

IAU2000 决议对卫星轨道的影响

陈俊平^{1,2} 王解先^{1,3} 曹月玲¹

(1 同济大学测量与国土信息工程系, 上海市四平路 1239 号 200092)

(2 GeoForschungsZentrum Potsdam, 14473, Potsdam, Germany)

(3 现代工程测量国家测绘局重点实验室, 上海市四平路 1239 号, 200092)

摘要:研究了 IAU2000 对 GPS 卫星轨道确定的影响。以 2006 年 DOY186 的 GPS 数据为例, 分析了 GPS 卫星在 IAU2000 决议模型以及原有模型下, 惯性参考系统以及地固坐标系中轨道的差别。结果显示, 采用不同模型, 卫星轨道在惯性参考系中的差值存在周期性, 其中 X、Z 方向的幅度达到了 2.5 m, Y 方向的幅度约为 1 m; 在地固系中, 轨道差别也存在周期, 幅度约为 4 mm。并对卫星轨道的差值进行了统计, 得出了在惯性系下, 不同模型引起轨道差值的 3D RMS 为 m 级。

关键词:ICRS; FK5; IAU2000; 轨道

中图法分类号:P228.41; P228.1

第 24 届 IAU 大会的 IAU2000 决议, 拓展了 IAU' 1991 关于参考系统以及时间系统的定义。自从 2003 年 1 月 1 日, 新的参考系 ICRS (international celestial reference system) 正式启用, 取代了 FK5 系统。ICRS 包括基于地球质心的 GCRS (geocentric celestial reference system) 以及基于太阳系质心的 BCRS (barycentric celestial reference system)。新的参考系统在时间系统、坐标轴指向、极轴的定义以及与地固系转换的模型等与原有参考系统存在差别。与此同时, IAU2000 决议重新定义了惯性以及地固参考系统之间的转换关系, 定义了新的岁差-章动、自转、极移模型。对于基于地面观测进行轨道确定的人造卫星来讲, 这些模型的改变必然会影响轨道的确定。

1 坐标系的转换

IAU2000 决议不仅重新定义了惯性系天球极、参考点, 在与地固系 ITRS (international terrestrial reference system) 的转换关系上也进行了改变。坐标系的转换如下^[1]:

$$[CRS] = Q(t)R(t)W(t)[TRS] \quad (1)$$

式中, $Q(t)$ 为岁差-章动矩阵, 表示天球极在天球系统里的运动; $R(t)$ 为地球自转矩阵, 表示地球绕地球极自转; $W(t)$ 为极移矩阵, t 的定义为:

$$t = (TT - 2000 \text{ January } 1.5) \text{ in days} / 36\,525 \quad (2)$$

式中, TT 为地球时, 由于其与地球动力学的 TDT 差别可以忽略, 一般用 TDT 代替。

经典的转换模型存在一些不足, 例如岁差和章动很难区分, 它们属于不同的物理定义, 岁差章动的计算需要参考给定时刻的黄道面, 地球自转角度相对于给定时刻春分点等。IAU2000 决议建议的旋转矩阵定义如下:

$$W(t) = R_3(-s')R_s(x_p)R_1(y_p) \quad (3)$$

式中, x_p 、 y_p 为协议天球极 CIP 在地固坐标系 TRS 中的坐标; s' 表示地球历书原点 TEO (terrestrial ephemeris origin) 在地球实际赤道因极移而累积的移动, 这一项在原来的模型中没有考虑。目前 IERS 建议采用 IAU2000 章动模型代替原来的 IAU76 岁差、IAU80 章动模型:

$$R(t) = R_3(-\theta) \quad (4)$$

式中, θ 为地球自转角 ERA (earth rotation angle)。 θ 的定义与原来的格林尼治恒星时不一样, 其定义为 t 时刻, CEO 和 TEO 在协议天球极 CIP

所对应的协议赤道上的夹角:

$$Q(t) = R_3(-E) \circ R_2(-d) \circ R_3(E) \circ R_3(s) \tag{5}$$

式中, E 和 d 分别为 CIP 在 CRS 中的球面坐标。CIP 的三维坐标可以表示为:

$$X = \sin d \cos E, Y = \sin d \sin E, Z = \cos d \tag{6}$$

式中, s 是为参考历元和指定 t 时刻之间 CEO 的累积位移。

2 数据处理

参考系统以及坐标系统转换模型的区别, 必然会对卫星的轨道确定产生影响。由于 IERS 目前同时公布新老两种模型的参数, 因而, 可以定量考察不同模型下卫星轨道的差别。数据处理过程中采用了约化动力学精密定轨^[12]。

本文采用 2006 年年积日 (DOY)186 的 GPS 精密星历对卫星轨道进行分析。首先, 利用参考系统转换模型, 将地固系下的精密星历转换到相应的惯性参考系统; 然后, 将精密星历当成虚拟的观测值对动力学积分轨道进行平滑, 得到积分时刻的约化动力学轨道, 从而得到在惯性系下基于不同转换模型的卫星轨道。

将惯性参考系中的两种约化动力学轨道进行对比, 图 1 表示了 GPS 卫星 PRN01 约化动力学轨道之间的差值。

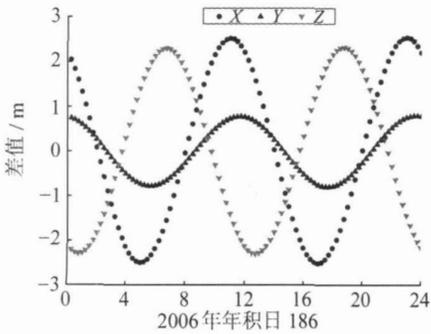


图 1 PRN01 卫星在新旧模型下惯性系统中轨道的差值

Fig. 1 Orbits Difference in Inertial Frame of PRN01

从图 1 中可以看出, 不同模型下, GPS 卫星的约化动力学轨道之间存在较大差值, 并且该差值在 X 、 Y 、 Z 3 个方向上都存在与 GPS 运动一致的周期性, 其中 Y 分量上振幅为 1 m 左右, X 、 Z 分量上振幅达到了 2.5 m。

GPS 精密星历一般表示在地固系中, 将以上约化动力学轨道重新转换到地固系中, 来进一步考察参考系统转换模型的精度。图 2 表示了在地固系中两种轨道之间的差值。地固系中轨道的差值也表现出一定的周期性, 振幅约为 4 mm, 远小于目前 GPS 轨道的误差 (5 cm)。这表明新旧模型在地固系中, 卫星轨道存在很好的一致性。

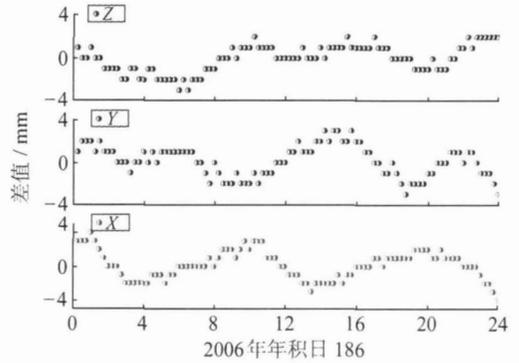


图 2 PRN01 卫星在新旧模型下地固系中轨道的差值

Fig. 2 Orbits Difference in Earth-fixed Frame of PRN01

3 分析与结论

对所有的 GPS 卫星不同轨道之间的差值进行统计。图 3、图 4 为惯性系下的结果, 图 5、图 6 为地固系下的结果。图 3、图 5 给出了不同模型下, 每颗卫星轨道差值在 X 、 Y 、 Z 3 个分量上的平均值 (图中表示的是平均值的绝对值); 图 4、图 6 给出了每颗卫星轨道差值在 X 、 Y 、 Z 3 个分量上的 RMS 以及 3DRMS。

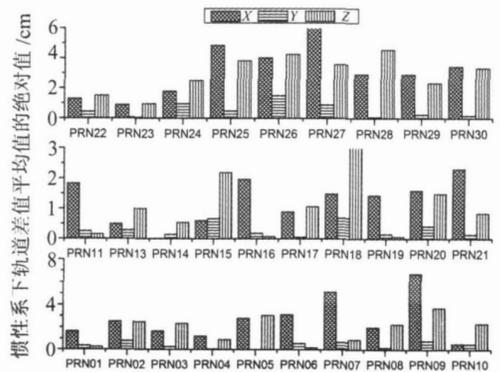


图 3 惯性系下轨道差值平均值的绝对值

Fig. 3 Average Difference Between Orbits of Each Satellite, Inertial Frame

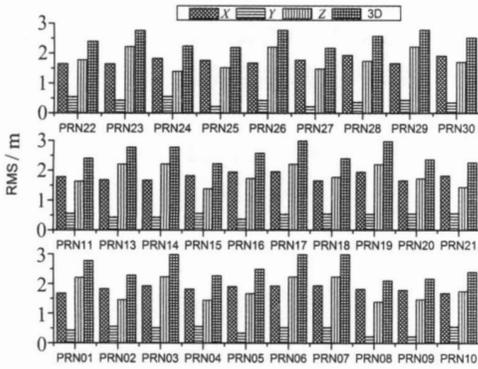


图 4 惯性系下轨道差值的 RMS

Fig. 4 RMS of Orbits Difference, Inertial Frame

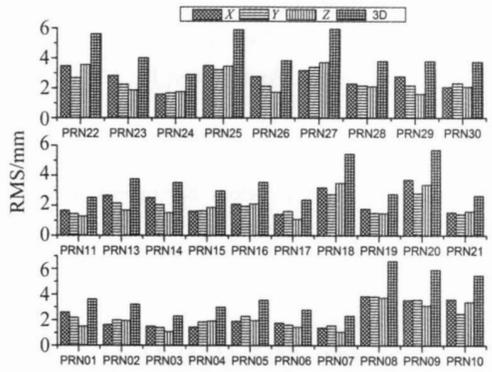


图 6 地固系下轨道差值的 RMS

Fig. 6 RMS of the Orbits Difference, Earth-fixed Frame

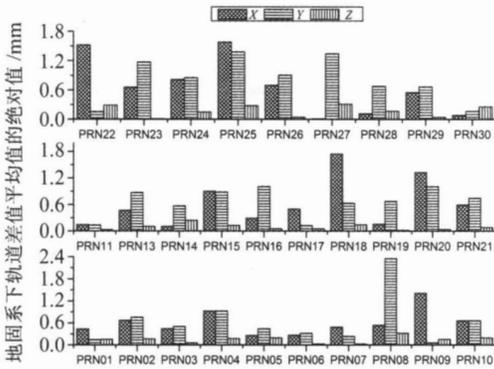


图 5 地固系下轨道差值平均值的绝对值

Fig. 5 Average Difference Between Orbits of Each Satellite, Earth-fixed Frame

从上面的结果可以看出, 所有卫星的结果与 PRN01 卫星一致。在惯性系中, 不同模型下轨道之间差值较大, 但差值反映在地固系中很小。将该天所有卫星轨道差值如表 1 所示。

表 1 中, X 、 Y 、 Z 表示在该轴上所有卫星轨道差值的平均值; 3D-Diff 表示轨道 3 维位置差值的平均值; X_{RMS} 、 Y_{RMS} 、 Z_{RMS} 表示不同坐标轴上轨道差值 RMS 的平均值; 3DRMS 表示轨道差值 3D RMS 的平均值。从表 1 可以看出, 惯性系以及地固系中, 3 个坐标轴上轨道差值的平均值都非常小。由于 GPS 卫星在惯性系呈周期运动, 这表明新老模型参考系所定义的坐标原点具有

表 1 轨道差值的统计/mm

Tab. 1 Statistics of Orbits Difference

	X	Y	Z	3D-Diff	X_{RMS}	Y_{RMS}	Z_{RMS}	3DRMS
惯性系	-2.30	-0.06	-2.17	2.354	1.800	453	1.826	2.541
地固系	0.04	-0.06	0.01	3.77	2.42	2.22	2.16	3.92

很好的一致性; 不同地固系中轨道的差值远小于 IGS 官方轨道的精度, 从而在地固系中可以忽略参考系统的区别。但是在不同惯性系中, 轨道的差别达到了 m 级, 这在基于惯性系的研究领域必须加以考虑。

参 考 文 献

[1] Guinot B. Comparison of “OLD” and “NEW” Concepts; Celestial Ephemeris Origin(CEO), Terrestrial Ephemeris Origin(TEO), Earth Rotation Angle(ERA)[J]. IERS Technical Note, 2002, 29: 45-50

[2] McCarthy D D, Gérard Petit. IERS Conventions (2003)[R]. IERS Technical Note No. 32 Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamtsfr Kartographie Und Geod Sie, 2004

[3] Beutler G. Methods of Celestial Mechanics Volume

II: Application to Planetary System, Geodynamics and Satellite Geodesy[M]. Berlin: Springer-Verlag, 2004

[4] Petit G. Comparison of “Old” and “New” Concepts; Coordinate Times and Time Transformations [J]. IERS Technical Note, 2002, 29: 19-29

[5] Souchay J, Martine F V. The International Celestial Reference System and Frame - ICRS Center Report for 2001-2004[R]. IERS Technical Note No. 34 Frankfurt am Main; Verlag des Bundesamts Kartographie und Geod sie, 2006

[6] 罗佳, 宁津生, 施闯, 等. 卫星跟踪卫星重力观测方程的建立[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2008, 33(6): 619-622

[7] Capitaine N. Comparison of “OLD” and “NEW” Concepts; The Celestial Intermediate Pole and Earth Orientation Parameters[J]. IERS Technical

- Note, 2002, 29: 35-44
- [8] Seidelmann P K. Comparison of “ OLD” and “ NEW” Concepts; Astrometry[J]. IERS Technical Note, 2002, 29: 51-52
- [9] Teunissen P J G, Kleusberg A. GPS for Geodesy (2nd edition) [M]. Telos: Springer-Verlag, 1998
- [10] 陈俊平, 王解先. GPS 定轨中的太阳辐射压模型 [J]. 天文学报, 2006, 47(3): 310-319
- [11] 陈俊平. 低轨卫星精密定轨研究[D]. 上海: 同济大学, 2007
-
- 第一作者简介: 陈俊平, 博士. 主要从事大地测量理论与应用研究
E-mail: junping.chen@gfz-potsdam.de

A Study of Satellite Orbit Differences under IAU2000 Resolution

CHEN Junping^{1,2} WANG Jiexian^{1,3} CAO Yueling^{1,3}

(1 Department of Surveying and Geo-informatics Engineering, Tongji University, 1239 Siping Road, Shanghai 200092, China)

(2 GeoForschungsZentrum Potsdam, 14473, Potsdam, Germany)

(3 Key Laboratory of Modern Engineering Surveying of SBSM, 1239 Siping Road, Shanghai 20092, China)

Abstract: The IAU2000 resolution was adopted at the IAU 24th General Assembly in 2000. The new resolution has officially become effective since January 1, 2003. Compared with the old system (FK5), which was essentially derived from Newtonian Mechanics; the new system is kinematically defined by the position of the extragalactic radiosources. The two systems are mainly differenced in the definition of the pole, orientation and the models of transformation between celestial frame and terrestrial frame. As a matter of fact, implementing of the new resolution will affect the orbits of artificial satellites, whose trajectories are determined according to the ground observations. The paper describes in detail the impact on GPS orbits due to the introduction of the new models in IAU2000 resolution. GPS data on DOY 186 2005 are analyzed to find out the orbit difference between old and new models. Results show that orbits difference of GPS exhibit a periodical signal in either inertial systems or terrestrial frame, with an amplitude about 2.5 m at X , Z axis and 1 m at Y axis in inertial systems, while that is about 4mm in each axis in terrestrial system. Statistics of orbits difference show that the 3D RMS of orbits difference in inertial systems is around 3m, and the orbits difference is neglectable in terrestrial system.

Key words: ICRS; FK5; IAU2000; orbit

About the first author: CHEN Junping, doctor. Main research focuses on the theory and application of satellite geodesy.

E-mail: junping.chen@gfz-potsdam.de