

光纤陀螺尖峰脉冲研究

洪伟, 潘子军, 王梦麒, 魏志武, 吉世涛

(中国航天科技集团公司第九研究院第十六研究所, 西安 710100)

摘要: 对光纤陀螺尖峰脉冲进行了深入研究, 建立了光纤陀螺前放电路的噪声模型, 分析了两个关键参数带宽和放大倍数对陀螺噪声和信噪比的影响, 仿真结果指出降低前放带宽、提高放大倍数可以大幅度提高陀螺的信噪比, 由于光纤陀螺信号特性的限制, 这些改变必须在切除尖峰脉冲后才可以实现。对比分析了常见的几种光纤陀螺尖峰脉冲抑制方案, 选择了模拟开关切除尖峰脉冲方案进行试验, 试验结果表明, 尖峰脉冲抑制方案对光纤陀螺的输出数据噪声性能提升效果显著, 改进后的陀螺噪声降低了13%。

关键词: 光纤陀螺; 前放电路; 带宽; 尖峰脉冲; 模拟开关

中图分类号: TP391.9 **文献标志码:** A **文章编码:** 2095-8110(2015)06-0059-04

Research on Peak Pulse of Fiber Optic Gyros

HONG Wei, PAN Zi-jun, WANG Meng-qi, WEI Zhi-wu, JI Shi-tao

(No. 16 Institute, The 9th Academy, China Aerospace Science and Technology Corporation, Xi'an 710100, China)

Abstract: The peak pulse of fiber optic gyroscopes (FOG) is deeply researched, noise model of preamplifier circuit is established, then the influence of two key parameters bandwidth and magnification times to the FOG noise and SNR is analyzed. Simulation results show that the reducing of bandwidth and increasing of magnification could significantly improve the SNR of FOG. Due to the limitations of FOG signal characteristics, these changes must be implemented after the removal of the peak pulses. Analog switch scheme is selected after comparison of several common methods. Experimental results show that this scheme could significantly improve the FOG noise performance, the noise is reduced by 13%.

Key words: FOG; Preamplifier circuit; Bandwidth; Peak pulse; Analog switch

0 引言

光纤陀螺以其成本低、体积小、无转动部件等优点, 在国防工业的各个领域得到了广泛的应用^[1-3]。目前, 中低精度光纤陀螺已基本成熟, 高精度光纤陀螺及其环境适应性为国内的研究重点。

尖峰脉冲是数字闭环光纤陀螺所固有的一种输出信号模式, 国内外研究机构对其进行了大量研究。本文分析了光纤陀螺中尖峰脉冲的产生机理及其影响, 对常见解决方案进行了分析, 针对现有的数字解调电路, 提出了尖峰脉冲切除和前

放电路改进方案, 并进行了试验验证。

1 尖峰脉冲的产生机理

图1为光纤陀螺的方波调制及输出信号示意图^[1], 由于方波上下沿持续时间的存在、方波占空比不是严格的50%、调制频率与本征频率的不对准等原因, 陀螺输出波形中含有2倍于本征频率的尖峰脉冲误差信号。在尖峰的有限持续时间内, 没有有用的旋转速率信息可以提取。但是, 作为调制信号在干涉曲线上的映射结果, 方波调制干涉式光纤陀螺输出中这种固有的光强尖峰现象导

收稿日期: 2015-06-10; 修订日期: 2015-07-14。

作者简介: 洪伟(1987-), 男, 博士, 工程师, 主要从事高精度光纤陀螺的研究。

致了许多问题。

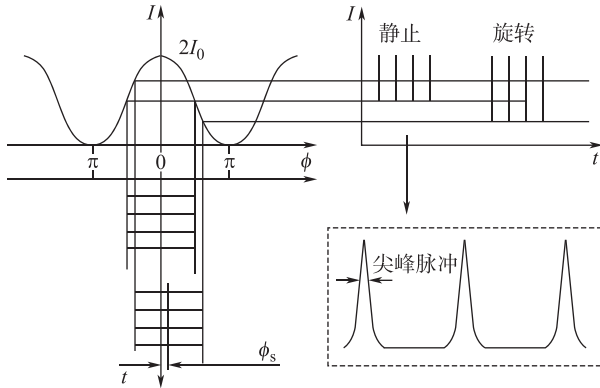


图1 光纤陀螺的方波调制及输出信号示意图

Fig.1 Square wave modulation and output signal of FOG

2 尖峰脉冲对前向放大器噪声的影响

在数字闭环系统中，干涉信号的前置放大部分是无法数字化的，而且由于信号幅值较小，信噪比要求较高，是最容易受到电路噪声影响的部分，为了提高A/D转换器的分辨率，需要对光电转换器组件PINFET的输出信号进行放大，然后进行A/D转换，而且尖峰脉冲很窄，含有多种高次谐波信号，这给干涉信号的放大和滤波带来了困难，因为若采用宽带放大器，虽然可以保持信号的原貌，但会将信号中的噪声放大，同时在信号放大过程中，还容易引入其他的电路噪声，使信号的信噪比下降，一般对微弱信号的放大应采用窄带放大器，对信号既起到放大作用，又起到滤波作用，但由于尖峰脉冲的存在，将导致放大后的信号虽然噪声减小了，但却产生了畸变，使光纤陀螺的输出产生一个较大的零偏，且该零偏容易受到放大器温漂的影响。通过上述分析可知，尖峰脉冲的存在需要较高的前放带宽，而较高的前放带宽会导致较大的电路噪声；另外，尖峰脉冲的存在限制了前放的放大倍数，由于尖峰脉冲的幅值为伏量级，而转速所导致的相位波动仅为毫伏量级，因此过大的放大倍数将导致运放电路饱和。下面将带宽和放大倍数对前放噪声的影响进行理论分析。

运算放大器是前放滤波电路的核心器件，运算放大器电路常见的噪声源包括电压噪声、电流

噪声和电阻噪声。三者叠加可得运算放大器电路的等效输入噪声^[4-5]：

$$e_{n_{in}} = \sqrt{e_{n_v}^2 + e_{n_i}^2 + e_{n_r}^2} \quad (1)$$

其中， $e_{n_{in}}$ 为等效输入噪声， e_{n_v} 、 e_{n_i} 、 e_{n_r} 分别为电压噪声、电流噪声和电阻噪声。

现参考某光纤陀螺型号进行分析。PINFET输出后连接一阶低通滤波电路，如图2所示。

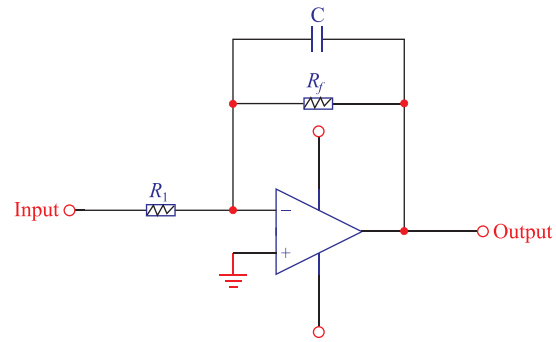


图2 一阶低通滤波电路

Fig.2 First order low pass filter circuit

下面按照图2所示电路分别对三种噪声进行计算，三种噪声通过计算转化为等效输入电压噪声，随后根据噪声增益就可以得到电路的输出电压噪声。首先，确定电路的噪声增益与噪声带宽。

电路的噪声增益

$$N_G = \frac{R_f}{R_1} + 1 \quad (2)$$

电路的闭环带宽

$$f_H = \frac{G_B}{N_G} = \frac{R_1 G_B}{R_f + R_1} \quad (3)$$

其中， G_B 为增益带宽。

1) 运算放大器本身的输入电压噪声噪声等效带宽

$$B_w = f_H \cdot K_n = \frac{K_n R_1 G_B}{R_f + R_1} \quad (4)$$

其中， K_n 为放大器截止频率系数，一般取 $K_n = 1.57$ 。

宽带电压噪声

$$e_{n_v} = e_{nw} \cdot \sqrt{B_w} = e_{nw} \cdot \sqrt{\frac{K_n R_1 G_B}{R_f + R_1}} \quad (5)$$

目前运放的 $1/f$ 噪声在总电压噪声中所占比重较小，为简化计算过程，忽略 $1/f$ 噪声。

2) 电流噪声转换为等效输入电压噪声
宽带电流噪声为

$$i_{nBB} = i_{nw} \sqrt{B_w} = i_{nw} \sqrt{\frac{K_n R_1 G_B}{R_f + R_1}} \quad (6)$$

等效电阻为

$$R_{eq} = \frac{R_f R_1}{R_f + R_1} \quad (7)$$

等效输入电压噪声可以表示为

$$e_{n_i} = i_{nBB} R_{eq} = \frac{i_{nw} R_f R_1}{R_f + R_1} \sqrt{\frac{K_n R_1 G_B}{R_f + R_1}} \quad (8)$$

3) 电阻噪声转换为等效输入电压噪声可以写作

$$e_{n_r} = \sqrt{4kTR_{eq} \cdot f_H} = \sqrt{\frac{4kTR_{eq} R_1 G_B}{R_f + R_1}} \quad (9)$$

4) 综上可得总输入电压噪声

$$\begin{aligned} e_{n_{in}} &= \sqrt{e_{n_v}^2 + e_{n_i}^2 + e_{n_r}^2} \\ &= \sqrt{e_{nw}^2 \frac{K_n R_1 G_B}{R_f + R_1} + \left(\frac{R_1}{R_f + R_1}\right)^2 i_{nw}^2 R_f K_n G_B + \frac{4kTR_f R_1^2 G_B}{(R_f + R_1)^2}} \end{aligned} \quad (10)$$

输出噪声可以表示为

$$\begin{aligned} e_{n_{out}} &= e_{n_{in}} N_G \\ &= \frac{R_f + R_1}{R_1} \sqrt{e_{nw}^2 \frac{K_n R_1 G_B}{R_f + R_1} + \left(\frac{R_1}{R_f + R_1}\right)^2 i_{nw}^2 R_f K_n G_B + \frac{4kTR_f R_1^2 G_B}{(R_f + R_1)^2}} \end{aligned} \quad (11)$$

取一组典型参数来仿真带宽对电路噪声的影响： $e_{nw} = 16\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ ， $i_{nw} = 600\text{fA}/\sqrt{\text{Hz}}$ ， $R_1 = 500\Omega$ ， $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$ ， $T = 298\text{K}$ ，其中 R_f 分别取 1500Ω 、 2500Ω 和 5000Ω 。仿真结果如图 3 所示，可以看出，在 R_f 不变的情况下，信号噪声与带宽的平方根 $\sqrt{G_B}$ 成正比，同样信号幅值的情况下，带宽越小，噪声越低；另外还可以看出，随着 R_f 的增大，噪声增大，增大的幅度与 $\sqrt{R_f}$ 近似成比例，由于 R_f 增大时信号放大倍数与 R_f 成正比，因此随着放大倍数的增大，噪声的放大幅度远小于信号的放大幅度，陀螺信噪比增加。

3 试验方案

针对尖峰脉冲对光纤陀螺的影响，常见解决方案主要有以下几种：

1) 增加电路带宽，减小尖峰脉冲；

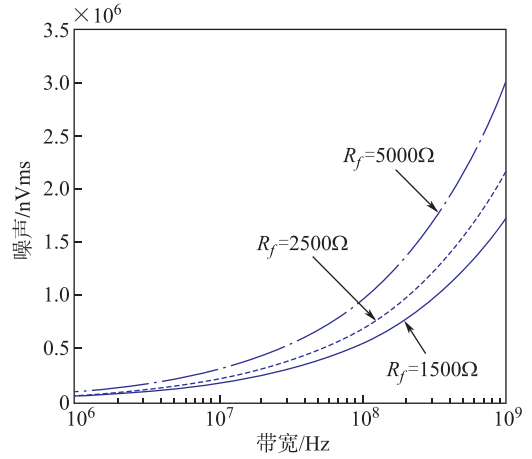


图 3 放大倍数变化的情况下，噪声与带宽的关系

Fig. 3 The relationship between noise and bandwidth in the case of magnification change

2) 采用特殊的四态调制。

据了解上述解决方案仅停留在实验室阶段，并未见相关产品的应用报道。采用大带宽电路会增加陀螺电路噪声，实际应用中并不可行；四态方波调制增加了光纤陀螺调制信号的复杂程度，降低了可靠性，而且其需要的采样点较多，对光纤环长度的要求较高，并不适合中低精度光纤陀螺。

本文在对模拟开关进行了大量调研的基础上，提出了采用模拟开关对光纤陀螺尖峰脉冲进行抑制的改进方案，其中模拟切换开关采用 2 选 1 开关，并将其中的一个输入端接 PINFET 输出的干涉信号，另一输入端接地，为了保证切换开关准确地切掉尖峰脉冲，不影响所要检测的信号部分，模拟切换开关的控制脉冲由时序控制器统一提供，然后将切换后的信号送入放大器。

采用电开关方案对尖峰脉冲进行抑制，改进后的解调电路加入了隔直电路和尖峰脉冲切除电路，新增电路如图 4 所示。

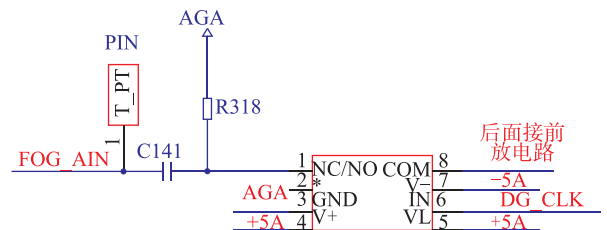


图 4 隔直电路和尖峰脉冲切除电路

Fig. 4 Blocking circuit and peak pulse excision circuit

图4中, C141为隔直电容, 与R318形成高通滤波器。光电联调后 PINFET 输出波形和模拟开关 CLK 信号如图5所示, 图6为切除尖峰脉冲后的陀螺信号。



图5 PINFET 输出波形和模拟开关 CLK 信号
Fig. 5 Output signal of PINFET and CLK of analog switch

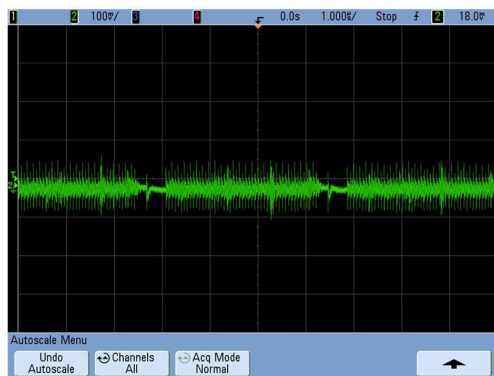


图6 切除尖峰脉冲后的陀螺信号
Fig. 6 FOG signal after peak pulse excision circuit

另外, 重新对运放进行了选择, 由于采用了尖峰脉冲切除电路, 尖峰脉冲切除后的信号带宽大大降低, 因此运放增益带宽由改进前的 110MHz 降低到 8MHz, 同时放大倍数由改进前的 3 倍提高到了 10 倍。

对改进前后的陀螺进行对比测试, 改进前陀螺数据见图7, 0.1s 零偏稳定性为 $0.95 (^{\circ})/h$, 改进后陀螺数据如图8所示, 0.1s 零偏稳定性为 $0.83 (^{\circ})/h$, 零偏稳定性提高了 13%。

4 结论

本文对光纤陀螺尖峰脉冲的产生原因及其对

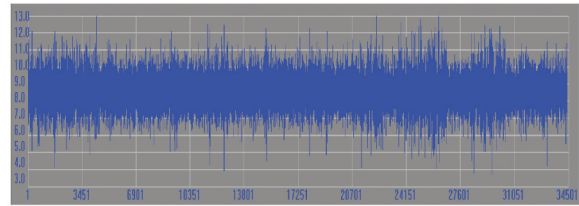


图7 改进前陀螺 0.1s 零偏稳定性
(横坐标单位为 0.1s, 纵坐标单位为 $(^{\circ})/h$)
Fig. 7 Bias stability of FOG before improvement in 0.1s unit (X-coordinate unit is 0.1s, Y-coordinate unit is $(^{\circ})/h$)

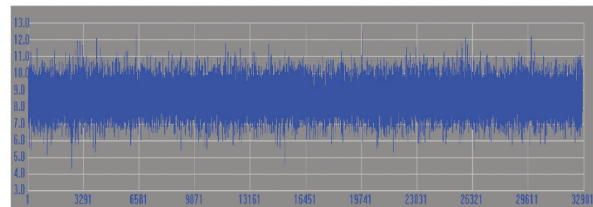


图8 改进后陀螺 0.1s 零偏稳定性
(横坐标单位为 0.1s, 纵坐标单位为 $(^{\circ})/h$)
Fig. 8 Bias stability of FOG after improvement in 0.1s unit (X-coordinate unit is 0.1s, Y-coordinate unit is $(^{\circ})/h$)

陀螺的影响进行了研究。研究表明尖峰脉冲的存在使光纤陀螺前放电路的带宽增大, 且限制了电路的放大倍数, 导致陀螺信噪比降低。在对现有方案进行比较分析的基础上, 提出了改进方案并进行了试验验证, 新型解调电路实现了隔直和尖峰脉冲切除功能, 尖峰脉冲切除电路对抑制光纤陀螺的信号噪声、提高陀螺的性能有较好的作用。

参考文献

- [1] 张桂才, 王巍, 译. 光纤陀螺仪[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- [2] 张桂才. 光纤陀螺原理与技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- [3] 盛钟延, 季杭峰, 周柯江. 光纤陀螺的最新进展[J]. 红外与激光工程, 1995, 28(3): 59-63.
- [4] 赛尔吉欧·弗朗哥. 基于运算放大器和模拟集成电路的电路设计[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2009.
- [5] 王梦麒, 吉世涛, 洪伟, 徐瑞峰. 光纤陀螺前置放大滤波电路的噪声分析[J]. 导航与控制, 2013, 12(4): 42-46.