DOI:10.14188/j.2095-6045.20260470

文章编号:2095-6045(2026)05-0146-06

多分析中心GNSS实时轨道/钟差稳健综合

蒋馨怡[1]　李　敏[1]　陈　国[1]

1 武汉大学卫星导航定位技术研究中心,湖北 武汉,430079

Robust Combination of GNSS Real-Time Orbit/Clock Products Across Multiple Analysis Centers

JIANG Xinyi[1]　*LI Min*[1]　*CHEN Guo*[1]

1 GNSS Research Center, Wuhan University, Wuhan 430079, China

摘　要:高精度实时轨道钟差是精密定位的基础,针对单个分析中心实时产品不连续不抗差的问题,本文研究并验证了多分析中心GNSS实时产品的稳健综合方法。试验结果表明:融合多分析中心的四系统综合产品完整率从27.53%～99.10%提升到99.13%～100%;综合轨道和钟差产品精度优于大多数分析中心,四系统轨道精度平均提升幅度43.6%～55.7%,钟差精度平均提升幅度12.3%～24.5%;精密动态定位的收敛时间和定位精度亦与最优分析中心相当,其中收敛时间较单分析中心平均缩短42.1%,东、北和高三个方向的定位精度分别为2.4 cm、3.9 cm和4.8 cm,相对分析中心产品定位结果平均提升32%、14%和24%。本文方法可为卫星导航系统实时高精度应用提供技术支撑。

关键词:实时轨道钟差;精密产品综合;精密单点定位;产品完整率

中图分类号:P228

文献标志码:A

Abstract: High-precision real-time orbit and clock error are the foundation of precise positioning. To address the issue of instability in real-time products from a single analysis center, this paper studies and validates a comprehensive method for multi-GNSS real-time orbit and clock products. Experimental results show that the integrated product from multiple analysis centers avoids service discontinuity caused by data interruptions in a single analysis center, with the completeness rate of four-system products increasing from 27.53%～99.10% to 99.13%～100%. The accuracy of the integrated orbit and clock error products is superior to that of most analysis centers, with an average improvement in one-dimensional averaging accuracy of the four-system orbit ranging from 43.6% to 55.7%, the average improvement in clock accuracy is in 12.3%～24.5%; The convergence time and positioning accuracy of the integrated product's precise dynamic positioning are comparable to those of the optimal analysis center. Specifically, the convergence time is on average 42.1% shorter than that of a single analysis center. The positioning accuracies in the east, north and height directions are 2.4 cm, 3.9 cm and 4.8 cm, respectively, with relative improvements of 32%, 14%, and 24% compared to the positioning results of the analysis center product. The conclusion indicates that the method proposed in this paper can provide technical support for real-time high-precision applications of satellite navigation systems.

Key words: real-time orbit and clock; precise product combination; precise point positioning; product completeness rate

近年来,实时高精度用户对全球导航卫星系统(global navigation satellite system,GNSS)实时精密定位服务的稳定性、精度和完好性提出了更高的要求,实时精密轨道与钟差是实时定位的基础,其质量好坏直接影响定位的精度和连续性。国际GNSS服务组织(IGS)成立了实时工作组(real time working group, RTWG),并自2013年起,推出实时服务(real time service, RTS)[1],多个分析中心向全球用户实时播发高精度的卫星轨道与钟差产品[2-4]。

由于分析中心采用的数据处理策略不尽相同,其生成的实时轨道与钟差产品在精度与数据可用性方面存在差异[5]。单一分析中心的产品在实际使用中可能出现精度波动、数据不稳定等问题,难以在连

引用格式:蒋馨怡,李敏,陈国. 多分析中心GNSS实时轨道/钟差稳健综合[J]. 测绘地理信息,2026,51(5):146-151(JIANG Xinyi, LI Min, CHEN Guo. Robust Combination of GNSS Real-Time Orbit/Clock Products Across Multiple Analysis Centers[J]. Journal of Geomatics, 2026, 51(5): 146-151)

基金项目:湖北省自然科学基金创新群体项目(2025AFA038);湖北省国际合作项目(2025EHA042);山西省重点研发计划(202402010101001)。

续性和可靠性方面满足用户高鲁棒性实时定位的要求[6]。因此,有效综合多个分析中心的实时轨道钟差产品,提升实时产品的完整性和精度,已成为当前GNSS实时产品服务的研究热点,IGS和全球连续监测评估系统(international gnss monitoring and assessment system,iGMAS)框架下的多个机构开展了相应研究。

传统产品综合方法主要基于GPS事后产品构建,其中,加权平均法是目前研究最深入的方法,其基本流程主要包括数据预处理和加权平均[7,8]。数据预处理主要识别并剔除异常轨道钟差数据,为了保证事后轨道产品的框架统一,还可通过分析中心提供的地球自转参数(earth rotation parameters,ERP)或IGS站坐标综合产品中提供的旋转参数实现轨道产品的定向基准统一[9,10]。此外,考虑卫星钟差与轨道,测站钟差与测站坐标之间的耦合性,钟差预处理还需要在钟差综合前进行钟差与轨道及站坐标产品间的一致性改正[11]。在综合模型方面,Beutler等[9]采用相似变换削弱不同轨道产品间的基准差异,采用线性变换消除不同钟差产品之间的系统差异。利用综合模型计算的轨道钟差残差统计结果即可确定分析中心的权重,继而获得加权结果[12-14]。

随着BDS、Galileo等全球导航卫星系统的相继部署与迭代升级,单机构的多系统实时轨道与钟差产品服务已经形成。IGS基于单历元加权平均方法提供实时综合轨道和钟差产品,同时提供基于卡尔曼滤波方法的实时钟差综合产品[6,15],但其产品精度和稳健性仍有进一步提升空间[16,17]。因此,开展多分析中心GNSS实时轨道/钟差的稳健综合方法研究,有助于克服单分析中心产品的局限性,并利用BDS、Galileo等系统的实时产品,从而提升实时产品的精度与可靠性,保障实时精密定位服务的性能。

1　实时轨道钟差综合方法

1.1　实时轨道综合

本文使用加权平均法进行轨道综合,首先将分析中心的轨道产品转换到同一个参考框架下,然后对各个分析中心的轨道产品设定合适的权值,从而得到加权平均轨道,其函数模型如下[14]:

$$\mathrm{orb}_{\mathrm{com}}=\frac{\sum_{i=1}^{n}P^{i}\times\left(\mathrm{orb}_{si}+T_i+D_i\times\mathrm{orb}_{si}+R_i\times\mathrm{orb}_{si}\right)}{\sum_{i=1}^{n}P^{i}} \tag{1}$$

式中,orb_{si}表示经过精密轨道恢复后的分析中心轨道产品;$\mathrm{orb}_{\mathrm{com}}$表示综合轨道;$T_i,D_i,R_i$表示分析中心轨道相对综合轨道的转换参数,包括平移参数、尺度参数和旋转参数;P^i表示分析中心权重。

1.2　实时钟差综合

为保证卫星综合钟差与综合轨道的一致性,需借助分析中心的轨道及综合轨道,对钟差产品实施一致性校正。具体修正公式如下:

$$\Delta\mathrm{clk}_{\mathrm{SAT}}=\left(\left(\mathrm{orb}_{si}-\mathrm{orb}_{\mathrm{com}}\right)\times X_{AC}\right)/R_{\mathrm{SAT}}/c \tag{2}$$

式中,$\Delta\mathrm{clk}_{\mathrm{SAT}}$表示分析中心卫星钟差产品的一致性改正量[18];$R_{\mathrm{SAT}}$为分卫星的位置矢量;$c$为光速。

单一分析中心解算得到的实时钟差产品可能出现数据中断、精度不稳定等异常现象,进而影响最终钟差综合产品的质量。因此,在进行钟差综合之前,对异常数据进行粗差探测与剔除。本文采用绝对偏差中位数(median absolute deviation, MAD)作为钟差综合中粗差剔除的统计指标。具体计算如下[19]:

$$\begin{cases}\mathrm{clk}_a^{g,s}(i)=C_a^{g,s}(i)+T_a^{g}(i)+O_a^{g,s}\\ \mathrm{clk}_a^{g,s}(i+1)=C_a^{g,s}(i+1)+T_a^{g}(i+1)+O_a^{g,s}\end{cases} \tag{3}$$

式中,g表示卫星导航系统;a代表分析中心;s表示卫星;i表示历元时刻;clk为基于实时卫星钟差改正数恢复的分析中心钟差产品;C为卫星钟的物理数值;T为时间基准偏差;O为初始卫星钟差偏差;$C_a^{g,s}$表示与分析中心所采用的解算软件及处理策略相关的误差项。

提取前后历元观测到的公共卫星s,并对它们做历元间差分,可得:

$$\Delta\mathrm{clk}_a^{g,s}(i,i+1)=\Delta C_a^{g,s}(i,i+1)+\Delta T_a^{g}(i,i+1) \tag{4}$$

计算前后相邻历元之间所有公共卫星的历元间差分钟差值,并采用中位数探测方法识别这些公共卫星中可能存在的钟差粗差。具体计算公式如下:

$$\Delta\mathrm{clk}_a^{g,\mathrm{med}}(i,i+1)=\mathrm{median}\left\{\Delta\mathrm{clk}_a^{g,s}(i,i+1)\right\} \tag{5}$$

$$\mathrm{MAD}_a^{g}(i)=\frac{\mathrm{MED}\left\{\left|\begin{array}{c}\Delta\mathrm{clk}_a^{g,s}(i,i+1)\\-\Delta\mathrm{clk}_a^{g,\mathrm{med}}(i,i+1)\end{array}\right|\right\}}{0.6745} \tag{6}$$

$$\left|\begin{array}{c}\Delta\mathrm{clk}_a^{g,s}(i,i+1)-\\ \Delta\mathrm{clk}_a^{g,\mathrm{med}}(i,i+1)\end{array}\right|>3\mathrm{MAD}_a^{g}(i+1) \tag{7}$$

式(5)至式(7)中,$\Delta\mathrm{clk}_a^{g,s}(i,i+1)$为相邻历元之间公共卫星所构成的钟差差分序列,median表示取中位数,$\Delta\mathrm{clk}_a^{g,\mathrm{med}}$为钟差差分序列的中位数。

对于某一公共卫星,若其差分钟差值与序列中

位数之间的偏差满足式(7)所给出的判别条件,则将该卫星钟差判定为粗差。按卫星系统依次遍历前后历元中的所有公共卫星,即可获得经过粗差探测处理后的正常公共卫星集合。

本文使用卡尔曼滤波方法对分析中心的实时钟差进行综合。卡尔曼滤波估计实时钟差的观测方程可表达为:

$$\mathrm{clk}_a^{g,s}(i)=C_{\mathrm{com}b}^{g,s}(i)+T_a^g(i)+O_a^{g,s} \tag{8}$$

式中,i表示历元时刻,g代表导航系统,$a=[1,\cdots,m]$为分析中心,$s=[1,\cdots,n]$为卫星,m为分析中心个数,n为卫星个数。clk表示分析中心的实时钟差产品,$C_{\mathrm{com}b}^{g,s}$为综合钟差,T_a^g为时间基准偏差,$O_a^{g,s}$为初始卫星钟差偏差。在i历元,误差方程的矩阵形式可表达如下:

$$\underset{(m\times n)\times 1}{\boldsymbol{v}_{\mathrm{clk}}(i)}=\underset{(m\times n)\times(n+m+m\times n)}{\boldsymbol{B}}\times\underset{(n+m+m\times n)\times 1}{\boldsymbol{x}(i)}-\underset{(m\times n)\times 1}{\boldsymbol{l}(i)} \tag{9}$$

式中,$\boldsymbol{v}_{\mathrm{clk}}$表示单一分析中心卫星钟差产品的观测值残差;$\boldsymbol{B}$为系数矩阵;$\boldsymbol{l}$为观测值,可具体表述为:

$$\underset{(m\times n)\times 1}{\boldsymbol{v}_{\mathrm{clk}}(i)}=\left[\mathrm{clk}_1^{g,1}(i)\cdots\mathrm{clk}_1^{g,n}(i)\cdots\mathrm{clk}_m^{g,1}(i)\cdots\mathrm{clk}_m^{g,n}(i)\right]^{\mathrm{T}}$$

$$\underset{(m\times n)\times(n+m+m\times n)}{\boldsymbol{B}}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{I}_{n\times n} & \boldsymbol{E}_{n\times 1} & \cdots & 0_{n\times 1} & \boldsymbol{I}_{n\times n} & \cdots & 0_{n\times n}\\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots\\ \boldsymbol{I}_{n\times n} & 0_{n\times 1} & \cdots & \boldsymbol{E}_{n\times 1} & 0_{n\times n} & \cdots & \boldsymbol{I}_{n\times n}\end{bmatrix}$$

$$\underset{(n+m+m\cdot n)\times 1}{\boldsymbol{x}(i)}=\left[c_{\mathrm{com}b}^{g,1}(i)\cdots c_{\mathrm{com}b}^{g,n}(i)\ t_1^g(i)\cdots t_m^g(i)\ o_1^{g,1}\cdots o_1^{g,n}\cdots o_m^{g,1}\cdots o_m^{g,n}\right]^{\mathrm{T}}$$

$$\underset{(m\cdot n)\times 1}{\boldsymbol{l}(i)}=\begin{bmatrix}\mathrm{clk}_1^{g,1}(i)-C_{\mathrm{com}b}^{g,1,0}(i)-T_1^{g,0}(i)-O_1^{g,1,0}\\ \vdots\\ \mathrm{clk}_1^{g,n}(i)-C_{\mathrm{com}b}^{g,n,0}(i)-T_1^{g,0}(i)-O_1^{g,n,0}\\ \vdots\\ \mathrm{clk}_m^{g,1}(i)-C_{\mathrm{com}b}^{g,1,0}(i)-T_m^{g,0}(i)-O_m^{g,1,0}\\ \vdots\\ \mathrm{clk}_m^{g,n}(i)-C_{\mathrm{com}b}^{g,n,0}(i)-T_m^{g,0}(i)-O_m^{g,n,0}\end{bmatrix}$$

其中,$\boldsymbol{I}_{n\times n}$为$n$维单位阵;$\boldsymbol{E}_{n\times 1}$为全1列矩阵;$c_{\mathrm{com}b}$表示综合钟差参数改正数;$t$表示时间基准偏差改正数;$O$表示初始卫星钟差偏差改正数;$C_{\mathrm{com}b}^0$为综合钟差初值;$T^0$为时间基准偏差初值;$O^0$为初始卫星钟差偏差初值,其余符号的定义与式(8)相同。

1.3 实时产品评估

本文从产品完整率、精度与定位性能三个方面对综合产品进行评估。

产品完整率是衡量实时产品服务产品质量的关键指标之一,它直接关系到实时定位服务的连续性。具体计算公式如下:

$$\begin{cases}\mathrm{AVA}_a^s=\dfrac{N_{\mathrm{act},a}^s}{N_{\mathrm{full},a}^s}\\ \mathrm{AVA}_a=\dfrac{1}{n}\sum_{s=1}^n\mathrm{AVA}_a^s\end{cases} \tag{10}$$

式中,a表示分析中心;s表示卫星;n是卫星数量;N_{act}表示卫星实际历元个数;N_{full}表示卫星理论历元个数;AVA_a^s表示分析中心a下卫星s的数据完整率;AVA_a为分析中心a的n颗卫星的数据完整率的平均值。

在进行产品精度评估时,选取IGS事后产品作为参考。将同一历元下待评估轨道与参考轨道作差运算,获得地固系下的坐标差异量,并转换至径向、切向和法向,计算各向实时轨道误差均方根(RMS):

$$\mathrm{RMS}_d=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k\Delta d^2(i)}{k}} \tag{11}$$

式中,d代表切向A、径向R或法向C的轨道误差;k为历元总数。

本文按照Yao等[18]提出的钟差评估方法进行精度评估,可以避免参考钟的切换导致的钟差二次差序列的分段跳跃问题[19],确保钟差精度的统计结果不受参考星数据缺失的影响,具体公式如下:

$$\begin{cases}\Delta T_{\mathrm{ref}}(i)=\dfrac{\sum_{s=1}^n\mathrm{clk}_{rt}^s(i)-\sum_{s=1}^n\mathrm{clk}_{\mathrm{post}}^s(i)}{n}\\ \Delta\mathrm{clk}^s(i)=\mathrm{clk}_{rt}^s(i)-\mathrm{clk}_{\mathrm{post}}^s(i)-\Delta T_{\mathrm{ref}}(i)\end{cases} \tag{12}$$

式中,i表示历元时刻;s表示卫星数量;clk_{rt}为实时精密卫星钟差;$\mathrm{clk}_{\mathrm{post}}$为事后精密卫星钟差;$\Delta T_{\mathrm{ref}}$为实时与事后精密钟差的系统性偏差;$\Delta\mathrm{clk}^s$为钟差二次差。

2 实时产品综合结果

本节使用2026年第53天实时接入IGS分析中心的GPS、Galileo、GLONASS与BDS-3轨道与钟差产品进行综合,评估综合产品的完整率和精度,并利用IGS全球站观测数据开展动态定位性能对比分析。其中,定位收敛时间以水平和垂直误差分别连续5 min小于0.2 m和0.4 m作为收敛依据。

2.1 产品完整率

分析中心产品完整率与综合产品的完整率见表1。APM、BKG、GFZ、WHU等中心表现较为稳定,Galileo

和GPS系统的完整率普遍较高(多数在93%以上),且系统内部卫星之间差异较小,说明该双系统的产品解算和服务较为稳定。GLONASS系统在多个中心出现不同程度的数据缺失问题,即使是同一分析中心,数据完整率较GPS和Galileo要小1%~26%。提供BDS-3实时轨道钟差服务的分析中心仅四家,且各中心之间差异较大,其中,SHA的北斗完整率仅27.53%。整体而言,单个分析中心实时产品在不同程度上会受到网络异常、解算失败等因素引起的中断现象,这与Kazmierski等发现的现象一致[20]。对于综合的实时产品(Wuhan Combination Center,WCC),GPS、Galileo与BDS-3的数据完整率均为100%,GLONASS系统的数据完整率也超过99%,与单一分析中心的数据完整率相比,综合产品显著提升了产品的可用性。

表 1　实时产品完整率/%

Tab. 1　Integrity Rate of Real-Time Products/%

分析中心	GPS	Galileo	GLONASS	BDS−3
APM	99.10	99.06	98.06	98.85
BKG	93.14	93.23	85.33	—
CHC	97.81	97.81	97.81	97.7
CNE	92.87	92.99	66.94	—
GFZ	93.65	93.72	85.92	—
SHA	79.60	80.57	75.32	27.53
WHU	91.74	91.91	90.62	88.90
WCC	100	100	99.13	100

2.2　轨道精度

分析中心与综合轨道产品的均方根误差见图1,具体统计结果见表2。

WCC综合轨道产品除GPS稍劣于WHU,其他三系统轨道产品精度均是最优,说明基于多分析中心产品,综合的实时轨道可以显著削弱异常分析中心的影响。GPS、GLONASS、Galileo和BDS-3综合轨道的三维误差均方根均值分别为3.0 cm、4.2 cm、3.5 cm和4.8 cm,相较于分析中心分别平均提升了43.9%、43.6%、55.7%和48.9%。

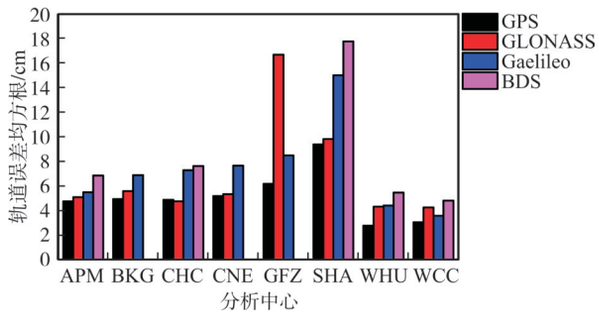


图 1　四系统卫星轨道三维误差均方根均值

Fig. 1　Averaging RMS of Orbital Errors for Four Constellations

2.3　钟差精度

图2为分析中心和综合钟差的精度对比。分析中心的钟差产品往往受数据处理策略和数据质量等因素影响,部分系统的钟差产品精度在分析中心间差异较大。而综合产品通过综合利用多个分析中心产品可以较好地实现质量控制,使得钟差性能与最优分析中心基本相当。

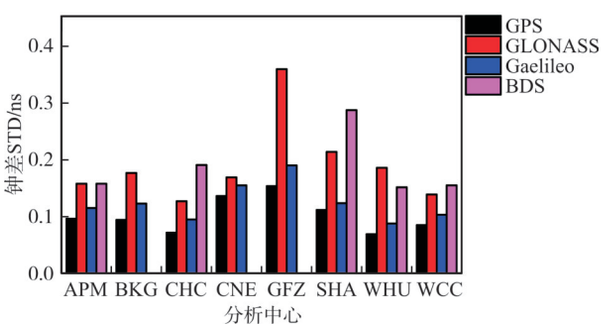


图 2　四系统卫星钟差精度

Fig. 2　Clock Accuracy Among Four Constellations

四系统综合钟差的标准差提升百分比见表3。相对大多数分析中心,综合钟差的精度均有不同程度的改善。GPS、GLONASS、Galileo和BDS-3综合钟差精度相较于分析中心分别平均提升了12.3%,24.5%,13.9%和16.2%。

表 2　分析中心和综合产品的轨道误差统计值/cm

Tab. 2　Orbital RMS of Four Constellations for Analysis Centers and Combined Solutions/cm

分析中心	GPS			Galileo			GLONASS			BDS−3		
	切向	法向	径向	切向	法向	径向	切向	法向	径向	切向	法向	径向
APM	5.0	5.8	3.0	5.6	5.7	5.1	6.3	5.6	2.6	8.1	7.1	5.0
BKG	4.7	5.6	4.4	6.8	7.2	6.6	6.9	5.5	3.9	—	—	—
CHC	4.5	5.2	4.9	7.8	7.7	6.2	5.6	5.4	2.7	8.8	8.2	5.4
CNE	4.8	5.9	4.7	7.7	8.0	7.2	6.5	5.4	3.7	—	—	—
GFZ	7.8	6.1	4.0	9.8	8.9	6.4	18.8	17.1	13.8	—	—	—
SHA	7.5	10.9	9.4	14.4	14.7	15.9	11.9	8.3	8.9	20.3	16.8	15.9
WHU	3.1	3.3	1.6	5.2	4.9	2.6	5.3	4.6	2.5	6.0	4.9	5.4
WCC	3.3	3.3	2.4	4.2	3.8	2.4	5.2	4.6	2.4	5.6	4.8	3.9

表 3 综合钟差精度提升统计/%

Tab. 3 Improvement of Combined Clock Compared to the Individual Products/%

分析中心	GPS	GLONASS	Galileo	BDS－3	均值
APM	11.5	12.0	10.4	1.9	9.0
BKG	9.6	21.5	16.3	—	15.8
CHC	－18.1	－1.5	－8.4	18.8	－2.3
CNE	37.5	17.8	33.5	—	29.6
GFZ	44.8	61.4	45.8	—	50.7
SHA	24.1	35.0	16.9	46.2	30.6
WHU	－23.2	25.3	－17.0	－2.0	－4.2
均值	12.3	24.5	13.9	16.2	18.4

2.4 定位性能

选取全球 5 个 GNSS 测站：ARHT（南极洲）、BOGT、CHPI（南美洲）、GCGO（北美洲）、NKLG（非洲），利用其观测数据评估分析中心和综合产品的定位性能。定位解算时使用 GPS、GLONASS、Galileo 与 BDS-3 四系统双频无电离层组合（GPS：L1/L2，GLONASS：G1/G2，Galileo：E1/E5a，BDS-3：B1I/B3I），数据处理间隔为 30 s，截止高度角为 7°，详细的定位解算策略见参考文献[21]。图 3 为分析中心与综合产品的动态定位收敛时间对比。

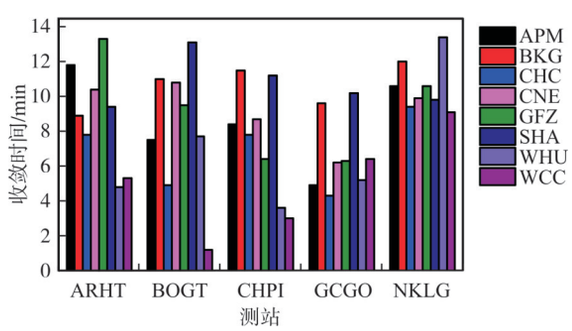


图 3 分析中心实时产品的定位收敛时间

Fig. 3 Positioning Convergence Time for Real-Time Products of Analysis Centers

基于综合轨道和钟差产品的精密定位收敛时间更快，在 5 个测站中，WCC 的收敛时间始终保持在 6～10 min 的范围内，5 个测站的平均收敛时间约为 5 min，在所有分析中心中收敛时间最短，相对单个分析中心收敛时间提升 26.9%～53.4%，这主要与综合产品有更多的可用卫星有关。以 BOGT 测站为例，图 4 给出 0:00～8:00 时段的定位误差序列与卫星时序。对比结果显示，单分析中心因可用卫星数不稳定，定位结果存在跳变；WCC 实时轨道钟差综合利用了多个分析中心的数据，多数历元的可用卫星更多，定位结果更为稳定，收敛更快。

表 4 给出为所有测站三个方向上的定位误差统计值。从表中可以得出：综合产品的定位精度普遍

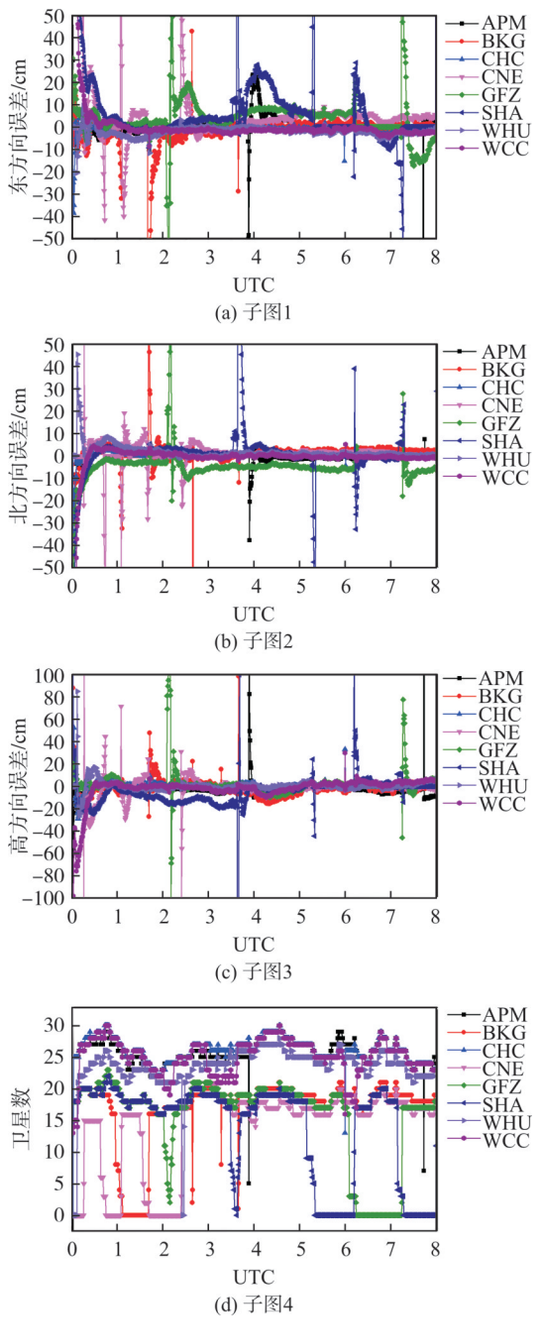


图 4 BOGT 测站定位误差序列

Fig. 4 Positioning Error Sequence of BOGT Station

优于多数分析中心，仅稍劣于 WHU，相对单个分析中心，在东、北、高方向平均提升幅度分别为 32%、14% 和 24%。

3 结束语

面向多系统实时精密产品稳健服务需求，本文研究了多分析中心 GNSS 实时轨道/钟差的稳健综合方法，并从产品完整率、精度和精密定位性能评估了综合产品效果。

结果表明，综合产品可显著弥补单一分析中心服务中断的缺陷，综合产品的完整率显著优于单一

表 4　实时产品精密单点定位误差统计结果/cm

Tab. 4　Statistics of Positioning Error for Real-Time Products of Analysis Centers/cm

分析中心	东	北	高
APM	3.3	4.4	5.8
BKG	2.7	4.3	5.4
CHC	2.3	4.2	4.9
CNE	4.2	3.6	5.9
GFZ	9.4	7.2	12.2
SHA	6.3	7.8	12.1
WHU	2.6	3.2	4.7
WCC	2.4	3.9	4.8

分析中心,有效保障了实时产品服务的连续性;轨道钟差综合产品的精度优于大多数分析中心;在动态精密定位场景下,综合产品可将收敛时间缩短26.9%～53.4%,且可改善单个分析中心实时产品缺失引起的定位不连续和精度跳变影响。本文综合方法可应用于GNSS高精度实时服务。

参 考 文 献

[1] Bosy J, Szafranek K, Figurski M, et al. Advanced Global Navigation Satellite Systems Troposphere Products for Monitoring Severe Weather Events and Climate (GNSS4SWEC) —Plan of Polish Participation in COST Actions ES1206[C]//EUREF 2013 Symposium,Budapest, Hungary,2013

[2] Caissy M, Agrotis L, Weber G, et al. The IGS Real-Time Service[C]//EGU General Assembly Conference Abstracts. Vienna, Austria, 2013: EGU2013-11168

[3] Johnston G, Riddell A, Hausler G. The International GNSS Service[M]//Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems. Cham: Springer International Publishing, 2017: 967-982

[4] Gong Xiaopeng, Gu Shengfeng, Lou Yidong, et al. An Efficient Solution of Real-Time Data Processing for Multi-GNSS Network[J]. Journal of Geodesy, 2018, 92(7): 797-809

[5] 娄俊萍, 李文文, 陈克杰. 不同IGS产品对精密单点定位的影响[J]. 测绘地理信息, 2013, 38(4): 21-23

[6] 陈亮. 北斗/GNSS实时精密卫星轨道钟差产品组合理论与方法研究[D]. 武汉:武汉大学,2021

[7] 姚宜斌, 刘经南, 陶本藻, 等. 基于SINEX文件的ERP参数估计[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2005, 30(8): 739-743

[8] 魏娜, 施闯, 李敏, 等. IGS产品的一致性分析及评价[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2009, 34(11): 1 363-1 367

[9] Beutler G, Brockmann E, Gurtner W, et al. Extended Orbit Modeling Techniques at the CODE Processing Center of the International GPS Service for Geodynamics (IGS): Theory and Initial Results[J]. Manuscripta Geodaetica, 1994, 19(6): 367-385

[10] Springer T, Zumberge J, Kouba J. The IGS Analysis Products and the Consistency of Combination Solutions[C]//IGS Analysis Center Workshop, Darmstadt, 1998

[11] Griffiths J. Misalignment of the AC Final Orbits[R]. (2012-11-16)[2026-06-30]. https://acc.igs.org/orbits/acc_report_final_rotations.pdf

[12] Kouba J, Springer T. New IGS Station and Satellite Clock Combination[J]. GPS Solutions, 2001, 4(4): 31-36

[13] 陈国. GNSS产品综合方法及在iGMAS中的应用[D]. 武汉: 武汉大学, 2019

[14] 陈康慷, 徐天河, 杨玉国, 等. iGMAS GNSS钟差产品综合与评估[J]. 测绘学报, 2016, 45(S2): 46-53

[15] Mervart L, Weber G. Real-Time Combination of GNSS Orbit and Clock Correction Streams Using a Kalman Filter Approach[C]// Proceedings of the 24th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2011. Portland, Oregon, 2011: 707-711

[16] Jean Y, Dach R. IGS International GNSS Service Technical Report 2014[R]. Astronomical Institute, Bern, Switzerland:University of Bern, 2015

[17] Zhang Liang, Yang Hongzhou, Yao Yibin, et al. A New Datum Jump Detection and Mitigation Method of Real-Time Service (RTS) Clock Products[J]. GPS Solutions, 2019, 23(3): 67

[18] Yao Yibin, He Yadong, Yi Wenting, et al. Method for Evaluating Real-Time GNSS Satellite Clock Offset Products[J]. GPS Solutions, 2017, 21(4): 1 417-1 425

[19] Wang Zhiyu, Li Zishen, Wang Liang, et al. Assessment of Multiple GNSS Real-Time SSR Products from Different Analysis Centers[J]. ISPRS International Journal of Geo-information, 2018, 7(3): 85

[20] Kazmierski K, Sośnica K, Hadas T. Quality Assessment of Multi-GNSS Orbits and Clocks for Real-Time Precise Point Positioning[J]. GPS Solutions, 2017, 22(1): 11

[21] 沈天枫, 陈国, 阚昊宇, 等. BDS-3 PPP-B2b太阳活动高年期间服务性能评估[J]. 测绘地理信息, 2025, 50(6): 42-47

修回日期:2026-09-10

第一作者:蒋馨怡,硕士,主要从事IGS精密数据处理。E-mail:2026202140010@whu.edu.cn

通信作者:陈国,副研究员,主要从事北斗多源时空基准信息综合理论方法和应用。E-mail:guo_chen@whu.edu.cn