

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2020.05.008

GPS/GLONASS/GALILEO 实时服务(RTS) 产品性能评估分析

王乐¹, 岳帆¹, 苗晨²

(1. 长安大学地质工程与测绘学院, 西安 710054;
2. 国家遥感中心, 北京 100036)

摘要:目前,不同机构提供的GNSS实时服务产品性能存在差异。为了全面揭示实时服务产品的性能,为系统服务和用户应用提供参考,统计了各实时服务产品的历元完整率及卫星数量,基于实时轨道和钟差恢复方法,比较分析了产品精度,并评估了产品定位性能。研究表明:正常情况下,实时服务产品的历元完整率较高,基本可保持在95%以上,所提供系统的卫星数量保持稳定且充足。对于GPS,各机构卫星实时轨道平均精度基本一致,约为3cm,实时钟差精度略有差别。对于其他GNSS,不同机构产品精度存在差别。利用实时服务产品进行GPS实时精密单点定位的平面精度优于10cm,高程精度优于20cm。相对于GPS单系统,多系统联合定位精度基本一致,但收敛速度明显提升。

关键词:实时服务;评估;轨道和钟差;精度;精密单点定位

中图分类号:V324.2+4 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):
文章编号:2095-8110(2020)05-0065-08



Performance Evaluation and Analysis of GPS/GLONASS/GALILEO Real-Time Service (RTS) Products

WANG Le¹, YUE Fan¹, MIAO Chen²

(1. College of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China;
2. National Remote Sensing Center of China, Beijing 100036, China)

Abstract: At present, there are differences in the performance of GNSS Real-Time Service (RTS) products provided by different institutions. It is of practical significance to comprehensively evaluate the performance of GNSS RTS products, which can provide references for the services and applications of GNSS. The epoch integrity rate and the number of satellites of each RTS product are counted. The accuracy of all RTS products is compared and analyzed based on recovery methods of the real-time orbit and clock-difference products. Real-Time Precise Point Positioning (RT-PPP) performances of RTS products are evaluated through experiments. The results of research show that the epoch integrity rate of RTS products is relatively high under normal circumstances, which can basically be maintained above 95%, and the number of satellites remains stable and sufficient. For GPS, the average accuracy of real-time satellite orbits of all RTS products is basically the

收稿日期:2020-03-30;修订日期:2020-04-25

基金项目:国家自然科学基金(41774025,41731066);国家重点研发计划(2018YFC1505100);
中央高校基本科研业务费专项(300102260106)

作者简介:王乐(1986-),男,博士,工程师,主要研究方向为精密定位定轨。E-mail: rexle@163.com

same, about 3 cm, and the real-time clock-difference accuracy is slightly different. For other GNSS, there are differences in the accuracy of different RTS products. Using RTS products, the accuracy of GPS RT-PPP is better than 10cm in the east and north components, and 20cm in the vertical components. Compared with RT-PPP using single-GPS, the accuracy of multi-system joint positioning is basically the same, but the convergence speed is significantly improved.

Key words: RTS; Evaluation; Orbit and clock offset; Accuracy; PPP

0 引言

鉴于广播星历和超快速产品的钟差精度均难以满足实时精密单点定位(Real-Time Precise Point Positioning, RT-PPP)的需求,国际GNSS服务组织(International GNSS Service, IGS)于2007年开始实施IGS实时精密单点定位项目,并于2013年正式生成并对外播发状态空间表示(State Space Representation, SSR)格式的实时数据流轨道和钟差改正数^[1-3]。用户可以基于广播星历和实时改正产品实时恢复出精密卫星轨道和钟差,进而进行实时精密单点定位。随着技术的发展,提供实时服务(Real-Time Service, RTS)的机构和导航系统越来越多。目前,共有8家权威机构独立提供实时服务,分别是德国联邦制图与大地测量局(Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, BKG)、法国空间研究中心(Centre National d'Etudes Spatiales, CNES)、德国航空航天中心(Deutsches Zentrum für Luftund Raumfahrt, DLR)、欧洲航天研究操作中心(European Space Agency/European Space Operations Centre, ESA/ESOC)、德国波茨坦地学研究中心(German Research Centre for Geosciences, GFZ)、西班牙航空航天研究中心(GMV Aerospace and Defense, GMV)、加拿大自然资源部(Natural Resources Canada, NRCAN)和中国武汉大学(Wuhan University, WUHAN)^[4]。已有学者对实时改正产品的性能进行了研究,夏凤雨等对部分机构播发的全球定位系统(Global Positioning System, GPS)卫星实时钟差精度进行了分析,并重点对基于SSR改正的GPS实时PPP精度进行了讨论,结果显示其各方向精度优于20cm^[5]。赵爽等分析发现CNES的GPS实时产品的完整性基本大于90%,产品精度轨道优于4.5cm,钟差优于0.09ns,静态单天解优于3cm^[6]。赵兴旺等利用CNES的实时服务产品,对GPS/GALILEO组合实时定位性能进行了分析研究,结果表明组合实时动态PPP在3个方

向的平均精度分别为4.3cm、2.9cm和7cm^[7]。张亮等系统地比较和分析了各机构GPS实时服务轨道、钟差产品的精度和服务性能,结果表明,轨道精度为3.8~7.5cm,钟差精度为1.9~5.6cm^[8]。汪亮等分析了CNES播发的GPS、GLONASS和GALILEO的实时轨道和钟差精度,其中GPS实时产品精度最高,GLONASS精度最差^[9]。刘腾等对5家机构的GPS实时轨道和钟差进行了分析,结果表明,GPS轨道位置精度优于5cm,钟差精度优于0.12ns^[10]。但是,上述论文均未对所有机构的各系统产品及定位性能进行完整的评估分析。

目前,上述国际GNSS机构提供的RTS产品解算原理和策略不同,导致产品性能存在一定差异。为了较为全面地揭示RTS产品性能,本文针对各机构RTS产品的完整性、精度及其对实时定位收敛时间和精度等的影响进行了全面的计算、比较、评估和分析,对促进导航系统RTS具有重大参考和应用价值。

由于GFZ的实时产品CLK70和CLK71处于中断状态,本文对其他7个权威机构的实时产品的精度和定位等服务性能进行评估和分析。首先,在相同环境下接收并保存连续一周的各机构RTS产品,并进行完整性统计;然后,利用广播星历和RTS产品,恢复实时精密轨道和钟差,并以GFZ的最终产品为基准,比较分析实时轨道和钟差精度;最后,进行实时PPP解算,评估目前基于RTS产品的RT-PPP的定位性能。

1 RTS产品完整性统计分析

各机构RTS产品及卫星系统如表1所示。由于BDS广播星历数据龄期(Issue of Data, IOD)与RTS产品无法匹配,故本文未对BDS卫星实时改正数进行恢复,仅对GPS、GLONASS和GALILEO三大卫星导航系统的RTS产品进行进一步分析和讨论。

表 1 各机构 RTS 产品及卫星系统

Tab. 1 RTS product and GNSS of each institution

机构	BKG	DLR	NRCan	WUHAN	ESA	CMV	CNES
产品	CLK11	CLK21	CLK22	CLK16	CLK50	CLK81	CLK93
卫星系统	G+R	G+R+C+E	G	G+R+C+E	G	G+R	G+R+C+E

RTS 产品数据流的稳定性,受播发机构、接收软件以及网络速度等多种因素的影响,对实时 PPP 的服务性能影响极大^[11]。本文在相同环境下,利用 BNC 软件接收了 2019 年 351~357 年积日连续 7 天的 SSR 信息,首先统计了各机构 RTS 产品的各天平均历元完整率,如图 1 所示。

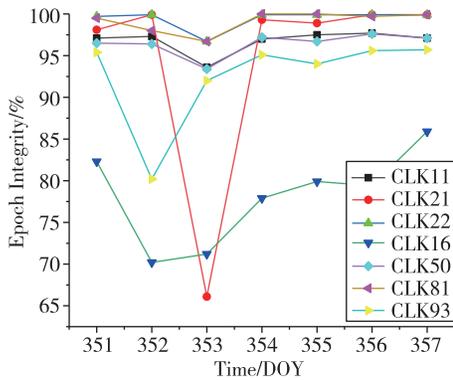


图 1 各 RTS 产品的历元完整率

Fig. 1 Epoch integrity rate of each RTS product

由图 1 可知,RTS 产品 CLK16 的整体历元完整率偏低,且各天波动偏大;CLK21 和 CLK93 仅某一天出现波动,完整率较低,其他时段保持完整率较高状态;大部分机构历元完整率几乎都保持在 95% 以上,最高达到 99%。分析原因为影响 RTS 产品历元完整率的因素有 2 个:1) 由于网络等外界环境,某历元的所有 RTS 产品均丢失;2) 由于改正数未能如期生成及播发,某机构某历元的 RTS 产品丢失^[8]。

为进一步分析不同导航系统 RTS 产品的完整性,统计了各机构不同导航系统各卫星每天的平均数量,如图 2~图 4 所示。

由图 2 可知,所有机构均可正常提供 GPS 实时改正数,且 GPS 卫星个数均达到 28 颗以上。由图 3 可知,CLK11、CLK21、CLK16 和 CLK93 可提供正常的 GLONASS 实时改正数,GLONASS 卫星平均可达 18 颗以上;CLK81 连续数天无法提供 GLONASS RTS,分析原因为 GLONASS 改正数未能如期生成及播发,导致 RTS 产品中无 GLONASS

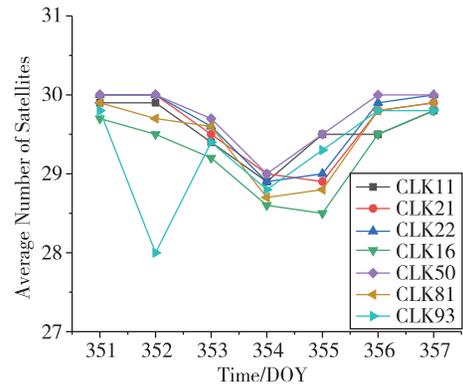


图 2 GPS 卫星平均数量

Fig. 2 Average number of GPS satellites

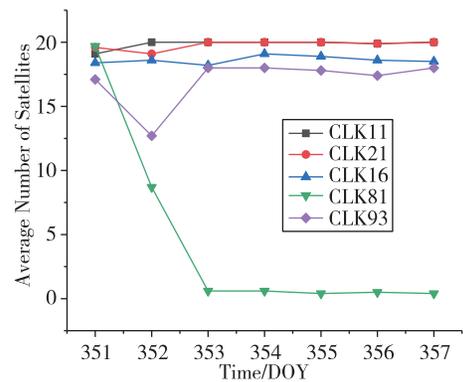


图 3 GLONASS 卫星平均数量

Fig. 3 Average number of GLONASS satellites

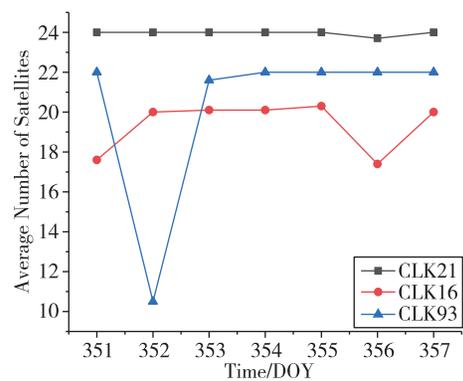


图 4 GALILEO 卫星平均数量

Fig. 4 Average number of GALILEO satellites

参数。由图 4 可知,CLK21、CLK16 和 CLK93 可提供 GALILEO RTS 产品,其中 CLK21 卫星数量最

多。由图2~图4可知,CLK93在352天各系统均出现卫星数量减少的情况,与历元完整率具有一致性。同时,不同机构提供不同系统RTS能力存在区别。下面将对各机构的RTS产品性能进行具体分析。

2 RTS产品恢复及精度分析

2.1 实时轨道与钟差产品恢复方法

假设,在 t_0 时刻,RTS轨道在卫星的径向(Radial, R)、切向(Along, A)、法向(Cross, C)的位置和速度改正数为 $(\delta_{t_0}^r, \delta_{t_0}^a, \delta_{t_0}^c, \dot{\delta}_{t_0}^r, \dot{\delta}_{t_0}^a, \dot{\delta}_{t_0}^c)$, t_0 后某时刻 t 的卫星位置改正数分别为 δ^r 、 δ^a 和 δ^c ,则有

$$\begin{cases} \delta^r = \delta_{t_0}^r + \dot{\delta}_{t_0}^r \cdot (t - t_0) \\ \delta^a = \delta_{t_0}^a + \dot{\delta}_{t_0}^a \cdot (t - t_0) \\ \delta^c = \delta_{t_0}^c + \dot{\delta}_{t_0}^c \cdot (t - t_0) \end{cases} \quad (1)$$

RTS产品的轨道改正数是基于轨道坐标系的,而通过广播星历计算的卫星位置是基于地心地固坐标系的。因此,利用轨道改正数对广播星历计算的卫星位置进行改正时,首先要将卫星改正值转化到地心地固坐标系下,假设转换后的卫星改正向量分别为 ΔX 、 ΔY 和 ΔZ ,则有

$$\begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^r & e^a & e^c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta^r \\ \delta^a \\ \delta^c \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, $e^r = e^a \times e^c$, $e^a = \frac{\mathbf{v}}{|\mathbf{v}|}$, $e^c = \frac{\mathbf{r} \times \mathbf{v}}{|\mathbf{r} \times \mathbf{v}|}$ 。其中, \mathbf{r} 为地心地固坐标系下的卫星位置矢量, \mathbf{v} 为地心地固坐标系下的卫星速度矢量。

假设通过IOD相符和时间最近原则匹配的广播星历计算的卫星位置为 (X', Y', Z') ,则有

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} \quad (3)$$

假设, t_0 时刻RTS产品的钟差改正系数为 C_0 、 C_1 和 C_2 , t 时刻的卫星钟差改正数为 ΔC ,则有

$$\Delta C = C_0 + C_1(t - t_0) + C_2(t - t_0)^2 \quad (4)$$

通过IOD相符和时间最近原则匹配的广播星历计算的卫星钟差为 dt_0 , t 时刻的卫星钟差为 dt ,则有^[12]

$$dt = dt_0 + \frac{\Delta C}{c} \quad (5)$$

式中, c 为光速。

2.2 实时轨道和钟差产品分析

以GFZ提供的最终轨道和钟差产品为基准,对恢复的卫星实时精密轨道和钟差进行精度评定。以R、A、C方向精度和1D RMS作为评定卫星轨道精度的指标。对于钟差,考虑到不同数据处理策略和起算数据引起的系统差,以二次差的RMS和STD作为评定卫星钟差精度的指标。本文具体方法为首先分别选取某颗卫星(G01, R01, E01)作为基准星,各卫星与其做差得到一次差 $\Delta t'$,然后将一次差和钟差基准的一次差作差得到二次差 $\Delta t''$,最后计算二次差 $\Delta t''$ 的RMS和STD^[13]。利用上述理论和方法,分别对各系统各个机构的实时轨道和钟差产品的精度进行计算、统计和分析。

2.2.1 GPS实时产品精度统计及分析

按照上述原理和方法计算了各机构2019年351~357年积日的GPS卫星实时轨道和钟差精度。各机构GPS实时轨道R、A、C方向精度和1D RMS统计如图5和表2所示,实时钟差RMS和STD统计如表3所示。

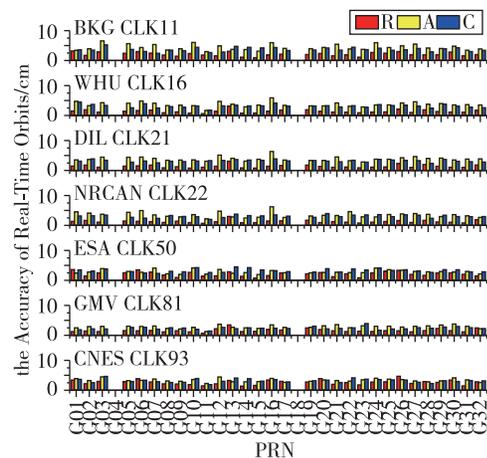


图5 GPS卫星R、A、C方向实时轨道精度

Fig. 5 GPS real-time orbit accuracy in the R, A, C directions

表2 GPS卫星实时轨道平均精度

Tab. 2 Average accuracy of GPS real-time orbit cm

产品	R	A	C	1D RMS
CLK11	2.05	4.45	3.7	3.59
CLK16	1.37	3.73	3.16	2.95
CLK21	1.38	3.89	3.21	3.04
CLK22	1.28	3.54	3.08	2.85
CLK50	2.11	2.88	3.27	2.83
CLK81	1.59	2.86	2.38	2.36
CLK93	2.63	3.35	3.21	3.11

由图 5 及表 2 可知,统计的所有 7 个机构均可提供 GPS RTS。各机构卫星实时轨道平均精度基本一致,约为 3cm。R、A、C 方向精度无明显差别,对定位影响最大的 R 方向平均精度优于或约为 2cm。分析原因为 GPS 卫星运行轨道稳定,利用动力学模型进行轨道预报的原理和方法已非常成熟。因此,GPS 卫星高精度实时定轨易于实现,且各机构精度差别不大。

表 3 GPS 卫星实时钟差平均精度

Tab. 3 Average accuracy of GPS real-time clock ns

产品	RMS	STD
CLK11	1.25	0.37
CLK16	0.56	0.12
CLK21	3.22	0.23
CLK22	2.58	0.55
CLK50	0.96	0.14
CLK81	0.36	0.08
CLK93	0.31	0.18

相比于轨道,各机构之间 GPS 卫星实时钟差精度差别较大。由表 3 可知,部分钟差精度 RMS 优于 1ns,STD 优于 0.2ns。各机构中,CLK81、CLK16、CLK93 和 CLK50 的 GPS 实时钟差精度较高,CLK11、CLK21 和 CLK22 次之。GPS 钟差比轨道实时高精度预报难度大,不同 RTS 产品性能有区别,实时钟差的性能直接决定了实时用户 PNT 性能。

2.2.2 GLONASS 实时产品精度统计及分析

参考 2.2.1 节的方法和内容,进行 GLONASS 实时产品精度统计及分析。图 6 和表 4 统计了 GLONASS 卫星实时轨道精度,表 5 统计了 GLONASS 实时钟差精度。

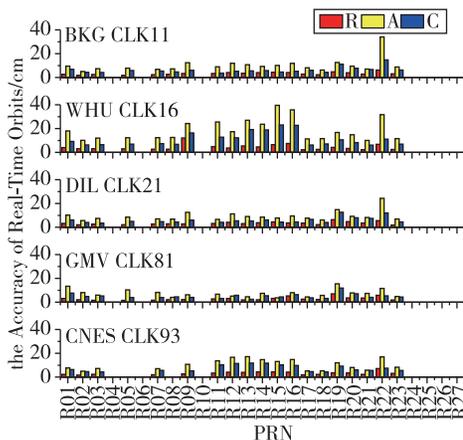


图 6 GLONASS 卫星 R、A、C 方向实时轨道精度
Fig. 6 GLONASS real-time orbit accuracy in the R、A、C directions

表 4 GLONASS 卫星实时轨道平均精度

Tab. 4 Average accuracy of GLONASS real-time orbit cm

产品	R	A	C	1DRMS
CLK11	3.33	10.27	6.09	7.26
CLK16	4.32	18.91	11.21	13.00
CLK21	3.43	9.41	5.93	6.77
CLK81	2.94	7.43	5.04	5.53
CLK93	3.26	10.51	7.42	7.70

由图 6 及表 4 可知,5 个机构可提供 GLONASS 实时产品。不考虑 R22 卫星,除 CLK16 的几颗卫星轨道精度稍差,绝大部分卫星轨道 RMS 为亚 dm 级,径向平均精度约为 3cm,虽然低于 GPS,但仍然具有较高精度。分析原因为 GLONASS 卫星的整体性能低于 GPS。

表 5 GLONASS 卫星实时钟差平均精度

Tab. 5 Average accuracy of GLONASS real-time clock ns

产品	RMS	STD
CLK11	10.87	3.80
CLK16	4.98	2.04
CLK21	4.80	1.91
CLK81	5.25	0.83
CLK93	3.75	1.22

由表 5 可知,GLONASS 卫星实时钟差质量整体较差,大部分 RMS 约为 4~5ns,STD 约为 1~2ns。仅从钟差精度分析,CLK93 和 CLK81 相对精度最高,CLK21 和 CLK16 次之,CLK11 最低。

2.2.3 GALILEO 实时产品精度统计及分析

GALILEO 卫星实时轨道精度统计如图 7 和表 6 所示,实时钟差精度统计如表 7 所示。

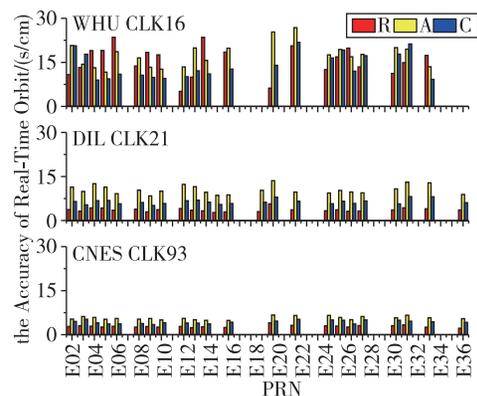


图 7 GALILEO 卫星 R、A、C 方向实时轨道精度
Fig. 7 GALILEO real-time orbit accuracy in the R、A、C directions

表 6 GALILEO 卫星实时轨道平均精度

Tab. 6 Average accuracy of GALILEO real-time orbit

产品	cm			
	R	A	C	1D RMS
CLK16	15.49	17.46	13.93	16.09
CLK21	3.63	10.49	6.36	7.39
CLK93	2.84	5.68	4.31	4.44

由图 7 和表 6 可知,3 个机构可提供 GALILEO 实时产品。CLK93 的平均轨道精度最高,约为 5cm,CLK21 优于 10cm,CLK16 精度偏低。产品精度不均匀或部分偏低的原因可能是部分机构采用的卫星参数或动力学模型有待改进或完善。

表 7 GALILEO 卫星实时钟差平均精度

Tab. 7 Average of GALILEO real-time clock

产品	ns	
	RMS	STD
CLK16	1.47	0.84
CLK21	0.35	0.20
CLK93	0.85	0.32

由表 7 可知,GALILEO 卫星实时钟差精度与 GPS 基本一致,其中,CLK21 和 CLK93 精度较高,CLK16 精度偏低。

3 实时精密单点定位及性能分析

3.1 数据处理策略

采用的数据处理策略如表 8 所示。

表 8 实时精密单点定位数据处理策略

Tab. 8 Data processing strategy for real-time precise point positioning

项目	策略
处理模式	实时仿动态
电离层	无电离层组合
对流层	估计
采样间隔	1s
截止高度角	7°
系统	GPS /GPS+GALILEO
天线相位中心偏差	igs14.atx
天线相位缠绕	改正
精密星历和钟差	SSR+广播星历(RTCM3ETH)
参数估计	扩展卡尔曼滤波

本文利用开源软件 BNC 进行实时仿动态 PPP

解算,以 E、N、U 方向定位误差分别小于 20cm、20cm 和 40cm 且连续 10min 作为收敛条件,从定位精度和收敛时间 2 个角度分析各机构 RTS 产品的定位性能^[14-15]。实验选取了 7 个 IGS 多系统测站如图 8 所示。

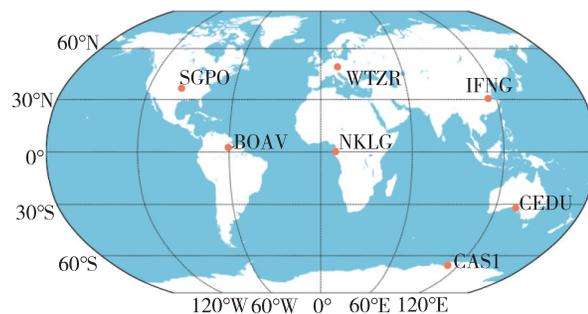


图 8 测站分布

Fig. 8 Distribution of ground monitoring stations

3.2 实时精密单点定位性能分析

3.2.1 单系统实时定位性能分析

限于篇幅,仅以 GPS 为例,对单系统实时 PPP 进行统计分析,平均精度和收敛时间统计如表 9 所示。

表 9 GPS 实时 PPP 平均精度和收敛时间

Tab. 9 Average accuracy and convergence time of GPS RT PPP

方向	CLK11	CLK16	CLK21	CLK22	CLK50	CLK81	CLK93
E/cm	7.6	7.9	8.7	7.2	7.2	8.5	6.4
N/cm	5.9	5.5	6.8	5.6	4.8	6.7	4.9
U/cm	13.2	16.9	19.6	14.1	19.6	22.3	16.1
收敛时间/min	32.7	35	21.4	53.2	33.5	57.8	22.4

由表 9 可知,各 RTS 产品定位的平面精度均优于 10cm,U 方向精度为 dm 级,基本优于 20cm。可见各机构 RTS 产品的 GPS 定位精度均达到较高水平,基本无差别。收敛时间是验证 PPP 性能的另一重要方面,从收敛时间上看,CLK21 和 CLK93 产品的定位收敛时间最短,约为 20min;CLK11、CLK16 和 CLK50 稍长,约为 30min;CLK22 和 CLK81 平均收敛时长接近 60min。

3.2.2 多系统定位性能分析

以 GPS 和 GALILEO 多系统联合实时 PPP 为例,统计分析了多系统实时 PPP 性能,平均精度和收敛时间统计如表 10 所示。

表 10 GPS/GALILEO 实时 PPP 平均精度和收敛时间
Tab. 10 Average accuracy and convergence time of
GPS/GALILEO RT PPP

方向	CLK16	CLK21	CLK93
E/cm	10.1	8.5	7.6
N/cm	6.9	6.4	5.4
U/cm	19.0	17.8	17.2
收敛时间/min	24.8	11.6	12.6

由表 10 可知,利用 GPS 和 GALILEO 双系统 RTS 产品进行实时精密定位,各机构平面精度基本优于 10cm,U 方向精度优于 20cm,精度均较高,基本无差别。可见各机构 RTS 产品的定位精度均达到较高水平,基本无差别。CLK21 和 CLK93 产品的定位平均收敛时间最短,约为 10min;CLK16 稍长,约为 25min。相比于单系统定位,双系统定位精度无明显变化,但是收敛时间明显缩短,收敛速度提升约 37.8%。分析原因为,更多卫星的加入,改善了空间几何构型,提升了收敛速度。

4 结论

本文针对国际各权威机构 RTS 产品性能,对 RTS 产品完整性、实时轨道钟差精度、实时定位精度和收敛时间进行了全面的数据处理和评估分析,结果表明:

1)正常情况下,各机构 RTS 产品的历元完整率基本可保持在 95%以上,最高可达 99%。但是,会出现某机构或某段时间历元完整率偏低的情况。各 RTS 产品提供的各系统卫星数量充足、稳定,GPS 卫星平均数量将近 30 颗,GLONASS 和 GALILEO 分别约为 20 颗。但是,仍然会出现异常情况,如某机构某段时间所有卫星数量偏少(CLK93 352 天)或某机构某段时间某系统卫星数量偏少(CLK81 353~357 天)。

2)所有 GNSS RTS 机构均能提供 GPS 实时精密服务,部分可提供 GLONASS、GALILEO 或 BDS RTS。各机构 GPS 实时轨道精度基本无差别,1D RMS 约为 3cm。实时钟差精度有较大差别,CLK81、CLK16、CLK93 和 CLK50 精度较高,优于 0.2ns。对于 GLONASS 实时产品,轨道精度为 dm,CLK93 和 CLK81 实时钟差 STD 相对较高,约为 1ns。对于 GALILEO,轨道精度平均为亚 dm 级,CLK21 实时钟差 STD 为 0.2ns,CLK93 为 0.32ns。因此,从 RTS 产品精度分析,GPS 实时精

密服务性能优于 GALILEO,GALILEO 优于 GLONASS;同时,不同机构提供的 RTS 产品精度有差别。

3)利用 GPS 单系统 RTS 产品进行 RT-PPP 的精度较高,平面方向优于 10cm,高程方向优于 20cm,最快收敛时间约为 20min。利用 GPS 和 GALILEO 多系统进行 RT-PPP,精度基本不变,收敛速度有所提高,平均提升约 37.8%。综上,多系统 RT-PPP 在一定程度上可提升定位性能和稳定性。

参考文献

- [1] Elsobeiey M, Al-Harbi A. Performance of real-time precise point positioning using IGS real-time service [J]. *GPS Solutions*, 2015, 20(3): 566-571.
- [2] Kazmierski K, Sośnica K, Hadas T. Quality assessment of multi-GNSS orbits and clocks for real-time precise point positioning [J]. *GPS Solutions*, 2018, 22(1): 11.
- [3] 余忠伦,高雅萍,杨立财. SSR 改正数更新频率及中断时间间隔对实时 PPP 的影响分析 [J]. *大地测量与地球动力学*, 2018, 38(11): 1153-1158.
She Zhonglun, Gao Yaping, Yang Licai. Analysis of impact of SSR correction update frequency and interrupt time interval in real-time PPP [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2018, 38(11): 1153-1158 (in Chinese).
- [4] 赵爽. BDS/GPS 实时精密单点定位方法研究 [D]. 郑州: 战略支援部队信息工程大学, 2018: 16.
Zhao Shuang. Research on BDS/GPS real-time precise point positioning method [D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2018: 16 (in Chinese).
- [5] 夏凤雨,叶世榕,赵乐文,等. 基于 SSR 改正的实时精密单点定位精度分析 [J]. *导航定位与授时*, 2017, 4(3): 52-57.
Xia Fengyu, Ye Shirong, Zhao Lewen, et al. Real-time precise point positioning accuracy analysis based on SSR correction [J]. *Navigation Positioning and Timing*, 2017, 4(3): 52-57 (in Chinese).
- [6] 赵爽,杨力,郜尧. 基于 SSR 信息的 GPS 实时精密单点定位性能分析 [J]. *大地测量与地球动力学*, 2019, 39(9): 952-955.
Zhao Shuang, Yang Li, Gao Yao. GPS real-time precise point positioning performance analysis based on SSR information [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2019, 39(9): 952-955 (in Chinese).

- [7] 赵兴旺, 葛玉龙. GPS/Galileo 实时精密单点定位精度分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2019, 39(8): 816-820.
Zhao Xingwang, Ge Yulong. Accuracy analysis of real-time GPS/Galileo precise point positioning[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2019, 39(8): 816-820(in Chinese).
- [8] Zhang L, Yang H Z, Gao Y, et al. Evaluation and analysis of real-time precise orbits and clocks products from different IGS analysis centers[J]. Advances in Space Research, 2018, 61(12): 2942-2954.
- [9] Wang L, Li Z S, Ge M R, et al. Validation and assessment of multi-GNSS real-time precise point positioning in simulated kinematic mode using IGS real-time service[J]. Remote Sensing, 2018, 10(2): 337.
- [10] Liu T, Zhang B C, Yuan Y B. et al. Real-Time Precise Point Positioning (RTPPP) with raw observations and its application in real-time regional ionospheric VTEC modeling[J]. Journal of Geodesy, 2018, 92(11): 1267-1283.
- [11] Hadas T, Bosy J. IGS RTS precise orbits and clocks verification and quality degradation over time [J]. GPS Solutions, 2015, 19(1): 93-105.
- [12] 尹倩倩, 楼益栋, 易文婷. IGS 实时产品比较与分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2012, 32(6): 123-128.
Yin Qianqian, Lou Yidong, Yi Wenting. Comparison and analysis of IGS real-time products[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2012, 32(6): 123-128(in Chinese).
- [13] Zhang X H, Li X, Guo F. Satellite clock estimation at 1Hz for real time kinematic PPP applications[J]. GPS Solutions, 2011, 15(4): 315-324.
- [14] Zhao Q L, Wang C, Guo J, et al. Assessment of the contribution of BeiDou GEO, IGSO, and MEO satellites to PPP in Asia-Pacific Region [J]. Sensors, 2015, 15(12): 29970-29983.
- [15] 张小红, 柳根, 郭斐, 等. 北斗三频精密单点定位模型比较及定位性能分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(12): 2124-2130.
Zhang Xiaohong, Liu Gen, Guo Fei, et al. Model comparison and performance analysis of triple-frequency BDS precise point position[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2018, 43(12): 2124-2130(in Chinese).