

# 基于状态协方差阵加权的 GPS PPP 应用研究

张继海<sup>1,2,3</sup>, 董绍武<sup>1,2,3,4</sup>, 袁海波<sup>1,2,3</sup>, 广 伟<sup>2,3</sup>

(1. 中国科学院大学, 北京 100049; 2. 中国科学院国家授时中心, 陕西西安 710600;  
3. 中国科学院时间频率基准重点实验室, 陕西西安 710600; 4. 中国科学院大学天文与空间科学学院, 北京 100049)

**摘 要:** 精密钟差以及天顶对流层时延是 GPS PPP 解算的重要参数. 本文通过在 PPP 数据处理过程中加入基于更新迭代的状态协方差阵作为取权因子, 分别在高精度时间比对和天顶对流层时延方面利用单向滤波以及双向加权滤波对 PPP 解算的钟差及对流层时延进行估计与分析. 结果表明, 在零基线比对方面, 经加权估计的钟差标准偏差优于单向结果, 提高在 30% 以上; 在时间比对方面, 利用加权估计的钟差与国际权度局发布的钟差在频率稳定度上水平相当; 最后, 在天顶对流层时延估计方面, 两种方法相对于 IGS 分析中心公布的天顶对流层时延的残差均方根误差中, 加权估计的天顶对流层时延也略有提高.

**关键词:** 载波相位; 取权因子; 高精度时间比对; 天顶对流层时延

**中图分类号:** TH714 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2020)11-2196-06

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2020.11.014

## Research of GPS PPP Based on Weighted State Covariance Matrix

ZHANG Ji-hai<sup>1,2,3</sup>, DONG Shao-wu<sup>1,2,3,4</sup>, YUAN Hai-bo<sup>1,2,3</sup>, GUANG Wei<sup>2,3</sup>

(1. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

2. National Time Service Center, CAS, Xi'an, Shaanxi 710600, China;

3. Key Laboratory of Time-Frequency Standard, CAS, Xi'an, Shaanxi 710600, China;

4. School of Astronomy and Space Science, UCAS, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The precision clock and zenith tropospheric delay (ZTD) are important parameters of GPS PPP solution. In this paper, the state covariance matrix based on update iteration is used for the weight calculation in GPS PPP data processing. The results of PPP are estimated by using one-way and two-way filtering weighted in time comparison and ZTD. The results show that in the PPP zero-baseline common clock comparison, the standard deviation to the time difference of the weighted is significantly better than that of the one-way, and the deviation is increased by more than 30%. The result of frequency stability is estimated with weighted is equivalent to the Bureau International des Poids et Mesures in time comparison. And the root mean square of residual to the final results between two methods and the results published by the IGS for the ZTD, the results of the weighted estimation are also slightly improved.

**Key words:** carrier phase; weighted factor; high precision time comparison; zenith tropospheric delay

## 1 引言

基于全球导航卫星系统 (Global Navigation Satellite System, GNSS) 载波相位测量的应用是大地测量中最准确的技术之一, 也是较为常用的方法. 其原理是用户在 GNSS 高精度测量方面通过接收机接收卫星天线相位中心发射的 GNSS 空间信号到接收机天线相位中心的

距离, 并利用精密单点定位 (Precise Point Positioning, PPP) 算法, 解算出本地接收机天线相位中心坐标、本地时间相对于国际 GNSS 服务 (International GNSS Service, IGS) 分析中心的系统时间偏差以及天顶对流层的时延<sup>[1,2]</sup>, 为全球的不同用户提供相关精密的定位与授时服务. 同时, 在国际权度局 (Bureau International des Poids et Mesures, BIPM) 每月计算标准时间—协调世界

收稿日期: 2019-10-23; 修回日期: 2020-05-18; 责任编辑: 李勇锋

基金项目: 中国科学院国家授时中心“青年创新人才”(No. NTSC 青创 201804); 中国科学院西部之光青年学者 B 类 (No. XAB2019B13); 国家自然科学基金 (No. 11773030)

时(Coordinated Universal Time, UTC)的归算中,目前全球 85 个在 BIPM 注册的守时实验中有 46 个守时实验室利用 GPS PPP 方法向国际 UTC 溯源<sup>[3]</sup>,为国际 UTC 的计算做出贡献。

本文依托我国时间基准 UTC(NTSC)系统,在 PPP 算法的基础上,加入迭代更新的状态协方差阵作为取权因子开展加权滤波估计在 PPP 中的应用研究.并利用德国物理联邦技术研究院(国际原子时物理归算节点)保持的时间基准 UTC(PTB)系统中的时间传递型接收机输出的 GPS 观测数据,分别利用 PPP 单向滤波估计以及双向加权滤波估计在零基线共钟比对以及远距离时间比对方面,与 BIPM 权威发布的两地比对钟差进行了对比分析与研究.同时利用单向滤波以及加权滤波方法估计出的 BJFS, BRUX 两个观测站的天顶对流层时延与 IGS 发布的进行了对比研究。

## 2 加权滤波算法原理

在精密单点定位算法中滤波设置包括待估计参数、协方差阵、状态噪声以及观测噪声初值设置,滤波估计的状态向量  $X$  可以表示为<sup>[4,5]</sup>:

$$X = [x \ y \ z \ \delta t \ d_{trop} \ N_1 \ N_2 \ \dots \ N_n] \quad (1)$$

式(1)中,  $x, y, z$  为接收机天线相位中心的坐标增量,  $\delta t$  为本地时相对于 IGST 的偏差,  $d_{trop}$  为天顶对流层时延,  $N_1, N_2, \dots, N_n$  为观测到  $n$  颗卫星的整周模糊度。

基于 IGS 分析中心公布的精密产品以及 PPP 算法中的各种误差修正项,分别利用单向滤波估计以及双向加权滤波估计的计算过程如图 1 所示。

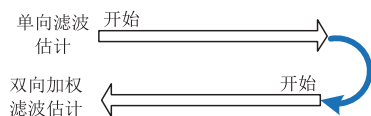


图1 处理过程

根据图 1 双向计算过程,利用单向以及双向加权滤波更新的状态协方差阵作为取权因子,由于在卡尔曼滤波参数估计中,状态协方差矩阵反应了钟差以及对流层时延估计的误差,在双向滤波过程中,基于方差矩阵取权可以更好的在正反单向滤波中选择误差较小的估计结果.利用取权双向组合的方法减少了端部不可信的估计值.其权计算方法如下:

$$w = \frac{1}{\frac{1}{w_f} + \frac{1}{w_b}} \quad (2)$$

$$X = \left( \frac{X_f}{w_f} + \frac{X_b}{w_b} \right) * w \quad (3)$$

式(2)和(3)中,  $w_f$  为第一次滤波(正向)的状态协方差阵,  $w_b$  为第二次滤波(反向)的状态协方差阵.  $X_f$  为正向滤波估计,  $X_b$  为反向滤波估计,通过加权计算,最终

获得双向加权估计的结果  $X$ 。

## 3 试验结果分析

### 3.1 基于 PPP 的零基线校准

根据 BIPM 全球校准规则,一般接收机校准时间为一周左右.本文利用国家授时中心时间基准 UTC(NTSC)系统中的三台同源 GPS 接收机 2019 年 2 月 23 日—2019 年 3 月 1 日采样间隔为 300s 的数据,开展零基线同源时间比对(Common Clock Difference, CCD)实验研究<sup>[6,7]</sup>.其三台接收机型号均为 SEPT POLARX4TR,天线类型为 SEPCHOKE\_MC,三台接收机连接如图 2 所示。

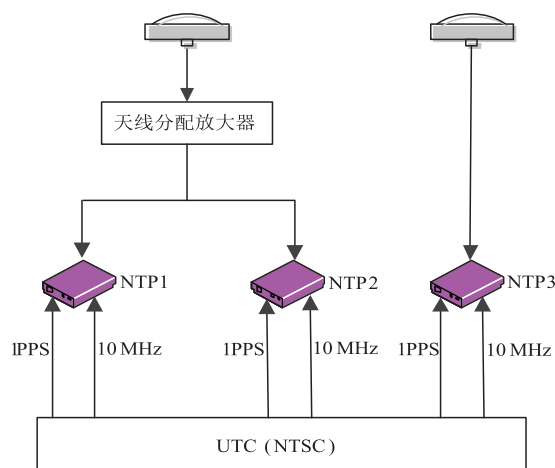


图2 接收机连接图

接收机连接如上图所示,其中 NTP1 和 NTP2 两台接收机共用一个天线,NTP3 单独自用一个天线,其三台接收机零基线两两相比钟差如图 3 ~ 图 5 所示。

图 3 ~ 图 5 为三台接收机零基线的比对钟差,可以看出三台接收机两两之间的同源零基线比对钟差具有很好的一致性.其比对钟差的标准偏差<sup>[8]</sup>(STDEV)如表 1 所示。

从表 1 可以看出 NTP1 与 NTP2 由于同天线因此其零基线差值的 STDEV 较小.并且接收机两两比对的单向加权滤波估计的钟差优于单向滤波估计的钟差。

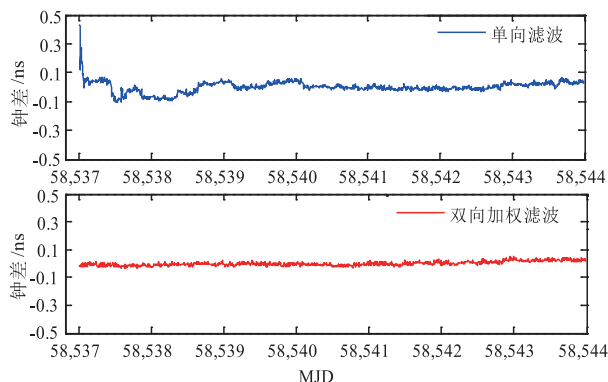


图3 NTP1-NTP2零基线比对钟差

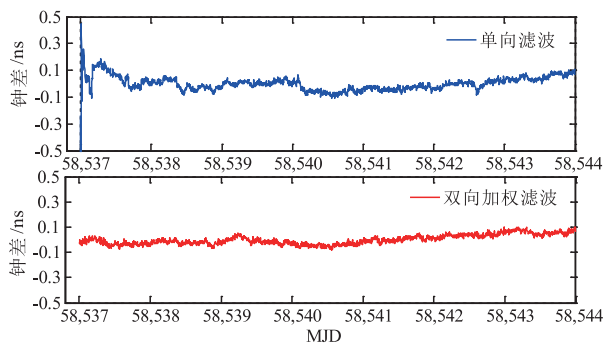


图4 NTP1-NTP3零基线比对钟差

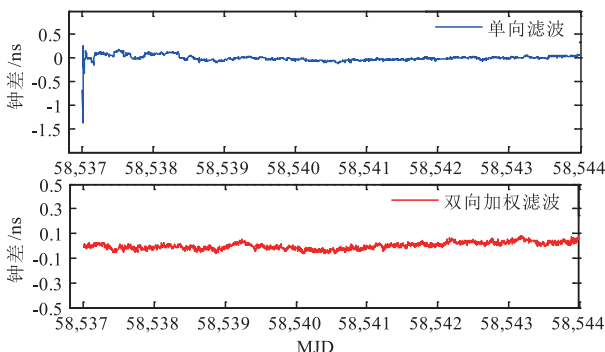


图5 NTP2-NTP3零基线比对钟差

表 1 接收机零基线钟差标准偏差

|           | 单向滤波     | 双向加权滤波   | 双向相对于单向提升百分比 |
|-----------|----------|----------|--------------|
| NTP1-NTP2 | 0.0397ns | 0.0152ns | 61.71%       |
| NTP1-NTP3 | 0.0561ns | 0.0380ns | 32.26%       |
| NTP2-NTP3 | 0.0632ns | 0.0272ns | 56.96%       |

### 3.2 基于 PPP 的精密时间比对

基于载波相位时间比对原理方法如图 6 所示<sup>[9,10]</sup>.

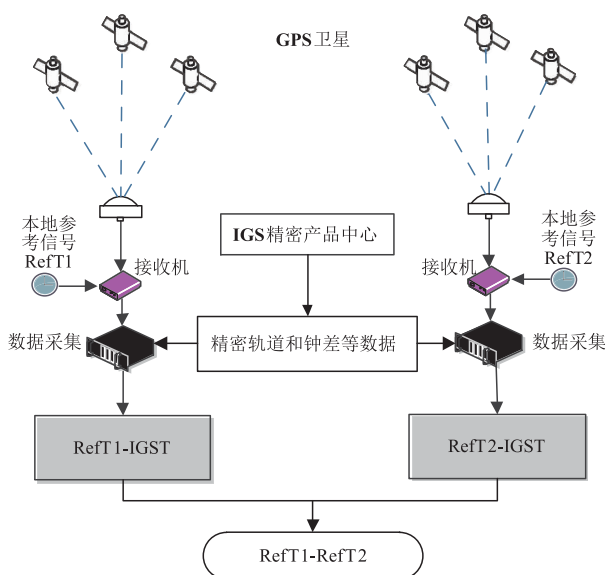


图6 PPP时间比对原理

根据图 6 所示, GPS 载波相位时间比对方法可描述为: 设 A 地的参考时间频率信号为 RefT1, B 地参考时

间频率为 RefT2, 统一的参考时间为 IGST<sup>[11]</sup>.

$$\Delta t_A = \text{RefT1} - \text{IGST} \quad (4)$$

$$\Delta t_B = \text{RefT2} - \text{IGST} \quad (5)$$

式(4)减式(5)即可得到两地的时间偏差:

$$\begin{aligned} \Delta t_A - \Delta t_B &= \text{RefT1} - \text{IGST} - \text{RefT2} + \text{IGST} \\ &= \Delta t_{AB} \end{aligned} \quad (6)$$

本文基于 UTC(NTSC) 以及 UTC(PTB) 时频基准系统, 利用 2019 年 2 月 23 日—2019 年 3 月 24 日 (MJD: 58537 ~ 58566) 两个守时实验室观测的 GPS 采样间隔为 300s 的数据开展 PPP 单向滤波估计以及双向加权滤波估计在高精度时间比对中的研究, 并与 BIPM 发布的比对钟差进行了比较.

表 2 实验室所用的接收机信息

| 实验室  | 接收机编号 | 接收机类型          | 天线类型        |
|------|-------|----------------|-------------|
| NTSC | NTP3  | POLARX4TR PRO  | SEPCHOKE_MC |
| PTB  | PTBB  | ASHTECH Z-XI3T | ASH700936E  |

图 7 为分别利用 GPS PPP 单向滤波估计、双向加权滤波估计以及 BIPM 发布的 UTC(NTSC) 与 UTC(PTB) 两守时实验室时间比对钟差. 通过图可以看出两守时实验室的钟差波动保持在 4ns 以内, 且利用不同方法估计的两条曲线与 BIPM 公布的钟差曲线具有相同的趋势. 下图为采用三种方法获得的 UTC(NTSC)-UTC(PTB) 的频率稳定度.

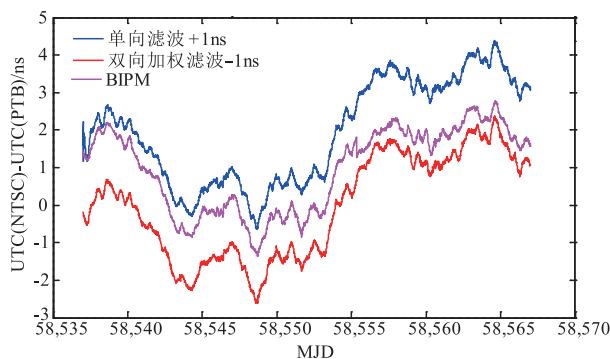


图7 UTC(NTSC)-UTC(PTB)两地钟差

表 3 从数值上显示了两守时实验室比对钟差的频率稳定度.

表 3 UTC(NTSC)-UTC(PTB) 频率稳定度

| Tau (s) | BIPM     | 单向滤波     | 双向加权滤波   |
|---------|----------|----------|----------|
| 300     | 6.10E-14 | 7.02E-14 | 5.74E-14 |
| 600     | 3.74E-14 | 5.10E-14 | 4.53E-14 |
| 1200    | 2.38E-14 | 2.55E-14 | 2.33E-14 |
| 2400    | 1.62E-14 | 1.78E-14 | 1.68E-14 |
| 4800    | 1.14E-14 | 1.22E-14 | 1.15E-14 |
| 9600    | 9.42E-15 | 1.01E-14 | 9.12E-15 |
| 19200   | 9.06E-15 | 1.07E-14 | 9.77E-15 |
| 38400   | 6.90E-15 | 7.60E-15 | 7.50E-15 |
| 76800   | 5.88E-15 | 5.59E-15 | 5.69E-15 |

通过图 8 以及表 3 可以看出双向加权滤波估计钟差优于单向滤波估计的钟差,并与 BIPM 发布的结果相当。

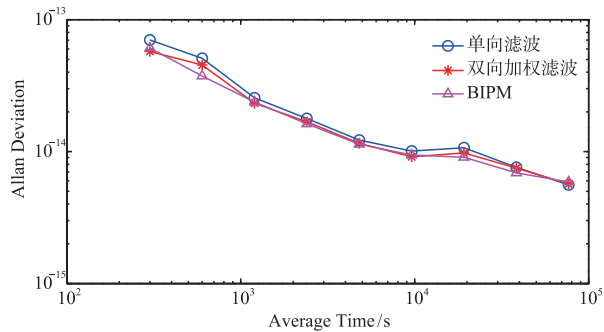


图8 UTC(NTSC)-UTC(PTB)频率稳定度

### 3.3 基于 PPP 的天顶对流层估计

本文采用 IGS 跟踪站(BJFS, BRUX)的 GPS 观测数据分别通过单向滤波估计以及双向加权滤波估计的天顶对流层时延来对比 IGS 分析中心发布的天顶对流层时延进行对比。

表 4 IGS 测站信息

| 观测站  | 位置       | 接收机类型          | 天线类型          |
|------|----------|----------------|---------------|
| BJFS | 中国·北京    | TRIMBLE NETR9  | TRM59900.00   |
| BRUX | 比利时·布鲁塞尔 | SEPT POLARX4TR | JAVRINGANT_DM |

表 4 为选取的 IGS 两个测站的信息,利用 2019 年全年中 2 月 23 日~3 月 4 日,7 月 10 日~7 月 19 日,9 月 1 日~9 月 10 日以及 11 月 10 日~11 月 18 日四个时间段各观测站的 GPS 数据,分别利用两种方法估计天

顶对流层时延,并与 IGS 发布的天顶对流层时延进行对比,其结果如图 9 和图 10 所示。

图 9 和图 10 分别利用单向滤波估计以及双向加权滤波估计得到的两个观测站的天顶对流层时延以及与 IGS 分析中心发布的天顶对流层时延对比,可以看出两种方法与 IGS 分析中心发布的天顶对流层具有较好的一致性,且趋势也相同。由于无法获得天顶对流层时延的绝对“真值”,因此利用 IGS 分析中心权威监测机构公布的各测站的天顶对流层时延值作为“真值”,评估单向滤波估计以及双向滤波加权估计的天顶对流层时延。表 5 和表 6 统计了不同方法计算的天顶对流层时延相对于 IGS 公布结果残差的 RMS 值。

通过表 5 和表 6 可以看出,利用双向加权滤波估计的天顶对流层时延与 IGS 的残差 RMS 值相对较小,相对于单向估计的对流层时延略有提高。

表 5 BJFS 测站残差值 RMS

| 时间                  | 单向滤波    | 双向加权滤波  |
|---------------------|---------|---------|
| 2 月 23 日~3 月 4 日    | 0.0096m | 0.0090m |
| 7 月 10 日~7 月 19 日   | 0.0119m | 0.0106m |
| 9 月 1 日~9 月 10 日    | 0.0090m | 0.0078m |
| 11 月 10 日~11 月 18 日 | 0.0099m | 0.0097m |

表 6 BRUX 测站残差值 RMS

| 时间                  | 单向滤波    | 双向加权滤波  |
|---------------------|---------|---------|
| 2 月 23 日~3 月 4 日    | 0.0159m | 0.0148m |
| 7 月 10 日~7 月 19 日   | 0.0168m | 0.0166m |
| 9 月 1 日~9 月 10 日    | 0.0156m | 0.0152m |
| 11 月 10 日~11 月 18 日 | 0.0104m | 0.0103m |

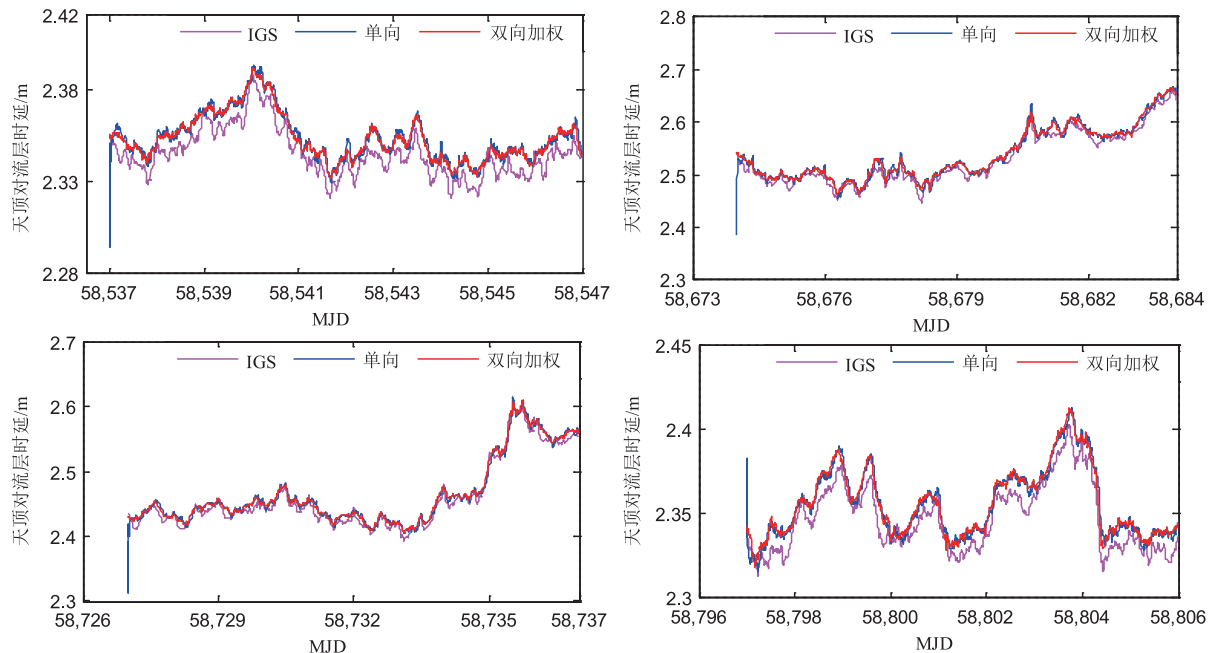


图9 BJFS天顶对流层时延

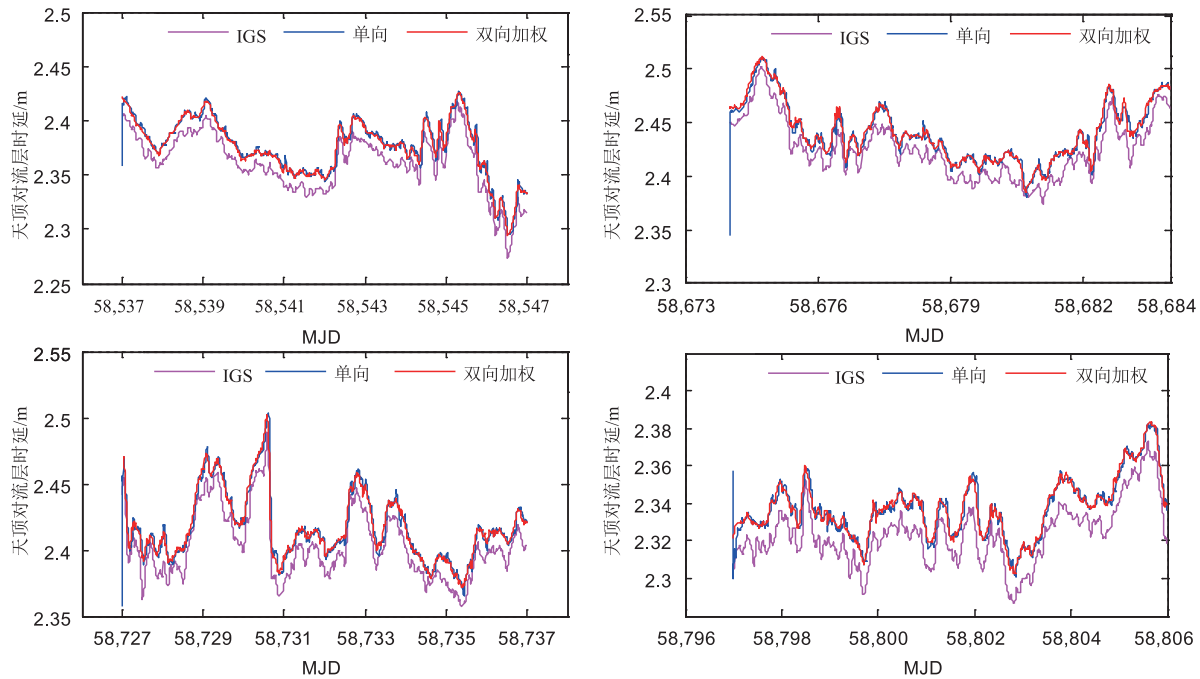


图10 BRUX天顶对流层时延

#### 4 结论

本文利用我国时间基准 UTC (NTSC) 系统和国际上主要守时实验室的时间基准系统,以及 IGS 全球跟踪站的多模多频 GNSS 接收机输出的实测数据,开展 GPS PPP 加权滤波估计与分析研究。

基于 PPP 载波相位数据处理中加入迭代更新的状态协方差阵作为取权因子,开展双向加权滤波估计在接收机零基线校准以及高精度时间比对方面的实验,经过双向加权滤波估计的钟差优于单向滤波估计的钟差。同时,利用 GPS PPP 两种方法估计出的天顶对流层时延与 BIPM 以及 IGS 权威机构公布的结果具有很好的—致性,且双向加权滤波估计的天顶对流层时延相对于单向滤波估计的天顶对流层时延略有提高。

结果表明,基于状态协方差阵加权的滤波估计在基于 PPP 载波相位的应用方面相对于单向滤波估计具有较好的结果。同时,随着现阶段我国北斗三号全球系统的不断建设完善,此算法可应用到北斗 PPP 的研究中,推动我国北斗系统的全球化高精度导航、定位和授时服务。

#### 参考文献

[1] Petit G, Harmegnies A, Mercier F, et al. The time stability of PPP links for TAI[A]. 2011 Joint Conference of the IEEE International Frequency Control and the European Frequency and Time Forum (FCS) Proceedings[C]. IEEE, 2011. 1-5.

[2] Baire Q, Defraigne P, Pottiaux E. Influence of troposphere in PPP time transfer[A]. 2009 IEEE International Frequency Control Symposium Joint with the 22nd European Frequency and Time forum[C]. IEEE, 2009. 1065-1068.

[3] BIPM circ. 375 公报[S]. 2020.

[4] GUANG W, YUAN H B, DONG S W, et al. The evaluation of BeiDou time transfer performance[A]. Frequency Control Symposium (IFCS)[C]. IEEE, 2016. 1-4.

[5] 张继海, 广伟, 袁海波, 等. 北斗测距信号评估与精密单点定位应用研究[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(11): 2707-2714.

ZHANG Ji-hai, GUANG Wei, YUAN Hai-bo, et al. Study on range signal evaluation and precise point positioning application of Beidou navigation satellite system (BDS)[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(11): 2707-2714. (in Chinese)

[6] Z Jiang, A Czubla, J Nawrocki, et al. Towards accurate optical fibre time transfer in UTC[A]. 2014 European Frequency and Time Forum (EFTF)[C]. IEEE, 2014. 231-234.

[7] Z Jiang, Petit G, Arias F, et al. BIPM calibration scheme for UTC time links[A]. 2011 Joint Conference of the IEEE International Frequency Control and the European Frequency and Time Forum (FCS) Proceedings[C]. IEEE, 2011. 1-6.

[8] ZHANG P F, Tu R, GAO Y P, et al. Study of time link calibration based on GPS carrier phase observation[J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2018, 12(11): 1330-1335.

[9] GE Y L, ZHOU F, LIU T J, et al. Enhancing real-time pre-

- cise point positioning time and frequency transfer with receiver clock modeling[J]. *GPS Solutions*,2019,23:1-14.
- [10] 广伟. GPS PPP 时间传递技术研究[D]. 北京:中国科学院研究生院,2012.  
GUANG Wei. Study on time transfer technology using GPS precise point positioning method[D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences,2012. (in Chinese)
- [11] YAO J, LEVINE L. A study of GPS carrier-phase time transfer noise based on NIST GPS receivers[J]. *Journal of Research of NIST*,2016;372-388.

#### 作者简介



张继海 男,1988 年 7 月出生,陕西西安人. 现为中国科学院国家授时中心时间频率基准实验室助理研究员,在读博士生,主要研究方向为高精度时间传递与 GNSS 时差监测.  
E-mail: zhangntsc@126.com



董绍武(通信作者) 男,1963 年 2 月出生,陕西榆林人. 现为中国科学院国家授时中心时间频率基准实验室研究员,博士生导师,主要研究方向为标准时间的产生与保持(守时)技术、GNSS 时间系统等.  
E-mail: sdong@ntsc.ac.cn