

采用开关电路消除尖峰脉冲的陀螺及其理论分析

张书颖, 左文龙, 惠菲, 陈馨, 高洪宇
(天津航海仪器研究所, 天津 300131)

摘要: 陀螺输出波形中经常含有2倍于本征频率的尖峰脉冲误差信号。采用高速开关电路消除了光纤陀螺的尖峰脉冲, 提高陀螺采样有用信号的信噪比。从理论分析和仿真上证明了这一方法不仅消除了尖峰脉冲, 而且也消除了尖峰脉冲扩散在解调信号中的奇次谐波干扰。通过实验对比可以看出这一方法提高了陀螺的精度。

关键词: 尖峰脉冲; 开关电路; 奇次谐波; 不对称性

中图分类号: V249 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-8110(2015)04-0058-05

Fiber Optic Gyro with Switch Circuit for Eliminating Spike Pulse and Theoretical Analysis

ZHANG Shu-ying, ZUO Wen-long, HUI Fei, CHEN Xin, GAO Hong-yu
(Tianjin Navigation Instrument Research Institute, Tianjin 300131, China)

Abstract: Gyro's output often contains the error signal whose frequency is twice as much as of the intrinsic frequency. In this paper, a high-speed switch circuit is used to eliminate the spike pulse of fiber optic gyroscope and improve the signal-to-noise ratio of the sampled signal. This method proved to eliminate not only spike pulse but also odd harmonic interference which diffuse into the demodulation signal by theoretical analysis and simulation. The experimental results confirm that this method indeed improves the accuracy of the gyro.

Key words: Spike pulse; Switch circuit; Odd harmonic; Asymmetry

0 引言

干涉型光纤陀螺基于其特有的解调方式, 不可避免地, 在探测器处可观察到无用的尖峰脉冲信号。这一信号的存在不仅影响了闭环系统对有用信号的提取效率, 而且钳制了信号采样的放大倍数, 增加了陀螺的输出噪声。因此, 对于陀螺的去尖峰势在必行。

在国外的发明专利中, 也早有提及去除探测器尖峰脉冲的光纤陀螺方案。在 Honeywell 专利中, M. K. Scruggs 等人提出了采用数控积分器实现去尖峰的装置。本文则采取开关电路来消除尖峰脉冲。

1 尖峰脉冲的产生和影响

1.1 尖峰脉冲的产生原因

在干涉式光纤陀螺中, 通常在两束反向传播光波之间施加一种方波相位调制信号, 即两态调制或四态调制。方波相位调制的振幅为 $\pm\pi/2$, 调制频率为线圈的本征频率。陀螺静止时, 输出信号是一条含有2倍本征频率的尖峰脉冲的直线, 如图1(a)所示。输出信号光强为 $I_0(1 + \cos\varphi_b)$ ^[1]。当陀螺旋转时, 工作点发生移动信号(在不考虑尖峰脉冲^[2]信号时)变成方波信号, 频率与调制波同频。采样点即在这些区间上。

收稿日期: 2015 - 04 - 21; 修订日期: 2015 - 05 - 30。

基金项目: 总装预先研究基金 (51309010102)

作者简介: 张书颖 (1986 -), 女, 工程师, 从事舰船导航研究。E-mail: zshuying@tju.edu.cn

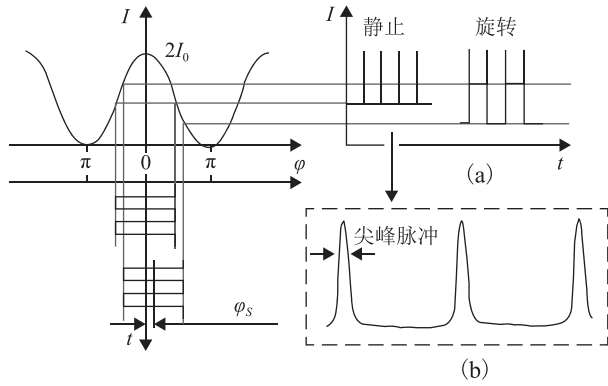


图 1 方波调制光纤陀螺的输出响应

Fig. 1 Output response of FOG modulated by square wave

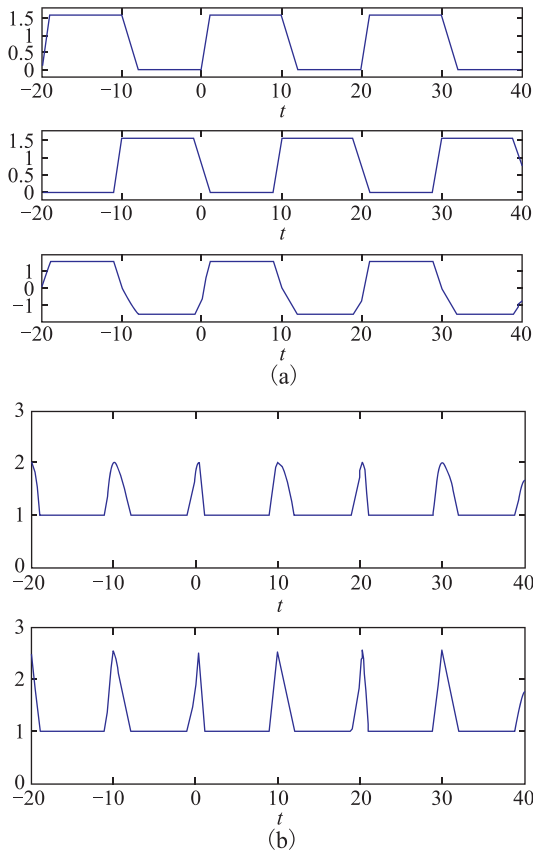


图 2 调制方波前后沿回扫时间不同，调制频率大于本征频率

Fig. 2 When flyback time of the positive edge of the modulation square wave is different from the negative edge, the modulation frequency is greater than the eigenfrequency

但在实际调试中观察到的尖峰脉冲波形却如图 1 (b) 所示，可以看到实际测量到的尖峰脉冲波形较理想状态有所展宽。产生这种波形的因素有很多，包括：1) 方波前后沿回扫时间不同。2) 方波占空比不是 50%。3) 调制频率和本征频率未完全对准等。

利用 MATLAB 对尖峰脉冲的形成进行仿真，将上述三种情况均考虑在内进行排列组合。我们发现只有上述条件至少 1) 和 3) 或 2) 和 3) 同时发生时，尖峰脉冲才具有不对称性。仿真如图 2、图 3 所示。

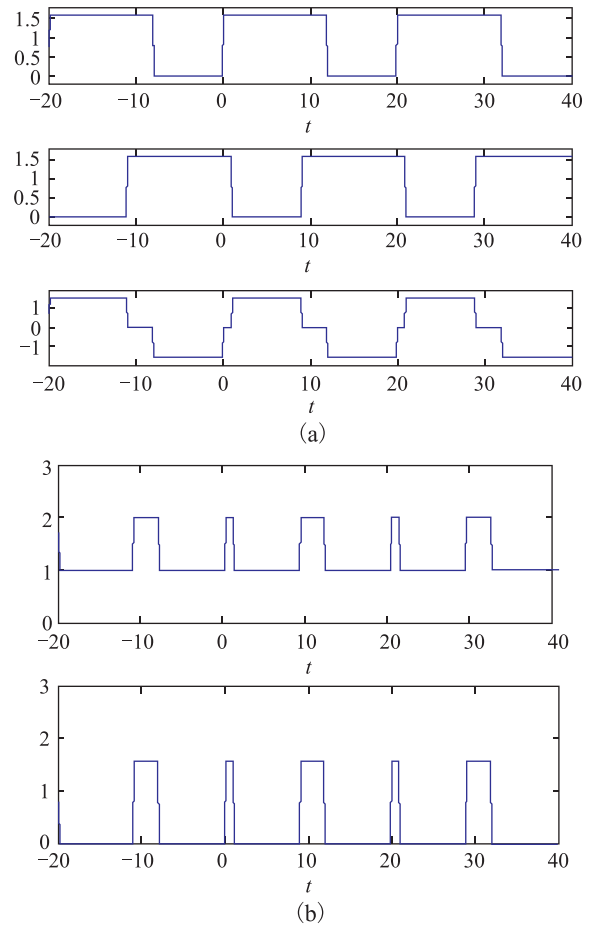


图 3 调制方波前后沿回扫时间相同，占空比为 60 : 40，调制频率大于本征频率

Fig. 3 When flyback time of the positive edge of the modulation square wave is the same as the negative edge and duty cycle is 60 : 40, the modulation frequency is greater than the eigenfrequency

1.2 尖峰脉冲对陀螺精度的影响

尖峰脉冲的存在本身对陀螺精度的影响是多方面的。首先,尖峰脉冲信号会导致探测器前级或后级放大器出现瞬态饱和,当探测器从这种过载状态恢复时会产生信号畸变^[3]。其次,尖峰脉冲的幅值要远大于解调信号的幅值,因此尖峰脉冲的相对幅值限制了陀螺前端信号处理电路可允许的增益以及前端放大器反馈电阻的最大值^[4]。第三,尖峰脉冲的不对称性^[5]会产生奇次谐波干扰耦合进有用信号,在解调过程中产生误差^[6]。

2 采用开关电路消除陀螺的尖峰脉冲的理论分析

根据前文所述尖峰脉冲的不对称性会导致解调出奇次正弦谐波信号。这一信号不仅出现在尖峰脉冲产生的区间,还会耦合进我们所要采样的有用信号段。当我们利用开关电路“切掉”了尖峰脉冲时,是否就意味着我们也消除了耦合进有用信号段的奇次正弦误差信号了呢?下面我们进行理论分析。

陀螺输出中的尖峰脉冲不对称性和去尖峰电开关波形如图4所示。

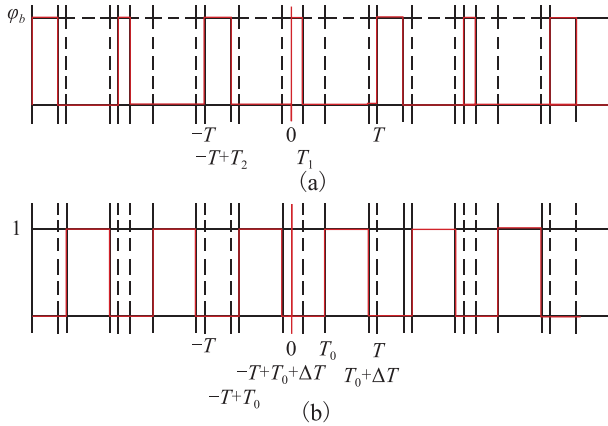


图4 尖峰脉冲与开关电路的函数图像

Fig. 4 Function graph of spike pulse and switch circuit

其中图4(a)为尖峰脉冲的函数近似图形。此处将尖峰脉冲信号近似看成一组不对称的方波信号,红线包络代表若干组尖峰脉冲。为方便分析,此处不对称的尖峰脉冲假设只有两种宽度即图4(a)中的 T_1 与 T_2 。图4(b)为开关电路的函数近似图形。此处将开关电路的打开和闭合近

似看成一组方波信号。函数值为1表示电路打开,对前级信号进行采样;函数值为0表示电路关闭,输出保持上次采样值。陀螺输出中的不对称性尖峰脉冲的函数形式及其傅里叶展开如式(1)、式(2)所示, T_1 、 T_2 决定了尖峰脉冲的宽度和不对称性。

$$f_1(t) = \begin{cases} \varphi_b & [-T, -T+T_2) \\ 0 & [-T+T_2, 0) \\ \varphi_b & [0, T_1) \\ 0 & [T_1, T) \end{cases} \quad (1)$$

当 $T_1 = T_2$ 时,即为对称尖峰脉冲; $T_1 \neq T_2$,即为不对称尖峰脉冲。将 $f_1(t)$ 进行傅里叶级数展开,即

$$f_1(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos \frac{n\pi t}{T} + b_n \sin \frac{n\pi t}{T} \right) \quad (2)$$

$$\text{其中, } a_n = \frac{1}{T} \int_{-T}^T f_1(t) \cos \frac{n\pi t}{T} dt, \quad \frac{a_0}{2} =$$

$$\frac{1}{2T} \int_{-T}^T f_1(t) dt, \quad b_n = \frac{1}{T} \int_{-T}^T f_1(t) \sin \frac{n\pi t}{T} dt. \text{ 将 } f_1(t)$$

进行化简可以表示成 $A_0 + \sum A_{2n-1} \cos(2n-1)\omega_p t + \sum A_{2n} \cos 2n\omega_p t + \sum B_{2n-1} \sin(2n-1)\omega_p t + \sum B_{2n} \sin 2n\omega_p t$ 的形式。

同理去尖峰电路的函数表达式如式(3)所示。

$$f_2(t) = \begin{cases} 0 & [-T, -T+T_0) \\ 1 & [-T+T_0, -T+T_0+\Delta T) \\ 0 & [-T+T_0+\Delta T, 0) \\ 0 & [0, T_0) \\ 1 & [T_0, T_0+\Delta T) \\ 0 & [T_0+\Delta T, T) \end{cases} \quad (3)$$

同样,对 $f_2(t)$ 进行傅里叶级数展开,即

$$f_2(t) = \frac{c_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(c_n \cos \frac{n\pi t}{T} + d_n \sin \frac{n\pi t}{T} \right) \quad (4)$$

$$\text{其中, } c_n = \frac{1}{T} \int_{-T}^T f_2(t) \cos \frac{n\pi t}{T} dt, \quad \frac{c_0}{2} =$$

$$\frac{1}{2T} \int_{-T}^T f_2(t) dt, \quad d_n = \frac{1}{T} \int_{-T}^T f_2(t) \sin \frac{n\pi t}{T} dt. \text{ 将 } f_2(t)$$

进行化简可以表示成 $C_0 + \sum C_{2m} \cos 2m\omega_p t + \sum D_{2m} \sin 2m\omega_p t$ 的形式。

当我们在陀螺的输出端采用这种去尖峰电路的时候,实际的输出波形即为 $f_1(t) \cdot f_2(t)$ 。根据前文的分析可知,在解调输出时只有 $\sin\omega_p t$ 项被解调。所以,根据已经推导出的不对称尖峰脉冲函数的傅里叶级数和电开关的傅里叶级数表达式,

$$\begin{aligned}
 & -\frac{\Delta T}{T} \sin\left(\frac{\pi T_2}{2T} + \frac{\pi T_1}{2T}\right) \sin\left(\frac{\pi T_2}{2T} - \frac{\pi T_1}{2T}\right) - \sum_{m=2}^{\infty} \frac{1}{(m-1)(2m-1)\pi} \sin\frac{(m-1)\pi\Delta T}{T} \cdot \\
 & \sin\left(\frac{(2m-1)\pi T_2}{2T} + \frac{(2m-1)\pi T_1}{2T} - \frac{(2m-2)\pi T_0}{T} - \frac{(m-1)\pi\Delta T}{T}\right) \\
 & \sin\left(\frac{(2m-1)\pi T_2}{2T} - \frac{(2m-1)\pi T_1}{2T}\right) + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{m(2m-1)\pi} \sin\frac{m\pi\Delta T}{T} \\
 & \sin\left(\frac{(2m-1)\pi T_2}{2T} + \frac{(2m-1)\pi T_1}{2T} - \frac{2m\pi T_0}{T} - \frac{m\pi\Delta T}{T}\right) \\
 & \sin\left(\frac{(2m-1)\pi T_2}{2T} - \frac{(2m-1)\pi T_1}{2T}\right)
 \end{aligned}$$

结合前文分析的波形占空比因素,假设一组典型参数为

$$\frac{T_1}{T} = 0.1, \quad \frac{T_2}{T} = 0.15, \quad \frac{T_0}{T} = 0.25, \quad \frac{\Delta T}{T} = 0.6。$$

对于无穷级数求和,我们采用 MATLAB 编程,进行仿真后发现,随着累加次数的增加,误差项越来越小,并且逐渐趋近于零。这说明采用开关电路消除尖峰脉冲,能够将尖峰脉冲不对称性产生的耦合进有用信号的奇次谐波误差项完全消除。

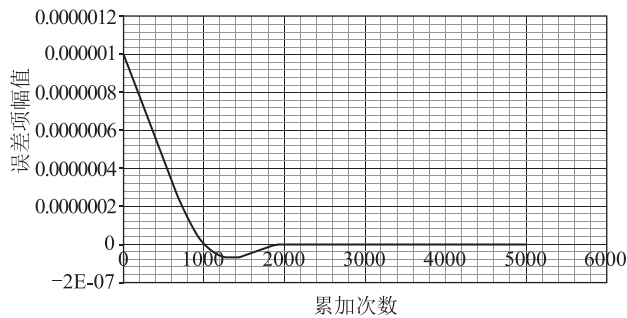


图 5 解调误差项和累加次数关系曲线

Fig. 5 The curve of the demodulation error item and accumulated number of times

3 采用开关电路消除陀螺的尖峰脉冲的实验

目前减小或消除尖峰脉冲误差信号的方案主要集中在陀螺电学输出的后期处理上,即在探测

含有一次正弦谐波分量的解调误差项为: $c_0 b_1 + \sum_{m=2}^{\infty} [c_{2m-2} b_{2m-1} - d_{2m-2} a_{2m-1}] - \sum_{m=1}^{\infty} [c_{2m} b_{2m-1} - d_{2m} a_{2m-1}]$ 。误差项经过化简之后为

器后端与解调电路前级放大器前端插入一个采样保持电路即开关电路,根据尖峰脉冲的出现时间断开该电路,在有用信号的出现时间闭合该电路进行采样,并在数字逻辑电路处给出电开关的同步控制信号,信号频率为陀螺本征频率的 2 倍(图 6)。前文理论分析已经证明这一方法能够消除尖峰脉冲的谐波干扰。具体实验结果如表 1 所示。

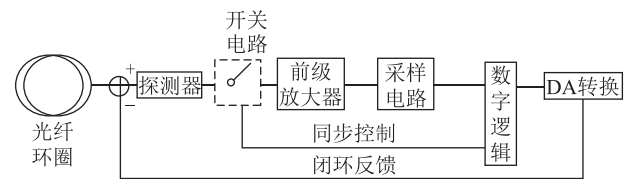


图 6 采用开关电路消除尖峰脉冲陀螺解调设计

Fig. 6 The demodulation design of FOG with switch circuit for eliminating spike pulse

表 1 加和不加开关电路陀螺噪声值对比

Tab. 1 The contrast of the FOG noise value with and without switch circuit

	实验组别	不加开关电路	加入开关电路
陀螺噪声 1s 典型值/ [(°)/h]	1	0.048	0.040
	2	0.042	0.037
	3	0.049	0.043
	4	0.047	0.035

4 结论

在本文中,我们分析了尖峰脉冲的产生机理以及尖峰脉冲不对称性对陀螺产生的影响。提出了采用开关电路(即采样保持电路)来去除尖峰脉冲。通过理论分析证明了开关电路在“切掉”尖峰脉冲的同时,也彻底消除了尖峰脉冲不对称性产生的耦合进有用信号的误差信号。并通过实验证明了采用开关电路去除尖峰脉冲确实能有效减小干扰信号,降低陀螺噪声,提高陀螺的输出精度。

参考文献

- [1] Lefevre H C. 光纤陀螺仪[M]. 国防工业出版社, 2002.
- [2] Auerbach D E. Fiber optic gyro with optical intensity spike suppression (Litton) [P]. U. S. Patent, No. 5850286, 1998.
- [3] Pavlath G. Closed-loop fiber optic gyros [C]//. Fiber Optic Gyros: 20th Anniversary Conference, 1996.
- [4] 鲁军. 高精度干涉式光纤陀螺前置放大器的设计与实现[J]. 中国惯性技术学报, 2013 (5).
- [5] Lefevre H C, et al. Latest advances in fiber optic gyroscope technology at photonetics [C]//. Proc. SPIE 2292, 156 (1994).
- [6] 吕品. 光纤陀螺的随机误差性能评价方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35 (2): 412-418.