

消除数字闭环光纤陀螺串扰的多态调制方法

吕嫣然¹, 马家君^{1*}, 黄月锐涵¹, 刘清扬¹, 张子鹏¹, 蒋军彪²

¹贵州大学大数据与信息工程学院, 贵州 贵阳 550025;

²西安现代控制技术研究所, 陕西 西安 710065

摘要 针对数字闭环光纤陀螺中由串扰引起的死区问题, 本文提出了一种新的在不同调制深度下消除串扰的多态调制方法。根据数字闭环光纤陀螺调制解调的原理, 建立了调制序列与解调序列的相关函数, 当该相关函数为零时, 可以获得多态调制序列中 φ_m 与 $2\pi - \varphi_m$ 的比例关系, 从而获得了不同调制深度下消除串扰的多态调制方案。对不同调制深度下构造的多态调制方案进行实验测试, 结果表明, 本文提出的数字闭环光纤陀螺多态调制方案能消除由串扰引起的死区问题。

关键词 光纤光学; 光纤陀螺; 串扰; 死区; 相位调制; 多态调制

中图分类号 V241.5

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL202249.0706003

1 引言

光纤陀螺是基于 Sagnac 效应的角速率传感器, 具有体积小、全固态结构、动态范围大、成本低等优点, 已被广泛应用于航天、航空等领域^[1-10]。高精度光纤陀螺一般采用闭环控制方式。然而, 在闭环控制中, 相位调制信号会产生调制串扰, 该串扰会导致陀螺在低转速附近对输入角速度不敏感, 从而形成死区^[10-15]。死区的存在会恶化光纤陀螺的零偏稳定性(零偏稳定性是衡量光纤陀螺精度的重要指标), 因此, 寻求消除串扰减小死区的方法对于提高光纤陀螺的性能具有重要意义。

针对调制串扰问题, 研究人员已提出六态调制和随机调制两种方法。随机调制通过降低调制信号与解调信号之间的相关性来有效抑制串扰对死区的影响^[16-20], 但随机调制延长了解调序列周期, 不仅会导致陀螺仪的动态范围减小和随机噪声增大, 还会存在引入低频干扰的隐患。六态调制方法为消除串扰引起的零偏误差提供了重要参考^[21-23]。但六态方波调制仅针对 $2\pi/3$ 的调制深度能达到完全消除串扰的效果, 在其他调制深度下调制信号与解调信号

的相关性仍然存在。

本课题组从调制解调原理出发提出了一种新的调制方法, 以消除串扰并使光纤陀螺具有良好的性能。本课题组通过构造多态调制序列, 建立调制序列与解调序列之间的关系式, 提炼出了计算调制相位的一般式, 并推算出了不同调制深度下消除串扰的调制序列; 此外, 对光纤陀螺的多态调制死区阈值、零偏稳定性、角随机游走 (ARW) 等性能指标进行了测试, 并将所提方法与四态调制方法进行了比较。实验结果表明, 使用多态调制方法可以解决不同调制深度下串扰带来的死区问题。

2 多态调制原理

如图 1 所示, 在数字闭环光纤陀螺中, 闭环回路主要由光源、耦合器、相位调制器、光纤环、探测器、前置放大器、模数 (A/D) 转换器、逻辑处理器、数模 (D/A) 转换器、缓冲放大器组成。从光源发出的光束经相位调制器分光后, 在光纤环中相向传播, 当光纤环发生旋转时, 相向传播的光束之间会产生一个相位差, 通过此相位差可以求得陀螺的输入角速度。虚线部分的方波调制信号经电磁串扰后耦合到光电探

收稿日期: 2021-07-26; 修回日期: 2021-08-24; 录用日期: 2021-09-13

基金项目: 国家自然科学基金(61605153)、贵州省科技厅自然科学基金基础研究计划(黔科合 LH 字[2017]7224 号)、贵州省教育厅青年科技人才成长项目(黔教合 KY 字[2017]107 号)、贵州大学博士基金(贵大人基合字[2016]61 号)

通信作者: *jjma3@gzu.edu.cn

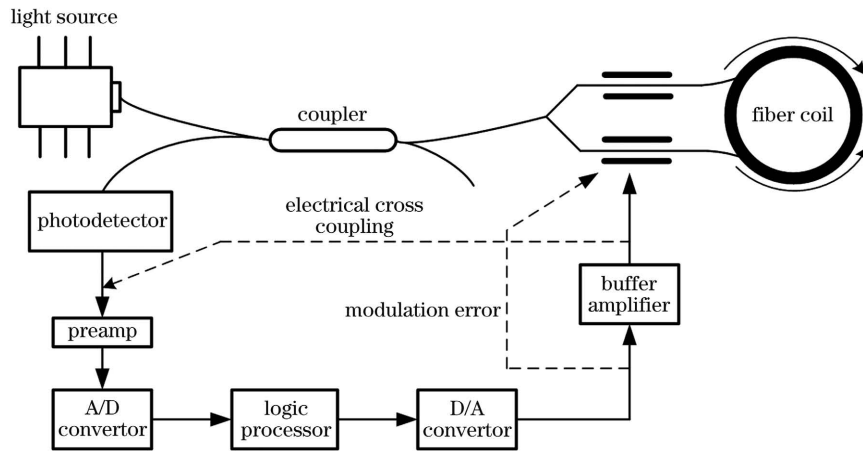


图 1 调制串扰耦合路径图

Fig. 1 Modulated crosstalk coupling path diagram

测器的输出信号中,调制信号在解调过程中产生的调制误差耦合到相位调制器,从而使陀螺出现死区。

为解决串扰给陀螺带来的不良影响,本课题组构造了多态调制序列 $S_m[n]$,如图 2(a)所示

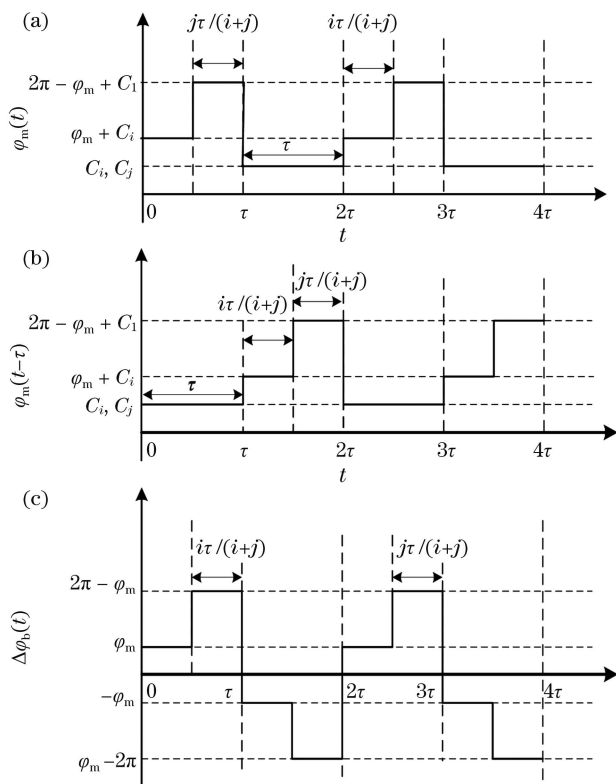


图 2 多态调制序列的波形构造。(a)施加于顺时针光束的多态调制相位调制序列;(b)施加于逆时针光束的多态调制相位调制序列;(c)多态调制序列波形

Fig. 2 Waveform construction of polymorphic modulation sequence. (a) A polymorphic modulation phase modulation sequence is applied to a clockwise beam; (b) a polymorphic modulation phase modulation sequence is applied to a counterclockwise beam; (c) polymorphic modulation sequence waveform

$$S_m[n] =$$

$$(\varphi_m + C_i, \dots, 2\pi - \varphi_m + C_j, \dots, C_i, \dots, C_j, \dots), \quad (1)$$

式中: $i = 1, 2, \dots; j = 1, 2, \dots; \varphi_m$ 为调制深度; C_i, C_j 为调制深度常量,下标 i 表示 φ_m 的个数, j 表示 $2\pi - \varphi_m$ 的个数。

沿光纤环相向传播的光束通过调制器时存在一个 τ 的时间延迟(τ 为光束通过光纤环的渡越时间),延迟一个 τ 后的调制序列如图 2(b)所示,此时,调制相位 $\varphi_m(t)$ 和 $\varphi_m(t - \tau)$ 之间的相位差可以表示为

$$\Delta\varphi_b(t) = \varphi_m(t) - \varphi_m(t - \tau), \quad (2)$$

得到的多态调制序列波形如图 2(c)所示。故相位调制序列可以表示为

$$S_{\varphi_b}[n] = S_m[n] - S_m[n - 1]. \quad (3)$$

相位调制序列和解调序列之间的关系可以表示为

$$f(\varphi) = -I_0 \operatorname{sgn}(\sin \varphi), \quad (4)$$

将式(3)代入式(4),得到解调序列为

$$D[n] = f(S_{\varphi_b}[n]) = -I_0 \operatorname{sgn}[\sin(S_{\varphi_b}[n])], \quad (5)$$

得到一个周期内的互相关函数为

$$G = \sum_{n=1}^N S_m[n] \cdot D[n], \quad (6)$$

式中: N 为序列周期。将式(1)和式(5)代入式(6),令调制序列与解调序列的相关函数为零,即 $G = 0$,可得调制相位 φ_m 的一般式为

$$\varphi_m = \frac{j2\pi}{i+j}. \quad (7)$$

由式(7)可以推导出消除调制序列与解调序列相关性所需的多态方波调制方案,得到调制序列 φ_m 与 $2\pi - \varphi_m$ 的比例关系,从而构成不同调制深度下

的多态调制序列,由此推出消除调制串扰的调制方法。当调制深度分别为 $\pi/2$ 、 $2\pi/3$ 、 $3\pi/4$ 、 $4\pi/5$ 、 $5\pi/6$ 、 $7\pi/8$ 时,构造的消除串扰的最佳调制方式如表 1 所示。

表 1 不同调制深度下的调制方式

Table 1 Modulation modes under different modulation depths

Modulation depth	Modulation method	Modulation sequence
$\pi/2$	8-state square wave modulation	$(\varphi_m + C_1, \dots, 2\pi - \varphi_m + C_4, C_1, \dots, C_4)$
$2\pi/3$	6-state square wave modulation	$(\varphi_m + C_1, 2\pi - \varphi_m + C_2, \varphi_m + C_3, C_1, C_2, C_3)$
$3\pi/4$	16-state square wave modulation	$(\varphi_m + C_1, \dots, 2\pi - \varphi_m + C_6, \dots, C_1, \dots, C_8)$
$4\pi/5$	10-state square wave modulation	$(\varphi_m + C_1, \dots, 2\pi - \varphi_m + C_4, \dots, C_1, \dots, C_5)$
$5\pi/6$	24-state square wave modulation	$(\varphi_m + C_1, \dots, 2\pi - \varphi_m + C_8, \dots, C_1, \dots, C_{12})$
$7\pi/8$	32-state square wave modulation	$(\varphi_m + C_1, \dots, 2\pi - \varphi_m + C_{10}, \dots, C_1, \dots, C_{16})$

干涉光强与萨格奈克相移成余弦函数关系。对相位调制器施加多态方波调制信号,每个状态的持续时间为 $\frac{\tau}{i+j}$,这是因为两束光波通过光纤环存在一个 τ 的时间延迟。由一般式得到的多态调制序列为 $(\dots, \varphi_m + C_i, \dots, \varphi_m - 2\pi + C_j, \dots, C_i,$

$\dots, C_j, \dots)$,经过一个 τ 后得到的多态方波调制序列为 $(\dots, C_i, \dots, C_j, \dots, \varphi_m + C_i, \dots, \varphi_m - 2\pi + C_j, \dots)$,两者相减可得调制相位为 $(\dots, \varphi_m, \dots, \varphi_m - 2\pi, \dots, -\varphi_m, \dots, 2\pi - \varphi_m, \dots)$ 。多态方波调制原理如图 3 所示。在多态相位偏置下的输出光强为

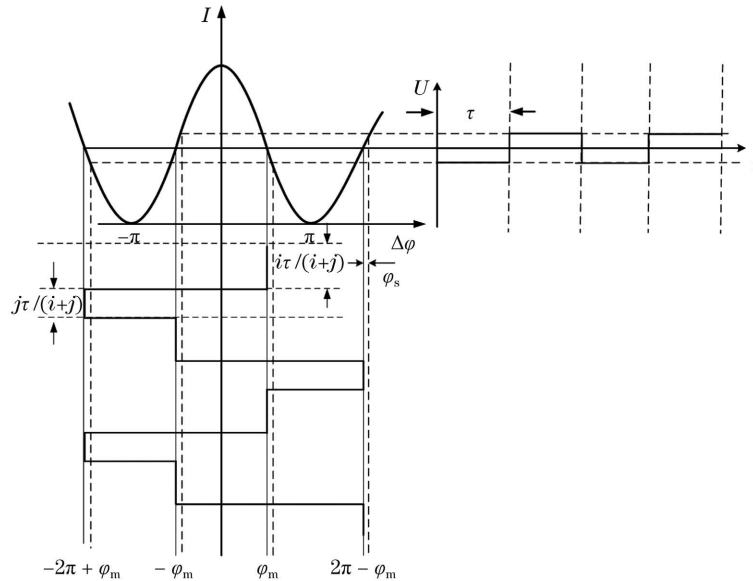


图 3 转速误差的调制解调

Fig. 3 Modulation and demodulation of speed error

$$\begin{cases} I_{1\sim i} = I_{\varphi_m}(\varphi_s) = I_0 [1 + \cos(\varphi_s + \varphi_m)] \\ I_{i+1\sim i+j} = I_{\varphi_m-2\pi}(\varphi_s) = I_0 [1 + \cos(\varphi_s + \varphi_m - 2\pi)] = I_0 [1 + \cos(\varphi_s + \varphi_m)] \\ I_{i+j+1\sim 2i+j} = I_{-\varphi_m}(\varphi_s) = I_0 [1 + \cos(\varphi_s - \varphi_m)] \\ I_{2i+j\sim 2(i+j)} = I_{2\pi-\varphi_m}(\varphi_s) = I_0 [1 + \cos(\varphi_s + 2\pi - \varphi_m)] = I_0 [1 + \cos(\varphi_s - \varphi_m)] \end{cases}, \quad (8)$$

式中: φ_s 为陀螺输入相移; I_0 为陀螺输入光强。由式(8)可以得转速的解调误差为

$$\Delta I = (I_{i+j+1\sim 2i+j} + I_{2i+j\sim 2(i+j)}) - (I_{1\sim i} + I_{i+1\sim i+j}). \quad (9)$$

当温度变化时,调制相位向左右两侧扩展,干涉光强也随之发生变化,如图 4 所示。得到增益解调误差为

$$\Delta I_e = (I_{i+1\sim i+j} + I_{2i+j\sim 2(i+j)}) - (I_{1\sim i} + I_{i+j+1\sim 2i+j}). \quad (10)$$

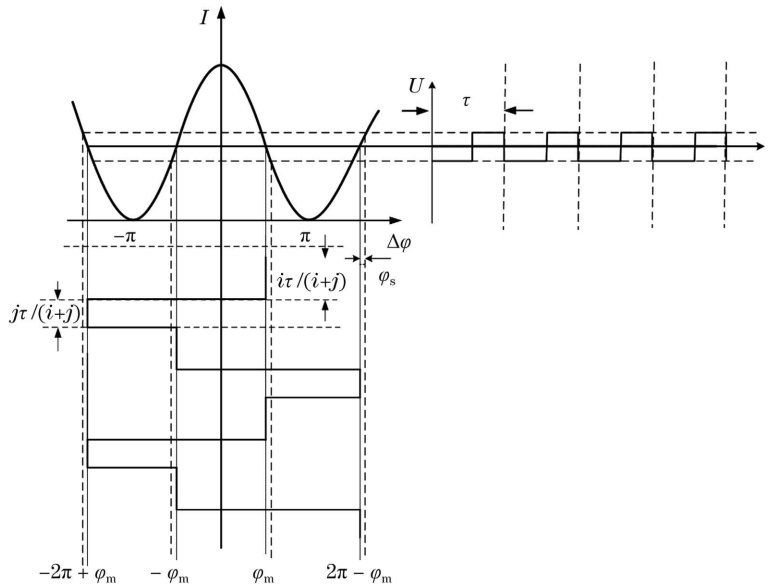


图 4 增益误差调制解调

Fig. 4 Modulation and demodulation of gain error

由式(5)可以得到解调序列为

$$D[n] = \{-1, \dots, -1, \dots, 1, \dots, 1\} \quad (11)$$

3 实验与结果分析

3.1 多态调制实现

本文用推导出的调制方法进行实验验证。基于 Xilinx 公司的硬件开发设计工具 ISE, 采用 Verilog

硬件语言完成多态方波调制代码的编写。现场可编程门阵列(FPGA)顶层设计包括 5 个模块: 时钟模块、温度模块、调制解调模块、D/A 模块、发送模块。各模块的寄存器传送级(RTL)图如图 5 所示, 其中, 32 态方波调制在 FPGA 的调制解调模块中实现, 利用状态机实现状态的跳变。如图 6 所示, 调制状态从 S_1 到 S_{32} 跳变, 每一个状态对应一个调制相

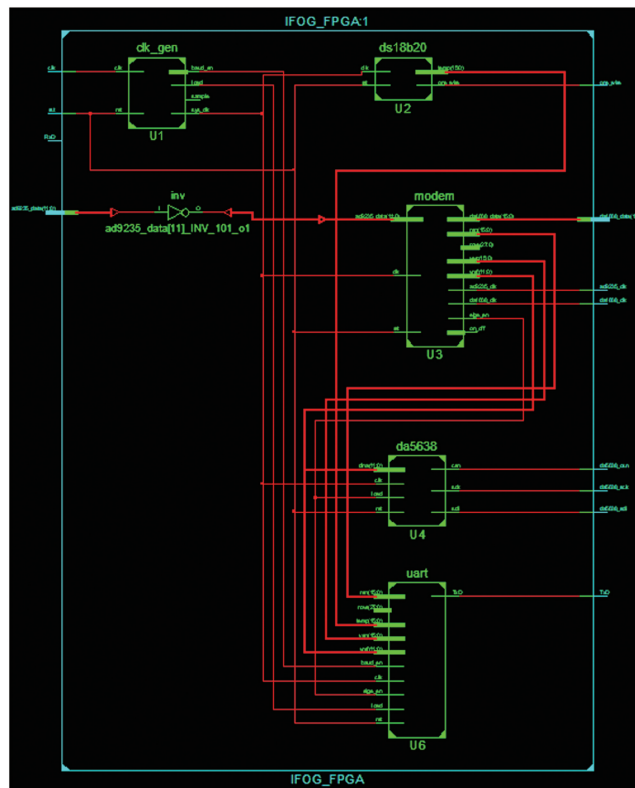


图 5 多态调制 RTL 视图

Fig. 5 RTL view of polymorphic modulation

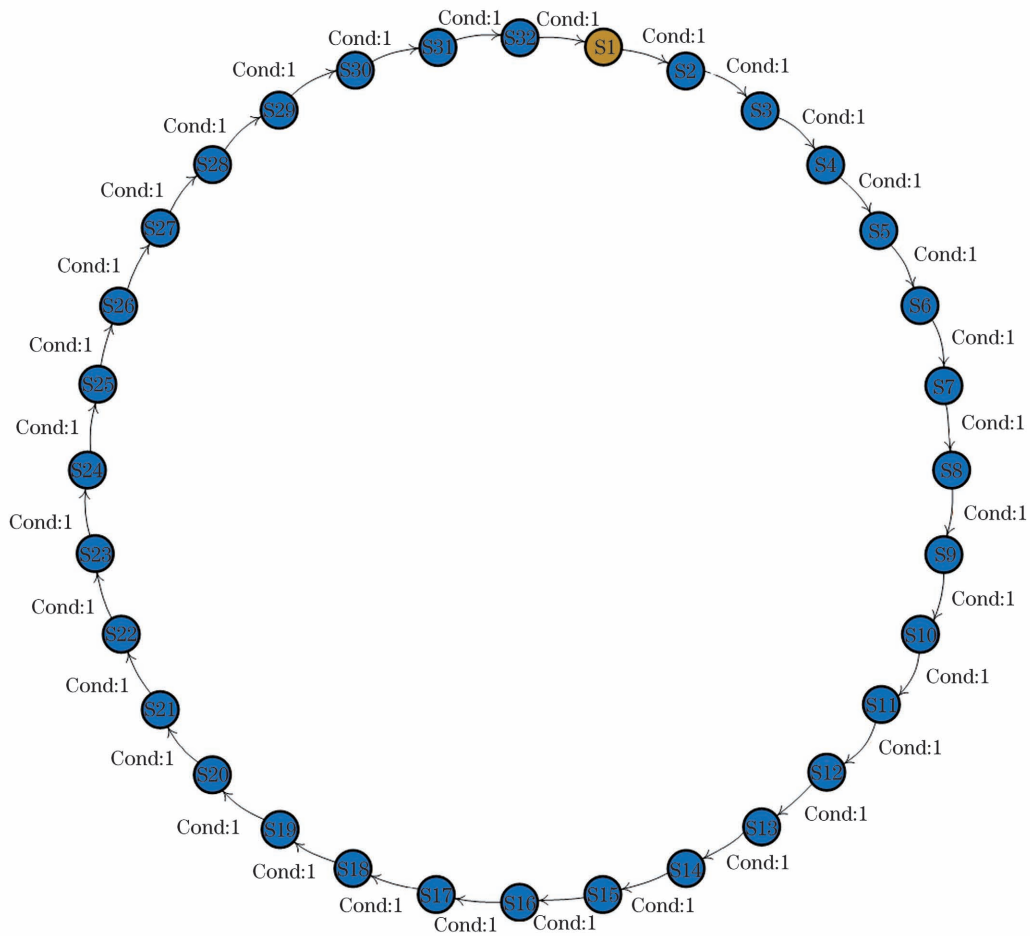


图 6 32 态调制在 FPGA 中的实现框图

Fig. 6 32-state modulation in FPGA implementation block diagram

位, φ_m 与 $2\pi - \varphi_m$ 成 9:7 的比例关系。每一个状态存放在不同的寄存器中, 对每个状态的光强值进行符号判断, 并赋值给寄存器, 然后对寄存器值进行累加就可以得到转速误差和基准误差。32 态调制波形原理图如图 7、8 所示。

将程序代码下载到陀螺仪进行验证, 使用 MATLAB 仿真软件对测试的原始数据进行解读, 获得实验结果。实验中使用的主要硬件设备包括示波器、APS3005S-3D 电源、速率转台、数字闭环干涉式光纤陀螺仪。实验主要对光纤环长为 480 m、光纤直径为 70 mm 的光纤陀螺的死区阈值、零偏稳定性、角随机游走等性能指标进行测试。在测试死区阈值时, 将陀螺的敏感轴垂直于速率转台, 速率转台以 $0.01 (^{\circ})/s$ 的速率旋转一周, 分别在 $\pi/2$ 、 $2\pi/3$ 、 $3\pi/4$ 、 $4\pi/5$ 、 $5\pi/6$ 、 $7\pi/8$ 调制深度下对四态调制和多态调制进行死区阈值测试。

3.2 结果分析

实验得到的实际测试曲线如图 9 所示, 其中实线为四态调制死区阈值测试曲线, 点线为多态调制

死区阈值测试曲线。从实线所示的四态调制死区阈值测试曲线可以看出: 在零角速度输入附近, 陀螺输

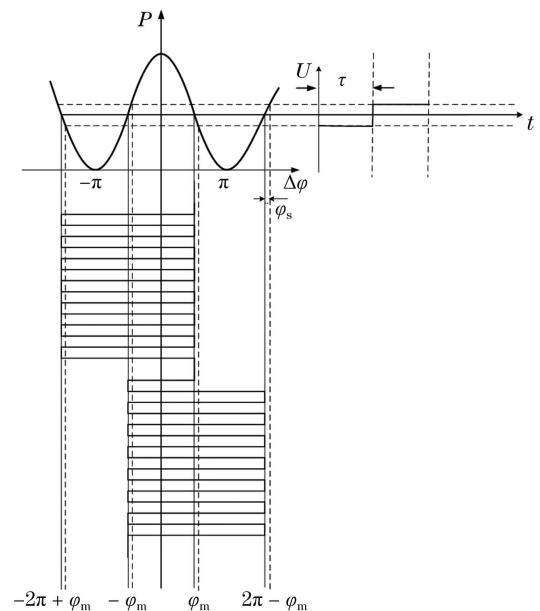


图 7 32 态转速调制原理图

Fig. 7 Schematic of 32-state speed modulation

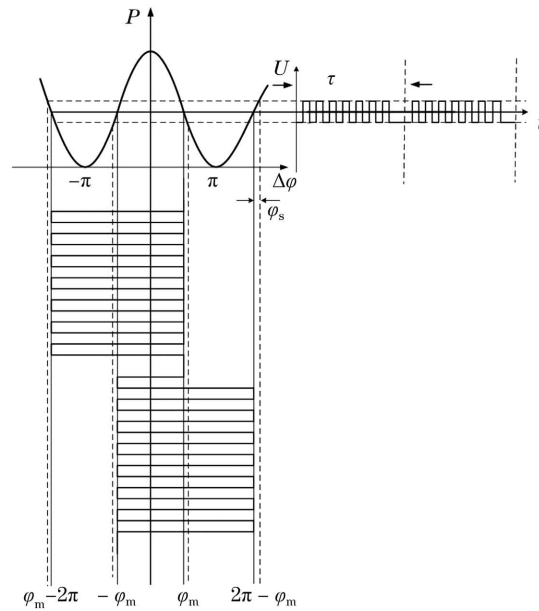


图 8 32 态增益调制原理图

Fig. 8 Schematic of 32-state gain modulation

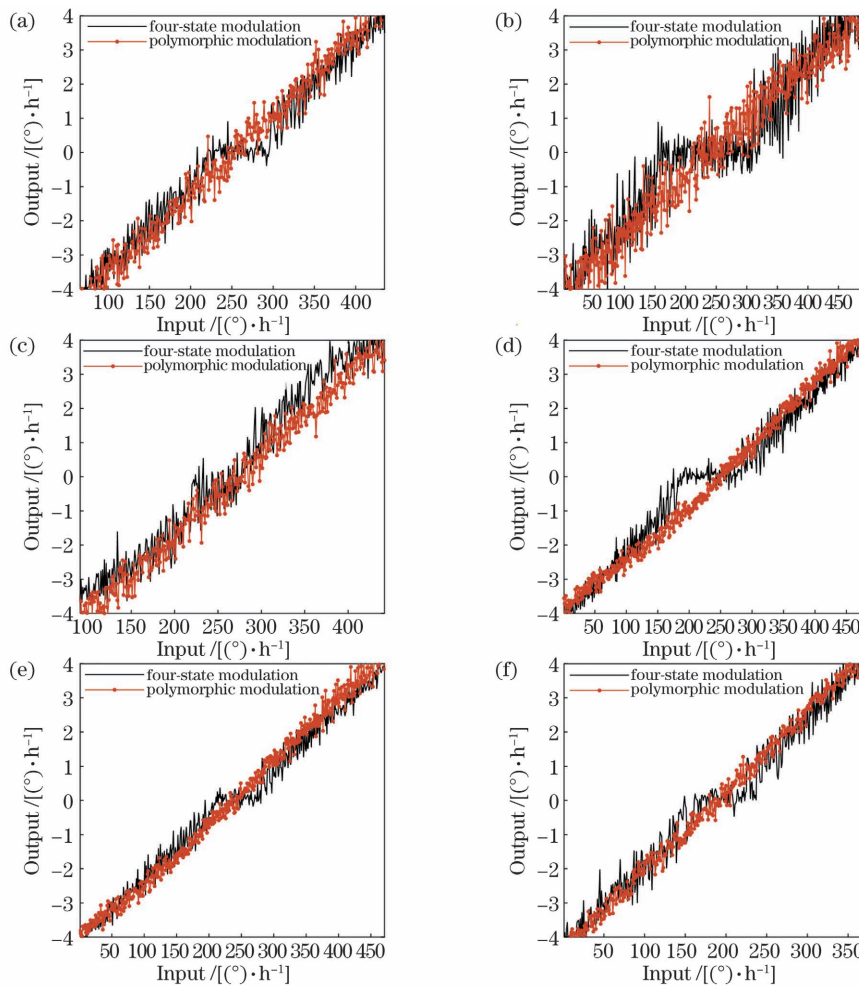


图 9 不同调制深度下的死区测试曲线。(a) $\pi/2$ 调制深度；(b) $2\pi/3$ 调制深度；(c) $3\pi/4$ 调制深度；(d) $4\pi/5$ 调制深度；(e) $5\pi/6$ 调制深度；(f) $7\pi/8$ 调制深度

Fig. 9 Dead zone test curves under different modulation depths. (a) Modulation depth of $\pi/2$; (b) modulation depth of $2\pi/3$; (c) modulation depth of $3\pi/4$; (d) modulation depth of $4\pi/5$; (e) modulation depth of $5\pi/6$; (f) modulation depth of $7\pi/8$

出呈非线性,说明四态调制死区仍然存在,并且在进入死区与离开死区附近噪声增大;在死区范围内,输出的噪声较小。观察图中点线所示的多态调制死区阈值测试曲线可以看出,陀螺的输出呈线性变化,死区基本消失,并且随着调制深度增大,输出噪声减小。

在每个调制深度下进行了 5 组阈值测试,将每

表 2 不同调制深度下的阈值对比

Table 2 Threshold comparison under different modulation depths

Modulation depth	Four-state modulation threshold /[(°)·h ⁻¹]	Polymorphic modulation threshold /[(°)·h ⁻¹]
$\pi/2$	0.453	0
$2\pi/3$	0.741	0
$3\pi/4$	0.340	0
$4\pi/5$	0.623	0
$5\pi/6$	0.539	0
$7\pi/8$	0.432	0

表 3 不同调制深度下的光纤陀螺性能对比

Table 3 Performance comparison of fiber optic gyroscope under different modulation depths

Modulation depth	Four-state modulation		Polymorphic modulation	
	Bias instability /[(°)·h ⁻¹]	ARW/[(°)·h ^{-1/2}]	Bias instability /[(°)·h ⁻¹]	ARW/[(°)·h ^{-1/2}]
$\pi/2$	0.0926	0.0034	0.0893	0.0031
$2\pi/3$	0.0758	0.0028	0.0701	0.0027
$3\pi/4$	0.0532	0.0025	0.0491	0.0021
$4\pi/5$	0.0478	0.0021	0.0429	0.0019
$5\pi/6$	0.0456	0.0018	0.0397	0.0015
$7\pi/8$	0.0416	0.0016	0.0365	0.0012

测试结果表明,多态调制方法保持了光纤陀螺良好的性能,角随机游走系数小于四态调制。可见,多态方波调制在不牺牲其他性能的情况下对死区的抑制效果优于四态调制,能有效消除死区。

4 结 论

本文通过建立适应不同调制深度的一般式,提出了抑制串扰的多态调制方法;通过不同的调制深度确定了最佳的调制方法,消除了死区。按照国家军用行业测试标准,在调制深度分别为 $\pi/2$ 、 $2\pi/3$ 、 $3\pi/4$ 、 $4\pi/5$ 、 $5\pi/6$ 、 $7\pi/8$ 的条件下,分别对四态调制和多态调制进行性能测试。结果表明,使用四态调制时对应上述调制深度的死区阈值依次为 0.453、0.741、0.340、0.623、0.539、0.432 (°)/h,使用多态调制时对应的零偏稳定性分别为 0.0893、0.0701、0.0491、0.0429、0.0397、0.0365 (°)/h,对应的角随机游走系数分别为 0.0031、0.0027、0.0021、

组数据取平均值。为了能更直观地观察死区的大小,将实验测试结果进行整理,如表 2 所示。

为了验证多态调制方法在消除死区的同时对光纤陀螺性能的影响,在相同的硬件平台上,对相同型号的光纤陀螺仪按国家军用行业测试标准进行性能测试,测试结果如表 3 所示。

0.0019、0.0015、0.0012 (°)/ \sqrt{h} 。使用一般式推导出的多态调制方法,在保持光纤陀螺良好性能的同时已观察不到明显的死区。多态方波调制在消除串扰引起的死区问题方面具有显著优势,为实现高性能光纤陀螺提供了重要参考。

参 考 文 献

- [1] Chen H Y, Zheng Y, Kong L H, et al. Self-inspection of detection circuit crosstalk of miniaturized high-precision fiber-optic gyroscopes[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(1): 0104005. 陈和宇, 郑月, 孔令海, 等. 小型化高精度光纤陀螺的检测电路串扰自检测[J]. 中国激光, 2020, 47(1): 0104005.
- [2] Wang X Q, Zhang T, Liang L J, et al. Testing technique of polarization-coupling distribution of fiber coil and beat length of used fiber [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(23): 230602.

- 王学勤, 张彤, 梁兰菊, 等. 光纤环偏振耦合分布及绕环光纤拍长测试技术[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(23): 230602.
- [3] Lei M, Yu H Y, Fang Y, et al. Out-of-lock frequency-tracking control of resonant fiber-optic gyro [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47 (1): 0106002.
雷明, 于怀勇, 方圆, 等. 谐振式光纤陀螺频率跟踪失锁控制研究 [J]. 中国激光, 2020, 47 (1): 0106002.
- [4] Liu S, Li H Z, Liu L, et al. Laser frequency noise power spectral density measurement technology and its application to resonant optical fiber gyroscope[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(13): 1306010.
刘霜, 李汉钊, 刘路, 等. 激光器频率噪声功率谱密度测试技术及在谐振式光纤陀螺中的应用[J]. 光学学报, 2021, 41(13): 1306010.
- [5] Xie Z, Yang Y H, Yan H, et al. Estimation of distributed polarization coupling error in optical fiber coil of fiber optic gyroscope[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(10): 1006004.
谢泽, 杨远洪, 闫晗, 等. 光纤陀螺光纤环分布偏振耦合误差预估 [J]. 中国激光, 2017, 44 (10): 1006004.
- [6] Zhu Z H, Wang L X, Li C. Real-time analysis method of random error of fiber optic gyroscope based on adaptive window length[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(1): 0105001.
朱战辉, 汪立新, 李灿. 基于自适应窗长的光纤陀螺随机误差实时分析方法 [J]. 中国激光, 2016, 43 (1): 0105001.
- [7] Jiang W G, Zhang Y D, Wang J F, et al. Composite gyroscope with high sensitivity in the low-velocity region and no dead zone[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2020, 37(2): 540-545.
- [8] Hu Z F. Effects of residual intensity modulation of Y-waveguide modulator on interferometric fiber optic gyroscope and elimination method [J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(12): 1924-1929.
胡宗福. 光纤陀螺调制器的残余强度调制影响与消除 [J]. 中国激光, 2008, 35(12): 1924-1929.
- [9] Jin J, Zhang C X, Song N F. Electrical crosstalk of modulation signal in digital closed-loop FOG [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2007, 28 (5): 1200-1205.
金靖, 张春熹, 宋凝芳. 数字闭环光纤陀螺的调制串扰误差 [J]. 航空学报, 2007, 28(5): 1200-1205.
- [10] Chong K H, Choi W S, Chong K T. Analysis of dead zone sources in a closed-loop fiber optic gyroscope[J]. Applied Optics, 2016, 55 (1): 165-170.
- [11] Suo X X, Yang Y H, Yang M W, et al. Relative intensity noise characteristic of broadband sources and its effect on performance of closed-loop fiber optic gyroscope[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41 (6): 0605009.
索鑫鑫, 杨远洪, 杨明伟, 等. 宽谱光源相对强度噪声及对闭环光纤陀螺影响研究 [J]. 中国激光, 2014, 41(6): 0605009.
- [12] Gu H, Zhao Q D, Yang G L. Study of the over modulation technique in the fiber optic gyroscope[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2008, 19 (8): 1035-1038.
顾宏, 赵启大, 杨功流. 数字闭环光纤陀螺仪过调制技术研究 [J]. 光电子·激光, 2008, 19(8): 1035-1038.
- [13] Song N F, Li L J, Jin J, et al. The study on deadband of fiber optic gyro[J]. Journal of Projectiles Rockets Missiles and Guidance, 2005, 25(1): 22-23, 26.
宋凝芳, 李立京, 金靖, 等. 光纤陀螺的盲区研究 [J]. 弹箭与制导学报, 2005, 25(1): 22-23, 26.
- [14] Li H, Deng X W, Zhu K B, et al. Method of variable square wave modulation to restrain excessive modulation crosstalk in FOG[J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(8): 226-232.
李贺, 邓学文, 朱奎宝, 等. 光纤陀螺抑制过调制串扰的多态方波调制方法 [J]. 红外与激光工程, 2017, 46(8): 226-232.
- [15] Ji S T, Qin Y Y, Shang J Y, et al. Research on dead zone suppression technology of FOG [J]. Computer Measurement & Control, 2012, 20(2): 497-499.
吉世涛, 秦永元, 尚俊云, 等. 光纤陀螺仪死区抑制技术研究 [J]. 计算机测量与控制, 2012, 20(2): 497-499.
- [16] Jin J, Li M, Song N F, et al. Random modulation for fiber optic gyroscope based on four-states Markov chain [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2008, 34 (7): 769-772.
金靖, 李敏, 宋凝芳, 等. 基于 4 态马尔可夫链的光纤陀螺随机调制 [J]. 北京航空航天大学学报, 2008, 34(7): 769-772.
- [17] Zhang X, Pan X, Zhang C X. Theory analysis and experiment of random modulation in FOG [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 32(2): 195-198.
张晞, 潘雄, 张春熹. 光纤陀螺随机调制的理论分析及实验 [J]. 北京航空航天大学学报, 2006, 32(2): 195-198.
- [18] Wang M H, Zhu G P. Attenuating dead-band nonlinearity in digital closed-loop FOG based on

- stochastic resonance effect [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2011, 19(1): 99-101.
- 王马华, 朱光平. 基于随机共振的数字闭环光纤陀螺死区现象抑制 [J]. 中国惯性技术学报, 2011, 19(1): 99-101.
- [19] Egorov D A, Olekhovich R O, Untilov A A, et al. Study on dead zones of fiber-optic gyros [J]. Gyroscopy and Navigation, 2011, 2(4): 197-207.
- [20] Yang Z H, Ma L, Zhang G C, et al. Analysis and suppression of dead band in digital closed-loop fiber optic gyro [J]. Navigation Positioning and Timing, 2017, 4(4): 97-102.
- 杨志怀, 马林, 张贵材, 等. 数字闭环光纤陀螺死区机理研究与抑制 [J]. 导航定位与授时, 2017, 4(4): 97-102.
- [21] Gu H, Huan Y P, Wang A S, et al. Real-time dynamic simulation of angular velocity and suppression of dead zone in IFOG [J]. Optical Review, 2015, 22(1): 39-45.
- [22] Gu H, Li S H, Zhao Q D. Method of reducing the threshold of the high-precision digital closed-loop fiber optic gyroscope [J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2012, 23(9): 1732-1737.
- 顾宏, 李淑红, 赵启大. 改善高精度数字闭环光纤陀螺阈值方法研究 [J]. 光电子·激光, 2012, 23(9): 1732-1737.
- [23] Zhang C, Zhang S, Pan X, et al. Six-state phase modulation for reduced crosstalk in a fiber optic gyroscope [J]. Optics Express, 2018, 26(8): 10535-10549.

Elimination of Crosstalk from Digital Closed-Loop Fiber Optic Gyroscopes via Polymorphic Modulation Method

Lü Yanran¹, Ma Jiajun¹, Huang Yueruihan¹, Liu Qingyang¹, Zhang Zipeng¹,
Jiang Junbiao²

¹ College of Big Data and Information Engineering, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China;

² Xi'an Modern Control Technology Research Institute, Xi'an, Shaanxi 710065, China

Abstract

Objective The closed-loop control mode in fiber optic gyroscopes causes the production of the modulation crosstalk, which leads to the dead zone phenomenon, with negative outcomes on the zero bias stability of the gyroscope. The random modulation method can reduce the impact of the crosstalk on the dead zone; nevertheless, the demodulation period is prolonged, the dynamic range of the fiber optic gyroscope is sacrificed, and the random noise increases. Meanwhile, a six-state modulation can maintain a good performance; however, it is able to eliminate the modulation crosstalk only for a single modulation depth. In this research, we proposed an innovative polymorphic modulation method for eliminating the dead zone problem caused by modulation crosstalk, and constructed the best modulation method under different modulation depths to eliminate crosstalk and achieve a good performance for fiber optic gyroscopes (FOG).

Methods Based on the principle of digital closed-loop fiber optic gyro modulation and demodulation, we define the polymorphic sequence modulation structure, and establish a sequence of modulation and demodulation sequences correlation function. When the correlation function is zero, the general formula for calculating the modulation phase is extracted, the proportion relation between φ_m and $2\pi - \varphi_m$ in the polymorphic modulation sequence is obtained, and the modulation sequences for eliminating crosstalk at different modulation depths are calculated. The performance indexes of four- and multistate modulation in FOG were tested at modulation depths of $\pi/2$, $2\pi/3$, $3\pi/4$, $4\pi/5$, $5\pi/6$, and $7\pi/8$. Furthermore, the experimental data of two methods were analyzed and compared.

Results and Discussions The multistate modulation method has achieved good results in solving the dead zone problem caused by modulation crosstalk. Regarding the test data of the dead zone at modulation depths of $\pi/2$, $2\pi/3$, $3\pi/4$, $4\pi/5$, $5\pi/6$, and $7\pi/8$ (Figs. 9–14), it has been observed that the fiber optic gyroscope output is nonlinear near the zero angular velocity input, indicating that the four-state modulation dead zone still exists, and that the noise increases near the entering and leaving dead zones. More in detail, the output noise is small, the polymorphic modulation dead zone threshold test curve, the fiber optic gyroscope output changes linearly, the dead zone basically

disappears, and the output noise decreases with the increase in modulation depth. The multistate modulation method maintains the good performance of FOG, while the angle random walk coefficient is smaller than that of the four-state modulation (Table 3). Therefore, the effect of multistate square wave modulation on dead zone inhibition is better than that of four-state modulation, and thus the former can effectively eliminate the dead zone effect.

Conclusions In this research, a polymorphic modulation method is proposed to suppress crosstalk by establishing a general formula adapted to different modulation depths; the optimal modulation method is determined by different modulation depths to eliminate the dead zone. According to the National Military test standard, the performance tests of the four-state and polymorphic modulations are carried out under modulation depths of $\pi/2$, $2\pi/3$, $3\pi/4$, $4\pi/5$, $5\pi/6$, and $7\pi/8$. The dead zone thresholds corresponding to these depths are about 0.453, 0.741, 0.340, 0.623, 0.539, and 0.432 ($^{\circ}$)/h. The zero offset stability corresponding to the use of polymorphism modulation is 0.0893, 0.0701, 0.0491, 0.0429, 0.0397, and 0.0365 ($^{\circ}$)/h, respectively. The corresponding angular random walk coefficients are 0.0031, 0.0027, 0.0021, 0.0019, 0.0015, and 0.0012 ($^{\circ}$)/ \sqrt{h} , respectively. Using the polymorphic modulation method derived from the general formula, the good performance of the fiber optic gyroscope can be maintained, and the obvious dead zone cannot be observed. Results show that the polymorphic square wave modulation has a significant advantage in eliminating the dead zone problem caused by crosstalk, which provides an important step for the realization of high-performance fiber optic gyroscopes.

Key words fiber optics; fiber optic gyroscope; crosstalk; dead zone; phase modulation; polymorphic modulation