

# Y波导相位调制器直流相位漂移参数测试系统研制

肖金根<sup>1,2</sup>, 肖浩<sup>1,2</sup>, 李建光<sup>2</sup>, 刘凡<sup>2</sup>, 王强龙<sup>2</sup>

<sup>1</sup>江西理工大学, 江西 赣州

<sup>2</sup>北京世维通光智能科技有限公司, 北京

Email: 18279661790@163.com

收稿日期: 2021年3月16日; 录用日期: 2021年4月16日; 发布日期: 2021年4月27日

## 摘要

本文对光纤陀螺系统中Y波导相位调制器的直流相位漂移参数进行研究分析, 搭建了一套全自动测试系统, 在实现对Y波导处于常温下准确测试的基础上, 首次实现全温下(-40℃~+85℃)直流相位漂移参数一键式自动化测试。结果表明: 搭建的测试系统能够连续、快速地对Y波导的直流相位漂移参数进行测试, 在常温下直流相位漂移参数的标准差小于72 ppm, 在全温下直流相位漂移波动幅度在3.06‰以内, 全温状态下直流相位漂移参数具有重复性。

## 关键词

Y波导相位调制器, 直流相位漂移, 全温特性, 自动化测试系统

# Development of Measurement System for DC Phase Drift Parameters of Y-Waveguide Phase Modulator

Jingen Xiao<sup>1,2</sup>, Hao Xiao<sup>1,2</sup>, Jianguang Li<sup>2</sup>, Fan Liu<sup>2</sup>, Qianglong Wang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>JiangXi University of Science and Technology, Ganzhou Jiangxi

<sup>2</sup>Beijing SWT Intelligent Optics Technology Co., Ltd., Beijing

Email: 18279661790@163.com

Received: Mar. 16<sup>th</sup>, 2021; accepted: Apr. 16<sup>th</sup>, 2021; published: Apr. 27<sup>th</sup>, 2021

## Abstract

In this paper, the DC phase drift parameters of Y-waveguide phase modulator in fog system are

文章引用: 肖金根, 肖浩, 李建光, 刘凡, 王强龙. Y波导相位调制器直流相位漂移参数测试系统研制[J]. 传感器技术与应用, 2021, 9(2): 80-88. DOI: 10.12677/jsta.2021.92011

studied and analyzed, and a set of automatic test system is built. Based on the accurate test of Y-waveguide at room temperature, the one click automatic test of DC phase drift parameters at full temperature ( $-40^{\circ}\text{C}\sim 85^{\circ}\text{C}$ ) is realized for the first time. The results show that the test system can continuously and quickly test the DC phase drift parameters of Y-waveguide, the standard deviation of DC phase drift parameters is less than 72 ppm at room temperature, the fluctuation amplitude of DC phase drift is less than 3.06‰ at full temperature, and the DC phase drift parameters have repeatability at full temperature.

## Keywords

Y-Waveguide Phase Modulator, DC Phase Drift, Full Temperature Characteristic, Automatic Test System

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

Y波导相位调制器(简称Y波导)主要以铌酸锂晶体制作而成,是光纤陀螺系统中的核心器件[1] [2] [3] [4],广泛应用于军工、航天、船舶和轨道交通等领域。在Y波导相位调制器中,直流相位漂移现象是由于Y波导的两侧电极施加调制电压时,铌酸锂衬底、缓冲层中的自由移动电荷( $\text{H}^+$ 、 $\text{OH}^-$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$ 等碱性金属离子)会形成与外加电压相反方向的空间电场,造成原本施加在晶体的有效电场强度减小。如图1为Y波导截面图与外电场作用下自由移动电荷形成空间电场图的对比示意图。

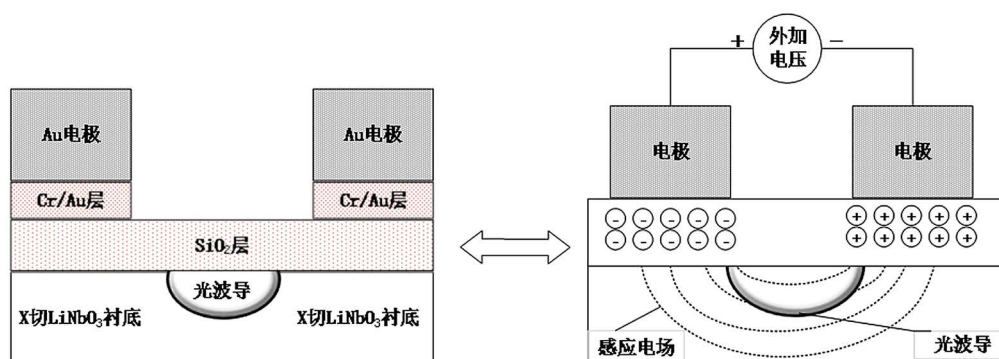


Figure 1. Comparison diagram

图 1. 对比示意图

1985年Becker [5]等人研究了两种模型并且都可以用于表征铌酸锂调制器的短期直流相位漂移现象;2005年李绪友[6]等人对Y波导调制器件的稳定性及调制非线性进行了详细的分析研究,给出了Y波导调制度漂移的补偿方法;2007年何风平[7]等人分析了多种外场作用对铌酸锂波导调制器相位稳定性的影响,并提出了相应的解决措施,以提高铌酸锂波导调制器的调制相位稳定性;2016年Chong [8]等人指出由于电极污染、铌酸锂基底的压电效应等原因易造成直流相位漂移,从而引起闭环光纤陀螺进入死区;2017年翁仓杰[9]等人阐述了Y波导调制器调制相位漂移对光纤陀螺系统特性的影响,测试了温度以及相对湿度变化对Y波导调制器调制相位漂移的影响,但并非是长时间的连续稳定测试;2018年Bi [10]等人

从理论上分析了调制相位误差与偏置误差的关系，通过实验得到了量化模型。

目前对于 Y 波导的半波电压测试也有众多学者进行实验研究[11]，但是 Y 波导的直流相位漂移参数  $W_d$  (又称波形斜度) 的精确检测技术方面还有较大欠缺，尤其在全温状态下，国内外尚无成熟的测试仪器可以对 Y 波导的直流相位漂移参数进行精密测量，而直流相位漂移这一参数直接影响 Y 波导器件及高精度光纤陀螺系统的稳定性。因此，如何快速、精确地测试出 Y 波导的直流相位漂移参数以及分析其在全温下的温漂特性是一个亟待解决的问题。

## 2. 测试机理

通常把 Y 波导等效为 RC 电路模型以便理解和分析直流相位漂移现象[12]如图 2 为 Y 波导相位调制器 RC 的电路等效图。 $R_1$ 、 $C_1$  为横向缓冲层电阻， $R_2$ 、 $C_2$  为纵向缓冲层电阻， $R_3$ 、 $C_3$  为铌酸锂晶体中的阻抗； $E_1(t)$  为外加电压产生的有效电场， $E_2(t)$  为感应电场；

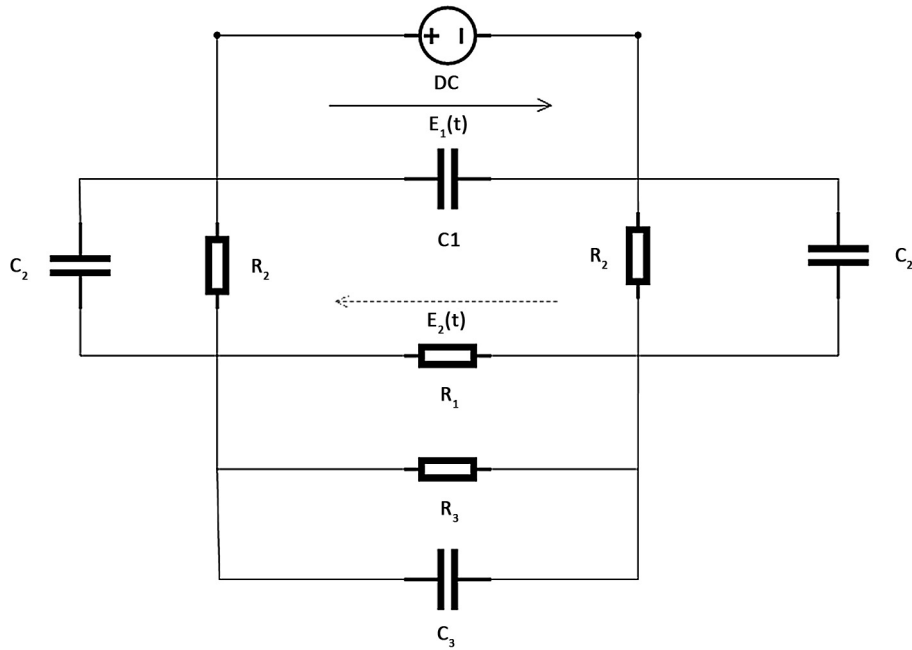


Figure 2. RC circuit equivalent diagram of Y-waveguide phase modulator  
图 2. Y 波导相位调制器 RC 电路等效图

当在 Y 波导电极两端输入调制电压信号  $V_0$  时，波导的瞬态电压为：

$$V(t) = V_0 \left[ \frac{R_4}{2R_2 + R_4} + \frac{2(C_2R_2 - C_3R_4)}{(2R_2 + R_4)(C_2 + 2C_3)} \right] e^{-t/\tau} \quad (1)$$

式中  $R_4$  为横向阻抗， $R_4 = R_1R_3/(R_1 + R_3)$ ， $\tau$  为渡越时间，此时的  $\tau = R_2R_4(C_2 + 2C_3)/(2R_2 + R_4)$ 。当  $t = 0$  时刻，作用在波导上的有效电压为：

$$V(t = 0) = V_0C_2(C_2 + 2C_3) \quad (2)$$

当信号偏置时间远大于渡越时间时，加在波导上的有效电压为：

$$V(t > \tau) = V_0R_4/(2R_2 + R_4) \quad (3)$$

由式(2)与式(3)可以看出，加在波导上的有效电压随时间而变化，这种现象便是所谓的直流相位漂移。

在本文中,测试直流相位漂移参数采用了 Sagnac 干涉光路方案,图 3 和图 4 分别为直流相位漂移仿真图和实际测试图,具体实验的测量方法为:

- 在被测 Y 波导器件外加  $4\tau$  周期的方波调制信号,调节方波电压值,使其等于半波电压  $V_\pi$  的一半,即  $V_\pi/2$ ,记录此时的光电探测器输出信号的脉冲幅值为  $\Delta V_1$ ;
- 对被测 Y 波导器件外加  $4\tau$  周期的锯齿波电压信号,调节锯齿波电压信号幅值 2 倍于半波电压  $V_\pi$  时,记录此时光电探测器输出信号的漂移量  $\Delta V_2$  (不含尖峰脉冲);
- 直流相位漂移  $W_d$  为:

$$W_d = \frac{\Delta V_2}{\Delta V_1} \quad (4)$$

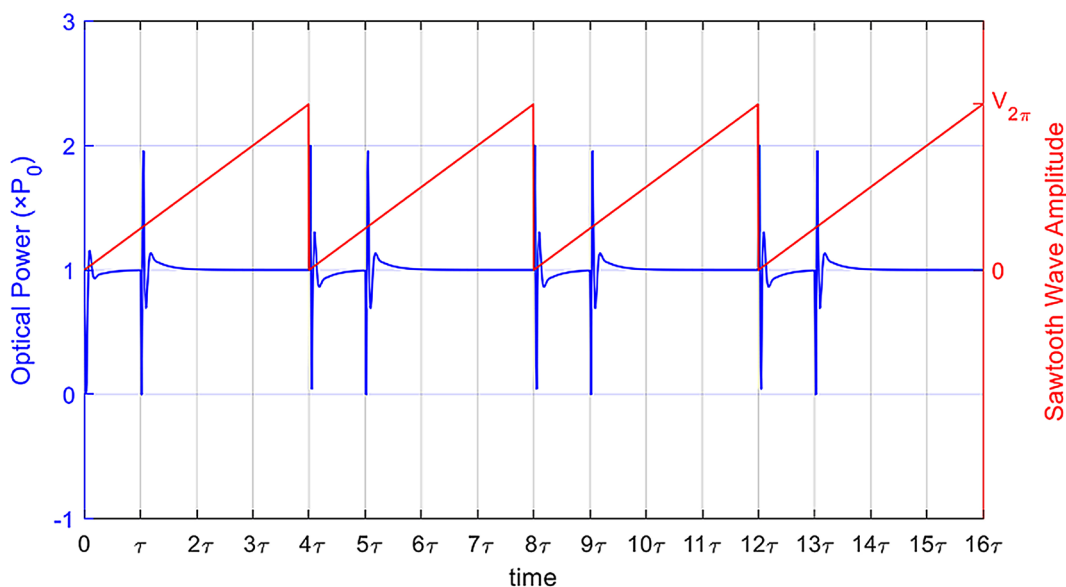


Figure 3. Simulation diagram of DC phase drift

图 3. 直流相位漂移仿真图

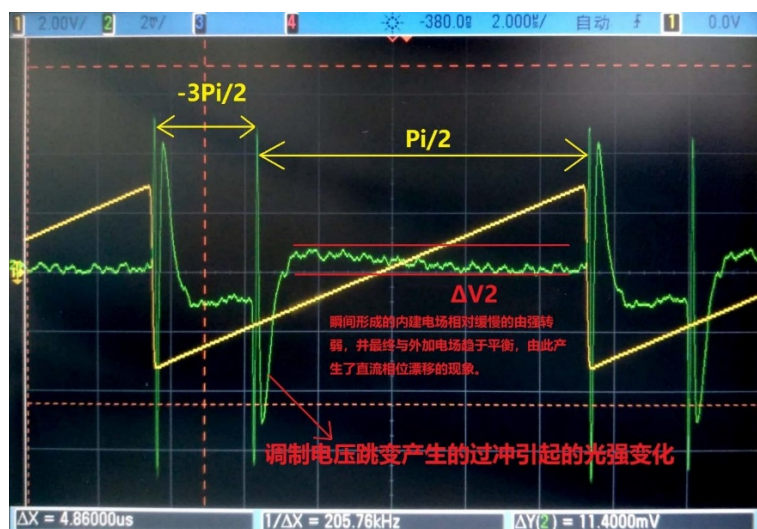


Figure 4. Measured diagram of DC phase drift

图 4. 直流相位漂移实测图

### 3. 系统研究与实现

如图 5 所示为 Y 波导直流相位漂移测试系统整体方案图，系统主要由电源模块、驱动电路模块、光路模块、信号处理模块与工控机(含上位机软件)组成，下面分别从光路、电路和上位机软件方面开展研究设计工作。

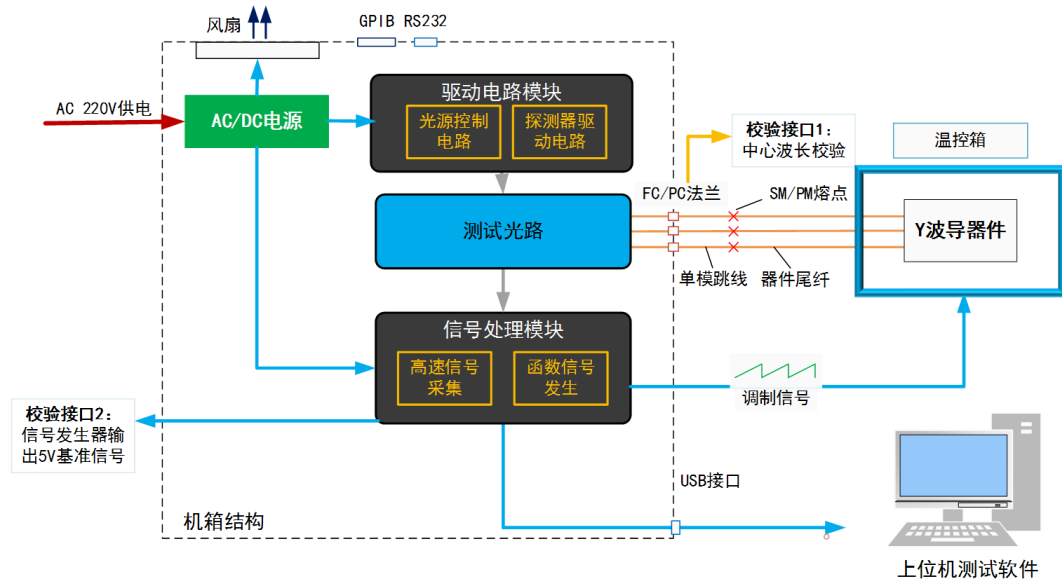


Figure 5. Overall scheme diagram of test system  
图 5. 测试系统整体方案图

#### 3.1. 光路设计

测试系统要实现准确、快速等功能，就要确保选择合适的光学器件[13] [14] [15] [16]。如图 6 光路设计测试方案，由于 Y 波导制作工艺存在实际偏差而导致插损不一致，会让 PIN-FET 探测器接收的光功率产生差异，故采用光衰减器调节光功率输出，使得探测器接收到的功率保持一致；环形器和耦合器都可使得光信号按照指定顺序传输，但本文采用环形器而不采用耦合器的原因主要是环形器可以抑制光信号的返回，避免光信号返回时对光源产生影响；采用单模跳线 FC/PC 原因是可以节约光纤的熔接时间，提高测试效率。

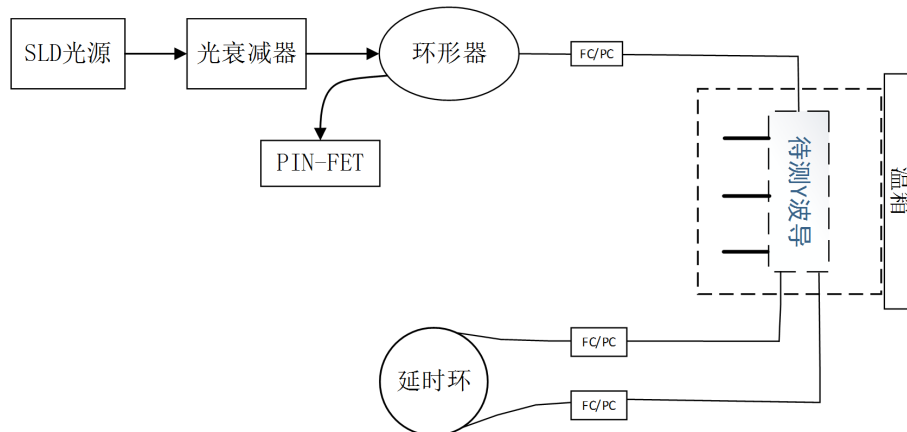


Figure 6. Optical path design of test system  
图 6. 测试系统光路设计方案图

### 3.2. 电路设计

测试系统的电路设计主要包含 AC/DC 电源、光电组件的驱动电路和信号采集模块，如图 7 为电路部分实拍图；AC/DC 电源负责将外接电压转换为测试仪中各用电设备所需要的工作电压，保障测试仪稳定高效地运行；光电组件的驱动电路包含 SLD 光源驱动电路、可调光衰减器驱动电路和光电探测器驱动电路三部分，分别是实现给光源稳定的供电以及对光源进行温控、稳定光功率保证光源以稳定的波长输出和给探测器稳定供电等功能；为了实现高速信号采集和信号发生功能，特选用 NI (National Instruments) 信号采集模块。

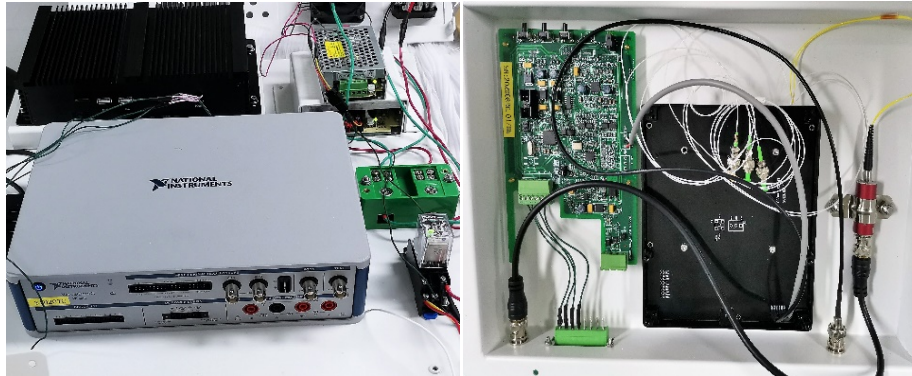


Figure 7. Actual picture of circuit part  
图 7. 电路部分实拍图

### 3.3. 上位机软件设计

采用 Labview 开发的上位机软件实时检测，软件的设计架构中共有 3 个并行执行的线程，主线程为用户界面的循环控制模块，通过用户事件来驱动不同的状态机模式，次要线程为测量计算模块，通过主线程发送的消息队列进行消息触发、进入采样控制和参数计算的子状态，其他线程为辅助线程，进行数据显示、生成报告和数据存储的状态循环或事件响应。其中软件设计要求满足具备合格判定功

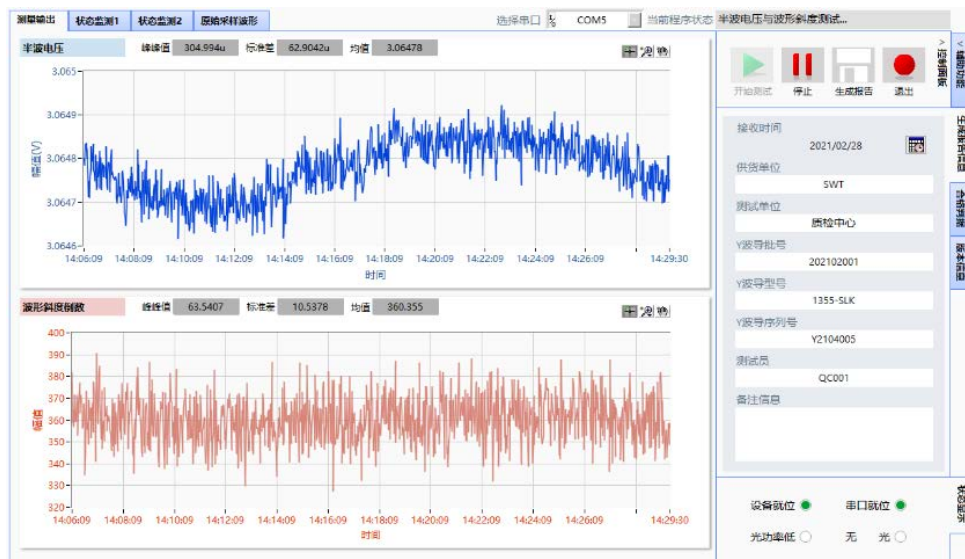


Figure 8. Upper computer software test interface  
图 8. 上位机软件测试界面

能,生成测试报告之前存在一个“是否合格”的判定流程。如图 8 所示为上位机软件测试界面,上位机软件的输出参数分为测量值和状态监测值两种,测量值包含半波电压和直流相位漂移,状态监测值包含调制电压信号幅值分别为  $V_{\pi}$  和  $V_{2\pi}$  的  $4\tau$  周期锯齿波时的探测器接收光功率波形;图 9 为测试系统整机图。

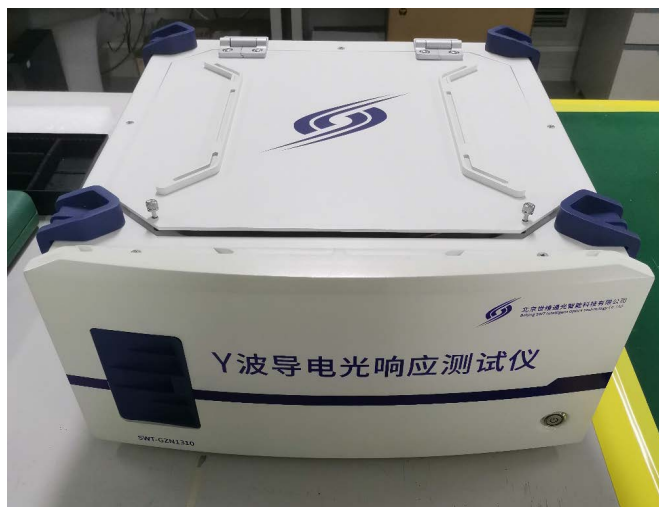


Figure 9. Overall diagram of test system  
图 9. 测试系统整机图

## 4. 实验与分析

### 4.1. 常温状态下的直流相位漂移测试

将 Y 波导置于温度  $22^{\circ}\text{C} \pm 4^{\circ}\text{C}$ , 相对湿度在  $20\% \pm 5\%$  的环境条件下,对 3 支不同的 Y 波导分支与单模光纤熔接后测试直流相位漂移参数,采样频率每分钟 50 点,每次测试数据在 150~180 个点数,验证测试系统的高效性与测试精确度,图 10 为测试数据图;测试结果处理如表 1 (正接和反接是指施加在 Y 波导调制电压的极性)。

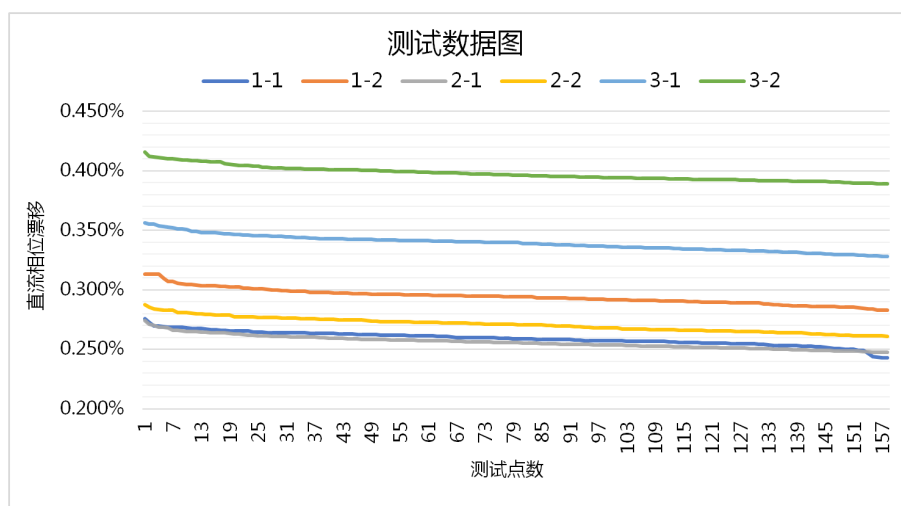


Figure 10. Test data chart  
图 10. 测试数据图

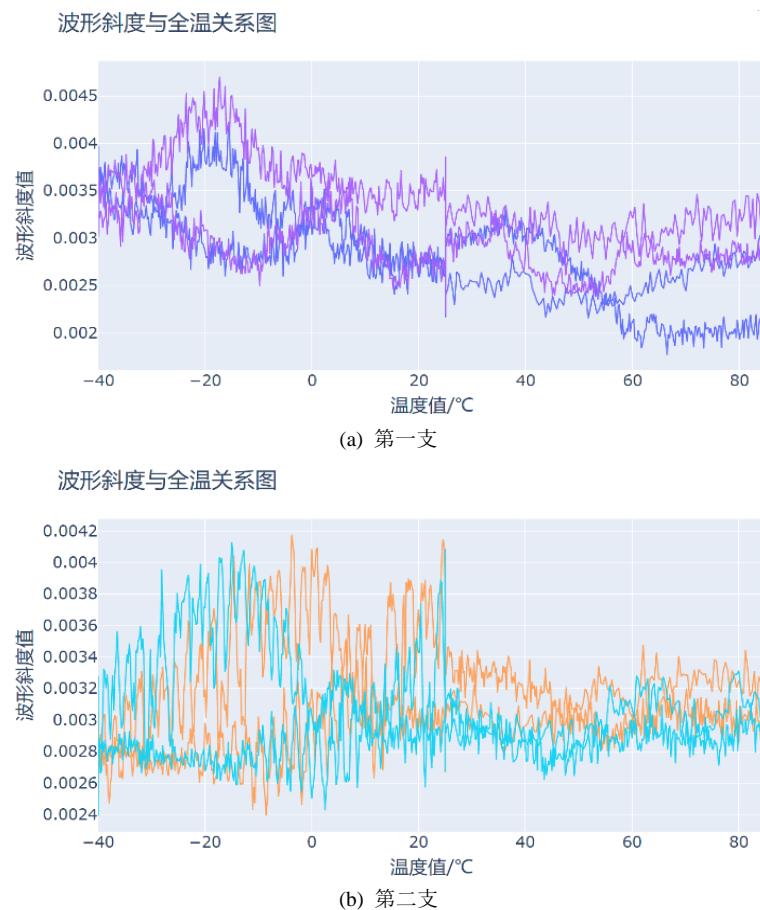
**Table 1.** Data processing table of Y-waveguide DC phase drift parameters test at room temperature  
**表 1.** Y 波导直流相位漂移参数常温测试数据处理表

Y 波导序号	直流相位漂移	测量值均值	标准差
第一支	正接	0.259%	58 ppm
	反接	0.294%	71 ppm
第二支	正接	0.255%	65 ppm
	反接	0.270%	70 ppm
第三支	正接	0.338%	72 ppm
	反接	0.396%	71 ppm

从表 1 可看出, 3 支 Y 波导的直流相位漂移标准差小于 72 ppm。

#### 4.2. 全温状态下的直流相位漂移测试

测试系统的全温测试时间一般设置每次 7.5 H, 采样频率为每分钟 50 个点, 每次采集的数据点数在 22,500~24,000 个, 全温温度循环为 $-40^{\circ}\text{C}\sim+85^{\circ}\text{C}$ 。多次全温测试下, 得到两支 Y 波导直流相位漂移如图 11 所示, 分析其直流相位漂移在全温状态下的温漂状态, 测试数据处理如表 2。



**Figure 11.** Full temperature test chart of DC phase shift  
**图 11.** 直流相位漂移全温测试图



**Table 2.** Data processing table for full temperature measurement of Y-waveguide DC phase drift  
**表 2.** Y 波导直流相位漂移全温测试数据处理表

Y 波导	测试项	第一次			第二次		
	峰峰值	波动幅度	均值	峰峰值	波动幅度	均值	
第一支	0.421%	0.244%	0.284%	0.471%	0.252%	0.257%	
	0.177%			0.219%			
第二支	0.418%	0.179%	0.306%	0.413%	0.170%	0.302%	
	0.239%			0.243%			

测试结果表明, 全温下第一支 Y 波导直流相位漂移  $W_d$  波动幅度在 2.52‰ 以内; 第二支 Y 波导直流相位漂移  $W_d$  波动幅度在 3.06‰ 以内; 且同一支 Y 波导的温度漂移具有一定重复性。

## 5. 结论

本文主要以全温测试状态的 Y 波导相位调制器为研究对象, 分析了直流相位漂移的测试机理, 搭建了自动测试系统, 不仅实现常温连续准确地测试出结果, 更首次实现在  $-40^{\circ}\text{C}\sim+85^{\circ}\text{C}$  的全温状态下能够长时间连续测试出 Y 波导的直流相位漂移参数, 提高现有测试方法的效率, 测试数据表明每支 Y 波导器件在全温下直流相位漂移参数具有一定的重复性, 为 Y 波导提供一种简单、高效、准确的性能筛选方案。

## 参考文献

- [1] Hervé C. Lefèvre. 光纤陀螺仪(The Fiber-Optic Gyroscope) [M]. 张桂才, 王巍, 译. 北京: 国防工业出版社, 2002: 48-50.
- [2] Szafraniec, B., Laskoskie, C.L., Ang, D. and Blake, J.N. (1992) High-Performance Ti-Indiffused LiNbO<sub>3</sub> Multifunction Chip for Use in Fiber Optic Gyros. *Proceedings of SPIE*, **1585**, No. 1.
- [3] 熊旭红. 光纤陀螺系统中的铌酸锂调制器的分析与设计[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2002.
- [4] 葛翠艳. Y 波导对光纤陀螺性能的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010.
- [5] Becker, R.A. (1985) Circuit Effect in LiNbO<sub>3</sub> Channel-Waveguide Modulators. *Optics Letters*, **10**, 417-419. <https://doi.org/10.1364/OL.10.000417>
- [6] 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.
- [7] 何风平, 李刚毅. 铌酸锂波导调制器的相位漂移机理[J]. 半导体光电, 2007, 28(2): 166-171.
- [8] Chong, K.-H., Choi, W.-S. and Chong, K.-T. (2016) Analysis of Dead Zone Sources in a Closed-Loop Fiber Optic Gyroscope. *Applied Optics*, **55**, 165. <https://doi.org/10.1364/AO.55.000165>
- [9] 翁苍杰, 杨德伟, 郑远生, 赵艳, 姚天龙. Y 波导调制器半波电压及调制相位漂移研究[J]. 半导体光电, 2017, 38(2): 161-163, 168.
- [10] Bi, R., She, X., Shu, X. and Liu, C. (2018) Influence of the Modulation Phase Error on Bias Error in Interferometric Fiber Optic Gyroscope. *Optical Engineering*, **57**, 087104. <https://doi.org/10.1117/1.OE.57.8.087104>
- [11] Yang, Y., Zhang, W. and Ma, J. (1999) High-Precision Measurement Scheme for Half-Wave Voltage of Y-Tap MIOC. *Proceedings of the International Symposium on Photonics and Applications*, **3897**. <https://doi.org/10.1117/12.369337>
- [12] Yamada, S. and Minakata, M. (1981) DC Drift Phenomena in LiNbO<sub>3</sub> Optical Waveguide Devices. *Japanese Journal of Applied Physics*, **20**, 733-737. <https://doi.org/10.1143/JJAP.20.733>
- [13] 丁东发, 王巍, 张桂才. 光纤陀螺用 Y 波导电光调制特性测试研究[C]//中国通信学会光通信专业委员会、中国电子学会通信学分会、中国光学学会纤维光学与集成光学专业委员会. 全国第十一次光纤通信暨第十二届集成光学学术会议(OFCIO'2003)论文集. 中国通信学会光通信专业委员会、中国电子学会通信学分会、中国光学学会纤维光学与集成光学专业委员会: 中国光学学会, 2003: 6.
- [14] 毛献辉. 环形干涉光纤传感器若干关键问题研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 清华大学, 2005.
- [15] 吴衍记, 彭昱, 黄显林. 光纤陀螺用 Y 波导半波电压的测试方法研究[J]. 半导体光电, 2005, 26(4): 307-309.
- [16] 赵明璐. 铌酸锂 Y 分支波导集成光学调制器的设计与制作[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉邮电科学研究院, 2012.