

机载设备测量数据中异常值判别与修正

马帅旗, 鲍存会

(陕西理工学院电气工程学院, 陕西 汉中 723003)

摘要: 研究机载设备异常数据的判别及修正问题, 提出了改进多项式外推拟合算法, 并在 FPGA 中对 GPS 和 AHRS 数据中的异常值进行判别和修正。根据机载数据的统计特性计算各物理量的标准差, 对多项式外推拟合算法进行改进, 简化了乘除法运算的硬件实现方式, 使之适合并行工作方式的 FPGA 进行异常值快速判断和处理。飞行试验数据处理结果表明, 该方法能够有效地判别、修正异常值, 满足飞行试验要求。

关键词: 飞行数据测量; 异常值判别; 异常值剔除; 多项式外推拟合

中图分类号: V249.122 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2014)06-0072-04

Identification and Correction of the Outliers in Airborne Equipment Data

MA Shuai-qi, BAO Cun-hui

(School of Electrical Engineering, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723003, China)

Abstract: As to the issue of identification and elimination of the outliers in data measured by airborne system, an improved polynomial extrapolation fitting algorithm is proposed, and the outliers of GPS and AHRS data are identified and corrected in FPGA. Standard deviations of parameters are calculated out according to statistic characteristics of the data, and the polynomial extrapolation fitting algorithm is improved to make it adaptable for identification and elimination of outliers. The results of experiment show that this method can identify and correct the outliers effectively, and can satisfy the requirement for flight test.

Key words: flight data measurement; outlier identification; outlier elimination; polynomial fitting

0 引言

在飞行数据测量过程中, 由于测量、记录设备故障或测量精度限制等因素, 测量数据中不可避免地存在异常值。如果不修正测量数据中的异常值, 会导致滤波效果变差, 测量值失真, 影响数据的置信度和系统控制性能。因此, 对异常值进行有效检测, 以合理、可信的预测值代之是飞行控制中不可缺少的步骤之一。

依据异常值在某时间域内出现的形式分为孤立型异常值和斑点型异常值, 孤立型异常值是指异常值单个出现, 斑点型异常值是指异常值成片出现。文献[1]根据观测值的标准差判断和剔除异常值, 常用的方法有狄克松准则、肖维勒准则、格拉布斯准则以及莱特准则等, 该类方法只从统计角度考虑数据特征, 适

应性不强^[2]; 文献[3-4]根据观测值特征判断异常值, 常用的方法有小波变换法和基于时间序列特征提取方法等, 该类方法异常值判别准确, 但容易丢失观测值的高频信息; 文献[5-7]根据估计值与观测值之间的差值进行异常值判断, 包括多项式外推拟合法、稳健滤波 M 估计法、样条逼近法和基于卡尔曼滤波器的残差分析法等, 该类方法适用于最优滤波, 但非最优滤波条件下异常值剔除效果不明显。

现有的小型机载记录系统多采用 DSP 或 ARM 处理器。对于多个高速率、串行工作方式的机载设备(如 GPS、AHRS 等), 这类串行工作方式的处理器容易发生数据帧丢失或被截断, 导致数据记录不完整, 参数出现异常值。针对这一问题, 采用并行工作方式的 EP2C8 FPGA 对多串行工作方式机载设备异常值进行判别和修正。本文采用统计方法预先计算参数标准差, 给出基于 FPGA 的改进多项式外推拟合法, 实现了异常值的判别和修正, 该方法减少了滤波器在 FPGA 中的资源占用率, 实现了多串行工作方式机载设备的同步滤

收稿日期: 2013-06-26

修回日期: 2013-08-27

基金项目: 陕西省教育厅科研计划项目(2013JK1072)

作者简介: 马帅旗(1977—), 男, 陕西乾县人, 硕士, 讲师, 研究方向为智能控制。

波,提高了系统异常值判别和修正的快速性和完整性。

1 异常值修正算法原理

在工程实际中常采用差分检测法判断系统异常值,方法如下:先绘制观测值的序列曲线图;然后观察并比较观测值序列特征与差分模型曲线,选择适当的差分检测阶次;最后简化和优化多项式拟合递推预测算法。多项式外推法实质是一个四阶差分滤波器,是一种工程中应用较为广泛的异常值剔除算法,其原理如图1所示。

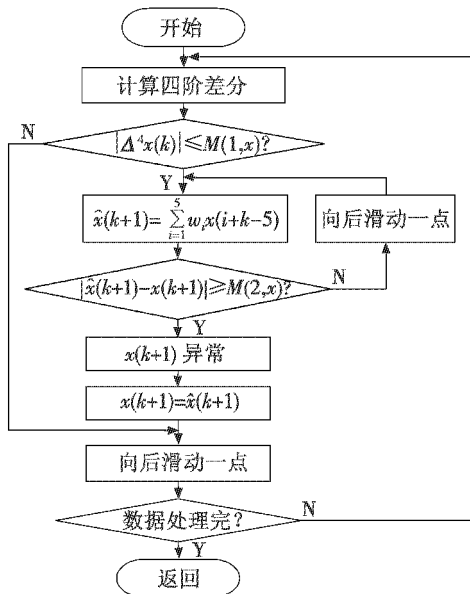


图1 多项式外推拟合法剔除异常值流程图
Fig.1 The flow chart of polynomial algorithm for eliminating outliers

首先依据统计特性得到检验门限 $M(1, x), M(2, x)$, 其中, $M(1, x), M(2, x)$ 分别为观测量的3倍和17倍随机误差;然后利用 $M(1, x)$ 确定一组无异常值的基准数据,利用无异常值的5组观测值拟合出下一序列的预测值;之后与门限值 $M(2, x)$ 比较,假若超过门限值 $M(2, x)$,则认为该观测数据是可疑异常值,利用预测值代替当前异常值,否则,认为当前序列为合理的观测值。具体算法如下所述。

1) 寻找一组基准数据,设 $x(k)$ 为某次观察序列, $\hat{x}(k+1)$ 为预测值,计算四阶差分

$$\Delta^4 x(k) = |x(k-4) - 4x(k-3) + 6x(k-2) - 4x(k+1) + x(k)| \quad (1)$$

当 $|\Delta^4 x(k)| \leq M(1, x)$, 则认为 $x(k-4) \sim x(k)$ 中无异常值,进入步骤2);当 $|\Delta^4 x(k)| > M(1, x)$ 时,认为存在异常值,向后滑动一点继续做4阶差分,直到 $|\Delta^4 x(k)| \leq M(1, x)$ 时转入下一步。

2) 在无异常值时,计算下一时刻值预测

$$\hat{x}(k+1) = \sum_{i=1}^5 w_i x(i+k-5), i = 1, 2, \dots, 5 \quad (2)$$

3) 当 $|\hat{x}(k+1) - x(k+1)| \leq M(2, x)$ 时,认为 $x(k+1)$ 为合理点,并向后滑动一点,继续计算外推值。

4) 当 $|\hat{x}(k+1) - x(k+1)| > M(2, x)$ 时,认为 $x(k+1)$ 为不合理点,用拟合值 $\hat{x}(k+1)$ 替代 $x(k+1)$ 并向后滑动一点,返回步骤1)作差分 $\Delta^4 x(k)$ 。

2 改进型异常值判别与修正算法

FPGA 与常规微处理器工作方式不同,FPGA 是在时钟信号驱动下使各模块工作,因而各参数滤波模块可以并行工作,提高滤波速度。在 FPGA 中异常值剔除状态机如图2所示。

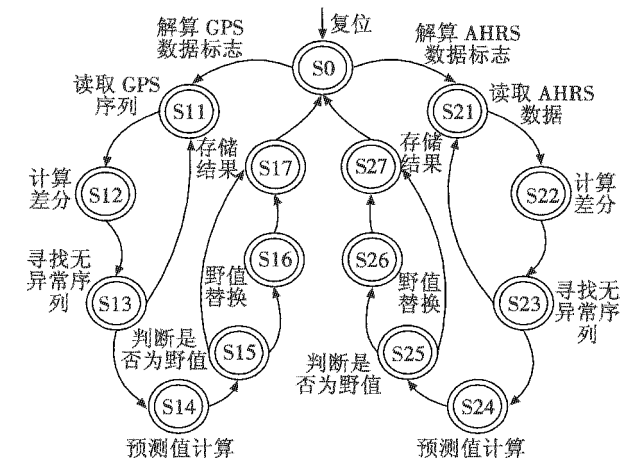


图2 异常值剔除状态机

Fig.2 The state machine for outlier elimination

由于 FPGA 中包含有限个硬件乘法器,进行乘法运算时会占用大量硬件资源,因而在 FPGA 中对多项式外推算法进行简化和改进。利用加、减法和移位运算实现乘、除法运算,避免乘除法运算时占用 FPGA 中逻辑块资源,并对拟合值的系数进行合理选择,便于 FPGA 实现。

2.1 机载设备异常值并行修正算法

某机械设备的异常值修正包含2个并行分支,分别用来实现 GPS 和航向参考系统 AHRS 数据帧的并行接收、参数解算、异常值判别和修正。该机载设备 GPS 和 AHRS 异常值的判别和修正算法由 FPGA 不同的硬件资源实现,从而保证 GPS 和 AHRS 输出的数据帧并行接收、解算、异常值的判别与修正。

2.2 四阶差分运算改进算法

四阶差分运算的表达式为

$$\Delta^4 x(k) = |x(k-4) - 4x(k-3) + 6x(k-2) - 4x(k+1) + x(k)| \quad (3)$$

为了在 FPGA 中实现四阶差分运算,将差分表达

式利用移位和加减法实现。

$$\Delta^4 x(k) = \left| \begin{array}{l} x(k-4) - x(k-3) \ll 2 + [x(k-2) \ll \\ 2 + x(k-2) \ll 1] - x(k-1) \ll 2 + x(k) \end{array} \right| \quad (4)$$

由于 EP2C8 FPGA 中包含有限个硬件乘法器,若用 FPGA 中逻辑资源实现乘法器,需要消耗大量逻辑资源,降低资源利用率。在 FPGA 中,式(4)通过移位方式容易实现,其运算精度与式(3)相当,可以有效地降低算法实现的逻辑资源占有率。

2.3 修正值计算

四阶差分法的外推预测值表达式为

$$\hat{x}(k+1) = \sum_{i=1}^5 w_i x(i+k-5) \quad (5)$$

式中, $w_i = (3i-7)/10, i=1,2,\dots,5$ 。由于 w_i 运算中涉及乘除法运算,因而需要改进预测值计算方法,为便于 FPGA 实现,改进算法为

$$\hat{x}(k+1) = \sum_{i=1}^5 w_i x(i+k-5) - x(k)/64 \quad (6)$$

式中, $w_i = (3i+4)/64, i=1,2,\dots,5$ 。

在 FPGA 中实现时

$$\begin{aligned} \hat{x}(k+1) = & [x(k-4) \ll 2 + x(k-4) \ll 1 + x(k-4)] \gg 6 + \\ & [x(k-3) \ll 3 + x(k-3) \ll 1] \gg 6 + \\ & [x(k-2) \ll 3 + x(k-2) \ll 2 + x(k-2)] \gg 6 + \\ & [x(k-1) \ll 4] \gg 6 + [x(k) \ll 4 + x(k) \ll 1] \gg 6 \quad (7) \end{aligned}$$

3 试验结果分析

机载数据包含 GPS 输出的经度、纬度和海拔高度等数据,也包含 AHRS 输出的三轴欧拉角、三轴角速度和三轴角加速度等。机载数据中出现的异常值一方面是由测量器件本身精度引起,另一方面是由接收模块引起。图 3a、图 4a、图 5a 分别是某次飞行试验 250~400 s 期间的机载系统接收的海拔高度、俯仰角和滚转角数据。从图中可以看出,原始数据存在异常值和毛刺,采用多项式外推拟合法剔除异常值效果如图 3b、图 4b、图 5b 所示。

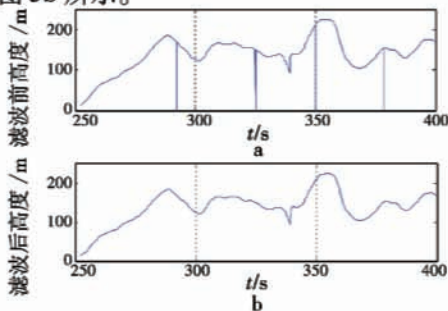


图3 海拔高度滤波效果
Fig.3 The filtering result of height

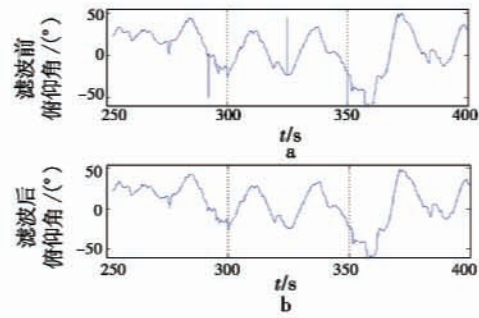


图4 俯仰角滤波效果

Fig.4 The filtering result of pitch

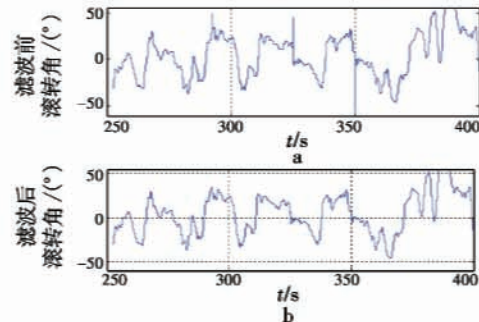


图5 滚转角滤波效果

Fig.5 The filtering result of roll

从滤波后数据曲线可以看出,多项式外推拟合滤波算法能有效地降低高频噪声,剔除数据中异常值。但是,差分法剔除异常值效果依赖于门限 $M(1,x)$ 、 $M(2,x)$,而且门限值难以合理地给定,只能依赖于观测器件性能确定,从而容易发生漏检或虚检的现象。针对这一问题,通过统计不含异常值参数的方差,定出上、下门限,实验结果表明,该方法能够满足飞行试验异常值剔除与控制要求。

4 结论

本文采用 FPGA 设计了多项式外推滤波算法,简化了现有多项式滤波算法,利用移位和加减运算代替乘除运算,提高了算法的运行效率,有效降低了异常值漏检现象,既保留了原有数据特性,又避免了异常值误判,减少了运算量,具有较大的工程应用价值。

参考文献

- [1] 姜大治,韩先平.基于双向检验的异常数据剔除与修复方法[J].电光与控制,2013,20(6):70-74.
JIANG D Z, HAN X P. Abnormal data eliminating and repairing method based on two-sided test[J]. Electronics Optics & Control, 2013, 20(6):70-74.
- [2] 朱学锋.基于聚类模糊系统动态数据野值剔除方法[J].飞行器测控学报,2011,30(5):81-84.
ZHU X F. A new method for outlier removal from dynamic data based on clustering fuzzy system[J]. Journal of Space-

- craft TT & C Technology, 2011, 30(5): 81-84.
- [3] 吕唯唯, 顾亮, 黄雪涛. 采用小波变换实现振动信号数据野点的剔除[J]. 噪声与振动控制, 2012, 32(4): 150-152, 157.
- LÜ W W, GU L, HUANG X T. A method of eliminating outliers in data processing of vibration signal based on wavelet transform[J]. Noise and Vibration Control, 2012, 32(4): 150-152, 157.
- [4] 高宗余, 方建军, 郭文荣. 抗野值鲁棒滤波在微惯性组合导航中的应用[J]. 传感技术学报, 2012, 25(6): 859-863.
- GAO Z Y, FANG J J, GUO W R. The application of robust filtering for outliers restraining in MEMS integrated navigation[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2012, 25(6): 859-863.
- [5] 王光鼎, 张升康, 杨汝良. 一种基于卡尔曼滤波处理的北斗卫星无源组合导航自适应野值剔除方法[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(8): 1981-1984.
- WANG G D, ZHANG S K, YANG R L. An adaptive outlier algorithm based on Kalman filtering for Beidou satellite passive combination navigation[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2008, 30(8): 1981-1984.
- [6] 蔡菲娜, 刘勤贤. Kalman 滤波器的抗干扰算法[J]. 浙江工业大学学报, 2007, 35(3): 279-282, 287.
- CAI F N, LIU Q X. The anti-jamming algorithm of Kalman filter[J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2007, 35(3): 279-282, 287.
- [7] 李健翻, 李学仁. 多项式拟合在试飞数据预处理中的应用[J]. 弹箭与制导学报, 2005, 25(4): 799-801.
- LI J H, LI X R. Application of polynomial fitting for data pre-processing flight test data[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2005, 25(4): 799-801.

(上接第 67 页)

统具有一定的抗干扰能力。仿真结果表明, 理论分析与仿真值基本一致, 与 TDMA 相比较, BT-MAC 协议时延性能明显更优。

参考文献

- [1] SAKHAE E, JAMALIPOUR A, KATO N. Aeronautical Ad Hoc networks [C]//Proceedings of IEEE Wireless Communication & Networking Conference, Las Vegas, 2006: 246-251.
- [2] SAKHAE E, JAMALIPOUR A. The global in-flight internet[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2006, 24(9): 1748-1757.
- [3] 彭艺, 周正中, 查光明. 一种基于负载均衡的动态多信道自组网 MAC 协议[J]. 计算机科学, 2005, 32(10): 44-45.
- PENG Y, ZHOU Z Z, ZHA G M. A dynamic multi-channel MAC protocol based on load balancing for Ad Hoc networks[J]. Computer Science, 2005, 32(10): 44-45.
- [4] 赵琪, 毛玉泉, 任浩. 直升机战术数据链的轮询组网方式分析[J]. 电讯技术, 2010, 50(11): 5-9.
- ZHAO Q, MAO Y Q, REN H. Poll network mode analysis of tactical data link for helicopter[J]. Telecommunication Engineering, 2010, 50(11): 5-9.
- [5] 王叶群, 杨峰, 叶向阳, 等. 一种支持实时性业务的多信道 MAC 协议[J]. 计算机应用研究, 2012, 29(8): 3098-3102.
- WANG Y Q, YANG F, YE X Y, et al. Multi-channel media access control protocol for real-time traffic[J]. Application Research of Computers, 2012, 29(8): 3098-3102.
- [6] YOUNIS O, FAHMY S. HEED: A hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for Ad Hoc sensor networks [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2004, 3(4): 366-379.
- [7] LI F M, MA X L, HU F, et al. Synchronization-based multi-channel multi-interface medium access scheme in Ad Hoc network [J]. IET Communications, 2011, 5(14): 2082-2090.
- [8] HANZO L L, LIEW T H, YEAP B L, et al. Turbo coding, turbo equalization and space-time coding: Exit-chartaided near-capacity designs for wireless channels [M]. Wiley-IEEE Press, 2011: 385-463.
- [9] CLARK S M, HOBACK K A, ZOGG S J F. Statistical priority-based multiple access system and method [P]. United States Patent: 7680077 B1, Mar. 16, 2010.
- [10] HERDER J C, STEVENS J A, COLLINS R. Method and architectures for TTNT symbol rate scaling modes: United States, 7839900B1 [P]. 2010-11-23.