

BDS 监测站坐标维持的探讨

曹解放¹, 毕再宽², 董海静¹, 聂国兴¹, 韩雪峰¹

(1. 61365 部队, 天津 300403; 2. 61206 部队, 北京 100094)

摘 要: 北斗二代卫星导航系统(BDS)监测站建设是在北斗一代的基础上进行的, 为方便管理, 监测天线安装在各监测站楼顶上, 稳定性不够, 同时北斗二代卫星导航系统目前采用的 2000 中国大地坐标系, 归算误差较大。本文针对这些问题, 分析了北斗卫星导航系统监测站由时变效应引起的位置变化量和地表沉降对监测站坐标维持的影响, 论述了目前时变效应处理方法存在的误差的量级, 讨论了美国 GPS 所使用的 WGS-84 坐标框架的维持与更新方法。最后, 结合北斗卫星导航系统监测站的建设现状, 从监测站的建设、数据处理等方面提出了建立测站坐标时间序列, 维持北斗卫星导航系统监测站坐标的可行性方法, 并提出了意见与建议。

关键词: 北斗卫星导航系统; 坐标维持; 时变效应; 地表沉降; 坐标时间序列

中图分类号: P228.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1008-9268(2017)01-0012-04

0 引 言

北斗卫星导航系统(BDS)是我国独立自主的区域/全球卫星导航系统, 它具有全天候、全天时、连续的三维定位、测速、短报文通信和授时能力。北斗卫星导航系统监测站坐标是提供精确卫星轨道产品的重要基础, 精确的轨道产品是支撑高性能导航系统的基础, 是高精度导航定位的必要条件。理论分析和实际经验都表明, 欲得到具有 cm 级的卫星轨道, 监测站的坐标必须具有 cm 级的精度^[1], 这就必须考虑时变效应对地面监测站坐标产生的影响。本文首先分析了时变效应对 BDS 监测站坐标精度的影响, 然后介绍了美国 GPS 使用的 WGS-84^[2]坐标框架的维持与更新, 接着从监测站的建设、数据处理等方面对监测站坐标维持方法进行了探讨。

1 影响 BDS 监测站坐标精度的主要因素

时变效应是大地测量达到一定精度时要顾及的一个参量, 其假定任何固定于地壳的测量标志都受岩石圈运动和潮汐等因素的影响, 地面点的位置

会随时间发生变化。时变效应主要有两个方面: 一是板块运动影响。在地心坐标系中, 由于地壳板块运动的影响, 会引起点位坐标的变化。在我国西部地区, 板块运动引起的测站坐标变化每年可达 4~5 cm^[3]; 二是潮汐效应^[4]。由于 BDS 监测站的站坐标在数据处理时, 已经采用相应潮汐模型, 归算至无潮汐系统, 因此本文不再详细讨论潮汐效应方面的内容。

还有一个要顾及的影响站坐标精度的因素是局部地表沉降, 这部分的影响在特殊地区最大年变化量可达 9 cm^[5], 所以监测站建在楼顶稳定性较差, 满足不了高精度应用的需要。目前, BDS 采用的 2000 中国大地坐标系(CGCS2000)坐标, 并没有归算到历元 2000.0, 这主要有两方面要考虑, 一是归算时间过长, 引起的归算误差过大; 二是没有精确的监测站坐标时间序列。

那么时变效应的影响究竟有多大呢? 根据 2000 中国大地测量系统(CGCS2000)^[4]的表述: 瞬时实际位置 $\bar{X}(t)$ 与规则化位置 $\bar{X}_R(t)$ 与用如下线性模型计算, 即

$$\bar{X}_R(t) = \bar{X}_0 + (t - t_0) \dot{\bar{X}}, \quad (1)$$

式中: $\bar{X}_0$ 为历元 $t_0=2000.0$ 时的站位置; $\dot{\bar{X}}$ 为历元 $t_0=2000.0$ 时的站速度。

时变效应由站速度体现,用站速度可以把一个站的坐标从一个历元归算至要求的历元。目前可用的历元归算方法有两种:板块运动模型和旋转矢量经验模型。

1.1 板块运动模型能达到的精度

板块运动对站位置的影响,一般情况下可以用 NNR-NUVEL1A 模型进行改正。按照 NNR-NUVEL1A 模型,

$$\begin{cases} v_x = (\Omega_y z - \Omega_z y) \times 10^{-6}, \\ v_y = (\Omega_z x - \Omega_x z) \times 10^{-6}, \\ v_z = (\Omega_x y - \Omega_y x) \times 10^{-6}, \end{cases} \quad (2)$$

式中: x, y, z 为站的地固直角坐标,单位:m; v_x, v_y, v_z 为站的地固速度,单位:m,速度单位为 m/s。

根据文献[4]计算出的站速度三个分量在我国境内,一般年变化量为 3 cm 左右,自 2007 年至今的 BDS 监测站坐标测量结果,归算至历元 2000.0,由于站速度的影响,坐标三分量的最大变化量可达 34 cm,国外站的速度影响除南美较小外,都与国内量级相当,以后还会随着时间的推延而增大。这样大的影响,在计算卫星轨道时是必须要考虑的。

利用 NNR-NUVEL1A 模型计算速度的误差,在一般地区约为每年 5 mm,青藏地区约为每年 10 mm。这样看来,即使监测站建在局部地壳运动稳定的基岩上,自 2007 年开始至今的测量结果,按 NNR-NUVEL1A 板块模型归算到历元 2000.0,最小也有 3.5 cm 的坐标误差,最大可达 11.0 cm。这样大的归算误差显然不能满足 BDS 地面站坐标误差的测量要求。

1.2 旋转矢量经验模型能达到的精度

另一个可以采用的精度较高的归算模型是旋转矢量经验模型。旋转矢量经验模型是基于待求点周围局部区域为一刚性块体的假设,利用包围待求点的局部区域的实测速度数据建立的地壳运动和地壳形变模型。用经验模型改正的具体方法是,首先利用位于块体内三个或三个以上已知点的水平速度,求定 $\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z$ 的最小二乘估值,然后用得到的估值按式(2)计算待求点的速度。

利用现有 927 个 GPS 点的速度数据,构建旋转矢量经验模型计算一点的速度,水平分量的误差平均为每年 2.2 mm;在实测数据较少的东北、东南和青藏地区或其他边疆地区,水平分量速度的误

差为每年 3.5 mm^[6]。

按照旋转矢量经验模型,目前测量的 BDS 监测站坐标结果归算到历元 2000.0 的坐标,变化量与采用 NNR-NUVEL1A 板块模型归算的坐标变化量相当,其误差最小有 2.2 cm 的水平误差,似乎勉强可以满足 BDS 的测量要求。但旋转矢量经验模型有两个问题不能忽略:一是旋转矢量经验模型数据是在假设垂直分量为零的情况下得出的,没有顾及垂直分量;二是构建模型的测站绝大多数是地壳运动监测网络的监测站,这样的点作为建立国家速度场的基准,满足一般测量要求还是适合的,但要作为 BDS 的基准并不合适。而且大多数站是定期观测,所得结果并不是很可靠。另外,这个模型只能适用于国内,国外的站我们还是无法解决。

1.3 局部地表沉降引起的站坐标变化

监测站多数建在普通建筑物顶部,抽取浅表地下水、季节、降水等因素都会引起监测站高程的变化,这个变化量用 NNR-NUVEL1A 板块模型和旋转矢量经验模型都是无法很好解决的,因为这两个模型都是基于地壳基岩层变化的,而低层楼房的基础大多建在十几至几十米的软土层。地表沉降的资料我们掌握得不多,根据公开的资料,北京、天津、江苏、山西、四川、哈尔滨、湖南、河北等不少地区地表存在程度不同的上升或下降,最大年沉降量可达 9 cm^[7]。如:自 1959 年到 2007 年为止,天津最大累计沉降量达 2.96 m,沉降面积达到 8000 km²^[8];1992—1999 年天津地区杨柳青附近的局部下降速率在每年—90 mm 以下^[7];2007 年 3 月至 2009 年 7 月期间,北京亦庄地区沉降量 113.55 mm,年下沉速率为每年 48.7 mm^[5]。以上数据都是全国有名的几个漏斗区的数据,并不具有普遍的代表性,但也提醒注意这方面的影响。

2 WGS-84 坐标系的维持与更新

WGS-84 的坐标系维持由一组全球分布的监测站坐标来实现的,监测站坐标用来计算 GPS 的精密星历。早期 GPS 监测站有美国地理空间情报局负责的位于澳大利亚、阿根廷、英国、巴林和厄瓜多尔的 5 个监测站和美国空军负责的位于美国科罗拉多、阿森群岛、多哥、夸贾林岛和夏威夷的 5 个监测站。这 10 个站的地心直角坐标最初是由这些站对子午仪卫星导航系统(TRANSIT)多普勒观测的数据处理后得到的。由于 TRANSIT 卫星星历采用的是 NSW92-2 参考系,为使新建的

WGS-84 与国际时间局 (BIH) 的 BTS84 一致, 对由多普勒观测数据计算的监测站坐标隐含的参考框架做了相应调整, 使得这一框架的原点和尺度与 BTS84 一致, 调整后的 10 个监测站坐标体现了 WGS-84 的最初实现, 并于 1987 年 1 月正式使用^[2]。

此后, 为了维持框架的精确性和稳定性, 分别于 1994 年 6 月、1997 年 1 月、2002 年 1 月和 2012 年 2 月 WGS-84 先后 4 次进行了更新, 即对 GPS 监测站的坐标进行了 4 次更新, 以使框架对准 ITRF。使用的基本方法是, 通过联合处理 GPS 监测站和国际 GNSS 服务组织 (IGS) 站的测量数据, 把 IGS 站的坐标约束到 ITRF 框架下, 同时利用板块运动模型监测站坐标归算到框架相应的历元, 获得监测站的地心坐标。WGS-84 的 4 次更新实现的坐标框架, 依次称为 WGS-84 (G730)、WGS-84 (G873)、WGS-84 (G1150)、WGS-84 (G1674)。目前, 使用的 WGS-84 (G1674) 监测站平差后的点位精度优于 ± 1 cm。

3 BDS 监测站坐标维持现状与方法探讨

WGS-84、ITRS、CGCS2000 都遵循《IERS convention》标准, 可以说他们的定义是一致的^[9]。文献[10]曾比较过 WGS-84 和 CGCS2000 的一致性, 认为 CGCS2000 和 WGS-84 (G1150) 在坐标系的实现精度范围内是一致的。因此, 可以参照 WGS-84 维持坐标系的方法来维持 BDS 的监测站坐标。

3.1 BDS 监测站的建设

我国北斗二代系统监测站建设是在北斗一代系统监测站的基础上进行的, 监测站的选择是根据北斗一代卫星定轨和电离层改正的需要进行的, 考虑方便使用和管理其监测天线安装在各监测站楼顶上, 未考虑当地的地质情况和大楼的沉降变化, 北斗二代组网卫星发射后, 其监测天线亦安装在楼顶, 监测站所在地位置地质是否稳定、楼房是否沉降, 会对定轨精度产生一定影响。因此, 在建设每个 BDS 监测站时, 要选在地质条件好的地区, 尽可能建在基岩上。同时, 要建立全球卫星导航系统 (GNSS) 连续运行观测站, 以便与国际国内的框架网进行联测, 以获得与其它框架的联系, 减少监测站境外分布不足的影响。同时, 这种方法不仅投入

较少, 而且可以无人值守、精度高, 还可以取得连续的站坐标时间序列, 顾及了局部地表沉降, 为向某一确定历元归算提供精确的手段。

3.2 BDS 监测站数据的处理

目前, BDS 监测站坐标观测都是独立观测, 监测站间没有同步观测, 这样监测站间的联系减少了。数据处理是将监测站观测数据与邻近陆态网络基准站的观测数据联合解算, 并没有与全球分布的 ITRF 站联合解算, 因陆态网络基准站坐标强制约束于 ITRF2000, 所以 BDS 框架对准的是 ITRF2000, 而不是 CGCS2000 的框架 ITRF1997, 二者不能简单用其坐标转换参数把地面监测站的 ITRF2000 框架下的坐标转换到 CGCS2000 框架^[9], 所以现行的北斗坐标系事实上也不是 CGCS2000。另外, 监测站只有坐标值, 没有速度值, 如归算到 CGCS2000 坐标对应的历元 2000.0, 因归算时间过长, 坐标误差较大。因此, 在数据处理时, 监测站数据要与 IGS 站的观测数据联合解算, 得到精确的测站坐标时间序列, 把 BDS 的监测站坐标精确化算到确定历元, 同时还顾及了局部地表沉降。同时, 建议尽快启动北斗卫星导航系统专用坐标系, 真正建立起面向全球、便于精化与更新的北斗卫星导航系统坐标系。

4 结束语

1) NNR-NUVEL1A 模型计算出的站速度三个分量在我国境内, 一般年变化量为 3 cm 左右, 自 2007 年至今的 BDS 监测站坐标测量结果, 归算至历元 2000.0, 由于站速度的影响, 坐标三分量的最大变化量可达 34 cm, 坐标误差最大可达 11.0 cm。这样大的归算误差不能满足 BDS 的测量要求。

2) 旋转矢量经验模型数据是在假设垂直分量为零的情况下得出的, 没有顾及垂直分量; 构建模型的测站绝大多数建在地壳运动活跃的断裂带上, 目的是监测局部地面水平运动, 不宜作为 BDS 的基准, 且该模型只适用于国内。

3) 上述两种方法都不能很好地解决局部地表沉降引起的误解差, 需要在监测站建设连续运行观测站, 解算监测站坐标时间序列。

4) 建设启用面向全球、便于精化与更新的北斗卫星导航系统专用坐标系, 使其与 CGCS2000 相分离。

参考文献

- [1] 魏子卿. 关于北斗卫星导航系统坐标系的研讨[J]. 测绘科学与工程, 2013, 33(2): 1-5.
- [2] National Imagery and Mapping Agency. Department of Defense World Geodetic System 1984: its definition and relationships with local geodetic system [EB/OL]. (2000-01-03) [2015-04-21]. <http://earth-info.nga.mil/GandG/publications/tr8350.2/wgs84fin.pdf>.
- [3] 吴显兵, 冯来平, 任红飞. 实测板块运动模型修正导航系统监测站坐标精度分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2011, 31(1): 83-86.
- [4] 中国人民解放军总装备部. 2000 中国大地测量系统: GJB 6304-2008[M]. 北京: 总装备部军标出版发行部, 2008: 13-15.
- [5] 陈阜超, 纪静, 塔拉, 等. 京津水准复测与垂直形变特征[J]. 华北地震科学, 2011, 29(2): 31-34.
- [6] 吴显兵, 冯来平, 任红飞. 实测板块运动模型修正导航系统监测站坐标精度分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2011, 31(1): 83-86.
- [7] 郭良迁, 薄万举, 陈宇坤, 等. 天津地区的垂直形变与构造活动研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2009, 29(5): 1-5.
- [8] 于强, 王威, 易长荣, 等. 天津市地面沉降及地下水位

监测自动化系统的设计与应用[J]. 地下水, 2007, 29(5): 101-104.

- [9] 曾安敏, 明锋, 景一帆. WGS84 坐标框架与我国 BDS 坐标框架的建设[J]. 导航定位学报, 2015, 3(3): 43-48+68.
- [10] 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.

作者简介

曹解放 (1976—), 男, 河南虞城人, 硕士, 高级工程师, 主要从事大地测量数据分析处理工作。

毕再宽 (1976—), 男, 长春吉林人, 硕士, 高级工程师, 主要从事地图制图与 GNSS 数据分析处理工作。

董海静 (1978—), 女, 天津宝坻人, 工程师, 主要从事大地测量数据分析处理工作。

聂国兴 (1967—), 男, 河南南阳人, 硕士, 工程师, 主要从事大地测量数据分析处理工作。

韩雪峰 (1985—), 男, 河北曲阳人, 硕士, 工程师, 主要从事 GNSS 野外数据采集和数据处理工作。

Discussion on the Coordinate Maintenance of BDS Monitoring Station

CAO Jiefang¹, BI Zaikuan², DONG Haijing¹, NIE Guoxing¹, HAN Xuefeng¹

(1. Troops 61365, Tianjin 300403; 2. Troops 61206, Beijing 100094)

Abstract: The monitoring stations of BeiDou 2nd generation navigation satellite system are built based on the 1st generation system, for the convenience of management, monitoring antennas are installed on the roof of the monitoring station. So their stability are not enough. At the same time, the coordinate system of BeiDou 2nd generation navigation satellite system is 2000 China Geodetic Coordinate System (CGCS2000) at present and the calculation error is out of range. According to these problems, the effect of time-varying and ground subsidence are analyzed in this paper, and the error order of magnitude processed by methods of time-varying effect is also pointed out at present. We discuss the initial implementation and refinement realizations of the World Geodetic System 1984 (WGS84) frame, which used as the terrestrial reference system for GPS. Finally, for the situation of BDS monitoring stations, we propose to set up coordinate time series through Global Navigation Satellite System (GNSS) continuous observation to maintenance the coordinate of monitoring station. Some suggestions are put forward for the monitoring station construction, data processing etc.

Keywords: BeiDou Navigation Satellite System; coordinate maintenance; time-varying effect; ground subsidence; coordinate time series