

## 基于 FPGA 的光纤陀螺 RLS 自适应实时降噪技术

马家君<sup>1\*</sup>, 刘清杨<sup>1</sup>, 吕嫣然<sup>1</sup>, 曾维<sup>1</sup>, 梁永超<sup>1</sup>, 蒋军彪<sup>2</sup><sup>1</sup>贵州大学大数据与信息工程学院, 贵州 贵阳 550025;<sup>2</sup>西安现代控制技术研究所, 陕西 西安 710065

**摘要** 针对光纤陀螺传统滤波方法降噪效果欠佳的问题,提出了一种基于递归最小二乘(RLS)自适应滤波的光纤陀螺实时降噪技术。根据 RLS 自适应滤波原理,基于现场可编程门阵列(FPGA)设计了一种新的实现 RLS 自适应滤波的交替存储乘累加流水线结构。实验结果表明,该结构能在较高频率下实现光纤陀螺输出信号的 RLS 自适应滤波实时降噪。相比较于传统的最小均方(LMS)自适应滤波,RLS 自适应滤波有效降低了光纤陀螺输出信号中的噪声含量,陀螺精度提高约 50%,相位延迟降低约 30%。该研究对光纤陀螺的性能提升具有一定的实用价值。

**关键词** 光纤光学; 光纤陀螺; 自适应滤波; 实时降噪; Allan 方差

**中图分类号** V241.5 **文献标志码** A

**DOI:** 10.3788/CJL202249.2106004

## 1 引言

光纤陀螺是基于 Sagnac 效应的高精度角速度传感器,其具有全固态、体积小、成本低、易维护等优点,被广泛应用于国防、航空、航天等领域<sup>[1-3]</sup>。由于光学元件的特性和环境因素的影响,光纤陀螺输出信号通常为非平稳、非线性的随机信号,输出信号中的噪声干扰是影响光纤陀螺零偏稳定性的主要因素之一<sup>[4-5]</sup>。在工程实际中,通常采用低通滤波对光纤陀螺的输出信号进行降噪。由于有效信号与噪声信号的频带互相重叠,该方法只能消除输出信号中的高频噪声,无法抑制低频噪声干扰<sup>[2,6]</sup>。自适应滤波能够实时地调节当前时刻的滤波系数,以适应随机信号的时变统计特性,相比于传统的低通滤波,自适应滤波更适用于光纤陀螺输出信号的降噪处理<sup>[7-11]</sup>。

目前主要的自适应算法有最小均方(LMS)算法和递归最小二乘(RLS)算法。LMS 算法通过随机梯度下降法使性能函数最小化,具有计算复杂度低、易于实现等优点。陈世同等<sup>[12-13]</sup>采用前向线性预测滤波技术设计了一种基于 LMS 算法的自适应滤波器,有效抑制了光纤陀螺输出信号中的随机噪声。亓洪涛<sup>[14-15]</sup>提出了变阶数 LMS 自适应滤波方法,提高了自适应滤波的收敛速度和动态跟踪性能。高亚楠等<sup>[16]</sup>提出通过解相关变步长 LMS 算法对光纤陀螺输出信号进行滤波,该方法对抑制光纤陀螺中的随机漂

移、提高信噪比具有良好的效果。以上有关光纤陀螺随机噪声降噪的方法均基于 LMS 算法实现。相比于 LMS 算法,RLS 算法在收敛速度上有明显的优势,在非平稳随机信号条件下,RLS 算法的适应性要优于 LMS 算法<sup>[17-18]</sup>。Huang 等<sup>[19]</sup>提出了一种基于变分模态分解(VMD)的自适应噪声消除方法,该方法将光纤陀螺输出信号分解为不同中心频率的模态分量,并将模态分量中的高频噪声分量累积为参考噪声,将剩余的低频分量累积为输入信号,然后通过自适应噪声消除得到降噪信号。但该方法需要根据光纤陀螺输出信号进行多次迭代,算法极其复杂,不适合实时信号处理,难以实现工程化应用。Chen 等<sup>[20]</sup>设计了一种基于无监督鲁棒递归最小二乘(UR-RLS)的自适应滤波器来抑制脉冲噪声,并证明了该算法具有良好的抗脉冲噪声性能和鲁棒性。然而,随着工艺的成熟和技术的进步,目前光纤陀螺输出信号中的脉冲噪声已经很微弱,散粒噪声、热噪声、量化噪声等成为影响光纤陀螺性能的主要因素。

为此,本文分析了 RLS 自适应滤波原理,提出实现 RLS 自适应滤波器的交替存储乘累加流水线结构,并基于现场可编程门阵列(FPGA)设计了 RLS 自适应滤波器。在静态下通过实验对比了 LMS 自适应滤波器和 RLS 自适应滤波器的滤波效应,并使用 Allan 方差对滤波后的性能指标进行分析。在动态下对比了 LMS 自适应滤波器和 RLS 自适应滤波器在延迟上的

收稿日期: 2022-04-07; 修回日期: 2022-06-02; 录用日期: 2022-06-29

基金项目: 国家自然科学基金(62163006, 61605153, 11964005)、贵州省科技厅自然科学基金基础研究计划(黔科合 LH 字[2017]7224 号)、贵州省教育厅青年科技人才成长项目(黔教合 KY 字[2017]107)、贵州大学博士基金(贵大人基合字[2016]61 号)

通信作者: \*jjma3@gzu.edu.cn

差异。本文的研究对于有效抑制光纤陀螺输出信号中的噪声,提高光纤陀螺在高精度稳定跟踪平台、高机动飞行器的控制精度上具有实际参考价值。

## 2 自适应滤波器原理

如图 1 所示,RLS 自适应滤波器主要包括 RLS 算法和横向滤波器两部分,横向滤波器根据 RLS 自适应算法迭代得到的权系数矢量  $W_k$  对输入信号矢量  $L_k$  进行线性组合获得自适应滤波器输出,RLS 算法根据期望信号  $d_k$  和自适应滤波器输出的误差  $e_k$  实时调整横向滤波器的权系数矢量  $W_k$ 。

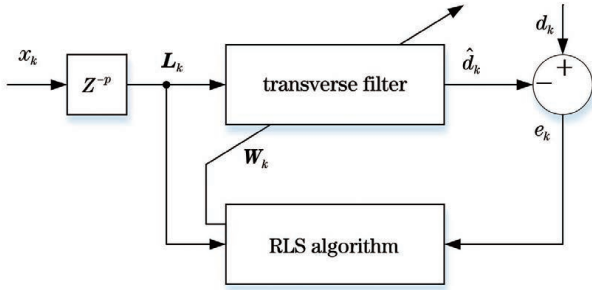


图 1 RLS 自适应滤波器结构图

Fig. 1 Structure diagram of RLS adaptive filter

在 RLS 自适应算法中,  $k$  时刻的输入信号矢量为

$$L_k = [x_k \ x_{k-1} \ \dots \ x_{k-p}]^T, \quad (1)$$

式中:  $p$  为滤波器阶数。

$k$  时刻的权系数矢量为

$$W_k = [\omega_k \ \omega_{k-1} \ \dots \ \omega_{k-p}]^T. \quad (2)$$

RLS 自适应算法以当前时刻到初始时刻所有误差的加权平方和最小化为准则,其性能函数为

$$\xi(W_k) = (Y_k - X_k^T W_k)^T A_k (Y_k - X_k^T W_k), \quad (3)$$

式中:  $Y_k$  为期望输出信号矢量;  $X_k$  为当前时刻到初始时刻所有输入信号矢量形成的矩阵;  $A_k$  为遗忘矩阵,且

$$A_k = \text{diag} [\alpha^{k-p} \ \alpha^{k-p-1} \ \dots \ \alpha \ 1], \quad (4)$$

式中:  $\alpha$  为遗忘因子。

将性能函数对权矢量求梯度,可得权系数矢量的

最小二乘解为

$$W_{k\text{opt}} = (X_k A_k X_k^T)^{-1} X_k A_k Y_k. \quad (5)$$

根据  $X_k$  和  $Y_k$  的递推关系,可得权系数的递推关系为

$$W_{k+1} = W_k - M_k (d_k - W_k^T L_k), \quad (6)$$

式中:  $M_k$  为  $k$  时刻滤波器的增益矢量,且

$$M_k = \hat{R}_k^{-1} L_k, \quad (7)$$

式中:  $\hat{R}_k^{-1}$  为  $k$  时刻输入矢量相关矩阵的逆矩阵,且满足递推关系

$$\hat{R}_k^{-1} = \frac{1}{\alpha} \left( \hat{R}_{k-1}^{-1} - \frac{\hat{R}_{k-1}^{-1} L_k L_k^T \hat{R}_{k-1}^{-1}}{\alpha + L_k^T \hat{R}_{k-1}^{-1} L_k} \right). \quad (8)$$

与 RLS 自适应滤波器原理不同, LMS 自适应滤波器采用瞬时梯度代替真实梯度,其权系数矢量更新公式为

$$W_{k+1} = W_k - \mu_k (d_k - W_k^T L_k) L_k, \quad (9)$$

式中:  $\mu_k$  为步长参数,决定了 LMS 自适应滤波器的收敛速度。

另外,在 LMS 自适应滤波器中,横向滤波器的输入矢量需要满足统计独立性,当该条件不满足时, LMS 自适应滤波器性能将会下降。由于 RLS 自适应滤波器以当前时刻到初始时刻所有误差的加权平方和最小化为准则,对于非平稳信号,RLS 自适应滤波器比 LMS 自适应滤波器具有更好的自适应性。

## 3 RLS 自适应滤波器的 FPGA 设计

根据 RLS 自适应滤波器原理,其运算结构如图 2 所示。运算过程中,需要存储的数据主要包括输入信号矢量  $L_k$ 、权系数矢量  $W_k$  和输入向量相关矩阵的逆矩阵  $\hat{R}_k^{-1}$ 。运算流程如下:首先,滤波器输入数据经  $p$  级缓存形成  $L_k$ ,并与  $\hat{R}_{k-1}^{-1}$  相乘获得  $\hat{R}_{k-1}^{-1} L_k$ ;其次,  $L_k^T$  与  $\hat{R}_{k-1}^{-1} L_k$  相乘获得  $L_k^T \hat{R}_{k-1}^{-1} L_k$ ,同时获得  $\hat{R}_{k-1}^{-1} L_k L_k^T \hat{R}_{k-1}^{-1}$ ,根据式(8)对输入矢量相关矩阵的逆矩阵进行更新;最后,根据式(7)计算增益矢量  $M_k$ ,并根据式(6)对权系数进行更新。

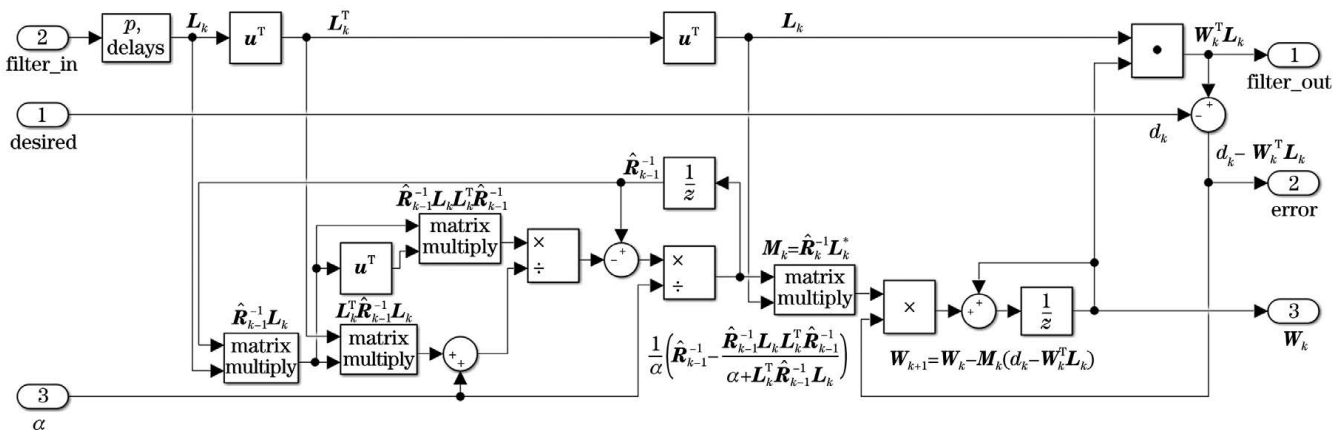


图 2 RLS 自适应滤波器运算结构

Fig. 2 Operation structure of RLS adaptive filter

自适应滤波器计算过程需要进行多次乘累加运算,计算复杂度高,不易完全采用并行结构实现。为了节省逻辑资源,提高计算效率和计算精度,将输入数据转换为双精度浮点数,基于流水线提出了交替存储的乘累加结构实现的 RLS 自适应滤波器。具体实现如下:设置 RAMA 和 RAMB 两个存储器, RAMA 总存储深度为  $2p$ ,前  $p$  个存储单元用于存储输入矢量  $L_k$ ,后  $p$  个存储单元用于交替存储中间变量和滤波器增益矢量  $M_k$ ; RAMB 总存储深度为  $2p+p \times p$ ,前  $p$  个存储单元存储滤波器权向量  $W_k$ ,中间  $p$  个存储单元存储中间变量,后  $p \times p$  个存储单元存储相关矩阵的逆矩阵  $\hat{R}_k^{-1}$ 。滤波过程中,通过时序电路读取 RAMA 和 RAMB 中的数据,并控制通道开关实现不同数据的乘累加运算。根据 RLS 运算流程,控制逻辑采用状态机实现,状态转移图如 3 所

示。当滤波器输入有新的数据时,状态机从 Idle 状态进入 RiL\_loading 状态,并在 RiL\_loading 状态将新的输入数据写入 RAMA,所需时钟周期为 1;在 RiL\_reading 状态完成  $L_k$  与  $\hat{R}_k^{-1}$  相乘的运算,并在 RiL\_writing 状态将运算结果写入存储器,所需时钟周期为  $(p+1) \times p$ ;在 LRL\_reading 和 LRL\_writing 状态完成  $L_k^T \hat{R}_k^{-1} L_k$  运算存储,所需时钟周期为  $p+1$ ;在 RFR\_reading 和 RFR\_writing 状态完成  $\hat{R}_k^{-1}$  的更新,所需时钟周期为  $3p^2$ ;在 RFM\_reading 和 RFM\_writing 状态完成  $M_k$  的更新,所需时钟周期为  $(p+1) \times p$ ;在 Out\_reading 和 Out\_writing 状态完成滤波器输出,所需时钟周期为  $p+1$ ;在 RFW\_reading 和 RFW\_writing 状态完成  $W_k$  的更新,所需时钟周期为  $2p+1$ 。

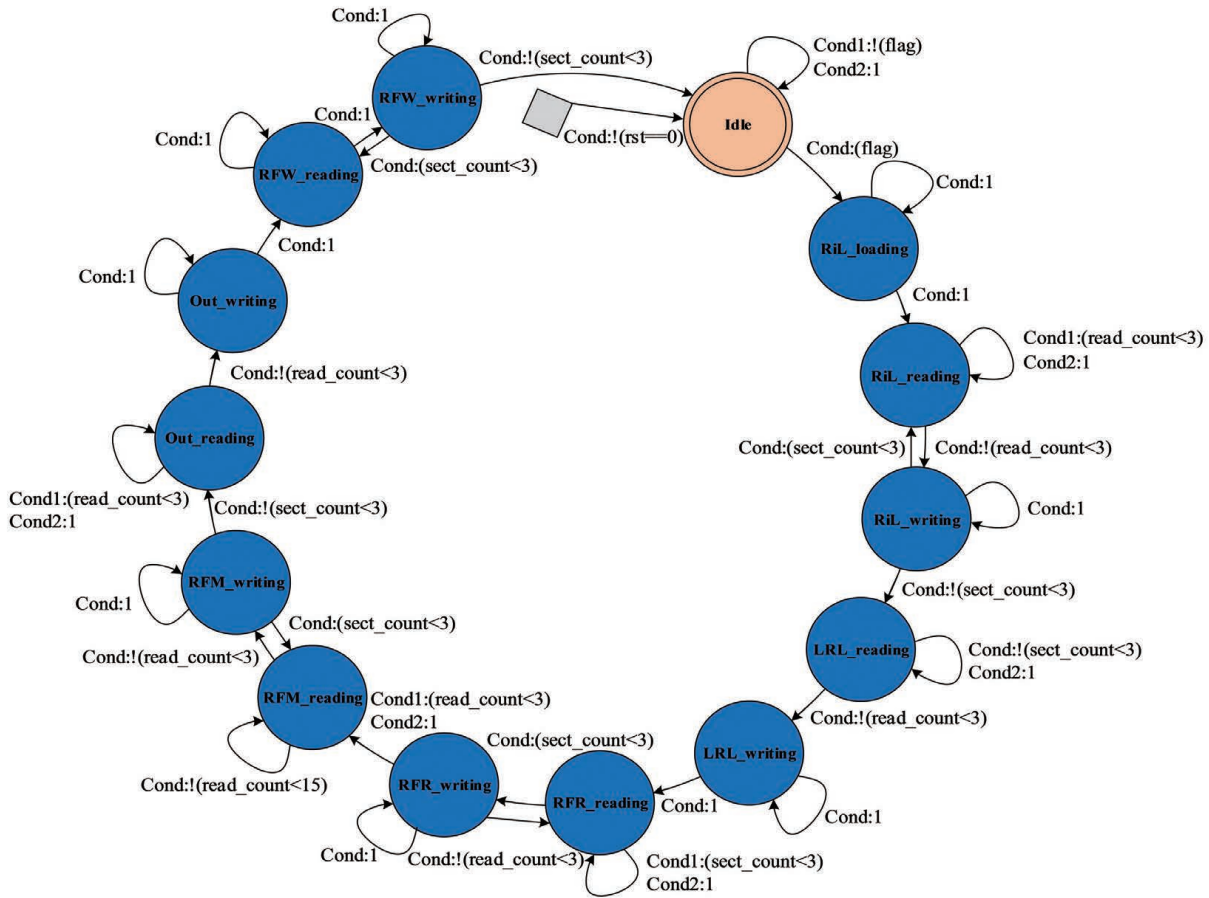


图 3 RLS 自适应滤波器状态转移图

Fig. 3 State transition diagram of RLS adaptive filter

根据图 2 的 RLS 自适应滤波器运算结构,可以采用最直接并行运算方式和传统串行运算方式实现。并行运算可以在一个时钟周期内完成滤波器的所有运算,但将消耗大量的运算资源;串行运算所需运算资源较少,但完成滤波器的运算需要消耗较多的运算时间。表 1 对比了 RLS 自适应滤波分别采用并行运算、串行运算和交替存储乘累加流水线结构在完成滤波器运算的过程中所需的时钟周期、乘法器、除法器 and 加法器上

的差异。

综上,在 RLS 自适应滤波器的 FPGA 设计中,通过双精度浮点运算保证了滤波器的运算精度,巧妙地设计了交替存储结构从而降低了存储空间要求。多路开关实现了乘累加结构的时分复用,节省了 FPGA 逻辑资源。RLS 自适应滤波器完成滤波器运算所需时钟总数为  $4+6p+5p^2$ ,相比于并行运算结构节省了大量的运算资源,相比于串行运算结构则在运算资源相

表 1 不同运算结构的性能对比

Table 1 Performance comparison among different operation structures

Operation structure	Performance indicators			
	Clock periods	Multipliers	Divider	Adders
Parallel operations	1	$1 + 2p + 3p^2$	1	$2 - p + 2p^2$
Serial operations	$9 + 3p + 15p^2$	1	1	1
Alternate storage pipeline	$4 + 6p + 5p^2$	1	1	1

同的条件下缩短了运算时间。当系统时钟频率为 40 MHz, 滤波器阶数  $p=4$  时, RLS 自适应滤波器完成滤波器运算时间为  $2.7 \mu\text{s}$ , 采样频率能达到 370 kHz 以上, 能实现在较高频率的自适应滤波。

## 4 实验与结果分析

### 4.1 静态实验验证

实验过程中采用 FOG-70 型光纤陀螺。光纤陀螺自适应滤波实验框图如图 4 所示。该陀螺光纤环长  $L$  为 800 m, 平均直径  $D$  为 70 mm, 光源为超辐射发光二极管, 光波长  $\lambda$  为 1310 nm。根据文献[13], 设置 LMS 自适应滤波器期望信号为输入信号的 2 阶平均, 阶数为 10 阶, 权值更新步长为 0.8。仿真分析发现, RLS 自适应滤波器的阶数越高, 其收敛速度越快, 遗忘因子越大, 噪声抑制效果越好, 为了便于 FPGA 实现, 设置 RLS 自适应滤波器阶数为 4 阶, 遗忘因子为 1。

根据国军标 GJB 2426A—2004《光纤陀螺仪测试方法》, 在静态下分别利用 LMS 自适应滤波器和 RLS

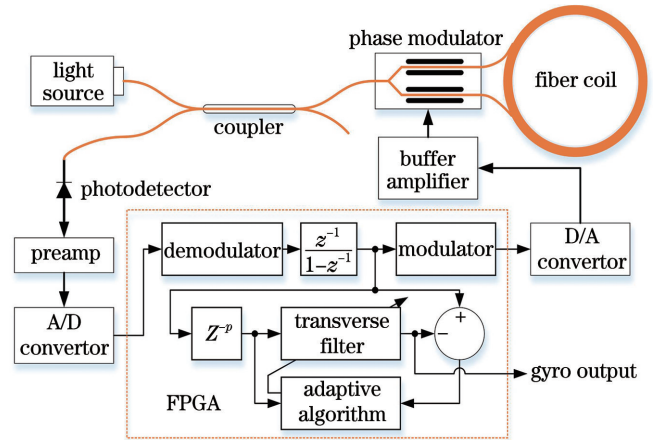


图 4 光纤陀螺自适应滤波实验框图

Fig. 4 Experimental block diagram of fiber optic gyroscope adaptive filtering

自适应滤波器对陀螺输出信号进行滤波。图 5 对比了在静态下两种自适应滤波器的滤波效果。图 6 对比了滤波器前后的频谱图和 Allan 方差结果。表 2 对比了

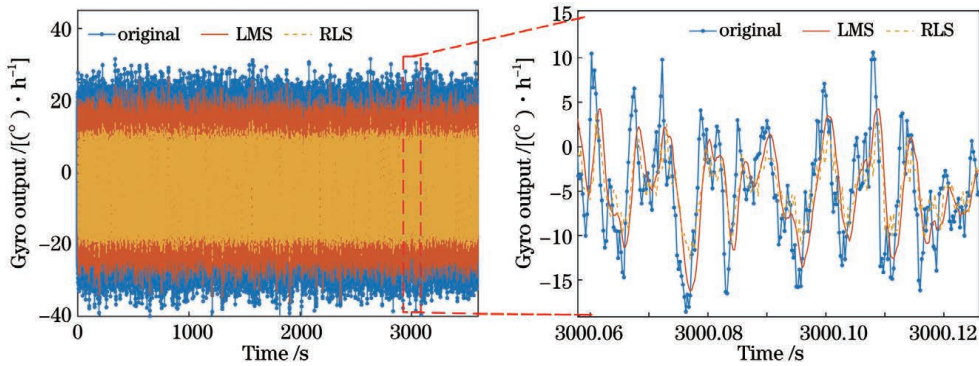


图 5 静态条件下滤波效果对比

Fig. 5 Comparison of filtering effects of different filters under static conditions

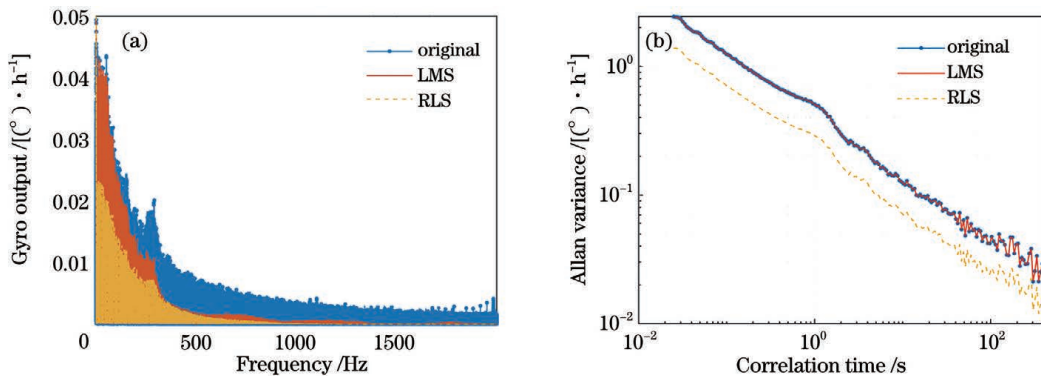


图 6 静态条件下滤波器性能对比。(a) 频谱图对比; (b) Allan 方差对比

Fig. 6 Comparison of performances of different filters under static conditions. (a) Comparison of spectrum; (b) comparison of Allan variance

表 2 RLS 自适应滤波与 LMS 自适应滤波性能对比

Table 2 Performance comparison between LMS adaptive filter and RLS adaptive filter

Temperature / °C	LMS adaptive filter			RLS adaptive filter		
	Bias stability / [(°) · h <sup>-1</sup> ]	Angular random walk / [(°) · h <sup>-1/2</sup> ]	Scale factor nonlinearity / 10 <sup>-6</sup>	Bias stability / [(°) · h <sup>-1</sup> ]	Angular random walk / [(°) · h <sup>-1/2</sup> ]	Scale factor nonlinearity / 10 <sup>-6</sup>
-40	0.0614	0.0065	45	0.0324	0.0031	33
25	0.0603	0.0060	34	0.0298	0.0029	24
60	0.0616	0.0064	43	0.0315	0.0030	28

LMS 自适应滤波和 RLS 自适应滤波后的光纤陀螺主要性能指标。

实验结果表明,在低频段,LMS 自适应滤波后噪声幅度与滤波前相当,而 RLS 自适应滤波器对噪声产生了一定程度的抑制作用;在高频段,LMS 自适应滤波和 RLS 自适应滤波均对噪声产生了一定的抑制作用。光纤陀螺输出信号通常为非平稳型信号<sup>[11]</sup>,因此,RLS 自适应滤波器比 LMS 自适应滤波器具有更好的自适应性。实验结果与理论分析吻合。对于 FOG-70 型光纤陀螺,RLS 自适应滤波能将陀螺的零偏稳定性提高约 50%,且能明显改

善角随机游走和标度因数非线性度。RLS 自适应滤波对提高光纤陀螺在高精度稳定跟踪平台和高机动飞行器上的控制精度方面具有重要的参考价值。

#### 4.2 动态实验验证

为了进一步验证 RLS 自适应滤波器的动态性能,将光纤陀螺置于转台上进行摇摆实验,设置转台摇摆幅度为 1°/s,摇摆频率分别为 5 Hz 和 10 Hz,分别采用 LMS 自适应滤波器和 RLS 自适应滤波器对光纤陀螺输出信号进行滤波,在摇摆运动条件下跟踪效果及相位延迟,结果如图 7 所示。

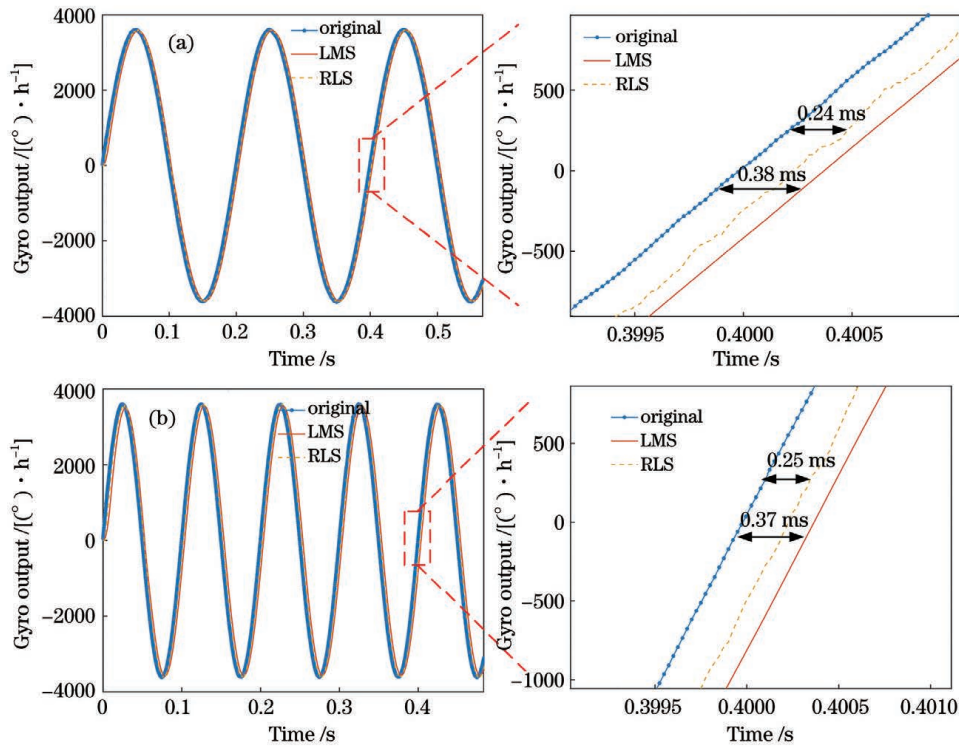


图 7 摇摆运动下不同滤波器输出对比。(a) 10 Hz;(b) 5 Hz

Fig. 7 Comparison of different filter outputs under swinging motion. (a) 10 Hz; (b) 5 Hz

对于 5 Hz 和 10 Hz 的摇摆实验,RLS 自适应滤波器的延迟分别为 0.24 ms 和 0.25 ms,LMS 自适应滤波器的延迟分别为 0.38 ms 和 0.37 ms。RLS 自适应滤波器的延迟主要来源于对输入信号的采样保持,其大小约为 1 个采样时钟周期;而 LMS 滤波器的延

迟主要来源于期望信号对输入信号的 2 阶平均,其大小约为 1.5 个采样时钟周期。在动态条件下,RLS 自适应滤波器比 LMS 自适应滤波器相位延迟降低约 30%。相比于 LMS 自适应滤波,RLS 自适应滤波对光纤陀螺输入信号具有更好的跟踪性能。

## 5 结 论

本文基于 FPGA 实现了光纤陀螺的 RLS 自适应滤波实时降噪。RLS 算法对非平稳信号具有更好的适应性,因而在光纤陀螺输出信号降噪上表现出了更加优越的性能。实验结果表明,相比于 10 阶的 LMS 自适应滤波器,4 阶的 RLS 自适应滤波器使光纤陀螺精度提高约 50%,相位延迟降低约 30%。另外,采用本文提出的交替存储乘累加流水线结构,当系统时钟频率为 40 MHz 时,对于 4 阶的 RLS 自适应滤波,能在 3  $\mu$ s 内完成滤波计算,最高采样率在 370 kHz 以上,能满足大多数光纤陀螺实时降噪的需求,对工程应用具有比较重要的参考价值。

### 参 考 文 献

- [1] 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.  
Shi W C, Xu J N, Lin E F. Development and prospect of gyroscope[J]. Journal of Navigation and Positioning, 2021, 9(3): 8-12.
- [2] Wu W R, Xian T H, Hu G D, et al. Rapid and precise compensation of scale factor in a fiber-optic gyroscope with a twin-peaks source[J]. Optics Letters, 2020, 45(11): 3107-3110.
- [3] Wang L, Wang W, Zhang Q, et al. Self-calibration method based on navigation in high-precision inertial navigation system with fiber optic gyro[J]. Optical Engineering, 2014, 53(6): 064103.
- [4] Song T X, Wang X Y, Liang W W, et al. Improved motor control method with measurements of fiber optics gyro (FOG) for dual-axis rotational inertial navigation system (RINS)[J]. Optics Express, 2018, 26(10): 13072-13084.
- [5] Zhu X M, Chen X F, Shu X W, et al. Eigen frequency measurements of a fiber optic gyroscope based on a staircase waveform with large temperature range[J]. Applied Optics, 2019, 58(6): 1562-1568.
- [6] Yang Y H, Yan H, Li S, et al. Estimation of gyro bias drift due to distributed polarization cross coupling in the fiber coil[J]. Optics Express, 2019, 27(7): 10247-10257.
- [7] 张延顺,孙枫,张家海,等.自适应横向滤波器在干涉式光纤陀螺中的应用[J].哈尔滨工程大学学报,2001,22(1):59-61,71.  
Zhang Y S, Sun F, Zhang J H, et al. Application of adaptive transverse filter in interference fibre optical gyro[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2001, 22(1): 59-61, 71.
- [8] 张晞,王夏霄,邹战军.光纤陀螺输出信号的自适应滤波[J].航天控制,2006,24(3):4-6,12.  
Zhang X, Wang X X, Wu Z J. Adaptive filter of output signal in optical fiber gyroscope[J]. Aerospace Control, 2006, 24(3): 4-6, 12.
- [9] 王立辉,孙枫,季强,等. LMS 自适应滤波算法在 FOG 数据处理中的应用[J].系统工程与电子技术,2010,32(5):1047-1050.  
Wang L H, Sun F, Ji Q, et al. Application of LMS adaptive filtering algorithm in FOG data processing[J]. Systems Engineering and Electronics, 2010, 32(5): 1047-1050.
- [10] 徐晓苏,吴亮,刘义亭.基于 LMS 与二代小波变换的光纤陀螺去噪算法[J].中国惯性技术学报,2014,22(6):810-814.  
Xu X S, Wu L, Liu Y T. Denoising algorithm for FOG based on LMS and second-generation wavelet transform[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2014, 22(6): 810-814.
- [11] 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.  
Tian Y P, Yang X J, Guo Y Z, et al. Filtering analysis on the random noise of fiber optic gyroscope[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(9): 0906006.
- [12] 陈世同,孙枫,高洪涛,等.自适应滤波技术在光纤陀螺信号处理中的应用研究[J].弹箭与制导学报,2006,26(SA):1130-1132.  
Chen S T, Sun F, Gao H T, et al. Research on the practical application of the adaptive filter technology in the IFOG data processing[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2006, 26(SA): 1130-1132.
- [13] 杜建邦,何金阳,卓超.基于最小均方自适应算法的光纤陀螺信号实时滤波方法[J].中国惯性技术学报,2020,28(6):814-818,828.  
Du J B, He J Y, Zhuo C. Real-time filtering method of FOG signal based on LMS adaptive algorithm[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2020, 28(6): 814-818, 828.
- [14] 亓洪涛.基于变阶数 LMS 算法的光纤陀螺降噪技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2019.  
Qi H T. Research on noise control technology in fiber optic gyroscope based on variable order least mean square algorithm[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2019.
- [15] 亓洪涛.基于自适应滤波的光纤陀螺仪降噪技术研究[J].舰船电子工程,2020,40(4):48-51.  
Qi H T. Research on noise control technology of fiber optic gyroscope based on adaptive filter[J]. Ship Electronic Engineering, 2020, 40(4): 48-51.
- [16] 高亚楠,杨亭鹏,陈家斌.解相关自适应滤波在光纤陀螺信号处理中的应用[J].光学技术,2006,32(3):476-478.  
Gao Y N, Yang T P, Chen J B. De-correlation adaptive filter for reducing the random drift at the output of FOG[J]. Optical Technique, 2006, 32(3): 476-478.
- [17] Wang D, Xu X, Zhang T, et al. An EMD-MRLS de-noising method for fiber optic gyro signal[J]. Optik, 2019, 183(C): 971-987.
- [18] Swaminathan G, Murugesan G, Sasikala S, et al. A novel implementation of combined systolic and folded architectures for adaptive filters in FPGA[J]. Microprocessors and Microsystems, 2020, 74: 103018.
- [19] Huang C F, Li A, Qin F J, et al. Fiber optic gyro signal denoising based on variational mode decomposition and adaptive noise cancellation[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1449(1): 012010.
- [20] Chen J, Ma T, Chen W J, et al. Unsupervised robust recursive least-squares algorithm for impulsive noise filtering[J]. Science China Information Sciences, 2013, 56(4): 048201.

# RLS Adaptive Real-Time Noise Reduction Technology for Fiber Optic Gyroscope Based on FPGA

Ma Jiajun<sup>1\*</sup>, Liu Qingyang<sup>1</sup>, Lü Yanran<sup>1</sup>, Zeng Wei<sup>1</sup>, Liang Yongchao<sup>1</sup>, Jiang Junbiao<sup>2</sup>

<sup>1</sup> College of Big Data and Information Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, Guizhou, China;

<sup>2</sup> Xi'an Modern Control Technology Research Institute, Xi'an 710065, Shaanxi, China

## Abstract

**Objective** Fiber optic gyroscope is a high-precision angular velocity sensor based on Sagnac effect, with the advantages of all solid state, small size, low cost and easy maintenance. It is widely used in national defense, aviation, aerospace and other fields. Due to the characteristics of optical components and environmental factors, the output signal of fiber optic gyroscope is usually a non-smooth, nonlinear random signal. Noise interference in the output signal is the main factor affecting the performance of fiber optic gyroscope. In engineering, low-pass filtering is usually used for the noise reduction of the output signal of fiber optic gyroscope. However, since the frequency bands of effective signal and noise overlap with each other, this method cannot suppress the low frequency noise interference. At present, the main adaptive filters are least mean square (LMS) adaptive filter and recursive least square (RLS) adaptive filter. LMS adaptive filter minimizes the performance function by stochastic gradient descent method, which has the advantages of low computational complexity and easy implementation. Compared with LMS adaptive filter, RLS adaptive filter has obvious advantages in convergence speed, and the adaptation of RLS adaptive filter is also better than LMS adaptive filter under non-smooth random signal conditions. However, RLS adaptive filtering has not been implemented on any hardware platform due to its high computational complexity, which makes it difficult to be applied in engineering.

**Methods** In this paper, we analyze the principle of RLS adaptive filtering and propose a real-time noise reduction technique of RLS adaptive filtering for fiber optic gyroscope based on field programmable gate array (FPGA) to address the above problems. According to the principle of RLS adaptive filtering, the most direct parallel operation and the traditional serial operation can be implemented. Parallel operation can complete all operations of a filter in one clock cycle, but it will consume a lot of computing resources. Serial operation requires less computing resources, but it takes more computing time to complete a filter. We design a new alternate storage multiply-accumulate pipeline structure based on FPGA to implement RLS adaptive filtering, which ensures the operation accuracy of RLS adaptive filter by double precision floating point operation, reduces the storage space by tactfully designing the alternate storage structure, and saves the FPGA logic resources by realizing the time-division multiplexing of multiply-accumulate structure with multiple switches. The filtering effects of the LMS adaptive filter and the RLS adaptive filter are experimentally compared under static conditions, and the post-filter performance indexes are analyzed using Allan variance. The difference in delay between the LMS adaptive filter and the RLS adaptive filter is studied under dynamic conditions.

**Results and Discussions** The experimental results show that the RLS algorithm shows a superior performance in noise reduction of the fiber optic gyroscope output signal due to its better adaptability to non-smooth signals. In the low frequency band, the noise amplitude after LMS adaptive filtering is comparable to that before filtering, while the RLS adaptive filter produces a certain degree of noise suppression; in the high frequency band, both the LMS adaptive filter and the RLS adaptive filter produce some suppression of the noise (Fig. 6). Compared with the 10th order LMS adaptive filter, the 4th order RLS adaptive filter improves the fiber optic gyroscope accuracy by about 50% (Table 2). For the swing experiments at 5 Hz and 10 Hz, the delays of RLS adaptive filter are 0.24 ms and 0.25 ms, respectively, while the delays of LMS adaptive filter are 0.38 ms and 0.37 ms, respectively. The delay of the RLS adaptive filter mainly comes from the sample hold of the input signal, which is about 1 sample clock cycle in size, while the delay of the LMS filter mainly comes from the 2nd order averaging of the desired signal on the input signal, which is about 1.5 sample clock cycles in size. Under dynamic conditions, the RLS adaptive filter reduces the phase delay by about 30% compared with the LMS adaptive filter (Fig. 7).

**Conclusions** Using the alternate storage multiply-accumulate pipeline structure proposed in this paper, when the system clock is 40 MHz, the RLS adaptive filter can complete the calculation within 3  $\mu$ s, and the highest sampling rate can reach more than 370 kHz, which can meet the demand of real-time noise reduction of most fiber optic gyroscopes. The research in this paper makes RLS adaptive filtering in fiber optic gyroscope noise reduction technology have engineering practical value, effectively suppressing noise in fiber optic gyroscope output signal and improving its control accuracy in high precision stable tracking platform and high maneuverability aircraft.

**Key words** fiber optics; fiber optic gyroscope; adaptive filtering; real-time noise reduction; Allan variance