

文章编号: 1673-3193(2024)05-0716-09

辐射剂量仪高精度滤波算法研究

张彦飞¹, 姚舜才¹, 王建飞²

(1. 中北大学 电气与控制工程学院, 山西 太原 030051; 2. 中国辐射防护研究院, 山西 太原 030006)

摘要: 嵌入式多通道辐射剂量仪的测量结果易受系统本身和环境噪声的干扰, 进而影响其测量精度。本文提出了模糊卡尔曼小范围自适应滤波方法来提升测量精度, 该方法先提取卡尔曼滤波的滤波残差作为滤波相对误差, 通过分析辐射剂量仪的环境噪声特性对滤波相对误差设置合理阈值。在此基础上, 设计了模糊控制器, 将滤波相对误差和误差阈值的差值作为模糊控制器的输入, 卡尔曼滤波的过程噪声协方差 Q 的变化量作为输出, 设定了模糊逻辑输入与输出的基本论域, 建立了隶属度函数, 依据测量经验制定模糊控制规则, 实现过程噪声协方差 Q 随滤波相对误差在动态辐射阶段和恒定辐射阶段的小范围自适应调整, 从而提升剂量仪在两个阶段的测量精度。将剂量仪放置在剂量率为 $0 \mu\text{Sv/h} \sim 15 \text{Sv/h}$ 的环境中, 采用本文所述方法测得的动态和恒定辐射的剂量率最大误差分别为4.3%和8.3%, 180 s时长的累计剂量误差为10%左右。与滑动平均滤波法和基于残差判断的卡尔曼滤波法相比, 本文所提出的模糊卡尔曼小范围自适应滤波方法在嵌入式多通道剂量仪中更有优势。

关键词: 嵌入式系统; 辐射剂量仪; 卡尔曼滤波; 模糊控制

中图分类号: TP274⁺.1

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.1673-3193.2024.05.018

引用格式: 张彦飞, 姚舜才, 王建飞. 辐射剂量仪高精度滤波算法研究[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2024, 45(5): 716-724.

ZHANG Yanfei, YAO Shuncai, WANG Jianfei. Research on High-precision filtering algorithm of radiation dosimeter[J]. Journal of North University of China(Natural Science Edition), 2024, 45(5): 716-724.

Research on High-Precision Filtering Algorithm of Radiation Dosimeter

ZHANG Yanfei¹, YAO Shuncai¹, WANG Jianfei²

(1. School of Electrical and Control Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. China Research Institute of Radiation Protection, Taiyuan 030006, China)

Abstract: The measurement result of embedded multi-channel radiation dosimeter is easy to be interfered by the system itself and the environment noise, which affects the measurement accuracy. In this paper, a fuzzy Kalman small-range adaptive filtering method was proposed to improve the measurement accuracy and save the memory space. Firstly, the filtering residual of Kalman filter was extracted as the filtering relative error, and a reasonable threshold was set for the filtering relative error by analyzing the environmental noise characteristics of the radiation dosimeter. On this basis, a fuzzy controller was designed, taking the difference between the relative error of real-time filter and the error threshold as the input of the fuzzy controller, and the process noise covariance Q of Kalman filter as the output. The basic discourse

收稿日期: 2024-01-24

作者简介: 张彦飞(1997-), 男, 硕士生, 主要从事嵌入式系统应用与研究。

通信作者: 姚舜才(1973-), 副教授, 博士, 主要从事电气传动与控制方面的研究。E-mail: yaoshuncai@nuc.edu.cn。

domain of fuzzy logic input and output was set up, the membership function was established, and fuzzy control rules were formulated according to the measurement experience. The process noise covariance Q was adaptive to the relative error of the filter in the dynamic radiation stage and the constant radiation stage, and the measurement accuracy of the dosimeter was improved. When the dosimeter is placed in the environment with the dose rate of $0 \mu\text{Sv/h} \sim 15\text{Sv/h}$, the maximum dose rate error of the dosimeter using the method described in this paper is 4.3% and 8.3% respectively in the dynamic and constant radiation, the cumulative dose error of 180s is about 10%. Compared with the moving average filtering method and the Kalman filtering method based on residual judgment, the fuzzy Kalman small-range adaptive filter proposed in this paper has more advantages in embedded multi-channel dosimeter.

Key words: embedded system; radiation dosimeter; Kalman filter; fuzzy control

0 引言

随着核电站及核相关产业的发展和规模的不断扩大,相匹配的核燃料厂、乏燃料存储池、放射性废料库等大型核设施数量也迅速增加,对核辐射剂量的精确监测愈加重要^[1-3]。辐射剂量仪是一种重要的辐射监测仪器,常用于核电站、放射性实验室等辐射防护领域的辐射监测,对于核安全和工作人员辐射防护起着重要作用,测量精度对于辐射监测防护具有很大影响。然而辐射剂量仪在使用过程中会受到系统本身和外界环境噪声的干扰,从而影响其测量精度。在测量过程中,抑制或消除数据采集过程中干扰信号的影响,对提高辐射剂量仪系统的精度具有重要意义。

剂量仪是一种测量环境辐射的嵌入式装置,采样数据需要经过数字滤波器滤波以提升其测量精度。乔茹虹^[4],袁雪岚^[5],王迪等^[6]采用滑动平均滤波法来提升测量精度,通过识别跳变数据有效降低了环境动态下测量误差。刘志强等^[7]建立了数字滤波器模型,采用多目标粒子群算法优化了动态环境下的测量精度。吴敬等^[8]采用自适应一阶低通滤波兼顾了动态和恒定辐射环境下仪器的性能指标。由此可见,剂量仪中的数字滤波器应尽可能地保证动态和恒定辐射环境下的测量精度。郭丰碑等^[9]设计了一种基于时差法与算术平均滤波的气体流量计,该方法通过切换卡尔曼率的测量噪声协方差以满足气体流量计在不同气流下的精度和稳定性。秦晓文^[10]在电磁流量计的信号处理中提出了一种基于残差判断的改进卡尔曼滤波方法,该方法对卡尔曼滤波的残差设置合理的阈值,从而调整卡尔曼率的过程噪声协方差,最终实现液体流量计恒定流量的可靠测量和动态

流量下的快速跟随。以上两种卡尔曼滤波方法只能实现切换,而不能在切换后的阶段进一步提升滤波效果。安昌祖等^[11]在无迹卡尔曼滤波中引入了模糊控制,采用模糊控制自动调整无迹卡尔曼的测量噪声协方差与理论值,使两者保持相等,提高了锂电池 SOC 的估算精度。蒋宗池等^[12]将四旋翼的运动频率、运动加速度、磁场干扰信息融入模糊推理机制中不断修正卡尔曼滤波中的噪声协方差矩阵,提高了四旋翼姿态估计的精度。模糊控制在以上两种算法中起到了良好的作用。

针对剂量仪的测量精度问题,本文提出一种模糊卡尔曼小范围自适应滤波方法,并在嵌入式多通道剂量仪中进行了实验验证和采样数据仿真分析。该方法提取卡尔曼滤波残差作为滤波相对误差并对其设置合理的阈值。在此基础上,引入了模糊控制调整卡尔曼滤波的过程噪声协方差,使滤波算法在进入动态和恒定阶段后进一步增强滤波效果,最终提高剂量仪的测量精度。

1 辐射探测系统原理概述

1.1 辐射探测系统原理

辐射剂量仪探测系统主要由探测器、多电压阈值(Multi-Voltage Threshold, MVT)采样电路、处理器组成,如图 1(a)所示。

探测器受辐射源照射后,其内部的闪烁晶体与射线发生相互作用并发光,经光电转换器件将光信号转换为电信号,最后经分压电路、放大电路生成电脉冲^[13],如图 1(b)所示。该脉冲经 MVT 电路采样后转化为方波脉冲,处理器以一定频率读取方波脉冲计数并对计数值滤波,将滤波后的结果代入拟合函数中完成环境中辐射剂量的测量^[14]。

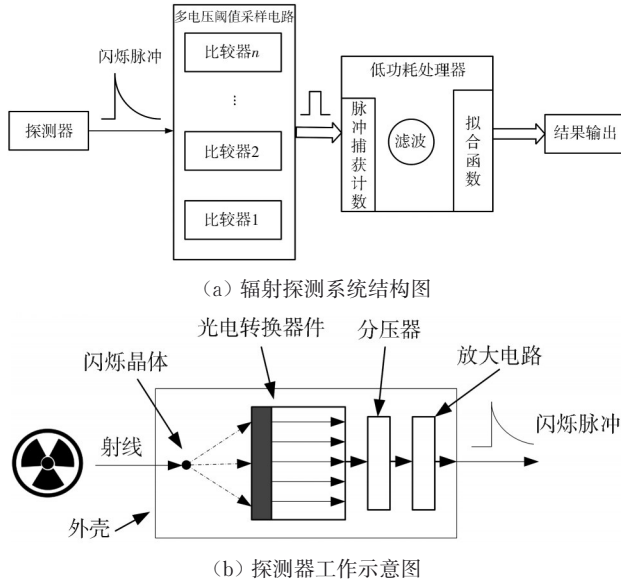


图1 辐射探测系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of radiation detection system

1.2 MVT的数学原理

MVT是一种基于先验信息的闪烁脉冲数字化方法,通过实验提前采集大量的闪烁脉冲数据,并进行分析后建立闪烁脉冲的数学模型^[15]。本文主要分为两步:

1) 预先设定 M 个电压阈值,然后记录脉冲数,得到 M 个样本点分别为 $z_1, z_2, z_3, \dots, z_M$ 。实际测量中,采集的样本点会有波动,表示为

$$z_i = x_i + N_i(t), \quad (1)$$

式中: z_i 为第 i 个通道的计数值; x_i 为第 i 个通道滤波后的计数值; $N_i(t)$ 第 i 个通道 t 时刻的干扰噪声,主要包括直流漂移、环境扰动、电源纹波、白噪声等。

2) 建立样本点滤波后的计数值和环境辐射剂量率的拟合函数。拟合函数模型为

$$y_k = \begin{cases} f_1(x_j) & \frac{x_j}{x_k} \in [a, b] \cap \dots \frac{x_j}{x_l} \in [c, d], \\ f_2(x_j) & \frac{x_j}{x_k} \notin [a, b] \cap \dots \frac{x_j}{x_l} \in [c, d], \\ \vdots & \vdots \\ f_n(x_j) & \frac{x_j}{x_k} \in [a, b] \cap \dots \frac{x_j}{x_l} \notin [c, d], \\ j, k, l \in [1, M], \end{cases} \quad (2)$$

式中: y_k 为 k 时刻的剂量率; $f_i(x_j)$ 为拟合函数, i 为分段函数序号,根据拟合效果确定,一般情况 $i \geq 2$; x_i, x_j, x_k, x_l 分别为第 i, j, k, l 个通道滤波后

的计数值; a, b, c, d, \dots 为常值,根据分段策略设置;将每时刻剂量率累加求出累计剂量

$$Y = \sum_{k=0}^{\infty} y_k / 3600. \quad (3)$$

2 模糊卡尔曼滤波算法设计

2.1 算法设计

剂量仪是嵌入式系统,在提高精度的同时要保证实时性、占内存小、测量结果的准确性等。卡尔曼滤波(Kalman Filter, KF)因其计算速度快、内存占用小等优点,常被用于嵌入式系统中的传感器滤波和数据融合^[16]。但卡尔曼滤波采用恒定的卡尔曼增益,不能同时满足响应速度和精度的要求,因此需要实时调整卡尔曼增益以提高系统的滤波效果、响应速度。模糊控制不依赖被控对象的数学模型,模糊条件语句容易加到过程控制环节上,适用性强、使用方法简单^[17]。本文将模糊控制算法与卡尔曼滤波相结合,提出小范围自适应卡尔曼增益来提高剂量仪的滤波精度。

2.2 卡尔曼滤波

卡尔曼滤波的核心思想是将第 k 个时刻的状态信息输入卡尔曼滤波器来预测第 $k+1$ 个时刻的状态信息,同时,第 $k+1$ 个时刻的实际状态信息会更新卡尔曼滤波器的参数,使其在之后的预测中变得更加准确。

在剂量仪测量系统中,卡尔曼滤波分别对各个计数通道滤波,整个测量过程可以用线性差分方程描述为

$$\mathbf{x}(k) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k-1) + \mathbf{B}u(k-1) + \mathbf{w}(k-1), \quad (4)$$

$$z(k) = \mathbf{C}\mathbf{x}(k) + v(k), \quad (5)$$

式中: $\mathbf{x}(k)$ 为状态向量;矩阵 \mathbf{A} 为将上一时刻 $k-1$ 的状态线性映射到当前时刻 k 的状态;矩阵 \mathbf{B} 为可选的控制输入 $u(k-1)$ 的增益;随机信号 $\mathbf{w}(k-1)$ 为过程噪声, $\mathbf{w}(k-1) \in N(0, \mathbf{Q})$;由于过程的状态没有控制输入,所以, $u(k-1) = 0$;矩阵 \mathbf{C} 为状态变量 $\mathbf{x}(k)$ 对测量变量 $z(k)$ 的增益; $v(k)$ 为观测噪声, $v(k) \in N(0, \mathbf{R})$ 。在测量过程中观测到噪声和过程噪声为互不相关的高斯白噪声。卡尔曼滤波算法包括预测阶段和更新阶段。

2.2.1 预测阶段

1) 预测当前状态

$$\hat{\mathbf{x}}(k|k-1) = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}(k-1|k-1). \quad (6)$$

2) 更新协方差

$$P(k|k-1) = AP(k-1|k-1)A^T + Q(k-1). \tag{7}$$

2.2.2 更新阶段

1) 计算卡尔曼增益

$$K(k) = P(k|k-1)C^T[C^TP(k|k-1)C + R(k)]^{-1}. \tag{8}$$

2) 参考测量值估计

$$\hat{x}(k|k) = \hat{x}(k|k-1) + K(k)[z(k) - C\hat{x}(k|k-1)]. \tag{9}$$

3) 计更新 k 时刻的协方差

$$P(k|k) = [1 - K(k)C]P(k|k-1), \tag{10}$$

式中： $\hat{x}(k|k-1)$ 为先验估计值； $\hat{x}(k|k)$ 为后验估计值； $\hat{x}(k-1|k-1)$ 为上一时刻的最优估计值； $P(k|k-1)$ 为先验估计误差协方差； $P(k|k)$ 为后验估计协方差； $P(k-1|k-1)$ 为对应的 $\hat{x}(k-1|k-1)$ 的协方差值； $K(k)$ 为卡尔曼增益； $R(k)$ 为观测噪声协方差矩阵； $Q(k-1)$ 为过程噪声协方差矩阵。

由式(9)可知，卡尔曼滤波的卡尔曼增益决定了当前系统输出值倾向于预测值还是观测值，进一步从式(7)和式(8)可知卡尔曼增益与过程噪声参数 Q 和测量噪声参数 R 有关。

2.3 模糊控制器设计

剂量仪的结果易受环境影响，卡尔曼增益会影响到响应速度和滤波效果，如果按照常值处理会造成误差。因此，本文采用模糊推理技术实时调整过程噪声协方差 Q ，从而间接地调整了卡尔曼增益；使卡尔曼增益在辐射环境变化时适当增大达到快速跟随的效果，在辐射环境恒定时逐步减小以尽可能收敛到真实值；最终实现测量值随动态辐射环境的自适应调整。模糊无迹卡尔曼滤波具体步骤如下：

1) 结合工程应用，卡尔曼滤波退化是一维的。计算 k 时刻 KF 的滤波残差并作为滤波相对误差 $r_k^{[18]}$ 。

$$\begin{cases} r_k = \left| \frac{z(k) - C\hat{x}(k|k-1)}{C\hat{x}(k|k-1)} \right|, \\ e_k = r_k - r_h, \end{cases} \tag{11}$$

式中： r_h 为相对误差阈值，根据恒定辐射下的滤波残差进行微调； e_k 为滤波相对误差和设定阈值的差值。

2) 将差值 e_k 作为模糊控制器的输入，输出为 ΔQ 。根据 e_k 的大小调整 ΔQ 最终实现小范围内滤

波效果的优化。

$$Q(k) = Q(k-1) + \Delta Q (Q_k > 0). \tag{12}$$

根据测量经验设计模糊推理，当 $e_k > 0$ 时，判断辐射环境发生变化，应该增大 $Q(k)$ ；当 $e_k < 0$ 时，判断剂量仪处在原来的辐射环境中， $Q(k)$ 应该减小；当 $e_k \approx 0$ 时，这种情况只是瞬时变化，所以维持 $Q(k)$ 不变。将输入输出变量分为 5 个模糊子集^[19]，模糊推理规则如表 1 所示。

表 1 模糊规则表

Tab. 1 Fuzzy rule table

变量	论域	模糊子集	取值
e_k	[-0.07, 1.93]	负大	[-0.07 -0.03]
		负小	[-0.05 -0.03 0]
		零	[-0.03 0 0.5]
		正小	[0 0.5 1]
		正大	[0.5 1.93]
ΔQ	[-5, 5]	大降	[-5 -2.5 -1.5]
		小降	[-1.5 -0.5 -0.05]
		不变	[-0.05 0 0.5]
		小增	[0.5 2 2.5]
		大增	[2 2.5 5]

3) 经过模糊推理得到的结果矩阵不能直接作为输出，因此需要清晰化操作^[20]。常用的方法有重心法、加权平均法和最大隶属度法。考虑到剂量仪输出结果的平滑性，采用面积重心法将输出结果直接作用到过程噪声协方差变化量 ΔQ 。面积重心法的计算公式为

$$\Delta Q = \frac{\sum_{k=1}^n e_k A(e_k)}{\sum_{k=1}^n A(e_k)}, \tag{13}$$

式中： ΔQ 解为精确控制量； $A(e_k)$ 是模糊推理的结果。

设计完成的模糊控制器的输入输出曲线图和规则观测器如图 2 和图 3 所示。

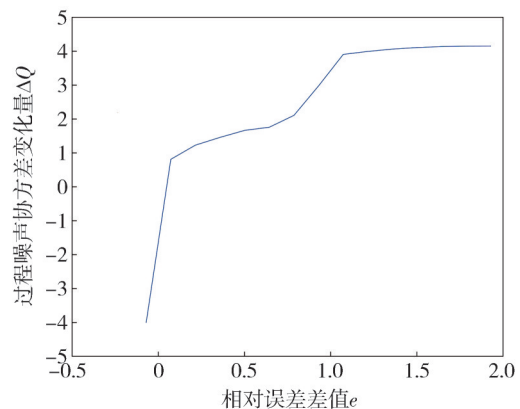


图 2 模糊逻辑控制的输入输出曲线图

Fig. 2 Fuzzy logic control input output curve

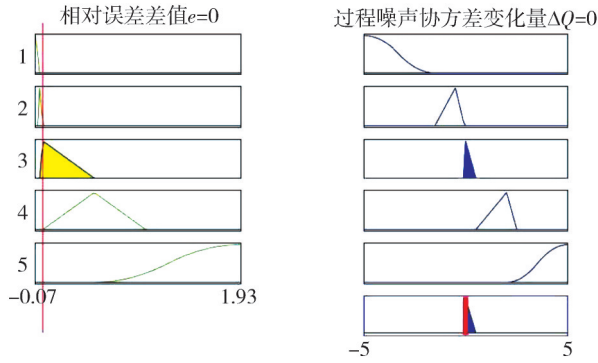


图3 规则观测器
Fig.3 Rule Viewer

由图3可知,当 $e_k < 0$ 时,剂量仪处于恒定辐射环境中,迅速减小过程噪声协方差,因此曲线比较陡;当 $e_k > 0$ 时,剂量仪处于动态辐射环境中,考虑切换过程中容易造成误差过大,所以根据相对误差差值适当增大过程噪声协方差,因此曲线比较缓。为简化计算,将隶属度函数的交点坐标提前记录到处理器中,采用查表的方法计算模糊控制器的最终输出值。

2.4 滤波算法结构图

模糊卡尔曼滤波(Fuzzy Kalman Filter, FKF)算法结构图如图4所示。该方法在每次滤波时提取当前滤波残差作为相对误差 r_k ,将 r_k 和设定的阈值 r_h 作差后作为模糊推理的输入 e_k ,根据模糊规则实时推出过程噪声协方差的变化量 ΔQ ,从而实现过程噪声协方差 Q 的小范围实时在线调整。

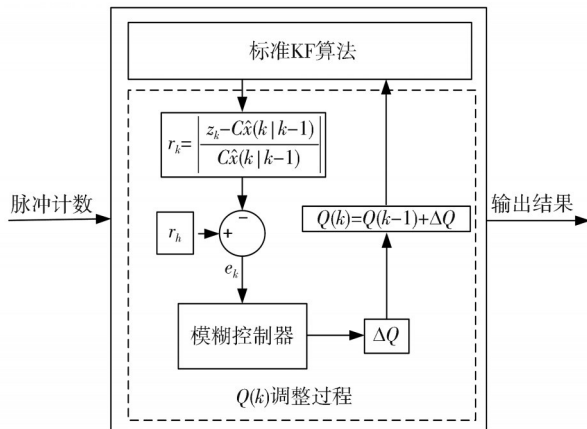


图4 FKF算法结构图
Fig.4 FKF algorithm structure diagram

3 实验验证与分析

本文剂量仪主控使用STM32L433VCT6单片机,以1 Hz的频率测量环境中辐射剂量。将剂量仪

放置在不同辐射环境下测试,测试环境参数如表2所示。

表2 测试环境参数
Tab.2 Test environment parameter

辐射源	能量范围/keV	辐射剂量率/(mSv·h ⁻¹)	时间/s
X射线	33~250	1.062	3 000
Cs	661	0.01~30	3 000
Co	1 250	30~15 000	1 800

3.1 仿真验证

取均值相邻的数据点在MATLAB中验证该算法的滤波效果,原始数据如图5所示。

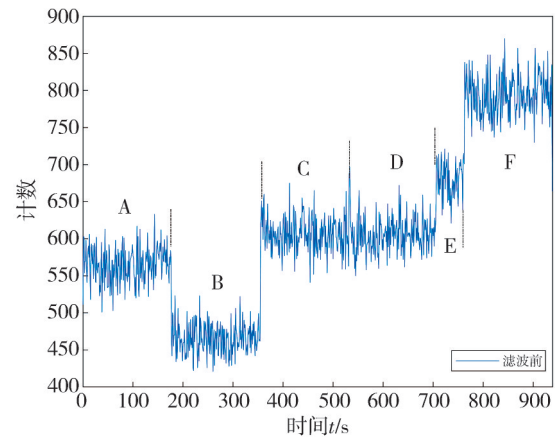


图5 原始数据
Fig.5 Original data

图5中A、B、C、D、E、F分别代表在恒定辐射环境阶段的计数值,点划线处为变化辐射环境阶段的计数值。

通过分析数据,确定上述理论模型的参数如下:初始协方差矩阵 $P=0.01$,过程噪声协方差初始值 $Q(0)=10$,测量噪声协方差 $R=1 000$,矩阵 $A=1$,矩阵 $C=1$ 情况下,计算恒定辐射环境下滤波残差的概率密度,如图6所示。

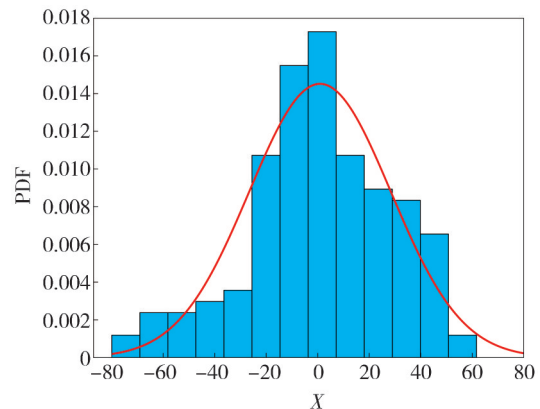


图6 滤波残差概率密度图
Fig.6 Filtered residual probability density map

由图 6 可知,滤波残差服从正态分布,测量时计数通道所受噪声为高斯噪声。

在上述模型参数条件下,计算变化辐射环境和恒定辐射环境两个阶段的滤波相对误差 r_k , 如图 7 所示,可以通过设置合理的阈值区分两种环境。经测试当 $Q=[0.045,20]$ 时,设定 $r_h=0.07$,因此调节过程噪声协方差 Q 可以实现两个阶段的小范围调节。

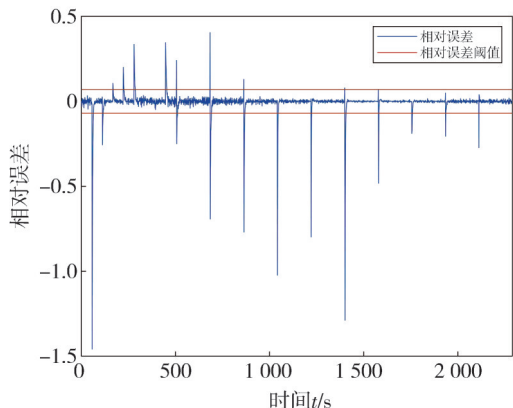


图 7 滤波相对误差

Fig. 7 Filtering relative error

为验证本文滤波算法在小范围作用的有效性,将 FKF 与基于残差判断的改进卡尔曼滤波方法(KF)对比,滤波效果如图 8 所示。

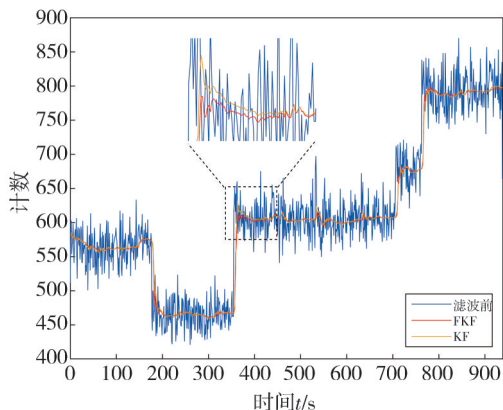


图 8 KF 与 FKF 的滤波效果图

Fig. 8 Filter effect diagram of KF and FKF

由图 8 可知,FKF 在变化辐射阶段和恒定辐射阶段优于 KF,定量分析该方法在两个阶段的滤波误差。将剂量仪放置在恒定辐射环境下,两种方法的滤波误差曲线如图 9 所示。

由图 9 可知,在该环境下两种方法的滤波误差都在平均值附近波动,整个滤波过程中 KF 要比 FKF 的滤波误差大。在滤波后期 KF 的滤波误差

将会越来越小,因为模糊控制算法的存在达到零基准线的速度要比 KF 快,直到达到设定的区间最小值。FKF 的滤波精度比 KF 要高 0.2 个百分点左右。

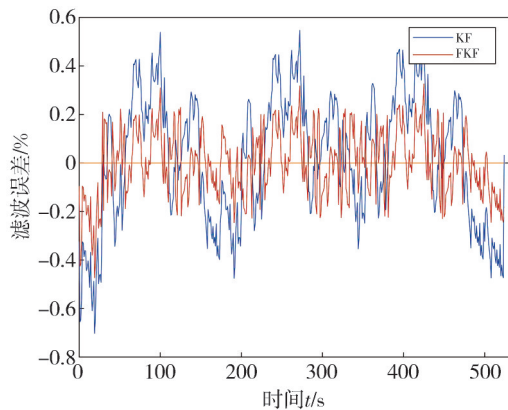


图 9 恒定辐射环境的滤波误差曲线

Fig. 9 Error curve of constant radiation environment filtering

剂量仪实际使用时的辐射环境是变化的,因此,将剂量仪放置在 10 组辐射剂量率接近的测试点,模拟变化的辐射环境,测量时间为 90 s 时,对比 KF、FKF 的滤波误差,结果如图 10 所示。

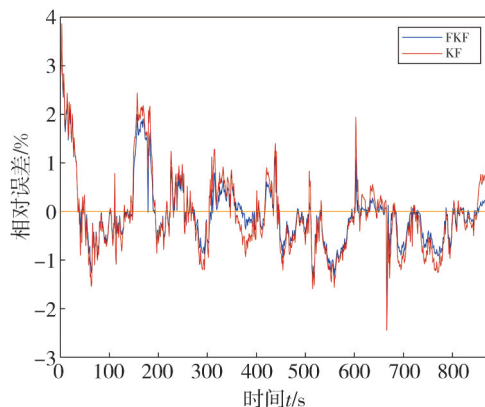


图 10 动态辐射环境的滤波误差曲线

Fig. 10 Variable radiation environment filtering error curve

由图 10 可知,变化辐射环境下,两种方法都能够有效切换。但在切换过程中 KF 造成的误差大于 FKF,因为模糊控制根据相对误差的大小调整过程噪声协方差进而调整卡尔曼增益系数,最终导致输出值更倾向于预测值,这种方法会使剂量仪的结果更加平滑。分析滤波误差曲线可知,FKF 的滤波精度比 KF 要高 0.5 个百分点左右。

进一步对比 FKF 与滑动平均滤波法(Moving Average Filter, MAF)的滤波效果。如图 11 所示,在滑动平均滤波窗口为 15 的情况下,整体滤波效果较为接近。

由图 11 可知,在窗口大小为 15 的情况下,滑

动平均滤波已经出现滞后,减小窗口虽然可以减少滞后,但是滤波效果会变差,因此FKF的滤波效果比MAF更稳定。

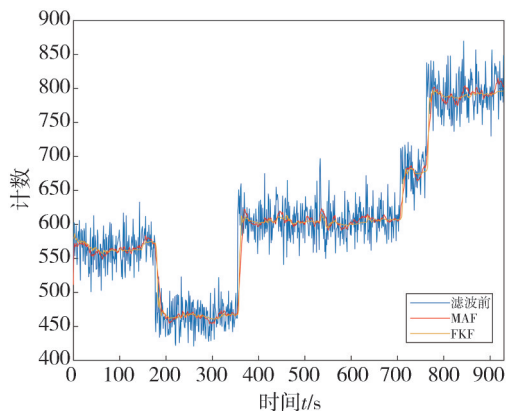


图 11 MAF 与 FKF 的滤波效果图

Fig. 11 Filter effect diagram of MAF and FKF

为定量分析两种算法滤波后的样本数据的分散程度,引入数据的样本标准差。计算公式为

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}, \quad (14)$$

式中: S 为样本标准差; X_i 为样本滤波后的值; \bar{X} 为样本平均值。

以单一通道为例,对比两种算法在剂量仪主频为 8 MHz、双精度数据类型下的占用内存、算法耗时、样本标准差 S , 结果如表 3 所示。

表 3 不同滤波方法综合对比

Tab. 3 Comprehensive comparison of different filtering methods

方法	FKF	MAF
所占字节数/字节	(48+60)	120
算法耗时 t /ms	21	18
样本标准差 S	3.8	6.5

分析表 3 可知, FKF 比 MAF 占用的采样存储空间更少,其中包括 KF 占 48 字节,模糊控制关键点占 60 字节,随着通道的增加 MAF 和 KF 的所需字节数都会增加,但是每增加一个通道 MAF 比 FKF 多 72 个字节,而模糊控制统一调节所有通道,其字节数并不会跟随通道数增加。在算法耗时方面, FKF 因为引入了数学函数的计算比 MAF 多 3 ms。在滤波效果方面, FKF 更加稳定。综合分析可知, FKF 在剂量仪中更有优势。

3.2 实验验证

实验现场如图 12 所示,将剂量仪样机放置在高度位移调节器上,使用激光水准仪尽可能保证探测器正对辐射源,改变辐射源和测量距离达到

$0 \mu\text{Sv/h} \sim 15 \text{ Sv/h}$ 的任意剂量率,样机串口以 9 600 的波特率将当前时刻剂量率和累计剂量的计算结果发送至上位机。

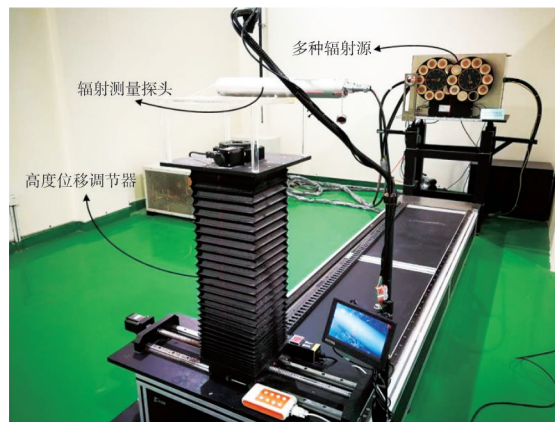


图 12 实验现场图

Fig. 12 Experimental field diagram

在该实验场景下,对比两种方法在各个阶段剂量率的测量误差,结果如表 4 所示。

表 4 不同滤波方法在不同阶段剂量率的测量误差对比

Tab. 4 Comparison of dose rate measurement errors of measurement results of different filtering methods at different stages of the process

滤波方法	恒定辐射环境		动态辐射环境	
	最大相对误差/%	平均相对误差/%	最大相对误差/%	平均相对误差/%
KF	6.7	0.893	11.7	7.837
FKF	4.3	0.473	8.3	5.315

由表 4 可知,在动态辐射环境中, FKF 比 KF 的最大相对误差小 3.4 百分点,平均相对误差小 2.5 百分点。在该环境中, FKF 在切换之后能够根据外界辐射变化量量化调整卡尔曼增益,从而调整跟随效果,最终使测量结果优于 KF。在恒定辐射环境中, FKF 比 KF 的最大相对误差小 2.4 百分点,平均相对误差小 0.42 百分点。进入恒定辐射环境阶段后,根据外界辐射变化量调整卡尔曼增益,使测量结果尽可能收敛到当前环境的真实剂量率值附近,所以 FKF 比 KF 的误差小。由此可知,实验和仿真效果一致,达到了滤波算法理论改进的预期效果。

对比两种方法 180s 的累计剂量测量值,测量结果如表 5 所示。

由表 5 可知,本文方案能够使累计剂量测量的相对误差保持在 10% 以内,满足剂量仪相对误差为 $-17\% \sim +21\%$ 的标定要求。

表 5 不同滤波方法累计剂量的测量结果对比
Tab. 5 Comparison of cumulative dose measurement results of different filtering methods

方法 真实值/ μSv	FKF		KF	
	测量值/ μSv	相对 误差/%	测量值/ μSv	相对 误差/%
1 247.05	1 146.0	-8.1	1 119.8	-10.2
2 589.50	2 343.49	-9.5	2 296.9	-11.3
5 208	5 572.56	+7.0	5 650.6	+8.5
22 837.5	24 390.4	+6.8	24 573.1	+7.6
35 770	33 123.02	-7.4	32 371.8	-9.5
46 900	45 962	-2.0	45 164.7	-3.7
63 892.5	67 662.1	+5.9	68 237.1	+6.8
92 225	96 006.2	+4.1	98 219.6	+6.5

4 结 论

辐射剂量仪易受环境影响,脉冲捕获通道越多越便于分析和处理,然而受运算精度和拟合函数误差的影响,测量结果还是会受到影响。本文在标准卡尔曼滤波的基础上,引入了模糊推理思想,提出了模糊卡尔曼小范围自适应滤波方法。通过建立滤波相对误差和过程噪声协方差变化量的模糊关系,实现卡尔曼滤波算法增益系数的小范围自适应优化。恒定辐射环境下FKF的最大误差为4.3%,而KF的最大误差为6.7%;动态辐射环境下FKF的最大误差为8.3%,而KF的最大误差为11.7%。相比KF的方法,本文提出的FKF滤波精度有一定提高,环境切换阶段误差曲线能够更加平滑,恒定环境下能够更快地达到均值。因此,FKF对于KF的改进是有效的,并且适用于嵌入式多通道剂量仪的滤波。

参考文献:

[1] 赵永康,陈晓秋,常向东,等. 探索我国放射性废物处置的多种途径[J]. 中国核电, 2019, 12(3): 252-258.
ZHAO Yongkang, CHEN Xiaoqiu, CHANG Xiangdong, et al. Multi-solutions to the disposal of radioactive waste in China[J]. China Nuclear Power, 2019, 12(3): 252-258. (in Chinese).

[2] 黄秋豹,王晖,甘霖. 核电厂辐射监测设备国产化进展及方向[J]. 兵工自动化, 2016, 35(9): 90-92.
HUANG Qiubao, WANG Hui, GAN Lin, et al. Radiation monitoring equipment localization progress and direction [J]. Ordnance Industry Automation, 2016, 35(9): 90-92. (in Chinese).

[3] 徐进财,张迪. 从系统设计分析核电站辐射监测仪表

的特点和发展趋势[J]. 核电子学与探测技术, 2009, 29(5): 1241-1247.
XU Jincai, ZHANG Di. Analysis of characteristic and development trend for nuclear power plant radiation monitoring instrument from system design[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2009, 29(6): 1241-1247. (in Chinese).

[4] 乔茹虹. β 、X、 γ 射线电子个人剂量仪的设计与实现[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.

[5] 袁雪岚. 智能化个人辐射剂量仪的研制[D]. 成都: 成都理工大学, 2021.

[6] 王迪. 便携式辐射探测仪的设计与实现[D]. 太原: 中北大学, 2021.

[7] 刘志强,马燕. 剂量仪中数字滤波器设计[J]. 原子能科学技术, 2016, 50(6): 1137-1141.
LIU Zhiqiang, MA Yan. Digital filter design in dosimeter [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2016, 50(6): 1137-1141. (in Chinese).

[8] 吴敬,陈祥磊,石松杰,等. 应用自适应低通滤波算法减小核探测中的噪声信号[J]. 核电子学与探测技术, 2022, 42(1): 155-160.
WU Jing, CHEN Xianglei, SHI Songjie, et al. Application of adaptive low-pass filtering method to reduce noise signal in radiation measurement[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2022, 42(1): 155-160. (in Chinese).

[9] 郭丰碑,杨宗良,程东旭,等. 基于自适应滤波算法的超声波气体流量计[J]. 仪表技术与传感器, 2023(3): 24-32.
GUO Fengbei, YANG Zongliang, CHENG Dongxu, et al. Ultrasonic gas flowmeter based on adaptive filtering algorithm [J]. Instrument Technique and Sensor, 2023(3): 24-32. (in Chinese).

[10] 秦晓文. 基于改进卡尔曼滤波的电磁流量计信号处理方法研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2022.

[11] 安昌祖,张蕊萍,张小周,等. 基于模糊无迹卡尔曼滤波算法的锂电池SOC估计[J]. 电源技术, 2020, 44(3): 333-336.
AN Changzu, ZHANG Ruiping, ZHANG Xiaozhou, et al. SOC estimation of lithium battery based on fuzzy unscented Kalman filter[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2020, 44(3): 333-336. (in Chinese).

[12] 蒋宗池,佃松宜,郭斌,等. 基于模糊卡尔曼滤波的四旋翼姿态估计方法[J]. 计算机应用与软件, 2023, 40(12): 79-85.
JIANG Zongchi, DIAN Songyi, GUO Bin, et al. A quadrotor attitude estimation method based on fuzzy kalman filter [J]. Computer Applications and Software,

- 2023, 40(12): 79-85. (in Chinese).
- [13] 胡燕, 何剑锋, 吴其反, 等. 现场X- γ 剂量率仪测量软件设计[J]. 核电子学与探测技术, 2017, 37(3): 349-354.
HU Yan, HE Jianfeng, Wu Qifan, et al. Design and implementation of the monitoring software for X- γ dose-rate meter based on-site measurement [J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2017, 37(3): 349-354. (in Chinese).
- [14] 邢立腾, 姜浩. 多电压阈值采样方法在辐射探测器能量响应补偿中的应用[C]//江苏省计量测试学术论文集, 2014: 101-104.
- [15] 刘苇. 基于MVT的多通道闪烁脉冲数字化系统的设计与实现[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
- [16] 岳兴春, 彭勇, 宋威, 等. 融合EMA和卡尔曼滤波的MEMS去噪研究与应用[J]. 仪表技术与传感器, 2023(4): 83-86.
YUE Xingchun, PENG Yong, SONG Wei, et al. Research and application of mems denoising based on EMA and Kalman filter[J]. Instrument Technique and Sensor, 2023(4): 83-86. (in Chinese).
- [17] 李东峰, 李冬梅, 张嵘, 等. 基于模糊控制的悬浮转子感应加热方法[J]. 中国惯性技术学报, 2023, 31(8): 839-843.
LI Dongfeng, LI Dongmei, ZHANG Rong, et al. A method of induction heating for suspended rotor based on fuzzy control[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2023, 31(8): 839-843. (in Chinese).
- [18] 庄伟东, 韩志刚, 周豪. 基于FAEKF算法的线控转向传感器的容错控制[J]. 计算机应用与软件, 2023, 40(12): 277-283.
ZHUANG Weidong, HAN Zhigang, ZHOU Hao, et al. Fault tolerant control of steer-by-wire sensors based on faekf algorithm [J]. Computer Applications and Software, 2023, 40(12): 277-283.
- [19] 王震坡, 薛雪, 王亚超. 基于自适应无迹卡尔曼滤波的分布式驱动电动汽车车辆状态参数估计[J]. 北京理工大学学报, 2018, 38(7): 698-702.
WANG Zhenpo, XUE Xue, WANG Yachao, et al. State parameter estimation of distributed drive electric vehicle based on adaptive unscented kalman filter[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2018, 38(7): 698-702. (in Chinese).
- [20] 周玉晟, 朱虹雨, 陈犇, 等. 基于模糊控制的光子辐射制冷功率测量系统[J]. 光学学报, 2024, 44(2): 178-187.
ZHOU Yusheng, ZHU Hongyu, CHEN Ben, et al. Photonic radiative cooling power measurement system based on fuzzy control [J]. Acta Optica Sinica, 2024, 44(2): 178-187. (in Chinese).