

椭球参数对北斗与 GPS 广播星历 计算互操作性的影响

秦显平^{1,2} 杨元喜^{1,2} 崔先强³

1 地理信息工程国家重点实验室,陕西 西安,710054

2 西安测绘研究所,陕西 西安,710054

3 中南大学地球科学与信息物理学院,湖南 长沙,410083

摘 要:多卫星系统之间的兼容与互操作能够减轻用户计算的负担,降低接收机生产厂商的成本,而目前的四大卫星导航系统(GPS、GLONASS、Galileo 和北斗)在系统互操作方面仍然存在一些问题。本文分析了北斗与 GPS 椭球参数不同对广播星历计算互操作的影响,列出了北斗与 GPS 在广播星历计算时采用的地心引力常数和地球自转角速度;对于采用广播星历计算导航卫星位置,分别从理论和实际数据两方面计算分析了地心引力常数及地球自转角速度微小差异对北斗和 GPS 的影响。理论和计算表明,北斗与 GPS 间的地心引力常数差异可以造成卫星位置几米误差,而两者的地球自转角速度差异可以造成卫星位置十几米甚至是几十米的误差。

关键词:全球卫星导航系统;椭球参数;互操作性;北斗;GPS

中图法分类号:P228.41

文献标志码:A

兼容与互操作是多导航卫星系统资源利用与共享的重要内容^[1]。然而由于各导航卫星系统由不同国家和地区主导,建设之初对系统兼容与互操作重视不够,加之导航卫星系统庞大、复杂,其时间系统和坐标系统定义各不相同,各系统间的差异给融合应用带来了一些困难。

美国全球定位系统(global positioning system, GPS)采用 WGS84 坐标系^[2-3],中国北斗导航卫星系统(简称为 BeiDou)采用 CGCS2000 坐标系^[4-6]。多名学者对我国的坐标系统进行了深入探讨^[3-14],比较分析了不同坐标系的定义及影响^[12-13],并对时空统一下的北斗与 GPS 融合定位^[15]进行了研究。

北斗卫星星座包括地球静止轨道(GEO)卫星、倾斜地球同步轨道(IGSO)卫星及中等高度地球轨道(MEO)卫星^[5]。采用广播星历计算卫星位置时,北斗和 GPS 的广播星历计算都需要用到地心引力常数和地球自转角速度,其中 IGSO 和 MEO 卫星与 GPS 算法相同,GEO 卫星与 GPS 算法仅在轨道倾角旋转方面不同^[15-17]。

文献^[12-13]中,WGS84 的地球引力常数和

自转角速度与 CGCS2000 是一致的,广播星历计算时,WGS84 与 CGCS2000 的椭球参数存在微小差异。一方面,这些文献都称为 WGS84,容易引起混淆;另一方面,在北斗与 GPS 的广播星历计算互操作中,对于是否可以忽略这种微小差异,如果不能,这种差异造成的影响有多大的问题,本文从理论和实际数据两方面对这种微小差异的影响进行了比较分析。

1 不同地心引力常数和地球自转角速度常数的比较

表 1 给出了 GPS 及北斗广播星历计算时所采用的地心引力常数和地球自转角速度常数^[1-6]。导航卫星所播发的广播星历通常都是由地面控制系统提供的,地面控制系统首先通过卫星定轨得到卫星轨道及预报轨道,然后通过对预报轨道进行参数拟合得到广播星历参数。因此,接收机在利用广播星历进行导航定位时,需要采用与广播星历参数拟合时相同的地心引力常数和地球自转角速度,否则就可能造成错误。

收稿日期:2013-09-07

项目来源:国家自然科学基金资助项目(41274040,41374019,41020144004)。

第一作者:秦显平,副研究员,主要从事卫星定轨及应用研究。E-mail: qxianping92@163.com

北斗地面控制系统在广播星历参数拟合时,采用 CGCS2000 的地心引力常数和地球自转角速度。GPS 早期的地心引力常数取值为 $3.986\ 005 \times 10^{-14}$, 1994 年, GPS 地面控制系统采用 $3.986\ 004\ 418 \times 10^{-14}$ 计算卫星轨道, 地心引力常数的这一改变消除了地面控制系统轨道 1.2 m 的径向偏差。但是, 为了避免 GPS 接收机软件更新, 同时又为了提高 GPS 定轨精度, GPS 地面控制系统在定轨时采用 $3.986\ 004\ 418 \times 10^{-14}$, 而在广播星历参数拟合时仍采用原值 $3.986\ 005 \times 10^{-14}$ 。

WGS84 定义的地球自转角速度与 IERS 推荐值相同, 为 $7.292\ 115\ 0 \times 10^{-5}$ rad/s。该值采用一个常数表示地球自转角速度, 事实上地球自转角速度是随时间变化的, 考虑到岁差的影响, 国际天文学联合会新的世界时定义中采用 $7.292\ 115\ 146\ 7 \times 10^{-5}$ 作为地球自转角速度常值。为了与卫星应用保持一致性, GPS 地面控制系统采用 $7.292\ 115\ 146\ 7 \times 10^{-5}$ 进行广播星历参数拟合。

表 1 GPS 及北斗广播星历计算采用的地心引力常数和地球自转角速度

Tab. 1 Value of the Earth's Gravitational Constant and the Earth's Rotation Rate Constant Adopted by the BeiDou and GPS with Broadcast Ephemeris

Computation		
	地心引力常数 GM /($m^3 \cdot s^{-2}$)	地球自转角速度 ω_{\oplus} /($rad \cdot s^{-1}$)
GPS	$3.986\ 005 \times 10^{14}$	$7.292\ 115\ 146\ 7 \times 10^{-5}$
北斗	$3.986\ 004\ 418 \times 10^{14}$	$7.292\ 115\ 0 \times 10^{-5}$

2 地心引力常数对广播星历计算的影响

利用 GPS 广播星历计算卫星位置时, 地心引力常数对卫星位置的影响可以采用位置矢量对地心引力常数的微分公式估计, 略去繁杂推导, 直接给出微分公式为:

$$d\mathbf{r} = \frac{1}{2GM} \cdot t_k \cdot \left(\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} + \omega_{\oplus} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ 0 \end{bmatrix} \right) \cdot dGM \quad (1)$$

其中, ω_{\oplus} 为地球自转角速度; $\mathbf{r} = [x \ y \ z]^T$ 为导航卫星位置矢量; t 为观测时刻; $\dot{\mathbf{r}} = [\dot{x} \ \dot{y} \ \dot{z}]^T$ 为导航卫星速度矢量; GM 为地球引力常数; t_{oe} 为广播星历参考历元时刻; t_k 为从参考

历元开始计算的观测时间, $t_k = t - t_{oe}$ 。在本文的计算中, 地心引力常数差值取为:

$$dGM = 3.986\ 005 \times 10^{14} - 3.986\ 004\ 418 \times 10^{14} = 5.82 \times 10^6$$

由式(1)可知, 不同地心引力常数 GM 对 GPS 卫星位置影响不仅与卫星的位置和速度相关, 还与地球自转角速度和观测时间 t_k 相关。为了验证上述影响公式的正确性, 本文首先采用 2005-12-10 GPS 广播星历计算了不同 GM 值的位置差(计算位置差), 然后采用式(1)计算了不同 GM 值的位置差(理论位置差), 并对两种位置差进行了比较。图 1 给出了计算位置差与理论位置差之差, 其横轴为卫星号, 纵轴为计算位置差与理论位置差之差。从图 1 可以看出, 采用式(1)计算的位置差与实际数据计算的位置差之差仅在 10^{-5} m 量级, 表明由式(1)表示的地心引力常数误差影响函数正确合理。

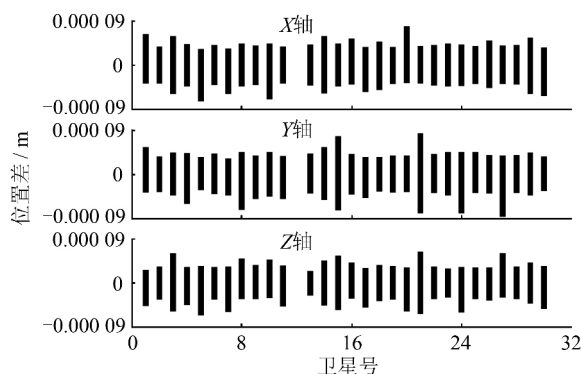


图 1 不同地心引力常数的计算位置差与理论位置差之差

Fig. 1 Comparison of Position Change Between Computation and Theory on Account of the Difference of the Earth's Gravitational Constant

图 2 给出了 2005 年 12 月 4 日到 10 日 (GPS1352 周 0~604 800 s) GPS03 星计算的卫星位置差, 其横轴为时间, 单位为 GPS 周秒, 纵轴为表 1 中两种不同 GM 值计算的卫星位置差。图 3 给出了所有 GPS 卫星计算的位置差, 其横轴为卫星号, 纵轴为不同 GM 值计算的卫星位置差。从图 2、3 可以看出, 不同地心引力常数对广播星历计算 GPS 卫星位置可以引起最大 2 m 的误差。

3 地球自转角速度对广播星历计算的影响

利用 GPS 广播星历计算卫星位置时, 地心引力常数对卫星位置的影响可以采用位置矢量对地

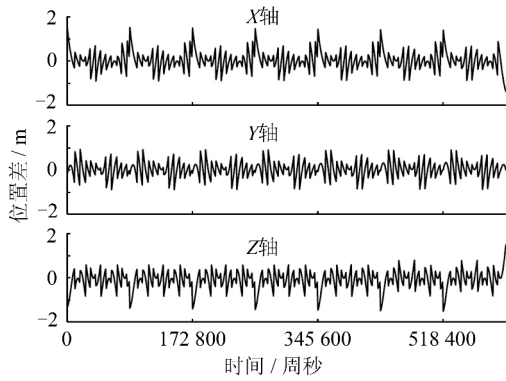


图 2 不同地心引力常数计算的 GPS03 星位置差
Fig. 2 Difference of Position of GPS03 Satellite
Computing by the Difference of the Earth's
Gravitational Constant

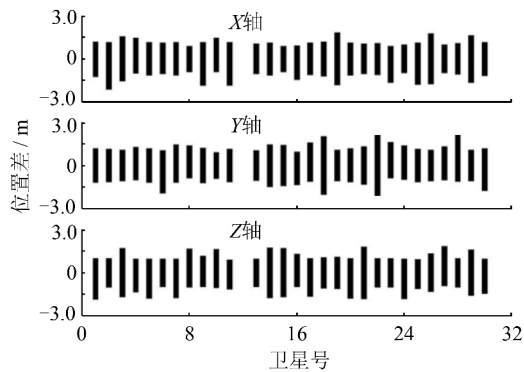


图 3 不同地心引力常数计算的 GPS 卫星位置差
Fig. 3 Difference of Position of all GPS Satellites
Computing by the Difference of the Earth's
Gravitational Constant

心引力常数的微分公式估计,略去繁杂推导,直接给出微分公式为:

$$d\mathbf{r} = \begin{bmatrix} y \\ -x \\ 0 \end{bmatrix} \cdot t \cdot d\omega_{\oplus} \quad (2)$$

式中各参数定义同式(1)。在本文的计算中,地球自转角速度差值取为:

$$d\omega_{\oplus} = 7.292\,115\,146\,7 \times 10^{-5} - 7.292\,115 \times 10^{-5} \\ = 1.467 \times 10^{-12}$$

由式(2)可知:(1)不同地球自转角速度仅对 GPS 卫星在 X 轴及 Y 轴有影响,这种影响不仅与卫星的位置相关,还与观测时间 t 相关;(2)GPS 广播星历是以周秒计时的,这就意味着,在相同条件下,地球自转角速度对每周最后一天的影响最大。同样,为了验证影响式(2)的正确性,本文采用 2005 年 12 月 10 日 GPS 广播星历计算了不同地球自转角速度的位置差(计算位置差),然后采

用式(2)计算了不同地球自转角速度的位置差(理论位置差),并对两种位置差进行了比较。图 4 给出了计算位置差与理论位置差之差,其横轴为卫星号,纵轴为计算位置差与理论位置差之差。从图 1 可以看出,采用式(2)计算的位置差与实际数据计算的位置差之差仅在 10^{-6} m 到 10^{-5} m 量级,表明由式(2)表示的地球自转角速度影响函数正确。

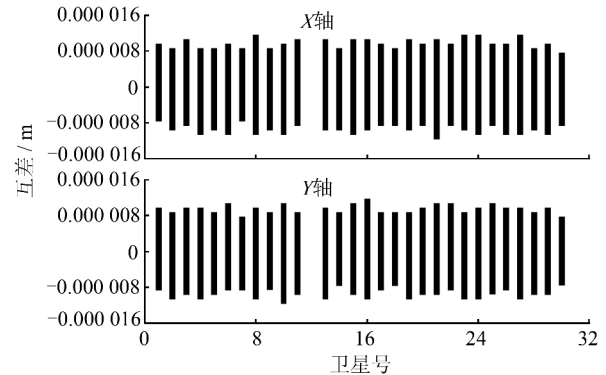


图 4 不同地球自转角速度的计算位置差与理论位置差之差

Fig. 4 Comparison of Position Change Between
Computation and Theory on Account of the Difference
of the Earth's Rotation Rate Constant

图 5 给出了 2005 年 12 月 4 日到 10 日(GPS1352 周 0 到 604 800 s)GPS03 星计算的位置差,其横轴为时间,单位为 GPS 周秒,纵轴为表 1 中两种不同地球自转角速度计算的卫星位置差;图 6 给出了所有 GPS 卫星计算的位置差,其横轴为卫星号,纵轴为不同地球自转角速度计算的卫星位置差。由图 5、图 6 可以看出,不同地球自转角速度对广播星历计算 GPS 卫星位置可以引起数十米的误差。

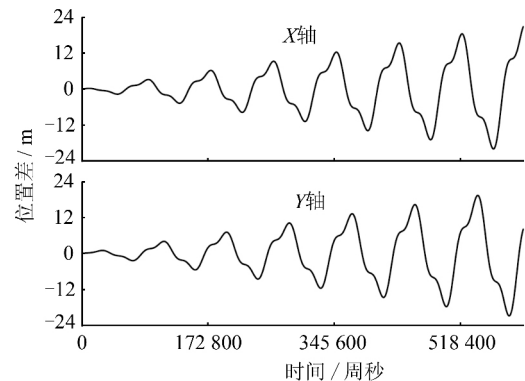


图 5 不同地球自转角速度计算的 GPS03 星位置差
Fig. 5 Difference of Position of GPS03 Satellites
Computing by the Difference of the Earth's
Rotation Rate Constant

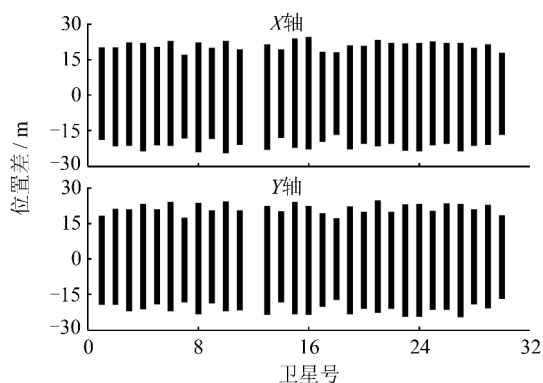


图6 不同地球自转角速度计算的 GPS 卫星位置差

Fig. 6 Difference of Position of all GPS Satellites
Computing by the Difference of the Earth's
Rotation Rate Constant

4 结 语

在广播星历计算中,北斗与 GPS 系统间的地心引力常数差异可以造成卫星位置几米误差,而两者的地球自转角速度差异可以造成十几米甚至几十米的位置误差。因此,在北斗与 GPS 的广播星历计算互操作中,必须考虑两者之间的地心引力常数和地球自转角速度差异。

参 考 文 献

- [1] Yang Yuanxi. Progress, Contribution and Challenges of Compass/BeiDou Satellite Navigation System [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2010, 39(1):1-6(杨元喜. 北斗卫星导航系统的进展、贡献与挑战[J]. 测绘学报, 2010, 39(1):1-6)
- [2] Xu Qifeng. Space Geodesy: Satellite Navigation and Precise Positioning[M]. Beijing: PLA Publications Inc, 2001(许其凤. 空间大地测量学: 卫星导航与精密定位[M]. 北京: 解放军出版社, 2001)
- [3] Zhou Zhongmo, Yi Jiejun, Zhou Qi. The Theory and Application of GPS Satellite Measurement[M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2002(周忠谟, 易杰军, 周琪. GPS 卫星测量原理与应用[M]. 北京: 测绘出版社, 2002)
- [4] Tan Shusen. Satellite Navigation and Positioning Project[M]. Beijing: National Defence Industry Publications Inc, 2007(谭述森. 卫星导航定位工程[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007)
- [5] China Satellite Navigation Office. Interface Control Document Concerning BeiDou System Signal-in-Space of (Test Version) [EB/OL]. <http://www.beidou.gov.cn/attach/2011/12/27/20111227ace155f4e69a4666b45235e129463872.pdf>2011(中国卫星导航系统管理办公室. 北斗卫星导航系统空间信号接口控制文件(测试版)[EB/OL]. <http://www.beidou.gov.cn/attach/2011/12/27/20111227ace155f4e69a4666b45235e129463872.pdf>2011)
- [6] Yang Y. Chinese Geodetic Coordinate System 2000 [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54: 2 714-2 721
- [7] Chen Junyong. On the Establishment of Chinese Modern Geodetic Coordinate System[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2002, 27(5):441-444(陈俊勇. 我国建立现代大地基准的思考[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2002, 27(5):441-444)
- [8] Chen Junyong. Chinese Modern Geodetic Datum; Chinese Geodetic Coordinate System 2000 (CGCS 2000) and its Frame[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2008, 37(3): 269-271(陈俊勇. 中国现代大地基准: 中国大地坐标系统 2000 (CGCS2000)及其框架[J]. 测绘学报, 2008, 37(3): 269-271)
- [9] Wei Ziqing. National Geodetic Coordinate System to Next Generation[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2003, 28(2): 138-143(魏子卿. 我国大地坐标系的换代问题[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2003, 28(2): 138-143)
- [10] Wei Ziqing. Re-approaching the Geodetic Coordinate System[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(8): 883-886(魏子卿. 大地坐标系新探[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2011, 36(8): 883-886)
- [11] Wei Ziqing. Proposal Concerning China Geodetic Coordinate System 2000 [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2006, 26(2): 1-4(魏子卿. 关于 2000 中国大地坐标系的建议[J]. 大地测量与地球动力学, 2006, 26(2):1-4)
- [12] Wei Ziqing. China Geodetic Coordinate System 2000 and its Comparison with WGS84 [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2008, 28(5): 1-5(魏子卿. 2000 中国大地坐标系及其与 WGS84 的比较[J]. 大地测量与地球动力学, 2008, 28(5):1-5)
- [13] Cheng Pengfei, Wen Hanjiang, Cheng Yingyan, et al. Parameters of the CGCS2000 Ellipsoid and Comparisons with GRS80 and WGS84 [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2009, 38(3): 189-194(程鹏飞, 文汉江, 成英燕, 等. 2000 国家大地坐标系椭球参数与 GRS80 和 WGS84 的比较[J]. 测绘学报, 2009, 38(3):189-194)
- [14] Ning Jinsheng. Modern Geodetic Reference System [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2002, 31(S): 7-11(宁津生. 现代大地测量参考系统[J]. 测绘学报, 2002, 31(增刊):7-11)

- [15] Gao Xingwei, Guo Jingjun, Cheng Pengfei, et al. Fusion Positioning of Compass/GPS Based on Spatio Temporal System Unification[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2012, 41(5):743-758 (高星伟, 过静珺, 陈鹏飞, 等. 基于时空系统统一的北斗与 GPS 融合定位[J]. 测绘学报, 2012, 41(5):743-758)
- [16] Cui Xianqiang, Jiao Wenhai, Qin Xianping. The Discussion of Fitting Algorithm of GPS Ephemeris Parameters[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2006, 31(1): 25-26 (崔先强, 焦文海, 秦显平. GPS 广播星历参数拟合算法的探讨[J]. 测绘科学, 2006, 31(1): 25-26)
- [17] Cui Xianqiang, Jiao Wenhai, Qin Xianping. Ephemeris Parameters of Navigation Satellite and Their Fitting Arithmetic[J]. *Journal of Zhengzhou Institute of Surveying and Mapping*, 2006, 23(1): 23-25 (崔先强, 焦文海, 秦显平. 导航卫星的历书参数及其拟合算法[J]. 测绘科学技术学报, 2006, 23(1): 23-25)

Influence of Ellipsoid Constants on Interoperability of Broadcast Ephemeris Computation Between BeiDou and GPS

QIN Xianping^{1,2} YANG Yuanxi^{1,2} CUI Xianqiang³

1 State Key Laboratory of Geo-information Engineering, Xi'an 710054, China

2 Xi'an Research Institute of Surveying and Mapping, Xi'an 710054, China

3 School of Geoscience and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China

Abstract: The compatibility and interoperability of GNSS (global navigation satellite system) multi-constellation can reduce the burden of computation on users and reduce the production costs of GNSS receivers for manufacturers. There are some problems in the interoperability of GPS, GLONASS, Galileo and BeiDou navigation satellite systems. The paper focuses on analysing the interoperability of broadcast ephemeris computation between BeiDou and GPS in particular, on account of the difference of the ellipsoid constants. Firstly, the difference of the earth's gravitational constant and the earth's rotation rate constant adopted by the BeiDou and GPS are listed. Then, the influence of the small difference of the earth's gravitational constant and the earth's rotation rate value were analyzed theoretically and in data computation practice when using broadcast ephemeris to compute the coordinates of navigation satellites. Both theory and computations indicate that the small difference value of the earth's gravitational constant between BeiDou and GPS can create several meter error in satellite coordinates. The small difference values in the earth's rotation rate constant between BeiDou and GPS can create more than ten meters of error and even several tens of meters of error.

Key words: global navigation satellite system; ellipsoid constants; interoperability; BeiDou; GPS

First author: QIN Xianping, PhD, associate professor, specializes in satellite orbit determination. E-mail: qxianping92@163.com

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41274040, 41374019, 41020144004.