

文章编号: 1002-1582(2026)03-0332-09

# 滤波新算法消除机械抖动在激光幕墙探测中的应用

卢胤<sup>1</sup>, 江乐岩<sup>2</sup>, 黄云天<sup>1</sup>, 唐自强<sup>1</sup>, 何鹏<sup>1</sup>, 周铭昊<sup>2</sup>, 朱旭<sup>2</sup>, 吴小山<sup>2\*</sup>

(1. 国网江苏省电力有限公司建设分公司, 江苏 南京 210000)

(2. 南通南京大学 材料工程研究院, 江苏 南通 226019)

**摘 要:** 噪声、扰动和机械振动导致激光幕墙偏离光扫描平面, 影响安防检测效果。为提高激光幕墙探测系统的稳定性与精度, 采用数学补偿方法进行处理。通过仿真研究, 发现高斯滤波计算快捷, 在光滑曲面的处理效果较好; 小波滤波计算耗时, 但在曲面突变处理上更为有效。为此, 提出一种新的数学处理策略: 在激光幕墙光面突变处使用小波滤波进行棱角区域补偿, 保留边缘曲面特征, 并结合高斯滤波对整体信号进行平滑。实验结果验证了该方法的有效性, 成功融合了两种滤波器的优势, 显著提高了系统的稳定性和探测精度。

**关 键 词:** 激光幕墙; 系统抖动; 小波滤波技术; 高斯滤波技术

中图分类号: TK83

文献标识码: A

## Application of a novel filtering algorithm to eliminate mechanical vibration in laser curtain detection

LU Yin<sup>1</sup>, JIANG Leyan<sup>2</sup>, HUANG Yuntian<sup>1</sup>, TANG Ziqiang<sup>1</sup>,  
HE Peng<sup>1</sup>, ZHOU Minghao<sup>2</sup>, ZHU Xu<sup>2</sup>, WU Xiaoshan<sup>2\*</sup>

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Construction Branch, Nanjing 210000, China)

(2. Institute of Materials Engineering & Technology, Nantong-Nanjing University, Nantong 226019, China)

**Abstract:** Noise, disturbances, and mechanical vibrations cause the laser curtain wall to deviate from the optical scanning plane, significantly affecting the security detection performance. To improve the stability and accuracy of the laser curtain wall detection system, mathematical compensation methods are used for processing. Simulation studies show that Gaussian filtering is fast and effective for smooth surfaces, while wavelet filtering is time-consuming but more effective in handling surface discontinuities. Therefore, a new mathematical processing strategy is proposed: wavelet filtering compensates for the edge regions of the laser curtain wall surface, preserving the edge curvature, and Gaussian filtering is applied for overall signal smoothing. Experimental results validate the effectiveness of this method, successfully integrating the advantages of both filters and significantly improving the system's stability and detection accuracy.

**Keywords:** laser curtain wall; system jitter; wavelet filtering technique; Gaussian filtering technique

## 0 引 言

激光器是通过在可使光子产生受激辐射的工作物质中, 借助光学谐振腔等实现光反馈放大,

从而发射出具有单色性、高相干性以及强抗干扰性的激光。由于其优异的抗干扰性, 在像素成像、遥感技术以及非视域成像中具有良好的应用场景<sup>[1-9]</sup>。在激光测距中, 更是体现出低衰减、强稳

收稿日期: 2025-11-14; 收到修改稿日期: 2026-02-17

基金项目: 本工作得到国网江苏省电力有限公司科技项目“基于立体激光幕墙技术的入侵报警装置研制及快速部署应用研究”的支持(J2024127)

作者简介: 卢胤(1980.6—), 男, 高级工程师, 从事500kV及以上输变电工程建设安全技术研究。13505158530@139.com  
吴小山(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 从事材料结构表征与薄膜太阳能电池技术开发研究。

\* 通讯作者: xswu@nju.edu.cn

定性的优势。

激光测距因其在高精度测量方面的优异表现,在许多测量领域都有着独特的优势。近年来,其在越来越多的领域得到广泛的关注,例如测绘,自动泊车以及安全防护等<sup>[10,11]</sup>。其中激光测距可用于制作激光幕墙防护系统,激光幕墙防护系统通常由接收器和发射器组成,通过发射器发射高相干的激光,当入侵物进入防护区域中,接收器收到变化信号从而发出报警。全球定位系统同样也可用作防护入侵系统,是最常用和最可靠的位置检测技术。GPS目标检测可以在大尺度上获得信息,但由于信号衰减,精度较低等原因,在高精度的防护系统中应用受限,因此声学、光学或RF信号检测的其他几种技术受到越来越多的关注<sup>[12-14]</sup>,激光幕墙防护系统就是其中兼具安全性与精度的重要手段。

精密测量需要有稳定的测量系统。近年来,激光扫描系统的机械抖动补偿与稳定测距已成为研究重点,已有研究表明户外振动对激光测距精度影响显著<sup>[15,16]</sup>。在安全防护领域,高稳定性激光入侵检测系统也大量采用抖动抑制与信号平滑技术<sup>[17,18]</sup>。目前针对防抖技术的研究集中在对视频系统的处理中,主要分为OIS光学防抖和EIS电子防抖<sup>[19,20]</sup>,OIS防抖是将元件悬浮,通过陀螺仪进行抖动补偿,EIS电子防抖则是一种软件补偿算法,在得到静态照片时,通过算法进行移动分析,判断画面的抖动,从而还原出原本图像。这两类防抖技术,或者更合适的新技术用于激光幕墙扫描探测系统的研究还是空白,需要研究获得一种防抖技术或算法用于激光精准扫描探测。

在激光扫描测量中,抖动误差通常表现为快速、高频的噪声,它可能是由于设备的不稳定性、振动或外部环境因素引起的。小波滤波技术和高斯滤波技术在去除这种抖动误差时有不同补充或抑制效果<sup>[21,22]</sup>。小波滤波和高斯滤波是两种常见的信号去噪数学补偿方法,各自具有独特的优势,特别针对处理由激光测量时抖动造成的误差时。

此外,类似的“分阶段”信号处理思想在LiDAR领域的回波/点云去噪中也较为常见,通常通过多尺度分解与平滑/优化的组合来兼顾噪声抑制与结构保持<sup>[23-29]</sup>。然而,激光幕墙扫描探测的数据形态与误差主导机制与传统LiDAR回波或点云处理存在差异:激光幕墙探测得到的是随扫描角度组织的二维距离序列/矩阵,抖动误差对边缘与棱角处的影响更为敏感,且系统往往需要在嵌入式或实时条件下完成快速处理。基于上述差异,

本文在借鉴分阶段处理思想的同时,侧重构建轻量化、易部署的抖动抑制流程,以在不引入过高计算复杂度的前提下提升边缘保真与整体测距稳定性。

小波滤波的优势在于其能够在时域和频域上自适应地进行信号处理。小波变换通过多尺度分析,能够有效地提取信号中的不同频率成分,对于含有突变或不规则噪声的信号有独到之处。由于小波变换具有良好的局部性,能够精确地去除高频噪声,同时保留信号中的重要低频信息,因此在激光测量的误差消除中,小波滤波能较好地应对由于测量设备抖动引起的高频噪声,并可应用于重载铁路货车轴承突发性损伤类故障检测和点焊质量监测过程中<sup>[30,31]</sup>。

高斯滤波是基于平滑函数的一种线性滤波方法,它通过对信号进行平滑处理来去除噪声。高斯滤波数学模型简单,计算效率较高,对于平稳的噪声具有较好的抑制效果。尽管高斯滤波可以有效去除低频噪声,但在处理激光测量中的高频抖动会导致信号失真。

## 1 算法设计

### 1.1 算法与滤波器设计

#### 1.1.1 局部滤波器

域滤波器是一种空间域滤波的处理方法,对应于信号处理中的时域滤波方法。通过设置一个一定面积的滑动窗口,即卷积核,在图像矩阵中进行卷积运算。局域滤波器的优点是算法简单直观,运算不涉及傅里叶变换,对于数量很有限的激光信号而言,运算速度极快。常用的降噪局部滤波器有均值滤波器、高斯滤波器<sup>[32-42]</sup>等。

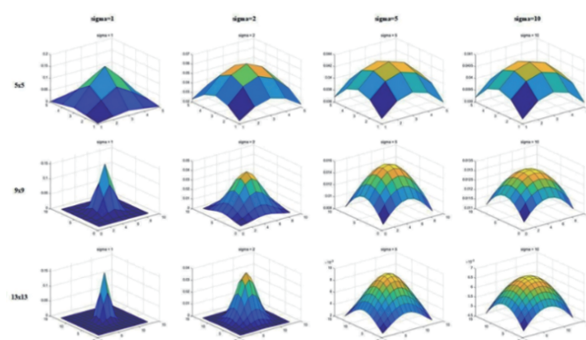


图1 不同参数选择下的高斯滤波器权重分布

均值滤波器:采用滑动平均法,取面积为 $N$ 的窗口 $S$ ,一般取为矩形,使其中心遍历所有像素,窗口内所有像素的平均值即为滤波后图像中该点的像素值,表示为<sup>[22]</sup>

$$I(x,y)=\frac{1}{N}\sum_{(i,j)\in S(x,y)}I_0(i,j) \quad (1)$$

式中 $(x,y)$ ,  $(i,j)$ 表示像素坐标。

高斯滤波器：与均值滤波器类似，不同点在于对于窗口 $S$ 内的点，按类似高斯分布进行加权平均得到滤波后图像中该点的像素值，而不是直接平均。表示为<sup>[22]</sup>

$$I(x,y)=\sum_{(i,j)\in S(x,y)}\omega(i,j)I_0(i,j) \quad (2)$$

式中 $(x,y)$ ,  $(i,j)$ 表示像素坐标，有归一性要求 $\sum\omega(i,j)=1$ 。其加权分布模板由高斯分布函数给出

$$H(x,y)=e^{-\frac{(x^2+y^2)}{2\sigma^2}} \quad (3)$$

当系数 $\sigma$ 较小时，中心系数较大而周围系数较小，平滑效果不明显。而当系数 $\sigma$ 较大时，系数分布较均匀，趋向于均值滤波，平滑效果较明显。相较均值滤波优势在于可以调节平滑效果以避免过平滑而模糊了图像边缘。

局域滤波器类似于通过模糊图像的方法，以牺牲图像精度为代价换取抑制噪声的效果。对于对形状细节不敏感，局部滤波器可以降低形状的奇异性，抑制不规则边缘的出现，起到节约算力，优化可视化后图像的作用。

### 1.1.2 变换滤波器

变换域滤波是一种频域滤波<sup>[39]</sup>，是将信号从空间域变换到频域进行滤波处理的方法。变换域滤波与图像整体信息相关，而局域滤波只与图像的局部信息相关。频域处理对于不规则的噪声有着空间域处理难以比拟的优势：通过傅里叶变换等操作，可以得到很好的平滑效果。缺点在于处理时需要进行傅里叶变换和逆向傅里叶变换的操作，数据量较大时需要更多的时间成本投入。而对于数量有限的激光信号而言，这是可以接受的。变换域滤波主要包括傅里叶变换、离散余弦变换、小波变换等。

早在 1807 年，法国数学家兼物理学家傅里叶就提出任意一个周期为 $T(2\pi)$ 的函数 $f(t)$ 都可以表示成三角级数，这就使得复杂的周期函数问题可以简化为简单的三角级数问题，如下所示<sup>[40]</sup>

$$F(t)=\frac{a_0}{2}+\sum_{n=1}^{\infty}a_n\cos(nt)+\sum_{n=1}^{\infty}b_n\sin(nt) \quad (4)$$

式中

$$\begin{aligned} a_n &= C_n + C_{-n} \\ b_n &= i(C_n - C_{-n}) \\ C_n &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(t)e^{-int}dt \end{aligned} \quad (5)$$

当 $T \rightarrow \infty$ 时，将求和变为积分，频率替换为 $\omega$ ，便得到了傅里叶变换公式

$$F(\omega)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}f(x)e^{-i\omega t}dt \quad (6)$$

其逆变换称为傅里叶逆变换

$$F(t)=F^{-1}[f(\omega)]=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}F(\omega)e^{i\omega t}d\omega \quad (7)$$

对于非平稳信号，傅里叶变换不能很好地反映出其频率在空间中的变化，使得图像中的空间位置信息丢失。而小波变换改变了傅里叶变换的基函数，将其由无限长的三角函数，调整为有限、随距离衰减的小基波，如图 2 所示，一般形式可表示为<sup>[22]</sup>

$$\Psi_{(a,b)}(t)=\frac{1}{\sqrt{a}}\Psi\left(\frac{t-b}{a}\right), a,b\in R \quad (8)$$

式中， $a$ 为长度因子，用于控制基波有效长度的变化； $b$ 为平移因子，用于实现小波函数在时间轴上平行移动。根据定义可以看出，小波基能量有限且具有波动特性，因此小波基能够在有限时间内保持特定形状，在有限时间外快速衰减；再者，小波基在周期区间外定义为 0。综上，小波基从根源处克服了傅里叶变换的缺陷，使得小波分析成为继傅里叶变换之后大为流行的变换域理论。

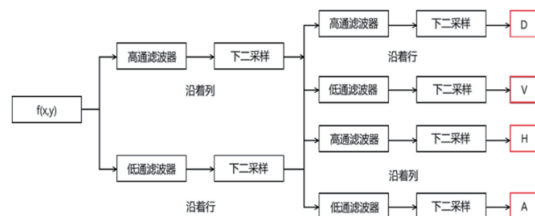


图 2 小波滤波流程图

计算机中连续问题实质是对原始问题进行采样，转化为离散问题进行处理。离散小波变换 (Discrete Wavelet Transform, DWT) 则是针对连续小波变换的尺度参数和平移参数进行的离散化取样。为了降低计算量，缩放因子和平移因子都选择 2 的倍数，选用这种参数的小波变换称为双尺度小波变换，是离散小波变换的一种形式。则离散小波变换可定义为<sup>[22]</sup>

$$W_{\lambda}(j,k)=\int_{-\infty}^{\infty}f(t)\Psi_{(j,k)}(t)dt \quad (9)$$

$$\text{式中, } \Psi_{(j,k)}(t)=\frac{1}{\sqrt{2^j}}\Psi\left(\frac{t-k}{2^j}\right)$$

计算中采用离散小波变换作为滤波参数，其原理为：信号通过小波变换被分解成多个频带，常见的有高频和低频子信号。抖动噪声通常集中

在高频部分,因此小波滤波会对这些高频成分进行处理。在高频部分,通过阈值化操作去除噪声。阈值化方法通常有硬阈值和软阈值,它们的目标是将噪声成分抑制到接近零,保留信号中的真实部分。

硬阈值处理为将小于阈值的小波系数全部置零。软阈值处理为将小于阈值的部分压缩为0,而大于阈值的部分减去阈值,优点是经处理后过度平滑,更好地保留了图像原始形状特征。故本次仿真采用软阈值处理。

### 1.1.3 滤波器选择

小波滤波凭借多尺度分析在处理具有边缘突变与高频噪声的激光信号中优势明显<sup>[23,24]</sup>。近期研究也提出了自适应阈值与复小波域的改进算法,可进一步提升保边能力<sup>[25,41-42]</sup>。小波滤波的优势在于能够非常精确地分辨信号中的噪声和有意义的变化,因此在处理设备抖动引起的瞬时变化时,能够最大程度地保留信号的有效信息。特别是其适用于非平稳信号,因为小波滤波在不同的尺度上处理信号,对于具有突变或非均匀噪声的情况尤为有效,例如在激光测量中由于设备抖动造成的高频误差。

高斯滤波通过卷积操作将信号与高斯核进行平滑处理,因其高效与稳定性,被广泛应用于光学测量与点云噪声抑制中<sup>[39,40]</sup>,特别是在平滑表面或均匀噪声场景下具有优越表现。高斯滤波对于平稳噪声具有较好的去除效果,适合去除残余平稳随机噪声<sup>[41,42]</sup>,例如在传感器数据读取过程中,传感器可能因随机轻微振动而产生小幅波动,使用高斯滤波可以平滑这些波动,使系统只响应那些变化幅度较大的有效信号,提高运算效率。

然而,在激光幕墙实际信号中,光滑区域与突变边缘往往同时存在,使得单独使用任意一种滤波器都难以兼顾“边缘保真”与“整体平滑”:仅使用高斯滤波会在棱角区域产生模糊过渡;仅使用小波滤波则可能在光滑区域保留一定残余噪声。

为解决这一矛盾,本文提出一种联合去噪策略(Hybrid Filtering Strategy):先利用小波滤波进行多尺度阈值分解,抑制高频抖动并保持边缘结构;再采用弱高斯滤波对整体信号进行二次平滑,以进一步削弱平稳噪声并降低方差。该滤波策略可以概括为“先小波、后高斯”,其核心思想是:第一阶段利用离散小波软阈值的多尺度分解能力抑制由机械抖动引起的高频、非平稳扰动,并尽量保持边缘/棱角处的突变结构;第二阶段采用参

数受限的弱高斯平滑对重构结果进行轻度去噪,以进一步降低残余平稳噪声方差并提升测距稳定性。该两阶段结构算子简单、计算量可控,便于嵌入式实时部署,同时降低强平滑导致的边缘模糊风险。

类似的多阶段信号处理结构也常用于LiDAR领域回波去噪,如VMD-小波或小波-高斯融合方法<sup>[26-28]</sup>,在此基础上,本文提出‘先小波、后弱高斯’组合策略,充分利用两者的互补特性,使得输出信号在边缘清晰度和整体稳定性之间达到更佳平衡。

本文区分弱高斯与标准高斯两类平滑强度,分别用高斯核标准差 $\sigma_w$ (weak Gaussian)与 $\sigma_s$ (standard Gaussian)表征,并统一采用核尺寸

$$K(\sigma) = 2 \times \lceil 3\sigma \rceil + 1 \quad (10)$$

弱高斯滤波取 $\sigma_w \in [0.3, 0.8]$ ,对应 $K(\sigma_w)$ 通常为 $3 \times 3$ 或 $5 \times 5$ ,用于在小波重构后进行轻度平滑;标准高斯平滑取 $\sigma_s = 1$ ,对应 $K(\sigma_s) = 7$ ,即 $7 \times 7$ ,平滑强度更高,易引入边缘扩散。本文在联合滤波策略中采用弱高斯作为第二阶段滤波,在仿真与实验过程中参数均取 $\sigma_w = 0.4$ , $K(\sigma_w) = 2 \times \lceil 3 \times 0.4 \rceil + 1 = 5$ ;对照说明中的标准高斯取 $\sigma_s = 1$ , $K(\sigma_s) = 5$ 。

综合考量工程所需的精度,尤其是考虑到成本、续航等原因对于算力的限制,每秒上千次的数据处理需求,本文将联合去噪对比高斯滤波、小波滤波,进行仿真模拟,并通过与真实图样的方差作为评价标准进行模拟实验,以选取最优的滤波方式。

## 1.2 激光幕墙防抖的设计

滤波算法在激光幕墙防抖中的应用主要是通过平滑信号、去除瞬时或无意义的噪声,从而抑制信号中由设备抖动、瞬时变化或外部干扰引起的无效波动。防抖算法的目标是减少由于设备误差或外部因素带来的短时变化,使得系统只响应真正有意义的信号变化。通过结合使用滤波算法,防抖算法能够更加高效、精准地实现这一目标。滤波算法在防抖算法中主要起到去除瞬时波动、减轻误报以及降低计算负担三种作用。

防抖算法能够通过滤波算法平滑信号,减少了不必要的波动,防抖算法可以设定更简洁的判断规则(如阈值判断或时间窗口),从而减少不必要的计算量。在体积有限需要考虑散热性能,或者电量续航有限的应用场景中,通过降低计算复杂度可以节约算力,降低对芯片性能要求的同时也减小了能量消耗,有利于延长续航。

同时,通过滤波信号的变化会变得更加平稳,防抖算法的阈值判断会变得更加有效,提高了信号的稳定性,可以避免由于奇异值引起的图像异常,保证了程序的可靠性与稳定性,以满足应用需求。

实践算法应用时,在进入防抖模块之前,首先应用小波滤波对信号进行分解与阈值化处理,去除由设备抖动引起的高频噪声,同时保留边缘与棱角的细节结构。随后,再使用弱高斯滤波对小波滤波后的结果进行整体平滑,进一步削弱残余的平稳噪声。通过这种先小波后高斯的联合处理策略,信号的平稳性显著提高,从而减少误报并提高系统的可靠性。最终输出的图像在边缘清晰度和整体平滑度之间达到了较好的平衡,便于后续的物体识别与特征提取。

## 2 分析与讨论

### 2.1 仿真设置

仿真流程分为四个步骤:数据获取、数据预处理、柱坐标化、滤波去噪、信号还原、可视化。其中滤波去噪部分是整套去噪算法的核心,也是本次仿真的重点考察对象。

数据获取:即选取样例形状,以模拟激光测距采样所获得模拟的原始信号;数据预处理:在信号到达小波滤波器之前,首先通过防抖策略筛选认为存在抖动噪声的数据,减小计算复杂度并防止过度滤波造成的信号失真。通过设定一个最小变化阈值,只有当信号变化幅度超过该阈值时,才进行小波滤波处理;矩阵化:将所得的激光信号,转化为以柱坐标为索引的二维矩阵进行处理,便于进行小波分解;滤波处理:分别采用所选滤波器对原始柱坐标距离数据进行滤波去噪,得到各方法对应的滤波输出;信号还原:对滤波输出进行数字化重构,统一转换为柱坐标数据形式,以保证不同方法结果具有可比性;可视化:将柱坐标数据矩阵转化为直角坐标数据,并完成最终的可视化处理。

为增强仿真结果的工程可信度,本文在无噪声的柱坐标距离数据基础上叠加两类扰动生成观测数据:一类为正弦振动项,用于表征扫描机构或载体振动引入的周期性机械抖动;另一类为零均值高斯随机项,用于表征环境散射与测距链路等导致的近似平稳随机扰动。仿真中首先生成理想距离序列/矩阵  $r_{\text{clean}}$ ,随后叠加正弦抖动分量  $n_s$ ,再叠加高斯噪声分量  $n_g$ ,得到最终观测数据  $r_{\text{obs}} = r_{\text{clean}} + n_s + n_g$ 。其中正弦项对应“机械抖动”的确定性振动成分,高斯项对应“环境扰动/测量噪

声”的随机成分,从而使仿真噪声在误差来源上与实际激光幕墙系统具有对应关系。

为还原工程应用中的常见情况,选择以球体、立方体,以及表面带有褶皱的不规则椭球作为测试情形。通过比较两种滤波方法对图像细节的保留效果,同时以去噪后图像与原始图像的方差作为图像质量的量化评价标准。

### 2.2 算法模拟结果与分析

本文首先采用高斯滤波和小波滤波针对多种模拟情形进行去噪处理,并进行了对比分析。

仿真结果首先表明,高斯滤波和小波滤波在不同场景下各有优势。对光滑曲面的球体测试图像而言,高斯滤波能够更均匀地削弱高频噪声,整体表面更为平滑,方差降低幅度较大,因此在光滑区域的去噪效果略优于小波滤波。然而,当处理带有锐利棱角或复杂边界的图像时,高斯滤波因其全局平滑特性,在边缘区域会出现毛边与模糊过渡,导致棱角细节明显丢失。相反,小波滤波凭借多尺度局部分析的优势,可以在有效去除噪声的同时较好地保留边缘和棱角结构,使边界更加清晰自然。在棱角结构保留方面,小波滤波在仿真中所表现出的优势与已有边缘保持滤波研究一致<sup>[29,41]</sup>。

从图3~8的对比结果可以直观地看出这一差异。高斯滤波后的球体与不规则椭球表面较为光滑,但立方体图像在棱角处出现明显的模糊现象。小波滤波在这些情况下保持了清晰的结构,在不同情形下表现出较强的稳定性。

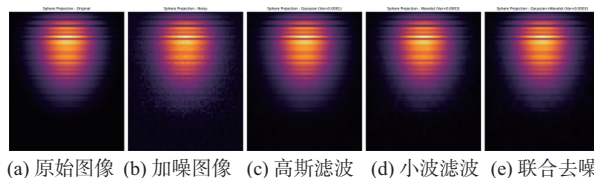


图3 球体情形的柱坐标数据

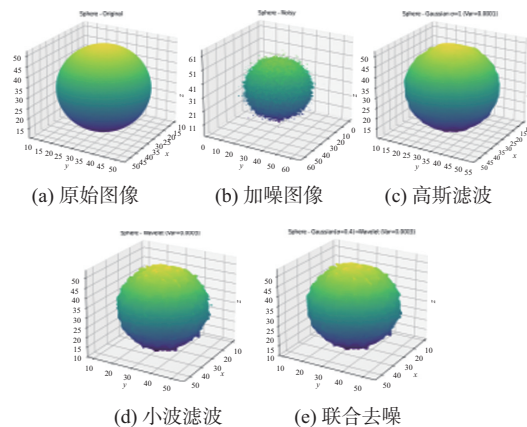
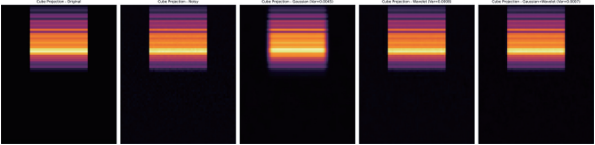
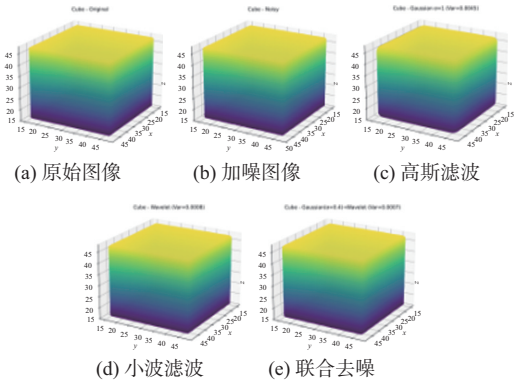


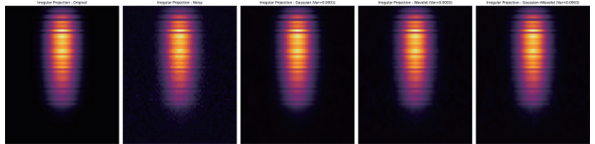
图4 球体情形的不同滤波方法三维数据



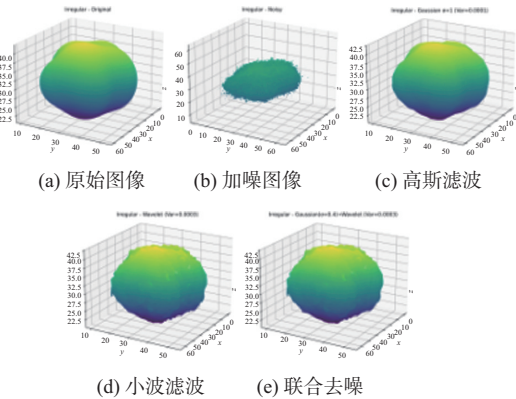
(a) 原始图像 (b) 加噪图像 (c) 高斯滤波 (d) 小波滤波 (e) 联合去噪  
图 5 立方体情形的柱坐标数据



(a) 原始图像 (b) 加噪图像 (c) 高斯滤波 (d) 小波滤波 (e) 联合去噪  
图 6 立方体情形的不同滤波方法三维数据



(a) 原始图像 (b) 加噪图像 (c) 高斯滤波 (d) 小波滤波 (e) 联合去噪  
图 7 不规则椭球情形的柱坐标数据



(a) 原始图像 (b) 加噪图像 (c) 高斯滤波 (d) 小波滤波 (e) 联合去噪  
图 8 不规则椭球情形的不同滤波方法三维数据

本文创新提出的联合滤波方法针对二者的差异化表现，先采用小波滤波处理棱角部位，以保留细节与边缘清晰度，再使用弱高斯滤波对整体图像进行二次平滑，从而进一步优化方差。从仿真结果数据图可以看出，这一组合策略有效融合了两者的优点。小波滤波解决了高斯滤波在棱角处的不足，避免了边缘模糊；而弱高斯滤波在全局范围内进一步抑制了残余噪声，使整体方差相比单独使用小波滤波时进一步下降。最终结果显示，组合滤波在保证边缘细节的同时获得了更平稳、更稳定的输出，防抖效果更加明显。

表 1 与图 9 给出了不同形状在高斯滤波、小波滤波以及本文提出的联合滤波下的方差对比结果。

可以看到：

在光滑曲面（如球体和椭球）中，高斯滤波对噪声的削弱更为直接，方差下降幅度较大，整体表面平滑度优于小波滤波。这与高斯滤波在均匀区域具有较强全局平滑性的特性相符。

在锐利棱角（如立方体）中，高斯滤波虽然降低了部分噪声，但在边界区域出现了模糊过渡和细节丢失，使得棱角特征不再清晰。小波滤波则依靠多尺度分解，有效去除了高频噪声，同时保留了棱角与边缘结构，因此在立方体情形中表现明显优于高斯滤波。

联合滤波的结果表明：在光滑曲面情形下，先经过小波滤波抑制高频抖动，再施加强高斯滤波进行整体平滑，方差进一步降低至低于单独小波滤波的水平，接近甚至略优于单独高斯滤波的结果；在锐利棱角情形下，联合滤波既保持了小波滤波的边缘保真，又利用弱高斯抑制了残余平稳噪声，最终实现了方差最优。

表 1 滤波后方差

| 形状  | 高斯滤波     | 小波滤波     | 联合去噪     |
|-----|----------|----------|----------|
| 球体  | 0.000063 | 0.000313 | 0.000264 |
| 立方体 | 0.004504 | 0.000754 | 0.000727 |
| 不规则 | 0.000069 | 0.000313 | 0.000264 |

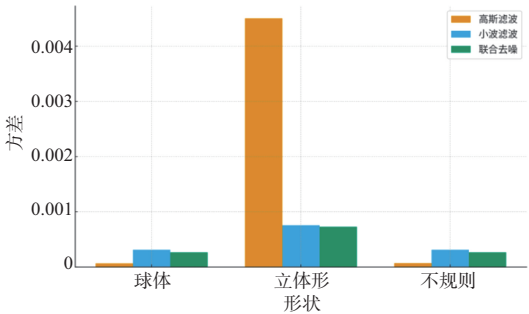


图 9 各形状在不同滤波方法下的方差

因此，方差数据充分验证了本文的核心观点：高斯滤波在光滑区域略优，小波滤波在棱角区域显著优于高斯滤波；二者的结合能够发挥互补优势，在保证边缘清晰度的同时进一步减小整体方差。

最终结果显示，联合滤波方法在三种形状下均实现了更平稳和更鲁棒的输出，相比单一方法具有更好的普适性和稳定性。

2.3 算法在激光防抖中的实际应用效果分析

通过前文仿真结果对比可以看出，高斯滤波和小波滤波在不同场景下各有优势：高斯滤波在光滑曲面中方差收敛较快，但在锐利棱角处存在明显不足；小波滤波能够保留边缘与细节，但在光滑区域仍存在少量残余噪声。基于此，本文最

终选择了联合去噪方法，即先采用小波滤波处理棱角与边缘区域，再使用弱高斯滤波对整体信号进行二次平滑。

在完成去噪方法选择后，在激光幕墙平台上进一步开展了激光探测器的防抖应用。在实际工程中，激光幕墙系统易受到户外环境振动和微位移的干扰，导致激光指向产生轻微偏移，这是激光测距系统普遍面临的问题，也有研究指出类似的机械抖动会显著降低光学测距的稳定性<sup>[43-44]</sup>。基于此，我们在搭建的激光幕墙平台中应用前述联合去噪策略，对探测器返回的极坐标数据进行实时补偿，以抑制由振动引起的瞬时漂移，从而提高激光发射过程中的探测器稳定性和精确度。

为验证联合去噪算法在实际应用中的可靠性，本文设计了一组实验，通过让墙体以及人员从不同距离入侵激光幕墙，实验布置如图 10。

在激光探头完成原始数据的采集工作后，通过前文所确定的联合去噪算法补偿激光探头高速运动造成的抖动，最终计算得出墙体或人员的具体位置，并与实际测量比较，实验结果见表 2。

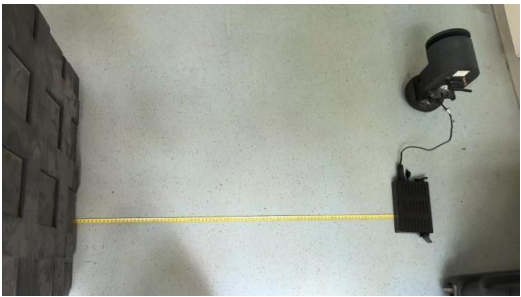


图 10 实验场地布置  
表 2 实验结果

| 对象 | 测得距离 | 矫正距离 | 相对误差 |
|----|------|------|------|
| 墙体 | 1.42 | 1.50 | 5.3% |
| 人员 | 1.57 | 1.50 | 4.6% |
| 人员 | 3.13 | 3.00 | 4.3% |

经过去噪算法补偿后，测距精度显著提高，相对误差控制在 5% 左右，满足工程所需求的测量精度。

实验结果表明，激光束在复杂环境下的稳定性提升明显，探测器的指向精度保持在较高水平，受环境振动和外界扰动影响大幅减小。联合去噪方法通过有效减少因外界震动或环境因素引起的激光偏移，确保了激光系统在复杂环境中的稳定性和可靠性，在实际工程中具有较高应用价值。

图 11 展示了联合去噪方法在户外环境下的实际搭建与运行效果。可以清晰地看到，系统在外界扰动下的激光束偏移幅度显著减小，探测器信号更加稳定可靠。与未处理信号相比，联合去噪

方法在消除因设备抖动引起的瞬时波动方面表现出更高的鲁棒性。



图 11 基于联合滤波技术的激光幕墙  
在户外环境中的实际搭建场景

综上所述，联合去噪方法有效结合了小波滤波和高斯滤波的优势，在保持边缘细节的同时进一步优化了整体方差。该方法不仅在实验仿真中表现突出，在实际搭建的激光幕墙系统中同样验证了其优越性和工程应用价值。

3 结 论

本文面向激光幕墙在复杂环境下的机械抖动去噪与防抖问题，系统比较了高斯滤波与小波滤波在不同几何结构上的适用性：在光滑曲面区域，高斯滤波凭借线性低通的稳定性与高效性，呈现略优的方差压降；而在锐利棱角/高曲率边界，小波滤波通过多尺度稀疏保真显著减少边缘模糊与定位漂移，明显优于高斯滤波。基于这一互补性，本文提出并实现了“先小波、后弱高斯”的两阶段组合策略：先利用小波软阈值在多尺度上抑制高频抖动并保护边缘结构，再在重构结果上施加弱高斯（可选边缘掩膜自适应），以进一步优化全局方差。从偏差 - 方差分解、典型边界模型与多指标评估三方面论证可知，该策略在保持边缘清晰与几何拓扑不失真的前提下，实现了整体方差较单一滤波器进一步下降，从而显著提升激光幕墙探测系统在户外扰动条件下的稳定性、准确性与鲁棒性。

最后，研究表明，通过结合滤波与防抖技术，不仅可以提高激光幕墙防护系统的抗干扰能力，还能提升其在智能工业、自动泊车及安全防护等领域中的实际应用潜力。未来的研究可以进一步探索更高效的滤波算法，并优化其在动态环境中的实时处理能力，以满足日益增长的高精度激光测量需求。

参考文献：

[1] Sun B, Edgar M P, Bowman R, et al. 3D computational imaging with single-pixel detectors[J]. Science, 2013, 340 (6134): 844—847.

- [2] Sun M J, Edgar M P, Gibson G M, et al. Single-pixel three-dimensional imaging with time-based depth resolution[J]. *Nature Communications*, 2016, 7(1): 12010.
- [3] 康岩, 薛瑞凯, 李力飞, 等. 基于 SPAD 阵列的共光路扫描三维成像[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(10): 1011024.  
Kang Yan, Xue Ruikai, Li Lifei, et al. Co-axis scanning three-dimensional imaging based on SPAD array[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(10): 1011024.
- [4] 高冬阳, 陈宗镁, 陈寰, 等. Gm-APD 焦平面阵列的距离重构与三维成像实验[J]. *光子学报*, 2022, 51(12): 1214005.  
Gao Dongyang, Chen Zongmei, Chen Huan, et al. Distance reconstruction and 3D imaging experiment of Gm-APD focal plane array[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2022, 51(12): 1214005.
- [5] 唐勐, 谢欣, 史晓洁, 等. 基于偏振的时间相关单光子计数成像实验研究[J]. *光电技术应用*, 2022, 37(5): 88—96, 102.  
Tang Meng, Xie Xin, Shi Xiaojie, et al. Experimental study of polarization-based TCSPC imaging[J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2022, 37(5): 88—96, 102.
- [6] Araki H, Tazawa S, Noda H, et al. Lunar global shape and polar topography derived from Kaguya-LALT laser altimetry [J]. *Science*, 2009, 323(5916): 897—900.
- [7] Glennie C L, Carter W E, Shrestha R L, et al. Geodetic imaging with airborne LiDAR: the Earth's surface revealed[J]. *Reports on Progress in Physics*, 2013, 76(8): 086801.
- [8] O'Toole M, Lindell D B, Wetzstein G. Confocal non-line-of-sight imaging based on the light-cone transform[J]. *Nature*, 2018, 555(7696): 338—341.
- [9] Cao R, De Goumoëns F, Blochet B, et al. High-resolution non-line-of-sight imaging employing active focusing[J]. *Nature Photonics*, 2022, 16(6): 462—468.
- [10] Vornicu I, López-Martínez J M, Bandi F N, et al. Design of high-efficiency SPADs for LiDAR applications in 110 nm CIS technology[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 21(4): 4776—4785.
- [11] Chen Z, Gao B, Devereux B. State-of-the-art: DTM generation using airborne LIDAR data[J]. *Sensors*, 2017, 17(1): 150.
- [12] 董向华. 基于  $\varphi$ -OTDR 技术的海缆扰动监测系统的研究[J]. *光纤与电缆及其应用技术*, 2016(3): 32—33.  
Dong Xianghua. Research on submarine cable disturbance monitoring system based on  $\varphi$ -OTDR technology[J]. *Optical Fiber & Cable and Its Applications*, 2016(3): 32—33.
- [13] 蔡海文, 叶青, 王照勇, 等. 基于相干瑞利散射的分布式光纤声波传感技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(5): 050001.  
Cai Haiwen, Ye Qing, Wang Zhaoyong, et al. Distributed optical fiber acoustic sensing technology based on coherent Rayleigh scattering[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(5): 050001.
- [14] 王杰, 贾新鸿, 饶云江, 等. 基于双向拉曼放大的相位敏感光时域反射仪[J]. *物理学报*, 2013, 62(4): 044212.  
Wang Jie, Jia Xinhong, Rao Yunjiang, et al. Phase-sensitive OTDR based on bidirectional Raman amplification[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(4): 044212.
- [15] Chou P H, Hsu Y L, Yang S C, et al. Vibration measurement and suppression for laser galvanometers using a micro-electromechanical system-based accelerometer[J]. *Sensors and Materials*, 2018, 30(11): 2401—2418.
- [16] Zhang F M, Li Y T, Pan H, et al. Vibration compensation of the frequency-scanning-interferometry-based absolute ranging system[J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(1): 147.
- [17] Venkataaayan K, Askraba S, Alameh K E, et al. Multi-wavelength laser sensor for intruder detection and discrimination[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2012, 50(2): 176—181.
- [18] Beerer M J, Yoon H, Agrawal B N. Practical adaptive filter controls for precision beam pointing and tracking with jitter attenuation[J]. *Control Engineering Practice*, 2013, 21(1): 122—133.
- [19] Wang Y M, Huang Q, Jiang C X, et al. Video stabilization: a comprehensive survey[J]. *Neurocomputing*, 2023, 516: 205—230.
- [20] Souza M R E, Maia H A, Pedrini H, et al. Survey on digital video stabilization: concepts, methods, and challenges[J]. *ACM Computing Surveys*, 2023, 55(3): 1—37.
- [21] Othman G, Zeebaree D Q. The applications of discrete wavelet transform in image processing: a review[J]. *Journal of Soft Computing and Data Mining*, 2020, 1(2): 31—43.
- [22] Mafi M, Martin H, Cabrerizo M, et al. A comprehensive survey on impulse and Gaussian denoising filters for digital images [J]. *Signal Processing*, 2019, 157: 236—260.
- [23] Park Y, Kim S. Wavelet-domain denoising and surface enhancement for LiDAR point clouds[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2021, 143: 106627.
- [24] Zhou Z, Hua D, Wang Y, et al. Improvement of the signal-to-noise ratio of lidar echo signal based on wavelet denoising technique[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2013, 51(8): 961—966.
- [25] Zheng D, et al. An adaptive continuous threshold wavelet denoising method for LiDAR echo signal[J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2024, 8(2): 023006.
- [26] Wang Z, Ding H, Wang B, et al. New denoising method for lidar signal by the WT-VMD joint algorithm[J]. *Sensors*, 2022, 22(16): 5978.
- [27] Cheng X, Mao J, Li J, et al. An EEMD-SVD-LWT algorithm for denoising a lidar signal[J]. *Measurement*, 2021, 168: 108405.
- [28] Zha J, Wu S, Chen Z. A novel LiDAR echo signal denoising method based on variational mode decomposition and improved wavelet thresholding[J]. *Sensors*, 2025, 25(20): 6330.
- [29] Wen G, Zhang H, Guan Z, et al. Bilateral filter denoising of lidar point cloud data in automatic driving scene[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2023, 131: 104724.
- [30] 罗乐. 重载铁路货车轴承突发性损伤类故障检测[J]. *科技通报*, 2012, 28(7): 95—97.  
Luo Le. Detection of sudden damage faults of heavy-haul railway wagon bearings[J]. *Science & Technology Bulletin*, 2012, 28(7): 95—97.
- [31] 李如雄, 方平. 基于过程参数的点焊质量监测研究[J]. *科技通报*, 2011, 27(5): 740—745.  
Li Ruxiong, Fang Ping. Quality monitoring of spot welding based on process parameters[J]. *Science & Technology Bulletin*, 2011, 27(5): 740—745.

- [32] 王振华, 窦丽华, 陈杰. 一种尺度自适应调整的高斯滤波器设计方法[J]. 光学技术, 2007, 33(3): 395—397.  
Wang Zhenhua, Dou Lihua, Chen Jie. A scale-adaptive Gaussian filter design method[J]. Optical Technique, 2007, 33(3): 395—397.
- [33] 蔡靖, 杨晋生, 丁润涛, 等. 模糊加权均值滤波器[J]. 中国图象图形学报: A 辑, 2000, 5(1): 52—56.  
Cai Jing, Yang Jinsheng, Ding Runtao, et al. Fuzzy weighted mean filter[J]. Journal of Image and Graphics (A Edition), 2000, 5(1): 52—56.
- [34] 胡浩, 王明照, 杨杰. 自适应模糊加权均值滤波器[J]. 系统工程与电子技术, 2002, 24(2): 15—17.  
Hu Hao, Wang Mingzhao, Yang Jie. Adaptive fuzzy weighted mean filter[J]. Systems Engineering and Electronics, 2002, 24(2): 15—17.
- [35] 侯迎坤, 刘明霞, 杨德运, 等. 多级块匹配变换域滤波图像去噪[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2014, 26(2): 225—231.  
Hou Yingkun, Liu Mingxia, Yang Deyun, et al. Multi-stage block-matching transform-domain filter for image denoising[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2014, 26(2): 225—231.
- [36] Heath M T. Scientific computing: an introductory survey[M]. New York: McGraw-Hill, 2002.
- [37] 邓春华, 周勇. 小波检测的二次迭代修剪均值滤波算法[J]. 光学技术, 2021, 47(6): 741—746.  
Deng Chunhua, Zhou Yong. Twice-iterated trimmed mean filtering algorithm based on wavelet detection[J]. Optics Technique, 2021, 47(6): 741—746.
- [38] 吴丽华, 聂丰英. 基于复小波与最大后验估计的红外图像滤波[J]. 光学技术, 2023, 49(1): 113—119.  
Wu Lihua, Nie Fengying. Infrared image filtering based on complex wavelet and MAP estimation[J]. Optics Technique, 2023, 49(1): 113—119.
- [39] Ding S, Chen X, Ai C, et al. A noise-reduction algorithm for raw 3D point cloud data of asphalt pavement surface texture[J]. Scientific Reports, 2024, 14: 16633.
- [40] Deng G, Cahill L W. An adaptive Gaussian filter for noise reduction and edge detection[C]// Proceedings of the IEEE Nuclear Science Symposium & Medical Imaging Conference. 1993: 1615—1619.
- [41] 李健, 丁小奇, 陈光, 等. 基于改进高斯滤波算法的叶片图像去噪方法[J]. 南方农业学报, 2019, 50(6): 1385—1391.  
Li Jian, Ding Xiaoqi, Chen Guang, et al. Blade image denoising method based on improved Gaussian filtering algorithm[J]. Journal of Southern Agriculture, 2019, 50(6): 1385—1391.
- [42] 王文远. 基于图像信噪比选择优化高斯滤波尺度[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(10): 2483—2487.  
Wang Wenyuan. Selection of optimal Gaussian filtering scale based on image SNR[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2009, 31(10): 2483—2487.
- [43] Swinkels B L, Bhattacharya N, Braat J J M. Correcting movement errors in frequency-sweeping interferometry[J]. Optics Letters, 2005, 30(17): 2242—2244.
- [44] Yang H J, et al. High-precision absolute distance and vibration measurements performed with frequency-scanned interferometry[J]. Applied Optics, 2005, 44(19): 3937—3944.