基于4态马尔可夫链的光纤陀螺随机调制

金 靖 李 敏 宋凝芳 张春熹

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院，北京 100191)

摘 要：在数字闭环光纤陀螺中，由调制信号引起的电串扰(即调制串扰)会导致零偏稳定性、死区和线性度等指标恶化.为了消除调制串扰信号的影响，提出了基于4态马尔可夫链的随机调制方法.将一个4状态马尔可夫链引入到随机调制中，该马尔可夫链利用正弦函数的周期性和状态转移方向的等概率性，产生出了相互统计独立的调制信号和解调信号，由于解调信号为等概率取值－1，1的零均值随机序列，所以在理想情况下调制信号及电串扰信号和解调信号相关的结果为零.仿真和实验结果表明，基于4态马尔可夫链的随机调制方法对调制串扰信号的抑制可达1×10^3倍，消除了调制串扰信号对陀螺零偏稳定性、死区和线性度等指标的影响.

关 键 词：光纤陀螺；信号检测；随机调制；马尔可夫链；串扰

中图分类号：V 241.5$^+$9

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2008)07-0769-04

Random modulation for fiber optic gyroscope based on four-states Markov chain

Jin Jing Li Min Song Ningfang Zang Chunxi

(School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Electrical crosstalk from modulation signal deteriorates bias stability, dead band and linearity in digital closed-loop fiber optic gyroscope (FOG). A random modulation based on a four-states Markov chain was presented to attenuate the electrical crosstalk. With periodicity of sine function and equiprobability of state transition direction, the four-states Markov chain can generate two signals statistical independently, a demodulation signal and a modulation signal, and the demodulation signal is a zero-mean stochastic sequence with the value of −1 and 1 equiprobablely. So the electrical crosstalk from the modulation signal can be attenuated via correlation with demodulation signal. The random modulation was implemented by using state machine in field programmed gate array (FPGA). Simulation and experimental results indicate that the random modulation based on the four-states Markov chain can attenuate the electrical crosstalk from the modulation signal by 1×10^3 times, and improve bias stability, dead band and linearity of FOG.

Key words: fiber optic gyroscope; signal detection; random modulation; Markov chain; crosstalk

数字闭环光纤陀螺的调制串扰误差主要表现为死区、周期噪声、小角速度漂移等，它将影响陀螺的阈值、零偏稳定性、小角速度线性度等指标[1−3].产生调制串扰误差有两个必要条件，一是存在调制信号耦合到光探测器的串扰通道，二是调制信号与解调信号具有相关性.由于从电路上彻底阻断串扰通道难于实现，所以消除调制信号与解调信号的相关性成为了研究的重点[4−6].

本文提出了基于4态马尔可夫链的随机调制方法，该方法使调制信号和解调信号成为相互独

收稿日期：2007-06-11

作者简介：金 靖(1975－)，男，内蒙古包头人，讲师，jinjing@buaa.edu.cn.

立的随机序列，从解调环节消除了调制串扰，且该方法性能优良，结构简单，便于FPGA(Field Programmed Gate Array)实现.

1 调制串扰途径分析

在数字闭环光纤陀螺中，调制信号电压峰值可高达几伏特，而光探测器输出的电流峰值却可低至10^{-13}安培，因此，光探测器的输出极易受到调制串扰信号的影响，调制串扰路径如图1中虚线部分所示[1-3].

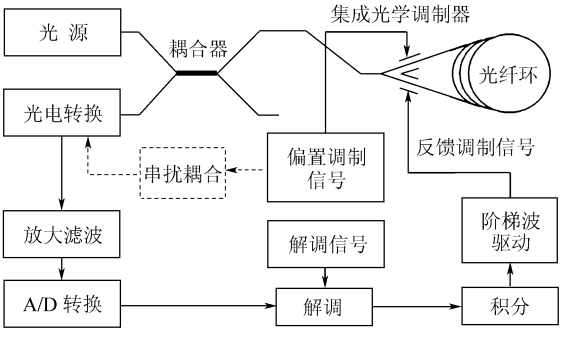


图1 数字闭环光纤陀螺调制串扰框图

如果陀螺的主要参数如表1所示，则输入角速度为0.1(°)/h时对应的Sagnac相移为[1]：$\Phi=2\pi LD\Omega/(\lambda C)=2.73\times10^{-7}$ rad；若系统附加一个$\pi/2$的相位偏置，则光探测器输出的电流幅值为[1]：$I=PR\cos(\Phi-\pi/2)=5.02\times10^{-13}$ A. 由以上分析可知，在2.5 μs的光渡越周期τ内，只要调制信号串扰耦合到光探测器10个电子，就可能使陀螺输出产生0.1(°)/h量级的误差.

表1 光纤陀螺参数值

参数	取值
光纤长度 L/m	500
光纤环直径 D/m	0.07
光波长 λ/μm	1.3
探测器输入光功率 P/μW	2
光电转换效率 R/(A·W^{-1})	0.92
真空光速 C/(km·s^{-1})	3×10^5

数字闭环光纤陀螺多采用方波偏置调制和方波解调[1-4]，调制信号与解调信号关系如图2所示.

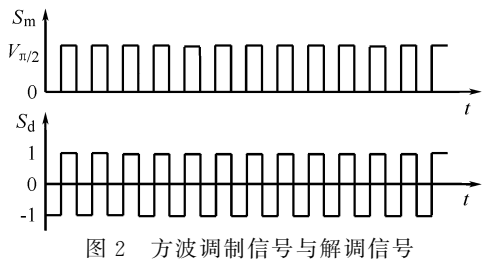


图2 方波调制信号与解调信号

图中，$S_m(n)$为调制信号序列；$S_d(n)$为解调信号序列；$V_{\pi/2}$为偏置相位是$\pi/2$时所需的调制幅值；τ为每个序列值的延迟时间，是光纤环渡越时间；$S_m(n)$，$S_d(n)$之间的关系可表示为[1]

$$S_d(n)=\sin[K_mS_m(n)-K_mS_m(n-1)] \quad (1)$$

式中，K_m为调制系数，且$V_{\pi/2}K_m=\pi/2$. 若$S_m(n)$为0和$V_{\pi/2}$周期更替的序列，则$S_d(n)$为−1和1周期更替的序列，将$S_m(n)$，$S_d(n)$进行相关解调得

$$R_{md}(m)=\lim_{N\to\infty}\frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N}S_m(n)S_d(n-m)=\begin{cases}V_{\pi/2}/2 & m\text{ 为偶数}\\ -V_{\pi/2}/2 & m\text{ 为奇数}\end{cases} \quad (2)$$

式中，N为相关长度；$m\tau$为相关延迟时间. 由式(2)可知，调制信号序列与解调信号序列是周期相关的，因此，调制信号串扰到探测器会被解调信号检测出，从而产生调制串扰误差.

抑制调制串扰误差有两种方法：①将调制电路和信号检测电路物理隔离以阻断串扰通道；②采用随机调制的方法消除调制信号与解调信号的相关性. 方法①需要精细的电路设计，且难以得到好的效果[1-3]；方法②只需进行算法和软件的调整，易于实现.

2 随机调制原理与实现

2.1 随机调制原理

随机调制的思路是，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，使调制信号序列和解调信号序列相互独立，且解调信号序列的均值为零，则调制信号序列和解调信号序列相关解调的结果为零.

将4个状态{1，2，3，4}的马氏链引入调制信号序列$S_m(n)$，$S_m(n)$在每个状态的取值分别为$\{0,V_{\pi/2},V_{\pi},V_{3\pi/2}\}$，调制信号状态转移如图3所示.

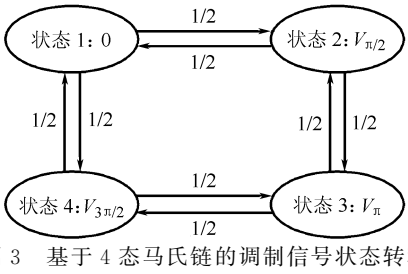


图3 基于4态马氏链的调制信号状态转移

由图3可知，调制信号在任何状态只能等概率地向相邻状态转移，且状态转移呈现周期性{1，3}→{2，4}→{1，3}→{2，4}…，其一步状态转移矩

阵为

$$\boldsymbol{p}=\begin{Bmatrix}0 & 1/2 & 0 & 1/2\\ 1/2 & 0 & 1/2 & 0\\ 0 & 1/2 & 0 & 1/2\\ 1/2 & 0 & 1/2 & 0\end{Bmatrix} \tag{3}$$

若 $V_{\pi/2}K_{\mathrm{m}}=\pi/2$,$V_{\pi}K_{\mathrm{m}}=\pi$,$V_{3\pi/2}K_{\mathrm{m}}=3\pi/2$,则由式(1)、式(3)可知,$S_{\mathrm{d}}(n)$为等概率取值$-1$,1的零均值随机序列,而且由状态转移的周期性可得,$S_{\mathrm{d}}(n)$的取值仅由 $S_{\mathrm{m}}(n)$状态转移方向决定,而与 $S_{\mathrm{m}}(n)$所处的状态无关,即 $S_{\mathrm{d}}(n)$与$S_{\mathrm{m}}(n)$相互独立[7].随机调制信号与解调信号关系如图 4 所示.

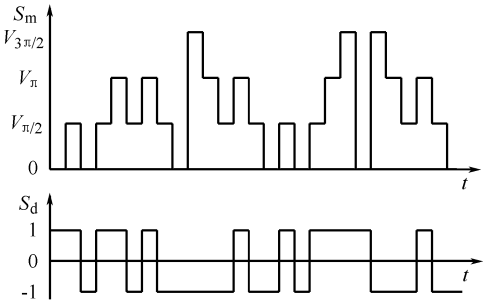


图 4　随机调制信号与解调信号

由于 $S_{\mathrm{d}}(n)$为零均值随机序列,且 $S_{\mathrm{d}}(n)$,$S_{\mathrm{m}}(n)$相互统计独立,所以得 $S_{\mathrm{m}}(n)$和 $S_{\mathrm{d}}(n)$的相关解调结果为

$$R_{\mathrm{md}}(m)=\lim_{N\to\infty}\frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N}S_{\mathrm{m}}(n)S_{\mathrm{d}}(n-m)=$$
$$E[S_{\mathrm{m}}(n)]E[S_{\mathrm{d}}(n-m)]=0 \tag{4}$$

可见,若随机调制信号串扰到光探测器,则通过相关解调可以消除其影响.

2.2　随机调制的实现

本文提出的基于 4 态马尔可夫链的随机调制方法非常易于在 FPGA 中实现,图 5 给出了一种基于状态机的实现方法.

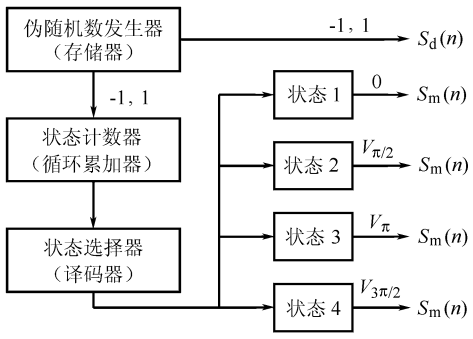


图 5　随机调制在 FPGA 中的实现框图

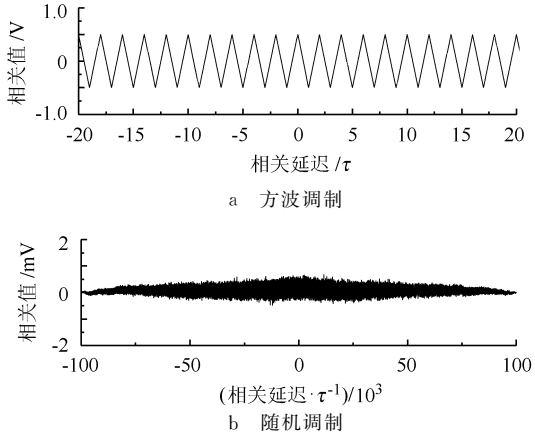
在图 5 中,伪随机数发生器输出等概率取值-1,1的零均值随机序列[7-8],该序列一方面作为解调信号输出值,另一方面进入模 4 循环累加器以产生状态码,可表示为

$$C_{\mathrm{s}}(i)=C_{\mathrm{s}}(i-1)+S_{\mathrm{d}}(i)=$$
$$\begin{cases}C_{\mathrm{s}}(i) & \text{其他}\\ 1 & C_{\mathrm{s}}(i-1)=4\quad S_{\mathrm{d}}(i)=1\\ 4 & C_{\mathrm{s}}(i-1)=1\quad S_{\mathrm{d}}(i)=1\end{cases}$$

式中 C_{s} 为状态码,且 $C_{\mathrm{s}}(0)=1$.状态码经译码后按照图 3 各状态的取值确定调制信号输出值.伪随机数发生器中存储的随机序列是循环使用的,存储长度要大于式(2)、式(4)中的相关长度 N.最后,还需对产生的随机调制序列和解调序列进行独立性检验和相关分析,以验证其有效性.

3　仿真与实验

令相关长度为 $N=1\times10^{5}$、调制幅度为 $V_{\pi/2}=V_{\pi}/2=V_{3\pi/2}/3=1$ V,利用式(2)对方波调制信号和解调信号的相关结果进行了仿真,仿真曲线如图 6a;使用 2.2 节方法产生一组随机调制信号序列和解调信号序列,由式(4)可得其相关结果,仿真曲线如图 6b.



a　方波调制

b　随机调制

图 6　调制信号与解调信号的相关结果对比曲线

由图 6 可知,采用方波调制时,随相关延迟时间的变化,方波调制信号和解调信号的相关值呈现周期性变化,当相关延迟时间为 τ 的整数倍时,相关结果为 0.5 V 或-0.5 V;而采用随机调制时,无论相关延迟时间为何值,相关结果均分布在 6×10^{-4} V 到-4×10^{-4} V 之间.

按照上述条件和方法,产生了 100 组随机调制信号序列和解调信号序列,并由式(4)计算其相关延迟时间为零时的相关结果,各组相关的结果如图 7 所示,相关结果的均值为 7×10^{-6} V、方差为 2×10^{-4} V.

通过以上仿真可知,在本文设计的参数条件下,随机调制信号和解调信号的相关值比方波调制信号和解调信号的相关值减小约 1×10^{3} 倍.

实验用陀螺的主要参数见表1.图8a是采用随机调制的陀螺输出数据,零偏稳定性为0.24(°)/h、零偏为-2.6(°)/h;图8b是采用方波调制的陀螺输出数据,零偏稳定性为0.47(°)/h、零偏为-12.28(°)/h.此外,采用方波调制时陀螺死区为0.5(°)/h,采用随机调制时陀螺已无明显死区.

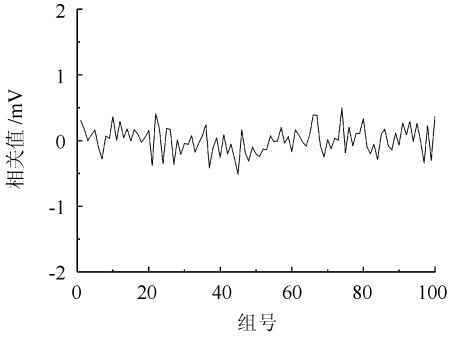


图7 100组随机调制信号与解调信号的相关结果

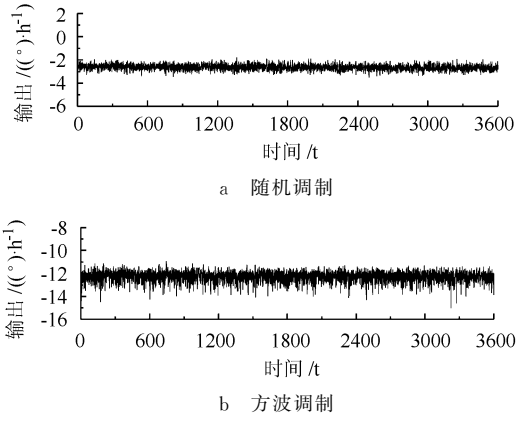


图8 采用方波调制和随机调制时的陀螺输出

4 结束语

本文提出了基于4态马尔可夫链的光纤陀螺随机调制方法,该方法不但可以有效地在解调环节抑制调制串扰误差,而且结构简单易于在FPGA中实现.仿真和实验结果表明:随机调制使调制串扰信号衰减约1×10^3倍,基本消除了调制串扰误差对陀螺偏置、零偏稳定性、死区等指标的影响.

参考文献(References)

[1] Lefevre H C. The fiber-optic gyroscope [M]. London: Artech House, 1993

[2] 潘军.闭环光纤陀螺的死区现象及克服死区实验[J].航空学报,2001, 22 (2): 177-179
Pan Jun. Dead band phenomena of closed-loop fiber optic gyroscope and the experiment to eliminate dead band [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2001, 22 (2): 177-179 (in Chinese)

[3] Pavlath G A. Closed-loop fiber optic gyros [C]// Rric Udd, Lefevre H C, Kazuo Hotate, et al. Fiber Optic Gyros: 20th Anniversary Conference. Denver: SPIE, 1996: 46-60

[4] Spahlinger G. Error compensation via signal correlation in high precision closed-loop fiber optic gyros [C]// Rric Udd, Lefevre H C, Kazuo Hotate, et al. Fiber Optic Gyros: 20th Anniversary Conference. Denver: SPIE, 1996:218~227

[5] 毛彩虹,王冬云,舒晓武,等.伪随机调制在全数字闭环光纤陀螺中的应用[J].光电工程,2002, 29(Sup): 80-83
Mao Caihong, Wang Dongyun, Shu Xiaowu, et al. Application of pseudo-random modulation in full-digital closed-loop optic fiber gyroscope [J]. Opto-Electronic Engineering, 2002, 29(Sup): 80-83 (in Chinese)

[6] 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
Zhang Xi, Pan Xiong, Zhang Chunxi. Theory analysis and experiment of random modulation in FOG [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 32 (2): 195-198 (in Chinese)

[7] Zepernick H J, Filger A. Pseudo random signal processing theory and application [M]. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, 2005

[8] Meerschaert M M. Mathematical modeling [M]. USA: Elsevier Science, 1999:227-249

(责任编辑:娄 嘉)