

IGS 产品的一致性分析及评价

魏娜^{1,2} 施闯² 李敏^{1,2} 邹蓉^{1,2}

(1 武汉大学测绘学院,武汉市珞喻路 129 号,430079)

(2 武汉大学卫星导航定位技术研究中心,武汉市珞喻路 129 号,430079)

摘要:回顾了 IGS 参考框架的历史和发展现状,分析了 IGS 框架与 ITRF 框架的一致性,介绍了 IGS 的数据处理策略及其对 IGS 最终产品一致性的影响。算例分析了 IGS 最终轨道和 IGS05 框架的一致性,以及 IGS 最终轨道/钟差和周解 SINEX 的一致性。

关键词:IGS 参考框架;一致性;最终轨道/钟差;周解 SINEX

中图法分类号:P228.41

IGS 的首要目标是为 GNSS 用户提供一个高精度、连续、一致的参考框架。IGS 的最终产品包括最终卫星轨道/钟差、ERP、IGS 站坐标和速度、地心变化以及对流层和电离层产品,这些产品的精度、产品之间的一致性和连续性是用户进行高精度导航/定位的基础保障^[1]。随着精度的提高、应用的广泛性和多样性,IGS 产品的一致性对用户的影响越来越大。目前,IGS 在站坐标、ERP 和轨道/钟差产品一致性方面取得了一定的进展,但仍需进一步完善和精化,尚未涉及大气产品与这些产品的一致性研究^[2]。本文所述的 IGS 产品的一致性包括 IGS 框架的外部一致性和 IGS 产品的内部一致性。IGS 框架的外部一致性指 IGS 框架与 ITRF 框架的一致性,而 IGS 产品的内部一致性指 IGS 产品与 IGS 框架的一致性以及 IGS 产品间的一致性。

1 IGS 参考框架与 ITRF 的一致性分析

IGS 框架与 ITRF 密切相关。IGS 成立之初,IGS 站较少,可用数据有限,曾经直接采用 13 个 ITRF 站在 ITRF92、ITRF93、ITRF94 下的坐标实现了最初的三个版本的 IGS 参考框架。对 IGS 而言,直接采用 ITRF 站坐标将不可避免地引入各种技术间的系统误差,导致网内部发生形

变。为了保证 IGS 产品的自洽性,IGS 参考框架的建立开始进入第二个阶段,即用 Helmert 转换将 IGS 每星期更新的累积解转换到 ITRF 框架下。先后建立一系列仅由 GPS 技术实现的参考框架,包括 IGS96、IGS97、IGS00、IGb00,测站数量逐渐增加,分布更为均匀,运行也更为稳定^[3]。

IERS 于 2006 年 10 月正式发布了 ITRF2005,与之前发布的 ITRF 框架相比,ITRF2005 在输入数据、基准定义以及组合策略方面均有所改进^[4]。为了与 ITRF2005 一致,IGS 随之发布了 IGS05。IGS05 是最新的 IGS 参考框架,参考历元为 J2000.0,由 132 个 IGS RF 站实现。实现过程为:从 ITRF 最终解中提取 IGS 解 ITRF2005_IGS-TRF.SNX,进行绝对天线相位中心改正后,再利用 Helmert 将其转换到 ITRF2005 框架下^[5]。图 1 为 ITRF05 与 IGS05 在 IGS RF 站下的残差,其纬度、经度和高程方向的均值分别为 -0.3 mm、-0.0 mm、-0.5 mm,标准差分别为 1.5 mm、1.3 mm、10.3 mm。

IGS 框架的定义与 ITRS 一致,采用 ITRF 的基准。IGS 框架的更新与 ITRF 的更新保持一致,一旦发布新版本的 ITRF,IGS 框架也应当进行相应的更新,保证 IGS 的基准定义尽可能准确。

IGS 为 ITRF 的建立和维持提供重要的源数据。从 ITRF1991 开始,GPS 作为 4 种重要技术之一开始为 IERS 提供规定的源数据。与其他技

术相比,IGS 站数量多且分布均匀,不但为用户提供使用了 ITRF 框架的便捷接口,更重要的是为 ITRF 实现定向随时间的演变提供了基础。

尽管 IGS 框架相对于 ITRF 框架的残差比较小,但对 GPS 用户而言,实际使用中应当采用 IGS 框架。直接使用 ITRF 站坐标进行数据处理是不恰当的,会导致 GPS 网的扭曲和变形。

IGS 框架是 ITRF 的扩展和延伸,既采用了 ITRF 高精度的基准,又保持了 IGS 站网的内部一致性。ITRF 框架的质量直接决定了相应的 IGS 框架的质量,同时,IGS 产品影响新版本的 ITRF 框架的维持和精化。

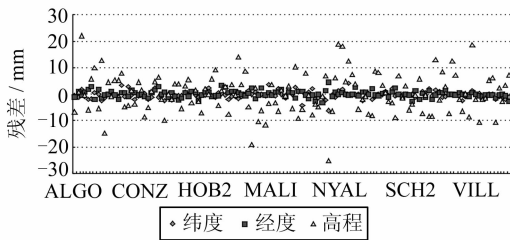


图1 ITRF05 与 IGS05 的残差

Fig.1 Residuals of ITRF05 and IGS05

2 IGS 产品的一致性分析

为了确保可靠性和稳健性,IGS 利用紧组合的方法对分析中心提交的周解进行处理得到最终的 IGS 产品。因此从一定程度上来说,IGS 产品与 AC 的系统误差无关。但 IGS 周解 SINEX 和轨道/钟差是分开组合的,分别由参考框架工作组 RFWG 和分析中心协调机构 ACC 负责,而且 SINEX 组合和轨道/钟差组合的原理和方法存在差异,因此,采用合理的措施保证 SINEX 组合解和轨道/钟差组合解的一致性是有必要的。

IGS 建议 AC 提交给 IGS 的最终产品应采用松弛约束,即无基准解,则 AC 的轨道、钟差、周解 SINEX 都应当基于所采用的测站网的基准。CODE、NGS、MIT 采用无整网旋转约束,JPL 采用自由网基准,而其他分析中心则采用松弛约束,并向 IGS 提交先验约束的方差-协方差信息,供 IGS 进行后续的产品组合。但无论采用哪种约束,AC 必须保证这些先验约束在组合时是可以消除的。

RFWG 对 AC 提交的 SINEX 周解进行组合,得到 IGS 的最终解,包括测站位置周解、ERP 天解、给定参考历元的累积解。先对 AC 提交的周解 SINEX 文件进行预处理,消除先验约束,然

后利用公共的 RF 站将 AC 周解转换到 IGS 框架下。进行粗差探测后,利用最小二乘同时对测站位置和 ERP 进行紧组合,确保这些产品组合解间的一致性。为了与 IGS05 框架一致,需将 IGS 组合解转换到 IGS 累积解框架下,转换参数的平移量即为地心变化^[1,7]。

ACC 利用最小范数稳健估计对 AC 提交的轨道/钟差周解进行组合,得到 IGS 最终的轨道/钟差。为了保持轨道和 SINEX 组合的一致性,轨道组合之前,先利用 RFWG 提供的各 AC SINEX 周解与累积解的旋转参数将各 AC 提交的轨道参数转换到统一的框架下,即每周更新的 IGS SINEX 累积解框架下^[8]。应当注意的是,参数转换时,并没有对轨道的原点和尺度进行改正。轨道组合方法参见文献^[9]。

由于动力学方程的约束,轨道对地心十分敏感,地面网基准约束相对于 IGS 框架的偏移不会对轨道原点产生显著的影响,因此,各 AC 轨道原点基本一致,基于地心。同样,由于开普勒第三定律的约束,地面跟踪网的尺度偏差对 GPS 轨道的尺度影响很小,因此,利用周解 SINEX 与 IGS 框架的平移和尺度参数对轨道进行转换是不合理的。

钟差组合之前,必须利用周解 SINEX 和轨道组合的相关信息对 AC 的钟差(包括卫星钟差和测站钟差)进行改正,保证钟差与周解 SINEX 和轨道的一致性^[10]。

由于各分析中心提供的是相对钟差,还需要将各分析中心的钟差转换到共同的时间基准下。经过粗差探测、剔除,对各 AC 的钟差进行加权平均得到 IGS 的最终钟差。

基于上述改正后的钟差基于 IGS05 框架,这样可以保证利用最终轨道和钟差得到的 PPP 是基于 IGS05 框架的,与利用快速轨道和钟差得到的 PPP 结果一致。

综上所述,IGS 最终产品中的周解 SINEX 和轨道/钟差组合解的参考框架如表 1 所示。周解 SINEX 和 IGS05 是一致的,而最终轨道的尺度和钟差的尺度并没有进行调整,与 SINEX 的尺度不一致。此外,轨道的原点基于组合解的质心,与 IGS 框架的原点也存在一定的差异。

表 1 IGS 最终产品采用的参考框架

Tab.1 Reference Frame Adopted by IGS Final Products

	定向	原点	尺度
SINEX	IGS05	IGS05	IGS05
轨道	IGS05	组合解的质心	ACs 平均尺度
钟差	IGS05	IGS05	ACs 平均尺度

从 1 400 周开始,IGS 及其分析中心采用绝对天线相位中心改正,在此之前,IGS 采用的是相对天线相位中心改正。如表 2 所示,从 1 350~1 399 周,各 AC 周解 SINEX 与 IGB00 的尺度差异均值为 1.5~4.5 ppb,而且各 AC 间的尺度差异也较大。采用绝对天线相位中心改正后,从 1 400~1 537 周,各 AC 周解与 IGS05 的尺度差异显著减小,均值为-0.61~0.18 ppb,各 AC 的尺度一致性也至少提高了两倍,IGS 周解 SINEX 与 IGS05 的

表 2 周解 SINEX 与 IGB00/IGS05 的尺度差异/ppb

Tab. 2 Scale Bias of Weekly SINEX with Respect to IGB00 and IGS05 Respectively /ppb

GPS 周	JPL	GFZ	ESA	COD	NGS	NCL	EMR	SIO	MIT	IGS
1 350~1 399	1.48	2.59	2.00	3.39	3.37	2.46	4.46	2.14	2.73	2.96
1 400~1 537	0.14	-0.36	-0.51	-0.12	-0.61	-0.16	0.03	0.18	-0.29	-0.18

参考框架的定向是协议确定的,从某种程度上说是任意的,利用旋转变换可加以统一。但原点和尺度有明确的物理意义,原点对应于质心,尺度则与物理常数(如 GM)和相对论模型有关,受各种地球物理模型的约束,对各种技术的相关误差敏感,不可能利用简单的数学方法加以调整。因此,原点和尺度的统一是极为复杂的问题,是影响 IGS 产品一致性的关键因素。

3 实验结果分析

3.1 IGS 轨道和 IGS05 框架的一致性

为了检验 IGS 最终轨道和 IGS05 框架的一致性,利用 2008 年 314~320 d IGS RF 站进行精密定轨,由于部分测站没有观测数据,最终参与定轨的共有 116 个 RF 站。数据处理采用三种方案:① 固定所有 RF 站在 ITRF05 框架下的坐标;② 固定所有 RF 站在 IGS05 下的坐标;③ 松弛约束 RF 站在 IGS05 下的坐标。定轨结果与 IGS 最终轨道的 RMS 如图 2 所示,图 2(a)、2(b)分别为附加/不附加 Helmert 转换的 RMS,三种方案的定轨结果分别用 ITRF05、IGS05 和 IGS05_S 表示。

从图 2 可以看出,三种方案的定轨结果精度相当,均为 3 cm 左右。除 314 d 外,方案②的精度始终略好于方案①。如前文所述,虽然 IGS05 相对于 ITRF05 进行绝对天线相位中心改正后与 ITRF05 的残差较小,但仍对精密定轨有影响,这也可以说明 IGS 的最终轨道是基于 IGS05 框架的。尽管采用固定基准时,两种方案的 RMS 值基本都在 mm 以下,以目前的轨道精度来看是可以忽略的,但并不能否定这种改进对将来更高精度定轨的贡献。

尺度差异从 2.96 ppb 提高到-0.18 ppb。由于 IGS 最终的轨道和钟差的尺度基于各 AC 中心的平均尺度,因此可以认为,绝对天线相位中心的引入使 SINEX 组合周解和最终轨道、钟差间的一致性有了较大的提高,大约有 3 ppb 的改进。另外,IGS 最终轨道基于组合解的地心,仅利用轨道得到的定位结果也将基于这一原点,与 PPP 的定位结果不一致。但这种不一致可以利用 IGS 提供的地心运动值加以改正,将其纳入到 IGS 框架下^[2]。

如果进行 Helmert 转换,方案③的精度略好于方案②,说明固定 RF 站会导致定轨结果相对于 IGS 最终轨道产生内部变形和扭曲,同时也可以验证 IGS 最终轨道是松弛约束的定轨结果。不进行 Helmert 转换时,除 320 d 外,方案③的精度比方案②和方案①都要差。这可能是因为利用松弛约束进行定轨得到的是某种程度上的无基准轨道,而 IGS 最终轨道的定向是基于 IGS05 框架的,两者之间存在一个系统性的差异。结合以上观点可以说明,IGS 最终轨道是利用各 AC 的松弛约束解组合得到的,并且转换到了 IGS05 框架下。

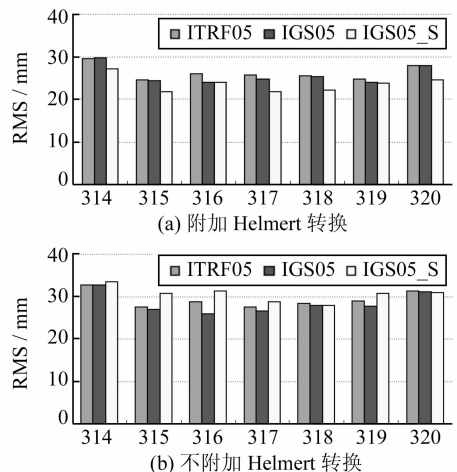


图 2 不同基准约束的定轨结果与最终轨道的 RMS
Fig. 2 RMS of Orbit Result Using Different Datum Constraints with Respect to Final Orbit

3.2 IGS 产品的一致性

为了评价 IGS 最终轨道/钟差和周解 SINEX 的一致性,利用 IGS 最终轨道和钟差对欧洲区域 6 个 IGS RF 站 1 461~1 468 周共 8 周的观测数

据进行了精密定位。采用的方案如下：① 仅利用 IGS 最终轨道，固定 BRUS 站在 IGS05 下的坐标，进行网解精密定位。② 用 IGS 最终轨道和钟差对 6 个 RF 站进行 PPP 定位，将网解结果和 PPP 结果分别与周解 SINEX 文件求差，得到最终的残差时间序列，分别用 NET-SNX⁽¹⁾、PPP-SNX⁽²⁾ 表示，并用这两个残差序列来分析轨道/SINEX 和轨道/钟差/SINEX 的一致性。

由表 3 中 NET-SNX⁽¹⁾ X、Y、Z 方向的残差均值和标准差，考虑到 SINEX 解的精度，可以认为利用 IGS 最终轨道的定位结果与 SINEX 精度相当，IGS 最终轨道与周解 SINEX 基本一致。

表 3 PPP/网解/SINEX 的残差统计/mm

Tab. 3 Statistics of Residuals Among PPP, Net Solution and Weekly SINEX/mm

	NET-SNX ⁽¹⁾		PPP-SNX ⁽²⁾		PPP-SNX ⁽³⁾		PPP-NET ⁽³⁾⁻⁽¹⁾	
	残差 均值	标准 差	残差 均值	标准 差	残差 均值	标准 差	残差 均值	标准 差
X	2.1	3.7	-12.7	4.8	-1.7	4.4	-3.9	3.7
Y	5.4	2.9	-1.7	3.2	-1.0	3.9	4.5	4.0
Z	0.6	5.9	-14.3	5.2	-1.7	5.3	-2.4	4.4

由 PPP 残差时间序列 PPP-SNX⁽²⁾ 可以看出，由测站坐标在 X 和 Z 方向与周解 SINEX 始终存在 1.0~1.5 cm 的公共系统偏差，X 方向的残差图如图 3(a) 所示，受篇幅限制，并未列出所有残差的时间序列。由于所选测站是欧洲区域的 IGS 站，靠近起始子午面，因此可以推断这一系统性偏差主要表现在测站的高程方向上。而 NET-SNX⁽¹⁾ 在 X 和 Z 方向上与周解 SINEX 符合较好，由于网解也采用非差模式定位，而且仅引入了 IGS 精密轨道，因此可以推断 PPP-SNX⁽²⁾ 的系统性偏差应该不是轨道引起的。考虑到这 8 周的 X 和 Z 方向的地心运动值最大不超过 6 mm，而且由于 PPP 属非差模式定位，站间不相关，一些公共偏差并无法消除，因此系统偏差可能是由于所采用的地球物理模型与周解 SINEX 不同引起的，且极有可能是潮汐改正差异引起的，但也不能排除 IGS 精密钟差的影响，只是按照目前的数据处理经验，这一系统性偏差主要由 PPP 本身引起的可能性更大。

考虑到网解时固定了 BRUS 站，将其他 5 个站的残差时间序列对 BRUS 站的残差时间序列再次求差，得到新的残差时间序列 PPP-SNX⁽³⁾，见表 3 和图 3(b)。可以看出，在新的时间序列中，系统偏差消失。考虑到所选 RF 站 1 461~1 468 周的周解 SINEX 的标准差均为 mm 量级，可以认为利用 IGS 最终轨道/钟差得到的 PPP 结

果经系统误差改正后与 SINEX 精度相当。但需要注意的是，这一结论的正确与否依赖于系统误差主要是由 PPP 本身引起这一假设的正确性，因此，准确、可靠地检验 IGS 最终轨道、钟差和周解 SINEX 的一致性还有赖于 PPP 精度的进一步提高。

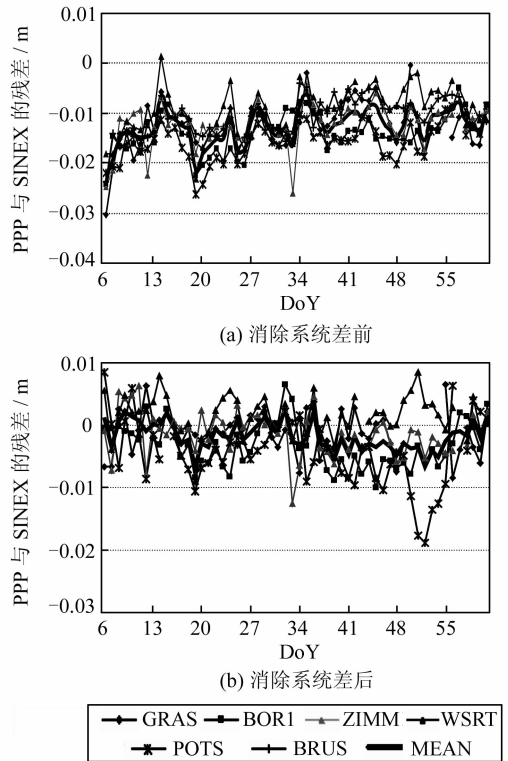


图 3 PPP 与 IGS 周解 SINEX X 方向的残差
Fig. 3 Residuals of PPP and Weekly SINEX in X Direction

最后将新的时间序列 PPP-SNX⁽³⁾ 与网解残差时间序列 NET-SNX⁽¹⁾ 求差得到 PPP-NET⁽³⁾⁻⁽¹⁾，如图 4 所示。这个残差序列可以用于检验轨道和钟差的一致性。结合表 3 可以看出，不进行系统误差改正时，最终轨道和钟差至少在 cm 级的水平上是一致的。

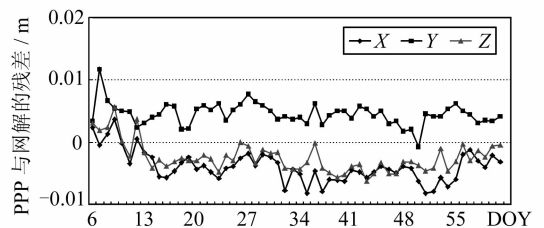


图 4 消除系统误差后 PPP 与网解的残差
Fig. 4 Residuals of PPP Without System Error with Respect to Net Solution

检验 IGS 产品的一致性是一项复杂的工作，

上述初步结论还有待深入验证,对更大范围、更长时间的 RF 站进行 PPP 和网解精密定位,而且 PPP 的精度和可靠性亟待提高。

4 结 语

随着绝对天线相位中心模型的引入,IGS 框架和 ITRF 框架的尺度一致性有显著的提高。按照目前的精度水平,周解 SINEX 和最终轨道的一致性较好,钟差和其他 IGS 产品的一致性有待提高,特别是 PPP 的广泛应用迫切需要深入研究轨道和钟差的一致性。

参 考 文 献

- [1] Ferland R, Gendt G, Schöne T. IGS Reference Frame Maintenance[C]. Celebrating a Decade of the International GPS Service, IGS 2004 Workshop and Symposium, Bern, 2005
- [2] Ray J, Dong D, Altamimi Z. IGS Reference Frames: Status and Future Improvements[J]. GPS Solution, 2004, 8:251-266
- [3] Kouba J, Ray J, Watkins M M. IGS Reference Frame Realization[R]. The IGS Analysis Center Workshop, Darmstadt, Germany, 1998
- [4] Altamimi Z, Collilieux X, Legrand J, et al. ITRF2005: A New Release of the International Ter-

restrial Reference Frame Based on Time Series of Station Positions and Earth Orientation Parameters [J]. J Geophys Res, 2007, 112: B09401

- [5] Ferland R. Proposed IGS05 Realization[OL]. <http://igs.cb.jpl.nasa.gov/mail/igsmail/2006/msg00170.html>, 2006
- [6] McCarthy D D, Petit G. IERS Conventions (2003) [R]. IERS Technical Note No. 32, Frankfurt am Main, 2004
- [7] Ferland R, Kouba J, Hutchison D. Analysis Methodology and Recent Results of the IGS Network Combination[J]. Earth Planets Space, 2002, 1(52):953-957
- [8] Springer T A, Beutler G. Towards an Official IGS Orbit by Combining the Results of all IGS Processing Centers[R]. IGS Annual Report, Ottawa, Canada, 1993
- [9] Beutler G, Brockmann E, Hugentobler U, et al. Combining Consecutive Short Arcs into Long Arcs for Precise and Efficient GPS Orbit Determination [J]. Journal of Geodesy, 1996, 70:287-299
- [10] Kouba J, Springer T. New IGS Station and Satellite Clock Combination[J]. GPS Solution, 2001, 4(4): 31-36

第一作者简介:魏娜,博士生,研究方向为大地测量参考框架。
E-mail:wanna@sina.com

Analysis and Assessments of IGS Products Consistencies

WEI Na^{1,2} SHI Chuang² LI Min^{1,2} ZOU Rong^{1,2}

(1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

(2 Research Center of GNSS, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

Abstract: The evolution and state-of-the-art of IGS reference frame is reviewed, and the consistency of IGS reference frame and ITRF is analyzed. It also generally introduces IGS data processing strategy and its related effects on the consistency of IGS final products. Two experiments were designed to investigate the consistency of IGS final orbit and IGS05, and that of IGS final orbit, final clock and weekly SINEX.

Key words: IGS reference frame; consistency; final orbit and clock; weekly SINEX

About the first author: WEI Na, Ph.D candidate, majors in terrestrial reference frame.

E-mail: wanna@sina.com