



一种改进的MAD钟差粗差探测方法

黄博华¹ 杨勃航¹ 李明贵¹ 郭忠楷¹ 茅健佑² 王宏¹

¹ 63780部队,海南 三亚,572000

² 61876部队,海南 三亚,572000

摘要:针对传统中位数绝对偏差(median absolute deviation, MAD)方法在探测钟差粗差方面的不足,提出一种改进的MAD钟差粗差探测方法。以一次差分数据为研究对象,通过深入分析传统MAD方法的工作原理,发现传统MAD方法的数学模型表达存在歧义。在优化探测模型结构的基础上,基于岭回归的基本原理,生成动态MAD,有效克服了部分具有显著趋势变化特征的钟差一次差分数据对粗差探测的干扰。使用国际全球卫星导航系统服务组织提供的GPS精密钟差数据进行了实验,并与传统MAD方法进行比较,结果表明,所提方法相较于传统的MAD方法在粗差探测准确率和查全率方面具有明显优势,实际应用价值较高。

关键词:卫星钟差;一次差分;中位数绝对偏差;粗差探测;岭回归

中图分类号: P228

文献标志码: A

卫星钟差数据的质量直接影响星载原子钟性能分析结果的可靠性和钟差预报的精度^[1]。星载原子钟钟差数据的预处理是原子钟稳定性分析、钟差预报的前提和基础,因此欲获得有意义的分析结果,在进行原子钟性能评估之前,需进行数据预处理^[2]。在实际应用中,原始钟差数据常会出现数据间断、跳变和粗差等异常情况^[3],处理不同类型的异常值需要针对性的方法。已有不少学者对于异常值处理开展了研究^[1-12]。对于数据跳变和数据间断问题,郭海荣^[2]提出一种利用移动窗口寻找钟差数据的跳变点的算法;郭吉省^[4]提出一种基于希尔伯特-黄变换的钟差跳变检测算法;Hackman等^[5]给出了非等间隔数据的处理方法。对于粗差问题,冯遂亮^[3]利用小波分析多分辨率的特点对该方法在原子钟数据粗差处理方面的应用进行了初步的探讨;方书山^[6]研究了多元统计方法中的聚类分析在卫星钟差粗差探测中的应用;魏道坤^[7]针对一次差分数据呈现线性趋势的情况提出了一种中值线粗差探测法;张倩倩等^[8]提出一种基于Bayesian原理的星地时间同步钟差粗差探测方法。而最常用的粗差探测传统方法是中位数绝对偏差(median absolute deviation, MAD)^[2-3,9-11],该方法原理简单,计算复杂度低,实际应用效果好。但传统的MAD

方法在粗差探测存在不足:模型表达式存在歧义;对趋势特征明显的粗差探测效果有限。

本文通过对传统MAD方法的深入分析,提出一种改进的MAD钟差粗差探测方法,相较于传统MAD方法,其粗差探测的准确率和查全率有了显著的提升。

1 本文方法

1.1 传统MAD的方法

已知钟差数据 $L = \{l_1, l_2, \dots, l_i\}$, $i = 1, 2, \dots, n$, 对相邻历元间的钟差数据进行一次差分,得到钟差数据对应的一次差分数据 $\Delta L = \{\Delta l_1, \Delta l_2, \dots, \Delta l_j\}$, $j = 1, 2, \dots, m$, 其中 $m = n - 1$, $\Delta l_j = l_{i+1} - l_i$ 。传统MAD通常应用于钟差一次差分数据,其基本原理为:将钟差一次差分数据 Δl_j 与一次差分数据的中位数 k 及MAD数倍之和进行比较:

$$|\Delta l_j| > (k + n \times \text{MAD}) \quad (1)$$

式中, $k = M\{\Delta l_j\}$, 其中 M 表示中位数; $\text{MAD} = M\{|\Delta l_j - k|/0.6745\}$ 。若 Δl_j 满足式(1)时(常数 n 取值根据需要确定),就认为 Δl_j 为粗差点。

在粗差探测出来之后,一般通过将粗差值设为0或其他的值,完成钟差异常值的预处理,本文

主要探讨钟差的粗差探测方法。

1.2 改进的MAD粗差探测方法

本文使用的是国际全球卫星导航系统服务组织提供的全球定位系统(global positioning system, GPS)精密钟差数据,图1为PRN-01卫星(2017-01-01—2017-01-31,5 min采样间隔)的钟差数据和一次差分数据。钟差数据的有效位较多,对异常值不敏感(图1(a)),而一次差分数据异常值特征明显(图1(b)),故一般采用钟差一次差分数据进行异常值处理。传统MAD粗差探测方法原理简单,探测效率高,但仍存在需改进的方面,本文对此进行了分析,提出了改进方法。

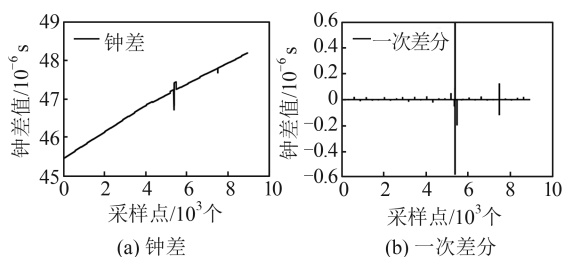


图1 PRN-01卫星钟差及一次差分数据

Fig.1 SCB Data and Single Difference Data of PRN-01 Satellite

式(1)中, Δl_j 是钟差一次差分数据,左边项 $|\Delta l_j|$ 表示钟差一次差分数据的绝对值,右边项中MAD是正值,系数 n 一般取 $3 \sim 5^{[10]}$, $n \times \text{MAD}$ 可视为恒为正值的变量,当右边项 $k + n \times \text{MAD} < 0$ 时,则 Δl_j 均判断为粗差,由此可知,传统MAD模型数学表达存在歧义。MAD方法本质上是判断每个 Δl_j 偏离中数的距离是否超限,当左项为 $|\Delta l_j - k|$ 时,其数学含义为 Δl_j 偏离中数 k 的距离;相应的右项为 $n \times \text{MAD}$ 时,其数学含义为判断 Δl_j 是否为粗差的门限距离值,因此传统的MAD方法可修改为:

$$|\Delta l_j - k| > n \times \text{MAD} \quad (2)$$

式中, k 值为常数,一般情况下可以准确表达一次差分数据的分布特征,但对于趋势特征变化明显的的数据,理想状态下, k 值应该是随趋势变化而不断变化的,采用固定 k 值,会使得偏离 k 值的 Δl_j 难以通过距离约束条件探测粗差。

图2为在同等参数条件下($n=5$),分别采用式(1)和式(2)对PRN-01卫星一次差分数据进行粗差探测的结果(粗差均以中位数替换,下同)。可见,采用式(2)的探测结果(见图2(b))优于式(1)的探测结果(见图2(a)),式(1)中多个粗差值未被探测出来。对于大部分一次差分数据,其趋势变化特征不明显。本文提出基于岭回归^[13-16]

的基本原理,生成由 k 值组成的一次差分趋势线,得到动态 $\text{MAD} = M\{|\Delta l_j - k|/0.6745\}$,可有效克服部分具有显著趋势变化特征的钟差一次差分数据对粗差探测的干扰。

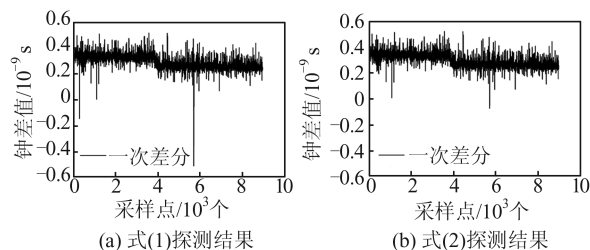


图2 PRN-01卫星剔除粗差后的数据对比图

Fig.2 Comparison of Data of PRN-01 Satellite After Removing Gross Error

岭回归是一种有偏估计回归方法,实质上是一种改良的最小二乘估计法。包含粗差的钟差一次差分数据是一种“病态”数据,采用经典的最小二乘估计法会产生过拟合问题,而岭回归通过损失部分精度,可以得到更可靠的拟合结果。已知岭回归的数学模型为:

$$\hat{\omega} = (X^T X + \lambda I)^{-1} \cdot X^T y \quad (3)$$

式中, X 为钟差一次差分数据的时间序列; y 为钟差一次差分数据序列; I 是单位矩阵; λ 为正则化系数(通常经多次实验确定); $\hat{\omega}$ 为回归值。式(3)联合式(2)可得动态MAD方法,数学模型为:

$$\begin{cases} |\Delta l_j - k| > n \times \text{MAD} \\ k = \hat{\omega} = (X^T X + \lambda I)^{-1} \cdot X^T y \end{cases} \quad (4)$$

在同等参数条件下($n=5$),分别采用式(4)和式(2)对GPS系统PRN-32卫星的一次差分数据进行粗差探测的结果如图3所示。图3(a)为式(4)探测的结果,图3(b)为式(2)探测的结果,图3中红色实线为 k 值,显而易见,图3(a)的红色实线相较于图3(b)更能客观地反映数据的趋势变化特征。在同等参数条件下,采用式(4)的探测结果优于式(2),式(2)中多个粗差值未被探测出来,需进一步减小 n 的取值,但过小的取值意味着判断粗差的距离约束进一步减小,容易导致部分正常值被判断为粗差。

如图4所示,本文方法的改进主要体现在两方面:(1)针对传统MAD方法在数学表达方面存在的歧义,调整了MAD方法的结构,消除了模型表达上的歧义;(2)传统MAD方法在面对趋势性特征明显的的数据时,粗差探测的效果不好,本文采用有偏估计的方法(岭回归),重新定义了 k 的取值,消除了趋势性的影响。

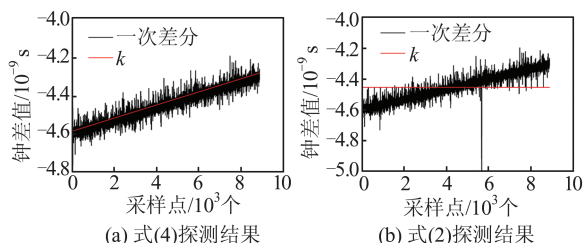


图 3 PRN-32 剔除粗差后的数据对比图

Fig.3 Comparison of Data of PRN-32 Satellite After Removing Gross Error

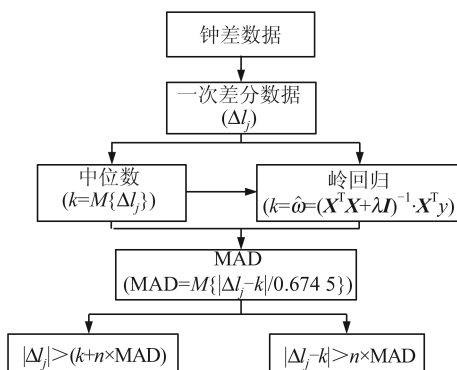


图 4 改进 MAD 方法流程图

Fig.4 Flowchart of Improved MAD Method

2 实验与分析

2.1 量化评价指标

本文采用国际全球卫星导航系统服务组织的 GPS 系统(2017-01-01—2017-01-31)的 5 min 采样间隔的精密钟差数据进行实验,验证本文方法的有效性。GPS 系统在轨运行 32 颗卫星,由于 PRN-03、PRN-06、PRN-08、PRN-21 和 PRN-23 星数据存在间断,PRN-04 星无数据,因此上述卫星不参与实验。另外,本文方法主要与传统 MAD 方法进行对比,利用准确率(P)和查全率(R)两个指标对不同方法的粗差探测能力进行量化评估。

假设钟差数据中存在粗差的个体总数为 C ,探测出粗差的个体总数为 B ,正确探测的粗差个体总数为 A ,则准确率和召回率计算公式为:

$$\begin{cases} P = \frac{A}{B} \times 100\% \\ R = \frac{A}{C} \times 100\% \end{cases} \quad (5)$$

式中, P 为准确率; R 为召回率。

2.2 实验结果和分析

分别采用改进 MAD 方法(式(4)和式(2))和传统 MAD 方法(式(1))进行了对比实验,本文参数均通过多次实验获得,为保证实验条件的一致

性,对于式(1)和式(2)一般取同一个 n 值,对于式(2)和式(4)一般通过优化 n 的取值,使得约束条件保持同一性。本文实验结果如图 5 和图 6 所示,图 5 和图 6 中灰色实线为原始数据,黑色实线为处理后数据,红色实心圆为粗差值。图 5(c)在 $n=5, \lambda=0.5$ 参数条件下,准确探测出所有的粗差值,准确率和召回率均为 100%(见表 1)。同样,图 5(b)在 $n=5$ 参数条件下,准确探测出所有的粗差值,准确率和召回率均为 100%,这是由于 PRN-02 星的钟差一次差分数据的趋势变化特征不明显,没影响粗差探测,但对于图 5(a),在 $n=5$ 参数条件下,式(1)右边项 $k+n \times \text{MAD}$ 为负值,导致所有的钟差一次差分数据均被探测为粗差,表 1 中准确率和召回率的结果没有实际意义,若继续增加 n 的取值,使得 $k+n \times \text{MAD}$ 为正,即增加了参数寻优的计算成本,也不适合实际应用。

图 6(c)在 $n=10, \lambda=0.5$ 参数条件下,准确探测出所有的粗差值,准确率和召回率均为 100%,图 6(b)在 $n=2$ 的参数条件下,准确率为 89.02%,召回率为 96.05%,其中,探测出粗差的个体总数 $B=82$,实际的真实值为 76,表明其中至少有 6 个错误探测值,准确探测的个数为 73,其中有 3 个粗差未被探测出来(图 6(b)绿色实线区域),这进一步说明错误探测的个数为 9(与图 6(b)蓝色实线区域红色实心点个数一致)。分析错误粗差探测点的分布特征可知,由于 PRN-10 星钟差一次差分数据趋势性特征明显,错误的探测点集中分布在数据首尾部分,由此表明,对于趋势特征明显的钟差一次差分数据,采用动态 MAD 的方法能取得更好的探测效果。图 6(a)在 $n=2$ 的参数条件下,准确率为 91.30%,召回率为 82.89%,其中,探测出粗差的个体总数 $B=69$,实际的真实值为 76,正确探测出的个数 $A=63$,其中有 6 个错误探测值(图 6(a)蓝色实线区域),这说明有 13 个粗差未被探测出来(图 6(a)绿色实线区域),表明传统 MAD 方法由于模型结构的不合理,导致探测能力不及本文方法。

特别指出,在图 6 的实验中,公共参数 n 设置存在差异(图 6(c)中, $n=10$;图 6(a)、图 6(b)中, $n=2$),这是由于图 6(c)采用的是式(4)模型,动态 MAD 方法准确地表达了趋势性的变化特征,使得距离约束条件 $n \times \text{MAD}$ 的取值不会偏大,而采用固定 k 值会使 $n \times \text{MAD}$ 的取值偏大,相应的 n 的取值偏小,通过对参数的不断优化,动态 MAD 方法可以最大限度地准确识别出所有的粗差。

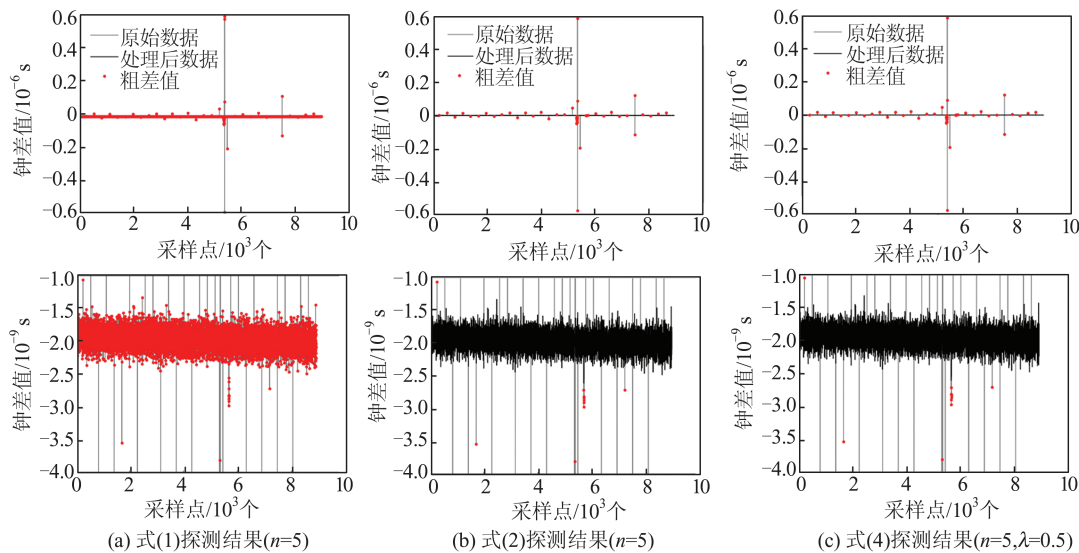


图5 PRN-2卫星实验结果

Fig.5 Experiment Results of PRN-2 Satellite

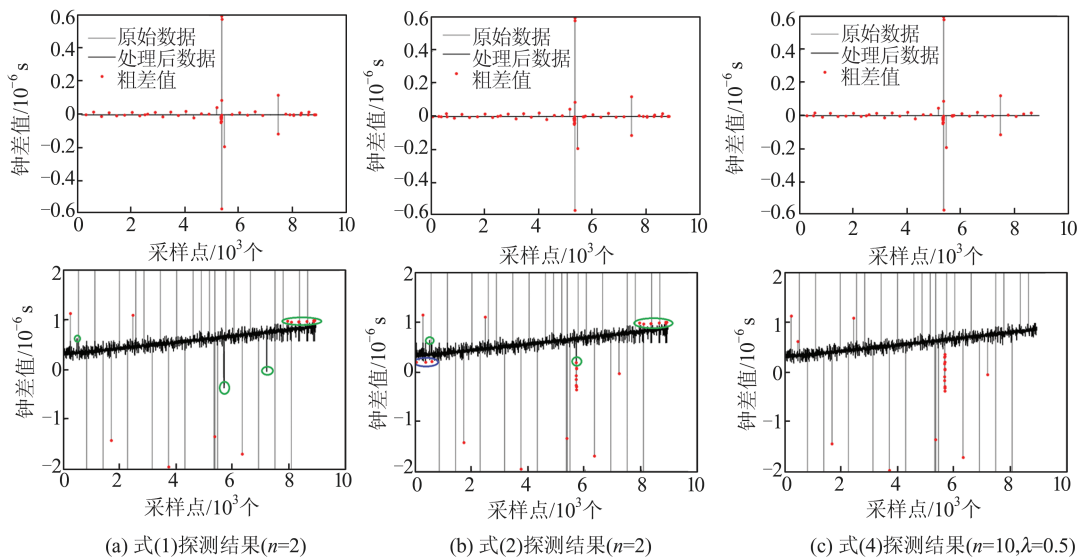


图6 PRN-10卫星实验结果

Fig.6 Experiment Results of PRN-10 Satellite

实验结果表明,本文方法通过优化MAD模型结构和改进动态MAD,使粗差探测的准确率和召回率大幅提高。对GPS系统26颗可用卫星的钟差数据进行了实验,说明本文方法的普适性。式(1)、式(2)和式(4)的公共参数 n 的取值存在差异,为保证实验环境的同一性,本文利用式(4)模型,首先,通过多次重复实验取得最优参数(是指在该参数条件下,粗差识别的准确度和召回率达到最优);然后,以最优参数为参考,对式(1)、式(2)模型采用同一参数,当一次差分数据趋势变化特征明显时,式(2)采用固定 k 值,导致距离约束条件偏大,故参数设置小于式(4)的参数,与式(1)保持一致,但距离约束条件 $n \times \text{MAD}$ 相等,可以认为实验环境具备同一性。表1列出了GPS系统26颗数据可用卫星的钟差一次

差分数据粗差探测结果。

分析表1可得,实验结果分为3类:

1)表1中加粗字体为趋势特征明显的一次差分数据的实验结果,包括PRN-01、PRN-10、PRN-26和PRN-32星。其中,PRN-01(图1)存在一个明显的频跳,但幅度有限,式(4)中的 k 变化范围不大,与式(2)的固定值差异较小,所以式(2)和式(4)的探测结果保持一致,均优于式(1)的结果;PRN-10(图6)趋势特征显著,式(4)的结果优于式(2)和式(1),同理PRN-26和PRN-32星的实验结果与PRN-10星一致,但式(1)的结果由于 k 值为负导致所有数据被判定为粗差,实验结果无意义。

2)表1中PRN-13、PRN-14、PRN-29和PRN-31星采用式(1)的探测结果是部分正常值被探测

为粗差,这是由于 k 为负值,但 $(k+n\times\text{MAD})$ 值为正,远小于式(2)中的右边项 $n\times\text{MAD}$,在同一参数条件下,式(1)的距离约束过小,部分正常值被探测为粗差,对于PRN-02、PRN-07、PRN-22、PRN-25、PRN-26和PRN-32星,被探测出粗差的个体总数 B 为8 927(样本总数),所有的数据均被探测为粗差,这是由于式(1)中的 k 为负,且 $(k+n\times\text{MAD})$ 也为负,导致结果无意义。

表 1 实验结果统计
Tab.1 Statistics of Experiment Results

卫星	式(1)						式(2)						式(4)					
	n	A	B	C	$P/\%$	$R/\%$	n	A	B	C	$P/\%$	$R/\%$	n	A	B	C	$P/\%$	$R/\%$
PRN-01	4	67	67	77	100	87.01	4	77	77	77	100	100	8	77	77	77	100	100
PRN-02	5	68	8 927	68	0.76	100	5	68	68	68	100	100	5	68	68	68	100	100
PRN-05	8	55	55	59	100	93.22	8	58	58	59	100	98.31	8	59	59	59	100	100
PRN-07	8	59	8 927	59	0.66	100	8	59	59	59	100	100	8	59	59	59	100	100
PRN-09	10	52	55	75	94.55	69.33	10	75	77	75	97.40	100	10	75	75	75	100	100
PRN-10	2	63	69	76	91.30	82.89	2	73	82	76	89.02	96.05	10	76	76	76	100	100
PRN-11	10	54	54	58	100	93.10	10	54	54	58	100	93.10	10	58	58	58	100	100
PRN-12	8	59	59	59	100	100	8	59	59	59	100	100	8	59	59	59	100	100
PRN-13	8	42	4 080	63	1.03	66.67	8	63	63	63	100	100	8	63	63	63	100	100
PRN-14	8	26	900	59	2.89	44.67	8	59	59	59	100	100	8	59	59	59	100	100
PRN-15	8	59	74	59	79.73	100	8	59	59	59	100	100	8	59	59	59	100	100
PRN-16	8	58	58	59	100	98.31	8	59	59	59	100	100	8	59	59	59	100	100
PRN-17	8	57	57	60	100	95.00	8	60	60	60	100	100	8	60	60	60	100	100
PRN-18	8	55	55	59	100	93.22	8	59	59	59	100	100	8	59	59	59	100	100
PRN-19	8	58	58	60	100	96.67	8	59	59	60	100	98.33	8	60	60	60	100	100
PRN-20	8	50	50	57	100	87.72	8	51	51	57	100	89.47	8	57	57	57	100	100
PRN-22	8	59	8 927	59	0.66	100	8	59	59	59	100	100	8	59	59	59	100	100
PRN-24	8	54	56	54	96.43	100	8	54	54	54	100	100	8	54	54	54	100	100
PRN-25	10	86	8 927	86	0.96	100	10	86	88	86	97.72	100	10	86	86	86	100	100
PRN-26	3	72	8 927	72	0.81	100	3	69	69	72	100	95.83	15	72	72	72	100	100
PRN-27	8	56	56	75	100	74.67	8	74	75	75	98.67	100	8	75	75	75	100	100
PRN-28	8	55	59	59	93.22	100	8	59	59	59	100	100	8	59	59	59	100	100
PRN-29	8	31	5 187	59	5.98	52.54	8	59	59	59	100	100	8	59	59	59	100	100
PRN-30	8	72	72	75	100	96.00	8	75	75	75	100	100	8	75	75	75	100	100
PRN-31	8	59	7 853	59	0.75	100	8	59	59	59	100	100	8	59	59	59	100	100
PRN-32	3	75	8 927	75	0.84	100	3	72	72	75	100	96.00	8	75	75	75	100	100

3)表1中剩余卫星钟差一次差分趋势稳定, k 值为正,所以在同一参数条件下,3种模型的实验结果较好,但式(4)的实验结果整体上仍优于其他两种模型。

由上述分析可知,本文模型结构合理,不仅可有效避免 k 值为负导致大量的错误探测结果,而且显著的趋势变化特征对粗差探测结果影响不大,具有较强的普适性。

3 结 语

本文通过分析传统MAD粗差探测方法的工作原理,针对其在模型结构方面存在的不足,提出了一种改进的MAD钟差粗差探测方法,具有以下特点:(1)本文方法优化了传统MAD的模型

结构,修正了数学模型表达中的歧义,避免了大量错误探测结果的出现;(2)本文方法基于岭回归的基本原理,优化 k 值的选取,形成动态MAD,有效克服了趋势变化特征显著的钟差一次差分数据对粗差探测的干扰,提高了粗差探测的准确率和召回率,有效控制了算法的复杂度,具备实际应用价值。

参 考 文 献

[1] Wang Ning. Study on the Methods of Clock Bias Data Preprocessing and Performance Analysis for On-Board Atomic Clocks of BDS[D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2017 (王宁. BDS星载原子钟钟差数据预处理与钟性能分析研究[D]. 郑州:信息工程大学, 2017)

- [2] Guo Hairong. Study on the Analysis Theories and Algorithms of the Time and Frequency Characterization for Atomic Clocks of Navigation Satellite[D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2006 (郭海荣. 导航卫星原子钟时频特性分析理论与方法研究[D]. 郑州: 信息工程大学, 2006)
- [3] Feng Suiliang. Study on the Methods of Data Preprocessing and Performance Analysis for Atomic Clocks[D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2009 (冯遂亮. 原子钟数据预处理与钟性能分析方法研究[D]. 郑州: 信息工程大学, 2009)
- [4] Guo Jixing. Time Scale Steering in UTC (NIM) [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2013 (郭吉省. UTC(NIM)原子时标驾驭研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2013)
- [5] Hackman C, Parker T E. Noise Analysis of Unevenly Spaced Time Series Data[J]. *Metrologia*, 1996, 33(5): 457-466
- [6] Fang Shushan. Research of GPS Satellite Clock Error Integrity Monitoring and Algorithm Implementation [D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2011 (方书山. GPS卫星钟差完备性监测研究与算法实现[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2011)
- [7] Wei Daokun. Study on the Satellite Clock Bias Forecast Model[D]. Xi'an: Chang'an University, 2014 (魏道坤. 卫星钟差预报模型研究[D]. 西安: 长安大学, 2014)
- [8] Zhang Qianqian, Han Songhui, Du Lan, et al. Bayesian Methods for Outliers Detection and Estimation in Clock Offset Measurements of Satellite - Ground Time Transfer[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2016, 41(6): 772-777 (张倩倩, 韩松辉, 杜兰, 等. 星地时间同步钟差异常处理的Bayesian方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2016, 41(6): 772-777)
- [9] Huang Guanwen. Research on Algorithms of Precise Clock Offset and Quality Evaluation of GNSS Satellite Clock [D]. Xi'an: Chang'an University, 2012 (黄观文. GNSS星载原子钟质量评价及精密钟差算法研究[D]. 西安: 长安大学, 2012)
- [10] Wang Yupu, Lü Zhiping, Chen Zhengsheng, et al. A New Data Preprocessing Method for Satellite Clock Bias and Its Application in WNN to Predict Medium-Term and Long-Term Clock Bias[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2016, 41(3): 373-379 (王宇谱, 吕志平, 陈正生, 等. 一种新的钟差预处理方法及在WNN钟差中长期预报中的应用[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2016, 41(3): 373-379)
- [11] Wang Y P, Lu Z P, Qu Y Y, et al. Improving Prediction Performance of GPS Satellite Clock Bias Based on Wavelet Neural Network[J]. *GPS Solutions*, 2017, 21(2): 523-534
- [12] Ma Chaozhong, Zhu Jianqing, Han Songhui. Model Selection Method Based on ARIMA Model in Outliers Detection of Satellite Clock Offset [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(2): 167-172 (马朝忠, 朱建青, 韩松辉. 基于ARIMA模型的卫星钟差异常值探测的模型选择方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2020, 45(2): 167-172)
- [13] Hoerl A E, Kennard R W. Ridge Regression: Biased Estimation for Nonorthogonal Problems[J]. *Technometrics*, 1970, 12(1): 55-67
- [14] Dwivedi T D, Srivastava V K, Hall R L. Finite Sample Properties of Ridge Estimators[J]. *Technometrics*, 1980, 22(2): 205-212
- [15] Golub G H, Heath M, Wahba G. Generalized Cross-Validation as a Method for Choosing a Good Ridge Parameter[J]. *Technometrics*, 1979, 21(2): 215-223
- [16] Hastie T. Ridge Regularization: An Essential Concept in Data Science[J]. *Technometrics*, 2020, 62(4): 426-433

An Improved Method for MAD Gross Error Detection of Clock Error

HUANG Bohua¹ YANG Bohang¹ LI Minggui¹ GUO Zhongkai¹
MAO Jianyou² WANG Hong¹

¹ Troops 63780, Sanya 572000, China

² Troops 61876, Sanya 572000, China

Abstract: Objectives: Satellite clock difference (SCB) is affected by many factors, such as data discontinuity,

(下转第761页)

fective extraction method for moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) data is the combination of Beck+Derivatives, and the best extraction methods for visible infrared imaging radiometer suite (VIIRS) data are the combination of Beck + Threshold and that of Elmore + Derivatives. **Conclusions:** PhenoCams data and remote sensing data have obvious differences in spatial and temporal scale, and the PhenoCams data provide a higher temporal resolution than the remote sensing data. Moreover, the PhenoCams data are less affected by weather conditions, and thus the signal pollution caused by weather conditions can be reduced. Regulating the operational PhenoCams observation and expanding the spectral observation range of PhenoCams will improve the extraction of phenological information and help validate remote sensing phenological information. All of this certainly can help build a stable and long-term scientific data set for vegetation observations.

Key words: phenological camera; remote sensing data; phenology observation; Xinjiang Tianshan of China; grassland; curve fitting methods

First author: MA Yonggang, PhD, professor, specializes in remote sensing and phenology. E-mail: mayg@xju.edu.cn

Corresponding author: XIAO Zhengqing, PhD. E-mail: xiaoqz@xju.edu.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China (41761013); the Research Project of the Higher Education Institutions of the Xinjiang Uygur Autonomous Region of China (XJEDU2017M007); the Natural Science Foundation of the Xinjiang Uygur Autonomous Region of China (2019D01C022).

引文格式: MA Yonggang, HUANG Yue, XIAO Zhengqing. Comparative Analysis of Phenological Extraction Methods for Grasslands in High-Altitude Mountainous Areas[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2022, 47(5): 753-761. DOI: 10.13203/j.whugis20190469 (马勇刚, 黄粤, 肖正清. 高海拔山区草地物候提取方法对比分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2022, 47(5): 753-761. DOI: 10.13203/j.whugis20190469)

(上接第 752 页)

jump and gross error, among which the gross error is the most representative. Traditional SCB gross error detection method is the median absolute deviation (MAD) method. **Methods:** With the single difference of SCB as the research object, we analyzed the working principle of traditional MAD method. In view of the deficiency of traditional MAD in SCB gross error detection, an improved gross error detection method was proposed. Firstly, the ambiguity in mathematical expression was eliminated by optimizing the model structure, and then dynamic MAD was generated based on the basic principle of ridge regression, which effectively overcame the interference of some single difference data with significant trend changes on gross error detection. **Results:** We used International Global Navigation Satellite System Service precision SCB as reference for experiments. Compared with traditional MAD, the detection accuracy and recall rate of the proposed method were better than traditional MAD, especially for the data with obvious change of trend characteristics. **Conclusions:** The proposed method has obvious advantages in gross error detection accuracy and recall rate and has high application value.

Key words: satellite clock bias; single difference; median absolute deviation(MAD); gross error detection; ridge regression

First author: HUANG Bohua, master, specializes in spatial data updating and mining. E-mail: 15799034054@163.com

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China (61973328).

引文格式: HUANG Bohua, YANG Bohang, LI Minggui, et al. An Improved Method for MAD Gross Error Detection of Clock Error[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2022, 47(5): 747-752. DOI: 10.13203/j.whugis20190430 (黄博华, 杨勃航, 李明贵, 等. 一种改进的 MAD 钟差粗差探测方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2022, 47(5): 747-752. DOI: 10.13203/j.whugis20190430)