

光纤陀螺抑制过调制串扰的多态方波调制方法

李 贺¹, 邓学文¹, 朱奎宝¹, 邓年茂²

(1. 北京计算机技术及应用研究所, 北京 100854; 2. 北京控制与电子技术研究所, 北京 100038)

摘 要: 光纤陀螺方波调制信号引起的调制串扰会导致陀螺输出信号的不稳定, 恶化阈值、标度非线性等指标。过调制技术是采用增大调制相位来抑制噪声的一种方法, 根据过调制串扰的相关解调原理和模型, 推导出含过调制串扰的陀螺输出表达式, 指出过调制相位是影响串扰量的重要因素。针对增大过调制相位引起串扰量增加的问题, 提出一种抑制过调制串扰的多态方波调制方法, 利用响应余弦函数的周期性和调制波形的重复性, 产生统计上相关性很小的调制信号和解调信号, 在一定的延迟时间下, 调制信号及串扰信号与解调信号的相关结果为 0, 在相关解调过程中减小串扰量。仿真和实验结果表明, 该调制方法对串扰信号的抑制作用相比方波过调制提高一个数量级, 陀螺的零偏稳定性和阈值指标相比方波过调制改善约 40%。

关键词: 光纤陀螺; 串扰; 过调制; 多态方波; 相关性

中图分类号: V241.5+9 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0822004

Method of variable square wave modulation to restrain excessive modulation crosstalk in FOG

Li He¹, Deng Xuewen¹, Zhu Kuibao¹, Deng Nianmao²

(1. Beijing Institute of Computer Technology and Application, Beijing 100854, China;
2. Beijing Institute of Control and Electronics Technology, Beijing 100038, China)

Abstract: Crosstalk from square wave modulation signal causes output signal instability and deteriorates threshold value and scale linearity in FOG. Excessive modulation uses bigger phase to restrain noise. According to the principle of correlative demodulation and crosstalk model, the output expression of FOG containing excessive modulation crosstalk would be derived and the modulation phase is an important effect factor of crosstalk. To solve the problem that deeper modulation phase would enlarge the crosstalk, a method of variable square wave modulation was put forward to restrain the crosstalk. With periodicity of response cosine function and repeatable modulation wave, the modulation signal and demodulation signal would be generated nearly independently. The correlative demodulation result would be zero in some delay time and reduce the crosstalk amount. Simulation and experimental results indicate that this method can improve one order of magnitude of restrain effect of crosstalk compared to square wave modulation. The zero bias stability and threshold value would be improved about 40% compared with square wave excessive modulation.

Key words: fiber optic gyroscope; crosstalk; excessive modulation; variable square wave; relativity

收稿日期: 2016-12-05; 修订日期: 2017-01-13

基金项目: 北京计算机技术及应用研究所所内项目

作者简介: 李贺(1988-), 男, 博士生, 主要从事光纤陀螺随机误差方面的研究。Email: lihesky1988@163.com

导师简介: 邓年茂(1963-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事光电技术方面的研究。Email: dengnianmao@sohu.com

0 引言

光纤陀螺是一种基于 Sagnac 效应的新型全固态惯性仪表,主要用于测量导弹、火箭、飞机等运载体的旋转角速度和姿态角,因其具有质量轻、体积小、动态范围大等特点而被广泛用于航空、航天、航海领域。由于采用必要的相位调制和闭环反馈控制技术,数字闭环光纤陀螺常用的方波调制信号将引入与解调信号同频同相的串扰信号^[1],从而导致陀螺的零偏稳定性、阈值、标度非线性等指标恶化。北京航空航天大学的研究人员提出了一种基于 4 态马尔可夫链的光纤陀螺随机调制方法^[2],这种方法通过产生统计上相互独立的调制信号和解调信号,在解调环节消除调制串扰,但 4 态的调制波形仅能满足 $\pi/2$ 方波调制相位。而中高精度光纤陀螺为了抑制散粒噪声和相对强度噪声,常采用方波调制相位大于 $\pi/2$ (调制相位范围 $\pi/2 \sim \pi$) 的过调制技术来提高陀螺输出信号的信噪比^[3],目前,国内分析光纤陀螺过调制相位对串扰量影响的文献很少,也没有建立过调制相位与串扰量之间的关系式,因此,开展过调制串扰的相关理论和抑制方法研究是中高精度光纤陀螺的重要课题之一。

文中在分析光纤陀螺方波过调制串扰的相关解调原理和模型的基础上,推导出含过调制串扰量的陀螺输出表达式,分析了过调制相位与串扰量之间的关系,并根据随机调制原理,提出一种抑制过调制串扰的多态方波调制方法,该方法利用一组重复的调制序列,实现调制信号与解调信号的解相关,从而减小串扰量对光纤陀螺的性能指标的影响。

1 光纤陀螺方波过调制串扰的理论分析

1.1 光纤陀螺方波过调制串扰的解调原理

在数字闭环光纤陀螺的检测电路中,反馈相位阶梯波信号与调制信号叠加后作用于 Y 波导,调制信号的电压一般可达几伏,而光电探测器输出的信号在微伏量级,如此大的调制电压会通过电路板或其他途径耦合到探测器的信号中,尽管串扰信号的耦合比例系数很小,但串扰信号仍将对陀螺信号的解调产生影响^[4-7]。由于光纤陀螺 Sagnac 效应的干涉信号是微弱的直流信号,常采用调制放大和相关检

测技术来提高干涉信号的信噪比^[8]。设数字闭环光纤陀螺一组方波过调制序列 S_m 、调制相位序列 S_ϕ 、串扰序列 S_r 与解调序列 S_d 如图 1 所示。

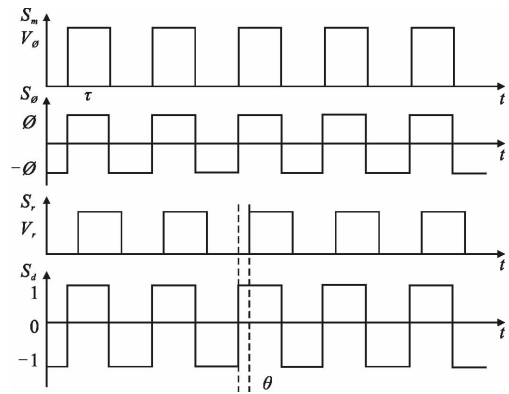


图 1 方波调制各序列波形

Fig.1 Each sequence wave of square wave modulation

图中 V_ϕ 是使 Y 波导产生相移 ϕ ($\phi > \pi/2$) 时所需的调制电压幅值, $V_\phi = K_v \phi$, K_v 为调制相位到调制电压的转换系数, V_r 是串扰信号电压幅值, $V_r = K_r V_\phi$, K_r 为串扰耦合系数, τ 是每个序列值的持续时间,是光纤环的渡越周期^[9-11], θ 是串扰序列与调制序列之间的延迟时间,由串扰信号耦合到被测信号端的传播时间决定,图 1 中各序列间有如下关系:

$$S_m(n) = \begin{cases} V_\phi, n=2k-1 \\ 0, n=2k \end{cases}, k \geq 1 \quad (1)$$

$$S_\phi(n) = K_\phi \cos[S_m(n) - S_m(n-1)] \quad (2)$$

$$S_d(n) = \sin K_d [S_m(n) - S_m(n-1)] \quad (3)$$

$$S_r(n) = K_r S_m(n - \theta) \quad (4)$$

式中: K_ϕ 、 K_d 为调制系数,根据相关检测原理,对串扰序列 S_r 进行相关解调得:

$$R_{rd}(\theta, \phi) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N S_r(n) \cdot S_d(n) = \begin{cases} K_r K_v \phi (1/2 - \theta/\pi), 0 < \theta \leq \pi \\ K_r K_v \phi (\theta/\pi - 3/2), \pi < \theta \leq 2\pi \end{cases} \quad (5)$$

式中: N 为相关长度,由公式(5)可知,方波过调制序列产生的串扰序列与解调序列之间是相关的,其相关运算的结果是两序列相位差的函数,且正比于调制相位 ϕ 。因此,理论上方波过调制相位 ϕ 越大,调制信号引起的串扰电压和串扰的相关解调结果越大。

而抑制调制串扰有两条途径:一是阻断调制信号与光电探测器之间的耦合通道,二是采用适当的

调制波形以降低调制信号与解调信号之间的相关性,由于串扰是通过电路和空间共同发生作用的,从硬件电路上阻断串扰通道难度很大,因此,降低调制信号与解调信号间的相关性成为解决过调制串扰问题的关键^[12-14]。

1.2 光纤陀螺过调制相位对串扰量的影响

根据数字闭环光纤陀螺的工作原理^[8]可以建立图 2 所示的采用过调制技术的光纤陀螺调制串扰模型。

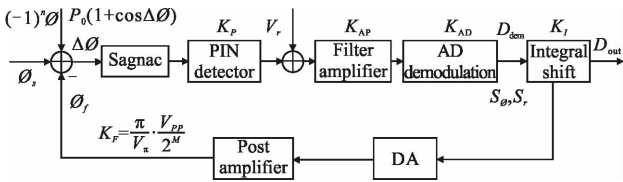


图 2 光纤陀螺的串扰模型

Fig.2 Crosstalk model of FOG

上图中 ϕ_s 为 Sagnac 相移, ϕ 为过调制相位, ϕ_f 为反馈相移, P_0 为干涉信号的平均光功率, K_p 为光电探测器增益, V_r 为由调制方波产生的串扰电压幅值, K_{AP} 为前置放大器增益, K_{AD} 为 AD 转换解调增益, K_I 为反馈量调整增益, K_F 为反馈通道增益, V_π 为 Y 波导半波电压, V_{PP} 为阶梯波的峰峰值, M 为 DA 转换器的位数。公式(6)和公式(7)分别表示经过滤波放大和 AD 转换后的光纤陀螺方波干涉信号 $S_\phi(n)$ 和串扰信号 $S_r(n)$, 式中每个信号值持续 τ 时间:

$$S_\phi(n) = K_{AD}K_{AP}K_pP_0\cos[\phi_s - \phi_f + (-1)^n\phi] \quad (6)$$

$$S_r(n) = \begin{cases} K_{AD}K_{AP}V_r, & n=2m-1 \\ 0, & n=2m \end{cases}, m \geq 1 \quad (7)$$

根据公式(5), 设陀螺的一个积分周期为有限长度 N , N 是渡越时间 τ 的偶数倍, 幅值为 V_r 的串扰信号 S_r 与解调信号 S_d 的相关运算结果表示为 $R_{rd}(\theta, \phi)$, 则光纤陀螺信号的相关解调输出为:

$$D_{out} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [S_\phi(n) + S_r(n-\theta)] \cdot S_d(n) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N S_\phi(n) \cdot S_d(n) + \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N S_r(n-\theta) \cdot S_d(n) \quad (8)$$

由图 1 和公式(3)可知, 解调信号 S_d 是 1 和 -1 按 τ 周期相互交替出现的, 实际中光纤陀螺的检测过程是每相邻两个 τ 周期进行一次解调, 得到输出 D_{dem} 后再累加取平均得到 D_{out} , 因此, 由公式(8)可推出公式(9):

$$D_{out} = \frac{2}{N} \sum_{n=1}^{N/2} [S_\phi(n) - S_\phi(n-1) + S_r(n) - S_r(n-1)] =$$

$$\frac{2}{N} \sum_{n=1}^{N/2} D_{dem} = \frac{2}{N} \sum_{n=1}^{N/2} \{ K_{AD}K_{AP}K_pP_0[\cos(\phi_s - \phi_f - \phi) - \cos(\phi_s - \phi_f + \phi)] + K_{AD}K_{AP}R_{rd}(\theta, \phi) \} \quad (9)$$

由于系统是闭环的, 当环路稳定时, 有 $\phi_s \approx \phi_f$ 和 $D_{dem} \approx 0$, 由图 2 模型框图的反馈回路可得公式(11), 由光纤陀螺 Sagnac 效应可得公式(12), 则有

$$D_{dem} = K_{AD}K_{AP}K_pP_0[\cos(\phi_s - \phi_f - \phi) - \cos(\phi_s - \phi_f + \phi)] + K_{AD}K_{AP}R_{rd}(\theta, \phi) \approx 0 \quad (10)$$

$$\phi_f = K_I D_{out} = \frac{\pi V_{PP}}{2^M V_\pi} D_{out} \quad (11)$$

$$\phi_s = \frac{2\pi LD}{\lambda c} \Omega \quad (12)$$

式中: L 为光纤长度; D 为光纤环直径; λ 为光源波长; c 为真空中光速; Ω 为输入角速度, 根据公式(10)~(12)可得光纤陀螺的相关解调输出为:

$$D_{out} = \left(\frac{2^{M+1} V_\pi LD}{\lambda c V_{PP}} \Omega - \frac{2^{M-1} V_\pi}{\pi V_{PP} K_p P_0} \cdot \frac{R_{rd}(\theta, \phi)}{\sin\phi} \right) \quad (13)$$

式中: 第一项为光纤陀螺敏感角速率 Ω 的输出; 第二项即为过调制信号引入的串扰量, 其与串扰信号的相关解调值和调制相位均成正比。由此可见, 光纤陀螺过调制技术在 $(\pi/2, \pi)$ 内增大了调制相位, 这将增大调制串扰量, 恶化陀螺的性能指标。

2 光纤陀螺多态方波调制方法

串扰信号由调制信号产生, 降低调制信号与解调信号之间的相关性可以抑制调制串扰。随机调制方法利用调制信号状态转移方向的随机性和三角函数的周期性, 实现调制序列和解调序列之间的解相关^[2], 可有效抑制调制串扰的影响, 其采用调制相位 ϕ 的随机调制信号状态转移情况如图 3 所示, 调制信号的最小状态数 n 与调制相位 ϕ 之间满足关系式: $n\phi = 2m\pi$ ^[15], m 为正整数, n 个状态的调制信号形成一个闭环。



图 3 随机调制信号的状态转移图

Fig.3 State transfer of random modulation signal

由于随机调制序列的产生是随机的, 当相关运算的长度 N 足够长时, 调制序列 $S_m(n)$ 和解调 $S_d(n)$ 有较小的相关值。如果从图 3 中的随机调制序列的状态

1 开始沿顺时针方向和逆时针方向分别连续跳转一周, 则所经过的状态将组成一组固定顺序的长度为 $2n$ 的调制序列 $\{1, 2, \dots, n-1, 0, n-1, \dots, 2, 1, 0\} V_\phi$, 根据公式(2)和公式(3), 上述序列相应产生 $2n$ 个 τ 周期的调制相位序列 $(\pm\phi)$ 和解调序列 (± 1) , 各个序列对应关系如图 4 所示。

$$\begin{matrix} S_m \{ V_\phi, 2V_\phi, \dots, (n-1)V_\phi, 0, (n-1)V_\phi, \dots, 2V_\phi, V_\phi, 0 \} \\ S_\phi \{ \phi, \phi, \dots, \phi, \phi, -\phi, \dots, -\phi, -\phi, -\phi \} \\ S_d \{ \underbrace{1, 1, \dots, 1, 1}_{n\text{个}}, \underbrace{-1, \dots, -1, -1, -1}_{n\text{个}} \} \end{matrix}$$

图 4 固定跳转顺序的序列值
Fig.4 Sequence value in regular shift order

在这 $2n$ 个 τ 周期内, 调制信号的每个状态重复出现, 因此, 调制序列的波形之间存在如下关系: $S_m(i)=S_m(2n-i), i=1, 2, \dots, n-1, S_m(n)=S_m(2n)$, 当串扰序列和调制序列间的延迟时间 $\theta=0$ 时, 由公式(4)、(5)可得串扰序列与解调序列的相关解调结果:

$$\begin{aligned} R_{rd} &= \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_r(i) \cdot S_d(i) = K_r \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_m(i) \cdot S_d(i) = \\ & K_r \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N/2n} \sum_{i=1}^{2n} S_{m,j}(i) \cdot S_{d,j}(i) = \\ & K_r \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N/2n} \sum_{i=1}^n [S_{m,j}(i) - S_{m,j}(2n-i)] = 0 \end{aligned} \quad (14)$$

由上式知, 当相关长度 N 为 $2n$ 的整数倍时, 固定顺序的多态方波调制序列与解调序列间的相关运算结果理论上为 0, 相比于随机调制序列, 多态方波调制序列可在较短的相关运算长度内实现更低的相关值, 且调制波形固定, 更易于工程实现。图 5 所示

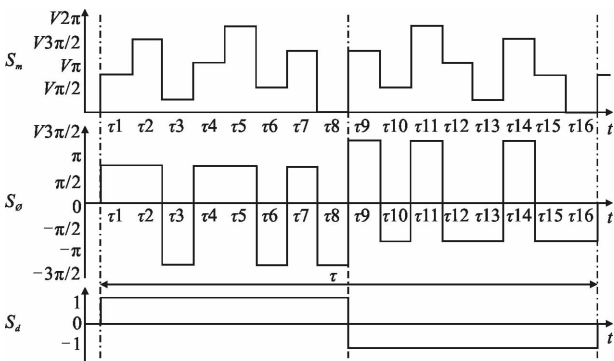


图 5 相位的多态方波调制各序列波形图

Fig.5 Each sequence wave of various square wave modulation

为采用 $3\pi/4$ 相位的多态方波调制序列 $S_m(n)$ 以及对应的调制相位序列 $S_\phi(n)$ 和解调序列 $S_d(n)$, 实际中因

Y 波导最大调制电压 $V_{2\pi}$ 对应的相位为 2π , 当 $nV_\phi > V_{2\pi}$ 时, $S_m(n)$ 取 $(nV_\phi/V_{2\pi})$ 的余数 $S_m'(n)$, 由公式(2)的余弦函数周期性知, $S_m'(n)$ 与 $S_m(n)$ 等效。

根据公式(14)知, 多态方波调制序列的解调周期 $T=2n\tau$ (n 为最小调制状态数), 当调制相位对应的最小调制状态数增加时, 陀螺的动态响应带宽将相应降低, 因此, 多态方波调制方法较适用于工作环境相对稳定的星载光纤陀螺。此外, 对于最小调制状态数较少且常用的过调制相位, 如 $2\pi/3$ (最小调制状态数仅为 3), 其解调周期为 6τ , 对陀螺响应带宽的影响较小, 可适当采用多态方波调制来提高串扰抑制的效果。

3 仿真和实验

3.1 调制序列与解调序列间的相关性仿真

仿真中取相关长度 $N=1000$, 调制幅值 $V_\pi=1$, 则采用 $3\pi/4$ 调制相位的方波过调制序列和多态方波调制序列可分别表示为 $\{0.75, 0\}$ 和 $\{0.75, 1.5, 0.25, 1, 1.75, 0.5, 1.25, 0, 1.25, 0.5, 1.75, 1, 0.25, 1.5, 0.75, 0\}$, 每个 τ 周期内取 10 个采样点, 用多个周期的调制序列和解调序列进行相关运算, 方波过调制和多态方波调制的仿真结果如图 6 所示。

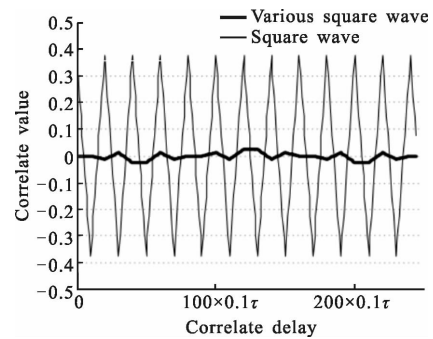


图 6 相关结果对比曲线

Fig.6 Contrast curve of correlate result

从上图看出, 方波过调制的相关运算结果随延迟时间呈周期性变化, 相关结果极值为 0.375 和 -0.375, 而采用多态方波调制时, 无论延迟时间多长, 其相关结果都较小, 极值约为 0.025 和 -0.025, 相比方波过调制, 相关值减小到约 $1/15$, 且当相关延迟在 τ 的某些整数倍区间内(如 $0 \sim \tau$)时, 多态方波调制序列和解调序列间的相关结果为 0, 这与公式(14)的理论运算结果相同。

3.2 过调制串扰的测试实验

选用一只散装光纤陀螺,光源处于关闭状态,则由光路产生的干涉信号 $S_{\phi}(n)=0$,实验采用开环检测方案,则图 2 的串扰数学模型简化为图 7。

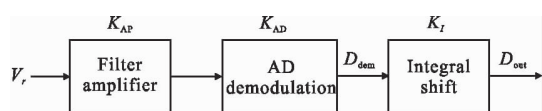


图 7 开环检测的串扰模型

Fig.7 Crosstalk model of open-loop detection

根据 1.2 节中的计算式,陀螺长度为 N 的相关运算过程对应的时间为 $N\tau$,开环检测中由于不存在反馈通道,故 $D_{dem} \neq 0$,考虑到系统中含随时间变化的噪声误差 R_{noise} ,则开环陀螺输出信号随时间的表达式为:

$$D_{out}(t) = \frac{t}{N\tau} \left(\frac{2}{N} \sum_{n=1}^{N/2} D_{dem} \right) + R_{noise}(t) = \frac{K_{AD}K_{AP}R_{nl}(\theta, \phi)}{N\tau} \cdot t + R_{noise}(t) \quad (15)$$

当实验采用同一块检测电路和相同的相关解调长度时,参数 K_{AD} 、 K_{AP} 、 N 保持不变,由于噪声量级较小,陀螺输出值与时间之间近似为线性关系,其斜率与串扰相关解调结果 $R_{nl}(\theta, \phi)$ 近似成正比。实验选用 $2\pi/3$ 和 $3\pi/4$ 调制相位的方波过调制和 $3\pi/4$ 调制相位的多态方波调制进行串扰测试,每次测试的采样时间为 1 000 s,采样间隔 1 s,实验测试数据曲线如图 8 所示。

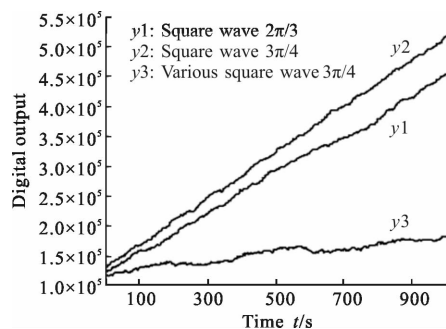


图 8 各相位的串扰测试数据曲线

Fig.8 Test data curve of each phase

从图中可知,方波过调制串扰量与过调制相位有关,调制相位越大,串扰量越大。多态方波调制的串扰量相比同相位的方波过调制明显减小,这与理论分析的结果一致。

3.3 光纤陀螺性能改善实验

实验选用一只小型化高精度光纤陀螺,光纤环长 1 000 m,光纤环直径 0.077 m,采用 $3\pi/4$ 相位的方波过调制和多态方波调制进行测试,零偏稳定性和阈值共重复测试 10 组,数据取平均,零偏稳定性每组测试时间为 3 600 s,数据采样间隔 1 s,测试结果:方波过调制对应的零偏稳定性为 $0.068(^{\circ})/h$ (1 s 平滑),阈值为 $0.087(^{\circ})/h$,多态方波调制对应的零偏稳定性为 $0.043(^{\circ})/h$ (1 s 平滑),阈值为 $0.056(^{\circ})/h$,图 9 为一组方波过调制的陀螺输出数据,图 10 为一组多态方波调制的陀螺输出数据。

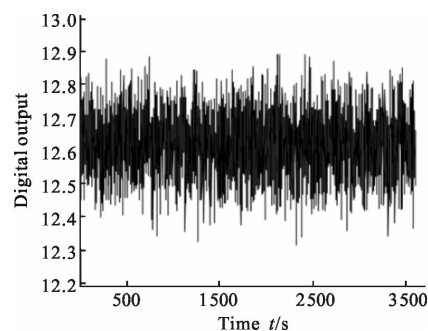


图 9 方波调制输出零偏

Fig.9 Output zero bias of square wave modulation

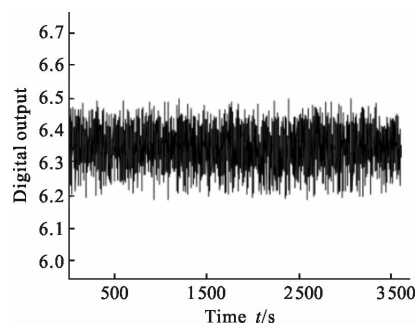


图 10 多态方波调制输出零偏

Fig.10 Output zero bias of various square wave modulation

由测试数据看, $3\pi/4$ 调制相位的多态方波调制相比同相位的方波过调制,其零偏稳定性和阈值指标均改善了约 40%,说明多态方波调制对过调制串扰有较好的抑制作用。

4 结论

过调制技术是中高精度光纤陀螺抑制噪声的重要技术之一,文中通过分析光纤陀螺过调制串扰的相关解调原理和模型,推导出过调制相位与串扰量

之间的关系式,并结合串扰的测试实验结果,给出结论:光纤陀螺过调制相位是影响陀螺输出信号中串扰量的重要因素,过调制相位越大,调制信号引入的串扰量越大。针对过调制技术存在的上述问题,文中从随机调制的原理出发,提出了一种抑制过调制串扰的多态方波调制方法,该方法利用随机调制序列的一种固定跳转顺序,生成一组波形重复的调制序列,在小于光纤环渡越周期的延迟时间内,实现串扰信号与解调信号之间的相关值为 0,从而减小串扰的影响,仿真和实验结果均证明了多态方波调制方法抑制串扰的有效性。

参考文献:

[1] Xu Wenyuan, Zhang Chunxi, Zhang Xi, et al. Theory analysis and experiment of the double-square wave modulation in FOG [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, 36(1): 63-67. (in Chinese)
 许文渊,张春熹,张晞,等. 光纤陀螺双方波调制方法及其实验研究[J]. 光电工程, 2009, 36(1): 63-67.

[2] Jin Jing, Li Min, Song Ningfang, et al. Random modulation for FOG based on four-states Markov chain [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2008, 34(4): 769-772. (in Chinese)
 金靖,李敏,宋凝芳,等. 基于 4 态马尔科夫链的光纤陀螺随机调制 [J]. 北京航空航天大学学报, 2008, 34(4): 769-772.

[3] Gu Hong, Zhao Qida, Yang Gongliu. Study of the over modulation technique in the fiber optic gyroscope [J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2008, 19(8): 1035-1037. (in Chinese)
 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): 1035-1037.

[4] Liu Jianfeng, Jiang Yong, Ding Chuanhong. The calculation of random signal of FOG based on Kalman [J]. *Journal of Astronautics*, 2009, 30(2): 604-605. (in Chinese)
 刘建锋,江涌,丁传红. 基于 Kalman 光纤陀螺的随机信号处理[J]. 宇航学报, 2009, 30(2): 604-605.

[5] Tian Yunpeng, Yang Xiaojun, Guo Yunzeng, et al. Filtering analysis on the random noise of fiber optic gyroscope [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(9): 0906006. (in Chinese)
 田云鹏,杨小军,郭云曾,等. 光纤陀螺随机噪声滤波分析 [J]. 光学学报, 2015, 35(9): 0906006.

[6] Zhang Qian, Wang Wei, Wang Lei, et al. Research on random errors of fiber optic gyro based on dynamic Allan variance and algorithm improvement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(4): 0406003. (in Chinese)
 张谦,王玮,王蕾,等. 基于动态 Allan 方差的光纤陀螺随机误差分析及算法改进 [J]. 光学学报, 2015, 35(4): 0406003.

[7] Suo Xinxin, Yang Yuanhong, Yang Mingwei, et al. Relative intensity noise characteristic of broadband sources and its effect on performance of closed-loop FOG [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(6): 0605009. (in Chinese)
 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.

[8] Zhang Guicai. Principles and Technologies of Fiber-Optic Gyroscope [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008. (in Chinese)
 张桂才. 光纤陀螺原理与技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.

[9] Li Lijing, Wang Ying, Yang Hui. Control of temperature dynamic characteristics of SFS light source [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(3): 539-546. (in Chinese)
 李立京,王颖,杨慧. 超荧光光源温度动态特性的分析与控制 [J]. 光学精密工程, 2014, 22(3): 539-546.

[10] Liu Shiwei, Wang Jiakou, Hu Yibin, et al. Influence of square-wave modulation distortion on closed-loop fiber optic gyroscope and its elimination [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(12): 3755-3671. (in Chinese)
 刘士伟,王家口,胡奕彬,等. 闭环光纤陀螺方波调制失真影响与消除 [J]. 红外与激光工程, 2015, 44(12): 3755-3671.

[11] Han Zhengying, Gao Han, Gao Yesheng, et al. Effect of strain distribution measurement of fiber coil on FOG performance [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(12): 4129-4130. (in Chinese)
 韩正英,高涵,高业胜,等. 光纤环应力分布测试对光纤陀螺性能的影响 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(12): 4129-4130.

[12] Li Changsheng, Zhang Chunxi, Song Ningfang, et al. Polarization-maintaining fiber loop with double optical length and its application to fiber optic gyroscope [J]. *Chinese Optic Letters*, 2011, 9(2): 020604.

[13] Hao Yanling, Wang Deshuang, Chen Honggang, et al. Suppression of relative intensity noise for FOG by using signal cross-correlation [J]. *Optics and Precision Engineering*,

- 2012, 20(6): 1218–1224. (in Chinese)
- 郝燕玲, 王德双, 陈洪刚, 等. 利用信号相关性抑制光纤陀螺强度噪声[J]. 光学精密工程, 2012, 20(6): 1218–1224.
- [14] Wang Yandong, Yang Chunlei, Dong Wenhui. EMD filtering of fiber gyro in initial alignment of SINS [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(6): 934–935. (in Chinese)
- 王延东, 杨春雷, 董文辉. SINS 初始对准中光纤陀螺 EMD 滤波[J]. 中国光学, 2015, 8(6): 934–935.
- [15] John G Mark, Daniel A Tazartes, Amado Cordova. Method and apparatus for overcoming cross-coupling in a fiber optic gyroscope employing overmodulation: United States Patent, 5682241[P]. 1997–10–28.