

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2020.04.06

MADOCA GPS/GLONASS 实时精密星历 产品的性能评估

马 壮^{1,2}, 陈俊平², 刘 姣², 王阿昊^{2,3}, 伍冠滨²

(1. 上海大学, 上海 200444; 2. 中国科学院 上海天文台, 上海 200030; 3. 同济大学, 上海 200092)

摘要: 日本的准天顶系统 (Quasi-Zenith Satellite System, QZSS) 除了基础的定位、导航、授时服务以外, 还开发了 GNSS 轨道和钟差估计系统 MADOCA (Multi-GNSS Advanced Demonstration Tool for Orbit and Clock Analysis)。MADOCA 通过 L6E 增强信号每 30 s 播发一次 GNSS 实时轨道改正, 每 1 s 播发一次钟差改正, 也可以通过 Ntrip 协议或 FTP 服务获取实时产品, 从而实现实时精密单点定位 (Real-time Precise Point Positioning, RTPPP) 服务。以 GFZ 事后精密星历和钟差产品为参考, 对 MADOCA 和 CNES 实时精密轨道与钟差产品进行评估, 统计了径向、切向、法向轨道误差, 钟差误差, 空间信号测距误差 (Signal-in-Space Range Error, SISRE), 仅考虑轨道误差的 SISRE 以及精密参数的可用性。最后基于 MADOCA 和 CNES 实时产品, 进行 GPS 单系统和 GPS/GLONASS 双系统实时精密单点定位, 对比了基于两种实时产品的 RTPPP 定位精度、收敛时间和可靠性。结果表明, 12 个 IGS 站动态 PPP 定位精度在东、北方向上优于 0.1 m, 天顶方向优于 0.4 m; 使用 MADOCA 精密产品进行 GPS/GLONASS 双系统定位, 其收敛速度比使用 CNES 精密产品更快。

关键词: MADOCA; 卫星轨道和钟差改正; 精密单点定位; GPS/GLONASS

中图分类号: P128; P135 **文献标识码:** A

1 引 言

准天顶系统 (Quasi-Zenith Satellite System, QZSS) 是由日本宇宙航空研究开发机构 (Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA) 研发和实施的区域性卫星导航及增强系统。QZSS 项目规划设计之初便明确其目标为服务日本 (主要服务区) 及亚太周边地区的区域性卫星导航及增强系统, 协同 GPS 系统的民用服务并提高区域 GPS 系统的服务精度。目前 QZSS 卫星空间信号精度能达 0.6 m 以内, 与 GPS 相当^[1]。

收稿日期: 2020-03-23; 修回日期: 2020-05-13

资助项目: 国家自然科学基金 (11673050); 国家重点研发计划 (2018YFB0504300)

通讯作者: 陈俊平, Junping.chen@shao.ac.cn

QZSS 还提供多种增强服务。主要包括, 在 L1S 信号频段上提供基于伪距定位的 SLAS (Sub-meter Level Augmentation System) 增强服务^[2], 在 L6 信号频段上提供基于 PPP-RTK 的 CLAS (Centimeter Level Augmentation System) 精密定位服务, 以及通过 QZS-1 的 LEX 信号传输的采用国际标准格式 RTCM-SSR (Radio Technical Commission for Maritime Services-State Space Representation) 的 MADOCA (Multi-GNSS Advanced Demonstration tool for Orbit and Clock Analysis) 产品^[3]。

MADOCA 通过 L6E 增强信号按照国际标准格式 RTCM10403.2 每 30 s 播发一次 GNSS 实时精密轨道改正数, 每 1 s 播发一次精密钟差改正数, 目前已经提供的产品包括 GPS, GLONASS, QZSS 系统。MADOCA 也通过 Ntrip 协议或 FTP 服务发布实时产品, 产品格式包括 RTCM 格式以及 RINEX SP3 格式。除了精密轨道、精密钟差之外, MADOCA 还提供时间间隔为 30 s 的用户范围精度 (URA) 等信息。此外, 国际上公开提供多系统实时精密轨道和钟差修正产品的机构有德国地学研究中心 (German Research Centre for Geoscience, GFZ), 法国国家太空研究中心 (the Centre National d'Etudes Spatiales, CNES) 等。

在实时轨道和钟差产品的评估方面, El-Mowafy 等人^[4]对 GPS 实时精密轨道和钟差产品进行了性能评估, Kazmierski 等人^[5]分析了轨道和钟差的衰减特性、CNES 实时产品的质量以及影响实时产品质量的因素, Zhang 等人^[6]对 MADOCA 的 GPS 实时精密轨道和钟差产品进行了性能评估。

本文将 MADOCA 发布的 RTCM 格式文件进行解码, 得到的参数对广播电文轨道和钟差参数进行改正, 获取了实时精密卫星轨道和钟差, 作为对比还获取了 CNES 的实时精密轨道和钟差产品。以 GFZ 的事后精密轨道和钟差产品作为参考真值, 评估了 MADOCA GPS/GLONASS 的实时产品精度、可用性和定位性能。

2 数据和产品评估

本文将通过 FTP 服务获取的 RTCM 格式文件解码得到的参数对广播电文轨道和钟差参数进行改正, 得到 SP3 格式的精密星历文件。基于以上方法获取了 2019 年 2 月 1 日至 2 月 28 日, 为期 4 星期的产品。生成的 SP3 文件中精密轨道和钟差时间间隔都为 30 s, 作为对比, 还获取了 CNES 的实时精密轨道和钟差产品。

在此基础上, 以 GFZ 产品作为参考真值, 分别计算并对比 MADOCA 与 CNES 的实时产品的钟差误差, 法向、切向、径向轨道误差, 空间信号测距误差 (Signal-in-Space Range Error, SISRE), 以及仅考虑轨道误差的 SISRE 和精密参数的可用性。在定位性能评估方面, 以 RTKLIB 作为软件平台, 在全球范围内均匀选取了 12 个 IGS 站 2019 年 2 月共 28 d 的数据, 对比使用 MADOCA 与 CNES 实时精密产品并进行 GPS 单系统和 GPS/GLONASS 双系统动态实时精密单点定位 (Real-time Precise Point Positioning, RTPPP), 然后评估 MADOCA GPS/GLONASS 的实时产品精度、可用性和定位性能。

3 钟差与轨道评估

3.1 评估方法

由于 MADOCA 和 CNES 实时产品与 GFZ 事后产品的卫星轨道的参考框架不同, 需要将统计结果全部转化到相同的参考框架下, 然后可通过下式将轨道差异旋转至卫星轨道坐标系下:

$$\begin{bmatrix} R \\ A \\ C \end{bmatrix} = G_{3 \times 3} \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式(1)中, R, A, C 分别为实时产品在卫星轨道坐标系中径向、切向和法向的误差, $G_{3 \times 3}$ 为旋转矩阵, $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ 为实时精密轨道误差, 即 MADOCA 和 CNES 实时产品与 GFZ 之差。本文使用的精密星历是以卫星质心为参考点的卫星位置, 因此需要进行卫星相位偏差改正。精密星历中 CLK92 挂载点改正数也是基于卫星质心, 而 CLK91 和 CLK93 挂载点的 SSR 是基于卫星相位中心, 因此在评估时须改正卫星相位偏差。

一般每种钟差产品都有各自的时间参考基准, 不同机构的钟差产品因此会产生一个较大的时标偏差。在精密单点定位中, 该偏差会被接收机钟差吸收而不会产生影响, 但如果进行不同机构的钟差产品对比, 则需要消除该偏差。通常可以选择某颗参考星作为基准, 计算二次差来消除所有卫星的公共偏差, 但这种方法需要一颗非常稳定且精准的参考星, 实际操作难度较大。也可以通过减去所有卫星钟差的平均数的方式来消除公共偏差, 但如果存在偏差较大的卫星钟差, 则会严重影响该方法的准确性。本文最后选取同一历元同一系统所有卫星钟差的中位数来消除公共偏差的方法^[7], 这样可以有效避免卫星钟差的影响。

除此之外, 还可以通过空间信号测距误差来综合反映精密星历和钟差的整体误差, 其计算公式为:

$$SISRE = \sqrt{(\alpha \cdot R - Clk)^2 + \beta(A + C)^2}, \quad (2)$$

式中, R, A, C 与式(1)含义相同, Clk 表示卫星钟差, α 和 β 分别是各方向的投影系数, 不同轨道高度的卫星其取值不同, GPS 卫星 $\alpha = 0.98, \beta = 1/49$; GLONASS 卫星 $\alpha = 0.98, \beta = 1/45$ ^[8]。

如果综合考虑三个方向上轨道误差引起的空间信号误差, 可用仅考虑轨道的 SISRE 表示, 其计算公式如下:

$$SISRE(orb) = \sqrt{(\alpha \cdot R)^2 + \beta(A + C)^2}, \quad (3)$$

不同机构对于轨道和钟差的粗差的控制方法并不相同, 为了进一步降低粗差对产品评估和定位性能的影响, 本文设定了固定阈值来剔除粗差, 认为阈值范围内的产品即符合可用性的产品。

3.2 对比与分析

根据上述评估策略与对比方法, 计算了每颗 GPS 或 GLONASS 卫星的径向、切向、法向轨道误差, 钟差误差, SISRE 和仅考虑轨道误差的 SISRE, 本节数据均来源于 2019 年 2

月 1 日至 2 月 28 日。我们给出 MADOCA 与 CNES 的 G28 和 R13 卫星的三个方向上轨道误差对比, 如图 1 所示。

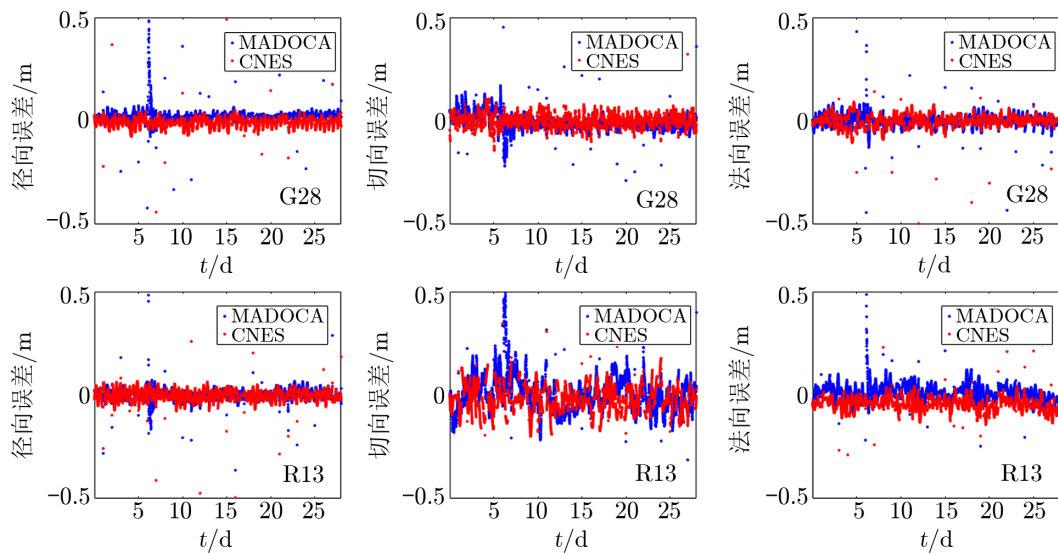


图 1 MADOCA 与 CNES 的 G28 和 R13 卫星的径向、切向、法向轨道误差对比

其他卫星的对比结果与 G28 和 R13 一致, 如图 1 所示, 所有卫星在径向方向上的轨道误差优于其他两个方向, GLONASS 卫星的切向轨道误差相对较大, 但整体而言三个方向上的卫星轨道误差都在 0.1 m 以内, 基本满足实时产品的精度目标。除 2 月 7 日 MADOCA 所有产品精度都有短暂的波动外, MADOCA 与 CNES 的精密轨道精度相差不大, CNES 的 GPS 精密轨道精度略优于 MADOCA。

MADUCA 与 CNES 的 G16, G28, R1 和 R13 卫星的钟差误差对比, 如图 2 所示。其他卫星的对比结果与图 2 一致, GPS 卫星钟差误差明显小于 GLONASS, GPS 卫星钟差误差都在 ± 0.2 m 以内, GLONASS 卫星钟差误差都在 ± 1 m 以内; MADUCA 与 CNES 的精密钟差精度相差不大, CNES 的 GPS 精密钟差精度略优于 MADUCA。

消除了整体的时标偏差后, 每颗卫星的钟差仍包含一个均值偏差, 但在精密单点定位中, 这一部分均值偏差可以被模糊度吸收, 对定位结果并无影响。本文计算了各个 GPS 或 GLONASS 卫星在 4 周的时间内卫星钟差误差的标准差 (Standard Deviation, STD), 而不是 RMS。如图 3 所示, 各颗卫星钟差精度具有良好的 consistency, 也可以进一步验证上述的结论。图中缺失的部分为原始数据有较长时间段不存在或不可用。

本文又计算了所有卫星的 SISRE, 并与仅考虑轨道的 SISRE 做进一步对比。图 4 为 G28 和 R13 卫星的 SISRE 与仅考虑轨道的 SISRE 对比, 其他卫星的对比结果与图 4 一致。MADUCA 及 CNES 的 SISRE 与仅考虑轨道的 SISRE 相差不大, SISRE 的精度结果与精密钟差误差的结果保持一致, 这是由于钟差误差在 SISRE 中的占比很大。

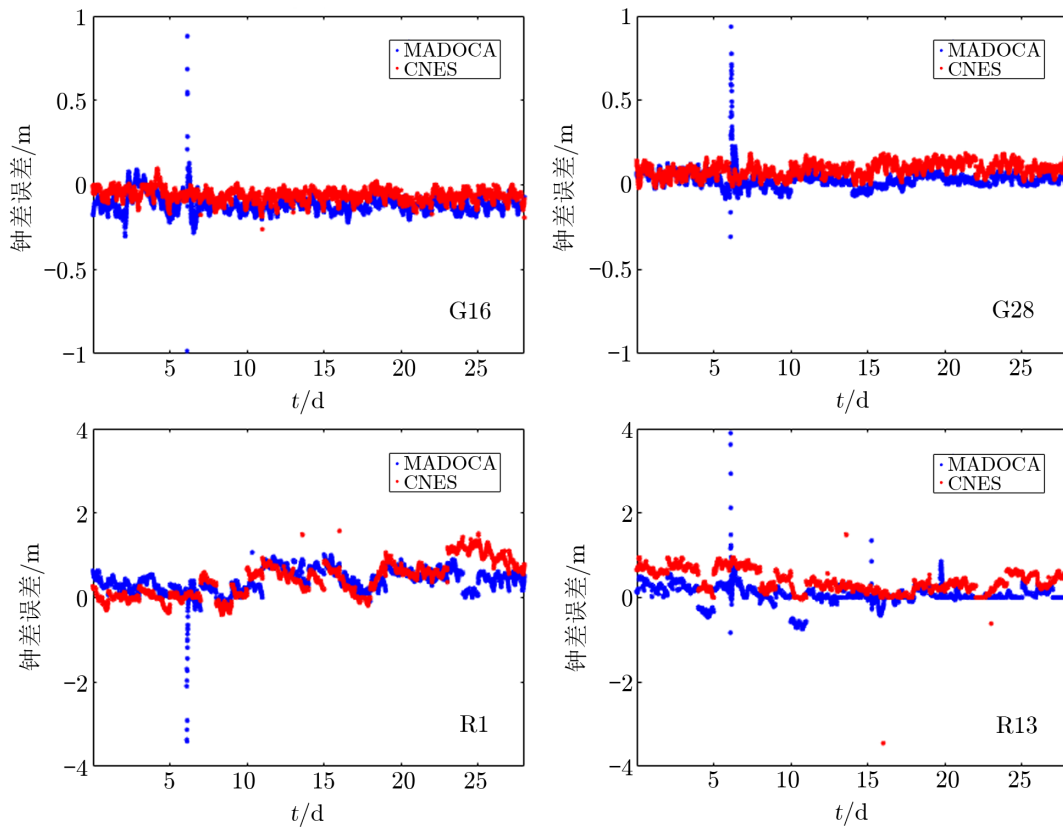


图2 MADOCA 与 CNES 的 G16, G28, R1 和 R13 卫星的钟差误差对比

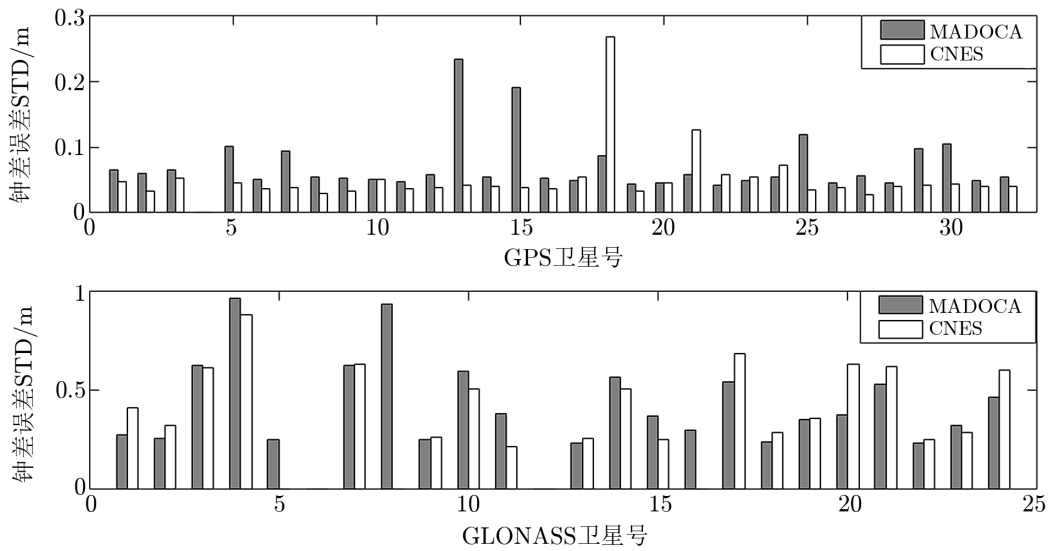


图3 GPS 与 GLONASS 各个卫星钟差误差标准差

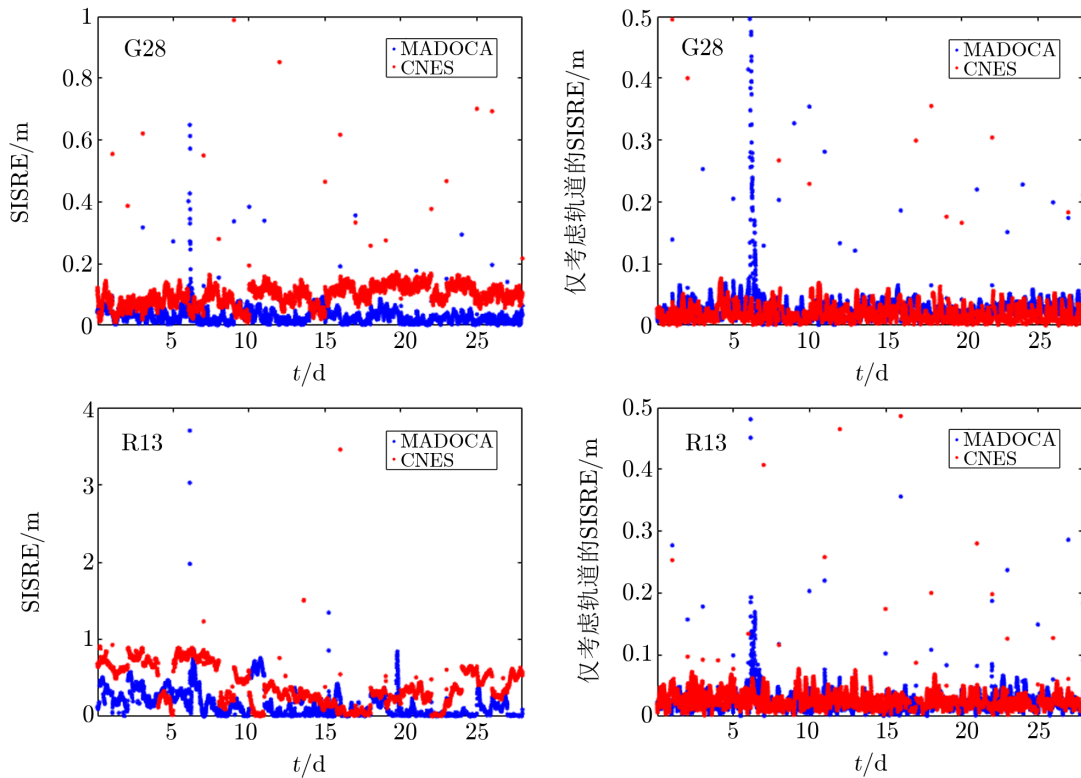
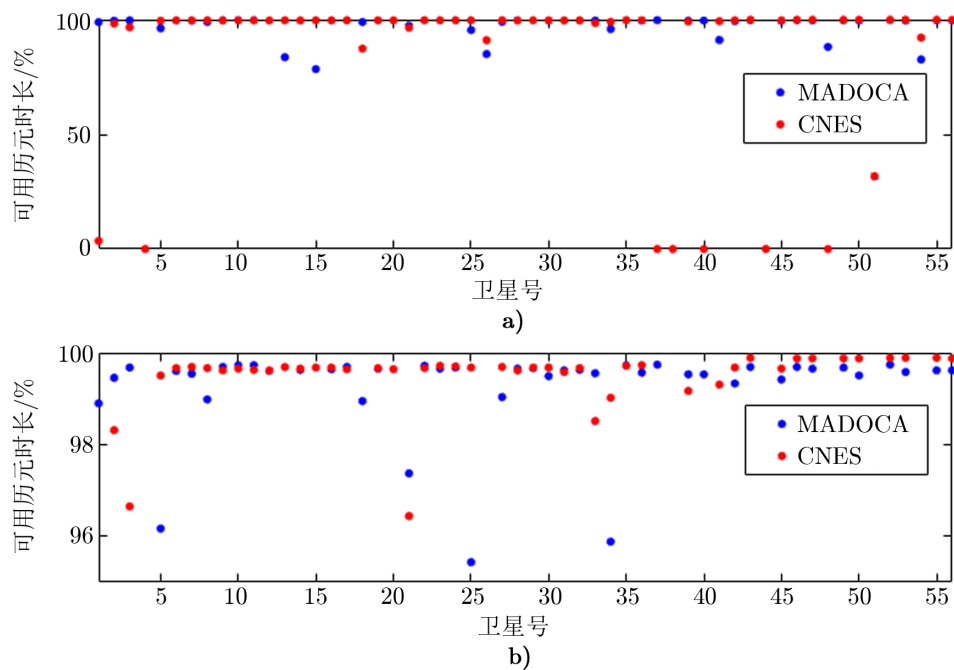


图4 MADOCA 及 CNES 的 G28 和 R13 的 SISRE 与仅考虑轨道的 SISRE 对比

4 可用性和产品评估总结

为了验证 MADOCA 实时产品的可用性, 选取了 2019 年 2 月 1 日至 2 月 28 日共 4 周的 MADOCA 和 CNES 的实时数据, 利用固定阈值来剔除粗差, 定义精密钟差误差、三个方向的轨道误差、SISRE 和仅考虑轨道的 SISRE 都在阈值范围内的历元为可用历元, 其占总历元的百分比为产品的可用性。如图 5 所示, a) 的取值范围为 0%~100%, b) 的取值范围为 95%~100%。由图中可以看出, 两家机构的大多数卫星的可用历元时长可以达到 98% 以上, 且在 98% 以上的区间内, CNES 的可用性优于 MADOCA; 但在 0%~98% 的区间内, MADOCA 的可用性优于 CNES, MADOCA 所有卫星都有 75% 以上的可用性, 而 CNES 有 2 颗 GPS 卫星和 6 颗 GLONASS 卫星的精密产品几乎不可用。总的来说, MADOCA 的精密产品具有更好的可用性。

表 1 列出两家机构的精密钟差误差的 STD、SISRE、仅考虑轨道的 SISRE、径向、切向、法向轨道误差的 RMS 以及可用性。表 1 中的数据进一步验证了前文的结论, MADOCA 与 CNES 的产品精度保持一致, MADOCA 的 GPS 实时精密产品略差于 CNES, 但 MADOCA 的 GLONASS 实时精密产品可用性明显优于 CNES。这些结果表明, MADOCA 的 GPS 和



注：横坐标中 1—32 为 GPS，33—56 为 GLONASS。

图 5 MADOCA 及 CNES 的各个卫星可用历元时长占比

GLONASS 实时产品都达到了与其他机构一致的水平，可满足实时精密单点定位用户的需求。

表 1 MADOCA 和 CNES 的精密钟差误差的 STD、SISRE、仅考虑轨道的 SISRE、径向、切向、法向轨道误差的 RMS 以及可用性汇总

	Clock /m	SISRE /m	SISRE(orb) /m	Radial /m	Along-track /m	Cross-track /m	Product Availability /%
MADOCA(G)	0.082	0.168	0.041	0.037	0.061	0.046	94.5
CNES(G)	0.066	0.137	0.031	0.030	0.040	0.033	92.6
MADOCA(R)	0.494	0.817	0.045	0.043	0.093	0.052	86.8
CNES(R)	0.494	0.945	0.034	0.031	0.092	0.052	75.7

5 PPP 性能分析

在实际实时定位过程中，卫星钟差与轨道径向误差具有强相关性，将精密轨道和钟差分开对比评估无法全面准确地反应产品的实时定位性能。因此，本文这一部分通过模拟实时精密单点定位，从定位的角度进一步评估和对比 MADOCA 实时精密产品的性能。表 2 为 PPP

的处理策略。

表 2 PPP 数据处理策略

项目	策略
软件平台	RTKLIB
时间	2019 年 2 月 1 日至 2 月 28 日
参数估计方法	卡尔曼滤波
观测值	载波相位和码观测值
对流层延迟	SAAS 模型改正+湿延迟估计
电离层延迟	无电离层组合
卫星轨道及钟差	MADOCA 或 CNES 实时精密产品
测站坐标	动态模式估计
待估参数	测站坐标, 测站钟差, 模糊度, 对流层湿延迟改正, 系统间偏差 (如果是 GPS+GLONASS)

本文采用双频无电离层模型模拟实时 PPP, GPS 系统使用 L1 和 L2 频点, GLONASS 系统采用 G1 和 G2 频点, 码和相位观测值的权重为 1:10 000, 差分码偏差 (differential code bias, DCB) 改正使用了 CAS 的 MGEX DCB 产品。SAAS 模型采用标准模型参数, 地面气压 $P_0 = 1013.25$ mbar, 地面温度 $T_0 = 15^\circ\text{C}$, 相对湿度 $rh = 0$ (湿延迟作为待估参数进行估计)。系统间偏差采用随机游走模型作为参数进行估计。使用 IGS 每周的 SINEX 文件提供的测站坐标作为定位误差的参考真值。

在全球范围内选取 12 个 IGS 站 2019 年 2 月 1 日至 2 月 28 日共 28 d 的数据, 分布如图 6 所示, 并与使用 MADOCA 及 CNES 进行 GPS 单系统和 GPS/GLONASS 双系统实时动态 PPP 定位。

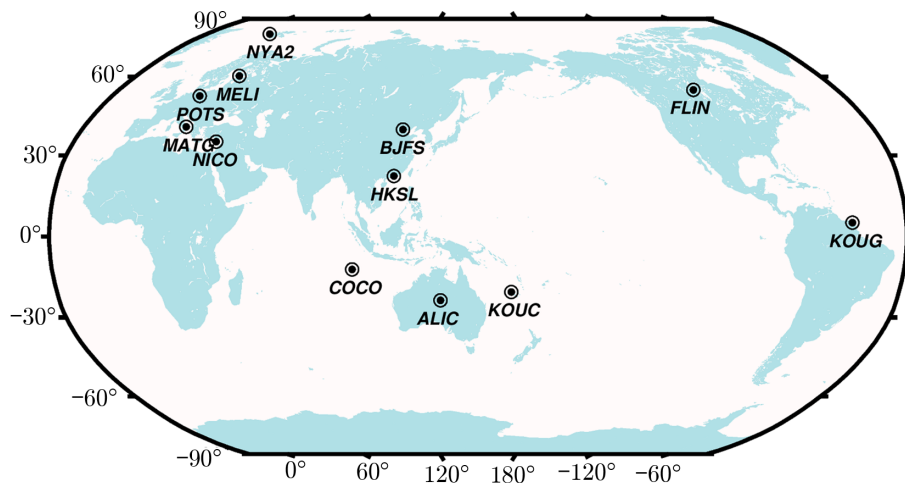


图 6 用于评估 PPP 的 12 个 IGS 站分布

由于不同测站或者不同年积日的实验结果较为相似, 因此本文仅列出 2019 年 2 月

1日 HKSL 测站的实验结果。图 7 为 2019 年 2 月 1 日, HKSL 测站分别使用 MADOCA 和 CNES 实时精密产品后所得的 GPS 单系统动态 PPP NEU 三个方向定位结果; 图 8 为 GPS/GLONASS 双系统定位结果。可以看出, 使用 MADOCA 或 CNES 的实时产品所得的 GPS 单系统 PPP 定位结果非常相似, 几乎没有显著差别, 定位精度在东、北方向上优于 0.1 m, 天顶方向优于 0.4 m。但使用 MADOCA 实时产品 GPS/GLONASS 双系统 PPP 定位收敛速度比 CNES 更有优势。

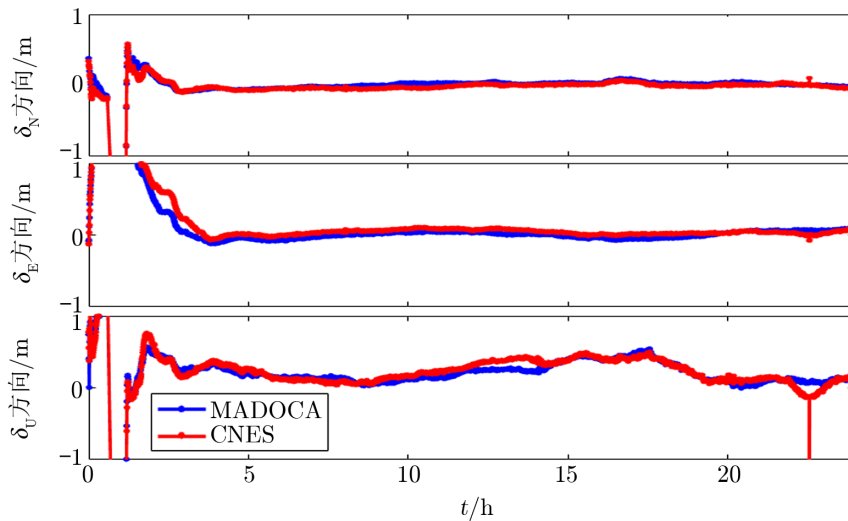


图 7 2019 年 2 月 1 日 HKSL 测站 GPS 动态 PPP NEU 方向坐标误差

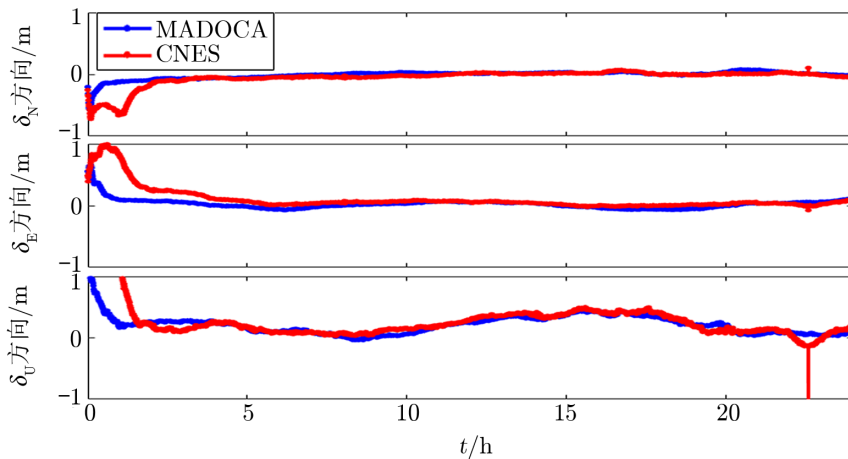
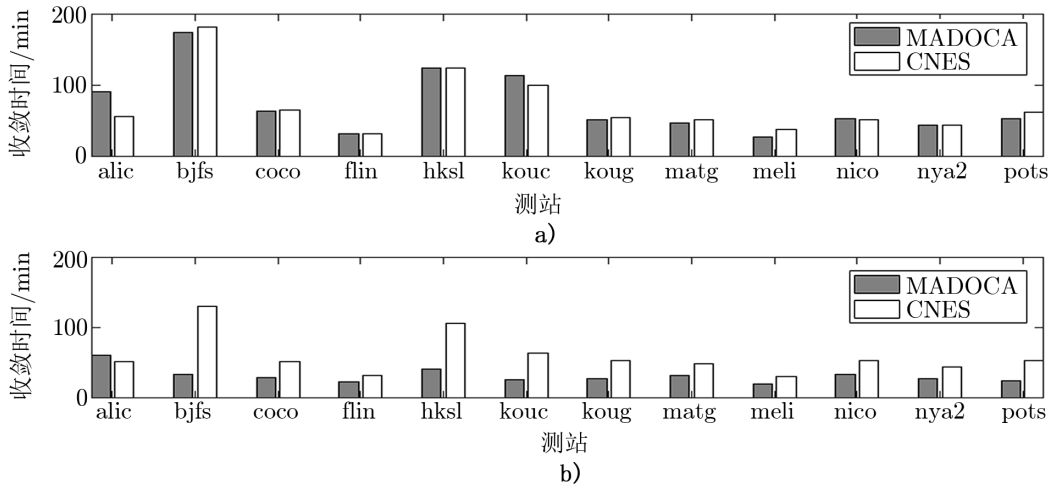


图 8 2019 年 2 月 1 日 HKSL 测站 GPS+GLONASS 双系统动态 PPP NEU 方向坐标误差

为了进一步验证这一结论, 本文还计算了所有测站 28 d 的平均收敛时间 (如图 9 所示), 判断收敛的条件为连续 20 个历元平面坐标误差低于 0.2 m 且三维坐标误差低于 1 m。从图 9 可知, 使用 MADOCA 或 CNES 的实时产品的 GPS 动态 PPP 收敛速度几乎相同, 但使

用 MADOCA 的 GPS/GLONASS 双系统定位收敛速度明显优于使用 CNES。双系统收敛速度明显优于单系统, 所以 MADOCA 的精密产品可以更有效地提高双系统定位的收敛速度。结合前文的评估和分析, MADOCA 与 CNES 的钟差和轨道精度相差较小, 但 MADOCA 的历元可用性明显优于 CNES, 即 CNES 的精密产品存在较多粗差或数据缺失, 这一点在 GLONASS 系统上尤为明显, 因此使用 MADOCA 精密产品进行 GPS/GLONASS 双系统定位收敛速度可能比使用 CNES 精密产品更快。



注: a) GPS 动态 PPP 收敛时间; b) GPS+GLONASS 动态 PPP 收敛时间。

图 9 12 个 IGS 站 GPS 或 GPS+GLONASS 动态 PPP 收敛时间

基于一个月数据, 本文还统计了 12 个测站收敛后的平均 RMS, 结果如图 10 所示。使用 MADOCA 与 CNES 的精密产品的 RMS 一致, 说明 MADOCA 的实时产品在精度上可以满足 PPP 的需求, 也可以证明上述轨道和钟差评估工作的有效性。

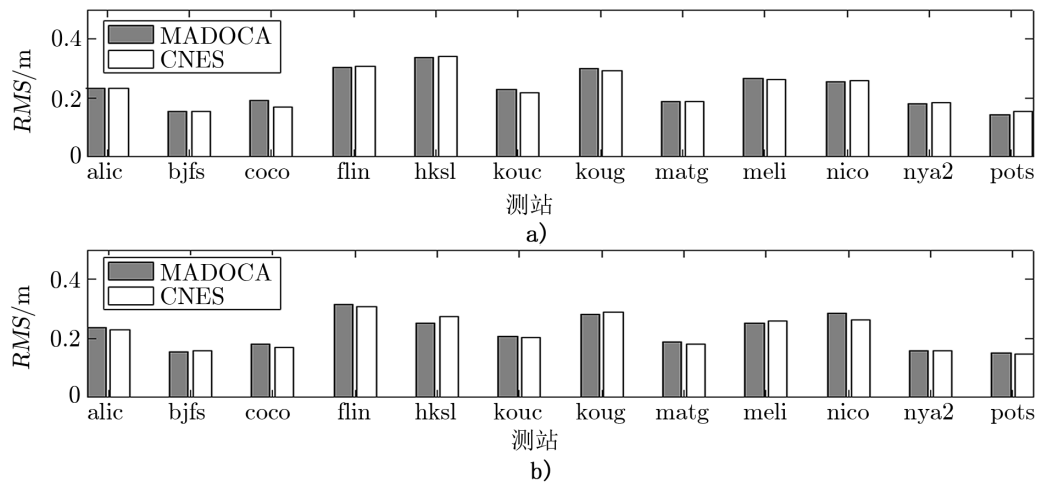


图 10 12 个 IGS 站 GPS 或 GPS+GLONASS 动态 PPP 收敛后的 RMS

6 总 结

本文对 MADOCA 发展现状进行了介绍, 通过与 CNES 的实时精密产品进行对比, 从钟差误差、轨道误差、SISRE, 仅考虑轨道的 SISRE, 以及可用性等角度对 MADOCA 实时精密产品的准确性、稳定性进行了评估, 还验证了使用 MADOCA 实时精密产品的 GPS 单系统、GPS/GLONASS 双系统动态 PPP 性能。

结果表明, MADOCA 实时精密产品与 CNES 实时精密产品准确性、稳定性等方面已达到同一水平。轨道误差范围在 3~6 cm, GPS 钟差误差在 ± 0.2 m 内, GLONASS 钟差误差在 ± 1 m 内; 在 4 周时间内, GPS 精密产品可用时段约为 95%, GLONASS 约为 87%; MADOCA 的 GPS 精密产品略差于 CNES, 但可用性方面 (特别是 GLONASS) 明显优于 CNES。在 PPP 评估方面, 使用 MADOCA 或 CNES 精密产品定位精度一致, 定位精度在东、北方向上优于 0.1 m, 天顶方向优于 0.4 m, 且使用 MADOCA 精密产品进行 GPS/GLONASS 双系统定位收敛速度比使用 CNES 精密产品更快。

参考文献:

- [1] Montenbruck O, Steigenberger P, Hauschild A. *Gps Solut*, 2015, 19(2): 321
- [2] JAXA. Quasi-Zenith Satellite System Interface Specification Sub-meter Level Augmentation Service. <https://qzss.go.jp/en/technical/ps-is-qzss/ps-is-qzss.html>, 2017
- [3] JAXA. Interface Specification for MADOCA-SEAD. https://ssl.tksc.jaxa.jp/madoca/public/doc/Interface_Specification_B_en.pdf, 2019
- [4] El-Mowafy A, Deo M, Kubo N. *Gps Solut*, 2017, 21: 1
- [5] Kazmierski K, Sośnica K, Hadas T. *Gps Solut*, 2018, 22(1): 11
- [6] Zhang S C, Du S K, Li W, et al. *Sensors*, 2019, 19(11): 2580
- [7] 张益泽, 陈俊平, 周建华, 等. *测绘学报*, 2016, 45(S2): 64
- [8] 张益泽. 博士论文. 上海: 同济大学, 2017: 83
- [9] Guo F, Li X, Zhang X, et al. *Gps Solut*, 2017, 21(1): 279
- [10] Safoora Z, Kan W, Teunissen P J G. *Gps Solut*, 2018, 22(4): 101
- [11] 张益泽. 第九届中国卫星导航学术年会论文集. 哈尔滨: 中国卫星导航协会, 2018: 18

Evaluation of the MADOCA GPS/GLONASS Real-time Precise Orbit and Clock Corrections

MA Zhuang^{1,2}, CHEN Jun-ping², LIU Jiao², WANG A-hao^{2,3}, WU Guan-bin²

(1. Shanghai University, Shanghai 200444, China; 2. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China; 3. Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In addition to the basic positioning, navigation, and timing services, the Japanese Quasi-

Zenith Satellite System (QZSS) has also developed the precise GNSS orbit and clock estimation system, which is named as MADOCA (Multi-GNSS Advanced Demonstration tool for Orbit and Clock Analysis). MADOCA broadcasts GNSS real-time precise orbits every 30 s, satellite clock corrections every 1 s through L6E augmentation signals. The real-time products can be obtained from the Ntrip protocol or FTP service to realize real-time precise point positioning (RTPPP) services. In this paper, the real-time precise products of MADOCA and CNES are compared with the GFZ final products, the radial, along-track, cross-track orbit errors, clock errors, signal-in-space range errors (SISRE), orbit-only SISRE, and product availability are evaluated. The real-time MADOCA and CNES products are assessed in the GPS-only and GPS/GLONASS dual system RTPPP using four weeks' data of 12 IGS stations, where positioning accuracy, convergence time, and positioning reliability are evaluated. It turns out that the dual-frequency kinematic RTPPP accuracy is better than 0.1 m in the east/north component, and better than 0.4 m in the up component. In particular, positioning convergence speed of GPS/GLONASS dual system using MADOCA products is much faster than that using CNES streams.

Key words: MADOCA; orbit and clock corrections; precise point positioning; GPS/GLONASS