

利用区域基准站进行导航卫星 近实时精密定轨研究

施 闯¹ 李 敏¹ 楼益栋¹ 邹 蓉¹

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

摘 要:利用滞后 1 d 的全球跟踪站数据和当天实时的区域基准站数据,基于法方程叠加的原理,对 GPS 卫星轨道进行分析计算,与 IGS 最终精密星历比较,近实时轨道的三维平均 RMS 达到 14 cm;2 h 的近实时预报轨道的三维平均 RMS 优于 30 cm。

关键词:GPS;区域基准站;精密定轨;法方程叠加

中图法分类号:P228.41

目前,很多国家都在不断发展和完善自己的导航定位服务体系,特别是一些基于 GPS 导航定位服务体系得到了长足的发展。例如美国的连续运行参考站网系统(CORS)、加拿大的主动控制网系统(ACS)、日本的 GPS 连续应变监测系统(COSMOS),以及一些地区的连续运行参考站网络等。随着这些系统的相继建成,导航定位服务已广泛应用于各学科领域,促进了导航服务产业的快速发展^[1,2]。

利用导航卫星进行导航定位服务,首先必须要获得精密的卫星轨道信息。目前使用的 GPS 精密星历都是从 International GNSS Service (IGS)获得。该星历基于全球均匀分布的 300 多个连续跟踪站求得,可达到优于 5 cm 精度的事后轨道,但有时延^[3]。然而,局域的导航定位服务系统目前一般都建立在基于美国 GPS 系统之上,导航定位服务系统要能获得自主连续可靠的导航服务,就不能仅依赖于 IGS,例如要发展我国的导航卫星区域增强系统,就必须考虑如何利用我国的区域基准站来计算得到高精度的导航卫星轨道。

1 区域定轨策略

1.1 精密定轨软件

本文对区域定轨进行研究和数据分析的软件

基础都是基于武汉大学 GNSS 研究中心自主研发的导航数据综合处理软件(position and navigation data analyst, PANDA)。该软件主要用于处理卫星与导航定位数据,现已成为导航定位领域的集科研与学习于一体的研究平台。

PANDA 软件采用非差模型,几乎考虑了各 IGS 分析中心所用的相关软件的所有改正项与动力学模型,以获得高精度的 GNSS 卫星与 LEO 卫星轨道。为获得实时轨道与历元解轨道,采用均方根信息滤波参数估计方法以克服通常采用的 Kalman 滤波在这些方面的数值问题^[4,5]。同时,该软件采用最小二乘估计的方法以节省数据后处理的计算时间和数据反复清理的次数,利用实时消参的方法以解决大网精密定位解算问题(可以同时处理 300 个 GPS 跟踪站)^[6-8]。

1.2 区域定轨观测模型与动力学模型

区域精密定轨与全球站性精密定轨的原理以及参数估计方法都是一致的^[7]。这里的固定测站坐标,采用无电离层组合非差相位观测值(LC)和无电离层组合非差伪距观测值(PC)进行区域定轨,观测模型和参数参见文献[7],GPS 卫星动力学模型和参数见表 1。

表 1 GPS 卫星动力学模型与参数

Tab. 1 GPS Satellite Force Models and Parameters

参数	模型
重力场	EGM96
N 体摄动	太阳,月亮和行星引力
潮汐	地球固体潮,海洋潮汐
太阳光压	ROCK4
空气阻力	不考虑
经验力	不考虑

2 常规定轨方法进行区域定轨

为了进行区域定轨试验,首先采用中国区域内的 7 个 GPS 跟踪站 3 d 的数据(2004 年,年积日 089~091),进行了一般的动力学定轨。采用的

动力学模型见表 1。
分别对 GPS 卫星进行了单天、两天、三天弧长的精密定轨和轨道预报,轨道预报是采用观测数据预报随后的 1 d 弧长的轨道,并与 IGS 提供的精密轨道进行比较,较差 RMS 见表 2。

表 2 事后轨道与预报轨道精度/m

Tab. 2 Information of Precision

RMS	数据		
	089 单天	089~090 两天	089~091 三天
事后轨道	2.03	0.51	0.43
预报轨道	—	2.2	1.6

各卫星的区域定轨和轨道预报精度如图 1 所示。

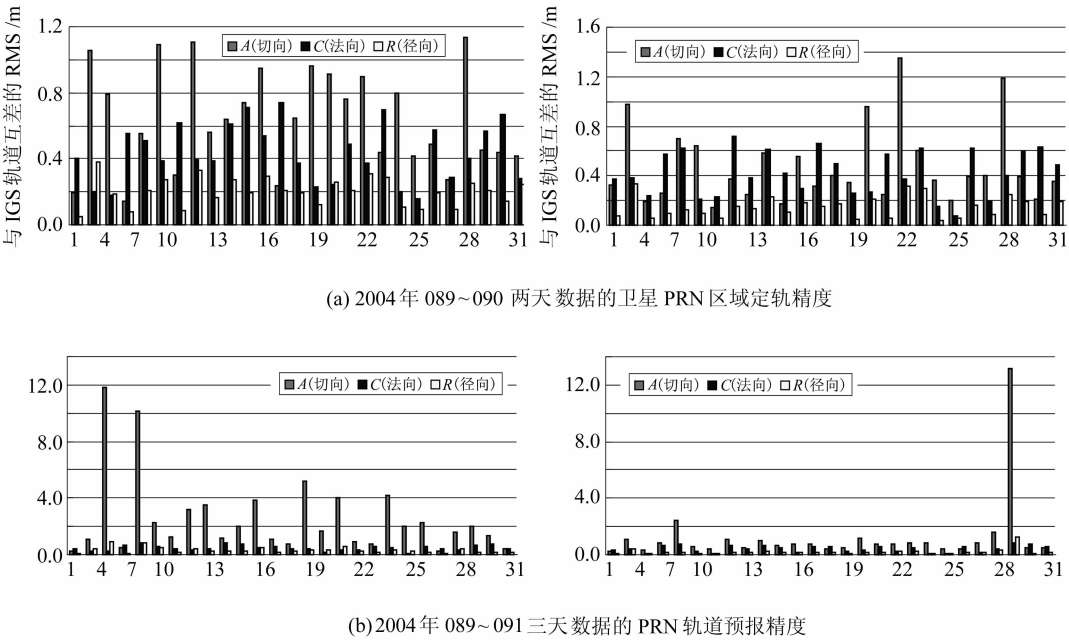


图 1 区域定轨和轨道预报精度

Fig. 1 Orbit Determination and Prediction by General Method

从表 2 可以看出,单天弧段的定轨精度仅相当于广播星历精度,故没有进行进一步的轨道预报计算。从表 2 和图 1 可以发现,即使是三天弧长解算的事后轨道,与 IGS 精密轨道的互差 RMS 也达到了 40 cm,这甚至弱于全球站单天弧长数据的预报轨道。这主要是由于观测数据少,且局域跟踪站的几何分布不均造成的,是区域定轨不可避免的缺陷。另外,多天观测数据的区域定轨试验结果比单天定轨要好得多,与 IGS 最终轨道比较的平均 RMS 可以优于 0.5 m,预报精度可达到广播星历的精度。这是因为多天解的卫星可视弧段长、卫星轨道参数和力模型参数的解算相对准确,轨道的预报能力也较强。

图 1 中 PRN29 卫星的三天弧长预报精度相

比两天弧长预报精度更差,达到 10 m 以上,其他的都在 1 m 左右,可能是因为 2004 年第 92 d PRN29 卫星存在轨道异常,如进行了轨道机动。

3 基于法方程叠加的区域定轨

根据以上分析,区域定轨与全球性定轨的主要不同就在于,全球性定轨使用的是全球均匀分布的观测站数据,而区域定轨使用的是分布在某个区域的观测站数据。导致了区域网轨道的观测几何条件较差(有的卫星可能一天都不会被观测到),从而造成了定轨精度较低。

3.1 近实时精密定轨

目前,可以获得滞后 1 d 的全球站观测数据。

因此,可以充分利用这些数据形成的法方程作为先验约束,然后与区域站实时的观测数据形成的法方程进行叠加,并一起解算参数。

进行法方程叠加的前提是所有法方程系统中未知参数的先验初值是一致的,因此,这里需要对法方程系统进行转换。为了法方程叠加的需要,区域站数据形成的法方程需要转化到全球站数据法方程的先验轨道和力模型初值。

设全球站法方程参数为 \mathbf{x} , 区域站法方程参数为 $\hat{\mathbf{x}}$, 全球站数据和区域站数据形成的法方程分别为:

$$\mathbf{N}_1\mathbf{x} + \mathbf{W}_1 = 0, \mathbf{N}_2\hat{\mathbf{x}} + \mathbf{W}_2 = 0 \tag{1}$$

$\hat{\mathbf{x}}$ 与 \mathbf{x} 的转换关系为:

$$\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{d}\mathbf{x} \tag{2}$$

由式(1)、式(2)可知,区域站新的法方程系数阵为 $\tilde{\mathbf{N}}_2 = \mathbf{C}^T\mathbf{N}_2\mathbf{C}$, 常数阵为 $\tilde{\mathbf{W}}_2 = \mathbf{C}^T(\mathbf{W}_2 - \mathbf{N}_2\mathbf{d}\mathbf{x})$ 。

经过参数转换,新的叠加后的法方程系统可变为在一致的先验初值下:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{N}_1 \\ \tilde{\mathbf{N}}_2 \end{bmatrix} \hat{\mathbf{x}} + \begin{bmatrix} \mathbf{W}_1 \\ \tilde{\mathbf{W}}_2 \end{bmatrix} = 0 \tag{3}$$

在前一天的全球站观测方程中只有测站坐标和轨道初值及力模型参数是整个定轨计算中的公共未知数,其他参数如模糊度参数和对流层折射参数只与当天观测数据有关。因此,由每天的观测数据形成法方程后,从中消去模糊度参数和对流层折射参数,得到仅包含测站坐标和轨道初值及力模型参数的法方程:

$$\tilde{\mathbf{N}}_j \begin{bmatrix} \delta\mathbf{X} \\ \delta\mathbf{Q} \end{bmatrix} + \tilde{\mathbf{W}}_j = 0, j = 1, 2 \tag{4}$$

式中, $\delta\mathbf{X}$ 为测站坐标参数的改正数; $\delta\mathbf{Q}$ 为卫星轨道初值和力模型参数的改正数; j 为第几天; $\tilde{\mathbf{N}}_j$ 为第 j 天数据形成的法方程系数阵; $\tilde{\mathbf{W}}_j$ 为常数阵。

利用这种方法,笔者选用了中国区域内的 7 个 GPS 跟踪站 2004 年 090 d 的实时数据,同时选择了全球均匀分布的 25 个站 2004 年 089 d 数据所形成的法方程信息。采用的观测模型参见文献[7],动力学模型见表 1。

同样将计算结果与 IGS 提供的精密轨道进行了比较,各卫星三维平均 RMS 为 0.14 m。相比于一般方法,有一个数量级的提高。基于法方程叠加的各卫星区域定轨精度如图 2 所示。

从图 2 可以看出,随着全球站法方程信息的加入,轨道精度有了大幅的提高。同时预报 1 d 的轨道互差平均 RMS 提高到了 0.22 m。这主要是因为加入全球站法方程后,轨道观测几何强度

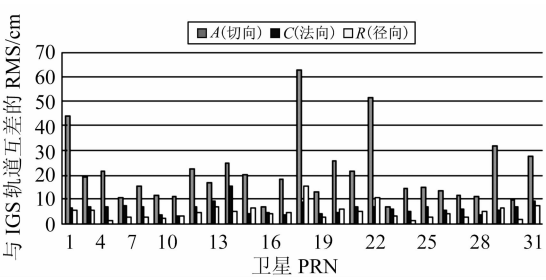


图 2 基于法方程叠加的 2004 年 090 d 定轨精度
Fig. 2 Orbit Determination of Day 090 Based on Normal Equation Adding

显著增强,利用 089 d 法方程信息可以建立高精度光压模型和数值积分器;然后以此作为先验约束,可建立起相对高精度的 090 d 的光压模型,以及高精度的轨道数值积分器。

3.2 近实时轨道预报

在此基础上,还利用滑动定轨的方法进行了近实时轨道预报试验。同样利用 089 d 法方程信息作为先验约束,在进行滑动定轨时,以 090 d 每 2 h 作为一个滑动窗口。假如预报 090 d 10~12 h 的近实时轨道,所用到的观测信息为 089 d 全球站形成的法方程,以及 090 d 0~10 h 的观测数据。叠加后的法方程同式(1)。图 3 描述了利用 089 d 全球站法方程预报的轨道与利用法方程叠加的思想计算的近实时轨道精度的比较关系。

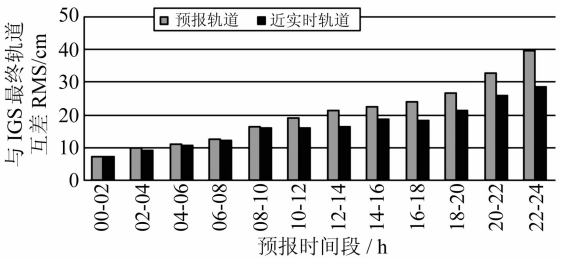


图 3 预报轨道与近实时轨道预报精度
Fig. 3 Precision of Predicted Orbit and Near Real-time Predicted Orbit

从图 3 可以看出,采用 089 d 全球站数据对 090 d 轨道的预报精度与近实时预报轨道精度具有相同的递减趋势,都随着时间的向后推移精度降低,这是由于单天轨道精度较 IGS 已有一定的差值,导致轨道预报随时间将误差放大。而区域网的数据由于受到几何条件以及数据量的限制,区域网数据的加入对轨道改善弱于预报导致的误差放大,因而近实时轨道精度也具有精度递减的趋势。但是区域站数据的加入对轨道预报还是起到了一定的作用,在各个时间段相对于预报轨道精度最高可以提高 28.7%。而且近实时轨道在

各个时间段与 IGS 精密轨道互差的三维平均 RMS 都低于 30 cm,与导航定位影响最为关键的径向精度^[10]优于 10 cm。

通过以上试验可以发现,如果充分利用已有的观测信息,采用本文介绍的基于法方程叠加思想的区域精密定轨,相比于 IGS 精密轨道,利用 PANDA 软件可以获得三维平均 10 cm 精度的近实时轨道,同时近实时预报轨道也能达到优于 30 cm 的精度,径向精度优于 10 cm,可以满足一般导航与定位对轨道精度的需求。

参 考 文 献

[1] 曾庆化, 刘建, 彭文明, 等. 我国卫星导航系统相关技术发展分析[J]. 航天控制, 2006, 24(4): 91-96

[2] 李征航. 全球定位系统(GPS)技术的最新进展(第一讲):多功能卫星导航定位服务系统[J]. 测绘信息与工程, 2002, 27(1):19-22

[3] IGS. IGS[OL]. <http://igsb.jpl.nasa.gov/>, 2007

[4] Liu Jingnan, Ge Maorong. PANDA Software and Its Preliminary Result of Positioning and Orbit Determination[J]. Wuhan University Journal of Natu-

ral Science, 2003, 8(2B):603-609

[5] Zhao Qile, Liu Jingnan, Ge Maorong. High Precision Orbit Determination of CHAMP Satellite [J]. Geo-spatial Information Science, 2006, 9(3):180-186

[6] 赵齐乐, 刘经南, 葛茂荣, 等. 均方根信息滤波和平滑及其在低轨卫星星载 GPS 精密定轨中的应用[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2006, 31(1): 12-15

[7] 赵齐乐. GPS 导航星座及低轨卫星的精密定轨理论和软件研究[D]. 武汉:武汉大学, 2004

[8] 葛茂荣, 刘经南. GPS 卫星精密星历的实时确定[J]. 武汉测绘科技大学学报, 1999, 24(1):32-35

[9] 姚宜斌. GPS 精密定位定轨或处理算法与实现[D]. 武汉:武汉大学, 2004

[10] 许其凤. 区域卫星导航系统的卫星星座[J]. 测绘工程, 2001, 10(1):1-5

第一作者简介:施闯,教授,博士生导师。主要研究方向为高精度 GNSS 数据处理方法和理论研究。
E-mail:shi@whu.edu.cn

Near Real-time Orbit Determination of Navigation Satellite
Using Regional Tracking Network

SHI Chuang¹ LI Min¹ LOU Yidong¹ ZOU Rong¹

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

Abstract: On the basis of adding normal equation method, the one day-long delayed global station's data and real time regional station's data have been synchronously dealt for navigation satellite orbit determination. Compared with the IGS precision orbit, the average of 3D RMS of the computed near real-time orbit is 14 cm, and the average of 3D RMS of the near real-time prediction orbit is better than 30 cm.

Key words: GPS; regional tracking station; precise orbit determination; adding normal equation

About the first author: SHI Chuang, professor, Ph.D supervisor. He is mainly engaged in the theory and methods of high precision GNSS data processing.
E-mail: shi@whu.edu.cn