

doi: 10.7690/bgzdh.2022.01.006

雷达探测数据野值剔除方法

秦晓珊, 张峰, 万华, 秦国政
(中国电子科学研究院, 北京 100041)

摘要: 为提升雷达探测精度评估中雷达探测导弹目标数据的质量, 提出基于滑窗的均值和中值剔除法, 并将其与基于滑窗的多项式拟合法和模板卷积法进行对比分析。通过以 3 倍的均方误差作为门限, 设置合适的窗口长度, 选取基于窗口滑动的均值或中值剔除法。测试结果表明: 2 种方法均可更有效地剔除雷达探测导弹目标数据中的野值, 为后续弹道还原和数据评估提供了有效支撑。

关键词: 误差门限; 窗口长度; 野值剔除; 雷达探测数据

中图分类号: TP274 **文献标志码:** A

Method for Removing Outliers from Radar Detection Data

Qin Xiaoshan, Zhang Feng, Wan Hua, Qin Guozheng
(China Academy of Electronic & Information Technology, Beijing 100041, China)

Abstract: In order to improve the quality of radar detection missile target data in radar detection accuracy evaluation, the mean and median elimination method based on sliding window is proposed, and it is compared with the polynomial fitting method and template convolution method based on sliding window. By taking three times of the mean square error as the threshold and setting the appropriate window length, the mean or median elimination method based on window sliding is selected. The test results show that the 2 methods can effectively eliminate the outliers in the radar detected missile target data, and provide effective support for the subsequent trajectory restoration and data evaluation.

Keywords: error threshold; window length; outlier elimination; radar probe data

0 引言

在对雷达探测精度进行评估时, 需要将雷达探测数据和弹道导弹目标的真值数据进行对比, 而在现实作战中很难获得目标的真值数据, 需利用雷达的探测数据进行弹道还原。在雷达探测目标的过程中, 由于受外在环境杂波、雷达自身工作状态等因素影响, 雷达探测数据中经常存在一些野值点, 即数据集合中严重偏离大部分数据所呈现趋势的小部分数据点。若不对这些野值点进行剔除, 会造成弹道还原数据失真, 从而影响后续的雷达探测精度评估; 因此, 准确找到野值并对其进行剔除是数据处理的重要环节, 对用户后续利用该组数据进行相关分析有重要意义。

1 研究思路

在工程上通常使用的野值剔除思想: 首先, 利用某种方法和相关数据计算预测值; 其次, 定义一个门限, 当测量值与预测值误差大于该门限时, 则认为该测量值为野值, 并用预测值替代测量值。因此, 门限和方法的选取对野值剔除效果起着决定作

用, 而当前大多数门限选择都是测量数据的 3 倍标准差。

对于雷达探测导弹目标数据, 野值出现的形式主要有孤立型野值(以一个个不连续的跳点形式出现, 跳点领域内的数据是正常)和斑点型野值(成片出现, 且各野值点幅值相近)。雷达探测数据变化比较大或者目标做机动, 会导致雷达探测数据大于 3 倍标准差, 若直接选取 3 倍标准差门限进行野值剔除, 会误剔除掉一些有用的探测数据, 真正的野值点反而无法剔除。

针对以上情况, 笔者将门限中的标准差修改为均方误差, 通过设置不同的滑窗长度, 采用基于滑窗的多项式剔除法、模板卷积法、滑窗均值剔除法和滑窗中值剔除法对野值进行剔除, 并对野值剔除的精度进行分析。具体思路: 首先, 设置滑窗长度; 其次, 对窗口内的数据利用某种方法进行预测, 并通过比较预测值与无野值数据对野值进行剔除, 剔除门限为 3 倍均方误差; 最后, 窗口向后滑动一个数据点, 重复上述步骤, 直至窗口最右端到达数据末点位置。

收稿日期: 2021-09-29; 修回日期: 2021-10-28

作者简介: 秦晓珊(1992—), 女, 宁夏人, 博士, 从事航迹数据处理、效能评估研究。E-mail: monkey_shan@126.com。

2 算法概述

针对不同数据中的不同野值类型, 目前提出的野值剔除基本方法有差分法^[1]、多项式拟合法^[2]、最小二乘 B 样条逼近法^[3]、滑窗中值剔除法^[4]、模板卷积法^[5]等, 其他方法均是在以上方法基础上进行改进和组合, 以达到剔除目的, 如差分辅助中值滤波法^[6]。针对雷达对弹道导弹目标的探测数据, 笔者具体对以下 4 种方法进行测试和分析。

2.1 多项式剔除法

多项式平滑算法是应用最小二乘准则对观测数据进行逐步移动的多项式曲线拟合, 进而实现对观测数据的平滑^[7]。多项式的阶数取得太低容易欠拟合, 次数过高容易过拟合。针对雷达探测数据, 笔者采用二阶多项式进行拟合。

由于该方法较为简单, 故直接给出多项式剔除法步骤:

Step1: 设置滑动模板窗口长度 n , 并假设窗口内的探测数据为 X_1, \dots, X_n ;

Step2: 利用二阶多项式最小二乘估算各探测数据的估计值为 $\hat{X}_1, \dots, \hat{X}_n$;

Step3: 计算窗口内探测数据的均方误差:

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \hat{X}_i)^2 / (n - 1)}; \quad (1)$$

Step4: 取误差门限为 3σ , 对窗口内的探测数据进行检验, 判断 $|x_i - \hat{x}_i| < 3\sigma$ 是否成立。若不成立, 由 \hat{X}_i 代替 X_i , 否则仍然取 X_i ;

Step5: 窗口往后滑动 1 个数据点, 转入 Step2, 直至遍历完全部探测数据。

2.2 模板卷积法

王学伟等^[5]针对传感器(红外或雷达)测量数据(假设测量噪声均值为 0、标准差为 σ 的加性白色高斯噪声)提出了一种基于模板卷积滤除测量数据中野值的方法。该方法是一种基于事后处理和离线处理的方法, 并不适用于实时性要求较高的系统。殷艳华等^[8]对模板进行了改进, 并以最小二乘准则为原则进行估值, 保障了方法的最小误差优点, 并可实时剔除野值。李红军等^[9]依据测量数据的前后相关性和变化规律, 继续对模板卷积法进行了改进, 通过增加“判断预估值前 2 个测量点是否为野值”的过程, 消除了连续多个野值对测量数据工作的影响, 避免了连续野值造成误估计情况的发生。

由于对雷达探测数据的剔除也是基于事后处理和离线处理的方法, 且每当模板(即窗口)长度为 n 时, 模板系数 $a_{((n+1)/3)}=0$ 。笔者结合王学伟、殷艳华等^[5,8]的方法, 采用如下模板卷积野值剔除法:

Step1: 设置滑动模板窗口长度;

Step2: 最小二乘为依据设置滑动模板系数^[8];

Step3: 模板卷积计算预测值;

Step4: 取误差门限为 3σ , 比较预测值与探测值, 若满足门限要求, 则不做任何改动, 窗口往后滑动, 否则判断为野值点, 并用预测值替代野值点, 转入 Step3, 直至遍历完全部探测数据。

2.3 滑窗均值剔除法

目前, 尚无文献提出借鉴数字图像处理中的滑窗均值剔除法对测量数据进行野值剔除的思想。笔者将该方法用至雷达探测数据中验证其效果, 执行步骤如下:

Step1: 设置窗口长度 n ;

Step2: 利用窗口内数据均值计算中间数据点的预测值, 对前 $[n/2]$ (向前取整函数) 和后 $[n/2]$ 个点的预测值, 通过在前面或后面补零的方式取均值预测;

Step3: 利用预测值和探测值计算窗口内数据的均方误差 σ ;

Step4: 取误差门限为 3σ , 比较预测值与探测值, 若满足门限要求, 则不做任何改动, 窗口往后滑动, 否则判断为野值点, 并用预测值替代野值点, 转入 Step3, 直至遍历完全部探测数据。

2.4 滑窗中值剔除法

针对中值滤波对连续型野值检测与剔除性能不理想的问题, 孟庆海^[6]提出了一种差分辅助中值滤波方法, 将其应用于外弹道测量数据的野值检测与剔除工作中。本文中只考虑基于滑窗的中值滤波剔除法, 具体步骤如下:

Step1: 设置窗口长度 n ;

Step2: 利用窗口内数据的中值计算中间数据点的预测值, 对前 $[n/2]$ (向前取整函数) 和后 $[n/2]$ 个点的预测值, 通过在前面或后面补零方式取中值预测;

Step3: 利用预测值和探测值计算窗口内数据的均方误差 σ ;

Step4: 取误差门限为 3σ , 比较预测值与探测值, 若满足门限要求, 则不做任何改动, 窗口往后滑动, 否则判断为野值点, 并用预测值替代野值点, 转入 Step3, 直至遍历完全部探测数据。

3 测试分析

笔者利用 STK 软件生成一组大地坐标系下的弹道原始数据，采样点数为 2 384 点，采样频率为 1 Hz，并借助 Matlab 工具，在斜距、方位、俯仰上加均值均为 0，标准差分别为 100 m、0.1°、0.1°的高斯噪声，在此基础上再随机增加 10%左右的野值，做 100 次蒙特卡罗仿真试验，得到含野值点的雷达探测数据。

设利用某种野值剔除方法对上述含野值点的雷达探测数据进行剔除后的数据点为 y_1, \dots, y_m ，原无野值数据点为 x_1, \dots, x_m ，定义剔除后的最终误差为：

$$\theta = \sqrt{\sum_{i=1}^m (x_i - y_i)^2 / m} \quad (2)$$

针对以上探测数据，选取不同的窗口长度(包括窗口长度为 7、8、10、20、30、50、100、200 等)，利用基于滑窗的多项式剔除法、模板卷积法、滑窗均值剔除法、滑窗中值剔除法，对野值剔除效果进行分析，具体见表 1。

表 1 多种剔除方法剔除误差统计

窗口长度	剔除方法	最终误差/km
7	多项式剔除法	0.462 5
	模板卷积法	0.493 5
	滑窗均值剔除法	0.375 7
	滑窗中值剔除法	0.466 4
8	多项式剔除法	0.394 0
	模板卷积法	0.431 1
	滑窗均值剔除法	0.369 9
10	滑窗中值剔除法	0.392 1
	多项式剔除法	0.359 9
	模板卷积法	0.450 7
20	滑窗均值剔除法	0.337 2
	滑窗中值剔除法	0.322 9
	多项式剔除法	0.364 8
30	模板卷积法	0.908 6
	滑窗均值剔除法	0.374 7
	滑窗中值剔除法	0.227 0
50	多项式剔除法	0.390 9
	模板卷积法	2.239 8
	滑窗均值剔除法	0.411 0
100	滑窗中值剔除法	0.213 3
	多项式剔除法	0.436 3
	模板卷积法	8.967 0
200	滑窗均值剔除法	0.442 5
	滑窗中值剔除法	0.206 7
	多项式剔除法	0.442 4
100	模板卷积法	57.195 5
	滑窗均值剔除法	0.340 1
	滑窗中值剔除法	0.237 0
200	多项式剔除法	0.394 0
	模板卷积法	0.289 8
	滑窗均值剔除法	3.980 7
	滑窗中值剔除法	0.270 9

此处只给出窗口长度为 20、50、200 的剔除结果图。

窗口长度为 20 时，每种方法的剔除效果如图 1—5 所示。同时，给出 100 次模拟试验中每种方法的野值剔除精度曲线对比如图 6 所示。

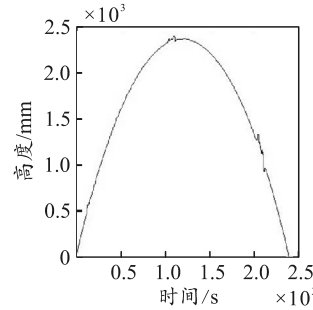


图 1 原始测量数据

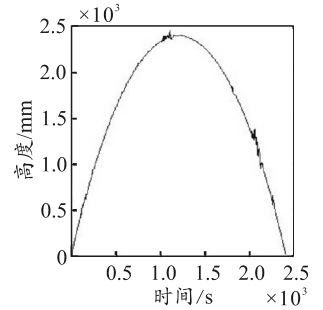


图 2 多项式法剔除结果

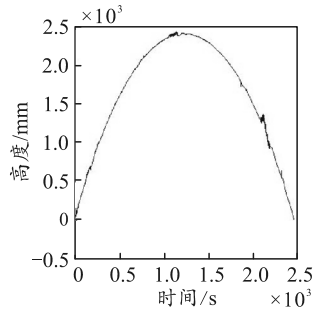


图 3 模板卷积法剔除结果

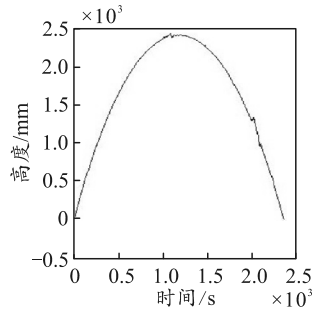


图 4 滑窗均值法剔除结果

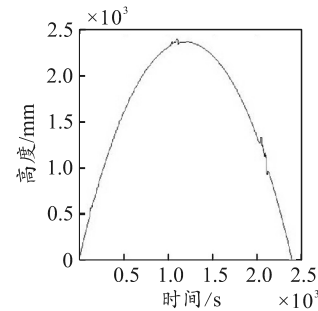


图 5 滑窗中值法剔除结果

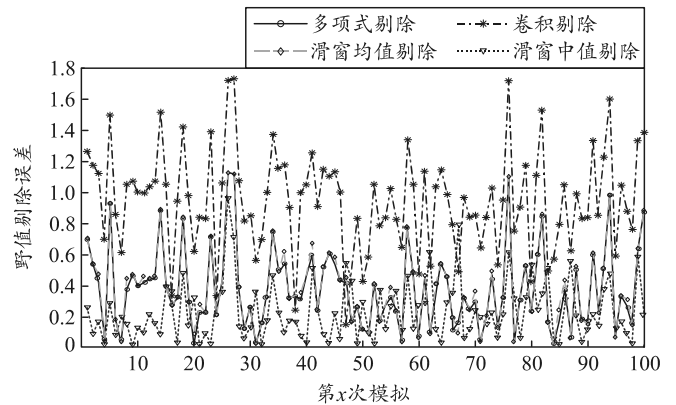


图 6 多次模拟各方法误差分析

由上图可见：滑窗中值剔除法和滑窗均值剔除法总体效果最佳，对孤立型野值和斑点型野值都有

较好的剔除效果；而模板卷积法对孤立型野值的剔除效果不佳，整体剔除精度较差，多项式剔除法对斑点型的野值剔除效果都不如滑窗中值法和滑窗均值法。

利用同样的噪声数据，当窗口长度为 50 时，每种方法的剔除效果如图 7—10 所示。同时，给出 100 次模拟试验中每种方法的野值剔除精度曲线对比如图 11 所示。

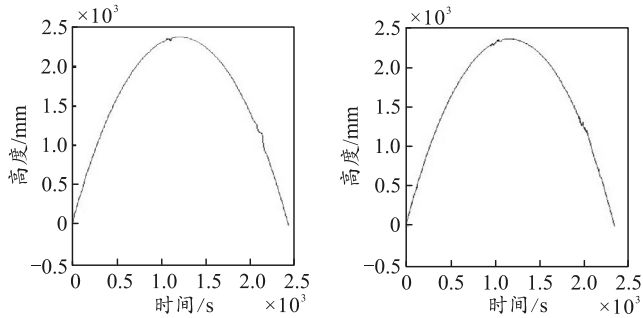


图 7 滑窗中值法剔除结果

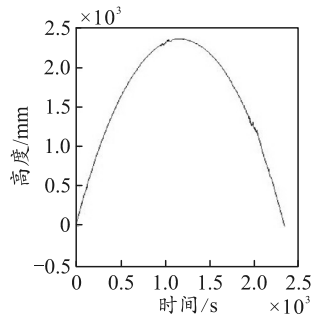


图 8 多项式法剔除结果

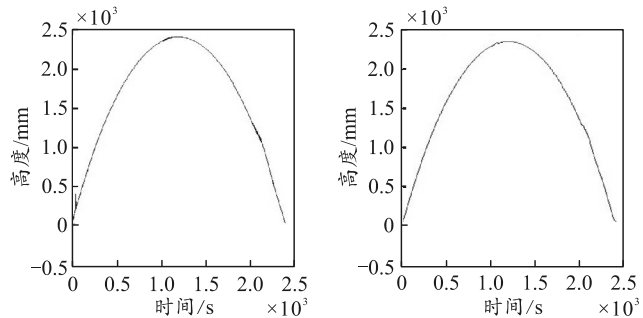


图 9 模板卷积法剔除结果

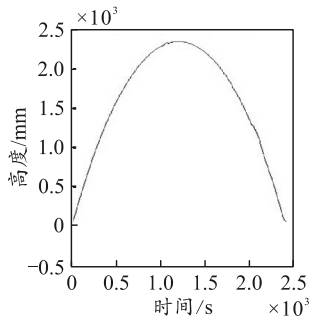


图 10 滑窗均值法剔除结果

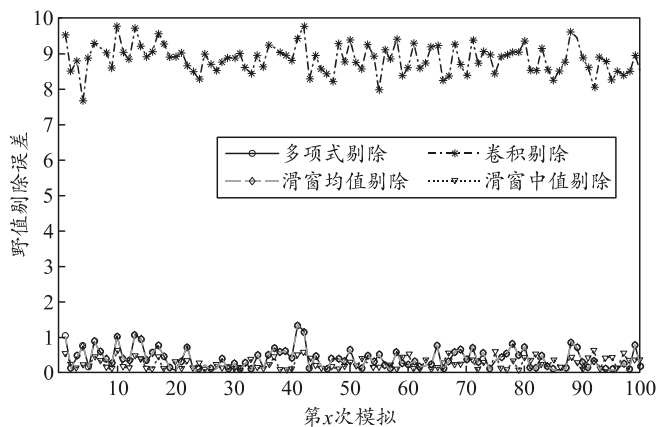


图 11 多次模拟各方法误差分析

由上图可见：滑窗中值剔除法和滑窗均值剔除法总体效果仍是最佳，而模板卷积法对有些孤立型野值依旧未进行剔除，整体剔除误差最大。

当窗口长度为 200 时，做同样的测试分析。从图 12—16 中可以看到：滑窗中值剔除法和多项式剔除法总体效果最佳，而滑窗均值剔除法和模板卷积法对有些孤立型野值没有剔除成功，且此时滑窗均

值剔除法的整体剔除误差最大。

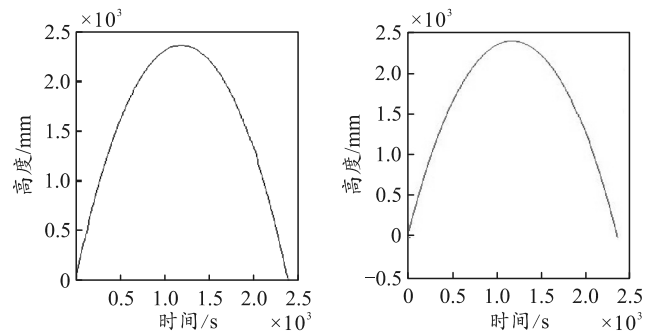


图 12 滑窗中值法剔除结果

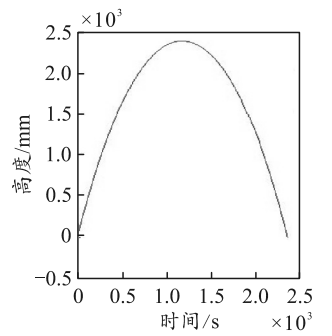


图 13 多项式法剔除结果

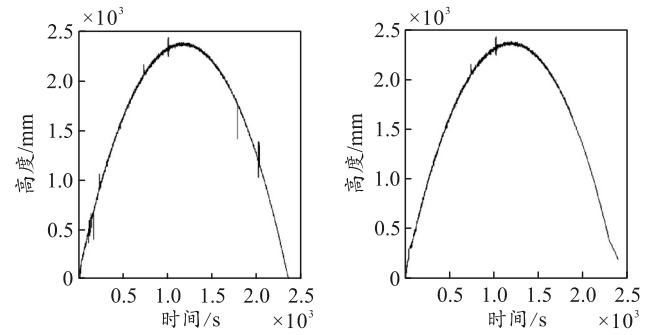


图 14 模板卷积法剔除结果

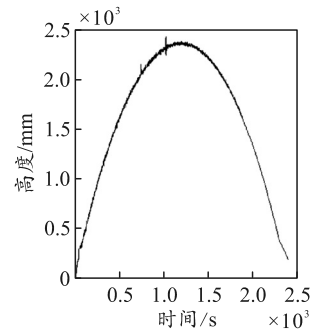


图 15 滑窗均值法剔除结果

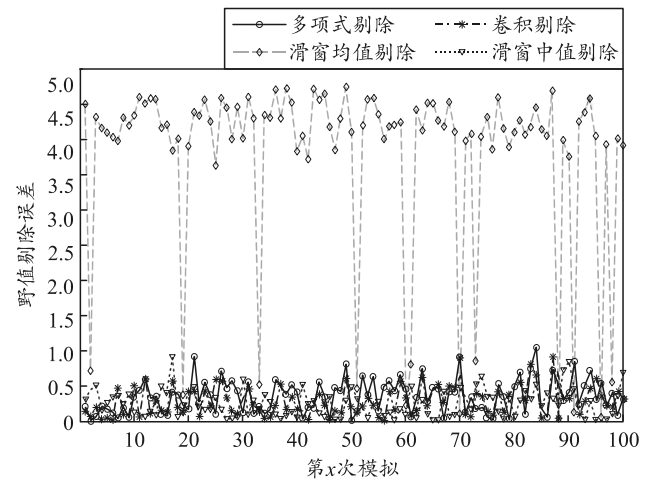


图 16 多次模拟各方法误差分析

综上，对雷达探测导弹目标数据，有以下结论：

1) 模板卷积法的误差随着窗口长度的增大而增大，且剔除效果最差，其次是滑窗均值剔除法、多项式剔除法、滑窗中值剔除法。

2) 当窗口长度取 10 左右，滑窗均值法和滑窗中值法的剔除效果最佳，其次是多项式剔除法和模板卷积法(通常在实际应用中，取窗口长度为 10)。

3) 滑窗中值法的整体误差都较小，其次是多项式剔除法、滑窗均值法、模板卷积法；但当滑窗长度适度(如本次测试中长度为 20)时，滑窗均值剔除法的稳定性最好，整体剔除效果最佳。

4) 滑窗中值法对孤立型和斑点型野值的剔除

效果均较好, 其次是多项式剔除法; 当窗口长度过大(如本次测试中长度为 200)时, 滑窗均值法对孤立型野值的剔除效果不佳, 模板卷积法效果最差。

笔者对其他无野值数据进行了以上同样的加野值和剔除野值操作, 得出了同样的结论。

4 结束语

针对雷达探测导弹目标数据中因各种方式产生的孤立型野值和斑点型野值, 重点分析了影响野值剔除效果的各类因素, 主要包括门限、窗口长度、野值剔除方法的选取等。通过以 3 倍的均方误差作为门限, 设置合适的窗口长度(实际应用中通常取 10 或 20), 选取基于滑窗的中值剔除法或均值剔除法。测试结果表明: 2 种方法均可更有效地剔除雷达探测导弹目标数据中的野值, 为后续弹道还原和数据评估提供了有效支撑。

参考文献:

[1] 王正明, 王宝智. 异常观测数据的逐点剔除法[J]. 数

(上接第 17 页)

3) 以闯座 2 次到达 20 mm 自由行程的时间为基础, 以 1 ms 延迟为间隔, 分别仿真得到 3 种情况下迟发火会造成自动机故障的时间范围, 其中首发迟发火会造成自动机故障的时间范围为 10~30 ms; 起始浮动时迟发火会造成自动机故障的时间范围为 6~34 ms; 稳定浮动时迟发火会造成自动机故障的时间范围为 9~32 ms。

笔者针对某内能源自动机迟发火导致自动机损伤故障原因的合理分析, 能完善该自动机设计的理论体系, 提高自动机射击的可靠性; 同时, 能为后续同样结构的内能源自动机设计提供参考。

参考文献:

[1] 张海洋. 某转管炮药筒破裂故障原因分析[J]. 火炮发射与控制学报, 2019, 40(3): 84-89.

[2] 李庆泉, 陈继, 刘树新. 某自动机炸壳故障原因分析[J]. 四川兵工学报, 2013, 34(9): 5-7.

[3] 邢宏光, 杨振军, 王国辉. 基于 ADAMS 的某型炮门故

学的实践与认识, 1997(3): 76-84.

[2] 王光新, 王云江, 吴翊, 等. 基于加权融合的多信源弹道数据实时野值检测方法[J]. 飞行器测控学报, 2005, 24(6): 44-48.

[3] 黄家贵, 吕红宁, 王安利. 斑点型野值的进一步识别与处理[J]. 装备指挥技术学院学报, 2002, 13(6): 56-59.

[4] 王广成, 刘海明, 杨根荣. 中值滤波方法在遥测数据处理中的应用[J]. 遥测遥控, 2002(1): 26-31.

[5] 王学伟, 殷艳华, 郭明, 等. 基于模板卷积的平滑滤波在野值剔除中的应用[J]. 红外技术, 2008, 30(6): 321-323.

[6] 孟庆海. 差分辅助中值滤波外弹道野值检测与剔除方法[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(36): 9924-9927, 9932.

[7] 赵能龙. 超视距航迹数据处理研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.

[8] 殷艳华, 王学伟, 施建礼. 基于模板卷积的野值剔除方法[J]. 红外技术, 2009, 31(3): 181-183.

[9] 李红军, 吕绍杰, 张永华, 等. 基于模板滑窗处理测量数据中野值的方法[J]. 弹箭与制导学报, 2020, 19(4): 135-137, 141.

障仿真分析方法研究[J]. 四川兵工学报, 2014, 35(6): 25-28.

[4] 朱延飞, 魏立新. 基于故障树的某闭锁机构故障原因仿真分析[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(1): 44-46, 82.

[5] 管佳伟, 李志刚. 基于 ADAMS 与 MATLAB 的药仓推药链联合仿真[J]. 机械与电子, 2020, 38(9): 27-31, 36.

[6] 马超, 李强, 程驰青. 基于 ADAMS 的某转管武器缓冲装置的参数化设计[J]. 兵工自动化, 2016, 35(11): 32-36.

[7] 胡涛, 王瑞林, 张军挪. 某车载速射迫击炮自动机动力学建模仿真[J]. 兵工自动化, 2019, 38(4): 66-70.

[8] 杨松, 赫雷, 沈超, 等. 某新型自动防暴枪自动机动力学仿真[J]. 兵器装备工程学报, 2017, 38(3): 57-61.

[9] 蒋潇蓉, 郁家耀, 周君涛, 等. 基于 ADAMS 的某无后坐炮发射动态仿真分析[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(8): 17-21.

[10] 王光建, 姜铁牛. 弹链系统间隙较多体动力学模型仿真与试验[J]. 机械工程学报, 2008, 44(5): 238-241.

[11] 杨一帆, 张鹏军, 牛俊财. 基于亚像素边缘检测的高速摄影下枪机运动分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(11): 43-49.