

基于基准站观测数据的 GPS 事后星历解算研究

杜伟吉*, 刘伟劲, 智超

(南京市测绘勘察研究院有限公司, 南京 210019)

摘要: 精准获取高精度的事后卫星轨道是我国发展北斗导航系统最重要的任务之一, 以3天为实验窗口, 介绍了GPS事后星历解算流程。基于不同区域范围、不同数量以及不同时间跨度的GPS基准站观测数据进行定轨, 使用GAMIT/GLOBK软件采用3天解的方法进行定轨计算, 并与IGS分析中心发布成果进行比对, 可知, 采用一定数量的全球均匀分布的基准站进行长时间的连续解算, 可以获取精度均在5-7cm之间比较稳定的定轨结果。通过对卫星定轨的理论和方法进一步深入学习研究, 更好发展我国的北斗卫星导航系统。

关键词: GNSS; 事后星历; 基准站; IGS

中图分类号: P237

文献标志码: A

文章编号: 1672-2736(2024)08-0056-8

0 引言

目前, 我国已全面建成北斗三号(BDS3)全球卫星导航系统, 并向全球提供定位和导航服务, 未来的目标是建设面向全球的更加泛在、更加融合、更加智能的综合时空服务体系, 其中最重要的任务之一就是如何精准获取高精度的事后卫星轨道^[1]。目前世界上的四大导航定位系统中应用最广泛的全球卫星导航系统是GPS系统, 其相关的理论技术方法相对较成熟^[2,3], 可以为我们的北斗卫星导航系统发展过程中提供一定的学习借鉴。因此, 研究学习GPS系统相关的定轨理论和方法^[4,5], 可以更好的为建设发展我国卫星导航事业服务。

国内有许多学者在导航卫星定位定轨方面做了深入的研究。20世纪80年代, 西安测绘研究所通过深入研究导航卫星精密定位定轨基础上, 自主开发出了自己的卫星定位定轨软件, 基于国内均匀分布的基准观测站进行定位定轨可以达到2m的精度^[6,7]。武汉大学科研团队也在卫星导航定位定轨方面做了比较深入的研究, 通过不断的钻研攻关, 开发出了具有自主知识产权的卫星导航数据处理软件PANDA, 目前使用

该软件进行卫星导航定位定轨, 能够兼容综合处理多源观测数据(如伪距、载波相位、DORIS、激光测距、C波段等观测数据), 可以实现多星座(GPS、COMPASS、GLONASS、GALILEO等)导航卫星的精密导航定位定轨, 其基于全球均匀分布的基准站观测数据进行导航卫星事后星历计算精度可以达到2-3cm^[8]。依托此软件, 武汉大学GNSS中心解算并对外提供的IGS产品已达到国际先进水平, 发展成为几个主要的国际IGS分析中心机构之一^[9]。目前世界上已经形成多星座兼容发展的格局, 迫切需要统一的兼容的高精度的卫星轨道, 这也促进了精密定轨的发展与进步^[10]。

本文介绍了事后星历的解算方法和流程^[11], 分别采用区域基准站、全球基准站以及长时间的GPS事后星历连续结算结果与IGS发布的精密星历成果进行比对分析, 得出采用一定数量的全球均匀分布的基准站进行长时间的连续解算可以获得比较稳定的定轨结果的结论, 同时也发现了一些存在的问题和难点, 这也为后续进一步的深入研究提供了基础。

1 事后星历解算方法及流程

全球卫星导航系统应用已经深入人们的日

常生活的各个方面,卫星的轨道误差是卫星导航定位应用中最主要的误差源之一^[12],精确确定卫星轨道是卫星应用的前提,其精度直接影响卫星导航产品的应用,各大分析中心也十分重视为用户提供快速而高精度的轨道产品,这也是世界各大分析中心目前研究的热点^[13]。事后精确轨道的获取通常有动力学顶柜和几何法定轨两大类。其中动力学定轨法是基于导航卫星运动的动力学模型进行积分计算,依据后续时刻的卫星状态参数归算计算得到初始状态的时间点的轨道位置,然后使用观测数据组合观测方程计算获取卫星初始状态的卫星运用状态参数,再使用精确计算的卫星初始状态时刻的参数进行积分计算,进一步外推计算获取卫星后续时刻的位置状态^[14]。几何法定轨是通过使用星载的卫星信号接收机接收到的观测数据,采用动态定位的方式,进一步计算得到位置准确位置的方法,这种方法应用主要局限于低轨卫星的事后星历的获取,其好处是不用轨迹卫星的动力学模型,通过逐渐逼近的方式获取卫星的事后轨道,不能进行卫星轨道的外推计算^[15]。其他的方法基本上都是基于这两种方法为基础进行的优化或对这两种方法进行的综合,将各类观测数据进行加权计算和处理,获取一个更高精度的事后星历^[16]。

通常采用基于 3 天解、5 天解、7 天解的方法来精确计算卫星轨道的初始位置以及相应的速度和光压等参数进行事后星历的计算^[17]。本文中事后星历解算主要采用 3 天解的方法,首先建立观测方程、进行参数估计,得到某一观测时刻的每颗卫星的精确位置、速度和光压参数,然后对每颗卫星的精确位置、速度和光压参数进行积分计算,获取该卫星其他时刻的精确位置^[9-10]。文中涉及实验计算全部使用 GAMIT/GLOBK 软件进行解算,软件主要处理数据是基于最小二乘法处理双差观测量进行相应的参数估计计算。由于该软件使用双差观测量进行参数估计计算,所以观测方程差分计算时可以完全消除接收机和卫星钟差的影响^[20],同时可以显著的减小解算中的一些系统误差(如轨道误差、大气折射误

差等)。

GAMIT 是一款基于 Linux 系统下运行的交互式的软件,该软件由美国麻省理工学院(MIT)和斯克利普斯海洋研究所(SIO)基于 FORTRAN 语言共同研制编写的面向 GNSS 的综合数据处理分析软件包,主要应用于全球卫星导航系统(GNSS)的精密定位和定轨相关的数据分析和处理。

GLOBK 软件是一款基于 GAMIT 软件处理原始观测值后提供的测站坐标、轨道参数以及地球自转参数等信息进行联合解算空间大地测量和地面观测数据的卡尔曼滤波器,可以处理 GAMIT 软件的数据、GIPSY 软件和 BERNESE 软件等其他数据处理软件计算得到的输出数据和经典大地测量和卫星激光测距(SLR)观测获取的数据。该软件虽然比常规软件复杂,但其操作灵活、运行效率高,完全可以满足日常的应用研究需要。

使用 GAMIT/GLOBK 软件进行 GNSS 定轨计算步骤为:

(1)使用 GAMIT 软件计算 GNSS 观测数据获取精确轨道的单天解;

(2)使用 GLOBK 软件合并 GAMIT 软件计算输出的多天的单天解数据,计算得到精确的轨道参数的多天解;

(3)再次使用 GAMIT 软件将精确的多天解算成果进行轨道积分,进一步获取全弧段的卫星事后精确轨道位置(即卫星事后星历)。

使用 GAMIT/GLOBK 软件进行事后星历解算的流程如图 1 所示。

2 基于区域基准站观测数据的 GPS 事后星历解算

根据现有的卫星定轨相关的理论基础,卫星轨道摄动力模型的精度和双差观测方程的精度综合总影响直接决定了解算的卫星轨道精度^[18]。在此基础上,在事后高精度轨道确定方面,采用的基准站的数量及其分布情况也是很重要的影响因素^[19],基于以下两个算例进行分析比

轨精度为 21cm,略优于基于中国区域内基准站的定轨精度 29cm(在切向和法向上的表现更为明显)。由图 4 可知,由于选取的范围的限制,基于区域基准站观测数据的定轨结果不太理想,但整体分析来看,随着基准站数量的增加,定轨精度有所提升。

3 基于全球基准站观测数据的 GPS 事后星历解算

分别采用全球均匀分布的 100 个基准站和 30 个基准站在 2024 年同一时段连续 3 天的 GPS

观测数据,改进全球广播星历,并将其结果与 IGS 中心发布的精密星历成果分别在径向、切向、法向以及综合三维指标进行比对分析。

由表 2 可知,随着采用的基准站范围由区域扩大到全球,跟踪的卫星弧段也扩大到全部,综合的定轨精度有所提高,尤其切向和法向的精度提高较大,甚至超过了径向的定轨精度。

由图 5 可知,采用全球基准站数量增加时,定轨精度略有提升,但幅度较小,解算效率上损失较大,因此,通过综合分析确定采用一定数量的全球均匀分布的基准站来定轨是最优方案,这

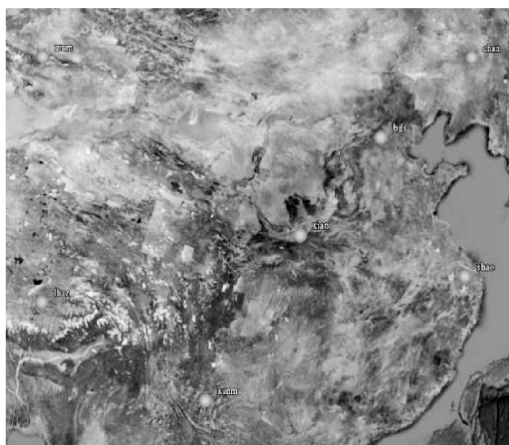


图 2 中国范围内基准站及分布图

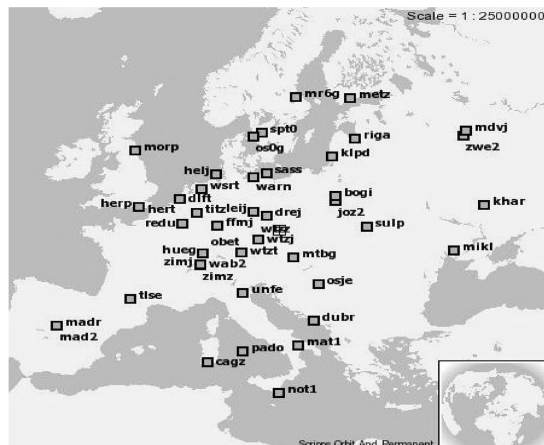


图 3 欧洲范围内基准站及分布图

表 1 基于区域基准站定轨结果对比

基准站范围	综合 (cm)	径向 (cm)	切向 (cm)	法向 (cm)
中国区域基准站	29.0	16.4	35.5	31.5
欧洲区域基准站	21.0	13.5	27.1	20.0

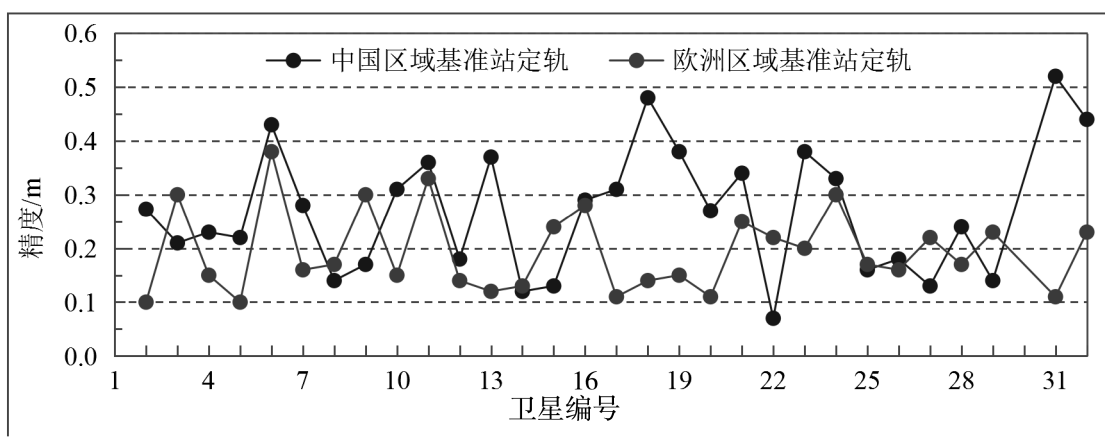


图 4 基于区域基准站观测数据的轨道综合精度

表 2 基于全球基准站定轨结果对比

基准站范围	综合 (cm)	径向 (cm)	切向 (cm)	法向 (cm)
100 个站	6.5	9.0	4.6	4.3
33 个站	6.8	10.0	4.8	4.7

也是后续的研究内容。另外可以看出,由于 11 号、21 号、24 号三颗卫星的定轨精度稍差,导致径向上整体定轨精度略低于切向和法向。

选取全球范围内均匀分布的 30 个 GPS 基准站在 2024 年另一阶段连续 3 天的观测数据进行定轨解算,进一步改进广播星历轨道,对 11 号、21 号、24 号三颗卫星进行进一步分析,将期计算轨道与表 2 定轨结果进行对比分析。

由表 3 可以看出,随着时间段不同,11 号、21 号、24 号三颗卫星的定位精度相差较大,在径向方向尤为突出,综上可知,11 号、21 号、24 号三颗卫星的定轨精度稍差的影响因素非卫星本身因素所致。

进一步采用 2024 年 161 - 163 共计 3 天的全球均匀分布的 30 个基准站进行定轨解算,进一步研究其对其他卫星的定轨结果的影响,分别

对其剔除前后的定轨结果进行对比分析。

由表 4 可知,剔除三颗卫星(11 号、21 号、24 号)前后整个星座定轨精度差异较小,综合前述,进一步可以得出,11 号、21 号、24 号三颗卫星的定轨精度稍差的影响因素非卫星本身所致,可能是由于受基准站观测数据量少低或其卫星轨道机动等影响因素影响。另外多周期窗口的定轨方式,有利于发现整个星座中的个别异常卫星,但是否能全部探测出全部异常卫星,有待于进一步分析研究。

4 长时间 GPS 星历连续解算

采用全球均匀分布的 61 个基准站的 2024 年 31 - 60 天的 GPS 观测数据,以 3 天为一个周期,改进全球广播星历,并将其结果与 IGS 中心发布的精密星历成果进行对比分析。进一步分

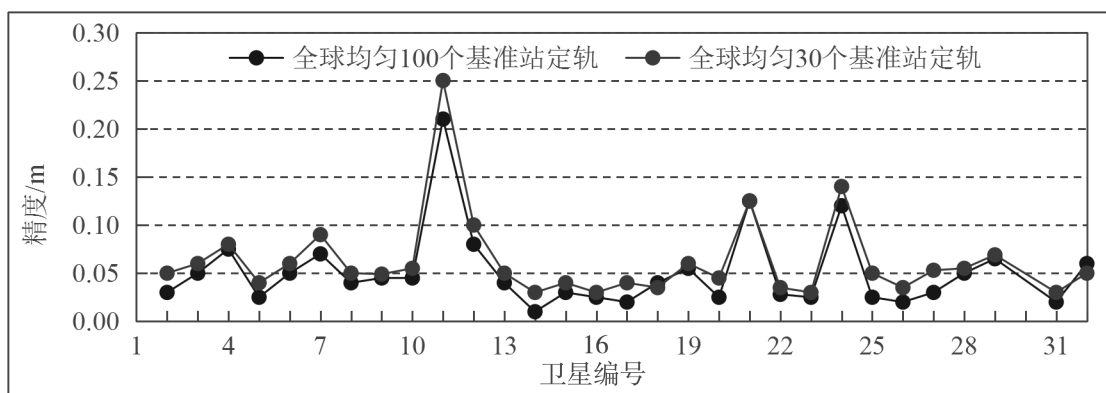


图 5 基于全球跟踪站观测数据的轨道综合精度

表 3 (11 号、21 号、24 号)三颗卫星不同时段定轨结果对比

卫星号	年积日	径向 (m)	切向 (m)	法向 (m)	综合 (m)
PG11	160	0.419	0.111	0.055	0.252
	260	0.013	0.062	0.144	0.091
PG21	160	0.194	0.034	0.042	0.116
	260	0.019	0.111	0.154	0.110
PG24	160	0.188	0.053	0.044	0.116
	260	0.027	0.048	0.106	0.069

表 4 剔除三颗卫星(11号、21号、24号)前后整个星座定轨精度对比

事项	径向(m)	切向(m)	法向(m)	综合(m)
剔除前	0.043	0.042	0.043	0.043
剔除后	0.042	0.040	0.036	0.039

析验证前述的定轨模式,确认其解算的定轨成果的稳定性。

由图 6 可知,采用全球均匀分布的 61 个基准站较长时间的连续解算事后星历的精度均在 5-7cm 之间,各卫星定轨成果之间差异较小,整体精度达 6.8cm,精度相对较稳定。

5 结语

本文分别基于不同区域范围、不同数量以及不同时间跨度的 GPS 基准站观测数据进行定轨,并与 IGS 分析中心发布成果进行比对,可以得出如下结论:

(1) 分别以区域和全球范围作为对比分析的窗口,随着基准站数量的增加,计算获取的事后星历的精度有所提升,但提升的幅度不是很明显,效率上损失较大。因此,通过综合分析确定采用一定数量的全球均匀分布的基准站来定轨是最优方案。

(2) 以全球范围为研究窗口,基于全球范围内均匀分布的基准站可以跟踪到几乎所有的卫星弧段,因此,使用全球范围内均匀分布的基准站计算获取的事后星历精度明显优于基于区域范围内均匀分布的基准站观测数据计算获取的

事后星历的精度。

(3) 随着基准站数量的减少,可能出现少数个别卫星观测数据量的减少,导致最终综合事后定轨精度的降低。

(4) 基于全球范围内均匀分布的基准站观测数据进行了长时间的事后星历连续解算,获取了精度比较稳定的延迟事后星历,这也为后续的研究进一步研究连续计算事后星历奠定了基础。

(5) 采用一定数量的全球均匀分布的基准站进行长时间的连续解算,可以获取比较稳定的定轨结果,但对于如何选取全球均匀分布的基准站的位置和数量有待进一步研究。

参考文献(References):

- [1] 秘金钟,党亚民,蒋志浩,等. 基于国家测绘局 GPS 连续运行参考站的定轨[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2009, 28(2): 202-205.
- [2] 常志巧,郝金明,张成军. GPS 精密星历的外推精度分析[J]. 测绘工程, 2006, 15(02): 27-29+39.
- [3] Xu Guochang. Orbits[M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008.
- [4] 杜兰. GEO 卫星精密定轨技术研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2011.
- [5] 程义军. 基于 IGS 精密星历的 GPS 卫星轨道分析

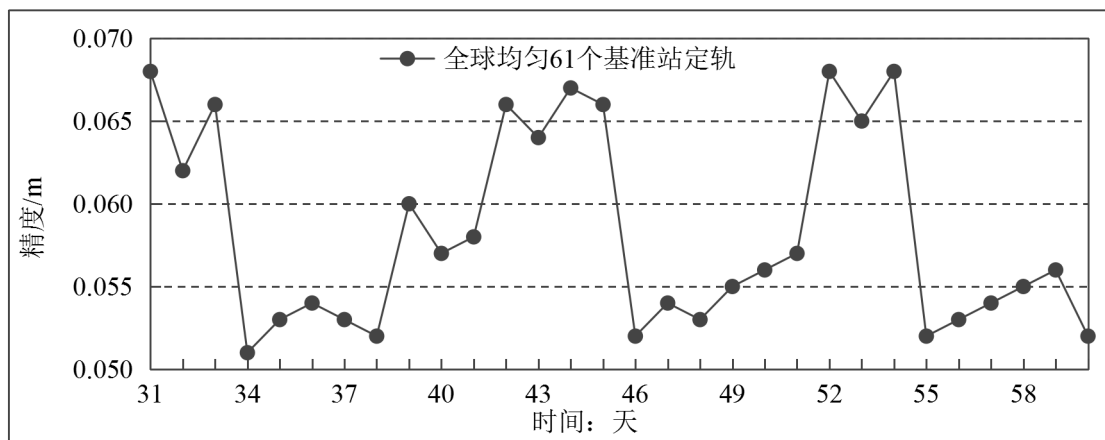


图 6 61 个基准站连续解算事后轨道精度

- [D]. 武汉: 武汉大学, 2005.
- [6] Chen King. Real - Time Precise Point Positioning and Its Potential Applications [C]. ION GNSS 17th International Technical Meeting of the Satellite Division, Long Beach, CA, 2004.
- [7] 郭睿. 区域导航卫星精密定轨研究 [D]. 上海: 中国科学院上海天文台, 2010.
- [8] 李敏. 多模 GNSS 融合精密定轨理论及其应用研究 [D]. 郑州: 中国人民解放军信息工程大学, 2006.
- [9] 张睿. 基于地面跟踪站观测技术的 GPS 卫星定轨研究及程序设计 [D]. 西安: 长安大学, 2013.
- [10] Baek J, Lim H, Park J. Preliminary study on the system development for IGS products [A]. Proceeding of the 12th GNSS workshop [C]. 2005.
- [11] 盛传贞, 袁运斌, 孙保琪, 等. 基于全球 IGS 数据的 GPS 导航星座精密轨道确定 [J]. 大地测量与地球动力学, 2011, 31(01): 138 - 141.
- [12] 蔺玉亭. 利用区域网数据确定 GPS 卫星轨道方法研究及相关软件设计 [D]. 郑州: 中国人民解放军信息工程大学, 2005.
- [13] 周善石, 胡小工, 吴斌. 区域监测网精密定轨与轨道预报精度分析 [J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2010, 40(06): 800 - 808.
- [14] Liu Jingnan, Ge Maorong. PANDA Software and It's Preliminary Result of Positioning and Orbit Determination [J]. Wuhan University Journal of Natural Science, 2003, 8 (2B): 603 - 609.
- [15] 郑作亚. GPS 数据预处理和星载 GPS 运动学定轨研究及其软件实现 [D]. 上海: 中国科学院上海天文台, 2004.
- [16] 王武星, 顾国华. 利用基准站观测资料确定 GPS 卫星轨道 [J]. 大地测量与地球动力学, 2003, 23(03): 112 - 115.
- [17] 赵东明, 张传定, 吴晓平. 关于勒让德函数的一组特殊定积分递推公式 [J]. 测绘学院学报, 2000, 17(04): 239 - 241.
- [18] 王威, 董绪荣, 柳丽, 等. 基于全球导航卫星系统的高轨卫星定轨理论研究及仿真实现 [J]. 测绘学报, 2011, 40(S1): 6 - 10.
- [19] 楼益栋, 施闯, 葛茂荣, 等. GPS 卫星实时精密定轨及初步结果分析 [J]. 武汉大学学报 信息科学版, 2008, 33(08): 815 - 817 + 841.
- [20] 刘林, 侯锡云, 汤靖师, 等. 关于空间探测器定位在太阳系中特殊点上的有关问题 [J]. 天文学进展, 2005, 23(02): 180 - 189.

作者简介:

第一作者/通讯作者: 杜伟吉, 1985 年生, 男, 江苏徐州人, 硕士, 南京市测绘勘察研究院股份有限公司, 高级工程师, 主要研究方向为大地测量学与测量工程。Email: 292693726@qq.com

GPS Post Ephemeris Calculation Research based on the Base Station Observation Data

DU Weiji *, LIU Weijin, ZHI Chao

(Nanjing Institute of Surveying, Mapping & Geotechnical Investigation, Co. , Ltd, Nanjing 210019, China)

Abstract: It's one of the most important tasks to accurately obtain high – precision post satellite orbits for the development of China's Beidou navigation system. In this paper, a 3 – day experimental window is used to introduce the GPS post ephemeris calculation process. Based on GPS reference station observation data from different regions, quantities, and time spans, orbit determination was performed using GAMIT/GLOBK software with a 3 – day solution method. The results were compared with those published by the IGS Analysis Center. It was found that stable orbit determination results with an accuracy between 5 – 7 cm can be achieved using a certain number of globally uniformly distributed reference stations for long – term continuous calculation. it's anticipate to promote China's Beidou satellite navigation system through deep theories and methods of satellite orbit determination.

Key words: GNSS; post ephemeris; base station; IGS