

徐榆鑫, 马家君, 白仕才, 等. 基于梳状滤波器的光纤陀螺尖峰干扰抑制方法[J]. 智能计算机与应用, 2024, 14(6): 188-192.
DOI: 10.20169/j.issn.2095-2163.240627

基于梳状滤波器的光纤陀螺尖峰干扰抑制方法

徐榆鑫, 马家君, 白仕才, 高 辉, 徐文正

(贵州大学 大数据与信息工程学院, 贵阳 550025)

摘要: 针对光纤陀螺尖峰干扰引起的解调误差问题, 提出了一种基于梳状滤波器的光纤陀螺尖峰干扰抑制方法。首先, 介绍了光纤陀螺尖峰干扰产生的原因和梳状滤波器的原理; 然后, 通过 Matlab 仿真, 验证了梳状滤波器对尖峰干扰有良好的抑制效果; 最后, 根据梳状滤波器原理, 基于现场可编程门阵列设计了一种优化的梳状滤波器, 并与采用模拟开关抑制尖峰干扰的方法进行性能比较。实验结果表明, 此方法可有效抑制光纤陀螺输出信号中的尖峰干扰, 相比于传统基于模拟开关的尖峰干扰抑制方法, 陀螺精度提高约 12.74%。该研究对高精度光纤陀螺的性能提升具有重要参考价值。

关键词: 光纤光学; 光纤陀螺; 梳状滤波器; 尖峰干扰; Allan 方差

中图分类号: TP212

文献标志码: A

文章编号: 2095-2163(2024)06-0188-05

Peak interference suppression method of Fiber Optic Gyroscope based on comb filter

XU Yuxin, MA Jiajun, BAI Shicai, GAO Hui, XU Wenzheng

(College of Big Data and Information Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: Aiming at the demodulation error caused by the peak interference of Fiber Optic Gyroscope (FOG), a peak interference suppression method of FOG based on comb filter is proposed. Firstly, the causes of peak interference in FOG and the principle of comb filter are introduced. Then, through Matlab simulation, it is verified that the comb filter has a good suppression effect on peak interference. Finally, according to the principle of comb filter, an optimized comb filter is designed based on field programmable gate array, and the performance is compared with the method of using analog switch to suppress peak interference. The experimental results show that this method can effectively suppress the peak interference in the output signal of FOG. Compared with the traditional peak interference suppression method based on analog switch, the accuracy of gyroscope is improved by about 12.74%. This research has important reference value for the performance improvement of high-precision FOG.

Key words: fiber optics; Fiber Optic Gyroscope; comb filter; peak interference; Allan variance

0 引言

光纤陀螺是一种基于 Sagnac 效应的精密角速度传感器, 具有体积小、无运动部件、可靠性高、配置灵活、精度范围广等优点, 被广泛应用于航空、航天、国防、无人载体等领域^[1-5]。为提高光纤陀螺的灵敏度并确定旋转方向, 一般采用偏置调制使光纤陀螺系统工作在一个较大斜率的工作点^[6]。由于调制信号存在响应延迟和调制周期误差, 导致干涉光强在偏置调制过程中产生尖峰干扰, 尖峰干扰会增大光纤陀螺的噪声和零偏漂移, 降低了光纤陀螺的性能^[7]。因此需要采取一定的措施抑制尖峰干扰。

目前, 工程实践中广泛采用模拟开关对光纤陀螺尖峰干扰进行抑制, 该方法通过切断尖峰干扰时间内光电探测器组件与前置放大器之间的通路, 有效地减小了尖峰干扰对光纤陀螺性能的影响, 提高了光纤陀螺的精度^[8-12]。然而, 模拟开关存在非线性特性, 这意味着开关状态的切换会引入额外的非线性失真和噪声干扰耦合到陀螺误差解调信号中, 且开关电路的引入增加了光纤陀螺电路的复杂性, 在一定程度上降低了光纤陀螺的可靠性。梳状滤波器通常用于去除频谱中周期性或重复性干扰, 在视频处理、音频处理、生物信号检测等领域获得广泛应用^[13-15]。根据光纤陀螺尖峰干扰的梳状频谱特性,

基金项目: 国家自然科学基金(61605153, 62163006)。

作者简介: 徐榆鑫(1996-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 光电子技术。

通讯作者: 马家君(1985-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 激光与光电子技术。Email: jjma3@gzu.edu.cn

收稿日期: 2023-11-14

可利用梳状滤波器抑制光纤陀螺输出信号中的周期性尖峰干扰。考虑到现场可编程门阵列 (Field Programmable Gate Array, FPGA) 具有设计灵活、并行处理能力强、可重复配置等优势^[16], 结合数字梳状滤波器具有实时响应、高精度的计算和控制能力, 其滤波效果可以通过调整滤波器的参数进行灵活控制。因此, 选择在 FPGA 中设计数字梳状滤波器对光纤陀螺尖峰干扰进行抑制。

针对光纤陀螺对尖峰干扰的抑制需求, 本文提出了一种基于梳状滤波器的光纤陀螺尖峰干扰抑制方法。利用 Matlab 软件对梳状滤波器进行仿真验证, 根据梳状滤波器的原理, 采用 FPGA 设计了优化的梳状滤波器。最后, 通过实验验证了本文提出方法的可行性和优越性。该研究对高精度光纤陀螺的性能提升具有一定理论价值和实际意义。

1 基本原理

1.1 尖峰干扰的产生及影响

目前, 光纤陀螺的调制方法主要是方波调制和四态方波调制, 图 1 为光纤陀螺采用四态方波调制及探测器输出信号示意图。图 1 中, τ 为光纤环的本征周期, φ_m 为四态方波调制深度, φ_s 为旋转引起的 Sagnac 相移。由于四态方波调制信号的相位跳变存在延迟、各调制态的持续时间不完全相同、调制信号周期 T 与光纤环的 2 倍本征周期 2τ 无法严格相等, 偏置调制过程中干涉光强会在调制信号的阶跃处产生周期性的尖峰。

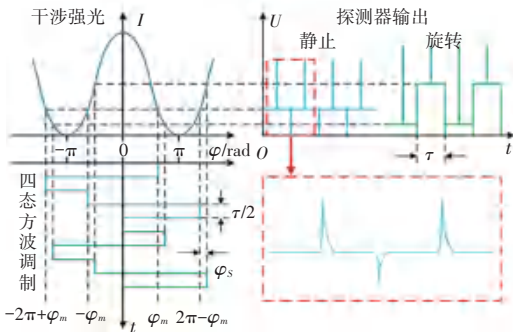


图 1 光纤陀螺四态方波调制及探测器输出信号

Fig. 1 Four-states square wave modulation of Fiber Optic Gyroscope and output signal of the detector

在实际的光纤陀螺信号检测过程中, 大量的尖峰是无用的噪声信号, 光纤陀螺携带角速度信息的有用信号和尖峰都被探测器转换为电压信号, 因此探测器输出的电压信号中含有周期性的尖峰干扰。

光纤陀螺中的尖峰干扰对其性能和测量结果会产生一定影响。由于调制信号的上升沿和下降沿时

间不等, 尖峰干扰具有不对称性, 出现高次谐波信号耦合进尖峰以外的平坦区域, 导致解调信号产生误差; 因温度变化造成调制周期与本征周期的偏差, 以及光纤陀螺电路中非理想器件引起的调制波形不对称, 导致尖峰干扰被展宽, 不仅对光纤陀螺零偏漂移产生不利影响, 还限制了陀螺的多点采样方式。针对上述问题, 提出采用梳状滤波器以抑制尖峰干扰的解决措施。

1.2 梳状滤波器原理

数字梳状滤波器的设计结构如图 2 所示。由图 2 可知, 数字梳状滤波器主要由延迟网络、加法器和乘法器三部分构成^[17], 通过设置合适的参数, 可以实现增强信号或抑制干扰的效果。

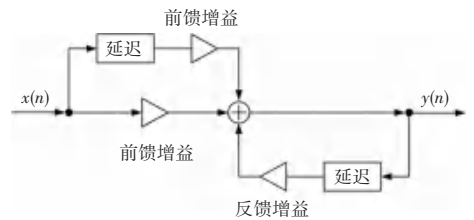


图 2 数字梳状滤波器结构图

Fig. 2 Structure diagram of digital comb filter

数字梳状滤波器的差分方程为:

$$y(n) = bx(n) - bx(n - N) + \rho y(n - N) \quad (1)$$

其中, $x(n)$ 表示 n 时刻的输入信号; $y(n)$ 表示 n 时刻的输出信号; N 表示梳状滤波器的阶数; b 为前馈系数; ρ 为反馈系数, 且 $b = (1 + \rho)/2, 0 < \rho < 1, \rho$ 取值越接近 1, 幅频特性越平坦。根据式 (1) 中的差分方程得到数字梳状滤波器的传递函数为:

$$H(z) = b \frac{1 - z^{-N}}{1 - \rho z^{-N}} \quad (2)$$

频率响应为:

$$H[\exp(j\omega)] = b \frac{1 - \exp(-j\omega N)}{1 - \rho \cdot \exp(-j\omega N)} \quad (3)$$

陷波频率为:

$$f_k = \frac{k \cdot f_s}{N} \quad (4)$$

其中, $k = 0, 1, \dots, N - 1, f_s$ 为采样频率。数字梳状滤波器能够滤除输入信号中陷波频率处的频率分量, 保留其它频率处的信号, 在频域抑制和频率选择方面具有显著优势。

以四态方波调制为例, 设光纤陀螺光纤环的本征频率为 f_c , 经偏置调制后, 尖峰干扰出现在干涉信号中 4 个调制态的阶跃处, 尖峰信号频率为 $2f_c$, 对其进行傅里叶变换, 尖峰干扰的频率分量主要在

$2mf_e$ 处,这里 $m = 1, 2, 3, \dots$ 。根据式(4),梳状滤波器的阶数应取 $N = f_s/2f_e$ 。基于光纤陀螺尖峰干扰的梳状频谱特性,可采用数字梳状滤波器抑制光纤陀螺输出信号中的周期性尖峰干扰。

2 梳状滤波器仿真与设计

2.1 仿真分析

为了验证梳状滤波器对尖峰干扰的抑制效果,采用 ISE 中的在线调试工具 Chip Scope,对光纤陀螺模数(Analog/Digital, A/D)转换器中含有尖峰干扰的数字信号进行采样分析。光纤陀螺调制方式为四态方波调制,A/D 转换器的采样速率为 39.9 MHz。采

样信号中尖峰干扰出现在每个调制态的跳变沿,尖峰干扰周期为 τ ,间隔 $\tau/2$ 依次出现小尖峰和大尖峰,幅度远大于有用信号。

利用 Matlab 软件提供的滤波器设计工具 Filter Designer,对梳状滤波器进行设计。根据试验光纤陀螺的本征频率、A/D 转换器的采样速率和采样信号带宽,设计 238 阶、陷波带宽为 59 kHz、通带纹波为 1 dB 的梳状滤波器对采样信号进行滤波,滤波器参数 $N = 238, b = 0.7611, \rho = 0.5221$ 。图 3 为滤波前后数据,图 4 为滤波前后数据的快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)分析。图 4 中,0.535 MHz 处为试验光纤陀螺的电路噪声。

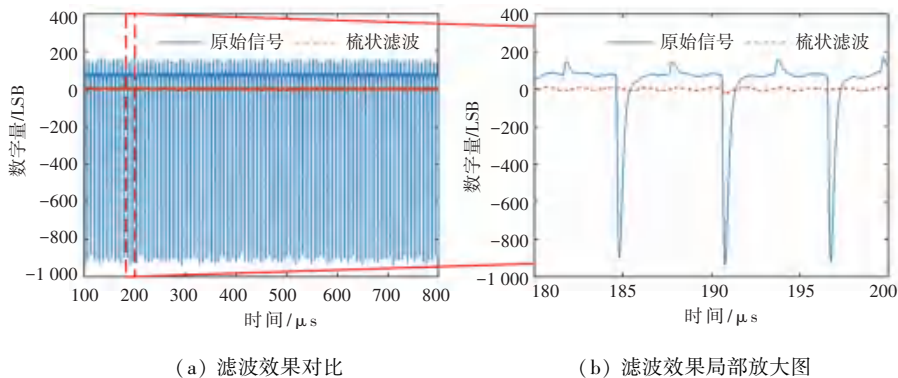


图 3 滤波前后数据

Fig. 3 Data before and after filtering

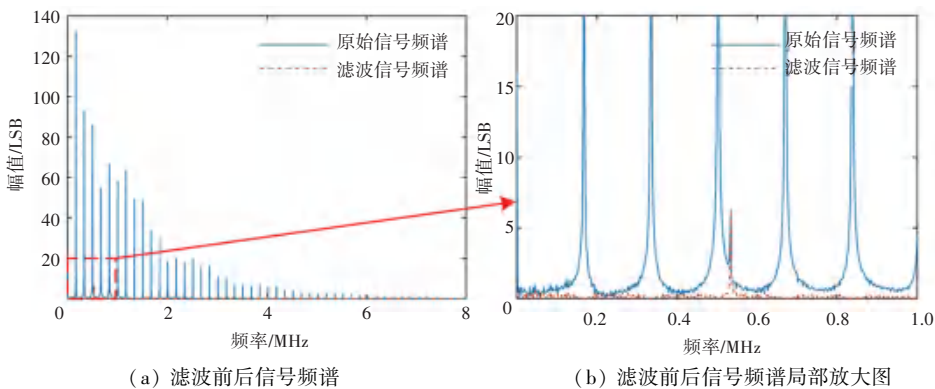


图 4 滤波前后数据 FFT 分析

Fig. 4 FFT analysis of data before and after filtering

仿真分析结果表明,滤波后信号中的尖峰干扰显著降低,尖峰干扰在频谱中呈梳状分布,其对应的频率分量幅值大幅衰减,梳状滤波器对光纤陀螺 A/D 转换器采样信号中的尖峰干扰有明显的抑制效果。

2.2 梳状滤波器的 FPGA 设计

无限脉冲响应(Infinite Impulse Response, IIR)滤波器具有良好的幅频特性,对于 N 阶差分方程,其直接 II 型结构相比于直接 I 型结构少了一半的延时单

元,采用 FPGA 实现时可节约寄存器资源。因此,基于直接 II 型 IIR 滤波器结构设计梳状滤波器。根据梳状滤波器的原理,其运算结构如图 5 所示。由图 5 可知,滤波流程如下:首先,滤波器输入数据与反馈数据求和,求和后的数据一路与前馈系数 b 相乘得到一组前馈数据,另一路进行 N 级缓存,缓存后的数据分别与反馈系数 ρ 和前馈系数 b 相乘得到反馈数据和另一组前馈数据,最后 2 组前馈数据相减作为滤波输出。

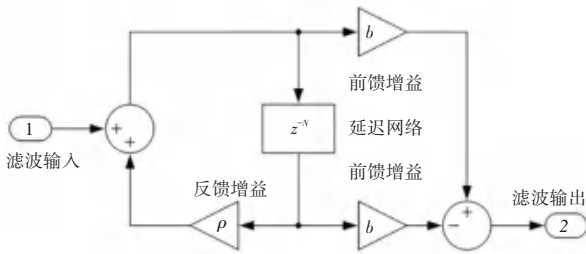


图 5 梳状滤波器运算结构

Fig. 5 Operational structure of comb filter

针对光纤陀螺系统对梳状滤波器的性能要求,对梳状滤波器进行优化设计。由于 IIR 梳状滤波器存在反馈环节,为避免字长效应对滤波系统造成较大影响,寄存器组、所有中间变量和滤波器输出数据的位宽大小在滤波器输入数据位宽大小的基础上扩展两位。同时,对反馈系数 ρ 和前馈系数 b 进行量化,采用移位的方法来近似实现乘法运算,以提升运算速度和减少硬件资源占用。

采用 Verilog HDL 硬件描述语言完成光纤陀螺数字逻辑电路的设计,将程序代码通过联合测试工作组接口下载到光纤陀螺上,使用 Matlab 软件对陀螺输出的原始数据进行解读。

3 实验结果与分析

为对梳状滤波器的性能进行评估,设计了梳状滤波器与传统模拟开关进行性能对比,光纤陀螺梳状滤波实验框图如图 6 所示。实验过程中,采用 FOG-98 型光纤陀螺,该型陀螺光纤环长 L 为 1 275 m,平均直径 D 为 85mm,光源为超辐射发光二极管,光源波长 λ

为 1 310 nm。

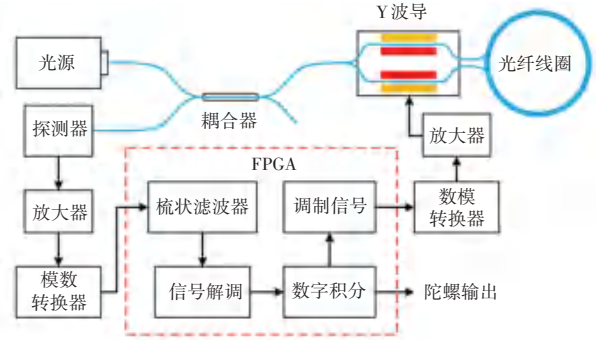


图 6 光纤陀螺梳状滤波实验框图

Fig. 6 Experimental block diagram of Fiber Optic Gyro comb filtering

根据国军标 GJB2426A-2004《光纤陀螺仪测试方法》^[18],在静态下分别利用梳状滤波器与模拟开关对光纤陀螺尖峰干扰进行抑制。在原始数据实验组中,将光纤陀螺内的模拟开关设置为导通状态。在模拟开关实验组中,设置模拟开关的关断时间为四态方波各调制态起始的 10 个 A/D 转换器采样周期。在梳状滤波实验组中,将模拟开关设置为导通状态,A/D 转换器采样数据经梳状滤波后进行信号解调。每组实验时间为 2 h,解调的光强信号均为 A/D 转换器在各调制态末尾相对平坦段采样的 60 个点。图 7 为各实验组的陀螺输出数据。图 8 为尖峰干扰抑制前后的陀螺输出数据 Allan 方差对比。表 1 对 3 种恒温条件下各实验组中光纤陀螺的主要性能指标进行了统计。

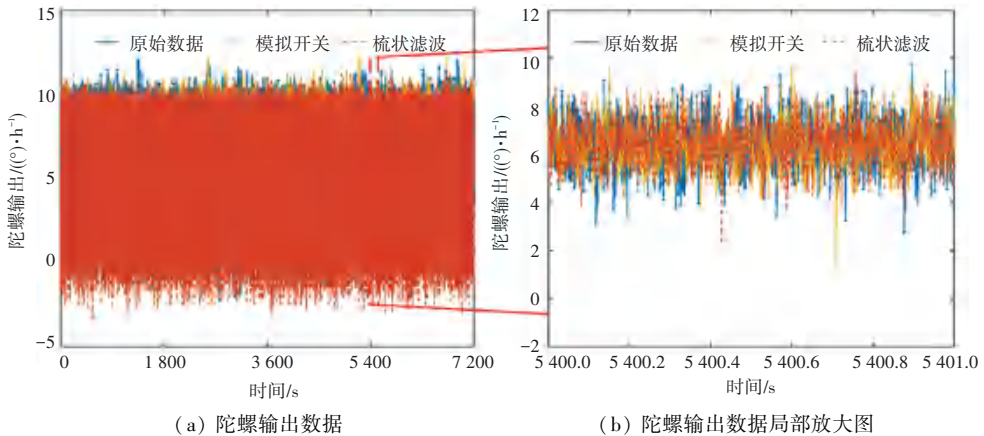


图 7 静态条件下陀螺输出数据

Fig. 7 Gyro output data under static conditions

由图 7、图 8 和表 1 可以看出,梳状滤波器有效地抑制了光纤陀螺信号中的尖峰干扰。相比于传统的模拟开关,梳状滤波器能将 98 型光纤陀螺的零偏

稳定性(10 s 平滑)提高约 12.74%,角度随机游走降低约 15.59%。实验结果说明,梳状滤波器对光纤陀螺尖峰干扰的抑制效果优于模拟开关。

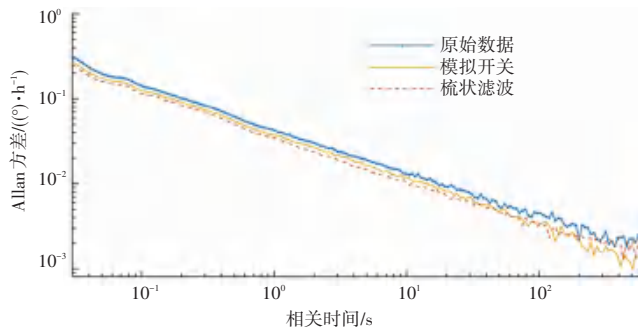


图8 静态条件下陀螺输出数据 Allan 方差曲线

Fig. 8 Allan variance curve of gyro output data under static conditions

表1 梳状滤波器与模拟开关性能对比

Table 1 Performance comparison between comb filter and analog switch

温度/℃	原始数据		模拟开关		梳状滤波	
	零偏稳定性/ ((°)·h ⁻¹)	角度随机游走/ ((°)·h ^{-1/2})	零偏稳定性/ ((°)·h ⁻¹)	角度随机游走/ ((°)·h ^{-1/2})	零偏稳定性/ ((°)·h ⁻¹)	角度随机游走/ ((°)·h ^{-1/2})
-40	0.019 46	0.002 71	0.017 54	0.002 10	0.015 32	0.001 77
25	0.013 07	0.001 82	0.011 79	0.001 41	0.010 27	0.001 19
60	0.019 22	0.002 68	0.017 31	0.002 07	0.015 11	0.001 75

4 结束语

本文针对光纤陀螺输出信号中尖峰干扰引起的解调误差问题,提出了一种基于梳状滤波器的光纤陀螺尖峰干扰抑制方法,利用梳状滤波器对光纤陀螺输出信号中特定频率的尖峰干扰信号进行选择性的抑制。通过仿真验证了该方法抑制光纤陀螺尖峰干扰的可行性,基于梳状滤波器的原理,采用 FPGA 对梳状滤波器进行优化设计。实验结果表明,梳状滤波器对光纤陀螺尖峰干扰有良好的抑制效果,有效地减小了光纤陀螺的噪声和零偏漂移。相比于工程中常用的模拟开关,梳状滤波器使光纤陀螺精度提高约 12.74%,角度随机游走降低约 15.59%。在尖峰干扰抑制方面具有优势,且易于在陀螺原有数字逻辑器件内实现,在一定程度上提高了光纤陀螺的精度和可靠性,对工程应用有重要的参考意义。

参考文献

[1] 苑立波,童维军,江山,等.我国光纤传感技术发展路线图[J].光学学报,2022,42(1):0100001.
 [2] 史文策,许江宁,林恩凡.陀螺仪的发展与展望[J].导航定位学报,2021,9(3):8-12.
 [3] 王巍.光纤陀螺在宇航领域中的应用及发展趋势[J].导航与控制,2020,19(S1):18-28.
 [4] 金靖,李铁志,王晓伟,等.光纤陀螺空间应用技术[J].中国激光,2022,49(19):1910001.
 [5] LEFEVRE H C. The fiber-optic gyroscope: Challenges to become the ultimate rotation - sensing technology [J]. Optical Fiber

Technology, 2013, 19(6): 828-832.
 [6] 肖文,伊小素.高精度光纤陀螺中相位调制的控制研究[J].光子学报,2007,36(1):43-46.
 [7] 靳晋军,王学锋,于海成,等.光纤陀螺仪中尖峰脉冲引起漂移的误差分析及其抑制[J].导航与控制,2016,15(1):47-53.
 [8] 王威,袁赣南,吴军伟.干涉型闭环光纤陀螺实现中关键问题研究[J].应用科技,2005,32(8):34-36.
 [9] 陆家兵,张琛.光纤陀螺同步相关检测技术的设计与实现[J].舰船科学技术,2013,35(8):111-114.
 [10] 鲁军,殷建玲,刘军,等.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,2013,21(5):668-671.
 [11] 张书颖,左文龙,惠菲,等.采用开关电路消除尖峰脉冲的陀螺及其理论分析[J].导航定位与授时,2015,2(4):58-62.
 [12] 洪伟,潘子军,王梦麒,等.光纤陀螺尖峰脉冲研究[J].导航定位与授时,2015,2(6):59-62.
 [13] WANG C C, LEE C L, CHANG Mingkai. Low - cost video decoder with 2D2L comb filter for NTSC digital TVs[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2005, 51(2): 694-698.
 [14] XIA Bingyin, BAO Changchun. Compressed domain speech enhancement method based on ITU - T G. 722. 2 [J]. Speech Communication, 2013, 55(5): 619-640.
 [15] ZHENG Wei, WEI Xueyun, ZHONG Jianjian, et al. Noninvasive fetal ECG estimation using adaptive comb filter [J]. Computer Methods and Programs in Biomedicine, 2013, 112(1): 125-134.
 [16] PEESAPAT R, SABAT S L, KARTHIK K P, et al. FPGA-based embedded platform for fiber optic gyroscope signal denoising [J]. International Journal of Circuit Theory & Applications, 2014, 42(7): 744-757.
 [17] CHANG C T, LEE P L, LIN E H. Variable delay digital comb filter extraction of weak phase signals for SSVEP [J]. Biomedical Signal Processing & Control, 2017, 31: 211-216.
 [18] 国防科学技术工业委员会.光纤陀螺仪测试方法:GJB 2426A-2004[S].北京:国防科工委军标出版发行部,2004.