

基于卡尔曼滤波的红外发射率测量数据稳定化处理方法研究

杨栩豪¹, 高恩翊¹, 范志栋¹, 李宇辰¹, 刘一楠², 吕珍余^{3*}

¹南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京

²南京电子设备研究所, 江苏 南京

³北京城建设计发展集团股份有限公司, 北京

收稿日期: 2026年7月27日; 录用日期: 2026年9月10日; 发布日期: 2026年9月17日

摘 要

针对手持式红外发射率测量系统中微弱信号易受噪声干扰、测量结果稳定性不足等问题, 提出一种基于卡尔曼滤波的发射率测量数据稳定化处理方法。分析探测器噪声、电路噪声、温度漂移及环境热背景扰动对测量结果的影响, 结合发射率稳态变化特性, 将真实发射率建模为缓慢变化状态量, 建立一维随机游走状态空间模型, 并采用卡尔曼滤波递推估计实现测量序列优化。在标准镀金发射率样片实验中, 采集150组连续测量数据对算法进行验证, 并与滑动平均滤波方法进行对比。结果表明, 所提方法能够有效抑制随机波动, 提高发射率测量稳定性; 滤波后最大相对偏差由3.491%降低至1.171%, 误差分布更加集中, 局部相对标准偏差(RSD)明显降低。该方法无需依赖材料先验发射率信息, 可直接应用于嵌入式测量系统, 为提升红外发射率现场测量精度与重复性提供有效途径。

关键词

红外发射率测量, 卡尔曼滤波, 弱信号检测, 测量稳定性

Research on a Kalman Filter-Based Data Stabilization Method for Infrared Emissivity Measurement

Xuhao Yang¹, Enyi Gao¹, Zhidong Fan¹, Yuchen Li¹, Yinan Liu², Zhenyu Lyu^{3*}

¹School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing Jiangsu

²Nanjing Electronic Equipment Research Institute, Nanjing Jiangsu

³Beijing Urban Construction Design & Development Group Co., Limited, Beijing

*通讯作者。

文章引用: 杨栩豪, 高恩翊, 范志栋, 李宇辰, 刘一楠, 吕珍余. 基于卡尔曼滤波的红外发射率测量数据稳定化处理方法研究[J]. 应用物理, 2026, 16(9): 815-828. DOI: 10.12677/app.2026.169075

Abstract

To address the problems of weak signals being susceptible to noise interference and insufficient measurement stability in handheld infrared emissivity measurement systems, a data stabilization method based on the Kalman filter is proposed for infrared emissivity measurement. The effects of detector noise, circuit noise, temperature drift, and environmental thermal background fluctuations on the measurement results are analyzed. Considering the steady-state variation characteristics of emissivity, the true emissivity is modeled as a slowly varying state variable, and a one-dimensional random-walk state-space model is established. Subsequently, a recursive estimation approach based on the Kalman filter is employed to optimize the emissivity measurement sequence and effectively suppress random fluctuations. Experiments were conducted using a standard gold-coated emissivity reference sample, and 150 consecutive measurement datasets were collected to validate the proposed method. The performance of the proposed approach was compared with that of the conventional moving average filtering method. Experimental results demonstrate that the proposed method effectively suppresses random fluctuations and improves the stability of emissivity measurements. After Kalman filtering, the maximum relative deviation is reduced from 3.491% to 1.171%, with a more concentrated error distribution and a significant reduction in the local relative standard deviation (RSD). The proposed method does not require prior knowledge of the material emissivity and can be directly implemented in the embedded processing unit of the measurement system, providing an effective approach for improving the accuracy and repeatability of in-situ infrared emissivity measurements.

Keywords

Infrared Emissivity Measurement, Kalman Filter, Weak Signal Detection, Measurement Stability

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

红外发射率[1][2]是表征材料表面红外辐射特性的重要参数,在红外测温[3]、目标探测、热控材料[4]评价、红外隐身性能[5]分析及遥感定标等领域具有重要应用价值。随着红外系统向高精度、小型化和现场化方向发展,对材料发射率[6]快速、准确测量提出了更高要求。相比传统实验室设备,手持式红外发射率测量系统便携性强和现场适应性好的特点,但实际测量过程中易受到环境温度变化、探测器噪声、电路扰动及背景辐射等因素影响,导致信号信噪比低,测量结果存在波动,限制了系统精度和重复性。

目前,红外发射率测量主要采用积分球反射法[7]、直接辐射法[8]和比较测量法[9]等技术。其中,积分球反射法能够有效降低样品表面方向性差异影响,适用于多角度、多波段发射率测量。为提高微弱红外信号检测能力,系统通常结合斩波调制、前置放大和锁相放大技术进行信号提取。然而,解调及标定后的测量数据仍不可避免受到随机噪声和短时扰动影响,表现为测量序列波动增大、重复性下降。因此,在硬件性能受限条件下,通过数据处理方法提升测量稳定性成为提高系统性能的重要途径。

针对微弱信号噪声抑制问题,已有研究采用滑动平均滤波[10]、低通滤波[11]、自适应滤波[12]及小

波分析[13]等方法。其中，滑动平均滤波算法简单，但存在响应滞后和突发扰动适应性不足等问题。卡尔曼滤波作为一种基于状态空间模型[14]的递推估计方法，能够融合系统预测与实时观测信息，在降低随机噪声影响的同时保持状态变化跟踪能力，已广泛应用于精密测量领域。然而，针对红外发射率测量过程中信号缓慢变化、噪声占比较高的特点，基于卡尔曼滤波[15]的数据稳定化处理研究仍较少。

本文针对手持式红外发射率测量系统连续测量稳定性不足的问题，提出一种基于卡尔曼滤波的发射率数据优化方法。通过分析测量过程中的噪声来源，将发射率变化过程建立为一维随机游走状态空间模型，并利用卡尔曼滤波实现测量序列递推估计。基于标准发射率样片开展实验验证，并与滑动平均滤波方法进行对比。实验结果表明，该方法能够有效降低测量数据波动，提高发射率测量稳定性和重复性，为手持式红外发射率测量系统的数据优化提供有效方法。

2. 发射率测量仪系统设计方案

2.1. 系统总体设计方案

发射率测量系统硬件组成原理如图 1 所示。主要由光学测量头模块、电子处理模块和电源管理模块组成。发射率测量系统整体上由光学测量头模块、电子处理显存模块、电源管理模块、一体化结构壳体及相关附属装置等部分构成。系统在结构设计上引入功能模块化思路，将不同功能单元进行分块划分与集成优化，使整机在满足测量精度与稳定性的前提下，具备体积紧凑、携带方便、部署迅速等特点。其原理框图如图 1 所示。

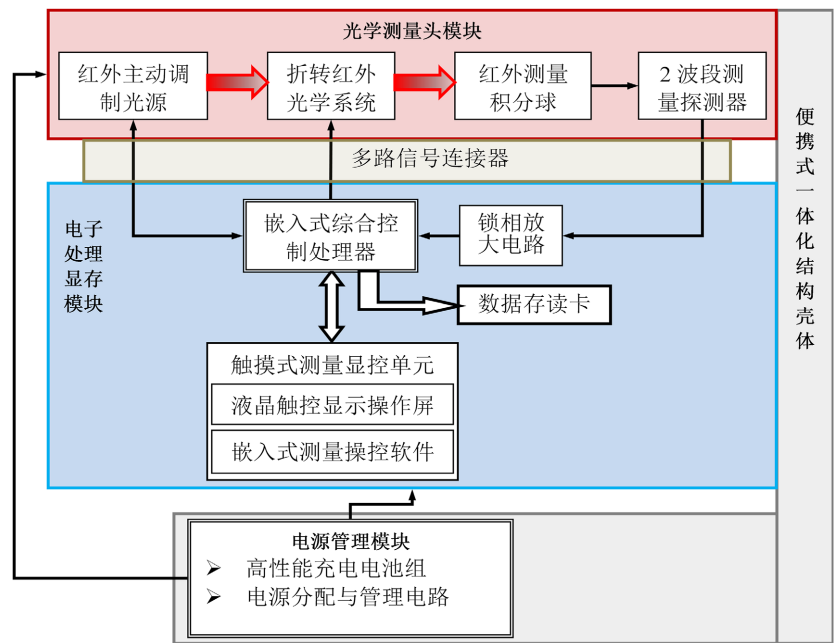


Figure 1. Overall principle block diagram of the system
图 1. 系统总体原理框图

发射率测量系统硬件组成如图 1 所示，主要由光学测量头模块、电子信号处理模块和电源管理模块组成。

光学测量头模块以红外测量积分球为核心，由红外主动调制光源、折转式照明光学系统以及双波段红外探测器组成。该模块负责对被测目标表面的红外反射辐射进行采集，并完成光电转换，为后续信号

处理提供稳定输入。

电子信号处理模块主要包括嵌入式综合控制处理器、锁相放大及前端信号调理电路、触控显示单元以及数据存储模块。该模块实现系统测量流程控制，对探测器输出信号进行前端调理、锁相解调、数字采集及算法处理，并完成测量数据存储与结果显示。

电源管理模块由高性能电池组和电源分配管理电路组成，实现整机供电及各功能模块的电源调控，保证系统稳定运行。

系统工作过程中，红外主动调制光源产生调制红外辐射，经折转式照明光学系统完成光束传输、压缩与成像后，以设定测量角度照射被测件表面。被测表面的反射辐射进入积分球腔体，经镀金内壁多次漫反射后形成均匀辐射场，由两个不同波段红外探测器分别接收并转换为电压信号。

探测器输出信号经锁相放大模块进行相干解调与增益放大，提取与目标反射特性相关的有效信号分量，并送入嵌入式处理器完成数据采集和算法计算，得到被测件的定向半球反射率。基于基尔霍夫定律，通过软件算法对双波段反射率数据进行转换与分析，最终获得对应波段的红外发射率测量结果。

2.2. 系统硬件总体方案

发射率测量系统硬件组成原理如图 2 所示。主要由光学测量头模块、电子处理模块和电源管理模块组成。

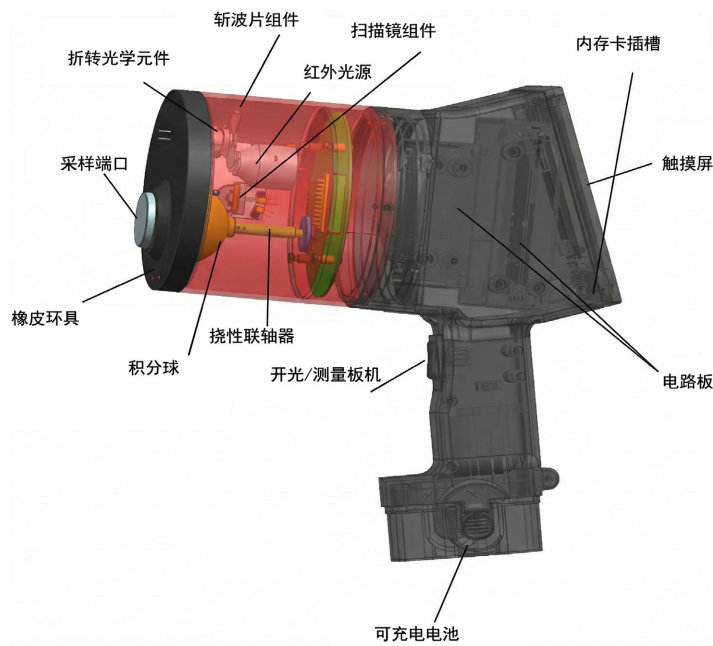


Figure 2. Schematic diagram of the hardware for the emissivity measurement system
图 2. 发射率测量系统硬件组成原理图

光学测量头模主要用于前端光信号的调制与获取，以镀金积分球为核心，集成了红外光源、折转反射镜、扫摆电机机构、光学滤光片、两路红外探测器以及振动器等光机组件。

电子处理模块主要用于对探测器输出的微弱电信号进行放大、采样与数字化处理，并完成测量过程控制、结果显示及数据存储等功能。该模块包括红外光源驱动与控制电路、探测器前置放大电路、电机驱动电路、斩波器频率检测与反馈电路、振动器控制电路、锁相放大电路、嵌入式综合控制处理器以及触摸显示屏等。

电源管理系统通过对外接电源或内置电池的电能进行统一调理和分配,向光学测量头、电子信号处理模块、显示与控制单元等各功能模块提供符合要求的电压与电流,并通过稳压、滤波等措施减小电源纹波和干扰,从而确保系统长期安全、稳定运行。

进行发射率测试时,首先将测量采样端口贴靠在被测目标表面,通过柔性联轴器结构保证采样端口与被测件之间保持弹性、稳定的紧密接触。按住扳机,红外光源发出的光经过折转反射镜会聚到光栏处,光栏用于限制光斑,使经过椭球反射镜成像光斑接近并小于采样端口,从而保证照明区域完全落在有效测量区域内。光束通过斩波片调制后,被椭球反射镜反射,扫摆电机可带动摆镜实现三个角度的扫描。发射率测量系统通过触发一次扳机,摆镜可摆动 3 个角度,一次性实现 20° 、 60° 方向半球和半球发射率测量,从而在单次操作中获取多角度发射率测量数据。

当进行 20° 方向半球测量时,光栏处的光斑通过椭球反射镜成像在采样端口附近,样品表面对入射红外辐射产生反射,反射辐射经积分球内壁多次散射后,由布置在球壁上的两个波段红外探测器分别接收,通过前置放大电路放大,锁相放大电路提取信号并进行模数转换,嵌入式控制处理器对采集到的数字信号进行数据处理,即可得到被测件在 2 个波段的 20° 方向半球反射率值 ε_{20} ($3\sim 5\ \mu\text{m}$)、 ε_{20} ($8\sim 12\ \mu\text{m}$)。

当进行 60° 方向半球测量时,控制扫摆电机将摆镜转至预设位置,光斑照射到内反射镜后反射到样品上,此时反射的光线与采样端口法线成 60° ,经过样品反射后被积分球壁的两个不同波段的探测器接收,最终得到被测件在 2 个波段的 60° 下方向半球反射率值 ε_{60} ($3\sim 5\ \mu\text{m}$)、 ε_{60} ($8\sim 12\ \mu\text{m}$)。

当进行半球发射率测量时,扫摆电机继续带动摆镜转动至预设位置,此时入射光束不再直接照射样品,而是被引导至积分球内壁,从而形成近似半球照明条件,为节省测量时间,转动角度选择为 40° 即可实现半球发射率测量,即可得到半球发射率值 ε_{HH} ($3\sim 5\ \mu\text{m}$)、 ε_{HH} ($8\sim 12\ \mu\text{m}$)。

测量过程完成后,嵌入式处理器对各角度测得的数据进行综合计算与转换,最终将对应的发射率结果实时显示在触摸屏界面上。

如图 3 和图 4 所示,为发射率测量系统结构示意图和实物图。为直观展示内部光机电模块的空间布局与装配关系,图中对外壳及部分结构件采用透明显示方式,以便观察测量头内部关键部件的相对位置、安装方式及空间余量。该图用于在结构设计阶段对整机总体布局、装配干涉、线束走向及结构集成可行性进行校核,并为后续样机加工与装配调试提供依据。

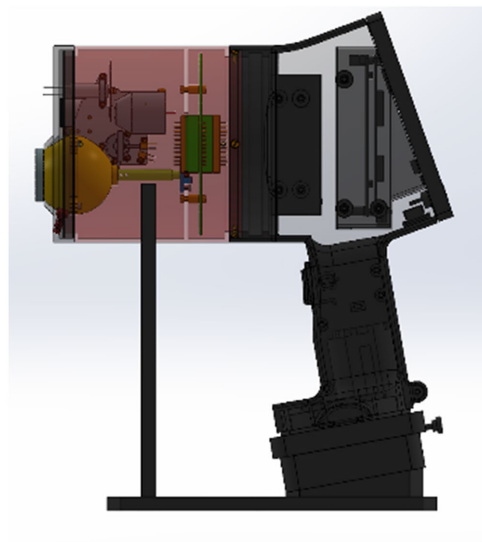


Figure 3. Schematic diagram
图 3. 结构示意图



Figure 4. Emissivity measurement instrument photograph

图 4. 发射率测量仪实物图

从整体布局来看,测量头区域集成了积分球、采样端口、双波段探测器、滤光组件及照明调制部件,构成紧凑的光学测量链路;握持区域集成电源管理、锁相放大、嵌入式控制及人机交互模块,以优化整机重心,提高便携性与操作稳定性。

机械结构设计不仅需满足小型化和轻量化要求,还需兼顾光学传输效率与测量精度。系统关键尺寸依据光学仿真结果和测量不确定度分析进行优化设计。在光路结构中,离轴椭球反射镜与红外光源、积分球端口的位置关系根据反射镜焦距及数值孔径确定,以提高红外能量耦合效率。同时,依据积分球开口率约束原则,对积分球尺寸与采样端口比例进行优化,以保证球内辐射场均匀性并降低测量误差。

此外,针对加工装配误差对测量结果的影响,对关键机械接口和运动机构进行精度控制。其中,扫摆机构驱动反射镜实现多角度切换,其定位精度直接影响光斑在样品表面的投射位置及有效采样区域,进而影响方向发射率测量准确性。

3. 基于卡尔曼滤波的发射率测量结果后处理方法研究

尽管通过锁相检测、温度补偿等硬件与算法手段能够有效提高红外微弱信号的信噪比,并抑制部分系统漂移误差,但在实际测量过程中,探测器噪声、电路随机扰动、环境热背景变化以及器件状态波动等因素仍会引起发射率测量序列的随机波动,导致短时间内测量结果离散性增加,影响系统的重复性和稳定性。由于发射率作为材料固有辐射特性参数,在稳定测量条件下通常表现为缓慢变化状态,其真实变化趋势不会随时间发生快速突变。因此,仅依靠硬件滤波和平均处理难以兼顾噪声抑制能力与动态响应性能。

针对上述问题,本文进一步引入基于状态估计的卡尔曼滤波方法,将测量过程中的真实发射率视为缓慢变化状态量,通过建立状态空间模型融合系统预测信息与实时观测信息,实现对随机噪声影响下发射率数据的递推优化,从而降低测量序列波动,提高发射率测量的稳定性与重复性。

3.1. 卡尔曼滤波算法原理与建模

在本系统的数据采集与信号处理的过程中,热释电探测器输出的微弱交流信号需经过斩波调制、前置放大与锁相放大等环节完成解调与采样。受探测器本底噪声、前端放大器噪声与温漂、斩波器转速微

扰、积分球内杂散辐射及环境热背景波动等因素影响,锁相放大后的电压序列仍不可避免地叠加随机扰动与小幅度波动。为在不削弱真实变化趋势的前提下提高测量结果的稳定性与重复性,本文引入卡尔曼滤波对嵌入式端连续解算得到的发射率序列进行递推估计,以抑制随机噪声并提升输出的平滑性与可用性。

卡尔曼滤波器包括两个主要过程:预估与校正。预估过程主要是利用时间更新方程建立对当前状态的先验估计,及时向前推算当前状态变量和误差协方差估计的值,以便为下一个时间状态构造先验估计值;校正过程负责反馈,利用测量更新方程在预估过程先验估计值及当前测量变量的基础上建立起对当前状态的改进的后验估计。这样的一个过程,我们称之为预估-校正过程,对应的这种估计算法称为预估-校正算法。

从信息融合角度理解,卡尔曼滤波的输出可以看作先验信息与观测信息的综合结果。先验信息来源于系统模型给出的预测,反映对状态随时间变化规律的先验认知,观测信息来源于测量值,具有实时性但不可避免叠加测量噪声。滤波器通过卡尔曼增益对两类信息的相对可信度进行权衡,当观测噪声较大时,增益减小,估计结果更依赖模型预测,输出表现为更强的平滑性;当模型不确定性较大或状态可能发生变化时,增益增大,估计结果更依赖观测数据,从而增强对真实变化的跟随能力。因此,卡尔曼滤波在抑制随机噪声与保持必要动态响应之间提供一种可调的折中机制,这对于微弱信号条件下既要求输出稳定又需要保持对缓慢变化敏感的测量具有实际意义。

在离散时间条件下,线性系统的状态变化与测量过程可表示为如下状态空间模型:

$$\mathbf{x}_k = F\mathbf{x}_{k-1} + B\mathbf{u}_{k-1} + \mathbf{w}_{k-1} \quad (1)$$

$$\mathbf{z}_k = H\mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k \quad (2)$$

式中, $\mathbf{x}_k$ 为时刻 k 的系统状态, $\mathbf{z}_k$ 为观测量, F 为状态转移矩阵, H 为观测矩阵, $\mathbf{u}_{k-1}$ 为控制输入(本系统无控制输入时可忽略), $\mathbf{w}_{k-1}$ 与 $\mathbf{v}_k$ 分别表示过程噪声与测量噪声。

通常假设两类噪声为零均值、相互独立的白噪声,其协方差分别记为

$$Q = E[\mathbf{w}_k \mathbf{w}_k^T] \quad (3)$$

$$R = E[\mathbf{v}_k \mathbf{v}_k^T] \quad (4)$$

其中, Q 用于刻画模型不确定性以及真实状态可能产生的随机变化强度, R 用于表征观测误差水平。卡尔曼滤波在每个采样时刻按照预测与校正的递推机制运行。预测阶段基于上一时刻的后验估计得到当前时刻的先验估计,并同步更新误差协方差。误差协方差的传播反映了不确定度会随时间逐步累积这一特性,其累积幅度由 Q 的大小所控制。随后在校正阶段,利用当前观测对先验估计进行修正,修正幅度由卡尔曼增益决定。卡尔曼增益由先验误差协方差与观测噪声协方差共同计算得到,本质上体现了对模型预测信息与观测信息可信度的权衡:当观测噪声较大时,增益减小,估计更倾向于依赖预测;当模型不确定性较大时,增益增大,估计将更充分吸收观测信息。

具体而言,预测阶段的先验估计与误差协方差更新为:

$$\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} = F\hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1} + B\mathbf{u}_{k-1} \quad (5)$$

$$P_{k|k-1} = FP_{k-1|k-1}F^T + Q \quad (6)$$

校正阶段先计算卡尔曼增益:

$$K_k = P_{k|k-1}H^T(HP_{k|k-1}H^T + R)^{-1} \quad (7)$$

再利用观测残差对估计进行修正:

$$K_k = P_{k|k-1} H^T (H P_{k|k-1} H^T + R)^{-1} \quad (8)$$

并更新后验误差协方差:

$$P_{k|k} = (I - K_k H) P_{k|k-1} \quad (9)$$

式中, 括号内的项 $z_k - H\hat{x}_{k|k-1}$ 表示“观测与预测之间的差值”, 也可视为观测残差或创新量。

若观测与预测一致, 则残差接近零, 滤波输出基本保持预测值不变, 若观测出现偏离, 则输出按增益比例向观测方向修正。误差协方差更新式表明, 随着观测信息被利用, 状态不确定度会降低, 且降低幅度与增益大小相关, 这一过程反映了滤波器逐步收敛的特性。在稳态条件下, 误差协方差与增益通常会在若干步后趋于稳定, 使得滤波器表现出稳定的平滑特性。

结合本系统稳态测量特性, 材料真实发射率在相邻采样周期内变化极为缓慢, 而测得发射率序列的波动主要来自随机噪声与短时扰动。因此, 本文将真实发射率作为状态量, 将嵌入式端解算得到的发射率作为观测量, 并采用一维随机游走模型描述其演化规律:

$$\hat{x}_{k|k-1} = Fx_{k-1|k-1} + Bu_{k-1} \quad (10)$$

$$P_{k|k-1} = FP_{k-1|k-1}F^T + Q \quad (11)$$

式中, x_k 表示时刻 k 的真实发射状态, z_k 为测得发射率(观测量), Q 表征状态允许缓慢变化的强度(过程噪声协方差), R 表征测量噪声水平(测量噪声协方差)。

该建模方式不需要引入已知真值约束, 能够在未知材料测量场景下仅依赖统计假设实现噪声抑制, 符合工程应用需求。由于发射率测量值为一维信号, 所以该模型为一维情形, 有 $F=1$ 、 $H=1$, 卡尔曼滤波的递推公式可化简为:

先验预测:

$$\hat{x}_{k|k-1} = \hat{x}_{k-1|k-1} \quad (12)$$

$$P_{k|k-1} = P_{k-1|k-1} + Q \quad (13)$$

卡尔曼增益:

$$K_k = \frac{P_{k|k-1}}{P_{k|k-1} + R} \quad (14)$$

后验更新:

$$\hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + K_k (z_k - \hat{x}_{k|k-1}) \quad (15)$$

$$P_{k|k} = (1 - K_k) P_{k|k-1} \quad (16)$$

为便于理解, 上式亦可写为:

$$\hat{x}_{k|k} = (1 - K_k) \hat{x}_{k|k-1} + K_k z_k \quad (17)$$

即滤波输出是预测值与观测值的加权融合。由此可知, 增益 K_k 越小, 输出越平滑且对单点波动不敏感; 增益 K_k 越大, 输出对观测的跟随性越强但平滑作用减弱, 从而体现出卡尔曼滤波在抑制随机噪声与保持缓变趋势之间的可调折中。对于稳态发射率测量而言, 合理设置 Q 与 R 的相对量级, 可使滤波器将观测序列中的高频抖动有效压制, 同时维持对可能存在的缓慢漂移或真实变化的必要跟踪能力。在实际应用中, 滤波器需给定初始估计与初始误差协方差。通常可取 $\hat{x}_{00} = z_0$ 或取稳态起始若干点观测均值, 以降低初期偏差; 同时可取 P_{00} 为相对较大值, 以增强初始阶段对观测的吸收能力, 使增益快速收敛。对于

噪声协方差 Q 与 R ，其物理含义分别对应真实状态变化强度与观测噪声水平，二者的相对量级决定滤波输出的平滑程度与响应速度。

本文在后续实验中将依据稳态观测序列的波动特征对 R 进行统计估计，并结合期望的跟随性选择 Q 的量级，从而使滤波结果既能显著降低短时抖动，又不致过度削弱真实的缓慢变化趋势，为发射率测量输出的稳定性评价与重复性分析提供更可靠的数据基础。

为了验证卡尔曼滤波在发射率数据后处理的优越性，本文引入滑动平均作为对比参照。滑动滤波是由一阶低通滤波推广而来的，其原理是每采样 1 次，将本次采样值和以前的 $N-1$ 次采样值一起加权得到当前的有效采样值。滑动滤波把从个采样数据看成一个队列，队列的长度固定为 N ，每进行一次新的采样，把采样结果放入队尾，而丢掉原来队首的一个数据，这样在队列中始终有个最新的数据，只要把队列中的 N 个数据进行处理，就可得到一个新的滤波值。这种滚动丢弃的方法大大增加了数据处理的速度。滑动滤波的结果数据的产生速度与采样速度相同，实时性大大优于其它常用算法。

滑动滤波公式表示为：

$$S(k) = \alpha S(k-1) + \beta \omega(k) \quad (18)$$

其中， $\omega(k)$ 为本次采样值； $S(k-1)$ 为上次的滤波输出值； $S(k)$ 为本次滤波的输出值； α 、 β 为滤波系数， $0 < \alpha < 1$ ， $0 < \beta < 1$ 。

把 $S(k)$ 按递推公式展开，可得：

$$S(k) = \beta \{ \omega(k) + \alpha \omega(k-1) + \dots + \alpha^{k-1} \omega(1) + \alpha^k \omega(0) \} \quad (19)$$

可见， α 越大，过去的输入对于 $S(k)$ 的影响衰减得越慢； α 越小，过去的输入对于 $S(k)$ 的影响衰减得越快。

通常输入信号都是有界的，因此假设 $|\omega(i)| \leq M$ ， $0 \leq i \leq k$ ，得：

$$S(k) \leq \beta M \{ 1 + \alpha + \dots + \alpha^k \} = \frac{\beta M}{1 - \alpha} \quad (20)$$

可以得到：(1) 滤波过程是收敛的；(2) 为了保证闭环放大系数小于 1，应取 $\beta/(1-\alpha) \leq 1$ 使用得 $S(k) \leq M$ 。特殊地，当 $\alpha + \beta = 1$ 时， $S(k)$ 有可能等于 M ，这时的放大系数为 1。滑动滤波对周期性干扰有良好的抑制作用，平滑度高，灵敏度低；但对偶然出现的脉冲性干扰的抑制作用差，不易消除由于脉冲干扰引起的采样值的偏差。因此它不适用于脉冲干扰比较严重的场合，而适用于高频振荡系统。通过观察不同 N_s 值下滑动滤波的输出响应来选取 N_s 值，以便既少占用时间，又能达到最好的滤波效果。

3.2. 卡尔曼滤波实验结果分析

为评估卡尔曼滤波在发射率测量结果后处理中的实际效果，本文选取系统在稳态工作条件下采集的标准发射率标定板数据进行验证。实验过程中，探测器信号经斩波调制、锁相放大与采样后，首先对探测器输出电压进行温度补偿与漂移修正，随后依据系统标定关系完成电压 - 发射率换算，得到温度补偿后的发射率测量序列 z_k 。本节采用嵌入式处理器采样系统稳定后经过温补计算的镀金标准样片发射率测量值序列，共 $N=150$ 个采样点，参考发射率的镀金标准样片的数值为 $\varepsilon = 0.044$ 。

在稳态测量条件下，真实发射率在相邻采样周期内基本保持不变，而测量结果的不确定性主要来源于探测器噪声、电路噪声、量化误差以及环境热背景扰动等随机因素。基于上述物理特性，本文采用一维随机游走模型描述发射率状态演化过程，测量噪声协方差 R 由温度补偿后计算出的发射率序列的统计方差估计得到，采用相邻差分抑制低频趋势，并据差分序列的方差估计观测噪声水平，从而确定 R 的量

级, 其数值为 $R = 3.284 \times 10^{-7}$, 过程噪声协方差 $Q = 1.0 \times 10^{-8}$, 该参数配置使滤波器在递推过程中对单次观测高频波动赋予较小权重, 从而增强输出序列的平滑性与稳定性。

温度补偿后计算出的原始发射率序列与卡尔曼滤波的结果对比如图 5 所示。可以看出, 经过温度补偿后的测量结果整体围绕参考发射率分布, 未表现出明显的系统性漂移, 说明温度补偿过程有效削弱了温漂引起的系统误差。然而, 原始发射率序列中仍存在较为明显的随机抖动, 且在个别采样点出现瞬时偏离。经卡尔曼滤波处理后, 输出序列明显更加平滑, 随机波动幅度显著降低, 同时滤波结果始终围绕参考值分布, 未引入新的系统性偏移。这表明卡尔曼滤波在温度补偿基础上进一步抑制残余随机噪声, 使发射率测量结果的稳定性和可用性得到有效提升。

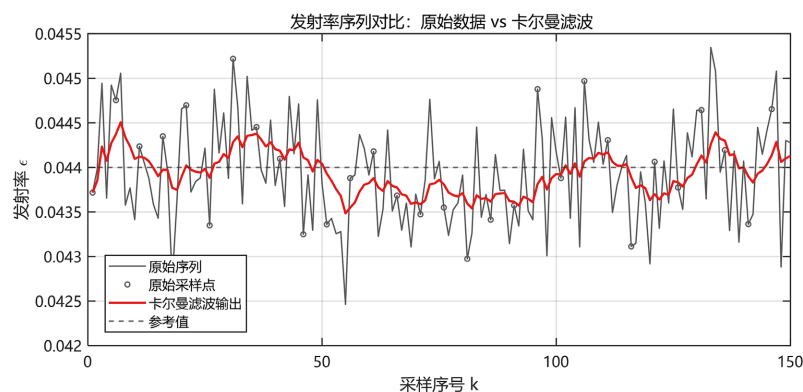


Figure 5. Comparison plot of raw data and Kalman filtered data

图 5. 原始数据与卡尔曼滤波后的对比图

从统计意义上对滤波效果进行分析, 图 6 给出了滤波前后发射率相对误差百分比的分布情况。可以看出, 滤波前误差分布较为分散, 反映出随机噪声对测量结果的显著影响; 而滤波后误差分布明显收敛, 误差集中程度显著提高, 该结果说明, 在稳态条件下, 卡尔曼滤波能够显著降低测量序列的随机离散性, 在统计意义上实现了误差分布的方差收缩与集中化从而有效提升发射率测量结果的重复性。

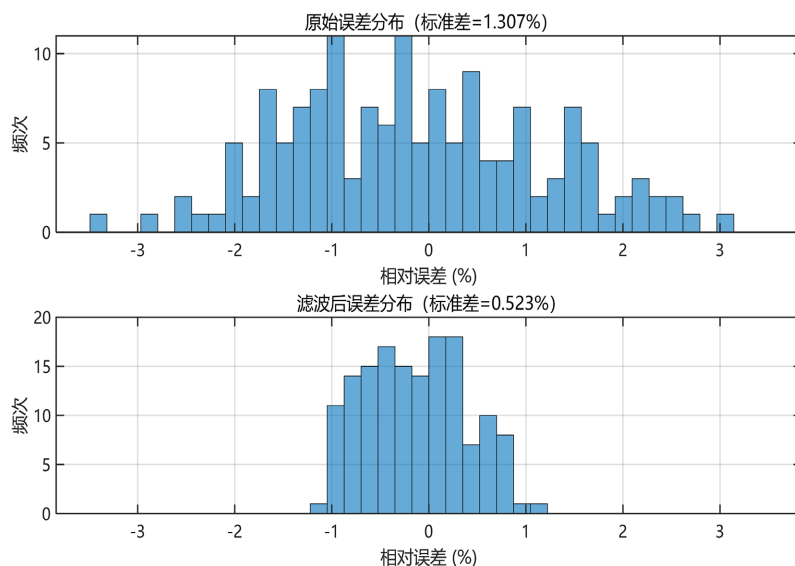


Figure 6. Histogram comparison of errors before and after Kalman filtering

图 6. 误差直方对比图

进一步从短时间尺度考察滤波对稳定性的改善效果, 本文采用移动窗口方法对发射率序列进行局部相对标准偏差(RSD)分析, 结果如图 7 所示。可以观察到, 滤波后局部 RSD 曲线整体水平明显低于原始序列, 且波动幅度更加平缓, 表明卡尔曼滤波不仅改善了全局重复性, 同时也显著抑制了短时间尺度内的随机波动, 使连续采样条件下的发射率输出更加稳定。

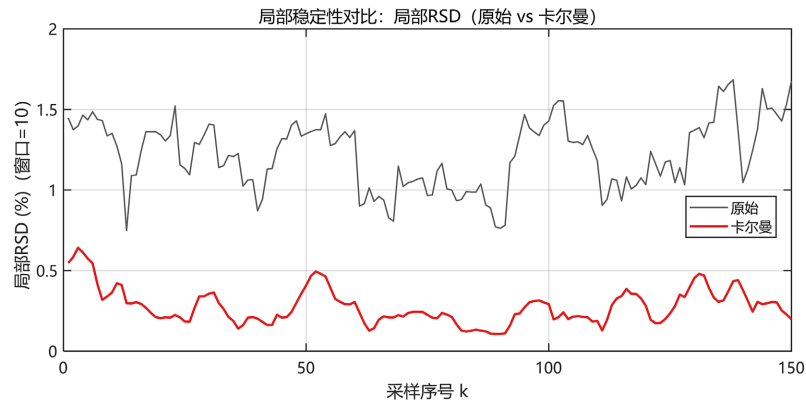


Figure 7. Comparison of local stability
图 7. 局部稳定性对比图

此外, 为评价滤波算法对偶发扰动的抑制能力, 图 8 给出误差幅值随采样序号变化的对比结果。原始发射率序列在个别采样点出现较大的误差峰值, 而经卡尔曼滤波处理后, 这些峰值被明显压制, 误差幅值整体显著降低。对应的最大相对偏差(MaxDev)由 3.491%降至 1.171%, 表明卡尔曼滤波能够有效减弱单次异常观测对最终估计结果的最不利影响, 从而提高发射率测量结果在存在偶发干扰时的鲁棒性。

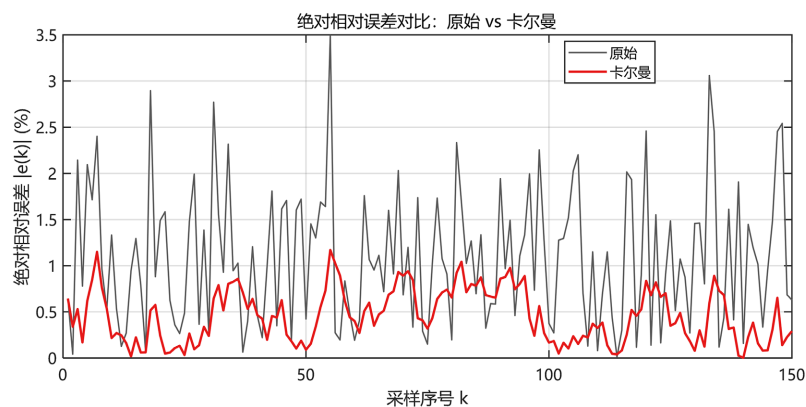


Figure 8. Comparison of relative error amplitude
图 8. 相对误差幅值对比图

从滤波机理角度分析, 卡尔曼增益随采样序号变化情况如图 9 所示。可以看出, 卡尔曼增益在滤波初期迅速收敛并进入稳定状态, 且稳态增益保持在较小水平。

在完成卡尔曼滤波基本效果验证的基础上, 为进一步说明所选算法相对于经典滤波方法的优势, 图 10 给出了原始序列、滑动平均(MA, 窗口 $M=15$)、中值滤波(Median, 窗口 $M=15$)以及卡尔曼滤波(KF)输出的时域对比。由图可见, 滑动平均(蓝色虚线)虽然能够在一定程度上抑制高频随机噪声, 使曲线更为平滑, 但其本质为固定窗口的局部平均, 不仅引入了明显的滞后效应, 且在信号快速变化处(如采样点

80~100 区间)响应迟缓。中值滤波(绿色实线)虽然对去除脉冲型尖峰噪声效果显著,但由于其非线性特性,输出曲线呈现出明显的“阶梯状”或“块状”特征,丢失了部分信号的连续细节,导致波形失真。相比之下,卡尔曼滤波(红色实线)在保证输出平滑度的同时,克服了滑动平均的相位滞后和中值滤波的波形畸变问题。它对序列的慢变趋势具有更好的跟踪能力,能够在噪声抑制与动态响应之间取得更优折中,使输出更紧密地贴合参考值(灰色虚线),保持了较好的时域一致性和信号保真度。

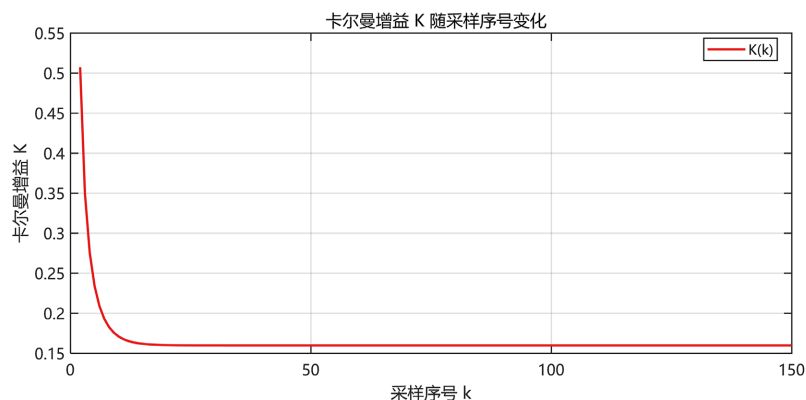


Figure 9. Diagram of the Kalman gain variation with sampling index

图 9. 卡尔曼增益随采样序号变化情况示意图

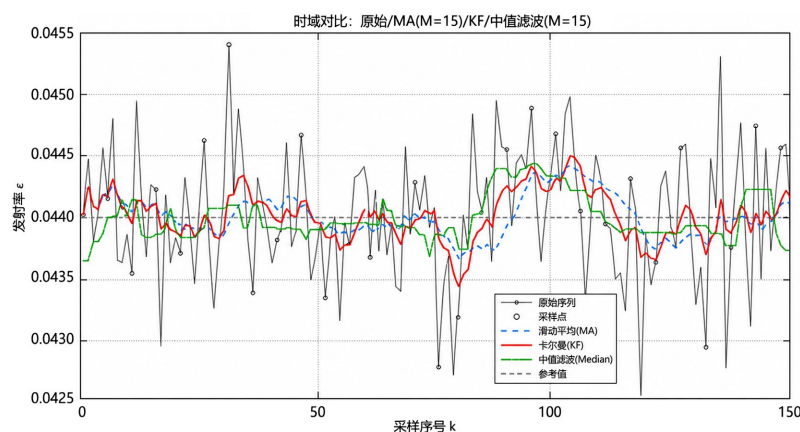


Figure 10. Diagram of the time-domain comparison among moving average, kalman filter, and median filtering

图 10. 滑动平均、卡尔曼滤波、中值滤波时域对比示意图

考虑到实际测量中常存在由电磁干扰、机构动作或瞬态供电波动引入的偶发毛刺,图 11 包含毛刺位置的局部区间进行放大对比,用以评估滑动平均(MA)、卡尔曼滤波(KF)与中值滤波三种策略对突发异常的响应特性。由图可见,即使毛刺仅发生在单点,滑动平均(MA, 蓝色虚线)的输出仍会在一段时间内持续偏离参考值,导致误差在多个点上累积,表现出明显的“拖尾”效应。中值滤波(绿色点划线)虽然能有效剔除毛刺的峰值,但在毛刺消除后,其输出呈现出明显的阶梯状跳变,且在后续区间(如采样点 140 之后)出现了较大的稳态偏差,未能很好地跟踪信号的连续变化趋势。相较而言,卡尔曼滤波(KF, 红色实线)对单点突发异常具有更强的抑制能力,异常点对输出的影响更为局部化,且在毛刺过后能够更快、更平滑地回归到参考值附近。这说明卡尔曼滤波在面对偶发扰动时具有更好的鲁棒性,既避免了滑动平均引起的异常扩散和恢复滞后,也克服了中值滤波可能带来的信号失真问题,从而更适合用于现场测量场景下的稳态信号提取。

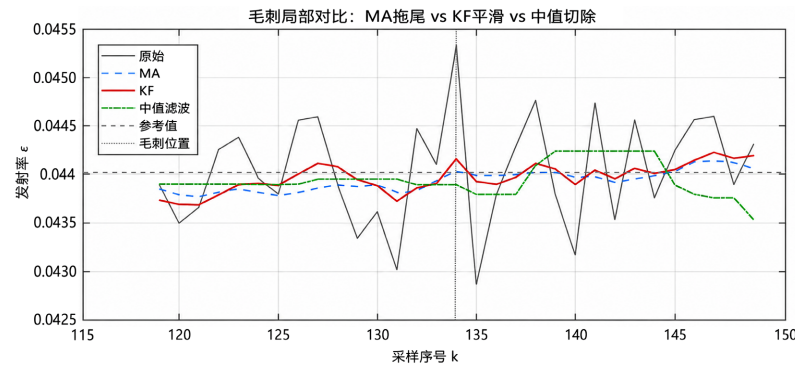


Figure 11. Diagram of the local comparison of glitch suppression among moving average, Kalman filter, and median filtering
图 11. 滑动平均、卡尔曼滤波、中值滤波毛刺局部对比示意图

为从误差角度进一步对比不同滤波方法的稳定性提升效果，图 12 给出原始序列，滑动平均，卡尔曼滤波三种情况下的绝对相对误差 $|e(k)|$ 随采样序号的变化曲线。由图可见，原始序列的误差幅值波动较大，并受到低频噪声与毛刺的显著影响。滑动平均虽可降低部分高频误差，但在毛刺附近出现持续偏大误差段，反映出其窗口拖尾导致的误差扩散效应。相比之下，卡尔曼滤波的 $|e(k)|$ 曲线整体更低、更集中，尤其在突发毛刺附近仍能保持较快回落，说明卡尔曼滤波在降低随机波动的同时，能够更有效抑制异常点对输出误差的放大与延续。综合图 10~12 的对比结果可知，卡尔曼滤波相对于滑动平均具有更优的综合表现，因此本文后续的稳态信号后处理与发射率解算环节采用卡尔曼滤波作为主要滤波方案。

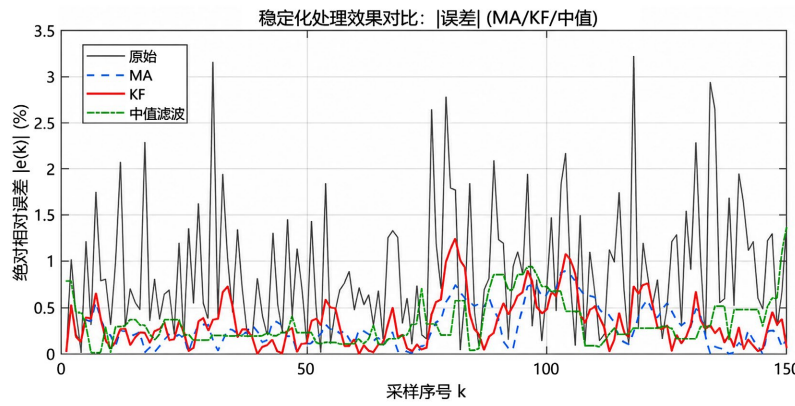


Figure 12. Diagram of the comparison of stabilization effects on infrared measurement data among Kalman filter, moving average filter, and median filter
图 12. 卡尔曼滤波与滑动平均滤波、中值滤波对红外测量数据稳定化处理效果对比图

为从误差角度进一步对比不同滤波方法的稳定性提升效果，图 12 给出了原始序列、滑动平均(MA)、卡尔曼滤波(KF)及中值滤波四种情况下的绝对相对误差 $|e(k)|$ 随采样序号的变化曲线。由图可见，原始序列(黑色实线)的误差幅值波动剧烈，受到高频噪声与突发毛刺的显著影响，峰值甚至超过 3%。滑动平均(蓝色虚线)虽能降低部分背景噪声误差，但在毛刺出现后(如采样点 20、100 附近)，误差曲线呈现出持续的“拖尾”现象，反映出其固定窗口机制导致的误差扩散与滞后效应。中值滤波(绿色点划线)虽然在去除极值尖峰方面表现尚可，但在某些区间(如采样点 100~140)其误差基线明显高于其他方法，且存在不稳定的跳变，说明其在保留信号细节方面存在局限，容易引入额外的稳态偏差。

相比之下，卡尔曼滤波(红色实线)的 $|e(k)|$ 曲线整体包络最低且最为集中。它不仅在平稳段能将误差控制在极低水平(大多在 0.5%以下)，而且在面对突发毛刺时，误差峰值显著低于原始序列，且能迅速回

落, 未出现明显的拖尾或持续高误差现象。这说明卡尔曼滤波在降低随机波动的同时, 能够更有效地抑制异常点对输出误差的放大与延续, 兼顾了动态响应速度与稳态精度。综合图 10~12 的对比结果可知, 卡尔曼滤波在时域波形跟踪、抗毛刺干扰及误差控制方面均表现出最优的综合性能, 因此本文的稳态信号后处理与发射率解算环节采用卡尔曼滤波作为主要滤波方案。

综上所述, 卡尔曼滤波能够在不引入明显系统性偏差的前提下显著提升发射率测量结果的稳定性与鲁棒性, 验证卡尔曼滤波作为发射率测量结果后处理方法在实际测量系统中的有效性, 为后续的实验分析与系统性能评估提供可靠依据, 为红外发射率测量系统的数据优化处理提供了一种有效方案。

目前没有其他标定过的样片, 后续需要进行其他样片的标定并完成其他发射率下的卡尔曼滤波验证实验。分析噪声的统计分布与自相关特性, 以及深入探讨参数 Q 和 R 的敏感性(特别是针对均方根误差与响应时间的权衡分析), 这部分将是未来重点研究方向, 以便在后续工作中进一步完善模型验证。

致 谢

感谢南京理工大学电光学院王一红老师的指导。

基金项目

本研究得到红外探测国家重点实验室开放课题资助, 课题号 IRDT-23。

参考文献

- [1] 戴景民, 宋扬, 王宗伟. 光谱发射率测量技术[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(4): 710-715.
- [2] 戴景民, 王新北. 材料发射率测量技术及其应用[J]. 计量学报, 2007(3): 232-236.
- [3] 潘冬, 蒋朝辉, 桂卫华. 基于方向发射率校正的红外测温补偿方法[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(6): 213-220.
- [4] Zhao, S., Li, X., Huai, X., Zhou, X. and Cheng, K. (2019) The Normal Spectral Emission Characteristics of Ni-Based Alloys during Oxidation at High Temperatures. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **128**, 378-391. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.09.008>
- [5] 熊德华, 陈炜, 李宏. 太阳能光热转化选择性吸收涂层研究进展[J]. 科技导报, 2014, 32(9): 50-58.
- [6] 刘波, 郑伟, 李海洋. 材料表面发射率测量技术研究进展[J]. 红外技术, 2018, 40(8): 725-732.
- [7] 张宇峰, 戴景民, 张昱, 等. 基于积分球反射计的红外光谱发射率测量系统校正方法[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(8): 2267-2271.
- [8] Furukawa, T. and Iuchi, T. (2000) Experimental Apparatus for Radiometric Emissivity Measurements of Metals. *Review of Scientific Instruments*, **71**, 2843-2847. <https://doi.org/10.1063/1.1150701>
- [9] Echániz, T., Pérez-Sáez, R.B. and Tello, M.J. (2017) IR Radiometer Sensitivity and Accuracy Improvement by Eliminating Spurious Radiation for Emissivity Measurements on Highly Specular Samples in the 2-25 Mm Spectral Range. *Measurement*, **110**, 22-26. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.06.010>
- [10] 胡芳凝, 王忠, 刘超群. 快速滑动平均滤波在 PPG 信号去噪中的应用[J]. 物联网技术, 2019, 9(6): 41-43.
- [11] 雷学堂, 方志雄. 基于 MATLAB 的 FIR 数字低通滤波器分析和设计[J]. 喀什师范学院报, 2007, 28(3): 37-39.
- [12] Markham, J.R., Kinsella, K., Carangelo, R.M., Brouillette, C.R., Carangelo, M.D., Best, P.E., *et al.* (1993) Bench Top Fourier Transform Infrared Based Instrument for Simultaneously Measuring Surface Spectral Emittance and Temperature. *Review of Scientific Instruments*, **64**, 2515-2522. <https://doi.org/10.1063/1.1143913>
- [13] 牛艳荣. 小波分析与应用综述[J]. 科技信息, 2009(3): 158-159.
- [14] Lucchesi, C. and Delmas, A. (2023) Experimental Setup for Direct Measurements of Spectral Directional Emissivity from 0° to 80° Angles at Temperatures as Low as 40°C. *International Journal of Thermal Sciences*, **185**, Article 108045. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2022.108045>
- [15] 彭丁聪. 卡尔曼滤波的基本原理及应用[J]. 软件导刊, 2009, 8(11): 32-34.