

文章编号: 0258-7025(2008)12-1924-06

# 光纤陀螺调制器的残余强度调制影响与消除

胡宗福

(同济大学信息与通信系, 上海 201804)

**摘要** 光纤陀螺(IFOG)用相位调制器的残余强度调制(RIM)直接影响标度因子稳定性。对 Y 波导调制器残余强度调制特性进行了实验测试,根据测试结果给出了残余强度调制特性的近似公式。对开环光纤陀螺,在调制器存在内静电电压时,残余强度调制对标度因子稳定性影响的大小与调制器两分支残余强度调制系数的差和内静电电压成正比;对数字闭环方式,残余强度调制不仅直接影响标度因子稳定性,也影响由  $2\pi$  复位环路确定的调制信号最高电压而间接影响标度因子稳定性,影响的大小与调制器两分支残余强度调制系数的差成正比,但与电光系数成反比。提出的三时隙解调方法不仅能消除残余强度调制的直接影响,也能消除通过  $2\pi$  复位环路的间接影响。

**关键词** 传感器;光纤陀螺;残余强度调制;三时隙解调;标度因子稳定性;Y 波导调制器

**中图分类号** TP212.14, TP211+.6 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL20083512.1924

## Effects of Residual Intensity Modulation of Y-Waveguide Modulator on Interferometric Fiber Optic Gyroscope and Elimination Method

Hu Zongfu

(Department of Information & Communication Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract** The residual intensity modulation (RIM) of a Y-waveguide modulator used in an interferometric fiber optic gyroscope (IFOG) directly impacts the stability of IFOG's scale factor. RIM is tested, and based on above results, RIM's characteristic formula is given. RIM deteriorates the scale factor stability of an open-loop IFOG when there is inner static voltage in the modulator. The deterioration is proportional to the inner static voltage and  $\alpha_2 - \alpha_1$ , the difference of RIM's coefficient between the two branches of the modulator. For a close-loop IFOG, RIM deteriorates its scale factor stability not only directly but also indirectly through  $2\pi$ -replacement loop that determines the peak voltage of modulation signals. The deterioration is proportional to  $\alpha_2 - \alpha_1$ , but inversely proportional to the modulator's electro-optic coefficient. A demodulation method employing three time slots is suggested that can completely remove the direct and indirect deterioration.

**Key words** sensors; interferometric fiber optic gyroscope; residual intensity modulation; three time slots demodulation; scale factor stability; Y-waveguide modulator

## 1 引言

光学陀螺无运动部件的独特优点使其得到了快速的发展,国外 He-Ne 激光陀螺和干涉型光纤陀螺(IFOG)已经实用化,同时新型光学陀螺——集成光学陀螺<sup>[1]</sup>、谐振式光纤陀螺<sup>[2]</sup>和环形光纤激光陀螺<sup>[3]</sup>备受关注。标度因子和偏置的稳定性是光纤陀

螺最主要的性能参数之一。目前在采取信号处理来改善标度因子和偏置稳定性<sup>[4,5]</sup>方面做了许多研究。影响标度因子稳定性的主要因数有:光源平均波长稳定性与重复性<sup>[6,7]</sup>、光纤传感线圈参数的稳定性与重复性、调制器电光系数的线性度<sup>[8,9]</sup>等。本文指出 Y 波导调制器的残余强度调制(RIM)也

收稿日期:2008-05-27;收到修改稿日期:2008-07-04

作者简介:胡宗福(1959—),男,安徽人,副教授,博士,主要从事光纤激光、光纤传感和光纤通信方面的研究

E-mail: huzongfu@mail.tongji.edu.cn

会影响标度因子稳定性,并对 Y 波导调制器残余强度调制进行了测试,并根据测试结果分析了它对开环和闭环光纤陀螺的影响以及对数字闭环光纤陀螺  $2\pi$  复位的影响,并提出了消除影响的方法。

## 2 Y 波导调制器的残余强度调制测试

Y 波导调制器的残余强度调制测试框图如图 1 所示,光电探测器 PINFET 的光电转换系数为  $1.2 \text{ V}/\mu\text{W}$ (输入光功率为 0 时的输出电压为  $-0.75$

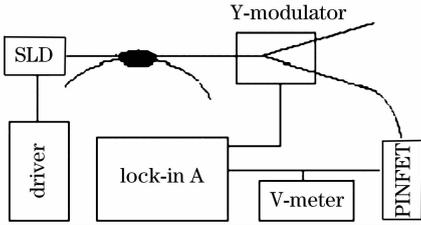


图 1 Y 波导调制器的残余强度调制测试系统  
Fig.1 Testing system for the RIM of a Y-waveguide modulator

V), SLD 是宽带光源,调制器由北京世维通公司生产。测试条件:1)调整输入光功率,维持光电探测器 PINFET 的输出电压在 0 V 附近(这是闭环光纤陀螺的工作状态);2)调制电压  $V_m(t) = V_0 \sin(2\pi \times 2 \times 10^5 t)$ , ( $V_0 = 3.2 \text{ V}$  因为调制器的半波电压为

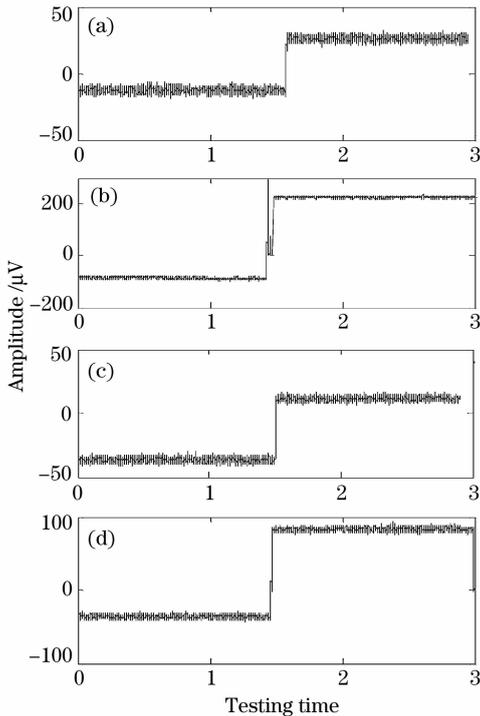


图 2 4 只 Y 波导调制器两分支的残余强度调制测试数据  
Fig.2 Testing data of RIM of four Y-waveguide modulators

3.2 V 左右)。实验测试了 10 只调制器,4 室温测试结果稳定,见图 2(a~d)所示(测试时间 30 min),图中第一段(负)和第二段(正)分别对应 Y1 与 Y2 分支的残余强度调制幅值。测试值显示:1)不同调制器的残余强度调制相差很大,残余强度调制最大的幅值为  $227 \mu\text{V}$ ,最小的只有十几微伏,对应的残余强度调制与输出的比在  $(284 \sim 12) \times 10^{-6}$ ;2)一个调制器的两分支的残余强度调制大小近似为两倍关系。两分支残余强度调制幅值的符号相反是由于调制器的推挽电极结构所致。

实验测试了以上 4 只调制器的残余强度调制大小与调制电压的关系,图 2(d)调制器的实验测试结果如图 3 所示。输入光功率和调制频率同以上测试条件,调制电压分别为 1 V,2 V,3 V,4 V,5 V,6 V 和 7 V,开始调制电压是 1 V。对应的残余强度调制电压约  $25 \mu\text{V}$ ;最大调制电压对应的残余强度调制电压约  $175 \mu\text{V}$ 。从图中看到,残余强度调制大小与调制电压成线性关系。根据以上测试结果,调制器的两分支输出光功率表示为

$$\begin{cases} P_1(t) = k_{Y1} P_0 e^{-\alpha_1 V_m(t)} \approx k_{Y1} P_0 [1 - \alpha_1 V_m(t)] \\ P_2(t) = k_{Y2} P_0 e^{-\alpha_2 [-V_m(t)]} \approx k_{Y1} P_0 [1 + \alpha_2 V_m(t)] \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $P_0$  为调制器的输入光功率;  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  为引入的外加电压引起的残余强度调制系数;  $k_{Y1}$  和  $k_{Y2}$  为 Y1 与 Y2 分支的插入损耗。  $-V_m(t)$  是由于调制器的推挽电极结构, Y1 与 Y2 分支上的电场方向相反。设  $k_{pin}$  为 PINFET 的光电转换系数,锁相放大器解调出的残余强度调制电压信号为:  $V_1(t) \approx k_{pin} k_{Y1} P_0 [1 - \alpha_1 V_m(t)]$ , 所以同步解调得到的残余强度调制的幅值为:  $V_1 \approx -\alpha_1 V_0 k_{pin} k_{Y1} P_0$ 。

另外,残余强度调制的大小是随着温度变化的,图 4 是图 2(d)调制器的残余强度调制在高低温下

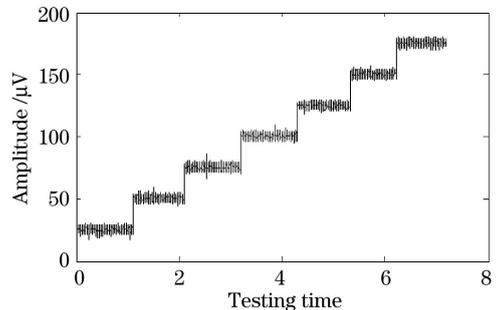


图 3 调制电压从 1 V 增加到 7 V 时 Y 波导调制器的残余强度调制测试数据  
Fig.3 RIM of a Y-waveguide modulator at the modulating voltage from 1 V to 7 V

的测量结果(测试条件同图 2)。从图上看到:初始值约为  $80 \mu\text{V}$ , 高低温下的幅值变化达到  $175 \mu\text{V}$ 。所以根据两分支的残余强度调制大小近似为两倍关系, 可以认为两分支的残余强度调制大小的差为  $3.2|\alpha_1 - \alpha_2|_{\max} \approx 80 \mu\text{V}/0.75 \text{ V} \approx 105 \times 10^{-6}$ 。这可能与调制器的折射率分布在高低温下变化以及  $\text{LiNbO}_3$  材料的特性有关。

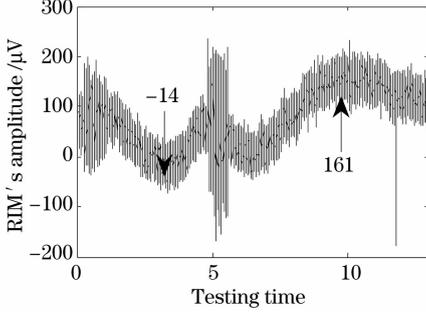


图 4 高低温( $-40 \sim +60 \text{ }^\circ\text{C}$  循环下 Y 波导调制器的残余强度调制测试数据

Fig. 4 Testing data of RIM of a Y-waveguide modulator under temperature circle ( $-40 \sim +60 \text{ }^\circ\text{C}$ )

### 3 Y 波导调制器的残余强度调制对开环光纤陀螺的影响

设光源的输出功率为  $2P_0$ , 经 3 dB 耦合器进入调制器的光功率为  $P_0$ 。由于分束比的影响可以等效为损耗, 所以假设它是理想的 1:1, 且不计 Sagnac 相移外其他非互易相移, 顺时针 (CW) 与逆时针 (CCW) 在合波时的光波场可表示为

$$\begin{cases} E_{Y1}(t) = \sqrt{k_L P_0} e^{[-\alpha_1 V_m(t) + \alpha_2 V_m(t-\tau)]/2} \times \\ e^{-i[\varphi_R(t) - k_p V_m(t) + k_p V_m(t-\tau)]/2} \\ E_{Y2}(t) = \sqrt{k_L P_0} e^{[+\alpha_2 V_m(t) - \alpha_1 V_m(t-\tau)]/2} \times \\ e^{i[\varphi_R(t) - k_p V_m(t) + k_p V_m(t-\tau)]/2} \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $k_L = k_{Y1} k_F k_{Y2}$ ,  $k_F$  为光纤传感线圈的插入损耗;  $\tau$  为光纤传感线圈的时延;  $k_p$  为调制器的电光系数;  $\varphi_R(t) = k_\Omega \Omega(t)$  为 Sagnac 相移,  $\Omega(t)$  为输入角速度,  $k_\Omega = 2\pi LD/c\lambda_0$ ,  $L$  为传感线圈的光纤长度,  $D$  为传感线圈的直径,  $\lambda_0$  为光源的平均波长,  $c$  为光速。在光纤陀螺中, 经 3 dB 耦合器返回到光电检测器的光功率为  $P_G(t) = |E_{Y1}(t) + E_{Y2}(t)|^2/2$ , 将 (2) 式代入后利用  $e^{-\alpha_1 V_m(t)} \approx 1 - \alpha_1 V_m(t)$  经化简得:

$$P_G(t) = k_L P_0 \{2 + (\alpha_2 - \alpha_1) \times [V_m(t) + V_m(t-\tau)]\} \{1 + \cos [\varphi_R(t) - k_p V_m(t) + k_p V_m(t-\tau)]\}. \quad (3)$$

对数字开环光纤陀螺, 调制电压  $V_m(t)$  满足  $k_p [V_m(t) - V_m(t-\tau)] = \pm \pi/2$ , 且  $V_m(t-\tau) = -V_m(t)$ , 由于本文主要讨论调制器残余强度调制的影响, 所以忽略所有噪声影响。(3) 式的干涉光强经光电检测器、前置放大和解调后的输出电压为

$$U_\Omega(t) = 2kk_{\text{pin}}k_L P_0 \sin \varphi_R(t), \quad (4)$$

式中  $k$  为前置放大器的放大倍数。(4) 式表明残余强度调制对开环光纤陀螺的偏置和标度因子稳定性没有影响。但是, 目前广泛使用的调制器基片材料  $\text{LiNbO}_3$  有压电与热电效应, 即在环境温度和压力变化时, 调制器自身会产生电荷积累形成内静电电压, 设其为  $V_s$ , 它是慢变化的, 不满足  $V_s(t-\tau) = -V_s(t)$ , 而是  $V_s(t-\tau) \approx V_s(t)$ , 考虑内静电电压影响时开环光纤陀螺的输出变为(如静电电压得不到及时释放)

$$U_\Omega(t) = 4kk_{\text{pin}}k_L P_0 \times [1 + (\alpha_2 - \alpha_1)V_s(t)] \sin \varphi_R(t) \quad (5)$$

由于调制器内静电电压  $V_s$  和残余强度调制系数是随环境变化的, 这时残余强度调制就会影响开环光纤陀螺的标度因子稳定性, 但仍不影响偏置的稳定性。

### 4 Y 波导调制器的残余强度调制对数字闭环光纤陀螺的影响

#### 4.1 残余强度调制对标度因子稳定性的影响

对数字闭环光纤陀螺, 用 16 位 D/A (实验中 D/A 输出的最大数是 65530), 设阶梯波从  $t = 0$  时刻开始, 加在调制器上的阶梯波电压为

$$V_m(t) = \frac{V_{\max}}{65530} \begin{cases} N_0 + \left( \left\lfloor \frac{t}{\tau} \right\rfloor + 1 \right) \cdot N_\Omega + N_0 & 2n\tau < t < (2n+1)\tau \\ N_0 + \left( \left\lfloor \frac{t}{\tau} \right\rfloor + 1 \right) \cdot N_\Omega - N_0 & (2n+1)\tau < t < 2(n+1)\tau \\ n = 0, 1, 2, \dots \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $\left\lfloor \frac{t}{\tau} \right\rfloor$  表示取整数部分;  $V_{\max}$  是加在调制器上的最高电压;  $N_0$  满足  $k_p \frac{V_{\max}}{2^{16}} \times N_0 = \frac{\pi}{4}$ , 对应于  $\pm \frac{\pi}{2}$  相位调制;  $N_\Omega$  为数字阶梯波的数字阶梯高度,  $N_\Omega \frac{V_{\max}}{65530}$  是闭环反馈阶梯波电压信号的阶梯高度。那么

$$V_m(t) + V_m(t - \tau) = \frac{V_{\max}}{65530} \left[ 2N_0 + \left( 2 \left\lfloor \frac{t}{\tau} \right\rfloor + 1 \right) N_\Omega \right]$$

$$V_m(t) - V_m(t - \tau) = \frac{V_{\max}}{65530} \begin{cases} N_\Omega + 2N_0 & 2n\tau < t < (2n+1)\tau \\ N_\Omega - 2N_0 & (2n+1)\tau < t < 2(n+1)\tau \end{cases} \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

在(6)式的调制电压作用下,干涉光强经光电检测器和前置放大后的输出信号电压(非  $2\pi$  复位期间,且不考虑噪声)

$$V(t) = A \left\{ 2 + (\alpha_2 - \alpha_1) \frac{V_{\max}}{65530} \left[ 2N_0 + \left( 2 \left\lfloor \frac{t}{\tau} \right\rfloor + 1 \right) N_\Omega \right] \right\} \left\{ 1 + \cos \left[ \varphi_R(t) - k_p \frac{V_{\max}}{65530} (N_\Omega \pm 2N_0) \right] \right\}, \quad (7)$$

$$V(t - \tau) = A \left\{ 2 + (\alpha_2 - \alpha_1) \frac{V_{\max}}{65530} \left[ 2N_0 + \left( 2 \left\lfloor \frac{t - \tau}{\tau} \right\rfloor + 1 \right) N_\Omega \right] \right\} \times \left\{ 1 + \cos \left[ \varphi_R(t - \tau) - k_p \frac{V_{\max}}{65530} (N_\Omega \mp 2N_0) \right] \right\}, \quad (8)$$

式中,幅值系数  $A = kk_{\text{pin}}k_L P_0$ ; 因为  $\varphi_R(t)$  是慢变化的,有  $\varphi_R(t) \approx \varphi_R(t - \tau)$ ; 在闭环状态下,有  $\varphi_R(t) - k_p \frac{V_{\max}}{65530} N_\Omega \approx 0$ , 所以  $\sin \left[ \varphi_R(t) - k_p \frac{V_{\max}}{65530} N_\Omega \right] \approx \varphi_R(t) - k_p \frac{V_{\max}}{65530} N_\Omega$ 。在讨论非  $2\pi$  复位期间的解调值时,

设  $t$  时刻有  $V_m(t) - V_m(t - \tau) = \frac{V_{\max}}{65530} (N_\Omega - 2N_0)$ , 由(3)式可知余弦的调制相位为  $+\pi/2$ , 称为  $+\pi/2$  调制,解调值为

$$U_\Omega(t) = V(t) - V(t - \tau) \approx 2A(\alpha_2 - \alpha_1) \frac{V_{\max}}{65530} N_\Omega - 4A \left\{ 1 + (\alpha_2 - \alpha_1) \left[ \frac{V_{\max}}{65530} \left( N_0 + \left\lfloor \frac{t}{\tau} \right\rfloor N_\Omega \right) \right] \sin \left[ \varphi_R(t) - k_p \frac{V_{\max}}{65530} N_\Omega \right] \right\}. \quad (9)$$

在稳态闭环工作时,有  $U_\Omega(t) \approx 0$  (因为本文不考虑噪声影响,实际是一段时间的平均解调值为 0), 考虑到  $\alpha_2 - \alpha_1 \ll 1\%$ , 数字闭环陀螺的输出

$$N_\Omega \approx \frac{65530}{k_p V_{\max}} \left( 1 - \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{2k_p} \right) \varphi_R(t), \quad (10)$$

(10)式表明,残余强度调制虽然不影响闭环光纤陀螺的偏置,但由于残余强度调制系数是变化的,所以影响标度因子稳定性。

同以上条件,当  $t$  时刻对应着  $-\pi/2$  调制时,数字闭环陀螺的输出

$$N_\Omega \approx \frac{65530}{k_p V_{\max}} \left( 1 + \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{2k_p} \right) \varphi_R(t), \quad (11)$$

(11)式说明  $t$  时刻对应着  $+\pi/2$  调制时,残余强度调制对标度因子的影响与对应的  $+\pi/2$  调制时相反,所以实际解调都是采用固定  $+\pi/2$  (或  $-\pi/2$ )。

利用残余强度调制的测试数据可得:  $\left| \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{2k_p} \right|_{\max} = \frac{106}{2\pi} \approx 17 \times 10^{-6}$ , 即残余强度调制限制的标度因子稳定性在  $17 \times 10^{-6}$  左右。容易证明调制器上静电电压对数字闭环陀螺的影响可以忽略。

#### 4.2 残余强度调制对 $2\pi$ 复位的影响

利用  $2\pi$  复位误差信号能够解决调制器的光电

系数随温度的变化问题,它利用余弦函数的周期性,通过检测复位前后信号的差来判断复位前后的相位差是否为  $2\pi$ , 当相位差是  $2\pi$  时,复位误差信号理想情况下应为 0。

设系统在调制相位为  $+\pi/2$  时刻  $t = t_0$  出现  $+2\pi$  复位,利用(6)~(8)式可得在  $2\pi$  复位时的解调输出为

$$U_\Omega^{+90}(t_0) = V(t_0) - V(t_0 - \tau) = A(\alpha_2 - \alpha_1) \frac{V_{\max}}{65530} (2N_\Omega - 52424) - 2A \left\{ \sin \left[ \varphi_R(t_0) - k_p \frac{V_{\max}}{2^{16}} N_\Omega + k_p V_{\max} \frac{52424}{65530} \right] + \sin \left[ \varphi_R(t_0) - k_p \frac{V_{\max}}{2^{16}} N_\Omega \right] \right\}. \quad (12)$$

设  $k_p V_{\max} \frac{52424}{65530} = 2\pi$ , 即理想的  $2\pi$  复位,将稳态闭环工作的(10)式代入(12)式得  $2\pi$  复位误差信号电压:

$$U_\Omega^{+90}(t_0) = A(\alpha_1 - \alpha_2) V_{\max} \frac{52424}{65530} = A(\alpha_1 - \alpha_2) \frac{2\pi}{k_p}, \quad (13)$$

(13)式表明即使在理想的  $2\pi$  复位,残余强度调制使得  $2\pi$  复位误差信号不为 0, 这将导致理想的  $2\pi$  复位被错误地判为非理想的  $2\pi$  复位,使系统错误地对

$V_{\max}$  进行调节。设  $\alpha_2 > \alpha_1$ , 有复位误差  $U_{\Omega}^{+90}(t_0) < 0$ ,  $2\pi$  复位系统将误认为是  $k_p V_{\max} \frac{52424}{65530} > 2\pi$ ,  $2\pi$  复位系统将自动减小  $V_{\max}$ , 设减小量为  $\Delta V^{+90}$ , 则  $\Delta V^{+90}$  满足:  $2A \sin\left(k_p \frac{V_{\max} - \Delta V^{+90}}{65530} \times 52424\right) = U_{\Omega}^{+90}$ , 由于  $k_p \frac{\Delta V^{+90}}{65530} \times 52424 \ll 1$ , 所以解得

$$\Delta V^{+90} = (\alpha_2 - \alpha_1) V_{\max} / 2k_p, \quad (14)$$

所以经  $2\pi$  复位环路调整后的调制信号最高电压为  $V'_{\max} = V_{\max} - \Delta V^{+90}$ , 代入(10)式得到经  $2\pi$  复位环路调整后的输出:  $N'_{\Omega} \approx \frac{65530}{k_p V_{\max}} \varphi_R(t)$ , 与残余强度调制无关。

然而, 由于  $2\pi$  复位的随机性, 当系统在调制相位为  $-\pi/2$  时刻  $t = t_0$  出现  $+2\pi$  复位时, 利用稳态闭环工作的(11)式同样能导出  $2\pi$  复位误差信号电压为  $U_{\Omega}^{-90}(t_0) = A(\alpha_1 - \alpha_2) \frac{2\pi}{k_p}$ , 由于此时复位发生在  $-\pi/2$  调制,  $2\pi$  复位系统将误认为是  $k_p V_{\max} \times \frac{52424}{65530} < 2\pi$ ,  $2\pi$  复位系统将自动增大  $V_{\max}$ , 同样可以求得增大量为  $\Delta V^{-90} = (\alpha_2 - \alpha_1) V_{\max} / 2k_p$ , 这样将经  $2\pi$  复位环路调整后的调制信号最高电压为  $V'_{\max} = V_{\max} + \Delta V^{-90}$ , 代入(10)式得到经  $2\pi$  复位环路调整后的输出

$$N'_{\Omega} \approx \frac{65530}{k_p V_{\max}} \frac{1 - (\alpha_2 - \alpha_1) / 2k_p}{1 + (\alpha_2 - \alpha_1) / 2k_p} \varphi_R(t) \quad (15)$$

(15)式表明残余强度调制的影响增大了。由于  $2\pi$  复位时刻的随机性, 标度因子将出现与残余强度调制有关的随机波动。

## 5 Y 波导调制器强度调制影响的解决方法

由于强度调制是通过  $V_m(t) + V_m(t - \tau)$  起作用的, 所以可以利用三时隙解调来消除它的影响。在非  $2\pi$  复位期间, 有

$$U_{\Omega}(t + \tau) = A \left[ 2(\alpha_2 - \alpha_1) \frac{V_{\max}}{65530} N_{\Omega} \right] - 4A \sin \left[ \varphi_R(t - \tau) - k_p \frac{V_{\max}}{65530} N_{\Omega} \right],$$

所以

$$\begin{aligned} U_{\Omega}(t) - U_{\Omega}(t + \tau) &= 2V(t) - V(t - \tau) - \\ V(t + \tau) &= 8A \sin \left[ \varphi_R(t) - k_p \frac{V_{\max}}{65530} N_{\Omega} \right]. \end{aligned} \quad (16)$$

将(16)式作为稳定闭环的条件, 即(16)式等于 0, 得到与残余强度调制系数无关的输出:

$$N_{\Omega} \approx \frac{65530}{k_p V_{\max}} \varphi_R(t). \quad (17)$$

同样地, 采用三时隙解调也能消除残余强度调制对  $2\pi$  复位误差信号的影响, 在  $+\pi/2$  复位时, 有

$$\begin{aligned} U_{\Omega}^{-90}(t_0) - U_{\Omega}^{-90}(t_0 + \tau) &= \\ 2V(t_0) - V(t_0 - \tau) - V(t_0 + \tau) &= \\ 4A \sin \left[ \varphi_R(t) - k_p \frac{V_{\max}}{65530} (N_{\Omega} - 52424) \right] + \\ 4A \sin \left[ \varphi_R(t) - k_p \frac{V_{\max}}{65530} N_{\Omega} \right]. \end{aligned} \quad (18)$$

利用稳定闭环条件得到复位误差信号

$$\begin{aligned} U_{\Omega}^{-90}(t_0) - U_{\Omega}^{-90}(t_0 + \tau) &\approx \\ 4A \sin \left( k_p V_{\max} \frac{52424}{65530} \right). \end{aligned} \quad (19)$$

(19)式与残余强度调制系数无关, 当  $k_p V_{\max} \frac{52424}{65530} = 2\pi$  时, 复位误差信号为 0。同样地, 在  $+\pi/2$  复位时也能导出相同的结果, 此方法对  $-2\pi$  复位同样有效。所以三时隙解调方法同样能完全消除残余强度调制对  $2\pi$  复位环路的影响。另一方面, 残余强度调制的影响也可以利用数字信号处理的方法来消除。

## 6 结 论

对 Y 波导调制器的残余强度调制的实验测量结果显示: 残余强度调制的大小与调制电压成正比, 残余强度调制与输出的比一般在  $284 \times 10^{-6} \sim 12 \times 10^{-6}$ , 而且随环境温度的变化很大; 一个调制器的两支的残余强度调制大小近似为两倍关系。

根据残余强度调制特性, 从理论上系统地分析了 Y 波导调制器的残余强度调制对数字开环/闭环光纤陀螺的影响, 分析结果表明: 1) 残余强度调制不影响光纤陀螺的偏置; 2) 它对开环与闭环光纤陀螺标度因子稳定性的影响是不同的; 3) 对开环光纤陀螺, 仅在调制器内有静电压  $V_s$  时影响标度因子及其稳定性, 它限制的标度因子稳定性范围是  $V_s(\alpha_2 - \alpha_1)$ ; 4) 对数字闭环光纤陀螺, 当解调采用相位调制的正半周  $+\pi/2$  减去负半周  $-\pi/2$  时, 残余强度调制使标度因子的相对减小为  $(\alpha_2 - \alpha_1) / 2k_p$ ; 相反地, 当采用相位调制的负半周  $-\pi/2$  减去正半周  $+\pi/2$  时, 残余强度调制使标度因子相对增大量为  $(\alpha_2 - \alpha_1) / 2k_p$ ; 5) 残余强度调制也会通过  $2\pi$  复位影响调制信号的最高电压  $V_{\max}$ , 从而影响标度因子的稳定性, 且与  $2\pi$  复位发生在  $+\pi/2$  (或  $-\pi/2$ ) 相位调

制有关。由于数字闭环系统  $2\pi$  复位的随机性, 所以常规的解调方法得到的标度因子将会出现随机波动。残余强度调制可以采用三时隙解调方法完全消除其对标度因子稳定性的影响。

### 参 考 文 献

- 1 Wang Mahua, Cui Yiping, Zhang Tong. Investigation on the optimization for the coupling coefficient of polymer integrated optic gyros[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(10): 1793~1796  
王马华, 崔一平, 张彤. 聚合物集成光学陀螺最佳耦合系数的研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(10): 1793~1796
- 2 Yang Zhihui, Ma Huilian, Zheng Yangming *et al.*. Frequency locking technique in digital closed-loop resonator fiber optic gyro[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(6): 814~819  
杨志怀, 马慧莲, 郑阳明等. 谐振式光纤陀螺数字闭环系统锁频技术[J]. *中国激光*, 2007, **34**(6): 814~819
- 3 Jingren Qian, Jue Su, Xuxu Wang *et al.*. Er-doped fiber ring laser gyroscope operating in continuous waves[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(4): 229~231
- 4 Ye Wei, Zhou Kejiang. Noise of fractal brownian motion in high performance fiber optic gyros [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2000, **29**(6): 217~221  
叶炜, 周柯江. 中高精度光纤陀螺的分形噪音研究[J]. *光子学报*, 2000, **29**(6): 217~221
- 5 Yang Tingpeng, Gao Yanan, Chen Jiabin. Allan variance analyse of the drift of the fiber-optic gyroscope [J]. *Optical Technique*, 2005, **31**(1): 87~89  
杨亭鹏, 高亚楠, 陈家斌. 光纤陀螺仪零漂信号的 Allan 方差分析[J]. *光学技术*, 2005, **31**(1): 87~89
- 6 Gong Zhaotao, Shu Xiaowu, Mou Xudong *et al.*. Analysis of the temperature fluctuating of FOG's source [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(12): 1910~1193  
宫兆涛, 舒晓武, 牟旭东等. 光纤陀螺用光源全温度工作交越失真研究[J]. *光子学报*, 2005, **34**(12): 1910~1193
- 7 Yang Yuanhong, Wang Zheng, Yi Xiaosu *et al.*. High precision fiber optic gyroscope based on Er-doped superfluorescent fiber source [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2005, **31**(11): 1159~1162  
杨远洪, 王峥, 伊小素等. 基于掺铒超荧光光纤光源的高精度光纤陀螺[J]. *北京航空航天大学学报*, 2005, **31**(11): 1159~1162
- 8 Xie Yuanping, Song Zhangqi, Yao Qiong *et al.*. Influence of phase modulator non-linearities on measurement of work point and signal demodulation in open-loop fiber optic gyroscope[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(7): 848~850  
谢元平, 宋章启, 姚琼等. 相位调制非线性对开环光纤陀螺工作点测量与信号解调的影响[J]. *中国激光*, 2004, **31**(7): 848~850
- 9 Li Xuyou, Wang Changwei, Zou Jibin. The influence of integrated optic device's stability for fiber optic gyroscope[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(6): 830~834  
李绪友, 王长伟, 邹继斌. 集成光学器件对光纤陀螺稳定性影响的研究[J]. *光子学报*, 2005, **34**(6): 830~834