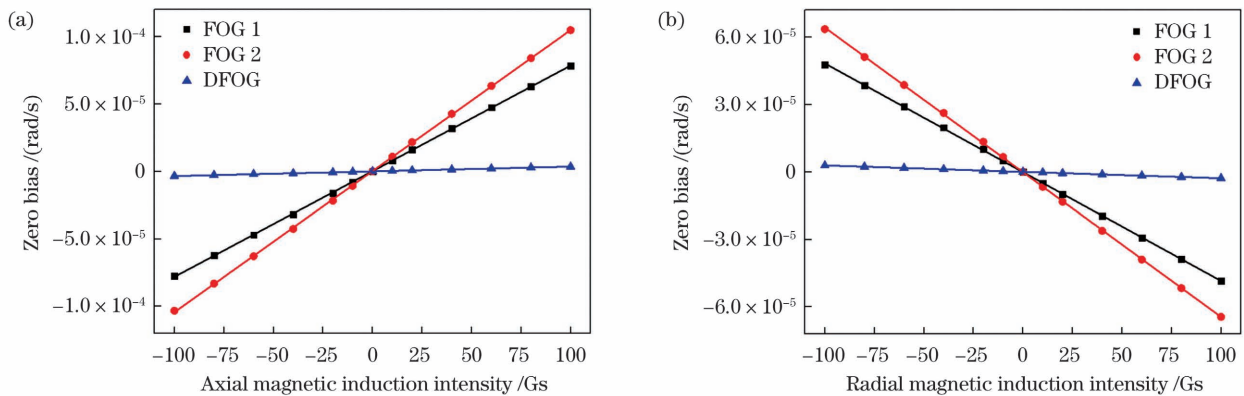


图 6 差分光纤陀螺的磁场灵敏度测试结果。(a)轴向磁场;(b)径向磁场

Fig. 6 Magnetic sensitivity test results of DFOG. (a) Axial magnetic field; (b) radial magnetic field

基于上述研究成果,本文提出了一种差分消偏光纤旋转地震仪(DD-FORS)方案,如图 7 所示,DD-FORS 由光电组件(OEA)模块和消偏 SIA 模块组成。OEA 模块包含双光源驱动模块、两个宽谱光源(BS1 和 BS2)、两个探测器(PD1 和 PD2)和信号处理模块,其中双光源驱动模块采用与文献[47]中仪器相同的结构,光源管芯采用串联驱动方式,较好保证了两只光源的一致性;消偏 SIA 由两个波分复用器(WDM1 和 WDM2)、双窗口耦合器(DWC)、Y 波导、两个消偏器、额外的相位调制器和单模光纤环组成,整个模块不含源器件,以保证自身温度均匀和稳定。由于采用普通单模光纤且绕环费用低,消偏光纤环成本可以控制到同等精度保偏光纤环的 1/3~1/2。DD-FORS 中的

差分光纤陀螺结构可以很好地抑制环境因素引起的共模误差。同时,在消偏 SIA 中引入额外高频相位调制后,由光谱调制造成的噪声和误差也能被有效抑制。所提方案在成本、精度和环境适应性等方面都具有明显的优势。单轴高精度 DD-FORS 的主要参数如表 2 所列,理论估计<sup>[49]</sup>其自噪声(或角度随机游走)约为  $2.2 \text{ nrad}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Hz}^{-\frac{1}{2}}$ 。研制的实际样机如图 8 所示,其中图 8(a)为 DD-FORS 照片,图 8(b)为包装箱。OEA 模块与 SIA 模块被空间分离,SIA 模块被封装于隔热隔振结构中,有效隔离了环境温度波动对 SIA 中光纤环和光路的影响。在此基础上,研制出三轴 DD-FORS,型号为 BHFORS-3C,如图 8(c)所示。

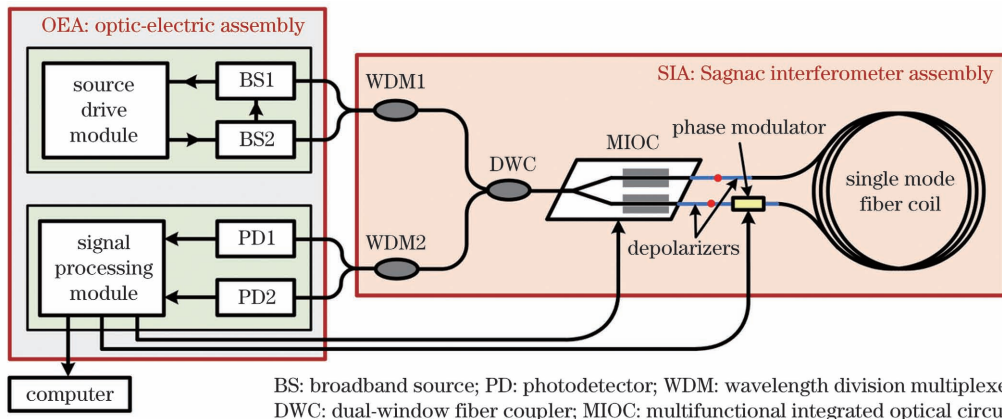


图 7 差分消偏光纤旋转地震仪的原理图

Fig. 7 Schematic of DD-FORS

表 2 单轴差分消偏光纤旋转地震仪的主要参数

Table 2 Main parameters of single axis DD-FORS

Component	Main parameter
BS1	Central wavelength of 1314.1 nm and bandwidth of 30.3 nm
BS2	Central wavelength of 1542.3 nm and bandwidth of 30.7 nm
PD1 and PD2	InGaAs detector, wavelength range of 1100–1650 nm, resistance of 40 kΩ, and efficiency ratio of 0.9 A/W
Fiber coil	Single mode fiber coil, length of 21 km, and diameter of ~0.4 m



图 8 研制的样机。(a)DD-FORS 样机;(b)包装箱;(c)BHFORS-3C

Fig. 8 Developed prototypes. (a) DD-FORS prototype; (b) packaging boxes; (c) BHFORS-3C

2021 年 4 月至今分别在安徽省淮南市潘一东矿区、云南省丽江地震台和北京市国家地球观测台进行了观测实验,实验现场分别如图 9(a)~(c)所示。研

制的 BHFORS-3C 重量轻,仪器三个轴向可分别拆卸搬运,具备流动布设与组合观测能力。单轴 DD-FORS 或三轴 DD-FORS 测试时被固定安装于底板

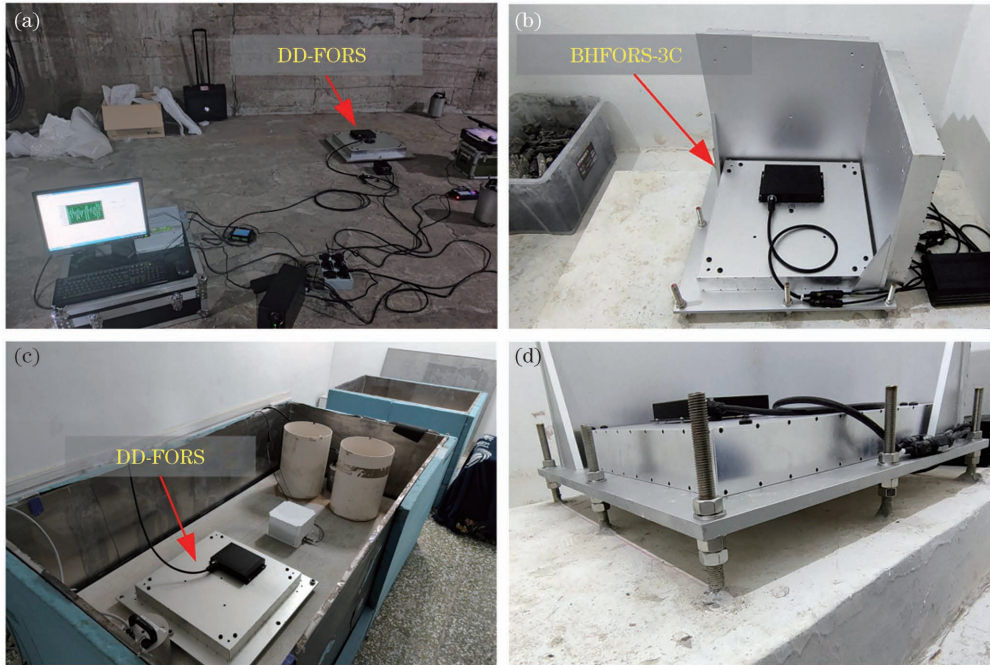


图 9 现场照片。(a)淮南测试现场;(b)丽江测试现场;(c)北京测试现场;(d)BHFORS-3C 与基墩的耦合  
Fig. 9 Scene photographs. (a) Test site in Huainan; (b) test site in Lijiang; (c) test site in Beijing; (d) coupling of BHFORS-3C and foundation pier

上,通过在底板上安装固定装置实现水平调整和稳固安装。数据采集系统通过专用电缆与 DD-FORS 连接,遥测距离大于 100 m。BHFORS-3C 光纤旋转地震仪经过多次长途物流运输和长期观测,未出现故障。研制的 FORS 可靠性高、便携性好。

从 2021 年 6 月开始,研制的 BHFORS-3C 光纤旋转地震仪一直在云南省丽江地震台进行现场测试,仪器被放置于观测山洞进深约为 75 m 的洞室内,采集电脑被放置于洞外的机房。BHFORS-3C 与基墩通过螺杆与基岩连接,利用寻北仪和水平仪确定好仪器位置后,通过水泥浇注固定螺杆,如图 9(d)所示。观测洞室条件稳定,日温度波动约为 0.15 °C,在这种条件下进行了正式性能测试,BHFORS-3C 三个轴向上的典型 Allan 方差曲线如图 10 所示,东西向(EW)的仪器自噪声为  $4.39 \text{ nrad} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-\frac{1}{2}}$ ,零偏不稳定性为  $1.18 \times 10^{-10} \text{ rad/s}$ ;北南向(NS)的仪器自噪声为  $4.07 \text{ nrad} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-\frac{1}{2}}$ ,零偏不稳定性为  $1.21 \times 10^{-10} \text{ rad/s}$ ,垂直向(UD)的仪器自噪声为  $4.46 \text{ nrad} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-\frac{1}{2}}$ ,零偏不稳定性为  $1.20 \times 10^{-10} \text{ rad/s}$ 。可能是因为样机参数未能调到最优匹配状态,实际测试的自噪声值高于理论估计值。图 11 为 2019 年法国 iXblue 公司绘制的 FORS 路线图<sup>[1]</sup>,研制的 BHFORS-3C 位置如图 11 五角星所示,三个轴的自噪声均小于  $4.5 \text{ nrad} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-\frac{1}{2}}$ 。图 11 中密虚线方块图表示该公司已完成的研究目标,疏虚线圆点图表示该公司的计划目标。我们研制的 BHFORS-3C 的自噪声已经达到

$4.07 \text{ nrad} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-\frac{1}{2}}$ ,已接近 iXblue 公司计划中的第 5 代样机水平(自噪声约为  $2.35 \text{ nrad} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-\frac{1}{2}}$ )。

BHFORS-3C 已经进行了近一年的现场测试,观测到大量的地震事件,其中比较典型的事件如表 3 所示,其中时间是北京时间。观测最远距离为 4064.00 km,观测到的地震事件是在日本本州东岸近海发生的 7.4 级地震(事件 11);最小的地震震级为 3 级,观测到的地震事件是在距观测站 19.49 km 的云南省丽江市玉龙县发生的地震(事件 9)。图 12 所示为青海省海北藏族自治州门源县发生的 6.9 级地震(事件 8)的实测曲线和时频分析结果,记录的地震波完整清晰,EW 分量和 UD 分量的波形峰值明显大于 NS 分量,三个地震旋转分量的中心频率分布不同,EW、NS 和 UD 旋转分量的中心频率分别为 0.17、0.15、0.13 Hz。实际

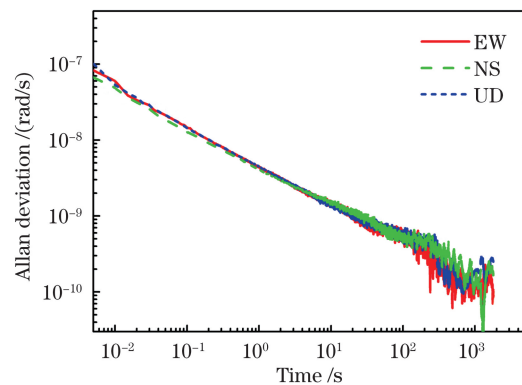


图 10 BHFORS-3C 三个轴向上的 Allan 方差曲线  
Fig. 10 Allan deviation curves along three axial directions for BHFORS-3C

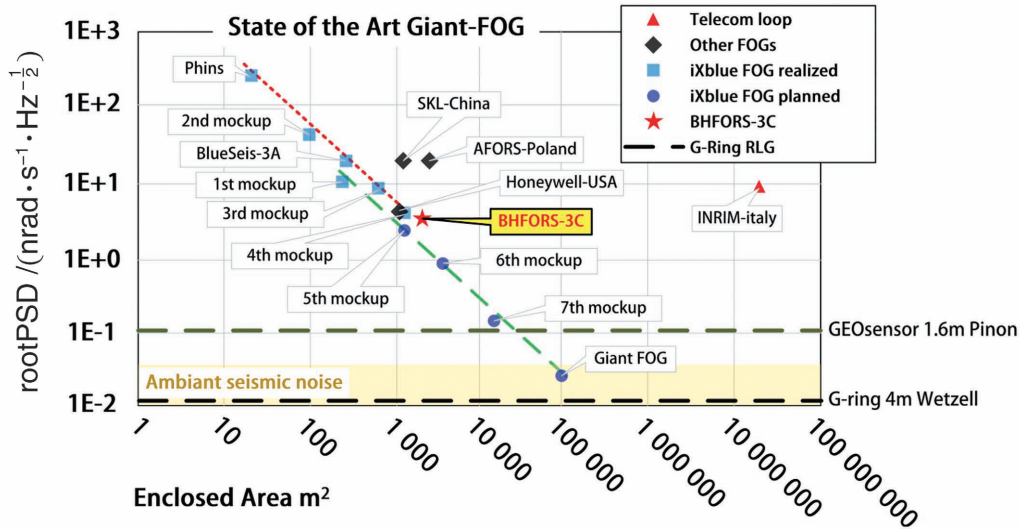


图 11 基于大型光纤陀螺的光纤旋转地震仪发展路线图<sup>[1]</sup>

Fig. 11 Road-map of fiber optic rotational seismometer development based on giant-FOG<sup>[1]</sup>

表 3 已观测到的部分地震事件列表

Table 3 List of partial observed seismic events

No.	Time	Earthquake magnitude	Latitude / (°)	Longitude / (°)	Distance/km	Region
1	2021-06-10T19:46:07	5.1	24.34	101.91	329.85	China
2	2021-06-12T18:00:46	5	24.96	97.89	317.89	China
3	2021-07-29T16:39:27	5.7	22.7	96.04	629.54	Burma
4	2021-09-16T04:33:31	6	29.2	105.34	563.02	China
5	2021-11-26T07:45:42	6.1	22.7	93.4	832.27	Burma
6	2021-12-20T05:06:14	6	19.6	101.4	819.58	Laos
7	2021-12-24T21:43:21	6	22.33	101.69	528.24	Laos
8	2022-01-08T01:45:27	6.9	37.77	101.26	1213.47	China
9	2022-01-15T16:19:48	3	26.99	100.07	19.49	China
10	2022-02-10T15:36:38	4.1	25.56	100.04	149.37	China
11	2022-03-16T22:36:29	7.4	37.65	141.95	4064.00	Japan
12	2022-03-23T01:41:38	6.6	23.45	121.55	2176.51	China
13	2022-04-16T08:32:13	4.6	27.78	100.62	105.89	China

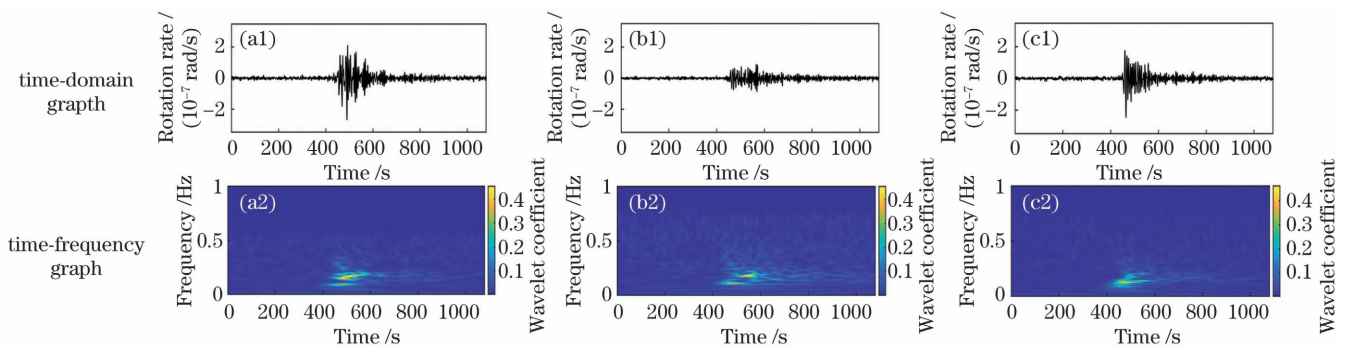


图 12 地震旋转分量的时频分析结果。(a1)(a2)东西向;(b1)(b2)北南向;(c1)(c2)垂直向

Fig. 12 Time frequency analysis results of seismic rotational components. (a1)(a2) EW; (b1)(b2) NS; (c1)(c2) UD

观测结果表明, BHFORS-3C 已经能实现远距离强震和近距离弱震的可靠观测。

地震的产生和传播机制复杂, 目前关于地震波平动分量的传播机理研究较为深入, 关于地震波旋转分

量传播方式和机理的研究还处于初级阶段,文献[50]参考平动分量传播模型,建立了地震垂直向旋转分量模型,得到了旋转量与传播速度、震中距和面波震级之间的近似关系,模型表达式为

$$\Omega_z = 2 \frac{\pi^2}{cT} \cdot 10^{M_s - 1.66 \times \lg D - 9.3}, \quad (8)$$

式中: $\Omega_z$  为垂直向旋转速率峰值; $c$  为 Love 波的相速度值; $T$  为窄带滤波的中心周期; $M_s$  为面波震级; $D$  为震中距。基于这个模型,对我们观测到的地震波垂直向旋转分量计算值和实测值进行了对比。其中 Love 波的相速度值利用青海省海北藏族自治州门源县地震的震中距以及发震时刻与波至时刻的时间差来估算<sup>[51]</sup>,约为 3.5 km/s,所有地震事件使用相同的窄带滤波器处理,中心周期  $T$  取为 2.5 s。计算得到的不同震级地震垂直向旋转分量与震中距的关系曲线如图 13 所示,表 3 列出的地震实测值用黑色球形标注在图上。可以看出,所用模型尽管是以地震波平动分量传播模型为基础的,但实测值与理论预测值还是吻合很好。

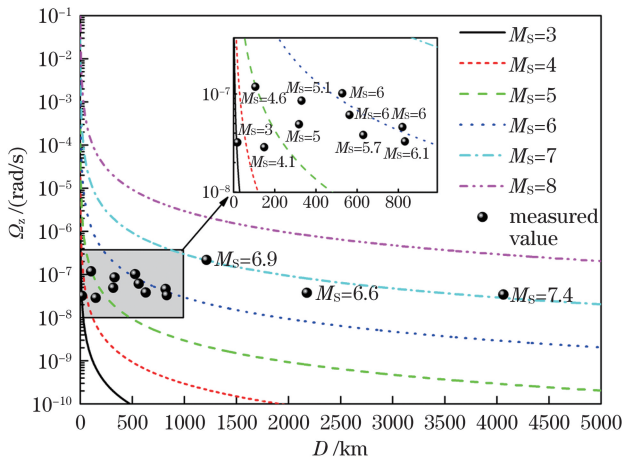


图 13 不同震级地震中  $\Omega_z$  与  $D$  的关系曲线

Fig. 13  $\Omega_z$  versus  $D$  in earthquakes with different magnitudes

## 4 结 论

基于高精度 FOG 的 FORS 对平动运动不敏感、灵敏度高、噪声低,而且结构简单、体积小、布设灵活,是一种适用于行星地震学中三维旋转分量观测的仪器。为了实现低成本高性能的 FORS,从偏光干涉角度建立了消偏陀螺中 SIA 的输出光谱模型,揭示了消偏光纤陀螺的噪声和误差机理;通过在消偏 SIA 中增加高频相位调制,降低了输出光谱调制度,有效抑制了由光谱调制引入的噪声和误差。提出了差分消偏高精度 FORS 方案,研制出 BHFORS-3C 型 FORS 样机,三轴自噪声均小于  $4.5 \text{ nrad} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-\frac{1}{2}}$ ,具有成本低、噪声低和环境适应性强的特点。在多地开展了长期现场地震观测实验,验证了 BHFORS-3C 的高可靠性及便携性,获得了大量天然地震三维旋转分量观测数据,并

初步进行了地震事件模型仿真和验证研究,为行星地震学研究提供了实用的高精度三维地震旋转观测仪器。

## 参 考 文 献

- [1] Guattari F, de Toldi E, Garcia R F, et al. Fiber optic gyroscope for 6-component planetary seismology[J]. Proceedings of SPIE, 2019, 11180: 1118080.
- [2] W. H. K. Lee, H. Igel, M. D. Trifunac, 等. 旋转地震学的近期进展[J]. 世界地震译丛, 2009, 40(6): 64-74. Lee W H K, Igel H, Trifunac M D, et al. Recent advances in rotational seismology[J]. Translated World Seismology, 2009, 40(6): 64-74.
- [3] 孙丽霞, 王赞, 杨军, 等. 旋转地震学的研究进展[J]. 地球科学, 2021, 46(4): 1518-1536. Sun L X, Wang Y, Yang J, et al. Progress in rotational seismology[J]. Earth Science, 2021, 46(4): 1518-1536.
- [4] Lee V W, Trifunac M D. Torsional accelerograms [J]. International Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1985, 4(3): 132-139.
- [5] Lee V W, Trifunac M D. Rocking strong earthquake accelerations [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1987, 6(2): 75-89.
- [6] Droste Z, Teisseyre R. Rotational and displacental components of ground motion as deduced from data of the azimuth system of seismograph [J]. Publications of the Institute of Geophysics, Polish Academy of Sciences, 1976, 97: 157-167.
- [7] McLeod D P, Webb T H, Schreiber U, et al. Comparison of standard and ring laser rotational seismograms [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1998, 88(6): 1495-1503.
- [8] Rowe C H, Schreiber U K, Cooper S J, et al. Design and operation of a very large ring laser gyroscope [J]. Applied Optics, 1999, 38(12): 2516-2523.
- [9] Schreiber K U, Klügel T, Velikoseltsev A, et al. The large ring laser G for continuous earth rotation monitoring [J]. Pure and Applied Geophysics, 2009, 166(8): 1485-1498.
- [10] Schreiber K U, Hautmann J N, Velikoseltsev A, et al. Ring laser measurements of ground rotations for seismology [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2009, 99(2B): 1190-1198.
- [11] Belfi J, Beverini N, Bosi F, et al. Performance of "G-Pisa" ring laser gyro at the Virgo site [J]. Journal of Seismology, 2012, 16(4): 757-766.
- [12] Belfi J, Beverini N, Carelli G, et al. Analysis of 90 day operation of the GINGERINO gyroscope [J]. Applied Optics, 2018, 57(20): 5844-5851.
- [13] Dunn R W, Shabalin D E, Thirkettle R J, et al. Design and initial operation of a 367-m<sup>2</sup> rectangular ring laser [J]. Applied Optics, 2002, 41(9): 1685-1688.
- [14] Hurst R B, Stedman G E, Schreiber K U, et al. Experiments with an 834 m<sup>2</sup> ring laser interferometer [J]. Journal of Applied Physics, 2009, 105(11): 113115.
- [15] Liu K, Zhang F L, Li Z Y, et al. Large-scale passive laser gyroscope for earth rotation sensing [J]. Optics Letters, 2019, 44(11): 2732-2735.
- [16] Gebauer A, Tercjak M, Schreiber K U, et al. Reconstruction of the instantaneous earth rotation vector with sub-arcsecond resolution using a large scale ring laser array [J]. Physical Review Letters, 2020, 125(3): 033605.
- [17] Schreiber K U, Wells J P R. Invited Review Article: large ring lasers for rotation sensing [J]. Review of Scientific Instruments, 2013, 84(4): 041101.
- [18] 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, 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.



- [19] 齐跃峰, 宫宸博, 丛碧彤, 等. 基于调制器中置结构的光纤陀螺设计与分析[J]. 光学学报, 2022, 42(2): 0206003.  
Qi Y F, Gong C B, Cong B T, et al. Design and analysis of fiber optic gyroscope based on modulator mid-mounted structure[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(2): 0206003.
- [20] Jaroszewicz L R, Krajewski Z, Solarz L. Fibre-optic Sagnac interferometer as a sensor of the seismic rotation waves [J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5855: 194-197.
- [21] Jaroszewicz L R, Krajewski Z, Solarz L, et al. Application of the fibre-optic Sagnac interferometer in the investigation of seismic rotational waves [J]. Measurement Science and Technology, 2006, 17(5): 1186-1193.
- [22] Jaroszewicz L R, Krajewski Z, Wiszniowski J. Fiber-optic Sagnac interferometer as seismograph for investigation rotation seismic events [C]//SENSORS, 2009 IEEE, October 25-28, 2009, Christchurch, New Zealand. New York: IEEE Press, 2009: 840-844.
- [23] Jaroszewicz L R, Krajewski Z, Kowalski H, et al. AFORS autonomous fibre-optic rotational seismograph: design and application[J]. Acta Geophysica, 2011, 59(3): 578-596.
- [24] Jaroszewicz L R, Krajewski Z, Teisseyre K P. Usefulness of AFORS: autonomous fibre-optic rotational seismograph for investigation of rotational phenomena [J]. Journal of Seismology, 2012, 16(4): 573-586.
- [25] Jaroszewicz L R, Krajewski Z, Kowalski J K, et al. AFORS-autonomous fiber optic rotational seismograph as a system for continuous monitoring the rotational seismic events [J]. Advanced Materials Research, 2014, 909: 444-449.
- [26] Kurzych A, Jaroszewicz L R, Krajewski Z, et al. Application of the fibre-optic interferometer as a rotational seismograph type AFORS[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9441: 944114.
- [27] Jaroszewicz L, Krajewski Z, Kurzych A, et al. FOSREM: fibre-optic system for rotational events & phenomena monitoring [EB/OL]. [2021-02-05]. <https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2016/EGU2016-6772.pdf>.
- [28] Jaroszewicz L R, Kurzych A, Krajewski Z, et al. FOSREM: fibre-optic system for rotational events and phenomena monitoring: construction, investigation and area of application [M]//Zembyat Z, de Stefano M. Seismic behaviour and design of irregular and complex civil structures II. Geotechnical, geological and earthquake engineering. Cham: Springer, 2016, 40: 49-64.
- [29] Jaroszewicz L R, Kurzych A, Krajewski Z, et al. The fiber-optic rotational seismograph-laboratory tests and field application [J]. Sensors, 2019, 19(12): 2699.
- [30] de Toldi E, Lefevre 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.
- [31] Bernauer F, Wassermann J, Guattari F, et al. BlueSeis3A: full characterization of a 3C broadband rotational seismometer[J]. Seismological Research Letters, 2018, 89(2A): 620-629.
- [32] ixblue. blueSeis-3A Portable rotational 3-component seismometer absolute & broadband [EB/OL]. [2022-05-11]. <https://www.ixblue.com/store/blueseis-3a/>.
- [33] Keil S, Wassermann J, Igel H. Single-station seismic microzonation using 6C measurements [J]. Journal of Seismology, 2021, 25(1): 103-114.
- [34] ixblue. blueSeis-1C ultra-low-noise portable 1 component rotational seismometer[EB/OL]. [2022-05-11]. <https://www.ixblue.com/store/blueseis-1c/>.
- [35] Li Y L, Cao Y W, He D, et al. Thermal phase noise in giant interferometric fiber optic gyroscopes [J]. Optics Express, 2019, 27(10): 14121-14132.
- [36] Cao Y W, Chen Y J, Zhou T, et al. The development of a new IFOG-based 3C rotational seismometer[J]. Sensors, 2021, 21(11): 3899.
- [37] 王巍, 冯文帅, 张首刚, 等. 用于世界时测量的大型高精度光纤陀螺技术研究[J]. 导航与控制, 2021, 20(2): 1-8.  
Wang W, Feng W S, Zhang S G, et al. Research on technology of large-scale high-precision fiber optic gyroscope for universal time measurement[J]. Navigation and Control, 2021, 20(2): 1-8.
- [38] 张桂才. 光纤陀螺原理与技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008: 276-283.  
Zhang G C. The principles and technologies of fiber-optic gyroscope[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008: 276-283.
- [39] 杨远洪, 王欢, 杨福铃, 等. 基于 Sagnac 干涉仪的保偏光子晶体光纤氢气传感器[J]. 光学学报, 2014, 34(8): 0806004.  
Yang Y H, Wang H, Yang F L, et al. Polarization-maintaining photonic crystal fiber hydrogen sensor based on Sagnac interferometer[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(8): 0806004.
- [40] 张维叙. 光纤陀螺及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008: 41-48.  
Zhang W X. Fiber optic gyroscope and its application[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008: 41-48.
- [41] Bernauer F, Wassermann J, Igel H. Rotational sensors: a comparison of different sensor types[J]. Journal of Seismology, 2012, 16(4): 595-602.
- [42] 闫皓, 杨远洪, 杨福铃. 光纤陀螺热扩散延迟响应模型及补偿技术研究[J]. 中国激光, 2019, 46(1): 0106003.  
Yan H, Yang Y H, Yang F L. Response model and compensation technology of thermal diffusion delay in fiber optic gyro coil[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(1): 0106003.
- [43] 范运强, 黄继勋, 李晶. 干涉光路装配应力对称性对 Shupe 误差的影响[J]. 光学学报, 2021, 41(21): 2112002.  
Fan Y Q, Huang J X, Li J. Effect of assembly stress symmetry of interference optical path on Shupe error [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(21): 2112002.
- [44] 王夏霄, 冯志芳, 秦祎, 等. 光纤陀螺光纤环轴向磁敏感性研究[J]. 中国激光, 2015, 42(8): 0805005.  
Wang X X, Feng Z F, Qin Y, et al. Study on the axial magnetic field sensitivity in optical fiber coil of fiber optic gyroscope[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(8): 0805005.
- [45] Yang Y H, Li S, Yan H, et al. Low-noise closed-loop FOG driven by two broadband sources [J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(18): 4555-4559.
- [46] 杨远洪, 李帅, 杨福铃, 等. 一种双光源高精度光纤陀螺: CN107202573A[P]. 2019-12-10.  
Yang Y H, Li S, Yang F L, et al. A high precision fiber optic gyroscope driven by two sources: CN107202573A[P]. 2019-12-10.
- [47] Yang Y H, Li S, Yang F L, et al. Differential fiber optic gyroscope driven by two broadband sources of different wavelengths[J]. IEEE Access, 2020, 8: 65443-65449.
- [48] 杨福铃. 双光源高精度光纤陀螺技术研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2018: 112-115.  
Yang F L. Research on high precision fiber optic gyroscope with dual light source[D]. Beijing: Beihang University, 2018: 112-115.
- [49] 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: 1-23.
- [50] Igel H, Cochard A, Wassermann J, et al. Broad-band observations of earthquake-induced rotational ground motions [J]. Geophysical Journal International, 2007, 168(1): 182-196.
- [51] 操玉文, 曾祥方, 李正斌, 等. 云南漾濞 M<sub>s</sub>6.4 地震信号的旋转和平动分量面波记录分析研究[J]. 地球物理学报, 2022, 65(2): 663-672.  
Cao Y W, Zeng X F, Li Z B, et al. Rotational and translational motions induced by the M<sub>s</sub>6.4 Yunnan Yangbi earthquake recorded by co-located FOGs and seismometer [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2022, 65(2): 663-672.

# Research and Application of High-precision Fiber-Optic Rotational Seismometer

Li Shuai, Yang Yuanhong<sup>\*</sup>, Li Liangzhen, Wang Rumo

*School of Instrumentation and Optoelectronic Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China*

## Abstract

**Objective** Planetary seismology is a new discipline for imaging the internal structure of planetary objects, and it shows the law of planetary motions and determines whether they are habitable. The complete internal structure of planetary objects cannot be obtained using conventional seismometers, which can only measure three translational components in the geological movements. Thus, three rotational components in the geological movements must also be measured. Nowadays, the rotational components are frequently measured using gyroscopes. Large ring laser gyroscopes are employed to achieve ultra-high precision measurement, although they can only function at a fixed site. The fiber optic rotational seismometer (FORS), which is based on the fiber optic gyroscope (FOG), is insensitive to the translation motion and has the benefits of low noise, high sensitivity, and portability, which is ideally adequate for measuring three rotational components in planetary seismology. High precision is required for the FORS, but as a civil system, low cost is also required. The biggest challenge for a practical high-precision FORS is to satisfy the demands of high performance and low cost simultaneously. In this study, the error mechanism of depolarized FOGs is shown and a noise suppression technique is proposed. Based on the differentially depolarized FOG, a three-axis high-precision seismometer (BHFORS-3C) is developed with self-noise smaller than  $4.5 \text{ nrad} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-\frac{1}{2}}$ . Long-term seismic observations demonstrate that BHFORS-3C is ready for field application and offers crucial support for the observation of 6-component planetary seismology and the accurate analysis of seismic activities.

**Methods** The output spectrum of Sagnac interferometer assembly (SIA) in a depolarized FOG is the modulation of the original input spectrum. The conventional analysis approach obtains the modulated output spectrum model by calculating the transfer function of the SIA. The depolarized SIA consisted of several polarization-maintaining fibers (PMFs) and single-mode fiber (SMF) coil is a common polarization interferometer. The modulated output spectrum is actually the polarization interference spectrum, and the output spectrum model can be obtained using the Jones matrix approach. The modulated spectrum is easily affected by the environment and becomes unstable, and the fluctuation of the modulation spectrum has a considerable effect on the noise and drifts of depolarized FOGs. In this study, a spectral modulation suppression technique is proposed. A phase modulator is inserted in a PMF of the depolarizers and additional high-frequency phase modulation is applied. The spectral modulation can be efficiently suppressed, and so are the noises and drifts.

**Results and Discussions** We previously demonstrated that a multifunctional integrated optical circuit can function well over a wide bandwidth (Fig. 5) and proposed a differential FOG (DFOG), which consists of two equivalent interferometric FOGs sharing a single SIA and driven by two broadband sources with various wavelengths. The DFOG has good common-mode error rejection capability and the errors because of temperature and magnetic field (Fig. 6) can be efficiently suppressed. In this study, we propose a differential depolarized FORS (DD-FORS) (Fig. 7) based on the DFOG and the depolarized FOG using additional high-frequency phase modulation. A 3-axis high-precision seismometer is developed (Fig. 8) with self-noise smaller than  $4.5 \text{ nrad} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-\frac{1}{2}}$  (Fig. 10). Long-term seismic observations have been conducted in Huainan, Lijiang, and Beijing (Fig. 9), and the result shows the reliability and portability of BHFORS-3C. The long-term formal observations in Lijiang demonstrate that BHFORS-3C has achieved reliable measurements of remote strong earthquakes and near-field weak earthquakes.

**Conclusions** In the current study, the output spectrum model of SIA in a depolarized FOG is built based on the polarization interference principle, and the error mechanism of depolarized FOGs is shown. A noise suppression technique using additional high-frequency phase modulation in SIA is proposed and verified. A high-precision FORS based on the differential depolarized FOG is proposed and a 3-axis high-precision seismometer which has the characteristics of low cost, low noise, and adaptability to the environment is developed. The long-term observations in several places demonstrate the high reliability and portability of BHFORS-3C. Considerable observational data have been recorded and preliminary verification of the rotational seismic model has been conducted. Our study offers a practical high-precision 3-component seismic rotation observation instrument for planetary seismology.

**Key words** measurement; fiber-optic gyroscope; rotational seismometer; planetary seismology; self-noise