

SLD 光源谱型对光纤陀螺精度的影响

Effect of the Spectrum of a Superluminescent Diode on Performance of Fiber-optic Gyro

王 巍/WANG Wei,王学锋/WANG Xue-feng,张桂才/ZHANG Gui-cai

中国航天时代电子公司研究院,北京 100854

The Research & Development Institute, CATEC, Beijing 100854, China

[摘要] 光纤陀螺仪的精度受到 Sagnac 相位差测量精度的限制,因此,减小相位差测量误差至关重要。通过相干函数,研究了 SLD 光源光谱形状及其纹波对光纤陀螺仪精度的影响,并结合实际情况进行了验证,最后给出了光纤陀螺对光源光谱的要求以及光源确定情况下陀螺的设计方向。

[关键词] 光纤陀螺,超辐射发光二极管,相干函数,光谱,纹波

[中图分类号] O43

[文献标识码] A

[文章编号] 1000-7857(2006)02-0022-05

Abstract: Using the coherence function of a superluminescent diode (SLD), The effect of the spectrum and its ripple of a SLD on the performance of fiber-optic gyro has been researched in this paper. The simulated results agree well with the reality. The requirement for the spectrum of a SLD is described, and some design advice of fiber-optic gyro with a given SLD is presented.

Key Words: fiber optic gyroscope, superluminescent diode, coherence function, spectrum, ripple

CLC Number: O43

Document Code: A

Article ID: 1000-7857(2006)02-0022-05

1 概述

光纤陀螺是一种新型的惯性仪表,具有全固态、寿命长、可靠性高、尺寸小、质量轻等优点。目前干涉型光纤陀螺已经获得实际应用。干涉型光纤陀螺基于 Sagnac 效应,即旋转环型干涉仪的相位差正比于其旋转速率。在典型的闭环光纤陀螺(如图 1)中,光源发出的光经过耦合器后进入 Y 波导集成光学器件(简称 Y 波导),分成两路相向传播的光,在 Y 波导中汇合后干涉,经过耦合器后到达探测器转换为电信号。逻辑电路中的解调信号经过积分后反馈到 Y 波导,补偿旋转产生的干涉信号变化。干涉信号的相位差变化正比于光纤线圈沿其法向的转速变化,因此通过测量闭环中反馈信号就可以实现转速的测量。

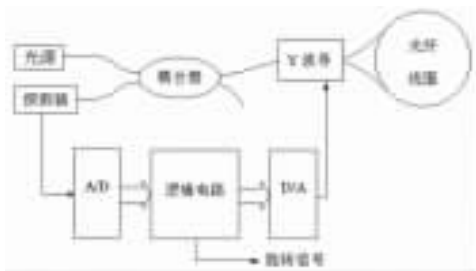


图 1 闭环光纤陀螺仪构成原理图

Fig. 1 Architecture of closed-loop fiber-optic gyroscope

典型的光纤陀螺仪光路由光源、耦合器、Y 波导、光纤线圈与探测器构成,各个器件之间存在光纤的熔接。另一方面,Y 波导内

部存在波导芯片与尾纤之间的耦合。由于在实际操作中存在轴对准误差,光纤之间的熔接与 Y 波导内的耦合均会引起一定程度的背向反射与偏振交叉耦合。反射光之间以及偏振耦合波与主波之间均可能产生寄生干涉信号,形成误差。为了减少直至消除寄生干涉信号,采用了宽带光源,对于 0.85 μm 和 1.3 μm 波长,通常是超发光二极管(SLD),利用宽带光源弱时间相干性与偏振光纤的偏振保持优点,可以消除大多数寄生干涉^[1-4]。

实际 SLD 的光谱接近高斯函数,但是由于 SLD 参数(比如管芯腔长、掺杂区位置、切割面角度与耦合尾纤的反射等)的不理想,仍存在谱型不对称、谱中存在位置与大小不确定的纹波等情况,这将影响 SLD 的相干函数,使得次相干峰与主相干峰之间可能产生寄生干涉信号,直接影响陀螺仪的精度。针对此类问题,本文通过 SLD 相干函数对陀螺仪精度的影响,研究和验证了 SLD 光谱形状及其纹波对光纤陀螺仪精度的影响,并给出了 SLD 光谱的优化设计建议。

2 光源相干函数对光纤陀螺精度的影响

对于功率谱密度为 $a^2(f)$ 的光源,其自相干函数表示为^[2]

$$\Gamma(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} a^2(f) e^{2i\pi f t} df \quad (1)$$

其中, t 为时间延迟, f 为光波频率。

如果 $a^2(f)$ 是一个中心型的谱,则有

$$a_c^2(f) = a^2(\bar{f} + f) \quad (2)$$

其中, $\bar{f}$ 为 $a_c^2(f)$ 的中心频率,光源相干函数为一个中心型的归一化自相干函数

收稿日期: 2005-06-02

作者简介: 王 巍,男,北京市 142 信箱 47 分箱中国航天时代电子公司研究院,研究员,主要研究方向为惯性技术,包括惯性仪表和惯导系统;E-mail: xuefeng21@yahoo.com.cn

$$\gamma_c(t)=\frac{\Gamma_c(t)}{\Gamma(0)} \tag{3}$$

其中

$$\Gamma_c(t)=\int_{-\infty}^{+\infty} a_c^2(f)e^{2i\pi ft}df \tag{4}$$

如果相干函数中存在两个峰——主相干峰与次相干峰,且两峰之间距离与干涉仪中某两光束光程差相等,则即使此光程差超过了光源的相干长度,仍会产生重建干涉。这种干涉通常是不希望的寄生干涉。

为简单起见,考虑光纤环中某点产生的交叉耦合光波经过一段光纤后耦合回到最初偏振,并与主光波产生干涉,其相位误差大小取决于两干涉光波的振幅比 k 与相干度^[2],即

$$\Delta\phi_e=2k\gamma_c(t)\sin(\Delta\beta\Delta L) \tag{5}$$

其中, $\Delta\beta$ 为光纤双折射率差, ΔL 为两个耦合点之间的距离。如果

表 1 不同谱宽时相干长度($\gamma_c=0.8$)

Tbl. 1 Coherence length with different spectrum width ($\gamma_c=0.8$)

光谱半高全宽(nm)	18	24	36	48	60
相干长度(μm)	48	36	24	18	14

在整个线圈中存在 M 个这样的干涉,对应的标准偏差为

$$\sigma_{\Delta\phi_e}=\sqrt{2M}k\gamma_c(t) \tag{6}$$

对应的陀螺速率误差为

$$\sigma_{\Omega_e}=\lambda c\sigma_{\Delta\phi_e}/(2\pi LD) \tag{7}$$

上式中, c 为光速, λ 为光源平均波长。选取光纤陀螺光纤环长度 $L=600$ m, 光纤环的平均直径 $D=80$ mm, $\lambda=1\,301$ nm。取寄生干涉个数 M 为 6 000, 耦合比为 25 dB, 第二相干峰的相对大小为 -25 dB, 则产生的误差为 0.29 °/h, 是比较大的。

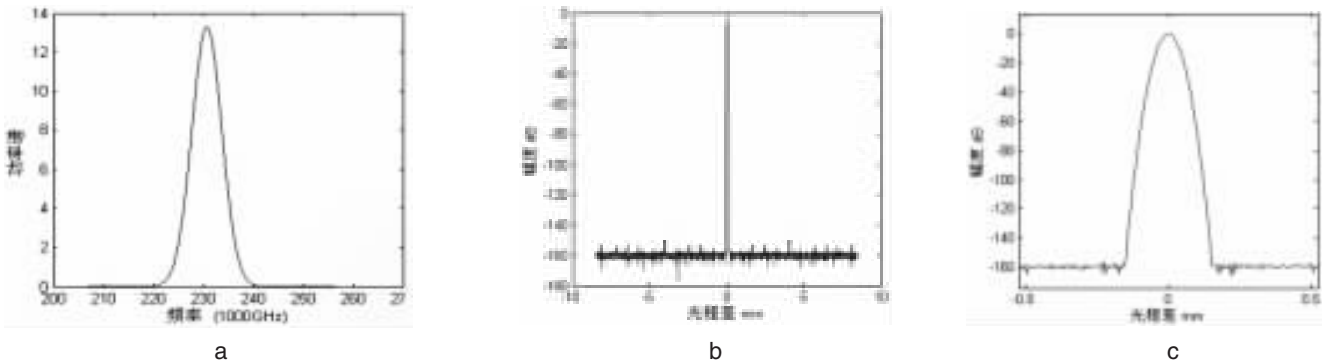


图 2 理想高斯光谱及其相干函数

Fig. 2 Gaussian spectrum and its coherence function

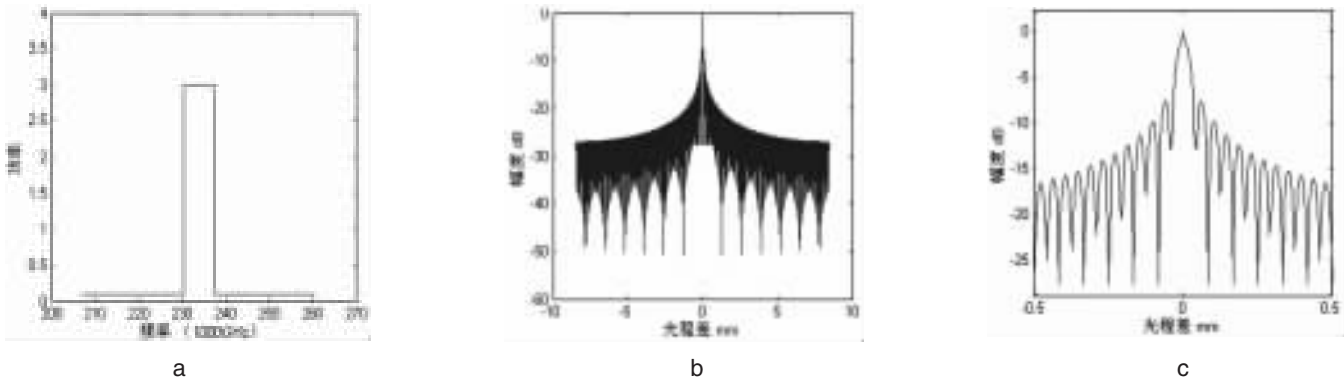


图 3 谱宽 40 nm 的矩形型光谱及其相干函数

Fig. 3 Rectangular spectrum with a 40 nm FWHM and its coherence function

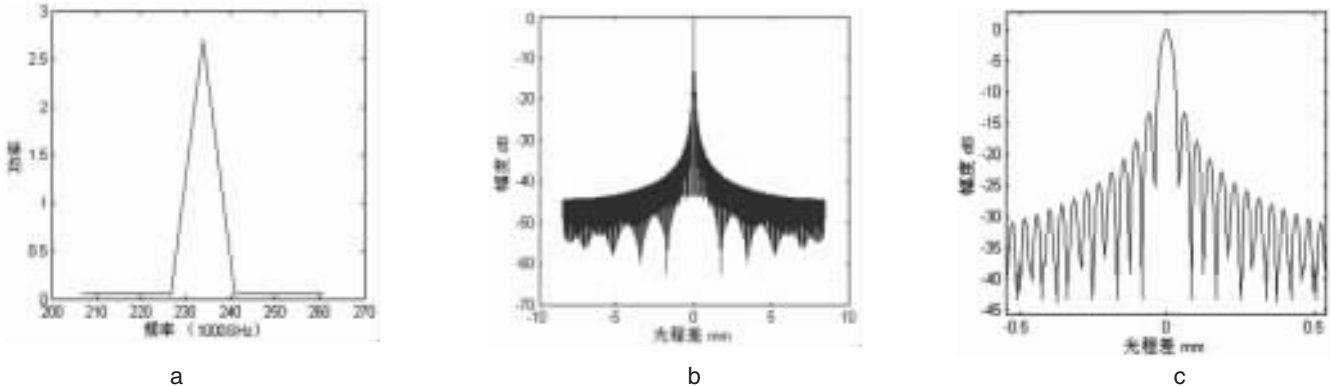


图 4 谱宽 40 nm 的三角形光谱及其相干函数

Fig. 4 Triangular spectrum with a 40 nm FWHM and its coherence function

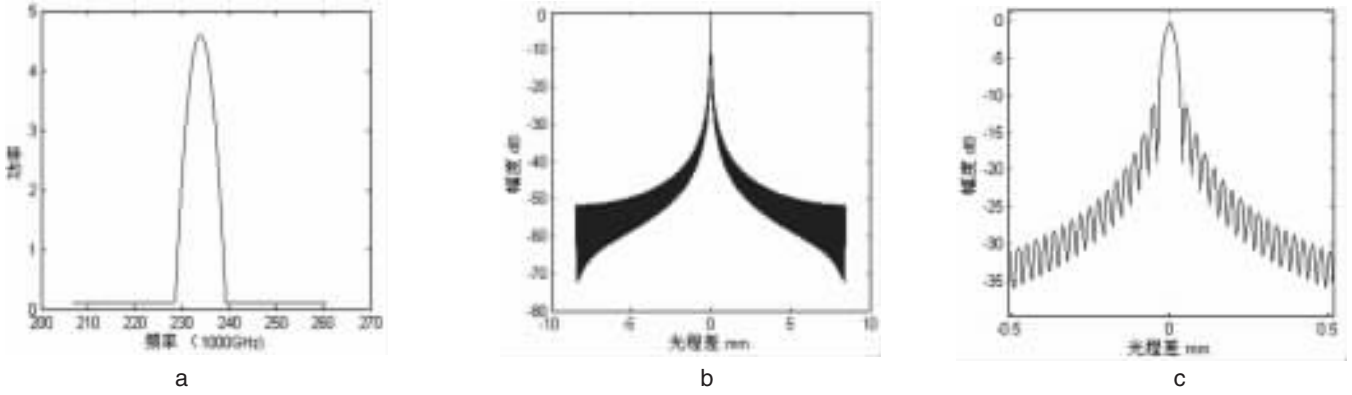


图 5 谱宽 40 nm 的抛物线型光谱及其相干函数

Fig. 5 Parabolic spectrum with a 40 nm FWHM and its coherence function

2.1 SLD 光谱谱型对光纤陀螺的影响 高斯型光谱表示为

$$I_c(f) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(f-f_0)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (8)$$

其中, σ 表征高斯光谱宽度, f_0 为频率谱的中心频率, 对应的相干函数为

$$\gamma_{ec}(\tau) = \exp(-\tau^2/4\tau_c^2) \quad (9)$$

其中, $\tau_c = 1/(4\pi\Delta f)$, $2\Delta f$ 为光谱的半高全宽。选取谱宽为 40 nm, 则对应光谱及其相干函数如图 2 所示, a、b、c 三图分别为光谱、相干函数及其局部放大。图中相干函数仅有一个主相干峰, 光程差为 0.5 mm 时, 相干度为 -160 dB。采用上述陀螺参数, 寄生干涉引起的相位误差小于 10^{-20} rad, 对于精度为 0.001 °/h 的陀螺, 此误差也可以忽略, 可见高斯谱型产生的误差很小。另外, 随着谱宽增加, 相干长度减小, 因此, 谱宽越宽越好。

而矩形、三角形与抛物线 3 种谱型的光谱可以分别表示为

$$I_R(f) = \begin{cases} a, f_0 - \Delta f/2 < f < f_0 + \Delta f/2 \\ \varepsilon, f < f_0 - \Delta f/2 \text{ 或 } f > f_0 + \Delta f/2 \end{cases} \quad (10)$$

$$I_T(f) = \begin{cases} \varepsilon + (f - f_0 + \Delta f)(a - \varepsilon)/\Delta f, f_0 - \Delta f < f < f_0 \\ a - (f - f_0)(a - \varepsilon)/\Delta f, f_0 < f < f_0 + \Delta f \\ \varepsilon, f > f_0 + 2\Delta f \text{ 或 } f < f_0 - 2\Delta f \end{cases} \quad (11)$$

$$I_P(f) = \begin{cases} -bf^2 + 2bf_0f + b_1, f_0 - 3\Delta f/4 < f < f_0 + 3\Delta f/4 \\ \varepsilon, f < f_0 - 3\Delta f/4 \text{ 或 } f > f_0 + 3\Delta f/4 \end{cases} \quad (12)$$

根据式(10)–(12), 可以求出对应的相干函数为

$$\gamma_{eR}(t) = \text{abs}\{\exp(if_0t)(a - \varepsilon)\sqrt{2/\pi} [\sin(\Delta f t/2)]/t + \varepsilon\} \quad (13)$$

$$\gamma_{eT}(t) = \text{abs}\{\exp(if_0t)\sqrt{2/\pi} (a - \varepsilon)/\Delta f \sin(t/2) 1/t^2 + a + \varepsilon\} \quad (14)$$

$$\gamma_{eP}(t) = \text{abs}\{\exp(if_0t) \frac{-b}{\sqrt{2\pi}} \frac{(\Delta f)^3}{3} [{}_1F_1(3, 4, i\Delta f t) + {}_1F_1(3, 4, -i\Delta f t)] + \exp(if_0t) \frac{-2bf_0}{\sqrt{2\pi}} \frac{(\Delta f)^2}{2} [{}_1F_1(2, 3, i\Delta f t) + {}_1F_1(2, 3, -i\Delta f t)] + b_1 + \varepsilon\} \quad (15)$$

式(13)–(15)中, $|t| < \Delta t$, $\Delta t = c/df$, df 为光谱的频率间隔, ${}_1F_1(\alpha, \gamma, z)$ 为库默尔函数, a, b, b_1, ε 为表征光谱形状的常数。取谱宽为 40 nm, 仿真了矩形、三角形与抛物线三种谱型的光谱及其相干函数, 分别如图 3、图 4、图 5 所示, 其中 c 图均为局部放大图。

与高斯型光谱相比, 矩形、三角形与抛物线形光谱中均含有密集的次相干峰, 上包络线与高斯型光谱的相干函数形状相同, 但是由于幅值远大于高斯型光谱, 这就使得光程差为 0.5 mm 时的相干度与高斯型光谱相比分别增大了 143 dB、129 dB 和 129 dB。根据上文所述陀螺参数, 由于矩形光谱引入光纤陀螺的噪声增加到 0.58 °/h, 三角形与抛物线两种谱型引入的噪声均为 0.023 °/h。

2.2 非理想高斯谱型对光纤陀螺精度的影响

一种简化的非理想光源光谱如图 6a 的形状, 图 6 b 与图 6c 为其相干函数, 光谱用式(16)来表示, 对应的相干函数如式(17)所示。

$$I_{NG}(f) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \left\{ \exp\left(-\frac{(f-f_{01})^2}{2\sigma^2}\right) + 1.2 \times \exp\left(-\frac{(f-f_{02})^2}{2\sigma^2}\right) \right\} \quad (16)$$

$$\gamma_{eNG}(t) = \exp(t^2/4t_c^2) \quad (17)$$

式(17)与式(9)的不同之处在于相干时间 t_c , 这是因为谱型不同的缘故。计算结果表明, 相干函数仅有一个主相干峰。与高斯型比较, 光程差为 0.5 mm 时, 相干度仍为 -160 dB。但是, 这种谱型的相干长度较大, 在光程差为 0.14 mm 时, 其相干强度是高斯型

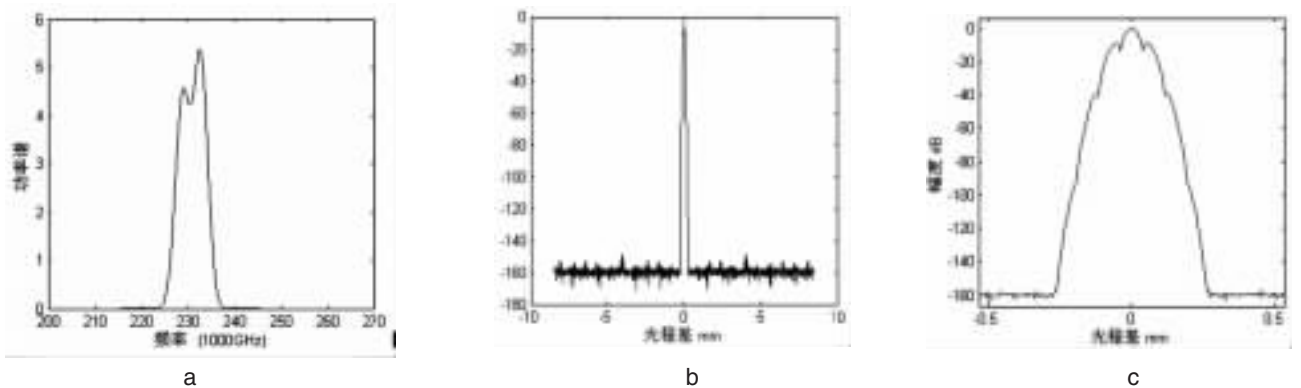


图 6 谱宽 40nm 的非对称高斯型光谱及其相干函数

Fig. 6 Asymmetrical Gaussian spectrum with a 40 nm FWHM and its coherence function

的 1 011 倍,造成的误差为 0.008 °/h。

3 SLD 光谱纹波对光纤陀螺精度的影响

3.1 光谱纹波对高斯型光谱的相干函数的影响

含光谱纹波(Ripple)的高斯光谱可简化表示为

$$I_{\alpha}(f)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}\exp\left(-\frac{(f-f_0)^2}{2\sigma^2}\right)\left[1+K\sin\left(\frac{(\lambda-\lambda_1)\pi}{5}\right)\right]\quad(18)$$

其中,K为Ripple的相对大小,λ为光谱中某一位置波长,λ₁为光谱的起始波长。

根据实际情况,按照式(18)仿真了Ripple周期(L_R)为1nm,k=0.01时的光谱,并计算其相干函数,结果如图7所示,实际的光谱与仿真光谱的局部放大如图8所示,Ripple的大小与周期均比较吻合。当Ripple大小变化时,次相干峰的大小M_{pp}与次相干峰距主相干峰的距离L₀₁的变化如表2所示,其中R₀₁表示Ripple幅值与光谱相应处功率的比值。由表2以看出,Ripple的大小决定次相干峰的大小,进而决定相干度大小。因此Ripple越大,次相干峰与主相干峰的寄生干涉产生的相位误差就越大。次相干峰随Ripple周期的变化如表3所示,可以看出Ripple的周期决定L₀₁的大小。Ripple周期越大,次相干峰与主相干峰的距离

就越小。由于典型的Ripple周期为1nm,光路中近似对称的两个熔接点距离Y波导汇合处的距离差要大于1.69mm,以消除背向反射光之间的干涉。

3.2 Ripple在光谱中位置不同时对相干函数的影响

3.2.1 Ripple在光谱两边

取Ripple的周期为1nm,K=0.01,占据光谱两边各1/3的宽度。光源谱宽为40nm时,次相干峰大小为-39.1dB,如图9所示。

3.2.2 Ripple在光谱中间

仍取Ripple的周期为1nm,K=0.01,占据光谱中间1/3的宽度。光源谱宽为40nm时,次相干峰大小为-23.1dB,如图10所示。

考虑光纤陀螺具有前述参数,Ripple在光谱中间时产生的误差为Ripple在光谱两边时的40倍,对于4个寄生干涉,误差分别为0.038°/h与0.00095°/h。

3.3 Ripple对光纤陀螺精度的影响

由以上计算分析:

1) Ripple越大,光源相干函数中第一个次相干峰与主相干峰产生干涉造成的误差就越大,由此产生的陀螺噪声越大,噪声

表2 第一个次相干峰大小随Ripple大小的变化

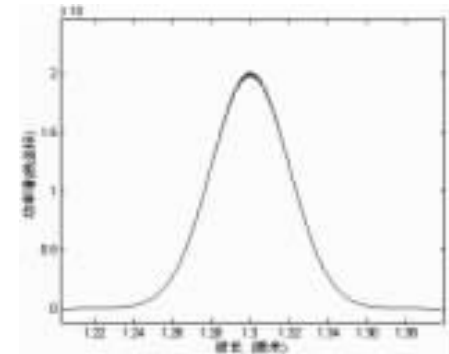
Tbl. 2 Vary of magnitude of the second coherence peak with different magnitude of ripple

R ₀₁	10 ⁻⁶	10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	10 ⁻³	10 ⁻²	10 ⁻¹
L _R (nm)				1		
M _{pp} (dB)	-63.01	-53.01	-43.01	-33.01	-23.01	-13.01
L ₀₁ (mm)	1.69	1.69	1.69	1.69	1.69	1.69

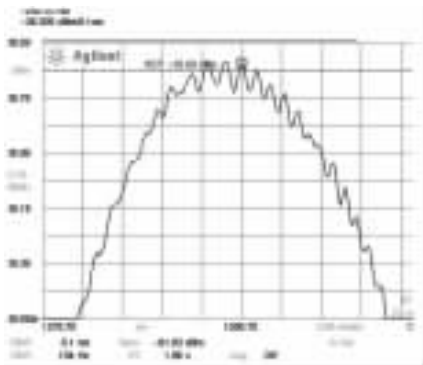
表3 第一个次相干峰与主相干峰距离随Ripple周期的变化

Tbl. 3 Vary of space between the first and second peaks with different period of ripple

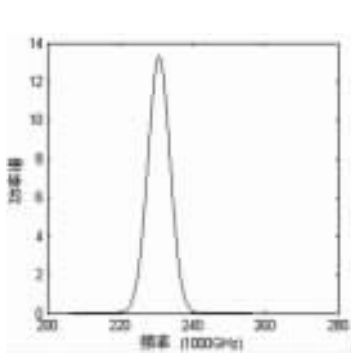
R ₀₁	10 ⁻³				
Ripple周期(nm)	0.5	1	2	5	10
M _{pp} (dB)	-33.02	-33.01	-33.01	-33.01	-33.01
L ₀₁ (mm)	3.38	1.69	0.84	0.338	0.169



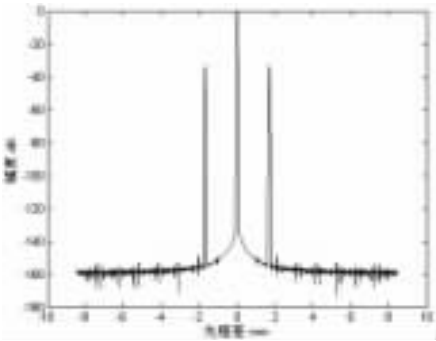
a



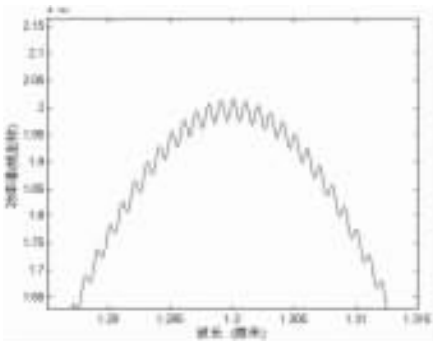
a



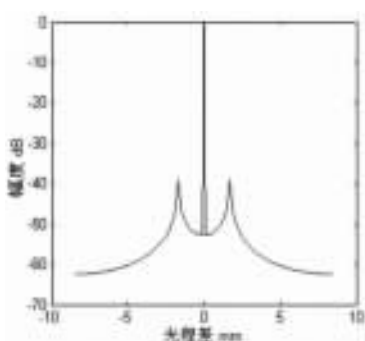
a



b



b



b

图7 含有周期性Ripple的高斯光谱(a)、及其相干函数(b)

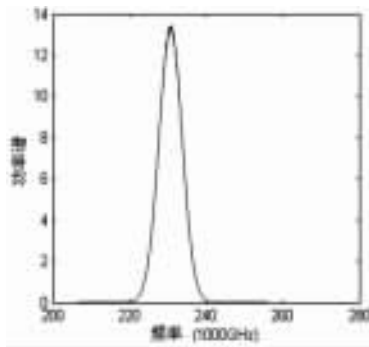
Fig. 7 (a)Gaussian spectrum with periodic ripple and (b) related coherence function

图8 实际含Ripple的光谱(a)与仿真的含Ripple的光谱(b)

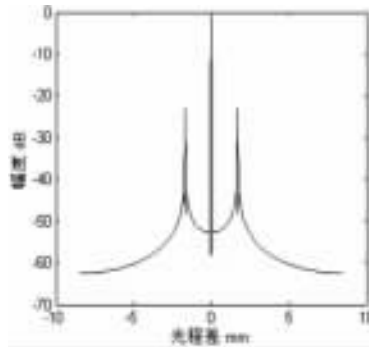
Fig. 8 (a) a real and (b) a simulated Gaussian spectrum with periodic ripple

图9 Ripple在两边时的高斯光谱(a)及其相干函数(b)

Fig. 9 (a)Gaussian spectrum with periodic ripple in its sides and (b) its coherence function



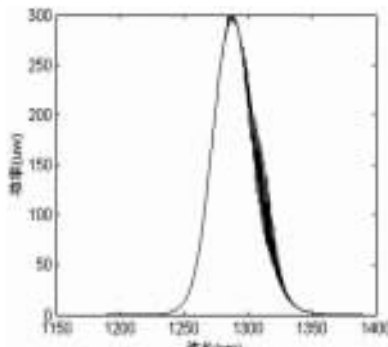
a



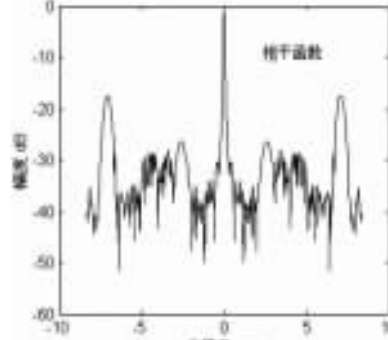
b

图 10 Ripple 在中间时的高斯光谱(a)及其相干函数(b)

Fig. 10 Gaussian spectrum with middle periodic ripple and its coherence function



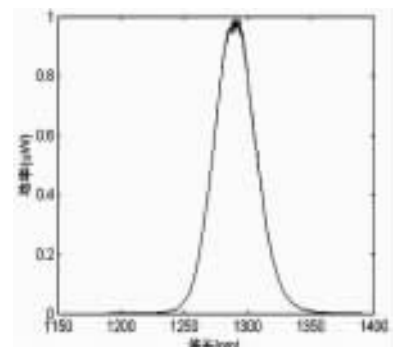
a



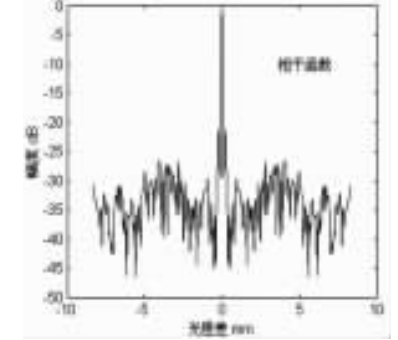
b

图 11 光源 A 的光谱(a)及其相干函数(b)

Fig. 11 Spectrum of source A and its coherence function



a



b

图 12 光源 B 的光谱(a)及其相干函数(b)

Fig. 12 Spectrum of source B and its coherence function

大小可由式(7)计算。

2) 光谱中 Ripple 的周期大小与寄生干涉需要的光程差成反比,在本文参数下,两者关系为 $LRL01=1.69 \text{ (nm} \cdot \text{mm)}$ 。根据 Ripple 的周期大小,可以设计光纤陀螺光路,避开相应的寄生干涉;或者根据光纤陀螺光路的状态提出对光源的要求。

3) 光谱中间部分的 Ripple 对光源相干性影响较大,容易形成较大的次相干峰,而光谱边缘的 Ripple 对光源相干性影响较小,所形成相位误差仅为前者的 $1/40$ 。实际的光谱中是光谱中间部分的 Ripple 较大,需要仔细计算。

4 实际的光源光谱与光纤陀螺特性试验

实际使用的 SLD 光源的光谱均接近高斯型,图 11 a 与图 12a 是使用光谱仪测出的两个 SLD 典型光谱,图 11 b 与图 12b 是对应计算出来的相干函数。图 11a 的光谱一边包含分布范围大、幅度大的 Ripple,因此,图 11 b 中存在一个明显的次相干峰,且幅值超过了 -18 dB ,与主峰的距离约为 7.1 mm ,根据前述参数,即使仅存在一个寄生干涉,造成相位误差也达到 $0.06 \text{ }^\circ/\text{h}$ 。在图中,光程差为 $110 \text{ } \mu\text{m}$ 时,存在大小为 -22 dB 的次相干峰,对于最多的寄生干涉个数,造成的最大相位误差为 $0.99 \text{ }^\circ/\text{h}$ 。

5 结论

本文分析了光源光谱宽度对光纤陀螺精度的影响,对比了不同形状光谱对光纤陀螺的影响,研究了光源光谱中纹波大小对陀螺精度的影响,得到了如下结论:

1) 在相干长度大于光源波长的前提下,光源谱宽越大越好,由于 Y 波导集成光学芯片两分支的典型长度差为 $35 \text{ } \mu\text{m}$,如果要求芯片与尾纤的两个耦合点所产生寄生干涉的对比度小于 $1/e$

($e \approx 2.71828$),则光源的谱宽要大于 50 nm ;

2) 高斯型光谱是理想的光谱,矩形、三角形与抛物线形的光谱均具有光谱宽度窄的效果,即容易形成寄生干涉而降低陀螺精度。在同样谱宽 (40 nm) 的情况下,对应于 0.5 mm 光程差的寄生干涉信号与高斯型光谱相比分别增大了 143 dB 、 129 dB 、 129 dB ;

3) 对于类似掺铒光纤光源的光谱,如果可以分解为两个高斯型光谱的叠加,且两个谱的间距小于单个谱的宽度,则其不对称性对陀螺的影响很小;

4) 光谱中纹波越大,对精度的影响越大;光谱中部纹波对陀螺精度影响大,而两边的纹波对光纤陀螺精度影响很小;对于前述陀螺参数,如果精度要求 $1 \text{ }^\circ/\text{h}$,寄生干涉为 104 个,则纹波的大小要小于 -25.8 dB ;

5) 通过对光纤陀螺光路进行优化设计,消除光程差等于光谱中次相干峰与主相干峰间距的耦合点,可以避免由于光谱纹波对应的次相干峰形成的寄生干涉。

参考文献(References)

- [1] BOHM K, et al. Low drift fibre gyro using a superluminescent diode. Electron. Lett[J]. 1981, 17:352-353.
- [2] 张桂才,王巍译. 光纤陀螺仪[M]. 国防工业出版社,2002.
- [3] MARTIN P, et al. Test apparatus of distributed polarization coupling in fiber gyro coils using white light interferometry [J]. SPIE, 1991, 1 585: 173-179.
- [4] SZAFRANIEC B, et al. Performance improvement in depolarized fiber gyros[J]. SPIE, 1995, 2 510: 37-48.

(责任编辑 胡春华)