

# SLD 光谱调制对光纤陀螺性能的影响\*

巴晓艳 张桂才 李永兵 王 巍

(中国航天时代电子公司研究院,北京 100854)

**摘 要** 对光纤陀螺中 SLD 光谱调制度的变化进行了实验研究.从理论上阐述了光路系统中光谱的调制度增大的原因,其仿真与实验结果非常一致.在此基础上,进一步分析了光谱调制度对相干函数的影响,评估了二阶相干峰引起的光纤陀螺误差水平.

**关键词** 超发光二极管(SLD);光纤陀螺;光谱调制度;相干函数;二阶相干峰

**中图分类号** V241.5;O43

**文献标识码** A

## 0 引言

光纤陀螺所用的 SLD 光源即超发光(或超辐射)二极管,除了要求体积小、寿命长、可靠性高以外,还应具有相干长度短、谱宽较宽和波长稳定性好等特点.一般  $1.3 \mu\text{m}$  SLD 的谱形为近高斯型光谱,谱宽约  $30 \text{ nm}$ ,相干长度为  $50 \mu\text{m}$  左右.这样一种弱相干光源有利于减少光纤陀螺的相干偏振噪音和其它寄生效应,从而提高了光纤陀螺的检测准确度.

由于光纤陀螺中光学元件对波长的依赖性,即使光谱很好的 SLD,其输出光通过光路系统后,光谱特性也会劣化,其中对光纤陀螺性能影响最大的是光谱的调制度.国外有文献<sup>[2]</sup>提出过 SLD 光谱调制度的概念,但尚未对 SLD 在陀螺光路中产生调制的机理以及对陀螺的影响作具体分析.本文针对光纤陀螺中 SLD 光谱调制度的变化进行了研究分析,并在此基础上分析了光谱调制度对相干函数的影响,评估了二阶相干峰引起的光纤陀螺误差水平.

## 1 光路系统的光谱特性分析

图 1 是一个实际  $1.3 \mu\text{m}$  SLD 的归一化光谱.目前最常用的全数字闭环保偏光纤陀螺方案的光路

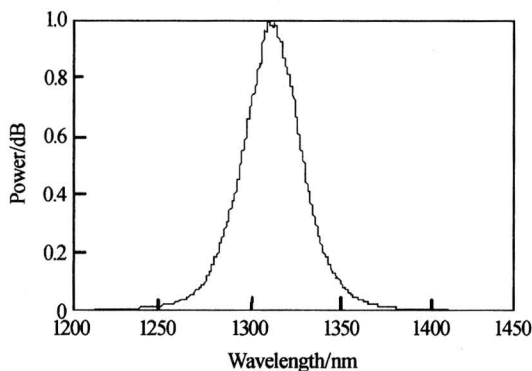


图 1  $1.3 \mu\text{m}$  SLD 的实际归一化光谱  
Fig. 1 The actual unitary spectrum of  $1.3 \mu\text{m}$  SLD

结构如图 2<sup>[1]</sup>,主要由 SLD 光源、光纤耦合器、Y 波导调制器、光纤环和探测器等组成,其中 Y 波导是集偏振器、分束器、相位调制器于一体的多功能  $\text{LiNbO}_3$  集成光学器件.

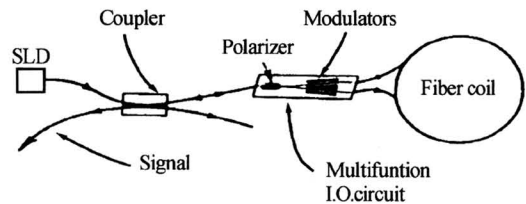


图 2 闭环保偏光纤陀螺光路结构  
Fig. 2 The optical circuit configuration of closed-loop polarization-maintaining optic fiber gyroscope

由于 SLD 的内部结构和光路中各个光学元件的光谱特性不同,从光源发出的光经过光路后谱形将会发生改变,其中变化最显著的是集成光学器件.图 3

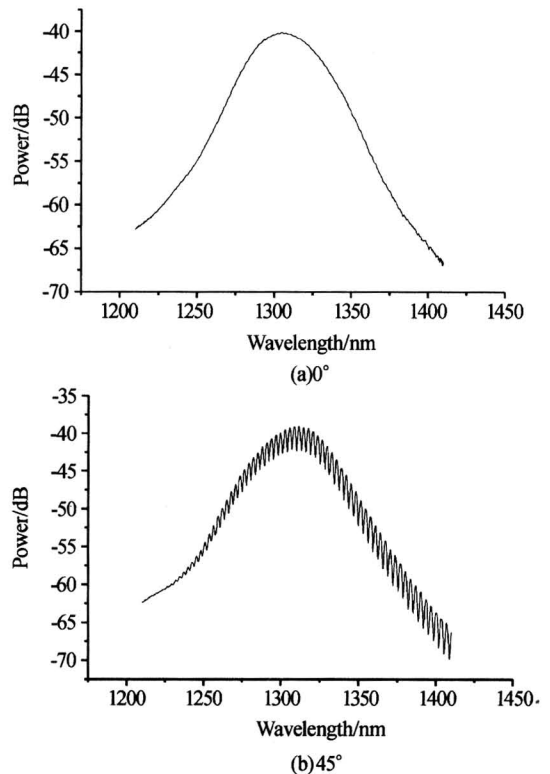


图 3  $0^\circ$ 和  $45^\circ$ 对准熔接时的光谱形状  
Fig. 3  $0^\circ$  and  $45^\circ$  angle precision fusing spectrum

\* 国防科工委基金资助项目

Tel: 010-88107027 Email: danhebao@263.net

收稿日期: 2005-02-20

(a)、(b)是 SLD(谱形如图 1)尾纤的偏振主轴与 Y 波导的尾纤偏振主轴分别以  $0^\circ$ 、 $45^\circ$  熔接时的光谱形状. 发现在  $0^\circ$  (和  $90^\circ$ ) 熔接时光谱形状基本不变; 而  $45^\circ$  熔接时光谱出现了较大的调制, 调制度约为  $4\sim 5$  dB; 对于其它对准角度, 也有不同程度的调制出现.

## 2 理论分析

任何一个部分偏振光源都可看成一个非偏振光源和一个完全偏振光源的和<sup>[1]</sup>. 假定 SLD 光源输出的是线偏振光, 输出光强为  $I_0$ , 偏振度为  $d$ , 那么总可以找到一对正交坐标轴  $(x_s, y_s)$ , 映射到该坐标轴上的正交场分量  $(E_{xs}, E_{ys})$  是不相关的, 即<sup>[3]</sup>

$$\langle E_{xs}(t)E_{xs}^*(t) \rangle = 0.5(1+d)I_0 \quad (1)$$

$$\langle E_{ys}(t)E_{ys}^*(t) \rangle = 0.5(1-d)I_0 \quad (2)$$

$$U = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \epsilon \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{j\Delta\beta L_2} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{j\Delta\beta L_1} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{j\Delta\beta(L_1+L_2)} \cos \alpha \cos \theta - e^{j\Delta\beta L_2} \sin \alpha \sin \theta - \epsilon e^{j\Delta\beta L_1} \cos \alpha \sin \theta - \epsilon \sin \alpha \cos \theta \\ e^{j\Delta\beta(L_1+L_2)} \sin \alpha \cos \theta + e^{j\Delta\beta L_2} \cos \alpha \sin \theta - \epsilon e^{j\Delta\beta L_1} \sin \alpha \sin \theta + \epsilon \cos \alpha \cos \theta \end{bmatrix} \quad (6)$$

为简便分析, 没有考虑 Y 波导的插入损耗和分光比, 而只将其看成一个偏振器. 式中  $\epsilon^2$  为 Y 波导偏振器的消光比, 一般为 30 dB 左右,  $\Delta\beta = [2\pi(n_t - n_s)]/\lambda$  ( $n_t, n_s$  分别为 SLD 和 Y 波导输出尾纤快轴和慢轴的折射率),  $L_1, L_2$  分别是光源、Y 波导保偏尾纤长度. 由于  $\epsilon^2 \approx 10^{-3} \ll 1$ , 式(6)可简化为

$$U = \begin{bmatrix} e^{j\Delta\beta(L_1+L_2)} \cos \alpha \cos \theta - e^{j\Delta\beta L_2} \sin \alpha \sin \theta & 0 \\ e^{j\Delta\beta(L_1+L_2)} \sin \alpha \cos \theta + e^{j\Delta\beta L_2} \cos \alpha \sin \theta & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

对于非偏振光部分, 相干矩阵为<sup>[3]</sup>

$$J_1 = UM_1U^+ = I_0 \begin{bmatrix} \frac{1-d}{2} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

相应的光强为

$$I_1 = \text{Tr}(J_1) = \frac{1-d}{2}I_0 \quad (9)$$

对于线偏振光部分, 相干矩阵为

$$J_2 = UM_2U^+ = I_0 \begin{bmatrix} dk & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中

$$k = \cos^2 \alpha \cos^2 \theta + \sin^2 \alpha \sin^2 \theta - \sin \alpha \cos \alpha \sin 2\theta \cos \Delta\beta L_1$$

相应的光强为

$$I_2 = \text{Tr}(J_2) = (\cos^2 \alpha \cos^2 \theta + \sin^2 \alpha \sin^2 \theta - \sin \alpha \cos \alpha \sin 2\theta \cos \delta_1) d I_0 \quad (11)$$

$$\langle E_{xs}(t)E_{ys}^*(t) \rangle = \langle E_{ys}(t)E_{xs}^*(t) \rangle = 0 \quad (3)$$

式中  $\langle \rangle$  表示时间平均,  $(x_s, y_s)$  为光源的本征偏振轴.

非偏振光部分的相干矩阵为

$$M_1 = I_0 \begin{bmatrix} \frac{1-d}{2} & 0 \\ 0 & \frac{1-d}{2} \end{bmatrix} \quad (4)$$

而线偏振光部分的相干矩阵为

$$M_2 = I_0 \begin{bmatrix} d & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

设光源输出光的本征主轴与其保偏尾纤的偏振主轴的对准误差为  $\alpha$ , 光源尾纤的偏振主轴与 Y 波导尾纤偏振主轴的对准误差为  $\theta$ , 则从光源到经过 Y 波导后这一段光路的传输矩阵为<sup>[4,5]</sup>

式中  $\delta_1 = \Delta\beta L_1$ . 因而从 Y 波导输出的总光强为

$$I = I_1 + I_2 = \frac{1-d}{2}I_0 + (\cos^2 \alpha \cos^2 \theta + \sin^2 \alpha \sin^2 \theta - \sin \alpha \cos \alpha \sin 2\theta \cos \delta_1) d I_0 \quad (12)$$

从式(12)中可以看出光谱的调制项为  $(d \sin 2\alpha \cdot \sin 2\theta \cos \delta_1)/2$ , 调制度的大小为  $(d \sin 2\alpha \sin 2\theta)/2$ ; 可知当  $d=0^\circ$  或  $\alpha=0^\circ, 90^\circ$  或  $\theta=0^\circ, 90^\circ$  时, 调制度为 0, 即光谱不改变形状.

## 3 仿真结果

设光源的尾纤为 1 m, 偏振度  $d$  为 95%, 角误差  $\alpha=5^\circ$ , 所用的熊猫型保偏光纤的双折射率差约为  $5 \times 10^{-4}$ , 考虑当熔接角  $\theta=45^\circ$  时的情况, 由式(12)推得

$$I(\lambda) = 0.5I_0(\lambda) - 0.08 \times \cos(2\pi \times 5 \times 10^{-4}/\lambda \cdot 10^{-9})I_0(\lambda)$$

( $\lambda$  的单位为 nm,  $I_0$  为原始谱, 谱形如图 1), 仿真结果归一化后如图 4(b), 和实际测量的光源与 Y 波导  $45^\circ$  对接的光谱(图 4(a))类似. 根据计算,  $\alpha$  为  $3^\circ$  时, 光谱的最大调制度约为  $1\sim 2$  dB. 谱调制的频率与光纤长度  $L_1$  有关,  $L_1$  越大, 谱调制越密集.

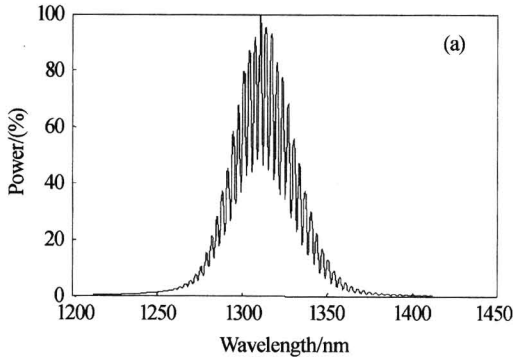
由分析可以看出, 如果入射光是非偏振光, 或光源出射的偏振光部分完全沿尾纤快轴(或慢轴)传输, 则经过 Y 波导后输出不会出现调制; 在实际中, 如果图 2 中光源和 Y 波导之间采用保偏光纤耦合器, 且做到对轴熔接, 输出光波也不会出现调制, 而采用单模光纤耦合器时由于单模光纤和保偏光纤无

法对轴,  $\theta$ 角的大小是随机的. 调制度随环境温度的变化还会引起光纤陀螺的标度因数稳定性, 因此, 控制光纤陀螺前端光路系统的偏振主轴对准准确度对于抑制光纤陀螺光路系统的光谱调制非常重要.

### 4 光谱调制对光纤陀螺性能的影响

#### 4.1 Sagnac 干涉仪的相干函数

Sagnac 干涉仪的相干函数与光路系统的光谱之间存在着傅里叶变换关系<sup>[1]</sup>. 图 1 的光谱对应的



相干函数如图 5(a), 实际光源与 Y 波导 45° 熔接时的光谱(即图 4(a))所对应的相干函数如图 5(b).

由图 5(a)和图 5(b)可以看出, SLD 光源与 Y 波导的保偏尾纤成 45° 熔接时, 由于光谱存在着调制, 在图 5(b)的相干函数中出现了较多的、与主相干峰成对称分布的次相干峰, 其中二阶相干峰与主相干峰相距 500  $\mu\text{m}$ , 幅值比主相干峰小约 -15 dB. 一般来说, 调制度越大, 则次相干峰的幅值越大; 调制的频率越高, 则出现的次相干峰的数量越多.

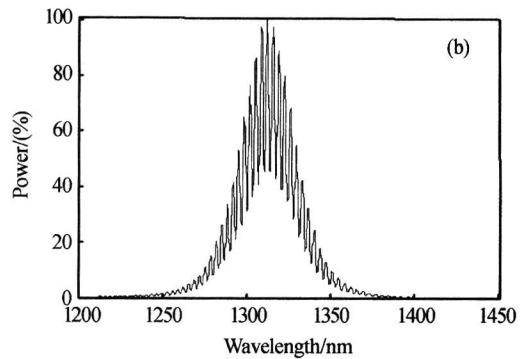


图 4 (a)实际光源与 Y 波导 45° 熔接时的光谱; (b)经过 Y 波导后的仿真光谱  
Fig. 4 Spectrum of the actual light source fused with the Y wave-guide in 45° angle; (b)The emulational spectrum which pass through the Y wave-guide

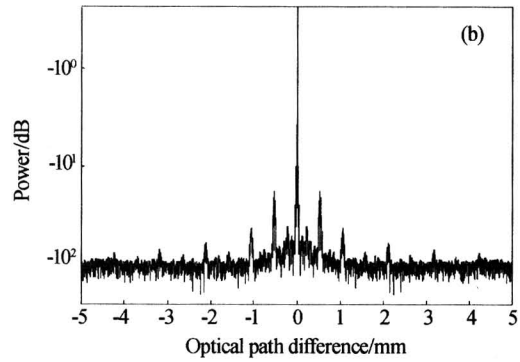
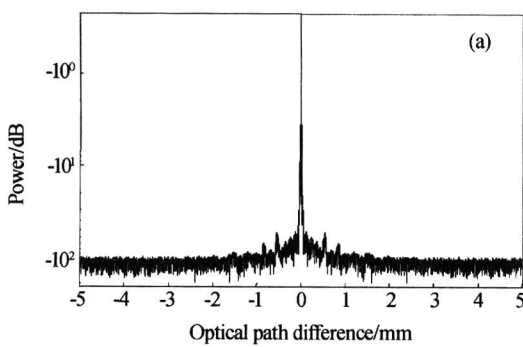


图 5 (a)实际光源的相干函数; (b)图 4(a)光谱的相干函数  
Fig. 5 (a)Coherent function of the actual light source; (b)Coherent function of the spectrum of Fig. 4(a)

#### 4.2 二阶相干峰引起的相位误差

二阶相干峰的存在会引起光纤陀螺的相位误差, 进而影响光纤陀螺的准确度. 考虑偏振交叉耦合波的情况: 在光纤环中点 A 处由主偏振模式耦合到正交偏振模式中的少量光波, 传输一段距离后, 在点 B 处重新耦合到主偏振模式中, 如果该交叉耦合波因这段传输距离产生的相对主波的光程差正好位于二阶相干峰上, 则该交叉耦合波仍然与主波发生干涉, 干涉对比度由二阶相干峰的幅值决定. 在保偏光纤中, 偏振交叉耦合通常被认为是均匀连续分布的, 因此所谓点 A 处产生的交叉耦合波应视为以 A 点为中心的一段消偏长度上的平均偏振交叉耦合. 在光纤陀螺中, 满足二阶相干条件的这类交叉耦合点共有  $M = [L - (L_A - L_B)] / L_d$  个, 其中  $L_A - L_B$

对应着满足二阶相干的光程差,  $L_d$  是保偏光纤的消偏长度. 满足二阶相干峰条件的每一个偏振交叉耦合波与主波的干涉可以表示为

$$I = \langle (E_{cw} + E_{ccw} + E_{cross}) * (E_{cw} + E_{ccw} + E_{cross}) \rangle = \left\langle \left[ \frac{E_0}{\sqrt{2}} e^{-j\frac{\phi_i}{2}} + \frac{E_0}{\sqrt{2}} e^{j\frac{\phi_i}{2}} + \frac{E_0}{\sqrt{2}} k_A k_B e^{-j(\frac{\phi_i}{2} + \phi_i)} \right]^* \left[ \frac{E_0}{\sqrt{2}} e^{-j\frac{\phi_i}{2}} + \frac{E_0}{\sqrt{2}} e^{j\frac{\phi_i}{2}} + \frac{E_0}{\sqrt{2}} k_A k_B e^{-j(\frac{\phi_i}{2} + \phi_i)} \right] \right\rangle \quad (13)$$

产生的相位误差可以表示为

$$\phi_a = \tan^{-1} \left[ \frac{E_0^2 k_A k_B \gamma \sin \phi_i}{E_0^2 + E_0^2 k_A k_B \gamma \cos \phi_i} \right] \approx k_A k_B \gamma \sin \phi_i \quad (14)$$

式中  $\phi_i$  为旋转速率引起的相移,  $i = 1, 2, \dots, M$ ,  $k_A, k_B$  分别为 A、B 两点的振幅型偏振交叉耦合系数(假定都相等),  $\phi_i$  是第  $i$  次偏振交叉耦合波相对主波的奇

生相位,  $\gamma$  是二次相干峰的相干度. 由于偏振交叉耦合的统计学特性,  $\phi_i$  在  $[0, 2\pi]$  之间随机分布, 因此, 总的相位误差  $\phi_e$  的平均值为零, 其均方根偏差的平方等于每个  $\phi_a$  的均方根偏差的平方之和

$$\sigma_{\phi_e}^2 = \sum_{i=1}^M \sigma_{\phi_a}^2 \approx \frac{1}{2} M \cdot k_A^2 \cdot k_B^2 \cdot \gamma^2 \quad (15)$$

二阶相干峰引起的相位噪音为

$$\sigma_{\phi_e} = \sqrt{M/2} \cdot k_A \cdot k_B \cdot \gamma \quad (16)$$

对于 1000 m 长的保偏光纤线圈, 消光比(强度型偏振交叉耦合)为 25 dB, 保偏光纤的消偏长度取 10 cm, 则有<sup>[1]</sup>:  $M=10^4$ ,  $k_A=k_B=5.5 \times 10^{-3}$ , 取  $\gamma=10^{-2}$ , 由此可以得到  $\sigma_{\phi_e} \approx 3 \times 10^{-5}$  rad ( $\sim 3^\circ/h$ ), 这样大的噪音在中高准确度光纤陀螺中是不允许的.

## 5 结论

理论分析和实验观察表明, 由于光纤陀螺中光学元件的波长依赖性, 即使光谱调制度很小的 SLD, 其输出光通过光路系统后, 光谱特性也会劣化. SLD 的本征偏振轴与光源保偏尾纤的偏振主軸的对准误差以及光源尾纤与 Y 波导尾纤偏振主軸之间的对准误差是光路系统中光谱调制度增大的主要原因, 调制度的增大导致较大的二阶相干峰, 引起光纤陀螺的输出相位噪音. 由于目前的工艺水平所限, SLD 的本征偏振轴与光源保偏尾纤的偏振主軸

还很难做到精确对准, 而采用全保偏光路尤其是保偏光纤耦合器并进行高准确度对轴融接(使  $\theta$  最小)是减少光谱调制度, 提高光纤陀螺准确度的重要途径, 本文的工作对中高准确度光纤陀螺的光路设计和器件选型具有参考价值.

## 参考文献

- 1 Lefèvre H C 著, 张桂才, 王巍译. 光纤陀螺仪. 北京: 国防工业出版社, 2002. 56~58  
Lefèvre H C, translated by Zhang Guicai, Wang Wei. The Fiber Optic Gyroscope. Beijing: National Defense Industry Press. 2002. 56~58
- 2 Burns W K. Optical Fiber Rotation Sensing. USA: Academic Press Inc. 1994. 265~275
- 3 张桂才, 杨清生. 采用消偏 SLD 光源的闭环光纤陀螺研究. 光子学报, 2002, **30**(1): 63~66  
Zhang G C, Yang Q S. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **30**(1): 63~66
- 4 苏广文, 马恒坚, 王光明. Loyt 光纤消偏器的原理及性能分析. 光子学报, 1997, **26**(10): 925~928  
Su G W, Ma H J, Wang G M. *Acta Photonica Sinica*, 1997, **26**(10): 925~928
- 5 孔伟金, 李国华. 偏振光的矢量表示及应用. 光子学报, 2002, **31**(11): 1405~1407  
Kong W J, Li G H. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(11): 1405~1407

# The Influence of SLD's Spectral Modulation on the Performance of Fiber-optic Gyroscope

Ba Xiaoyan, Zhang Guicai, Li Yongbing, Wang Wei

Academy of China Aerospace Times Electronics Corporation, Beijing 100854

Received date: 2005-02-20

**Abstract** The changes of SLD's spectral modulation in fiber-optic gyroscope was studied with experiment, the reason for the increasing of spectral modulation depth through the whole optical path was explained in theory, and the emulation result was highly consistent with the experimental result. On the basis of that, the influence of spectral modulation on the coherence function was analyzed, and the error level of fiber-optic gyroscope which arise from secondary coherence peak was evaluated.

**Keywords** Super-luminescent diodes (SLD); Fiber-optic gyroscope; Spectral modulation depth; Coherence function; Secondary coherence peak



**Ba Xiaoyan** was born in 1976 in Anhui Province, China. She received M. S degree in Beijing Jiao tong University in 2002. Now she is working in Academy of China Aerospace Times Electronics Corporation, doing the research of fiber-optic gyroscope.