

Research
Geodesy and Survey Engineering—Article

MGEX 轨道与钟差产品的一致性

Peter Steigenberger*, Oliver Montenbruck

German Aerospace Center, German Space Operations Center, Weßling 82234, Germany

ARTICLE INFO

Article history:

Received 31 October 2018

Revised 18 April 2019

Accepted 17 June 2019

Available online 11 December 2019

关键词

全球导航卫星系统

国际GNSS服务

多GNSS试点项目

精密轨道确定

卫星钟差参数

摘要

国际全球导航卫星系统 (GNSS) 服务的多GNSS试点项目的分析中心, 为全球导航卫星系统, 如全球定位系统 (GPS)、格洛纳斯卫星导航系统 (GLONASS)、伽利略卫星导航系统 (Galileo)、北斗卫星导航系统 (BeiDou) 以及日本区域系统——准天顶卫星导航系统 (QZSS) 提供轨道和钟差产品。由于改进了太阳辐射压模型和其他更复杂的模型, 近年来这些产品的一致性得到了提高。目前, 不同分析中心之间GPS轨道一致性为几厘米, GLONASS和Galileo轨道一致性约为1 dm, 北斗二号卫星导航系统 (BeiDou-2) 轨道一致性为几分米, QZSS轨道一致性为数分米。钟差一致性方面, GPS约为2 cm, GLONASS和Galileo约为5 cm, BeiDou-2约为10 cm。在用于精密单点定位的载波相位建模误差方面, 各种产品的一致性分别为GPS 2~3 cm、GLONASS 6~14 cm、Galileo 3~10 cm以及BeiDou-2 10~17 cm。

© 2020 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. 引言

过去10年间, 多个全球导航卫星系统 (GNSS) 已经成为一种普遍的定位、授时手段。国际GNSS服务 (IGS) [1]由国际大地测量协会 (IAG) 提供, 该协会成立于1994年。根据参考文献[2]给出的职权范围, IGS的任务是提供“最高质量的GNSS数据、产品和服务, 以支持地面参考框架, 地球观测与研究, 定位、导航和授时 (PNT), 以及其他有益于科学界和社会的应用”。IGS的核心产品是由IGS旗下的分析中心 (AC) 计算得到的全球定位系统 (GPS) 和格洛纳斯卫星导航系统 (GLONASS) 的精确卫星轨道和钟差参数, 这些轨道和钟差参数是IGS综合轨道和钟差产品的来源, 最终产品

由IGS数据中心免费提供。

为了满足新兴GNSS, 如北斗卫星导航系统 (BeiDou)、伽利略卫星导航系统 (Galileo)、日本区域系统——准天顶卫星导航系统 (QZSS) 和印度区域卫星导航系统 [IRNSS, 又称印度星座导航系统 (NavIC)] 产品服务的需求, IGS多GNSS工作组于2012年启动了多GNSS实验 (multi-GNSS experiment, MGEX) [3], 该实验在2016年被更名为多GNSS试点项目 (multi-GNSS pilot project)。MGEX是由247个站点 (截至2018年秋季) 组成的全球多GNSS跟踪网络、数据中心以及生成多GNSS轨道和钟差产品的分析中心组成。表1 [4–8]列出了这些分析中心及其产品所涵盖的星座。3个分析中心的产品涵盖整个全球系统, 5个分析中心为QZSS提供产品。因为

* Corresponding author.

E-mail address: peter.steigenberger@dlr.de (P. Steigenberger).

跟踪北斗三号卫星导航系统 (BeiDou-3) 的IGS站点数量相当有限, 欧洲定轨中心 (Center for Orbit Determination in Europe, CODE) 和德国地球科学研究中心 (German Research Centre for Geosciences, GFZ) 产品仅包括北斗二号卫星导航系统 (BeiDou-2)。从2019年开始, 武汉大学 (Wuhan University, WHU) 基于其他非IGS站点, 成为了唯一一个提供BeiDou-3轨道和钟差产品的分析中心。目前由于缺乏IRNSS的双频跟踪数据, 各分析中心没有提供IRNSS产品。有关MGEX及其分析中心产品的更多详细信息, 见参考文献[9–15]以及表1中列出的参考文献。

本文第2节分别从各分析中心轨道产品差异的3D均方根 (RMS) 以及卫星激光测距 (satellite laser ranging, SLR) 残差两个方面, 讨论比较了MGEX轨道产品的一致性。第3节分析了卫星钟差的均方根值差异。第4节利用空间信号测距误差 (SISRE) 的概念度量了组合轨道和钟差的一致性。

2. 轨道一致性

GNSS卫星轨道的一致性可以通过比较不同分析中心的轨道产品来评估。接下来, 本文利用每月的3D RMS值研究了2015—2018年中期MGEX轨道产品的一致性。图1显示了MGEX分析中心所有组合之间的Galileo轨道产品每月RMS值对比结果。在2015年年初, 轨道产品的一致性在15~35 cm水平。在随后的几年中, RMS值提高了2~3倍。在最近几个月, GFZ和WHU的轨道产品一致性最好, 约为5 cm。

早年间, 最大的误差来自太阳辐射压建模。由于缺乏Galileo卫星的详细信息, 分析中心延用了曾用于GPS的光压模型, 如经验CODE轨道模型 (empirical CODE orbit model, ECOM) [16]。由于这些方法不适用于Galileo卫星的长方体形状[12], 因此开发了更复杂的模型, 如ECOM-2 [17]和先验盒翼模型 (priori box-wing

model) [18,19], 这些模型大大减少了系统误差, 改进了轨道质量。

一致性的进一步提高归功于天线相位中心模型。最初, 相位中心偏差 (phase center offset, PCO) 采用协议值改正[20], 并忽略了相位中心变化 (phase center variation, PCV)。2016年, GFZ和德国航空航天中心 (DLR) 估计了Galileo在轨验证 (in-orbit validation, IOV) 卫星和具有完全运行能力 (full operational capability, FOC) 的卫星的PCO [21]。自GPS周的1915周以来, 这些结果已被更新在IGS天线模型igs08.atx [22]以及较新模型igs14.atx的早期版本中。从GPS周的1972周和1986周开始, 参考文献[23]中的Galileo IOV及FOC卫星的PCO和PCV的微波暗室标定结果被更新在igs14.atx中。

与Galileo星座的其他卫星相比, 在偏心轨道 (E201/E202) 上的Galileo FOC卫星明显存在更大的轨道差异, 因为太阳在轨道平面上方的高度角 (β) 的绝对值很小。这种差异可能源自这些卫星在姿态建模上的差异。

图2对中国BeiDou-2的比较仅限于倾斜地球同步轨道 (IGSO) 卫星和中地球轨道 (MEO) 卫星。未考虑地球静止轨道 (GEO) 卫星, 因为仅有两个MGEX分析中心提供产品。GFZ和WHU之间的BeiDou-2 GEO卫星轨道一致性为2~4 m。对于MEO和IGSO卫星, 在图2中, 随着时间推进, 一致性只出现了微小提升。这可能是因为缺少卫星元数据, 且跟踪BeiDou-2的站点比跟踪Galileo的少。GFZ和WHU产品之间达到了约15 cm的最佳一致性, 但是和CODE产品的比较结果较差, 相差了两倍。群延迟变化[24]是BeiDou-2数据处理的关键问题, 对于IGSO和MEO卫星来说必须予以考虑。

在地影期间, 单卫星之间的差异更大。BeiDou-2 MEO和IGSO卫星通常在 $|\beta| < 4^\circ$ 时进入零偏航 (orbit-normal, ON) 模式。根据参考文献[25], 一些BeiDou-2卫星不再进入ON模式。图3展示了BeiDou-2的MEO卫星C015的GFZ与WHU产品间的法向轨道

表1 MGEX分析中心及其产品所包含的GNSS星座

ID	Institution	Abbreviation	Constellations	References
grm	Centre National d'Etudes Spatiales/Collecte Localisation Satellites	CNES/CLS	GPS, GLONASS, Galileo	[4]
com	Center for Orbit Determination in Europe	CODE	GPS, GLONASS, Galileo, BDS, QZSS	[5]
gbm	German Research Centre for Geosciences	GFZ	GPS, GLONASS, Galileo, BDS, QZSS	[6]
jax	Japan Aerospace Exploration Agency	JAXA	GPS, GLONASS, QZSS	
tum	Technical University of Munich	TUM	Galileo, QZSS	[7]
wum	Wuhan University	WHU	GPS, GLONASS, Galileo, BDS, QZSS	[8]

BDS: BeiDou Navigation Satellite System.

差值, 该卫星自2016年10月以来一直未进入ON模式。由于两个分析中心使用了不同的姿态模型, β 一旦在 $-4^\circ \sim 4^\circ$ 就会出现高达 ± 80 cm的轨道差值。一致的姿态建模对于轨道综合算法以及非差GNSS观测[如精密单点定位 (PPP)]的用户非常重要[26]。

表2总结了2018年上半年MGEX分析中心的四个全球系统 (GPS、GLONASS、Galileo和BeiDou-2) 及区域系统QZSS的轨道一致性。总异常值超过1 m的历元已被排除在外。就3D RMS值而言, GPS轨道差异只有几厘米, 具有最好的一致性, 其次是GLONASS。虽然GLONASS在过去的20年里一直由IGS处理, 但得益于上文提到的最新改进, Galileo产品的一致性仅略差于GLONASS。BeiDou-2卫星的轨道一致性在几分米的水平, 而QZSS轨道差异的3D RMS值高达80 cm。其中部

分原因是QZS-1在ON模式期间的太阳辐射压建模问题[27]导致了轨道差异增加。

表2的右侧部分为从国际激光测距服务组织 (ILRS) 提供的SLR观测值中获得的SLR残差的平均RMS值[28]。站点坐标固定为SLRF2014 [29], 并且排除了超过50 cm的异常值。由于GNSS卫星的轨道高度, SLR主要评估了径向轨道精度。因此, 表2也给出了径向轨道比较的RMS值。SLR当前无法观测到GPS卫星, 因为只有两个GPS卫星带有激光反射棱镜, 而它们已经不再提供服务。有关SLR跟踪GNSS卫星和GPS SLR历史结果可详见文献[30]。另一方面, 所有GLONASS、Galileo、BeiDou和QZSS卫星均配备了激光反射棱镜。但是, ILRS并非定期跟踪以上所有卫星。

对于GLONASS而言, SLR残差的RMS在4 cm的水平, 偏差通常小于1 cm。Galileo的残差RMS值略高, 约为5 cm, 部分包含了几厘米水平的系统偏差。这些偏差可能源自对地球辐射压[31]和天线推力[32]的忽略, 这两个因素主要影响径向分量。BeiDou-2的SLR RMS值为6~8 cm, 其IGSO卫星表现出轻微的 β 相关性。对于QZSS, 几个分析中心的轨道SLR残差RMS值高达30 cm, 并具有明显的 β 相关性。BeiDou-2的IGSO卫星和QZSS的这种与 β 相关的SLR残差与太阳辐射压建模误差有关, 这种残差也出现在使用ECOM的早期Galileo

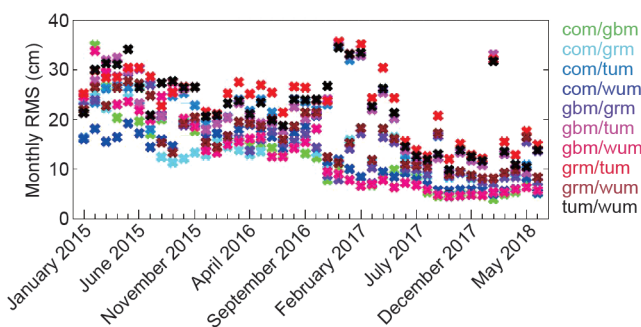


图1. MGEX分析中心所有组合之间的Galileo轨道产品每月RMS值的对比。

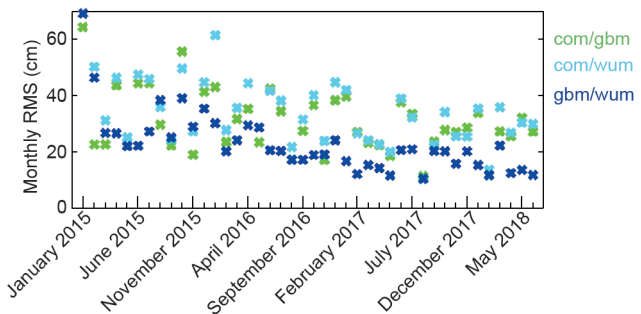


图2. MGEX分析中心所有组合之间的BeiDou-2的MEO和IGSO卫星每月RMS值对比。

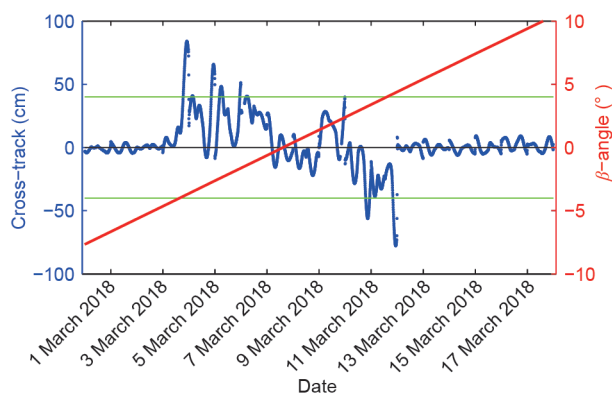


图3. GFZ与WHU分析中心之间BeiDou-2 MEO卫星C015的法向轨道差值及太阳在轨道平面上方的高度角 β 。绿色的水平线表示 $\beta = \pm 4^\circ$ 。

表2 2018年上半年MGEX GNSS卫星轨道的一致性

GNSS	3D RMS (cm)	Radial RMS (cm)	SLR residual RMS (cm)
GPS	2-5	1-3	-
GLONASS	4-11	1-6	4
Galileo	5-15	2-6	5
BeiDou-2	10-35	5-15	7
QZSS	20-80	10-40	5-30

产品中[12]。由于这种建模误差，QZSS是唯一一种特定产品[日本宇宙航空研究开发机构（Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA）的轨道SLR RMS为5 cm]的精度优于其他产品（最小径向RMS为10 cm）的系统。

图4展示了太阳辐射压对日本QZSS 2010年发射的第一颗卫星QZS-1的影响。该图为SLR残差与太阳距角 ϵ 的关系图。JAXA的SLR残差不依赖于 ϵ ，而慕尼黑工业大学（the Technical University of Munich, TUM）的轨道则明显依赖于 ϵ ，这导致均方根值的增加。

3. 钟差一致性

为了在全球的GNSS解中同时估计卫星与接收机的钟差，我们必须引入额外的基准约束。作为最小约束，可以固定一个测站或者卫星的钟差，或者可以对所有钟差参数采用零均值约束。常见的方法包括，将一个接收机的钟差固定在一个高稳时钟上，将整套地面测站钟差施加零均值约束，或将所有或部分选定的卫星钟差施加零均值约束。由于部分方法会依赖先验钟差，因此，分析中心通常会利用广播星历来进行钟差的额外对齐。

由于估计的卫星钟差是相对于天线的相位中心的，因此在进行钟差比较时必须考虑其PCO，尤其在各分析中心使用不同PCO的情况下。IGS天线相位中心模型的最新版本为igs14.atx [33]，其中包含了GPS [34]和GLONASS [35]的PCO估计值、Galileo的PCO微波暗室标定值，以及BeiDou [20]的PCO协议值。然而，对于Galileo，CODE仍使用参考文献[21]中的估计值，该值也曾包含在igs14.atx的早期版本中。而对于BeiDou而言，CODE使用igs14.atx中包含的MGEX PCO协议值，GFZ使用参考文献[36]中的PCO值，而WHU使用参考文献[8]中的估计值。

例如，图5说明了2018年1月CODE与GFZ之间的Galileo星座钟差的差异。图5（a）中的原始差异呈现出

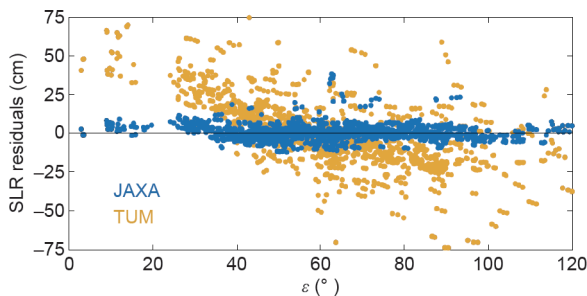


图4. 两个MGEX分析中心的QZS-1 SLR残差。太阳距角用 ϵ 表示。

均值约为-2 m的系统偏差，峰间变化值为3.3 m。由于基准约束是按日施加的，图5（b）移除了日偏差后的RMS值为9 cm。如图5（c）所示，如果偏差逐历元估计，则RMS值下降至5 cm。这个值只有在评估定位应用中不同钟差产品的一致性时才有意义，因为逐历元估计接收机钟差可以吸收卫星钟差历元间的平均差异。

对于GPS来说，各分析中心不同钟差产品之间的偏差通常在几分米的水平上，尽管有时也会出现几乎为零的偏差以及几米的偏差。其他卫星系统的偏差更大，例如，Galileo可达数米，GLONASS可达12 m，BeiDou-2的MEO和IGSO卫星甚至可以达到25 m。但是，个别天、分析中心和星座的钟差差异可能会高达数百米。

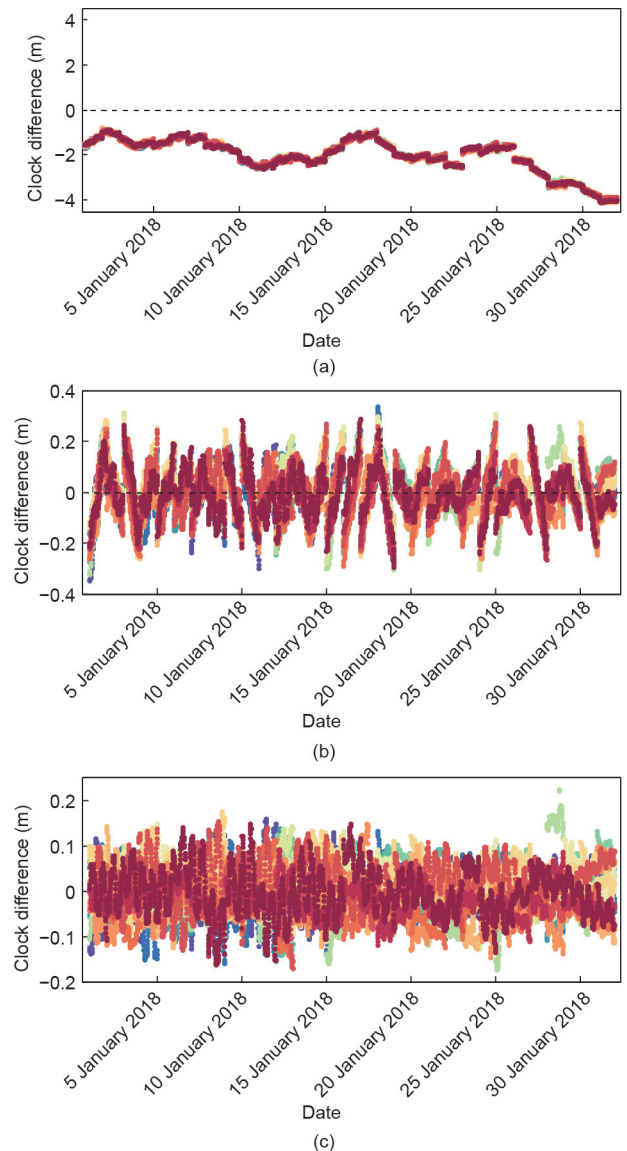


图5. 2018年1月CODE和GFZ之间的Galileo钟差差异。(a) 原始钟差差异；(b) 每日偏差调整；(c) 历元偏差调整。

图6显示了去除卫星日偏差和星座历元平均偏差后的所有分析中心组合的钟差差异的RMS值。分析涵盖了2018年1~6月的数据,异常值阈值固定为1 m。对于法国国家空间研究中心/卫星定位(Centre National d'Etudes Spatiales/Collecte Localisation Satellites, CNES/CLS)而言,由于在2018年2月17日之前,GLONASS卫星的R14钟差差异达到了几米的水平,该卫星的这段时间被排除在外。GPS系统显示的最高一致性约为2 cm,并且在各个分析中心之间仅存在细微的差异。GLONASS钟差RMS的范围为3~7 cm, Galileo钟差RMS的范围为2~7 cm。并且,与轨道产品的比较类似,在地影期,BeiDou-2钟差差异会变大,导致其RMS值在10 cm左右。

4. 空间信号测距误差

SISRE通常用于广播星历的质量评估[37,38]。而精

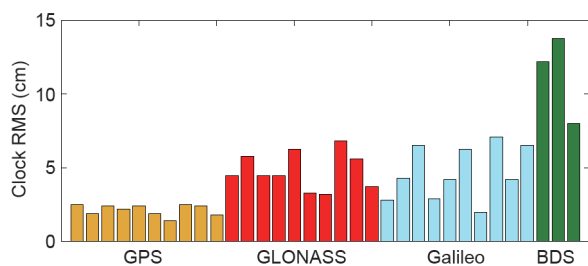


图6. 2018年1~6月, 去除所有卫星日偏差和星座历元平均偏差后, 各分析中心间的钟差差异的RMS值。

密轨道与钟差产品由于其卓越的准确性被用作参考。然而, 我们同样也可以用SISRE的概念来评估精密产品的一致性。逐历元及整体平均的SISRE值可按如下公式计算:

$$\text{SISRE} = \sqrt{(w_1^2 R^2 - 2w_1 R T + T^2) + w_2^2 (A^2 + C^2)} \quad (1)$$

式中, R 、 A 和 C 分别表示沿径向、切向和法向的轨道差异; T 代表卫星日偏差和星座卫星历元平均偏差修正后的钟差误差; w_1 和 w_2 是参考文献[38]中表4给出的系统权重因子。SISRE与观测卫星的几何结构和GNSS观测的噪声有关, 为定位精度提供了一种可实现的测量方法。

表3列出了2018年1~6月的各系统的SISRE值。表中给出了轨道SISRE (T 设为零) 以及SISRE的95%分位数。我们采用动态的 3σ 粗差探测对数据进行处理。由于可处理QZSS的MGEX分析中心太少, 因此此表不包括QZSS数据。

由于公式(1)中的权重因子, 表3中所有系统的轨道SISRE值小于表2中的3D RMS值。传统系统显示出较高的一致性, GPS在1~2 cm的水平, GLONASS在2~5 cm的水平。对于新兴系统而言, Galileo的轨道SISRE值为2~6 cm, BeiDou-2的MEO和IGSO卫星轨道的SISRE值为7~14 cm。GFZ和WHU获得的BeiDou-2 GEO卫星轨道的SISRE明显较差, 整体达到了60 cm的水平, 这是由这些卫星的静态观测几何特性所导致的。

表3 2018年1~6月的SISRE (orbit) 和SISER (95%)

AC1	AC2	GPS		GLONASS		Galileo		BeiDou-2	
		Orbit	95%	Orbit	95%	Orbit	95%	Orbit	95%
CODE	GFZ	2.0	2.4	4.0	6.2	2.6	3.3	12.7	15.4
CODE	CNES/CLS	1.5	2.4	4.1	10.5	3.2	5.1	-	-
CODE	JAXA	1.9	2.4	3.9	6.4	-	-	-	-
CODE	TUM	-	-	-	-	4.2	8.6	-	-
CODE	WHU	1.9	2.2	3.9	6.1	2.6	3.4	14.1	16.6
GFZ	CNES/CLS	2.4	2.8	4.7	10.3	3.4	5.1	-	-
GFZ	JAXA	1.6	2.7	2.2	6.5	-	-	-	-
GFZ	TUM	-	-	-	-	3.8	8.6	-	-
GFZ	WHU	1.1	2.0	1.9	5.6	2.1	3.3	6.7	10.1
CNES/CLS	JAXA	2.2	2.6	4.7	13.5	-	-	-	-
CNES/CLS	TUM	-	-	-	-	6.1	10.0	-	-
CNES/CLS	WHU	2.4	2.7	4.6	8.8	3.3	5.2	-	-
JAXA	WHU	1.4	2.5	1.9	7.2	-	-	-	-
TUM	WHU	-	-	-	-	4.5	8.8	-	-

BeiDou-2 is limited to IGSO and MEO satellites. All values are given in centimeter.

对于所有的分析中心组合而言, GPS的SISRE (95%) 值均小于3 cm。而其他GNSS的不同分析中心之间的差异较大, 其中GLONASS的SISRE (95%) 平均值为8 cm, Galileo为6 cm。对于BeiDou-2的MEO和IGSO卫星而言, GFZ/WHU的SISRE (95%) 值为10 cm, 而与CODE相比则差了50%。GFZ/WHU的BeiDou-2 GEO卫星的SISRE (95%) 甚至高达1 m, 而整个BeiDou-2的SISRE值为66 cm。

5. 结论

近年来, MGEX轨道和钟差产品的一致性已大大提高, 这是朝着实现MGEX最终目标迈出的重要一步——为所有GNSS提供轨道与钟差的综合产品。目前, 已经实现分别为GPS和GLONASS提供轨道和钟差综合产品[39,40], 对Galileo、BeiDou以及QZSS的初步综合实验也已经开展[41,42]。然而, 实现成功的产品综合的先决条件是进一步协调统一卫星天线相位中心、姿态、地球辐射压与天线推力模型。此外, 对于BeiDou和QZSS来说, 太阳辐射压模型也应当加以改进。未来我们所面临的另一个挑战是, 在IGS跟踪网络提供的双频观测数据有限(或缺乏)的前提下, 为BeiDou-3和IRNSS提供精密产品。

有关MGEX轨道和钟差产品的最新分析可通过MGEX产品分析网站[43]获取。该网站提供了最近的钟差时间序列、SLR残差分析以及不同卫星系统的轨道与钟差比较等信息, 并保持每周更新。

Acknowledgments

We would like to acknowledge the efforts of the MGEX station operators, data, and analysis centers, as well as the ILRS for providing SLR normal points.

Compliance with ethics guidelines

Peter Steigenberger and Oliver Montenbruck declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

References

- [1] Johnston G, Riddell A, Hausler G. The International GNSS Service. In: Teunissen P, Montenbruck O, editors. Springer handbook of global navigation satellite systems. New York: Springer; 2017. p. 967–82.
- [2] International GNSS Service: terms of reference [Internet]. Pasadena: International GNSS Service; [cited 2018 Nov 29]. Available from: https://kb.igs.org/hc/en-us/article_attachments/202278237/IGS_Terms_of_Reference_Adopted_Dec_2014_.pdf.
- [3] Montenbruck O, Steigenberger P, Prange L, Deng Z, Zhao Q, Perosanz F, et al. The Multi-GNSS Experiment (MGEX) of the International GNSS Service (IGS)—achievements, prospects and challenges. *Adv Space Res* 2017;59(7):1671–97.
- [4] Loyer S, Perosanz F, Mercier F, Capdeville H, Mezerette A. CNES/CLS IGS analysis center: contribution to MGEX and recent activities [poster]. In: 2016 IGS Workshop; 2016 Feb 8–12; Sydney, NSW Australia; 2016.
- [5] Prange L, Orliac E, Dach R, Arnold D, Beutler G, Schaer S, et al. CODE's five-system orbit and clock solution—the challenges of multi-GNSS data analysis. *J Geod* 2017;91(4):345–60.
- [6] Uhlemann M, Gendt G, Ramatschi M, Deng Z. GFZ global multi-GNSS network and data processing results. In: Rizos C, Willis P, editors. IAG 150 years. New York: Springer; 2015. p. 673–9.
- [7] Selmke I, Duan B, Hugentobler U. Status of the TUM MGEX orbit and clock products [presentation]. In: 2018 IGS Workshop; 2018 Oct 29–Nov 2; Wuhan, China; 2018.
- [8] Guo J, Xu X, Zhao Q, Liu J. Precise orbit determination for quad-constellation satellites at Wuhan University: strategy, result validation, and comparison. *J Geod* 2016;90(2):143–59.
- [9] Montenbruck O, Rizos C, Weber R, Weber G, Neilan R, Hugentobler U. Getting a grip on multi-GNSS. *GPS World* 2013;24(7):44–9.
- [10] Rizos C, Montenbruck O, Weber R, Weber G, Neilan R, Hugentobler U. The IGS MGEX experiment as a milestone for a comprehensive multi-GNSS service. In: Proceedings of 2013 ION Pacific PNT Meeting; 2013 Apr 22–25; Honolulu, HI, USA; 2013. p. 289–95.
- [11] Montenbruck O, Steigenberger P, Khachikyan R, Weber G, Langley RB, Mervart L, et al. IGS-MGEX: preparing the ground for multi-constellation GNSS science. *Inside GNSS* 2014;9(1):42–9.
- [12] Steigenberger P, Hugentobler U, Loyer S, Perosanz F, Prange L, Dach R, et al. Galileo orbit and clock quality of the IGS multi-GNSS experiment. *Adv Space Res* 2015;55(1):269–81.
- [13] Guo F, Li X, Zhang X, Wang J. Assessment of precise orbit and clock products for Galileo, BeiDou, and QZSS from IGS multi-GNSS experiment (MGEX). *GPS Solut* 2017;21(1):279–90.
- [14] Katsigianni G, Loyer S, Perosanz F, Mercier F, Zajdel R, Sošnica K. Improving Galileo orbit determination using zero-difference ambiguity fixing in a multi-GNSS processing. *Adv Space Res* 2019;63(9):2952–63.
- [15] An X, Meng X, Chen H, Jiang W, Xi R, Chen Q, et al. Improving integrated precise orbit determination of GPS, GLONASS, BDS and Galileo through integer ambiguity resolution. *GPS Solut* 2019;23(2):48.
- [16] Beutler G, Brockmann E, Gurtner W, Hugentobler U, Mervart L, Rothacher M, et al. Extended orbit modeling techniques at the CODE processing center of the international GPS service for geodynamics (IGS): theory and initial results. *Manuscr Geod* 1994;19(6):367–86.
- [17] Arnold D, Meindl M, Beutler G, Dach R, Schaer S, Lutz S, et al. CODE's new solar radiation pressure model for GNSS orbit determination. *J Geod* 2015;89(8):775–91.
- [18] Montenbruck O, Steigenberger P, Hugentobler U. Enhanced solar radiation pressure modeling for Galileo satellites. *J Geod* 2015;89(3):283–97.
- [19] Steigenberger P, Montenbruck O. Galileo status: orbits, clocks, and positioning. *GPS Solut* 2017;21(2):319–31.
- [20] Montenbruck O, Schmid R, Mercier F, Steigenberger P, Noll C, Fatkulin R, et al. GNSS satellite geometry and attitude models. *Adv Space Res* 2015;56(6):1015–29.
- [21] Steigenberger P, Fritsche M, Dach R, Schmid R, Montenbruck O, Uhlemann M, et al. Estimation of satellite antenna phase center offsets for Galileo. *J Geod* 2016;90(8):773–85.
- [22] Schmid R, Dach R, Collilieux X, Jäggi A, Schmitz M, Dilssner F. Absolute IGS antenna phase center model igs08.atx: status and potential improvements. *J Geod* 2016;90(4):343–64.
- [23] Galileo satellite metadata [Internet]. Madrid: European GNSS Service Center; [cited 2018 Nov 24]. Available from: <https://www.gsc-europa.eu/support-to-developers/galileo-satellite-metadata>.
- [24] Wanninger L, Beer S. BeiDou satellite-induced code pseudorange variations: diagnosis and therapy. *GPS Solut* 2015;19(4):639–48.
- [25] Dilssner F. A note on the yaw attitude modeling of BeiDou IGSO-6 [Internet]. Darmstadt: ESA/ESOC; 2017 Nov 20; [cited 2018 Nov 24]. Available from: http://navigation-office.esa.int/attachments_24576369_1_BeiDou_IGSO-6_Yaw_Modeling.pdf.
- [26] Zumberge JF, Hefflin MB, Jefferson DC, Watkins MM, Webb FH. Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. *J Geophys Res* 1997;102(B3):5005–17.
- [27] Montenbruck O, Steigenberger P, Darugna F. Semi-analytical solar radiation pressure modeling for QZS-1 orbit-normal and yaw-steering attitude. *Adv Space Res* 2017;59(8):2088–100.
- [28] Pearlman MR, Degnan JJ, Bosworth JM. The international laser ranging service. *Adv Space Res* 2002;30(2):135–43.
- [29] SLRF2014 [Internet]. Greenbelt: ILRS; [cited 2018 Nov 29]. Available from: <ftp://ftp.cddis.eosdis.nasa.gov/slr/products/resource>.
- [30] Sošnica K, Thaller D, Dach R, Steigenberger P, Beutler G, Arnold D, et al.

- Satellite laser ranging to GPS and GLONASS. *J Geod* 2015;89(7):725–43.
- [31] Rodriguez-Solano CJ, Hugentobler U, Steigenberger P. Impact of albedo radiation on GPS satellites. In: Kenyon S, Pacino MC, Marti U, editors. *Geodesy for planet Earth*. New York: Springer; 2012. p. 113–9.
- [32] Steigenberger P, Thielert S, Montenbruck O. GNSS satellite transmit power and its impact on orbit determination. *J Geod* 2018;92(6):609–24.
- [33] Rebischung P, Schmid R. IGS14/igs14.atx: a new framework for the IGS products [poster]. In: 2016 AGU Fall Meeting; 2016 Dec 12–16; San Francisco, CA, USA; 2016.
- [34] Schmid R, Steigenberger P, Gendt G, Ge M, Rothacher M. Generation of a consistent absolute phase-center correction model for GPS receiver and satellite antennas. *J Geod* 2007;81(12):781–98.
- [35] Dach R, Schmid R, Schmitz M, Thaller D, Schaer S, Lutz S, et al. Improved antenna phase center models for GLONASS. *GPS Solut* 2011;15(1):49–65.
- [36] Dilssner F, Springer T, Schönemann E, Enderle W. Estimation of satellite antenna phase center corrections for BeiDou [poster]. In: 2014 IGS Workshop; 2014 Jun 23–27; Pasadena, CA, USA; 2014.
- [37] Montenbruck O, Steigenberger P, Hauschild A. Broadcast versus precise ephemerides: a multi-GNSS perspective. *GPS Solut* 2015;19(2):321–33.
- [38] Montenbruck O, Steigenberger P, Hauschild A. Multi-GNSS signal-in-space range error assessment—methodology and results. *Adv Space Res* 2018;61(12):3020–38.
- [39] Beutler G, Kouba J, Springer T. Combining the orbits of the IGS analysis centers. *Bull Geod* 1995;69(4):200–22.
- [40] Weiss JP, Steigenberger P, Springer T. Orbit and clock product generation. In: Teunissen P, Montenbruck O, editors. *Springer handbook of global navigation satellite systems*. New York: Springer; 2017. p. 983–1010.
- [41] Fritsche M. Multi-GNSS orbit and clock combination: preliminary results [poster]. In: 2016 IGS Workshop; 2016 Feb 8–12; Sydney, NSW Australia; 2016.
- [42] Sakic P, Mansur G, Viegas E, Männel B, Schuh H. Towards a multi-constellation combination: improving the IGS orbit & clock combination software for MGEX products [presentation]. In: 2018 IGS Workshop; 2018 Oct 29–Nov 2, Wuhan, China; 2018.
- [43] MGEX product analysis [Internet]. Pasadena: International GNSS Service; [cited 2019 Nov 22]. Available from: <http://mgex.igs.org/analysis/index.php>.