

文章编号: 0258-7025(2004)08-01001-05

# 谐振腔光纤陀螺信号检测方法的研究

马慧莲, 金仲和, 丁 纯, 王跃林

(浙江大学信息与电子工程系, 浙江 杭州 310027)

**摘要** 谐振腔光纤陀螺(R-FOG)是利用光学 Sagnac 效应实现对转动检测的一种高精度的惯性传感器件。在谐振腔光纤陀螺系统中,信号检测系统占有非常重要的地位,其检测精度的大小直接影响陀螺的分辨率。光纤环形谐振腔是谐振腔光纤陀螺的核心敏感部件。采用两种频率的锯齿波组合调制,考虑激光器有限光谱线宽条件下,采用洛仑兹线型描写光纤环形谐振腔的输出光强表达式。针对输出光强与谐振频率偏差在靠近谐振点附近的近似线性关系,利用多次反馈频率操作来依次跟踪谐振腔光纤陀螺顺时针和逆时针光束的谐振点,从而避免了谐振频率偏差复杂的求根算法。仿真结果表明,多次反馈频率操作,可以较快地锁定到谐振点。

**关键词** 光电子学;谐振腔光纤陀螺;信号检测;双频率锯齿波组合调制

**中图分类号** TN 815;TN 911.74 **文献标识码** A

## Research on Signal Detection Method of Resonator Fiber Optical Gyro

MA Hui-lian, JIN Zhong-he, DING Chun, WANG Yue-lin

(Department of Information & Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

**Abstract** Resonator fiber optic gyro (R-FOG) is an inertial rotation sensor with high accuracy which is based on the Sagnac effect. The signal detection system has important role in the R-FOG. The detecting precision influences the maximum resolution of the gyro directly. The fiber ring resonator is the core-sensing element in the R-FOG. This paper presents the scheme to detect the resonance point using two-frequency serrrodyne modulation, and uses the Lorentzian function to describe the expression of the output power at the exit port of the fiber ring resonator taking the temporal coherence of the laser into account. According to near linear relationship between amplitude of the square waveform and the resonant frequency deviation near the resonant point, frequency feedback time after time is used for frequency tracking for both clockwise (CW) and counterclockwise (CCW) waves. Therefore, complex root finding process can be avoided. Simulation shows that both CW and CCW waves can be locked at the resonance frequency of the resonator quickly by frequency feedback operation.

**Key words** optoelectronics; resonator fiber optic gyro; signal detection; two-frequency serrrodyne modulation

## 1 引 言

谐振腔光纤陀螺(R-FOG)是利用光学 Sagnac 效应实现对转动检测的一种高精度的惯性传感器件<sup>[1~3]</sup>。当光纤环绕垂直于所在平面的轴产生转动,有一角速度  $\Omega$ , 设方向为顺时针(CW),则谐振腔内顺时针和逆时针(CCW)传播方向的光束间将产生正比于旋转角速度  $\Omega$  的谐振频率差  $\Delta F$ , 通过

检测 CW 和 CCW 两路光的谐振频率差  $\Delta F$  就可以获得  $\Omega$  的大小。然而,  $\Omega$  引起的频差是极其微小的,当环形腔直径为 10 cm 时,为获得  $1^\circ/\text{h}$  的分辨率,需要检测 0.2 Hz 的频差。因此,在谐振腔光纤陀螺系统中,信号检测系统占有非常重要的地位,其检测精度的大小直接影响陀螺的分辨率。新的高性能光纤陀螺,普遍倾向于采用数字闭环检测系统,使 CW/CCW 传输的光都处于谐振状态。采用两种频

收稿日期:2003-07-28;收到修改稿日期:2003-09-26

基金项目:国家 973 计划(G1999033110)和浙江省教育厅(20020723)资助项目。

作者简介:马慧莲(1975—),女,浙江大学信息与电子工程系讲师,博士,主要从事微光机电系统和光纤传感的研究。

E-mail:mahl@zju.edu.cn

率的锯齿波组合调制,通过分析输出光强与谐振频率偏差在靠近谐振点附近的近似线性关系,利用多次反馈频率操作来跟踪两路光束的谐振点,从而避免了谐振频率偏差复杂的求根算法。仿真结果表明,多次反馈频率操作,可以较快地锁定到谐振点。

## 2 原 理

### 2.1 谐振腔基本原理

在谐振腔光纤陀螺系统中,旋转角速度  $\Omega$  引起的 CW 和 CCW 光路的谐振频率差  $\Delta F$  可表示为

$$\Delta F = f_q^{\text{CW}} - f_q^{\text{CCW}} = \frac{D}{n\lambda} \Omega \quad (1)$$

式中,  $f_q^{\text{CW}}$  和  $f_q^{\text{CCW}}$  分别为 CW 和 CCW 光路的  $q$  次谐振频率,  $q$  为整数,  $D$  为环形腔直径,  $n$  为光纤折射率,  $\lambda$  为工作波长。

图 1 给出了谐振腔光纤陀螺系统结构简图。由激光器发出的光经过 Y 分支器分成两束,这两束光分别经过相位调制器 PM1 和 PM2 进行移频后进入耦合器  $C_1$  和  $C_2$ ,再由环形腔耦合器  $C_3$  耦合进入光纤环形谐振腔,形成顺时针和逆时针的两个谐振光束,其中顺时针谐振光束由耦合器  $C_1$  耦合到光电探测器  $D_1$ ,逆时针光束由耦合器  $C_2$  耦合到光电探测器  $D_2$ 。相位调制器 PM1 和 PM2 的控制信号是采用两种频率的锯齿波组合调制,其中  $f_1$  为固定频率,  $f_2$  则反映谐振腔旋转角速率的变化。从  $D_2$  和  $D_1$  出来的信号经过高速数字信号处理(DSP)专用芯片,提取谐振频率偏差用以控制激光器输出光频率  $f$  和锯齿波调制频率  $f_2$  的大小,从而使 CCW 和 CW 光路锁定在各自的谐振点。

光纤环形谐振腔是谐振腔光纤陀螺的核心敏感

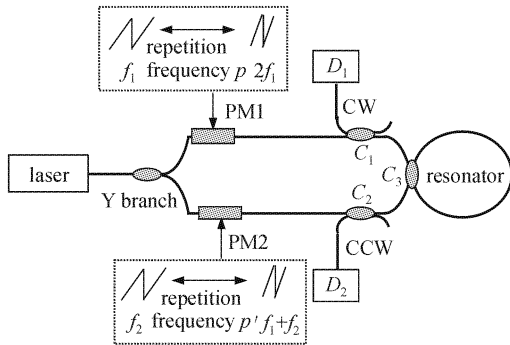


图 1 谐振腔光纤陀螺系统结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of resonator fiber optical gyro system

$C_1$ : coupler 1;  $C_2$ : coupler 2;  $C_3$ : coupler 3;  $D_1$ : detector 1;  
 $D_2$ : detector 2; CW: clockwise; CCW: counterclockwise

部件,考虑到半导体激光光源有限的时域相干性,反射式环形谐振腔的输出光强可表示如下<sup>[4]</sup>

$$I_D = I_0 \left[ T^2 - \frac{2TR(\cos\omega\tau - Q)}{1 + Q^2 - 2Q\cos\omega\tau} + \frac{(R')^2}{1 - (Q')^2} \cdot \frac{1 - Q^2}{1 + Q^2 - 2Q\cos\omega\tau} \right] \quad (2)$$

式中参数分别定义如下

$$T = \sqrt{1 - k_C} \cdot \sqrt{1 - \alpha_C}, \quad R = R' e^{-\alpha_R \tau},$$

$$R' = k_C \cdot (1 - \alpha_C) \cdot \sqrt{1 - \alpha_R} \quad (2a)$$

$$Q' = \sqrt{1 - \alpha_R} \cdot \sqrt{1 - k_C} \cdot \sqrt{1 - \alpha_C},$$

$$Q = Q' e^{-\alpha_R \tau}, \quad \tau = nL/c \quad (2b)$$

式中  $I_0$  表示输入谐振腔的光强;  $\omega$  为激光器输出角频率;  $\delta_f$  为光源的谱线宽度,定义为激光器输出光谱幅度降低为其最大值一半时所对应的频带宽度;  $\tau$  为光在环形腔中传输一周的时间;  $L$  为谐振腔长度;  $n$  为光纤折射率;  $c$  为真空中光速;  $k_C$  和  $\alpha_C$  分别为谐振腔耦合器  $C_3$  的耦合系数和损耗;  $\alpha_R$  为谐振腔传输损耗,包括成环时的接头损耗。

改写(2)式,可将其表示成洛仑兹线型

$$I_D = (1 - \alpha_C) [1 - \rho L(\delta/2)] I_0 \quad (3)$$

式中参数分别定义如下

$$L(\delta/2) = \frac{(1 - Q)^2}{(1 - Q)^2 + 4Q\sin^2(\delta/2)}$$

(洛仑兹函数) (3a)

$$\delta = \omega\tau = 2\pi[q + (f - f_q)/\text{FSR}]$$

(光绕环形谐振腔一周的相位延迟) (3b)

$$\rho = 1 - \frac{1}{1 - \alpha_C} \cdot \left[ T^2 - \frac{2TR}{1 - Q} + \frac{(R')^2}{1 - (Q')^2} \cdot \frac{1 + Q}{1 - Q} \right]$$

(谐振腔的谐振深度) (3c)

(3)式就是在考虑激光器光谱线宽后,用洛仑兹函数表示的光探测器输出光强的表示式。式中  $f_q$  为谐振腔的  $q$  次谐波振荡频率;自由频谱间距(Free Spectral Range, FSR)  $\text{FSR} = c/nL$ , 它是指相邻两个谐振频率的间距。

鉴于低损耗谐振腔的谐振带很窄,可限于讨论  $|(f - f_q)/\text{FSR}| \ll 1$ , 则有如下近似

$$\sin^2[\pi(f - f_q)/\text{FSR}] \approx [\pi(f - f_q)/\text{FSR}]^2 \quad (4)$$

将(4)式代入(3a)

$$L(f - f_q) = \frac{[(1 - Q) \cdot \text{FSR}/(2\pi\sqrt{Q})]^2}{[(1 - Q) \cdot \text{FSR}/(2\pi\sqrt{Q})]^2 + (f - f_q)^2} = \frac{C_0^2}{C_0^2 + (f - f_q)^2} \quad (5)$$

式中  $C_0 = (1-Q) \cdot \text{FSR} / (2\pi\sqrt{Q})$  为与输入光频率无关的常数。

考虑图 1 所示谐振腔光纤陀螺 CCW 光路, 由于相位调制器 PM1 采用频率  $f_1$  和  $2f_1$  的两种锯齿波组合调制, 且重复频率为  $p$ , 所以当环形腔的  $q$  次谐振频率为  $f + \frac{f_1 + 2f_1}{2}$  时, 输出只有直流分量; 而当谐振点偏离  $f + \frac{f_1 + 2f_1}{2}$  时, 在探测器  $D_2$  上可得到一个方波波形, 结合 (3) 式和 (5) 式, 方波幅度可表示如下

$$I_{D_{\text{out}}} = I_D \Big|_{f=f+2f_1} - I_D \Big|_{f=f+f_1} = (1-\alpha_c)\rho I_0 \left[ \frac{C_0^2}{C_0^2 + (f+f_1-f_q)^2} - \frac{C_0^2}{C_0^2 + (f+2f_1-f_q)^2} \right] \quad (6)$$

令  $f + \frac{f_1 + 2f_1}{2} - f_q = \Delta f$ , 则  $I_{D_{\text{out}}}$  可表示成谐振频率偏差  $\Delta f$  的函数

$$I_{D_{\text{out}}} = (1-\alpha_c)\rho I_0 \left[ \frac{C_0^2}{C_0^2 + (\Delta f - f_1/2)^2} - \frac{C_0^2}{C_0^2 + (\Delta f + f_1/2)^2} \right] \quad (7)$$

考虑 CW 光路, 此时相位调制器 PM2 采用的调制频率分别为  $f_2$  和  $f_1 + f_2$  ( $f_2$  可变), 相应地, 探测器  $D_1$  处输出的方波幅度可表示如下

$$I_{D_{\text{out}}} = I_D \Big|_{f=f+(f_1+f_2)} - I_D \Big|_{f=f+f_2} = (1-\alpha_c)\rho I_0 \left[ \frac{C_0^2}{C_0^2 + (f+f_2-f_q)^2} - \frac{C_0^2}{C_0^2 + (f+f_1+f_2-f_q)^2} \right] \quad (8)$$

令  $f + \frac{(f_1+f_2)+f_2}{2} - f_q = \Delta f$ , 则 CW 光路和 CCW 光路有相同的  $I_{D_{\text{out}}} \sim \Delta f$  关系曲线。

## 2.2 $I_{D_{\text{out}}} \sim \Delta f$ 分析

图 2 给出了一个 FSR 内的  $I_{D_{\text{out}}} \sim \Delta f$  的关系曲线示意图。由图可见, 在谐振点 ( $\Delta f = 0$ ) 附近, 曲线具有很好的线性, 这是谐振腔光纤陀螺的工作区间, 称为近似线性工作区 I; 在近似线性工作区的两侧, 是减函数性质的单调区间, 称为区域 II; 区域 I 和 II 的交界处, 则是方波幅度取极值时的谐振频率偏差值。

由 (7) 式对  $\Delta f$  求导数可以得到

$$\frac{dI_{D_{\text{out}}}}{d\Delta f} = (1-\alpha_c)\rho I_0 \left\{ \frac{2C_0^2(\Delta f + f_1/2)}{[C_0^2 + (\Delta f + f_1/2)^2]^2} - \right.$$

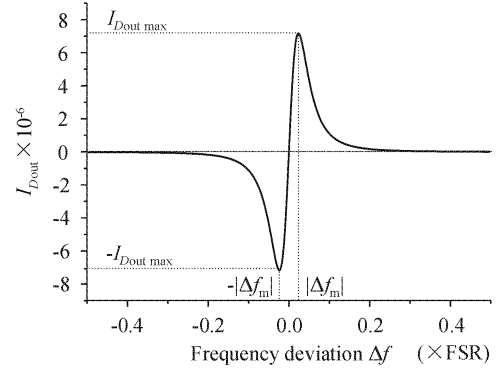


图 2 方波幅度  $I_{D_{\text{out}}}$  与谐振频率偏差  $\Delta f$  关系仿真图形

Fig. 2 Emulation of relationship between  $I_{D_{\text{out}}}$  and  $\Delta f$

$$\left. \frac{2C_0^2(\Delta f - f_1/2)}{[C_0^2 + (\Delta f - f_1/2)^2]^2} \right\} \quad (9)$$

令  $\frac{dI_{D_{\text{out}}}}{d\Delta f} = 0$ , 经整理可以得到一个关于  $\Delta f$  的方程

$$3\Delta f^4 + 2(C_0^2 - f_1^2/4)\Delta f^2 - (C_0^4 + f_1^4/16 + C_0^2 f_1^2/2) = 0 \quad (10)$$

解方程 (10), 舍去两个虚根可以得到  $I_{D_{\text{out}}}$  取极值时的  $\Delta f$  值, 即方波幅度绝对值最大的位置

$$|\Delta f_m| = \frac{2(f_1^2/4 - C_0^2) + \sqrt{16C_0^4 + f_1^4 + 4C_0^2 f_1^2}}{6} \quad (11)$$

将 (11) 式代入 (7) 式可以求得  $I_{D_{\text{out}}}$  的极值

$$|I_{D_{\text{out max}}}| = [2(1-\alpha_c)\rho I_0 C_0^2 f_1 \cdot |\Delta f_m|] \times [C_0^4 + 2C_0^2(\Delta f_m^2 + f_1^2/4) + \Delta f_m^4 + f_1^2/16 - \Delta f_m^2 f_1^2/2]^{-1} \quad (12)$$

由 (11) 和 (12) 式可知, 频差极值点位置和  $I_{D_{\text{out}}}$  极值的大小只取决于谐振腔陀螺光路系数和两种锯齿波频率差, 而与具体调制频率无关。

当  $\Delta f \ll f_1$  时, 忽略  $\Delta f$  项, 从 (9) 式可以得到一个与谐振频率偏差无关的曲线斜率

$$\frac{dI_{D_{\text{out}}}}{d\Delta f} = (1-\alpha_c)\rho I_0 \frac{2C_0^2(f_2 - f_1)}{(C_0^2 + f_1^2/4)^2} = k \quad (13)$$

上式得到的  $k$  即是近似线性工作区的近似斜率表示式。由 (9) 式和 (13) 式可知, 区域 I 的斜率可用一个常数  $k$  近似, 而区域 II 的斜率则随着谐振频率偏差改变。

## 3 谐振点跟踪算法和仿真

图 1 所示谐振腔光纤陀螺的工作原理可简述如下: 调节激光器输出光频率, 使 CCW 光路处于谐振

状态,探测器  $D_2$  输出一直流信号,此时 CCW 光路的谐振频率  $f_q^{\text{CCW}}$  满足

$$f_q^{\text{CCW}} = f + \frac{f_1 + 2f_1}{2} \quad (14)$$

改变 PM2 的调制频率  $f_2$ , 使 CW 光路也处于谐振状态,则 CW 光路的谐振频率  $f_q^{\text{CW}}$  满足

$$f_q^{\text{CW}} = f + \frac{(f_1 + f_2) + f_2}{2} \quad (15)$$

将(14)和(15)式代入(1)式可以得到

$$\Delta F = f_q^{\text{CW}} - f_q^{\text{CCW}} = f_2 - f_1 \quad (16)$$

由(16)式可知,通过检测  $f_2$  的大小,就可以获得谐振腔旋转角速度  $\Omega$ 。为获得  $f_2$  大小,需要依次锁定到 CCW 光路和 CW 光路的谐振点,即由探测器输出方波幅度,通过反馈频率改变激光器频率  $f$  (CCW 光路)和锯齿波调制频率  $f_2$  (CW 光路),使两路谐振频率偏差都为 0。已知 CW 光路和 CCW 光路有相同的  $I_{\text{Dout}} \sim \Delta f$  关系曲线,因此,以 CCW 光路为例分析谐振点的跟踪算法。

观察图 2  $I_{\text{Dout}} \sim \Delta f$  的关系曲线图,可以将曲线在  $\Delta f = \pm |\Delta f_m|$  处分成两个区域,中间的近似线性增函数区域(区域 I)和两侧的减函数区域(区域 II)。引入参数 eps,eps 为 DSP 系统设置的浮点相对精度,具体取值与谐振腔陀螺系统对方波幅度的检测精度有关,设最小检测精度为  $I_{\text{Dout min}}$ ,则可取  $\text{eps} = I_{\text{Dout min}}$ 。谐振点跟踪算法可描述如下:

1) 首先判别系统初始状态所处区域的位置,引入判据 1

$$|I_{\text{Dout2}}| > |I_{\text{Dout1}}|? \quad (17)$$

式中  $I_{\text{Dout1}}$  和  $I_{\text{Dout2}}$  分别为当谐振频率偏差为  $\Delta f_1$  和  $\Delta f_2$  时的方波幅度值,即  $I_{\text{Dout1}} = I_{\text{Dout}}(\Delta f_1)$ ,  $I_{\text{Dout2}} = I_{\text{Dout}}(\Delta f_2)$ 。说明:  $I_{\text{Dout0}}$  为系统启动方波幅度,  $\Delta f_0 = f_0 + \frac{f_1 + 2f_1}{2} - f_q^{\text{CCW}}$ ,  $f_0$  表示系统启动时激光器的输出光频率,  $\Delta f_0$  表示启动频差;反馈频差  $\delta f_1 = -I_{\text{Dout1}}/k$ ,  $\Delta f_2 = \Delta f_1 + \delta f_1$ 。若判据 1 成立,则表示频差  $\Delta f_1$  落入区域 II,反馈频差  $\delta f_2 = -\text{sign}(I_{\text{Dout1}}) \cdot |\Delta f_m|$ ,同时  $\Delta f_1 = \Delta f_2 + \delta f_2$ ,  $\delta f_1 = -I_{\text{Dout1}}/k$ ,  $\Delta f_2 = \Delta f_1 + \delta f_1$ ,进行判据 1。直至判据 1 不成立,则  $\Delta f_1$  进入  $I_{\text{Dout1}} = I_{\text{Dout2}}$ 。

2) 进入区域 I 后进行谐振点判别,引入判据 2

$$|I_{\text{Dout1}}| < \text{eps}? \quad (18)$$

若判据 2 不成立,则反馈频差  $\delta f_1 = -I_{\text{Dout1}}/k$ ,同时  $\Delta f_1 = \Delta f_1 + \delta f_1$ ,直至判据 2 成立,程序结束,锁定在谐振点。

在上面的算法中,区域 I 和 II 用了两个不同的反馈频差表示式,  $\delta f_2$  的引入是为了当谐振频率偏差位于区域 II 时可以较快地进入区域 I,同时又不致在区域 II 的两侧振荡;参数  $\delta f_i$  是用来累计反馈频差的。对 CCW 光路,锁定谐振点后,  $\delta f_i$  给出谐振点与  $I_{\text{Dout0}}$  对应的起始频差的距离,即  $-\Delta f_0$ 。在 CCW 光路锁定在谐振点后,在陀螺没有旋转时, CW 光路也处于谐振状态 ( $f_2$  初始值设为  $f_1$ );当陀螺有  $\Omega$  的旋转角速度时, CW 光路将不再处于谐振状态,需要引入反馈支路控制频率  $f_2$  的大小,每次反馈后,  $f_2 = f_1 + \delta f_i$ ,锁定到谐振点后,累加所得的  $\delta f_i$  即是 CW 光路和 CCW 光路的谐振频率差,即  $\delta f_i = \Delta F$ 。图 3 给出了谐振点跟踪算法的程序流程图。

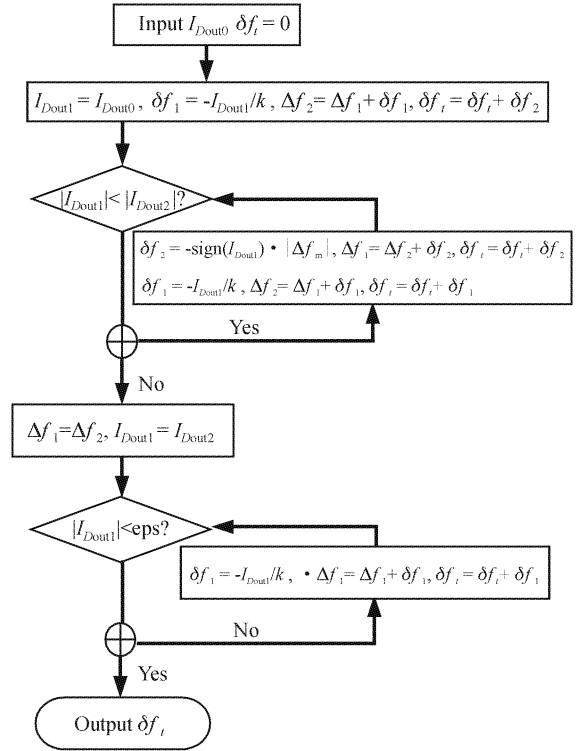


图 3 谐振点跟踪算法程序流程图

Fig. 3 Program flow chart for tracking resonant point

图 4(a)给出了  $I_{\text{Dout0}} = 1 \times 10^{-6}$  W,  $I_{\text{Dout1}} = 1 \times 10^{-7}$  W 时的频差移动情况,其中横坐标表示移动的次数。由图可知,频差  $\Delta f$  在进入近似线性区域 I 后经过短暂振荡之后能较快地锁定在谐振点 ( $\Delta f < \Delta F$ )。

图 4(b)给出了  $I_{\text{Dout0}} = 1 \times 10^{-6}$  W,  $I_{\text{Dout1}} = 1 \times 10^{-7}$  W 时每次移动后对应的  $I_{\text{Dout}}$  值。由图可知,锁定点的  $I_{\text{Dout}}$  值小于  $I_{\text{Dout min}}$ 。并且从图 4(b)可以进一

步看出,在进入近似线性区域 I 前,方波幅度移动轨迹与  $I_{Dout} \sim \Delta f$  在区域 II 的那部分曲线相似,每步反馈频差将逆向沿着  $I_{Dout} \sim \Delta f$  的曲线进入近似线性区域 I,在进入区域 I 后,经过短暂的振荡就锁定在谐振点。表 1 给出了不同启动方波幅度  $I_{Dout0}$  所需要的移频次数  $j$ ,最后锁定的频差值及对应的  $I_{Dout}$  值。

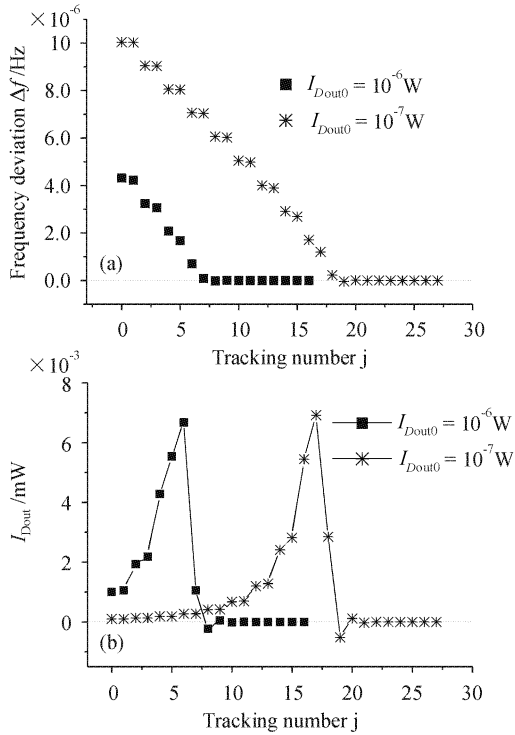


图 4  $I_{Dout0} = 1 \times 10^{-6} \text{ W}, 1 \times 10^{-7} \text{ W}$  时的谐振频率偏差跟踪情况(a)和跟踪轨迹(b)

Fig. 4 Distribution of resonator frequency deviation (a) and distribution of  $I_{Dout}$  (b) at every tracking number when  $I_{Dout0} = 1 \times 10^{-6} \text{ W}, 1 \times 10^{-7} \text{ W}$

表 1 计算参数:  $D = 10 \text{ cm}, n = 1.45, \lambda = 1.55 \mu\text{m}, I_0 = 1 \text{ mW}, k_C = 0.1$ , 耦合器  $C_3$  损耗  $0.4 \text{ dB}$ , 光纤环损耗  $0.05 \text{ dB}$ , 激光器线宽  $2 \text{ MHz}, \Omega = 1^\circ/\text{h}$ . 此时  $\Delta F = 0.2157 \text{ Hz}, I_{Dout \text{ max}} = 7.1632 \times 10^{-6} \text{ W}, I_{Dout \text{ min}} = 2.8090 \times 10^{-12} \text{ W}, \text{eps} = I_{Dout \text{ min}}$ . 由表 1 可知,最长经过 27 次的反馈移频就可以锁定在谐

表 1 不同启动方波幅度  $I_{Dout0}$  所需跟踪次数和频率检测精度及锁定点对应的  $I_{Dout}$  值

Table 1 Presents total tracking number  $j$ , detection precision and  $I_{Dout}$  value in lock anchor under different  $I_{Dout0}$

$I_{Dout0}$ /W	Tracking number, $j$	Detection precision /Hz	$I_{Dout}$ in lock anchor /W
$1 \times 10^{-6}$	16	-0.09405	$1.22519 \times 10^{-12}$
$1 \times 10^{-7}$	27	-0.21495	$-2.8001 \times 10^{-12}$
$1 \times 10^{-8}$	6	0.08589	$1.1188 \times 10^{-12}$
$1 \times 10^{-9}$	4	0.17824	$2.32185 \times 10^{-12}$
$1 \times 10^{-10}$	3	-0.0812	$-1.05772 \times 10^{-12}$
$1 \times 10^{-11}$	1	-0.16849	$-2.1949 \times 10^{-12}$
$1 \times 10^{-12}$	1	0.07678	$1 \times 10^{-12}$

振点。这种算法的优点在于避免了对(7)式的复杂数值求解,并且频差检测精度只取决于 DSP 系统设定的浮点精度 eps 的数值,可以根据分辨率要求进行研制不同精度要求的陀螺系统。

### 4 结 论

利用多次反馈频率操作来依次跟踪光纤陀螺顺时针和逆时针光束的谐振点,从而避免了谐振频率偏差复杂的求根算法。仿真结果表明,多次反馈频率操作,可以较快地锁定到谐振点。本文提出的信号检测方法和谐振点跟踪算法可以比较方便地在数字信号处理专用 DSP 芯片上实现。

### 参 考 文 献

- 1 W. W. Chow, J. Gea-Banaciloche, L. M. Pedrotti. The ring laser gyro [J]. *Rev. Mod. Phys.*, 1985, **57**(1):61~103
- 2 A. R. Marvern. Progress towards fiber optic gyro production [C]. *SPIE*, 1991, **1585**:48~64
- 3 R. E. Meyer, S. Ezekiel, D. W. Stowe *et al.*. Passive fiber-optic ring resonator for rotation sensing [J]. *Opt. Lett.*, 1983, **8** (12):644~646
- 4 Ma Huilian, Jin Zhonghe, Ding Chun *et al.*. Influence of spectral linewidth of laser on resonance characteristics in fiber ring resonator [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(8):731~734

马慧莲,金仲和,丁纯等. 激光器线宽对光纤环形谐振腔谐振特性的影响[J]. 中国激光, 2003, **30**(8):731~734