

文章编号: 0253-2239(2008)03-0419-04

光纤陀螺受辐照影响机理分析

刘德文 肖文 魏博

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100083)

摘要 构成光纤陀螺敏感器件的保偏光纤环在辐射环境中损耗会增加,陀螺的精度随之降低,从而限制了光纤陀螺在空间中的应用。采用⁶⁰Co作为辐射源模拟空间辐射环境,对光纤陀螺及其光电器件进行了大量的试验,并对光纤陀螺及其光电器件受空间辐射影响的机理进行了研究,得出光纤陀螺光电器件中保偏光纤环受辐射影响最严重,从而重点分析了光纤陀螺敏感器件保偏光纤环的辐射影响机理,从原理上探讨了保偏光纤环在辐射条件下损耗的增加对光纤陀螺的影响,为光纤陀螺抗辐射加固技术提供了理论基础。

关键词 光纤传感; 光纤陀螺; 保偏光纤; 辐射影响

中图分类号 TN216 **文献标识码** A

Mechanism of Radiation Effects on Fiber Optic Gyros

Liu Dewen Xiao Wen Wei Bo

(School of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract The polarization-maintaining fiber coil in a fiber optic gyro (FOG) is a sensitive element, its loss will increase when it works in radiation environment such as the spatial, and the performance of FOG also degrades. The spatial radiation environment is simulated with ⁶⁰Co as the radiation source, and influences of spatial radiation on elements of fiber optic gyro especially the polarization-maintaining fiber, were researched based on lots of simulation experiments of spatial radiation. It is found the polarization-maintaining fiber suffers from the spatial radiation most seriously, and the radiation effect mechanism of polarization-maintaining fiber has been proposed. Furthermore, the radiation effect on fiber optic gyro owing to the increase of loss in polarization-maintaining fiber under radiation has been discussed, which provides theoretical foundation for radiation hardening design of fiber optic gyro.

Key words fiber sensing; fiber optic gyros; polarization-maintaining fiber; radiation effect

1 引言

光纤陀螺(FOG)由于其潜在的优势和应用前景,已经成为新一代惯性制导测量系统中的主导器件。随着光纤陀螺研究的深入,人们逐步解决了光纤陀螺的各种关键问题,使光纤陀螺性能不断提高。现在光纤陀螺已经实现了集成化和数字化^[1]。国外研制的光纤陀螺零位漂移已达到 $0.001^\circ/\text{h}$ 以内,标定因数稳定性优于 10^{-6} ,测量精度达到了 $0.0003^\circ/\text{h}$ 。光纤陀螺整体可以满足空间各种应用的需求。光纤陀螺应用于空间有很多优势,体积小、功耗低及高可靠性

有利于空间的应用^[2]。国外光纤陀螺空间应用已经有了成功的例子,已经进行到了产业化阶段。国内光纤陀螺空间应用刚刚起步,各种技术都有待进一步提高,尤其是空间环境中辐照对光纤陀螺的性能影响较大,因此抗辐加固技术需要深入研究^[3~6]。

2 光纤陀螺辐射试验

2.1 辐射试验

关于空间辐射对电子器件影响的研究比较深入,有成熟的宇航级的抗辐照电子器件可供筛选。

收稿日期: 2007-08-07; 收到修改稿日期: 2007-09-17

作者简介: 刘德文(1980-),男,湖南邵阳人,博士研究生,主要从事光纤传感器方面的研究。

E-mail: dewer@aspe.buaa.edu.cn

导师简介: 肖文(1962-),男,陕西西安人,教授,博士生导师,主要从事光纤传感和空间技术等方面的研究。

E-mail: xiaow@buaa.edu.cn

但是关于空间辐射对光学器件的影响报导很少。为了研究光纤陀螺光电子器件对光纤陀螺的影响,设计试验方案如图 1 所示。

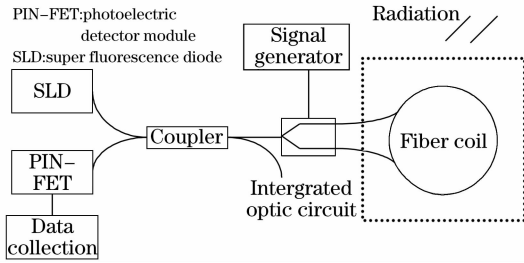


图 1 光纤陀螺辐射试验方案图

Fig.1 Radiation-experiment scheme of fiber optic gyro

该试验方案把光纤陀螺的光学部分包括光源 (SLD)、耦合器、Y 波导、光纤环、探测器分立安装在一个铝盒当中,相互间没有重叠。这样当需要研究光纤陀螺某一个光电器件对光纤陀螺性能的影响时可以用铅砖屏蔽其它光电器件,只把待研究的光电器件暴露在辐射环境当中,如图 1 所示当需要研究光纤环在辐射环境下对光纤陀螺的影响时,开放光纤环的辐射窗口,用铅砖屏蔽其它光电器件不受辐射的影响。其中信号发生器为 Y 波导提供方波调制信号,同时通过信号发生器和示波器能够测试 Y 波导的半波电压这一非常重要的参量。通过探测器的输出信号来检测辐射条件下光电子器件性能的变化对光纤陀螺性能的影响。因而该试验方案的特点为在保持光纤陀螺光学系统完整的情况下,能够很好地研究光纤陀螺单个光电器件性能变化对光纤陀螺性能的影响。具体试验装置如图 2 所示。

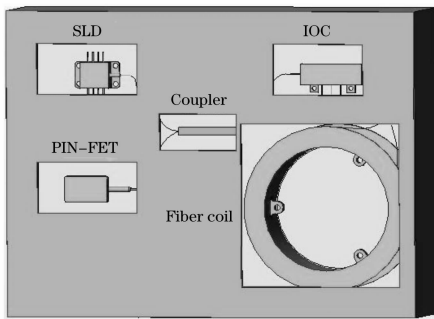


图 2 光纤陀螺辐射试验装置

Fig.2 Radiation experimental device of fiber optic gyro

2.2 试验现象

试验采用 ⁶⁰Co 作为辐射源,辐射剂量率为 1.3 cGy/s,累积总剂量到 200 Gy,分别对保偏光纤环、Y 波导、耦合器、探测器、光源进行了辐照试验,光纤陀螺所有的光电器件性能都有变坏的趋势,其中尤其是保偏光纤环的影响最大,试验结果如表 1~表 4

所示。

表 1 耦合器辐照实验前后参量对比

Table 1 Comparison of parameters before and after radiation

| Index | Before radiation | After radiation |
|-----------------|------------------|-----------------|
| Splitting ratio | 44.6/56.4 | 45.8/54.2 |
| Crosstalk /dB | 10/9 | 11.5/8.5 |
| Loss /dB | 0.5 | 0.6 |

表 2 Y 波导辐照实验前后参量对比

Table 2 Comparison of Y-typed waveguide parameters before and after radiation

| Index | Before radiation | After radiation after |
|----------------------|------------------|-----------------------|
| Splitting ratio | 49.5/50.5 | 48.2/51.8 |
| Loss /dB | 4.10 | 3.57 |
| Crosstalk /dB | 35.1/34.9 | 33/33.5 |
| Half-wave voltage /V | 3.9 | 3.9 |

表 3 探测器辐照实验前后参量对比

Table 3 Comparison of detector parameters before and after radiation

| Index | Before radiation | After radiation |
|-----------------|------------------|-----------------|
| Noise /mV | 0.24 | 1.00 |
| Bias voltage /V | -1.55 | -1.53 |

表 4 光纤环辐照实验前后参量对比

Table 4 Comparison of fiber coil parameters before and after radiation

| Index | Before radiation | After radiation |
|---------------|------------------|-----------------|
| Loss /dB | 0.5 | 4.6 |
| Crosstalk /dB | 26.4 | 26.0 |

2.3 试验分析

由以上的实验数据可知,空间辐照对光纤环的影响最大,对其它的光电器件影响较小,试验用光纤环为已绕好、应用于实际光纤陀螺的光纤环,光纤长度 500 m,工作波长 1310 nm,为法尔胜生产的“一”字型保偏光纤。实验中光纤环的损耗采用实时检测,通过如图 1 所示的探测器输出电压值来测量保

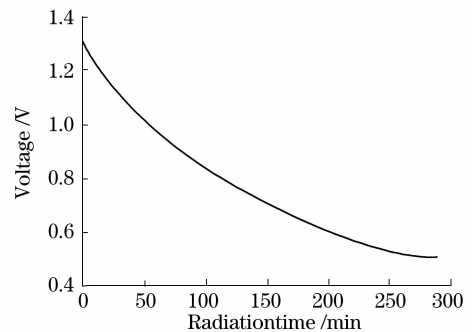


图 3 光纤环辐照时探测器的输出电压

Fig3 Voltage of PIN-FET as fiber coil in radiation

偏光纤的辐射损耗。测试的结果如图 3 所示。因而可以得到光纤环的损耗曲线如图 4 所示。

空间辐射对保偏光纤环的影响表现为在空间辐照条件下光纤环的损耗大幅度增加。这主要是由电离总剂量效应(TID)产生的。电离总剂量效应是材料中的缺陷俘获了带电高能粒子的一个过程。这种粒子俘获效应积累至一定程度,引起材料光学性质的变化,直接表现为光纤材料形成色心,因此实验室一般都用⁶⁰Co 作为辐射源,利用高能的 γ 射线来测试光纤环的辐射性能。保偏光纤中的色心主要是由用于产生应力作用的高浓度掺杂(硼、磷、铝等)产生的,从而导致光纤损耗变大^[7~9]。采用最普遍基于光功率描述的光纤辐照损耗增加的表达式为

$$A = CD^f, \quad (1)$$

式中 A 为辐照导致的损耗增加, C 和 f 为与光纤相关的常量, D 为总的辐照剂量。针对本实验中陀螺所使用的保偏光纤,对图 4 所示的实验数据通过曲线拟合得到 C 为 0.0035, f 为 0.72。因而保偏光纤损耗增加曲线与(1)式表示的模型是相符的。

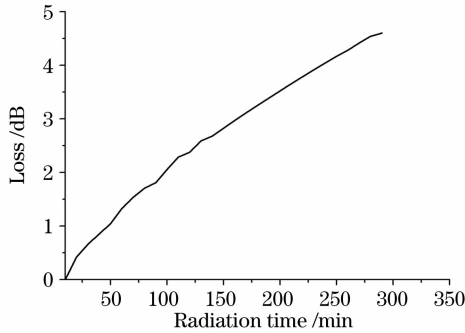


图 4 光纤环辐射损耗

Fig. 4 Loss of fiber coil induced by radiation

3 光纤陀螺空间辐射的影响机理

由以上的试验分析可知,空间辐射对光纤陀螺的影响主要表现为光纤陀螺光电器件在空间辐射下性能都有变坏的趋势,尤其是保偏光纤环的损耗大幅度增加。从而影响光纤陀螺的精度,甚至使光纤陀螺无法正常工作。

在光纤陀螺中,相向传输的两束光经过光纤环、Y 波导调制后产生干涉^[10],干涉信号为

$$P(\Delta\phi) = P_0 \{1 + \cos[\Delta\phi_R + \phi_b]\}, \quad (2)$$

其中 $\Delta\phi_R$ 为萨尼亚克效应产生的相位差, ϕ_b 为 Y 波导产生的偏置相位, P_0 为光源的光功率。陀螺静止时, Y 波导的两种调制态给出相同的信号为

$$P(0, -\phi_b) = P(0, \phi_b) = P_0(1 + \cos \phi_b) \quad (3)$$

旋转时

$$\begin{cases} P(\Delta\phi_R, -\phi_b) = P_0[1 + \cos(\Delta\phi_R - \phi_b)], \\ P(\Delta\phi_R, \phi_b) = P_0[1 + \cos(\Delta\phi_R + \phi_b)], \end{cases} \quad (4)$$

两种调制态之差变为

$$\begin{aligned} \Delta P(\Delta\phi_R, \phi_b) = \\ P_0[\cos(\Delta\phi_R - \phi_b) - \cos(\Delta\phi_R + \phi_b)], \end{aligned}$$

即

$$\Delta P(\Delta\phi_R, \phi_b) = 2P_0 \sin \phi_b \sin \Delta\phi_R, \quad (5)$$

而在空间辐射中,保偏光纤环受辐射的影响损耗增加并满足(1)式,综合(1)式和(5)式可得

$$A = -10 \lg(P_1/P_0),$$

$$\Delta P(\Delta\phi_R, \phi_b) = 2P_1 \sin \phi_b \sin \Delta\phi_R, \quad (6)$$

$$\Delta P(\Delta\phi_R, \phi_b) = 2 \times 10^{-A/10} \times P_0 \sin \phi_b \sin \Delta\phi_R,$$

其中 P_1 为光纤受辐照损耗增加后到达探测器的光功率。由(6)式可知由于保偏光纤环受辐射损耗的增加必然会影响到陀螺的探测精度,主要会影响到陀螺的零偏稳定性。使陀螺的零偏随辐射剂量的增加而变化,最终损坏陀螺。在辐射剂量率为 1.3 cGy/s, 累积剂量到 200 Gy 时,其辐射影响的仿真结果如图 5 所示。

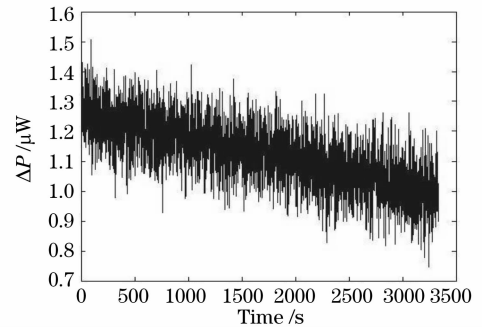


图 5 光纤陀螺辐射环境下的仿真结果

Fig. 5 Simulation output of FOG under radiation

这与在相同辐射试验条件下,光纤陀螺的输出变化趋势是一致的。辐射试验结果如图 6 所示。主要体现在陀螺零偏随辐射剂量的累积而变化。辐射

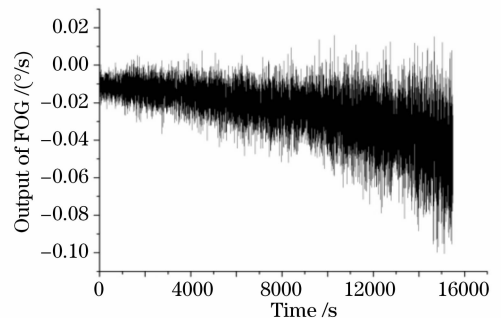


图 6 光纤陀螺的辐射试验结果

Fig. 6 Output of FOG under radiation

实验中光纤陀螺随着辐射的进行,其噪声变大,主要是由于保偏光纤损耗增加,使达到探测器的光功率减小,从而降低了光纤陀螺的信噪比。

4 结 论

在辐射环境下,光纤陀螺光电器件的性能都有下降的趋势,其中保偏光纤环的影响最大。主要表现为损耗的增加,最终影响陀螺的测量精度,甚至损坏陀螺。因而保偏光纤的抗辐照问题将是光纤陀螺抗辐照的关键技术。

参 考 文 献

- 1 Xiao Wen, Zhang Yuyan, Liu Dewen. ^{60}Co radiation effects and photobleaching properties of polarization-maintaining fiber in fiber optic gyroscopes[J]. *J. Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2006, **32**(8): 966~968
肖文,张玉艳,刘德文. 光纤陀螺中保偏光纤 ^{60}Co 辐照效应及光褪色特性[J]. 北京航空航天大学学报, 2006, **32**(8): 966~968
- 2 Mi Jian, Zhang Chunxi, Li Zheng *et al.*. Effect of polarization interference on fiber optic gyro performance[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(8): 1140~1144
米剑,张春熹,李铮等. 偏光干涉对光纤陀螺性能的影响[J]. 光学学报, 2006, **26**(8): 1140~1144
- 3 Zhang Yuyan, Xiao Wen, Liu Dewen. Research on the radiation-resistant optical fibers for fiber-optic gyroscopes in the satellites [J]. *Optics and Optoelectronic Technology*, 2005, **3**(1): 42~45
张玉艳,肖文,刘德文. 卫星用光纤陀螺中抗辐射光纤的研究[J]. 光学与光电技术, 2005, **3**(1): 42~45
- 4 Zhang Guicai, Jiang Liang, Wang Wei. Fiber optic gyro technology for satellites application[C]. *Proc. 5th Congress on Photonics, Vol. 2, Fiber Optics*, 2005. 329~332
张桂才,姜梁,王巍. 光纤陀螺技术在卫星上的应用[C]. 第五届全国光学大会会议论文集, 第二分册: 纤维光学, 2005. 329~332
- 5 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
- 6 Ning Tigang, Qin Xi, Pei Li *et al.*. A novel way to measure the temperature characteristic of polarization-maintaining fiber[J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(8): 1078~1080
宁提纲,秦曦,裴丽等. 新型保偏光纤温度特性的测试方法[J]. 中国激光, 2006, **33**(8): 1078~1080
- 7 H. Henschel, O. Köhn, H. U. Schmidt. Radiation-induced loss of optical fibres at 1300 nm and 1550 nm wavelength[C]. *Proc. SPIE*, 1996, **2811**: 68~76
- 8 V. A. Saetchnikov, E. A. Chernyavskaya, T. P. Yanukovich. The nature of radiation absorption centers in silica glass [C]. *Proc. SPIE*, 1998, **3573**: 196~199
- 9 Tingyun Wang, Zhenyi Chen, Fufei Pang. Improved silica fiber with enhanced ultraviolet transmission[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(12): 687~689
- 10 H. C. Lefevre. *The Fiber-Optic Gyroscope* [M]. Zhang Guicai, Wang Wei transl., National Defence Industry Press. 2002. 30~33
H. C. Lefevre. 光纤陀螺仪[M]. 张桂才,王巍译,北京: 国防工业出版社. 2002. 30~33