

iGMAS 轨道产品综合及精度初步分析

谭 畅¹ 陈 国² 魏 娜¹ 蔡洪亮³ 赵齐乐¹

1 武汉大学卫星导航定位技术研究中心,湖北 武汉,430079

2 武汉大学测绘学院,湖北 武汉,430079

3 北京跟踪与通信技术研究所,北京,100094

摘要:首先以 IGS(international GNSS service)的最终轨道产品为依据,具体介绍并验证了分析中心轨道综合的原理及方法。其次,针对产品一致性改正项,分析了其对综合轨道的影响,结果表明该项改正可以引起 2 mm 的轨道差异。最后针对试运行中的 iGMAS 轨道产品,通过对综合轨道质量稳定性和抗差性分析,进一步验证了本文给出的轨道综合方法适用于目前 iGMAS 分析中心多系统轨道。通过选定外部的参考产品,对 iGMAS 各个分析中心轨道产品及综合轨道的精度进行了初步分析。

关键词:GNSS 轨道综合; iGMAS; 产品一致性改正; 精度

中图法分类号:P228.41

文献标志码:A

近几年来,各国卫星导航系统建设都将进入关键阶段,到 2020 年,将有 100 多颗导航卫星在轨飞行^[1],全球卫星导航系统进入多 GNSS 时代。随着中国北斗系统(BeiDou satellite system, BDS)的不断完善发展,为了进一步推动实现多模 GNSS(global navigation satellite system)系统的兼容与互操作,中国在国际上发起了建立国际 GNSS 监测评估系统(iGMAS)活动^[2],该系统将建立多模导航卫星全弧段、多重覆盖的全球实时跟踪网,以及具备数据采集、存储、分析、管理和发布等功能的信息平台。

作为 iGMAS 的核心目标之一,系统将向全球用户提供高可靠性、高精度的综合产品。目前,已有 10 家分析中心为 iGMAS 提供各类 GNSS 产品,而各家产品在解算中采用的测站数和分布以及模型的不一致,将导致同一类产品之间存在差异,这种差异主要表现在框架差异和产品精度上。对多家分析中心的产品进行综合,一方面,可以提高单个分析中心产品的可靠性及精度,避免了综合产品受同一类模型误差的影响;另外,以综合产品作为参考可以对分析中心的产品进行问题反馈和精度评估^[3]。本文基于 IGS 和 iGMAS 分析中心轨道产品,主要探讨轨道综合算法,并就目前 iGMAS 分析中心轨道产品和综合轨道的精度进行初步分析。

1 轨道综合原理及方法

轨道综合主要有两种算法^[4]:①先将所有分析中心提交的离散几何轨道转换到同一个参考框架下,根据分析中心轨道的验后方差进行权重分配,从而得到加权平均轨道;②将分析中心的轨道转化为伪观测值,并对卫星初始状态参数及力学参数进行估计修正,从而得到积分轨道。

1.1 轨道综合函数模型

因为通过建立基准转换方程,可以消除分析中心轨道和综合轨道之间的系统差异使得两者差异较小;另一方面,几何加权方法能够在短时间内提供综合的超快速轨道产品,更好地满足用户的实时需求。所以本文拟采用几何加权平均的方法,得到超快速、快速和最终的综合轨道产品。基于几何加权平均方法的轨道综合平差函数模型表示如下:

$$\text{orb}_{\text{com}} = \frac{\sum_{i=1}^n P^i \times (\text{orb}_{s_i} + T_i + D_i \times \text{orb}_{s_i} + R_i \times \text{orb}_{s_i})}{\sum_{i=1}^n P^i} \quad (1)$$

式中, $\text{orb}_{s_i} = \text{orb}_i + \Delta \text{orb}_i$, orb_i 表示第 i 个分析中心的轨道, Δorb_i 表示对分析中心轨道进行框架统一的改正数, orb_{s_i} 表示经过框架统一之后的分析中心轨道; 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, 即平移参数、尺度参数和旋转参数。

1.2 轨道产品一致性改正

对于最终轨道产品综合, 由于分析中心用到的观测数据、测站数量及分布并不完全一样, 导致各个分析中心解算的产品并不在相同的框架下, 为了保证综合轨道和综合站坐标解的一致性, 轨道综合之前, 利用各分析中心的 SINEX (solution independent exchange format) 解与综合解的旋转参数对每个分析中心的轨道进行产品一致性改正, 可以保证综合轨道和综合站坐标的一致性, 改正公式如下:

$$\Delta \text{orb}_{x_i} = -RZ_{snx_i} \times \text{orb}_{y_i} + RY_{snx_i} \times \text{orb}_{z_i} \quad (2)$$

$$\Delta \text{orb}_{y_i} = RZ_{snx_i} \times \text{orb}_{x_i} - RX_{snx_i} \times \text{orb}_{z_i} \quad (3)$$

$$\Delta \text{orb}_{z_i} = -RY_{snx_i} \times \text{orb}_{x_i} + RZ_{snx_i} \times \text{orb}_{y_i} \quad (4)$$

式中, $(RX_{snx_i}, RY_{snx_i}, RZ_{snx_i})$ 表示站坐标综合结束后, 分析中心的站坐标解相对综合解的旋转参数。由于动力学方程约束, 地面参考框架相对于综合轨道解的框架偏移不会对轨道原点造成明显影响, 另外根据开普勒第三定律, 地面参考框架的尺度基准对综合轨道解的尺度影响很小, 因此, 不进行原点和尺度基准的改正^[5]。

1.3 分析中心轨道产品质量控制

针对分析中心轨道产品质量差异, 本文提出质量控制的策略, 主要表现在以下 3 个方面: ① 删除含有明显粗差的卫星轨道数据, 具体探测识别步骤参见文献[6]; ② 对系统偏差过大的整个分析中心进行剔除, 仅对该分析中心轨道进行精度评估, 因为考虑到综合轨道的基准为分析中心平均轨道基准, 且分析中心轨道都是具体的 IGB08 框架的瞬时实现, 为了保证综合轨道与 IGB08 框架的差异在可接受的范围内, 对系统偏差过大的分析中心轨道剔除很有必要; ③ 对于满足质量要求的分析中心轨道进行权重分配, 使得待估参数更加合理可靠。

无论是对个别问题卫星数据的剔除, 还是剔除整个分析中心的轨道产品, 都可以通过对分析中心卫星权重的分配和整个分析中心权重的设置来实现。对分析中心 i 卫星 j 在历元 k 的轨道, 根据赫尔墨特七参数转换, 建立平差观测方程, 初始轨道为平均轨道, 各分析中心权重均为 1。采用最小二乘算法, 计算每个分析中心的转换参数。

根据验后方差确定分析中心的权重 P^i 和分析中心每颗卫星的权重 P_j^i 。权重分配可以采用如下公式:

$$P^i(ii) = \frac{\sigma_0^2}{P^i(ii-1) * (\sigma^i)^2} \quad (5)$$

$$P_j^i(ii) = \frac{\sigma_{00}^2}{P_j^i(ii-1) * (\sigma_j^i)^2} \quad (6)$$

根据确定的分析中心及各卫星权重, 利用式(7)可以得到加权平均轨道。考虑到分析中心初始权重的设置不合理, 且要对系统误差偏大的分析中心进行剔除, 所以需要对综合轨道进行迭代计算, 直到不再有问题卫星且分析中心前后两次权重差异小于阈值, 结束迭代, 并输出综合产品。

$$\text{orb}_{comj} = \frac{\sum_{i=1}^n P^i \times \text{orb}_i^j}{\sum_{i=1}^n P^i} \quad (7)$$

2 算法验证

2.1 综合轨道结果分析

为了验证本文算法的正确性, 对 1 761 周到 1 764 周(2013-10-06~2013-11-02)的 IGS 分析中心最终轨道进行综合, 以 IGS 发布的 GPS 综合轨道和 GLONASS (globalnaya navigatsionnaya sputnikovaya sistema) 综合轨道为参考, 得到 X、Y、Z 方向以及三维的互差。

图 1 给出了本文综合的 GPS 和 GLONASS 轨道与 IGS 的 GPS 和 GLONASS 轨道三维 RMS (root mean square) 的均值, 图 1 表明 GPS 轨道 RMS 都在 4 mm 之内。图 1(b) 表明 GLONASS 轨道除了 R_{11} , 其余 RMS 在 10 mm 之内, 多数卫星优于 5 mm。而 IGS 的 GPS 最终轨道的一维方向的标称精度是 2.5 cm, IGS 的 GLONASS 最终轨道的一维方向标称精度是 3 cm。因为 IGS 进行轨道综合时采用 L_1 范数最小原则进行转换参数估计, 而本文采用抗差最小二乘估计方法。这可能导致本文轨道和 IGS 轨道的微小差异, 但相对于卫星轨道的标称精度, 足以说明本文算法的正确性。为了说明本文采用的几何加权平均方法得到的轨道与动力学平滑轨道的一致性, 图 2 给出 IGS 的 GPS 轨道和综合轨道(图中用 COMB 表示)积分后轨道的拟合精度, 统计值为单颗卫星四周内三维 RMS 均值(G_{30} 卫星数据不全, 没有参与统计), 从图 2 可以看出, 两者之间的差异很小, 综合轨道与动力学轨道的符合情况是与 IGS 的 GPS 轨道一致的。

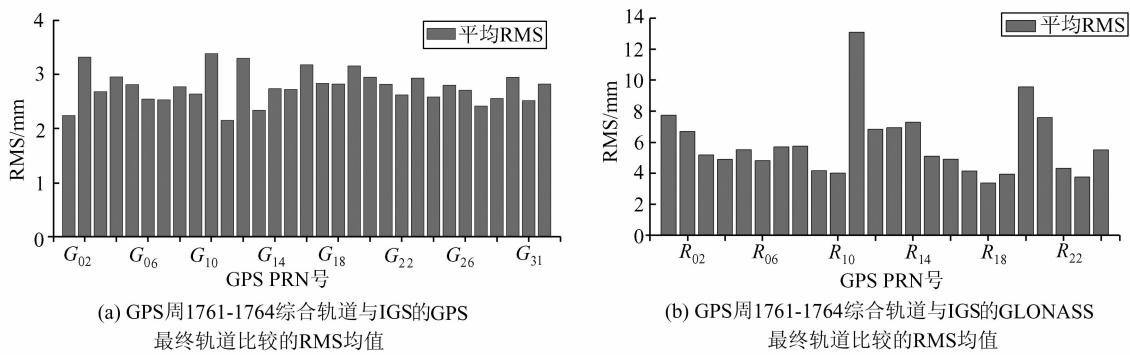


图 1 GPS 周 1 761-1 764 综合轨道与 IGS 最终轨道比较的 RMS 均值

Fig. 1 Averaged RMS Differences Between Combined Orbits and the IGS Fmal Orbits During GPS Weeks 1 761-1 764

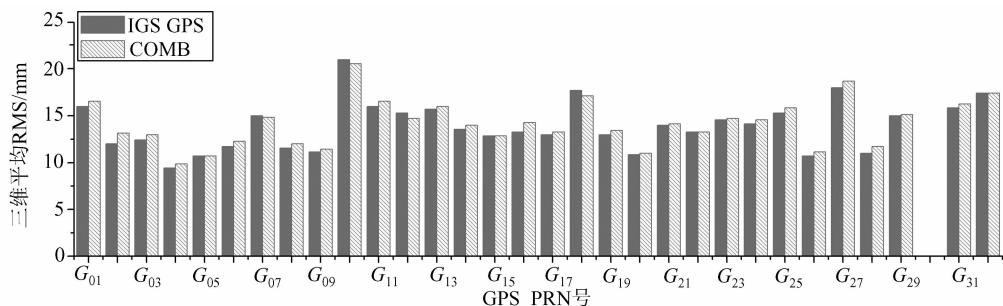


图 2 GPS 周 1 761-1 764 IGS GPS 最终轨道和综合轨道的拟合精度

Fig. 2 Precision of IGS GPS Final Orbits and Combined Orbits During GPS Week 1 761-1 764

2.2 产品一致性改正分析

为了说明产品一致性改正对综合产品结果精度的影响,本文对 GPS 周 1 761 周(2013-10-06~2013-10-12)各个分析中心的轨道产品在有无一致性改正的情况下进行综合,并以 IGS 最终轨道为参考进行精度评定。

图 3 中给出两种情况下三维 RMS 在一周时间内的平均值,为了方便显示,仅给出偶数编号卫星的比较结果。图 3 表明,进行产品一致性改正后的综合轨道比没有进行一致性改正的综合轨道精度好 2 mm 左右;另一方面,从综合轨道相对 IGS 轨道的转换参数来看,两种情况下的平移参数和尺度参数差异小于 0.1 mm,但 3 个旋转参数存在 $1.7 \mu\text{as}$ 的差异,该数值对 GPS 卫星能够造成 2.1 mm 的影响,这与有无一致性改正的综合轨道精度差异值是一致的,说明了轨道综合之前对分析中心产品进行一致性改正,可以有效地保证轨道产品和站坐标产品在同一框架下,从而使得两类综合产品是匹配的。

3 iGMAS 的 GNSS 轨道综合

分析 iGMAS 的 GNSS 轨道精度,通过获取北斗周第 0448 周(2014-08-03~2014-08-09)、10

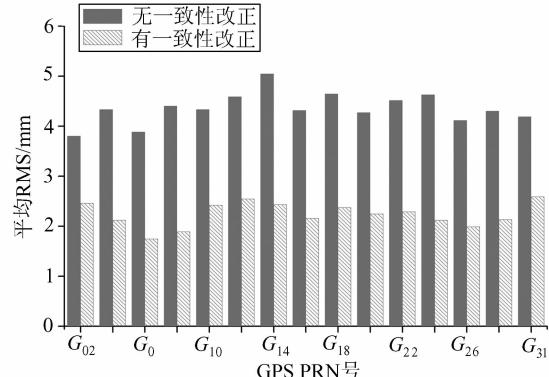


图 3 产品一致性改正对综合结果的影响

Fig. 3 Impact of Consistency Correction on the Combined Final Satellite Orbits

个分析中心(编号为 $AC_1, AC_2, \dots, AC_{10}$)的最终轨道、快速轨道和超快速轨道,采用本文的综合算法分别对不同时效的产品进行综合,得到 GNSS 综合轨道。并以 IGS 提供的最终轨道产品(包括 IGS、IGL(GLONASS 精密星历)、TUM(Technical University of Munich)、GBM 产品)进行精度评估^[7]。

另外,本文中提到的所有精度均代表综合轨道与参考轨道的符合精度,统计的精度值均为同一卫星系统的所有卫星在一维方向上的均值。

进行精度评估要解决以下两个问题:① 轨道

产品的时间系统不一致, iGMAS 产品采用时间系统为北斗时, 参考产品的时间系统是 GPS 时。本文采用连续 3 d 的参考轨道, 10 阶拉格朗日插值算法进行轨道内插, 将 GPS 时下的轨道内插到北斗时^[8]。② 卫星轨道基准不统一, 由于 iGMAS 各个分析中心在定轨中采用的测站数量和分布及解算策略并不完全一致, 所以轨道比较的结果中消除了轨道之间的系统偏差。

3.1 iGMAS 分析中心轨道产品精度

以北斗周第 0448 周分析中心 GPS 产品为例对分析中心产品进行精度评估, 图 4 给出了 iGMAS 各分析中心轨道和综合轨道相较于参考轨

道的互差 RMS, 其中 COMB 表示综合轨道。

精度评定结果表明各个分析中心的 GPS 轨道精度存在差异, 但均在 8 cm 以内, 大部分分析中心的最终轨道和快速轨道精度优于 2.5 cm, 超快速轨道观测部分优于 6 cm, 超快速轨道预报部分优于 15 cm; 同时, 综合的最终、快速轨道精度分别在 1 cm 和 1.5 cm 左右, 超快速轨道观测部分和预报部分(6 h)分别在 2 cm 和 2.5 cm 左右。而 IGS 标称的 GPS 轨道精度为 2.5 cm, 这说明综合的 iGMAS 的 GPS 轨道精度与 IGS 的 GPS 轨道精度基本在一个水平, 且与最优分析中心轨道精度一致。

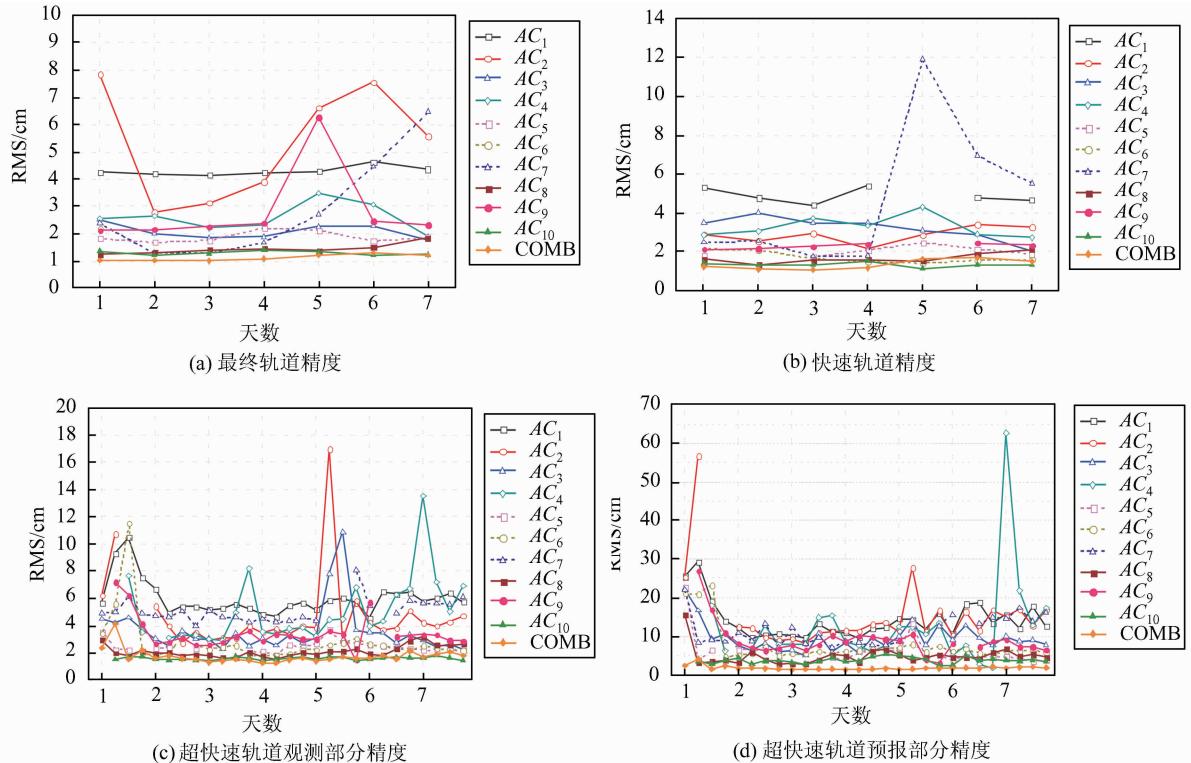


图 4 iGMAS 分析中心轨道、综合轨道精度

Fig. 4 Precision of iGMAS ACs Orbits and Combined Orbits with Respect to the IGS Final Orbits

为了说明综合轨道的可靠性, 以 2014-08-03 (BDT 04480) 各分析中心的 GPS 轨道为例, AC_1 的 RMS 均值为 4.2 cm, 其中的 G_{27} 号卫星存在较大偏差, 图 5 是该天分析中心产品和综合产品中 G_{27} 卫星历元互差序列 (COMB 表示综合轨道)。图 5 显示 AC_1 的 G_{27} 卫星互差值较大, 波动幅度大, 而综合后的 G_{27} 互差值在 4 cm 内, 波动幅度小。说明采用本文算法, 削弱了轨道精度较低的分析中心影响, 通过数据质量控制能够剔除坏卫星的影响, 使得综合轨道相对于单个分析中心轨道更加可靠, 精度更稳定。

3.2 iGMAS 综合轨道产品精度

图 6 是北斗周第 0448 周综合的 iGMAS 最

终轨道、快速轨道和超快速轨道的 RMS 图, 表 1 给出轨道产品精度。

iGMAS 的 GPS 最终轨道、快速轨道、超快速轨道观测部分精度在 2 cm 之内, 预报部分精度在 5 cm 左右, 与 IGS 的 GPS 的最终、快速和超快速轨道标称精度基本一致; GLONASS 最终轨道, 快速轨道精度在 2~3 cm, 超快速轨道观测部分精度 3~4 cm, 预报部分精度 7 cm 左右, 除超快速轨道预报部分外, 与 IGL 最终轨道标称精度 3 cm 基本一致; iGMAS 的 Galileo 最终轨道精度在 6 cm 左右, 快速轨道精度 8~9 cm, 超快速轨道观测部分精度 10~11 cm, 预报部分精度 20 cm 左右, 目前 TUM 的 Galileo 轨道产品精度在 5~30

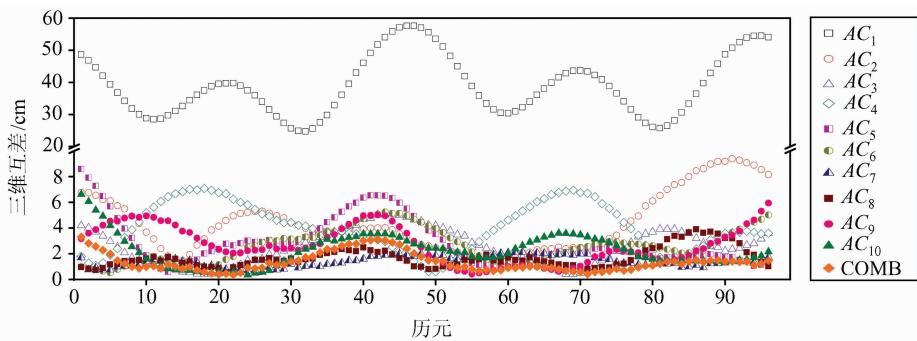
图 5 BDT 04480 G_{27} 卫星最终轨道三维互差图Fig. 5 The 3D Difference of Final Orbit of G_{27} in BDT 04480

表 1 北斗周第 0448 周 iGMAS 轨道产品与 IGS 轨道产品比较的平均 RMS/cm

Tab. 1 Averaged RMS Between iGMAS Orbit Product and IGS Orbit Products in BDS Week 0448/cm

轨道类型	GPS	GLONASS	Galileo	BDS-GEO	BDS-MEO/IGSO
最终轨道	1.12	2.34	6.09	146.27	18.29
快速轨道	1.33	2.71	8.64	160.64	17.06
超快速轨道观测部分	1.75	3.43	10.73	145.71	17.73
超快速轨道预报部分	5.23	7.09	20.26	151.14	26.93

cm 范围内^[9], iGMAS 的 Galileo 轨道与该精度基本一致。

iGMAS 的 BDS 系统的 GEO 卫星最终综合轨道、快速综合轨道、超快速综合轨道精度均在 1.5 m 左右, MEO/IGSO 卫星最终轨道、快速轨道、超快速轨道观测部分精度在 20 cm 之内, 预报部分精度在 27 cm 左右。SLR (satellite laser ranging)

检核显示 GBM 的 BDS 轨道产品 MEO/IGSO 卫星 (C_{08} , C_{10} , C_{11}) 的标准差在 9.3~13.9 cm 范围内, 偏差在 -6.3 cm~2.9 cm 范围内, GEO 卫星 (C_{01}) 的标准差为 28.6 cm, 偏差为 43.6 cm^[10]。目前, iGMAS 各分析中心 BDS 轨道解算时测站数量较少, 导致分析中心产品精度较低, 而采用的卫星 PCO 不一致将导致综合轨道无法完全消除

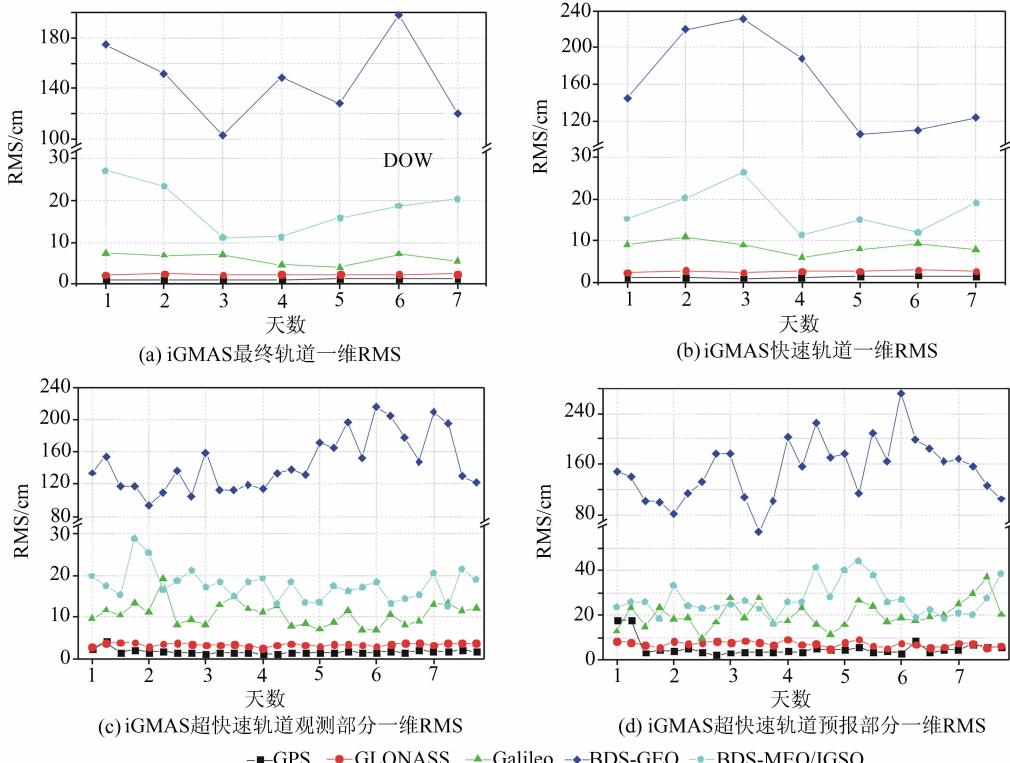


图 6 iGMAS 轨道产品一维 RMS

Fig. 6 RMS of iGMAS Orbit with Respect to the IGS Final Orbits

这种差异,造成 BDS 的 GEO 卫星综合轨道符合精度较低。

4 结语

1) 通过轨道综合,可以探测并剔除分析中心轨道产品中的问题卫星,对不同精度的卫星轨道进行权重分配,减少精度较差的卫星轨道对综合轨道的影响。实验结果表明,该方法使得综合轨道精度更为稳定,产品更加可靠。

2) iGMAS 的综合轨道产品精度评估结果表明,综合的 GPS、GLONASS 和 Galileo 轨道产品与参考产品基本在一个水平,其中, GPS、GLONASS 产品精度最高, Galileo 产品精度次之;而 BDS 的 GEO 卫星与 MEO/IGSO 卫星产品精度差异明显, MEO/IGSO 卫星明显好于 GEO 卫星。

目前,iGMAS 多数分析中心并没有将 GNSS 四系统的轨道进行联合解算,而是采用和 GPS 联合定轨的方式获得其他单系统的卫星轨道,该条件下综合的轨道可以认为和 GPS 卫星轨道同属一个框架,但是由于各个系统定轨时采用的测站数量和测站分布不一致,将导致多系统轨道并不在严格意义上的同一个时空框架下。在这种情况下,实现 GNSS 多系统综合轨道时空基准统一可以考虑如下方法:在对分析中心多系统轨道综合时,利用各系统卫星定轨时的站坐标和同一框架如 IGb08 的站坐标进行赫尔墨特七参数转换,获得框架差异,并将框架差异改正到分析中心各系统的轨道上,从而得到与 IGb08 框架统一的 GNSS 多系统综合轨道。另外,在综合轨道产品应用中,需要耦合较好的综合钟差和综合轨道配套使用,两者的一致性需要进一步验证。

参考文献

- [1] Xu Qing. Review of Global Navigation Satellite in 2013[J]. *Space International*, 2014(2): 32-37(徐菁. 2013 年世界导航卫星回顾[J]. 国际太空, 2014(2): 32-37)
- [2] Jiao Wenhui, Ding Qun, Li Jianwen, et al. Monitoring and Assessment of GNSS Open Services[J]. *Scientia Sinica Phys, Mech & Astron*, 2011, 41(5): 521-527(焦文海, 丁群, 李建文, 等. GNSS 开放服务的监测评估[J]. 中国科学: 物理学, 力学, 天文学, 2011, 41(5): 521-527)
- [3] Mireault Y, Kouba J, Lahaye F. IGS Combination of Precise GPS Satellite Ephemerides and Clocks [C]. *GPS Trends in Precise Terrestrial, Airborne, and Spaceborne Applications, International Association of Geodesy Symposia*, Boulde, CO, USA, 1996
- [4] Beutler G, Kouba J, Springer T. Combining the orbits of the IGS Analysis Centers [J]. *Bulletin-Geodesique*, 1995, 69(4): 200-222
- [5] Wei Na, Shi Chuang, Li Min, et al. Analysis and Assessment of IGS Products Consistencies[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2009, 34(11): 1 363-1 367(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)
- [6] Hu Zhigang. BeiDou Navigation Satellite System Performance Assessment Theory and Experimental Verification[D]. Wuhan: Wuhan University, 2013(胡志刚. 北斗卫星导航系统性能评估理论与试验验证[D]. 武汉: 武汉大学, 2013)
- [7] Griffiths J, Ray J R. On the Precision and Accuracy of IGS Orbits[J]. *Journal of Geodesy*, 2009, 83(3/4): 277-287
- [8] Zhang Shoujian, Li Jiancheng, Xing Lelin, et al. Comparative Analysis on Two Methods for IGS Precise Ephemeris Interpolation[J]. *Journal of Geodesy And Geodynamics*, 2007, 27(2): 80-83(张守建, 李建成, 邢乐林, 等. 两种 IGS 精密星历插值方法的比较分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2007, 27(2): 80-83)
- [9] Steigenberger P, Hugentobler U, Loyer S, et al. Galileo Orbit and Clock Quality of the IGS Multi-GNSS Experiment [J]. *Advances in Space Research*, 1999, 13(5): 259-267
- [10] Uhlemann M, Deng Z, Fritzsche M. Multi-GNSS Orbit and Clock Products of the GFZ Analysis Centre[R]. *Geodatische Woche*, Germany, 2014

Combined Satellite Orbits of the iGMAS Analysis Centers: Method and Precision

TAN Chang¹ CHEN Guo² WEI Na¹ CAI Hongliang³ ZHAO Qile¹

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

2 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

3 Beijing Institute of Tracking and Telecommunication Technology, Beijing 100094, China

Abstract: Currently, analysis centers(ACs) of International GNSS continuous monitoring and assessment system (iGMAS) could provide precise GNSS orbit products. To improve the stability and reliability of orbit products for high-precision users, we usually combine the orbit products from ACs. In this paper, we present a robust least square method of combining satellite orbits from different solutions. We first verify this method by combining GPS and GLONASS final orbit products provided by IGS Analysis Centers. Results show that the RMS differences between our combined GPS orbits and those from IGS are about 4 mm, and the RMS differences between our combined GLONASS orbits and those from IGS are about 5 mm. As the orbits of different IGS ACs are calculated in different reference frames, we first transform the orbits of different IGS ACs to the reference frame of IGS combined solution independent exchange format (SINEX) solutions before orbit combination. Results show that this transformation can improve the quality of combined orbits up to 2 mm. We then apply this method to analyze and combine GNSS satellite orbit products provided by ten of iGMAS ACs. For most iGMAS ACs, results show that the precision of GPS final and rapid orbits are better than 2.5 cm, and the precision of GPS ultra-rapid orbits are better than 6 cm and 15 cm for observed part and predicted part, respectively. The precision of iGMAS combined final orbits are 2 cm, 2~3 cm and 6 cm for GPS, GLONASS and Galileo satellites, respectively. The precision of iGMAS combined final orbits are 1.5 m and 20 cm for IGSO and MEO/IGSO of BDS, respectively. The relatively lower precision for combined GEO orbits is due to the different satellite antenna phase center offset (PCO) models adopted by different iGMAS ACs.

Key words: GNSS orbit combination; iGMAS; BeiDou orbits; reference frame

First author: TAN Chang, postgraduate, specializes in GNSS precise positioning. E-mail: chtan@whu.edu.cn

Corresponding author: WEI Na, PhD, lecturer. E-mail: nwei@whu.edu.cn

Foundation support: The National High-Tech Research and Development Program (863 Program) of China. No. 2014AA123101.