

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2415802

基于抗差估计的多 GNSS 共视基准站数据融合^{*}

罗诗琦^{1,2} 陈瑞琼¹ 刘 娅^{1,2}

(1. 中国科学院国家授时中心 西安 710600; 2. 中国科学院大学 北京 100049)

摘要: 为了满足远程时间用户对标准时间 UTC(NTSC) 纳秒级配送的需求, 建立了一套标准时间远程复现系统。该系统目前使用的单基准终端服务模式, 存在一定的风险, 若单个接收机出现故障, 会影响得到的本地时间和卫星钟之间偏差(即星站钟差)的准确性。为了解决上述问题, 本文提出了一种基于抗差估计的多 GNSS 共视基准站融合星站钟差的方法。该方法利用中位数绝对值偏差(MAD)对星站钟差数据进行异常值检测, 采用 IGG III 等价权函数的抗差估计方法对多站的星站钟差数据进行融合, 输出一组稳定的基准站参考值。通过 Matlab 仿真, 对比 MAD 法和 3-Sigma 法的异常值检测性能, 对于基准站星站钟差数据, MAD 法更加适用。同时, 将基于抗差估计的融合法与等权融合法进行对比, 前者融合数据的标准差比后者下降 0.11~6.65 ns, 提高了系统的稳定性。

关键词: GNSS 共视; 数据融合; MAD; 抗差估计

中图分类号: TN96 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.4030

Data fusion of GNSS common-view multi-reference stations based on robust estimation

Luo Shiqi^{1,2} Chen Ruiqiong¹ Liu Ya^{1,2}

(1. National Time Service Center, Chinese Academy of Science, Xi'an 710600, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to meet the needs of remote time users for standard time UTC (NTSC) nanosecond distribution, a standard time remote reproduction system has been established. The single-reference terminal service model currently used in the system has certain risks. If the single receiver fails, it will affect the accuracy of the resulting deviation between local time and satellite clock (i. e., the time difference between satellite time and local time). To solve the above problems, this paper proposes a method based on robust estimation for GNSS common-view multi-reference stations to fuse the time difference between satellite time and local time. In this method, the median absolute deviation (MAD) is used to detect the outliers of the time difference between satellite time and local time data, and the robust estimation method of IGG III. equivalent weight function is used to fuse the above data of multiple stations, to output a set of stable reference station reference values. Comparing the outlier detection performance of the MAD method and the 3-Sigma method through the Matlab simulation, the MAD method is more applicable for the time difference between satellite time and local time data of the reference stations. At the same time, the fusion method based on robust estimation is compared with the equal-weight fusion method, the standard deviation of the fusion data of the former is 0.11~6.65 ns lower than that of the latter, which improves the stability of the system.

Keywords: GNSS common-view; data fusion; MAD; robust estimation

0 引言

全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)卫星共视技术可以进行 10 ns 以内的远程高精度时间比对^[1-2]。标准卫星共视技术利用国际权度局规定的共视时刻表进行观测, 每 16 min 产生一次比对数据, 观测周

期缺乏灵活性, 并且产生的数据文件是事后交换的, 因此不能满足实时性的需求。为了解决上述问题, 中国科学院国家授时中心的研究团队研制了一种基于 GNSS 卫星共视的标准时间复现终端^[3-5]。

前期由于单个的共视基准终端存在设备故障、卫星信号丢失等风险, 标准时间远程复现系统通常配置了多台共

视基准终端。为了得到一组稳定可靠的星站钟差数据,需要对多台基准终端的数据进行融合。如今已经有许多学者提出了较为成熟的数据融合方法,它们被应用在不同的研究领域。在时间比对领域的数据融合方法也有一定的研究:张虹等^[6]计算两个观测站的钟差结果数据的标准差,利用标准差进行加权平均来融合北斗共视与卫星双向时间比对的钟差结果数据。Defraigne 等^[7]利用最小二乘法将全球定位系统(global positioning system, GPS)共视与卫星双向时间比对的测量数据进行了融合,结果表明融合数据提高了短基线的比对精度。王威雄^[8]通过 Kalman 滤波法将卫星双向比对与 GPS 精密单点定位(precise point positioning, PPP)的结果数据进行了融合,融合数据提高了短期稳定性。上述方法中,标准差加权平均和最小二乘法容易受到异常噪声的影响,Kalman 滤波中需要对状态方程和量测方程中的系统噪声和量测噪声有较为准确的判断,否则将影响滤波的结果。目前,针对多基准站的数据融合研究还较少。付欣^[9]利用等权平均对基于多基准终端的星站钟差数据进行融合,在数据发生大的波动时,等权法的融合结果易受影响。即使在同一地区、同一时刻下不同的基准终端也会因为观测位置和角度、接收机测量误差不同以及多路径效应等原因^[10-14],导致观测到的卫星数量不同,甚至同一颗卫星的星站钟差数据也不相同。因此在星站钟差数据融合之前,需要对数据进行预处理。通常采用 3-Sigma 准则检测服从高斯分布数据的异常值^[15],但是当数据中出现多个与正常数据差异较大的值时,3-Sigma 准则可能会失效。

本文针对同一地区多台共视基准终端观测数据的特点,提出了一种基于抗差估计的多 GNSS 共视基准站融合星站钟差的方法,在数据预处理阶段,利用中位数绝对值偏差(median absolute deviation, MAD)对星站钟差数据进行了粗差剔除,其后,采用 IGG III 等价权函数的抗差估计方法对多台基准终端的星站钟差进行融合,输出一组稳定的星站钟差数据。

1 数据特点分析

在标准时间远程复现系统中,共视基准终端每秒实时计算所有可视卫星的星站钟差数据,以 1 分钟作为观测周期,当观测周期结束时,每颗可视卫星会得到 60 个星站钟差数据,基准终端对这 1 min 内的各颗卫星的星站钟差数据进行最小二乘线性拟合处理^[16]。本文将针对拟合之后的星站钟差数据进行预处理以及融合处理。

星站钟差数据的特点如下:

- 1) 每个基准终端会同时输出多颗卫星的星站钟差数据;
- 2) 每颗卫星的星站钟差数据会受到卫星高度角、接收机时延等因素的影响;
- 3) 只有多个基准终端在同一时刻观测到的共同可视卫

星才能进行融合;

选择一种合适的数据融合方法对具有上述特征的星站钟差进行融合,可以提高多基准终端系统的稳定性和可靠性。一种基于范畴论和形式语言的数据融合的框架将融合的类型划分为数据融合、特征融合、决策融合和关系信息融合^[17-18]。数据融合侧重于将原始数据融合组合成一组数据后,再进行其他检测处理,最后得到目标数据;决策融合首先对来自不同来源的数据进行检测处理后,再将处理之后的数据进行融合得到目标数据。本文针对总结出的卫星星站钟差数据的特点,对其进行决策融合,首先分别对不同基准站的星站钟差数据进行 MAD 检测,筛选出异常的星站数据,然后将粗差筛查后的数据利用抗差估计法进行融合。多基准终端融合星站钟差数据的原理图如图 1 所示。

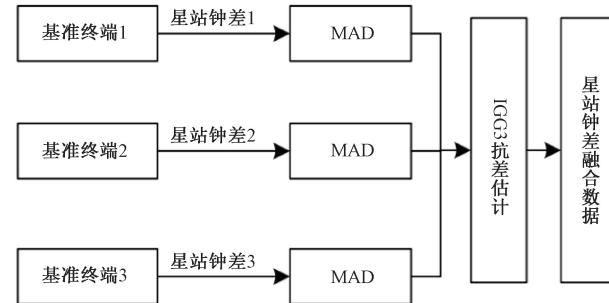


图 1 多基准终端数据融合原理图

Fig. 1 Schematic diagram of data fusion for multi-reference terminals

图 1 提出的融合方法主要分为 3 个部分:

1) 数据预处理:由于在同一地区、同一时刻下不同的基准终端观测到的卫星数量是不同的,并且同一颗卫星的星站钟差数据也不相同,因此筛选出同一时刻多个基准终端共同的可视卫星,对每个基准终端每颗卫星当前待融合时刻的星站钟差数据进行 MAD 异常值检测,如果某个终端某颗卫星的星站数据出现异常,则将此数据剔除。

2) 融合星站钟差:将多个基准终端同一颗卫星经过上一步处理得到的星站钟差数据进行融合,采用 IGG III 等价权函数的抗差估计法。

3) 跟踪融合结果:存储 10 个周期(10 min)的多个基准终端的各颗卫星的星站钟差数据,利用历史数据判断当前融合时刻的数据是否正常。

2 算法设计实现

本文提出的多基准终端星站钟差数据融合方法主要利用了 MAD 法检测异常值,并对预处理后的数据进行 IGG III 等价权函数的抗差估计来融合。

2.1 中位数绝对值偏差

假设每个基准终端每颗卫星的星站钟差数据是独立同分布的,并且服从正态分布。利用中位数绝对值偏差对星站钟差进行异常值剔除^[19-21],MAD 具体的定义为:

$$MAD = 1.4826 \times \text{median}(|x_i - \text{median}(\mathbf{X})|) \quad (1)$$

式中: $median(\cdot)$ 是取中位数的函数, \mathbf{X} 为原始星站钟差数据组成的序列, x_i 是第 i 个时刻的星站钟差数据。

计算 MAD 就是找到数据绝对偏离中位数的中位数, 然后利用式(2)对异常值进行筛查, 如果数据偏离中位数的程度超过 3 倍的 MAD, 那么该数据将被剔除。

$$\left| \frac{x_i - median(\mathbf{X})}{MAD} \right| > 3 \quad (2)$$

针对本文研究的星站钟差数据, 具体地计算步骤为: 设置一个周期长度为 10 的滑动窗口, 该周期内的星站钟差数据组成序列 \mathbf{X} , 求出第 10 点 x_{10} 的星站钟差数据的 MAD, 判断其相对序列中位数的偏离程度, 将偏离程度小于 3 倍的数据保留下, 进行下一步的融合处理, 否则超过 3 倍的数据视为异常的星站钟差数据, 剔除出去。

2.2 基于 IGG III 等价权函数的抗差估计

基于 IGG III 等价权函数的抗差估计法是一种利用等价权思想将抗差估计转换为类似于最小二乘估计的方法^[22-24], 该方法将观测数据划分为正常数据、可疑数据和淘汰数据 3 个部分, 利用等价权阵对各个部分的观测数据进行类似最小二乘估计。

基于 IGG III 等价权函数的抗差估计法的模型为:

假设观测数据相互独立, 设观测方程为:

$$\mathbf{v} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{X}} - \mathbf{l} \quad (3)$$

式中: \mathbf{A} 是 $n \times m$ 阶的系数矩阵, \mathbf{l} 是长度为 n 的观测值向量, $\hat{\mathbf{X}}$ 是待估计的 m 维向量。

先验权矩阵 \mathbf{P} 为对角阵:

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} p_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p_n \end{bmatrix} \quad (4)$$

根据抗差估计中 M 估计的原理, 要使估计值 $\hat{\mathbf{X}}$ 最优, 要求:

$$\sum p_i \rho(a_i \hat{\mathbf{X}} - l_i) = \min \quad (5)$$

式中: p_i 表示第 i 个权值, a_i 表示系数矩阵 \mathbf{A} 的第 i 行, l_i 表示第 i 个观测值, ρ 表示观测值的概率密度。

类似于最小二乘估计法, 求出抗差估计的解为:

$$\hat{\mathbf{X}} = (\mathbf{A}^T \bar{\mathbf{P}} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \bar{\mathbf{P}} \mathbf{l} \quad (6)$$

式中: $\bar{\mathbf{P}}$ 为 IGG III 等价权函数。

$$\bar{p}_i = \begin{cases} p_i, & |v_i| < k_0 \\ p_i \frac{k_0}{|v_i|} \frac{(k_1 - |v_i|)^2}{(k_1 - k_0)^2}, & k_0 \leqslant |v_i| < k_1 \\ 0, & |v_i| \geqslant k_1 \end{cases} \quad (7)$$

式中: v_i 为标准化残差, k_0, k_1 为调整系数。 k_0 的取值一般为 1.0~1.5, k_1 的取值一般为 2.5~3.0。

将上述模型应用于融合多个基准终端同一颗卫星的星站数据, 经过 2.1 节中粗差筛选的星站数据即观测数据 L 。

3 数据仿真试验

本节使用放置在陕西省西安市临潼区的 3 个基准终端的星站钟差数据进行仿真试验, 通过 Matlab 软件对上述星站钟差数据进行 MAD 异常值检测和基于 IGG III 等价权函数的抗差估计数据融合的仿真, 仿真使用连续的 24 h 星站钟差数据, 测试时间为 2023 年 3 月 7 日 0 时~2023 年 3 月 8 日 0 时, 测试设备连接框图如图 2 所示。

3.1 MAD 异常值剔除仿真试验

在对 3 个基准终端的星站钟差数据进行融合之前, 需要对各个基准终端的数据进行异常值检测的预处理, 筛选出异常值并将其剔除, 降低其对后续融合计算的影响。将

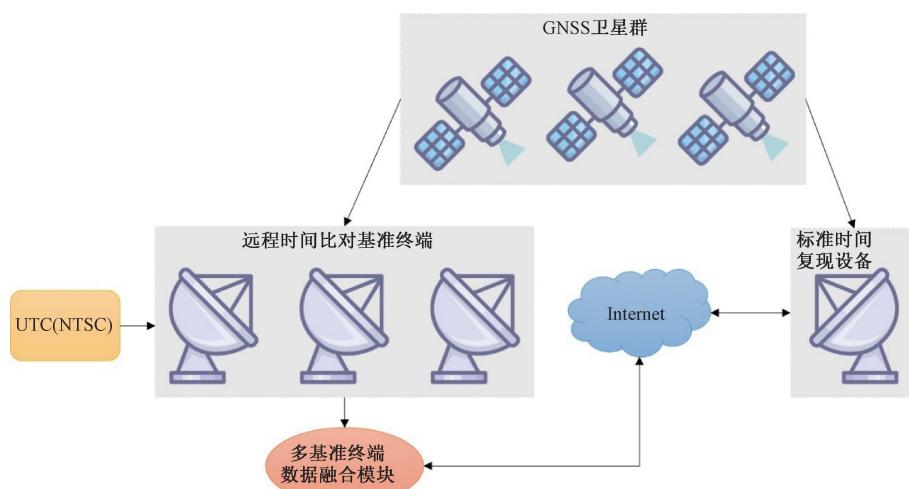


图 2 星站钟差融合试验设备连接图

Fig. 2 Test equipment connection diagram of the time difference between satellite time and local time

3-sigma 与 MAD 两种方法进行比较, 结果发现对于基准站星站钟差数据, MAD 法可以更加有效地检测出异常的数

据。1 号基准站 159 号卫星的星站钟差数据如表 1 第 1 列所示, 该列数据的均值为 36.21 ns, 中位数为 36.40 ns, 在

滑动窗口的第 10 个周期融合时刻,基准站星站钟差数据出现异常。

表 1 159 号卫星星站钟差及两种检测方法计算结果

Table 1 The time difference between satellite time and local time of satellite 159 and the calculation results of two detection methods

星站钟差/ ns	星站钟差与均值 的绝对偏差/ns	星站钟差和中位数的绝对 偏差与 MAD 的倍数关系
37.17	0.96	2.73
36.32	0.11	0.28
36.86	0.65	1.63
36.50	0.29	0.36
36.48	0.27	0.28
36.22	0.01	0.64
36.55	0.34	0.53
36.20	0.01	0.71
34.57	1.64	6.50
34.28	1.93	7.53

利用 3-Sigma 准则对表 1 中的星站钟差数据进行异常值检测,基准站星站钟差数据与其去掉最值后的均值的绝对差值如表 1 第 2 列所示。在滑动窗口的第 10 个周期融合时刻,计算得到的 3-Sigma 值为 2.09 ns,大于 1.93 ns,无法剔除该异常值。从图 3 中可以看到,利用 3-Sigma 法没有检测出异常的星站钟差数据。

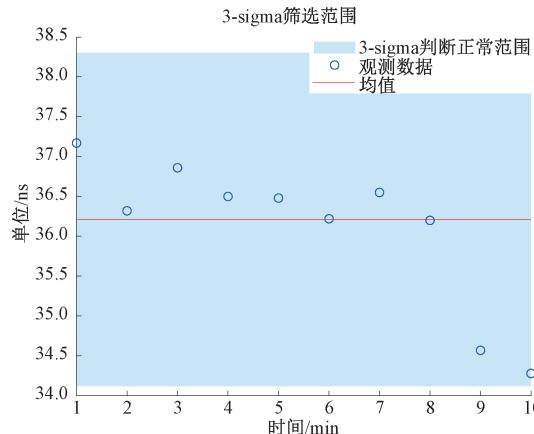


图 3 3-sigma 未能检测出异常的星站钟差

Fig. 3 3-sigma failed to detect anomalous the time difference between satellite time and local time

计算基准站星站钟差数据偏离中位数的程度与 MAD 之间的倍数关系(如表 1 第 3 列所示),在第 10 点融合时刻,星站钟差数据与序列中位数的偏离程度超过了 3 倍的 MAD,将被视作异常数据。如图 4 所示,MAD 检测出异常的星站钟差数据。

3.2 抗差估计法数据融合仿真试验

由于使用了滑动窗口,因此在设备刚开启或者卫星刚

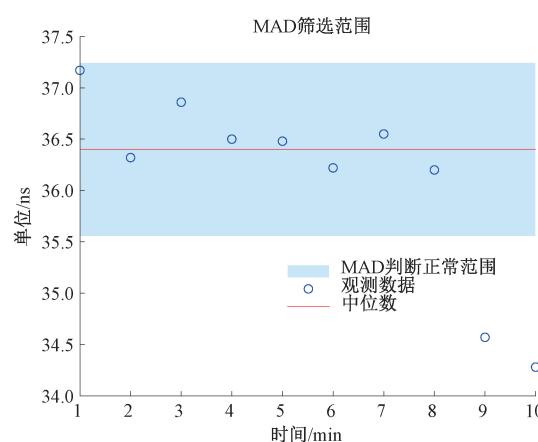


图 4 MAD 检测出异常的星站钟差数据

Fig. 4 MAD detected anomalous data of the time difference between satellite time and local time

进入可视范围内时,会有一段窗口长度的数据无法进行异常值检测,但是复现平台是实时产生数据的,因此在无法进行异常值检测时,也要对星站钟差数据进行融合。本文将最小二乘法,Kalman 滤波法和基于 IGG III 等价权函数的抗差估计法进行了对比,比较它们在设备刚开启或者卫星刚进入可视范围内时,融合数据的准确性和稳定性。

通过长时间的观察,发现在卫星刚进入可视范围内时,由于受到外部因素的影响,可能导致某个站的星站钟差数据出现异常,进而导致数据出现大的波动或者跳变。如表 2 所示,2 号基准站在 1 号卫星刚进入时出现异常,此时最小二乘法和 Kalman 滤波法对数据出现大波动的抵抗能力较弱,基于 IGG III 等价权函数的抗差估计法的抗干扰能力更强。

表 2 1 号卫星多基准站星站钟差数据融合结果

Table 2 Fusion results of the time difference between satellite time and local time of multi-reference stations of satellite 1

站 1 星站 钟差/ ns	站 2 星站 钟差/ ns	站 3 星站 钟差/ ns	最小二 乘法 融合 数据/ns	Kalman 融合 数据/ns	抗差 估计法 数据/ns
4.24	163.06	2.17	30.75	-2.79	3.23
4.56	102.28	2.06	25.48	36.29	3.37
2.53	-0.52	0.50	20.20	0.85	0.36
1.60	-1.93	-0.03	14.93	-0.12	-0.09
0.15	-4.48	-1.16	9.65	-1.83	-0.89
-2.24	-7.13	-3.14	4.37	-4.17	-2.86
-2.55	-7.53	-3.96	-0.90	-4.68	-3.67
-2.19	-7.50	-4.54	-6.18	-4.74	-4.56
-1.05	-7.11	-3.32	-11.45	-3.83	-3.12
-1.05	-8.32	-3.06	-16.73	-4.14	-2.63

图 5 是最小二乘法、Kalman 滤波法和基于 IGG III 等价权函数的抗差估计法分别融合 3 个基准站星站钟差数据之后对比图。从图 5 中可以看到在开始的第 1 min 和 2 min, 2 号基准站的星站钟差数据出现大的跳变, 此时最小二乘法和 Kalman 滤波法的融合结果偏向异常值, 当 3 个基准站数据都稳定之后, Kalman 滤波法和抗差估计法的结果相近。因此对于本文研究的星站钟差数据, 基于 IGG III 等价权函数的抗差估计法在准确性和稳定性方面表现更好。

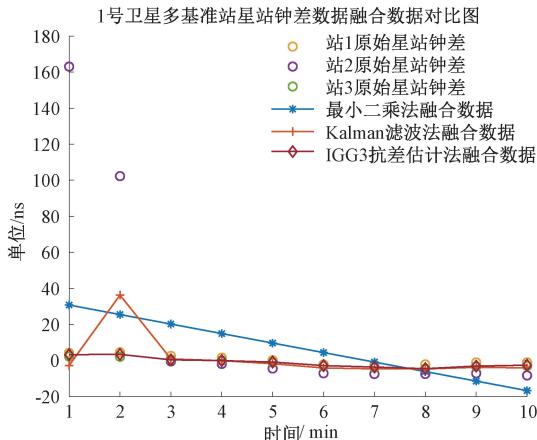


图 5 1号卫星多基准站星站钟差数据融合数据对比图

Fig. 5 Comparison of fusion data of the time difference between satellite time and local time of multi-reference stations of satellite 1

采用基于 IGG III 等价权函数的抗差估计法对 MAD 法剔除异常值后的星站钟差数据进行数据融合, 形成一组稳定的基准站星站钟差参考值。在数据融合时刻, 如果 3 个基准终端同一颗可视卫星的所有星站钟差数据都没有出现异常, 或者只有某一个终端的数据出现异常, 则对数据进行融合; 如果有两个基准终端的数据出现异常值, 则直接输出第 3 个基准终端的星站钟差作为总体的参考值。图 6 是 185 号卫星融合前后 3 个基准终端星站钟差数据的对比图。

对 3 个基准终端的星站钟差数据分别进行了基于 IGG III 等价权函数的抗差估计法融合和等权法融合, 表 3 是 185 号卫星融合前后星站钟差数据的均值和标准差。

从图 6 和表 3 可知, 185 号卫星的星站钟差数据在观测期间没有出现大的跳变, 但 2 号基准终端星站钟差数据的标准差相对偏大, 经过对 3 个基准终端的星站钟差进行融合后, 基于 IGG III 融合数据的均值接近三站的中位数, 本文认为其相对于等权融合更能反映真实的情况, 并且融合之后的数据标准差优于原始的两个基准站, 融合数据更加稳定。

在观测期间, 9 号卫星每次重新出现在可视范围内时(第 0 min 和第 219 min), 2 号基准站测量的星站钟差数据都会出现跳变(如图 7 所示), 此时还未达到 MAD 检测的

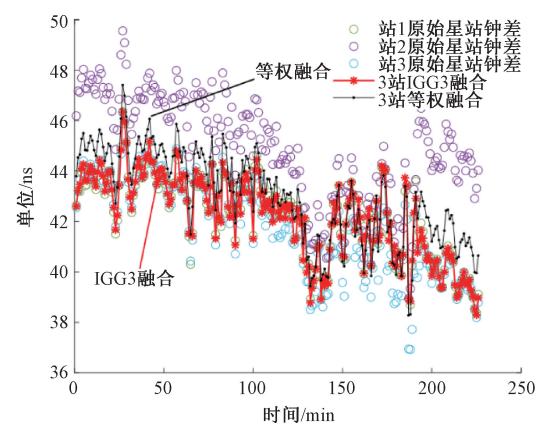


图 6 185 号卫星融合前后 3 个基准终端星站钟差

Fig. 6 The time difference between satellite time and local time of the three reference terminals before and after the fusion of satellite 185

表 3 185 号卫星融合前后星站钟差数据的均值和标准差

Table 3 The mean and standard deviation of the time difference between satellite time and local time before and after the fusion of satellite 185

参数	均值/ns	标准差/ns
1号基准终端	42.35	1.56
2号基准终端	44.93	2.16
3号基准终端	41.95	1.85
等权融合	43.08	1.78
IGG III 融合	42.36	1.67

窗口大小, 直接对数据采用 IGG3 融合和等权融合, 从图 7 可以看出, 等权融合偏离正常数据, IGG3 融合可以有效抵抗异常。表 4 是 9 号卫星融合前后星站钟差数据的均值和标准差。

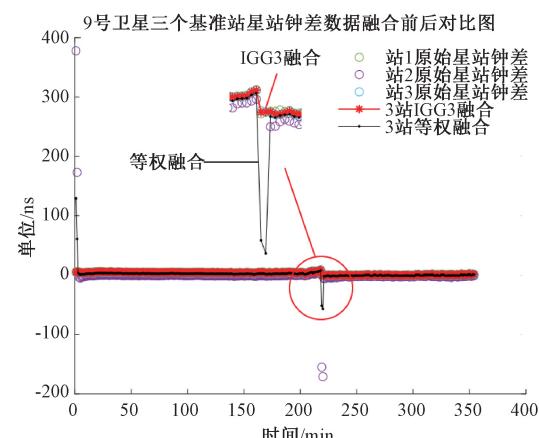


图 7 9号卫星融合前后 3 个基准终端星站钟差

Fig. 7 The time difference between satellite time and local time of the three reference terminals before and after the fusion of satellite 9

表 4 9号卫星融合前后星站钟差数据的均值和标准差

Table 4 The mean and standard deviation of the time difference between satellite time and local time before and after the fusion of satellite 9

参数	均值/ns	标准差/ns
1号基准终端	3.14	2.13
2号基准终端	-0.66	25.36
3号基准终端	2.48	2.08
等权融合	1.65	8.77
IGGⅢ融合	2.65	2.12

从图 7 和表 4 可知,当 2 号基准站数据出现突变时, IGG3 融合数据不会产生突变,继续保持稳定,且它的标准差显著优于等权融合,标准差降低 6.65 ns。在观测期间,3 个基准站共同可视卫星有 69 颗,IGG3 融合数据的标准差相对等权融合降低 0.11~6.65 ns。

4 结 论

本文研究了多 GNSS 共视基准终端融合星站钟差数据的方法,在数据预处理阶段,将 MAD 法与 3-Sigma 准则进行了对比,结果表明对于基准站的星站钟差数据,MAD 法更适用于检测异常值,提高了系统数据的准确性。

利用基于 IGGⅢ 等价权函数的抗差估计法对粗差剔除后的星站钟差数据进行数据融合,融合数据的均值接近于 3 个基准站数据的中位数,标准差相对等权融合进一步降低。因此多基准站星站钟差数据的融合,可以预防当单个基准终端设备出现异常时,导致产生的数据不准确的问题,提高了系统的可靠性和稳定性。

下一步将从工程实现的角度,对文中的算法进行工程化,融合算法软件工程化后,将利用同地的 3 个基准站的融合数据和单基准站的数据分别作为用户从站的参考信号,比较两个不同参考信号和同一个用户从站信号生成的两站钟差的结果数据,可以进一步检验多基准融合数据的稳定性,并且验证算法的可执行性。

参考文献

- [1] XU L X, LI X H, XUE Y R. A new timing method based on common-view [C]. 2012 IEEE International Frequency Control Symposium Proceedings, 2012.
- [2] 杨旭海,李孝辉,华宇,等. 卫星授时与时间传递技术进展[J]. 导航定位与授时,2021,8(4): 1-10.
YANG X H, LI X H, HUA Y, et al. Technical progress of satellite time service and time transfer [J]. Navigation Positioning and Timing, 2021, 8(4): 1-10.
- [3] 陈瑞琼,刘娅,李孝辉. 基于改进的卫星共视法的远程时间比对研究[J]. 仪器仪表学报,2016,37(4): 757-763.
CHEN R Q, LIU Y, LI X H. Study on remote time comparison based on improved satellite common-view method [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(4): 757-763.
- [4] 陈瑞琼,卢建福,刘娅,等. 一种基于 GNSS 卫星共视的标准时间复现终端研制[J]. 电子测量技术,2021,44(6): 143-148.
CHEN R Q, LU J F, LIU Y, et al. Development of a standard time recurring terminal based on GNSS satellite common-view [J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(6): 143-148.
- [5] 刘娅,李孝辉,赵志雄,等. 基于北斗卫星的纳秒级全球授时系统[J]. 导航定位与授时,2022,9(3): 14-22.
LIU Y, LI X H, ZHAO Z X, et al. Nanoseconds deviation timing service system for global users based on BDS [J]. Navigation Positioning and Timing, 2022, 9(3): 14-22.
- [6] 张虹,广伟,袁海波,等. TWSTFT 与北斗共视数据融合算法研究[C]. 第九届中国卫星导航学术年会论文集,2018.
ZHANG H, GUANG W, YUAN H B, et al. Research on fusion algorithm of TWSTFT and Beidou common view [C]. Proceedings of the 9th China Satellite Navigation Conference, 2018.
- [7] DEFRAIGNE P, MARTINEZ C M. Combination of TWSTFT and GPS data for time transfer [J]. Metrologia, 2010, 47(3): 305-316.
- [8] 王威雄. 守时系统国际时间比对数据融合方法研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2022.
WANG W X. Research on combination method of international time comparison data of timekeeping system [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2022.
- [9] 付欣. 多 GNSS 共视基准站融合方法研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2023.
FU X. Research on fusion method of GNSS common-view multi-reference stations [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2023.
- [10] 黄观文,王浩浩,谢威,等. GNSS 实时卫星钟差估计技术进展[J]. 导航定位与授时,2020,7(5): 1-9.
HUANG G W, WANG H H, XIE W, et al. Technical progress of GNSS real-time satellite clock offset estimation [J]. Navigation Positioning and Timing, 2020, 7(5): 1-9.
- [11] GALLON E, JOERGER M, PERVAN B. Robust modeling of GNSS tropospheric delay dynamics [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2021, 57(5): 2992-3003.

- [12] 邹璇,付睿男,王亚伟,等.测站处GNSS多路径误差效应反演及其应用研究[J].武汉大学学报(信息科学版),2022,47(9):1416-1421.
- ZOU X, FU R N, WANG Y W, et al. Inversion of GNSS multipath effects around the stations and its applications[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2022, 47(9): 1416-1421.
- [13] KOST O, DUNIK J, STRAKA O, et al. Identification of GNSS measurement error: From time to elevation dependency[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2023, 59(6): 8931-8943.
- [14] BHARDWAJ S C, SHEKHAR S, VIDYARTH A, et al. Satellite navigation and sources of errors in positioning: A review [C]. 2020 International Conference on Advances in Computing, Communication & Materials(ICACCM), 2020.
- [15] 王威雄,董绍武,武文俊,等.北斗三号卫星共视时间比对性能分析[J].宇航学报,2020,41(5):569-577.
- WANG W X, DONG SH W, WU W J, et al. Analysis of common view time comparison by BDS-3 satellite[J]. Journal of Astronautics, 2020, 41(5): 569-577.
- [16] 陈瑞琼. UTC(NTSC)远程复现方法研究与工程实现[D].北京:中国科学院大学,2016.
- CHEN R Q. Research on the method of remote reproduction of UTC(NTSC) and its realization[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2016.
- [17] KHALEGHI B, KHAMIS A, KARRY F O, et al. Multisensor data fusion: A review of the state-of-the-art[J]. Information Fusion, 2013, 14(1): 28-44.
- [18] DIEZ-OLIVAN A, DEL SER J, GALAR D, et al. Data fusion and machine learning for industrial prognosis: Trends and perspectives towards Industry 4.0[J]. Information Fusion, 2019(50): 92-111.
- [19] LEYS C, LEY C, KLEIN O, et al. Detecting outliers: Do not use standard deviation around the mean, use absolute deviation around the median[J]. Journal of Experimental Social Psychology, 2013, 49(4): 764-766.
- [20] COUPE P, MANJON J V, GEDAMU E, et al. Robust rician noise estimation for MR images[J]. Medical Image Analysis, 2010, 14(4): 483-493.
- [21] ADEKEYE K S, ADEWARA J A, AAKO O L, et al. Performance of median absolute deviation and some alternatives to median absolute deviation control charts for skewed and heavily tailed process[J]. Quality and Reliability Engineering International, 2021, 37(8): 3431-3440.
- [22] 刘宸,刘长建,王赛,等.两种新的IGGⅢ的改进方案[J].测绘通报,2016(10): 54-57.
- LIU CH, LIU CH J, WANG S, et al. Two new improvements of IGG Ⅲ scheme[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2016(10): 54-57.
- [23] 张小红,郭斐,李盼,等.GNSS精密单点定位中的实时质量控制[J].武汉大学学报(信息科学版),2012,37(8): 940-944.
- ZHANG X H, GUO F, LI P, et al. Real-time quality control procedure for GNSS precise point positioning[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2012, 37(8): 940-944.
- [24] 向民志,李祥云,范百兴,等.基于抗差估计的工业机器人运动学参数标定[J].南京航空航天大学学报,2018,50(6): 848-853.
- XIANG M Z, LI X Y, FAN B X, et al. Calibration of industrial robot kinematic parameters based on the robust estimation[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018, 50(6): 848-853.

作者简介

罗诗琦,硕士研究生,主要研究方向为基于GNSS的多种远程时间传递技术融合。

E-mail:1198977707@qq.com