



武汉大学学报(信息科学版)

Geomatics and Information Science of Wuhan University

ISSN 1671-8860,CN 42-1676/TN

《武汉大学学报(信息科学版)》网络首发论文

题目：一种新的北斗卫星钟差预处理方法
作者：王旭，柴洪洲，王昶，李金生，种洋
DOI：10.13203/j.whugis20200232
收稿日期：2020-05-16
网络首发日期：2021-02-23
引用格式：王旭，柴洪洲，王昶，李金生，种洋. 一种新的北斗卫星钟差预处理方法. 武汉大学学报(信息科学版). <https://doi.org/10.13203/j.whugis20200232>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI:10.13203/j.whugis20200232

引用格式:

王旭, 柴洪洲, 王昶, 等. 一种新的北斗卫星钟差预处理方法[J]. 武汉大学学报 信息科学版, 2020,

DOI:10.13203/j.whugis20200232 (WANG Xu, CHAI Hongzhou, WANG Chang, et al. A New Data Preprocessing Method for

Beidou Satellite Clock Bias[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2020, DOI:10.13203/j.whugis20200232)

一种新的北斗卫星钟差预处理方法

王旭^{1,2}, 柴洪洲¹, 王昶³, 李金生², 种洋¹

1.信息工程大学地理空间信息学院, 河南 郑州 450001;

2.辽宁生态工程职业学院测绘工程学院, 辽宁 沈阳 110101;

3.辽宁科技大学土木工程学院, 辽宁 鞍山 114051;

摘要: 为了提高卫星钟差预报的精度, 针对钟差数据中量级较小的误差, 提出一种基于中位数 (MAD) 的小波阈值法钟差数据预处理策略 (WMAD)。首先, 利用小波阈值方法将钟差数据进行分解, 得到分解后的高频系数和低频系数。然后利用 MAD 处理各层影响阈值设置的高频系数, 通过处理后的高频系数计算阈值, 从而提高小波阈值法剔除小异常值的能力。最后, 用北斗二号卫星钟差数据进行了验证, 结果表明: 本文方法可以有效剔除钟差历史观测序列中量级较小的误差, 并可对卫星钟差进行精确的预报。

关键词: 卫星钟差; 中位数; 小波阈值法; 小波神经网络; 预报

中图分类号: P237 **文献标志码:** A

目前钟差建模与预报的相关研究主要是以卫星钟差 (相位) 数据为支撑而开展的。可靠有效的卫星钟差数据是实现高精度卫星钟差建模与预报的前提和基础^[1]。由于星载原子钟在卫星高速运动过程中会出现钟切换、调相或调频等操作, 同时还会受到外部环境及星载钟自身等多种不确定因素的影响, 在获取的原始钟差数据中常会出现跳变、粗差和间断异常情况, 有时在测量中还会出现无数据段的现象。如果用这样的数据进行数据分析及建模预报, 会大大影响数据分析及建模预报的质量, 所以使用钟差数据之前, 合理有效的数据预处理是非常必要的步骤^[2]。

目前, 针对钟差数据预处理给出了不同形式的多种策略。对于钟差数据的其他异常情况 (跳变、数据间断、无数据段等), 现有的策略和处理方法已相对完善和有效^[3]。而针对卫星钟差数据所含粗差等异常值处理方面, 一些学者也提出了许多解决方法。常用的方法有中位数 (Median Absolute Deviation, MAD) 方法^[4]、抗差估计方法^[5]、Bayesian 方法^[6]、小波分析 (wavelet analysis) 探测法^[7]等。其中 MAD 方法的粗差探测方法是当前使用最为广泛的一种方法。但是该方法虽可有效探测出超出阈值的异常值, 却不具备对偏离真值但仍在阈值内的数据探测能力^[8], 很难剔除钟差中量级较小异常值。而小波阈值法具有多分辨率分析的特点, 可以有效探测出数据中量级较小的异常值^[9], 但是较小异常值的剔除与有效阈值的设置有很大关系^[10]。因此, 本文针对钟差数据中量级较小异常值处理的问题, 提出一种小波阈值法 (Wavelet threshold)^[11]与 MAD 法结合的钟差预处理策略 (WMAD), 其基本思想: 利用 MAD 方法处理小波分解后各层的高频系数, 将影响阈值设定的较大高频系数剔除并用内插方法恢复, 利用处理后的高频系数计算各层阈值, 提高小波阈值法剔除小异常值的能力。最后利用本文提出的方法对北斗超快速钟差 (WHU) 进行实验处理, 验证方法的有效性。计算结果表明本文提出的 WMAD 卫星钟差处理方法能够有效处理钟差数据中的量级较小的误差, 同时利用处理后的钟差数据建模, 能够有效提高卫星钟差预报精度。

1. WMAD 钟差的预处理策略

1.1 基于中位数的粗差探测

通常, 卫星钟差数据的数值相对较大, 往往容易掩盖其中所含的粗差等异常数据, 所以钟差数据的

收稿日期: 2020-05-16

项目资助: 国家自然科学基金 (41574010; 41574013)。

第一作者: 王旭, 在读博士, 讲师, 研究方向: 测量数据处理理论与方法。wangxu19830411@126.com

粗差探测一般是在其对应的频率数据上进行。频率数据相对于相位数据，其有效位数减少并且数据的数值也变小了，这样便于进行异常值识别；同时，异常的钟差数据对应于频率数据的峰值，而峰值较容易探测^[4]。MAD 方法的思路是：将频率数据 y_i 与频率数据序列的中数(MED) m 加上中位数(MAD)的若干倍之和相比较，即若钟差频率数据满足

$$|y_i| > (m + n \times MAD) \quad (1)$$

时就认为是粗差点，同时剔除该值，然后用内插方法来内插出该数值。式(1)中 $m = \text{Median}(y_i)$, $MAD = \text{Median}\{(y_i - m)/0.6745\}$ 。

1.2 WMAD 钟差的预处理策略

1995年, D.L.Dohono 在小波变换基础上提出了阈值去噪方法, 其基本思想是^[12], 当小波系数 $cD_{j,k}$ 小于某个临界阈值时, 认为这时的 $cD_{j,k}$ 主要是由噪声引起的, 应该舍弃; 当 $cD_{j,k}$ 大于这个临界阈值时, 认为这时的小波系数主要是由信号引起的, 那么就把这一部分的 $cD_{j,k}$ 按某一个固定量向零收缩(软阈值方法), 然后用新的小波系数进行小波重构得到去噪后信号。小波阈值法工作流程^[12]详见有关参考文献, 本文主要详细说明 WMAD 钟差数据处理策略的计算流程。

WMAD 策略的基本思路是: 利用小波分析对钟差数据进行多层分解得到各层的高频系数, 利用 MAD 法对各层较大的高频系数进行剔除, 并用内插方法内插出剔除的高频系数, 再利用处理后的高频系数计算各层阈值并进行阈值化处理得到处理后的高频系数, 然后将高频系数与低频系数重构即得到最终“干净”的钟差序列。其基本步骤如下:

(1) 小波分解: 选择一种小波函数, 对变化率数据进行 N 层分解, 得到低频系数和各层高频系数。在小波函数的选择上, 选择适合非线性钟差数据的 db6^[13]小波函数, 并利用文献[14]中的方法确定分解层数。

(2) 处理高频系数: 利用 MAD 方法对较大的高频系数进行处理。将每层的高频系数 $cD_{j,k}$ 与高频系数序列的中数(MED) m 加上中位数(MAD)的若干倍之和相比较, 即若高频系数满足,

$$|cD_{j,k}| > (m + n \times MAD) \quad (2)$$

就认为该高频系数对应的就是较大的峰值, 同时剔除该高频系数, 然后用三次分段样条内插方法^[2]来内插剔除的数据; 再对处理后的高频系数 $cD_{1j,k}$ 计算每层噪声的估计方差 σ , 在此基础上计算各层的阈值 λ 。其表达式为^[14]:

$$\lambda = \sigma \sqrt{2 \log(N)} \quad (3)$$

式中 N 为高频系数个数。

(3) 阈值化处理: 选择阈值函数对分解后的小波高频系数进行估计, 阈值函数体现了对小波分解后各层系数处理的策略。本文选用软阈值函数估计小波系数^[15], 其表达式为:

$$\widehat{cD}_{1j,k} = \begin{cases} \text{sign}(cD_{1j,k}) \cdot (|cD_{1j,k}| - \lambda), & |cD_{1j,k}| \geq \lambda \\ 0, & |cD_{1j,k}| < \lambda \end{cases} \quad (4)$$

其中 $cD_{1j,k}$ 为小波系数, $\widehat{cD}_{1j,k}$ 为估计小波系数, λ 为阈值。上式的含义就是把信号分解后得到的小波系数的绝对值和给定的阈值进行比较, 其策略是小于给定阈值的变为 0, 大于阈值的系数变为该系数与阈值的差值, 并保持符号不变。

(4) 小波重构: 最后将处理后的高频系数和低频系数进行小波重构, 得到最终“干净”的钟差序列。

2. 实验分析

本文使用武汉大学 GNSS 数据中心提供的 15min 采样间隔的 BDS 超快速钟差(WHU)产品, 该数据产品包含地球静止轨道 (GEO,C01~C05)、倾斜地球同步轨道 (IGSO,C06~C10) 以及中圆地球轨道 (MEO,C11~C14) 的 14 颗 BDS 卫星的钟差数据。此外, WHU 产品包含 48 小时钟差数据, 其中前 24 小时钟差数据为超快速实测钟差产品 (WHU-O), 而后 24 小时钟差数据为通过 WHU-O 数据建模预报得到的超快速预报钟差产品 (WHU-P)^[16]。本实验选取该时间段内数据连续、完整的所有在轨卫星 (C03 和 C05 卫星数据不完整) 进行实验分析。

2.1 建模精度分析

为了验证本文提出钟差处理策略的有效性，选择 C01、C08、C13 三颗 BDS 卫星进行实验，这三颗卫星覆盖了 BDS 三种轨道类型。首先，分别利用小波阈值算法以及本文提出的 WMAD 处理策略对三颗卫星 WHU-O 数据进行预处理，以对应时间段的 BDS 精密钟差值为真值，采用信噪比（SNR）和均方根误差（RMS）来评价数据预处理效果（信噪比越大、均方误差越小，预处理的效果越好）。其中信噪比的计算公式为^[15]：

$$SNR = 10 \times \lg \left\{ \frac{\sum_t v^2(t)}{\sum_t [v(t) - u(t)]^2} \right\} \quad (5)$$

式中， $v(t)$ 为处理后的钟差数据， $u(t)$ 为精密钟差值。然后，再用预处理后的钟差数据分别通过小波神经网络（WNN）建模^[4]预报卫星钟差，利用均方根误差（RMS）来评价预报的效果；利用最大，最小误差的绝对值（Range）评价模型预报的稳定性^[17]。图 1 给出了三颗卫星钟差相位和一次差分数据。

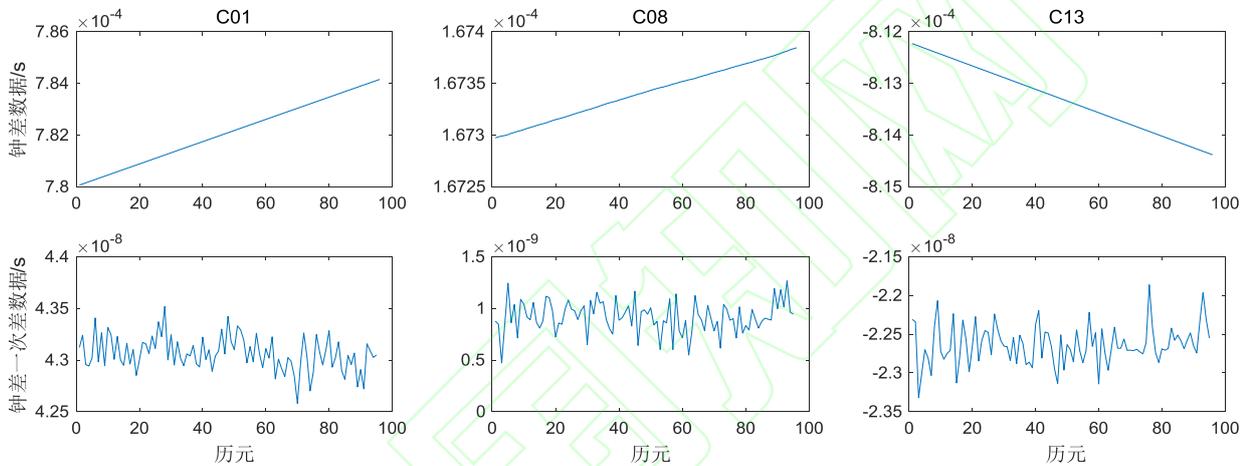


图 1 三颗卫星钟差数据及其对应的一次差分数据

Fig. 1 SCB data of three satellite clocks and their corresponding a once difference data

从图 1 可以看到，在短时间段的卫星钟差数据中不存在较为显著的数据异常（包括数据粗差、数据间断及数据跳变）。相比于钟差相位数据，一次差分数据序列中出现异常值时会出现峰值，这样可以放大钟差数据中量级较小的误差，便于小误差的识别。此外，三颗卫星钟差进行一次差分后出现了很多峰值，如果用含有大量小误差的数据进行建模预报钟差数据，也会影响预报的精度，所以在建模之前对钟差数据中含有的小误差进行剔除是很有必要的。为了更好的分析本文方法对钟差数据处理的效果，下面用“钟差一次差分图”来分析三颗卫星钟差数据处理后的效果。

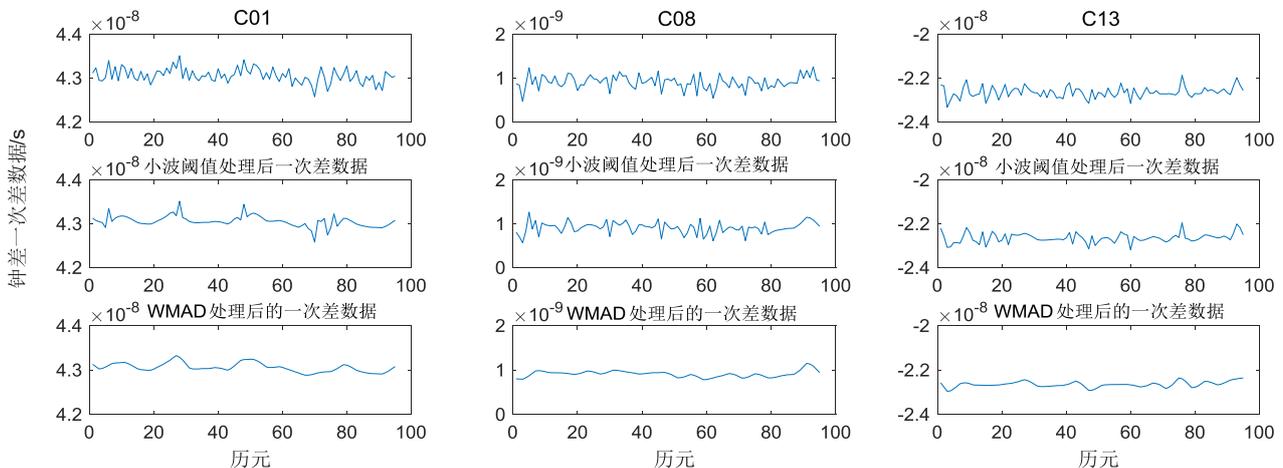


图 2 小波阈值法和 WMAD 法预处理效果图

Fig. 2 effect picture preprocessing based on Wavelet threshold and WMAD methods

从图 2 可以很明显的看出，小波阈值算法经过频率域处理能够很好的将相对较小的峰值点处理掉，但是不能准确的剔除相对较大峰值点。这是由于较大误差的影响，在计算每层阈值时，会使每层计算的噪声方差变小，从而计算的阈值会变小，不能探测出一些代表较大误差值的高频系数；而 WMAD 预处理策略是先将代表较大误差的高频系数剔除，再用内插的方法来补充该点的高频系数，然后再根据处理后的高频系数计算每层阈值，这样处理后既能有效剔除较大误差的同时又能很好的抑制较小的误差，更好的净化数据。表 1 给出了；两种方法对三颗卫星钟差预处理后的信噪比和均方根误差统计值。

表 1 小波阈值法和 WMAD 法预处理后的统计值

Tab.1 Statistics of preprocess results of Wavelet threshold and WMAD methods

卫星钟	Wavelet threshold		WMAD	
	SNR/dB	RMSE/ns	SNR/dB	RMSE/ns
C01	110.451	0.043	111.465	0.029
C08	101.805	0.025	102.684	0.017
C13	113.349	0.032	114.647	0.021

从表 1 可以看到，WMAD 方法得到信噪比均大于小波阈值方法，同时该方法得到的均方根误差均小于小波阈值方法。总体来看，WMAD 方法预处理的效果要优于小波阈值方法。

2.2 预报精度分析

为了验证本文提出方法的有效性，先采用小波阈值法和 WMAD 法对 WHU-O 钟差数据进行预处理，再利用 WNN 对处理后的钟差数据建模，预报接下来 24h 的钟差。两种预处理方法后的 WNN 模型分别记做 W-WNN 和 WM-WNN。图 3 给出了 WNN、W-WNN 和 WM-WNN 三种模型在 24h 预报时长下所有卫星预报的精度。

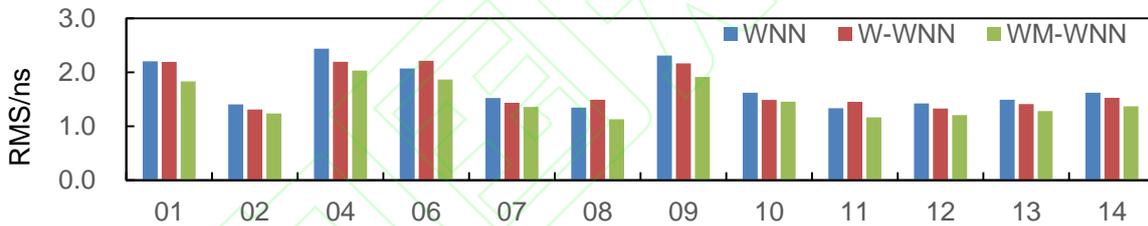


图 3 三种模型在 24h 预报时长下所有卫星预报的精度

Fig.3 the prediction accuracy of all satellite prediction under 24h predicting time lengths by three models

从图 3 可以看出，三种模型中，WNN 预报的精度最差，而 WM-WNN 模型预报的精度最优。同时发现，C04、C06、C09 三颗卫星预报精度较差。为了定量的对比三种模型预报精度，表 3 给出了不同类型轨道的所有卫星钟使用三种模型预报的平均精度统计值。“平均值”含义是所有卫星预报结果 RMS 和 Range 的平均统计值。

表 2 WNN、W-WNN、WM-WNN 三种模型预报效果统计值/ns

Tab.2 Statistics of prediction results of WNN,W-WNN and WM-WNN models/ns

卫星轨道 类型	WNN model		W-WNN model		WM-WNN model	
	RMS	Range	RMS	Range	RMS	Range
GEO 卫星	2.017	2.124	1.900	1.971	1.744	1.621
IGSO 卫星	1.775	2.407	1.759	2.334	1.549	2.053
MEO 卫星	1.468	1.334	1.430	1.361	1.194	1.133
平均值	1.733	1.979	1.685	1.919	1.488	1.589

从表 2 可以看到，总体上，WM-WNN 模型预报效果要好于 W-WMM 和 WNN 模型，相比于两种模型，该模型预报的精度分别提高了约 14.1%和 11.7%，而预报的稳定性提高了约 19.7%和 17.2%。这说明通过对钟差数据预处理，剔除了钟差数据中含有的误差，可以有效的提高 WNN 模型钟差预报的精度。

同时发现，在对 IGSO 和 MEO 两类轨道卫星预报时，W-WNN 模型预报的效果较 WNN 并不明显，这样证明了本文提出的钟差预处理方法要更优于小波阈值方法。另外，三种预报模型对 MEO 轨道的卫星预报的平均精度和稳定性优于其他两类轨道卫星。这是因为，MEO 轨道卫星钟差数据的精度优于 IGSO 和 GEO 两类轨道卫星^[18]。所以，使用较高精度钟差数据建模的 MEO 轨道卫星，会得到优于其他两类轨道卫星的预报精度。

为了进一步验证 WM-WNN 模型的预报性能，使用 WHU-O 产品 24h 钟差数据进行建模，预报接下来 24h 的钟差。并将预报效果与 WHU-P 产品进行对比分析。图 4 给出了 14 颗卫星使用 WM-WNN 和 WHU-P 两种模型预报 24 h 钟差的预报精度。

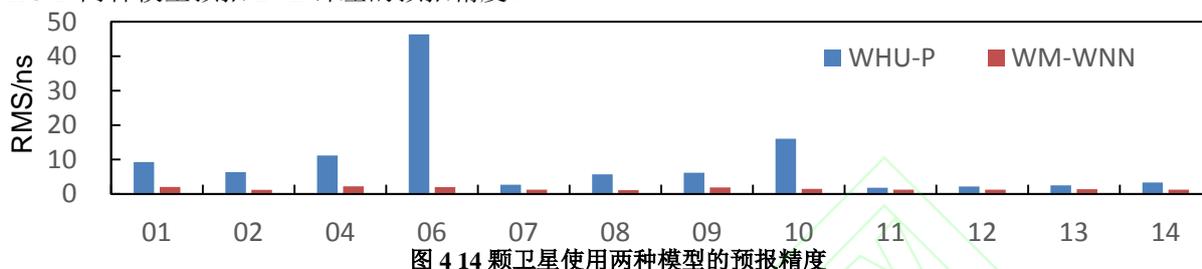


图 4 14 颗卫星使用两种模型的预报精度

Fig. 4 Prediction precisions of 14 satellites prediction under by two models

从图 4 可以看到，14 颗卫星在使用 WM-WNN 模型进行钟差 24h 预报时，得到的预报结果优于 WHU-P 产品。为了充分说明本文所提方法的优势，表 3 给出了 14 颗卫星使用 WM-WNN 和 WHU-P 两种模型预报 24h 钟差的预报结果统计情况。

表 3 WM-WNN 和 WHU-P 两种模型预报结果 RMS 和 Range 统计值/ns

Tab.3 Statistics of prediction RMS and Range results of WM-WNN and WHU-Pmodels/ns

模型 轨道类型	WHU-P model		WM-WNN model	
	RMS	Range	RMS	Range
GEO 卫星	8.944	15.256	1.744	1.621
IGSO 卫星	15.398	28.231	1.549	2.053
MEO 卫星	2.452	3.411	1.194	1.133
平均值	9.469	16.714	1.483	1.589

从表 3 可以看到。总体上，WM-WNN 模型预报的精度和稳定性均明显优于 WHU-P 产品。相比于 WHU-P 产品，WM-WNN 模型预报的平均精度和稳定性分别提高了约 84.3%和 90.5%。同时发现，对于 GEO 和 IGSO 两类轨道卫星而言，使用 WM-WNN 模型后，预报精度和稳定性提高的幅度要远大于 MEO 轨道卫星。这说明，采用本文所提的预处理方法可以有效改善 GEO 和 IGSO 两类轨道卫星钟差数据质量，从而提高 WNN 模型对两类轨道卫星的预报效果。

3. 结论

为了提高导航卫星钟差预报的精度，本文提出一种基于 WMAD 钟差数据预处理方法，该方法能够有效的剔除经典粗差探测方法很难剔除的量级较小的误差，提高钟差预报建模数据的质量。利用该方法后不但可以提高 WNN 模型预报的精度，还使模型具有较长时间预报钟差的能力，并且预报的精度优于北斗 WHU-P 钟差产品，一定程度丰富了现有的卫星钟差数据质量控制方法。

参考文献

[1] Mosavi M R, Shafiee F. Narrowband interference suppression for GPS navigation using neural networks[J]. GPS solutions, 2016, 20(3): 341-351.

[2] WANG Yupu, LuZhiping, ZHOU Haitao, WANG Ning, et al. Satellite Clock Bias Prediction Based on Modified Single Difference Data of Clock Bias[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2016, 36 (12): 1073-1077. (王宇谱, 吕志平, 周海涛, 王宁, 等. 基于修正钟差一次差分数据的卫星钟差预报[J].大地测量与地球动力学, 2016, 36 (12): 1073-1077)

- [3] Li X. Comparing the Kalman filter with a Monte Carlo-based artificial neural network in the INS/GPS vector gravimetric system[J]. Journal of Geodesy, 2009, 83(9): 797-804.
- [4] 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.
- [5] Mao Ya, Wang Qianxin, Hu Chao, et al. Analysis of the Characterization for BDS-3 Satellite Clock Error[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2020, 45(1): 53-61 (毛亚, 王潜心, 胡超, 等. BDS-3 卫星钟差特性分析[J]. 武汉大学学报 信息科学版, 2020, 45(1): 53-61)
- [6] 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.)
- [7] WANG Yupu. Research on Modeling and Prediction of the Satellite Clock Bias and Performance Evaluation of GNSS Satellite Clocks[D]. Zhengzhou: Information and Engineering University, 2017. (王宇谱. GNSS 星载原子钟性能分析与卫星钟差建模预报研究[D]. 郑州: 信息工程大学, 2017.)
- [8] WU Jing. Study on detection of GPS clock jump using median absolute deviation[J]. Science of Surveying and Mapping, 2015, 40(6): 36-41. (吴静. 利用中位数的 GPS 卫星钟跳探测方法[J]. 测绘科学, 2015, 40(6): 36-41.)
- [9] Yuan Kaiming, SHU Naiqiu, SU Yunlian, WANG Feng. Wavelet denoising based on threshold optimization method[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2015, 48(1): 74-79. (袁开明, 舒乃秋, 孙云莲, 等. 基于阈值寻优法的小波阈值去噪分析[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2015, 48(1): 74-79)
- [10] Han Songhui, Gong Yisong, Li Jianwen, et al. Outliers Detection in BDS Satellite Clock Errors by Using ARMA Model and Corresponding Short-Term Prediction[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, 46(2): 244-251 (韩松辉, 宫轶松, 李建文, 等. 基于 ARMA 模型的 BDS 卫星钟异常值探测及其短期预报[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2021, 46(2): 244-251)
- [11] WANG Xu, WANG Chang. A kind of Wavelet De-noising Composite Evaluation Index Based on Entropy Method [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2018, 38(7): 698-702. (王旭, 王昶. 一种基于熵权法的小波去噪复合评价指标[J]. 大地测量与地球动力学, 2018, 38(7): 698-702.)
- [12] WANG Xu, WANG Chang. An improved Wavelet Threshold Denoising method research [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2017, 37(10): 1038-1041. (王旭, 王昶. 一种改进小波阈值去噪方法的研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2017, 37(10): 1038-1041.)
- [13] GUO Chenjun, TENG Yunlong. Performance Analysis of Satellite Clock Bias Based on Wavelet Analysis and Neural Network [J]. Acta Astronomica Sinica, 2010, 51(4): 395-399. (郭承军, 滕云龙. 基于小波分析和神经网络的卫星钟差预报性能分析[J]. 天文学报, 2010, 51(4): 395-399.)
- [14] WANG Chang, SUI Xin, WANG Xu. Processing of Monitoring Data of Building Deformation Based on Wavelet Threshold Denoising[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2015, 34(11): 1271-1274. (王昶, 随心, 王旭. 基于分层阈值去噪法处理建筑物变形监测数据[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2015, 34(11): 1271-1274)
- [15] WANG Xu, LIU Wensheng, WANG Chang. An improved Wavelet Threshold Denoising method research [J]. Science of Surveying and Mapping, 2011, 36(5): 179-182. (王旭, 刘文生, 王昶. 一种改进小波阈值去噪方法的研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2011, 36(5): 1038-1041.)
- [16] WANG Yupu, LV Zhiping, CHEN Cuiyang, et al. Predicting navigation satellite clock bias using a genetic wavelet neural network[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2014, 39(7): 809-814 (王宇谱, 吕志平, 崔阳, 等. 利用遗传小波神经网络预报导航卫星钟差[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2014, 39(7): 809-814.)
- [17] WANG Xu, CHAI Hongzhou, WANG Chang. T-S fuzzy neural network to predict satellite clock bias[J].

Acta Geodaetica et Cartographica Sinica , 2020, 49(5) :580-587(王旭, 柴洪洲, 王昶. 卫星钟差预报的 T-S 模糊神经网络法[J]. 测绘学报, 2020, 49 (5) :580-587)

[18]WANG Wei,WANG Yupu,WANG Pin, ,et al. Accuracy evaluation of BDS satellite precise clock bias[J]. Journal of Navigation and Positioning,2020,8(1):20-26.(王威, 王宇谱, 王彬等.BDS 卫星精密钟差性能综合分析[J].导航定位学报, ,2020,8(1):20-26.)

A New Data Preprocessing Method for Beidou Satellite Clock Bias

WANG Xu^{1,2}, CHAI Hongzhou¹,WANG Chang³ ,LI Jinsheng²,CHONG Yang¹

1. PLA Strategic Support Force Information Engineering University, Zhengzhou, China, 450001;

2. Liaoning Vocational College of Ecological Engineering, Institute of Surveying and Mapping Engineering, Shenyang, China,110101

3. University of Science and Technology Liaoning, School of Civil Engineering, Anshan, China, 114051;

Abstract: To find a high accuracy method for SCB prediction based on characteristics of SCB data, a preprocessing strategy (WMAD) of a wavelet threshold method based on the median absolute deviation(MAD) is proposed to preprocess the SCB, aiming at the small error of the middleweight of the SCB data. Firstly, the wavelet threshold method is used to decompose the SCB data to obtain the decomposed high frequency coefficient and low frequency coefficient. Then the MAD method is used to deal with the high frequency coefficient of each layer affecting the threshold setting, and the processed high frequency coefficient is used to calculate the threshold, so as to improve the ability of eliminating small outliers by the wavelet threshold method. Finally, the clock bias data of beidou-2 satellite are used to verify. The results show that this method can effectively eliminate the small error of median magnitude in the historical observation sequence of clock difference and predicting the satellite clock bias.

Key words: satellite clock bias(SCB); median absolute deviation; wavelet threshold; wavelet neural network; prediction

网络首发:

标题: 一种新的北斗卫星钟差预处理方法

作者: 王旭, 柴洪洲, 王昶, 李金生, 种洋

收稿日期: 2020-05-16

DOI:10.13203/j.whugis20200232

引用格式:

王旭, 柴洪洲, 王昶, 等. 一种新的北斗卫星钟差预处理方法[J]. 武汉大学学报 信息科学版, 2020,

DOI:10.13203/j.whugis20200232 (WANG Xu, CHAI Hongzhou, WANG Chang, et al. A New Data Preprocessing Method for Beidou Satellite Clock Bias[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2020, DOI:10.13203/j.whugis20200232)

网络首发文章内容和格式与正式出版会有细微差别, 请以正式出版文件为准!

您感兴趣的其他相关论文:

BDS-3 卫星钟差特性分析

毛亚, 王潜心, 胡超, 杨鸿毅, 张铭彬

武汉大学学报 信息科学版, 2020, 45(1): 53-61

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20180224>

基于 ARIMA 模型的卫星钟差异常值探测的模型选择方法

马朝忠, 朱建青, 韩松辉

武汉大学学报 信息科学版, 2020, 45(2): 167-172

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20180230>

基于高频观测值的不同 GNSS 卫星钟稳定性分析

李明哲, 张绍成, 胡友健, 侯威震

武汉大学学报 信息科学版, 2018, 43(10): 1490-1495, 1503

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20160537>

收稿日期: 2020-05-16

项目资助: 国家自然科学基金(41574010; 41574013)。

第一作者: 王旭, 在读博士, 讲师, 研究方向: 测量数据处理理论与方法。wangxu19830411@126.com