

GPS 观测数据的模拟研究

韩保民¹ 欧吉坤² 曲国庆¹

(1 山东理工大学建筑工程学院,淄博市张店区张周路12号,255049)

(2 中国科学院测量与地球物理研究所,武汉市徐东路174号,430077)

摘要:主要研究了地面基准站GPS观测值模拟情况,分析了GPS观测值模拟的意义、原理及流程、用到的数学模型等,并用编写的模拟软件模拟了武汉站的GPS观测值情况。结果表明,本模拟方法所模拟的GPS观测值和实测值很接近,能满足不同层次人员对GPS模拟观测值的需要。

关键词:GPS观测值;模拟;数学模型

中图法分类号:P228.41

GPS观测值的模拟一般由专门的GPS模拟软件或GPS模拟发生器实现。目前,已有数家国外公司和研究机构在进行关于GPS观测值模拟的研究,具体见文献[1~5]。这些GPS观测值模拟发生器或定位软件中的模拟模块都可以用来模拟地面任意点的静态GPS观测值。除Bernese外,其他的模拟发生器或软件中的模拟模块还可以模拟星载GPS观测值,且效果较好。但GPS模拟发生器的价格较高,其他定位、定轨软件中,GPS模拟模块的源代码又无法得到,因此,有必要研究具有我国自主知识产权的GPS模拟软件。近年来,我国已有部分专家、学者在对GPS观测值或其中的部分误差进行模拟或仿真研究,但这些研究还很不系统^[6~10]。鉴于GPS模拟软件的重要性,本文系统地对GPS观测值模拟的意义、原理、方法及所用到的数学模型进行了研究,依据Bernese软件中的GPS模拟模块的核心部分,并结合最新研究成果,编制了静态GPS观测值的模拟软件。

1 GPS 观测值模拟的原理及流程

1.1 GPS 观测值模拟原理

GPS观测值的模拟和GPS定位既互相联系又有区别。其中,GPS定位是用在某位置上观测到的GPS信号来精确求定该测站的三维位置;而

GPS观测数据的模拟则是利用已知测站的三维位置来试图恢复该测站可能观测到的GPS信号。基于这种认识,许多用于GPS定位中各种误差的改正模型通常被用作相应的误差模拟模型。在模拟GPS观测值时,首先应计算任意历元GPS卫星的三维位置;然后根据测站及GPS卫星的位置及事先规定的卫星高度截止角等计算该测站可观测到的GPS卫星,并计算出测站和可视卫星之间的距离,以作为GPS模拟观测值的真值;最后在距离真值上模拟如GPS卫星钟差、接收机钟差、电离层和大气层延迟等各种系统误差。此外,还要模拟观测噪声、粗差及周跳等。对静态GPS观测值的模拟来说,还要计算可视卫星持续时间。至于测站名、接收机类型、观测时间、采样间隔及模拟观测值类型等的控制,则是通过用户事先准备好的输入文件控制的^[10]。

1.2 GPS 观测值模拟程序的构成

根据GPS观测数据模拟原理,GPS观测值模拟程序主要包括4个部分。

1) 用户文件输入及输出部分。需要事先将会战名、测站名、接收机类型、模拟起止观测时间、采样间隔、模拟观测值类型、截止高度角、周跳的多少和大小、模拟所具体用到的误差项模型名称、GPS卫星初始轨道参数及要输出的文件名称等内容,写入一个总的输入文件。输出文件则是一个标准的Rinex格式的GPS观测值文件。

2) 测站和 GPS 卫星位置的计算部分。对于静态 GPS 观测值的模拟而言,测站的位置不用任何计算,可以由用户直接给出。在实际计算中, GPS 卫星星历的计算是用一定的动力学模型,通过对初始轨道参数进行积分来求得的, GPS 卫星的初始轨道参数来源于 IGS 提供的精密星历。

3) 某测站可视 GPS 卫星及其持续时间的计算部分。在计算出 GPS 卫星的轨道后,其任意时刻的 GPS 卫星位置和速度可以通过插值方法求得,然后根据求出的卫星坐标、测站位置计算卫星高度截止角、该站可视卫星及其持续时间。在计算出任意历元可视 GPS 卫星的三维位置之后,就可以根据其位置计算该历元测站和 GPS 卫星之间的距离——站星间 GPS 模拟观测值的真值。

4) GPS 信号中各种误差的模拟部分。在模拟 GPS 信号受到各种误差的影响时,为了模拟方便,一般将各类误差的影响投影到测站至 GPS 卫星的距离,即 GPS 模拟观测值真值上,并以相应的距离误差表示,称为等效距离偏差。这些误差主要包括:与 GPS 卫星有关的误差,如 GPS 卫星钟差、星历误差;与 GPS 信号传播途径有关的误差,如电离层影响、中性大气层的影响和多路径影响等;与测站接收机有关的误差,如接收机钟差、接收机的天线相位中心偏差等。另外,在 GPS 观测信号中,还要考虑相对论效应、地球自转、伪距和载波相位观测值的观测噪声、周跳及粗差等因素。其他部分作如为参数求出的接收机钟差、卫星钟差等误差、与具体接收机及观测环境有关的观测噪声、多路径等误差则可用与具体型号的接收机有关的模型表示出来。

然而,不管用的模型如何精确,它们都不可能和真实值的大小及符号一致。其解决办法就是在现有的模型上再加上多余的“悲观”误差,以补偿那些没有被精确模型化的误差的影响^[11]。

2 GPS 观测值模拟的数学模型

2.1 卫星轨道模型和地球运动模型

轨道模型被用来计算 GPS 卫星的运动。这个力学模型要尽可能顾及施加在 GPS 卫星上各种力的作用^[5]:

$$\ddot{r} = -GM \frac{r}{r^3} + a(t, r, \dot{r}, p_0, p_1, p_2, \dots) = f(t, r, \dot{r}, p_0, p_1, p_2, \dots) \quad (1)$$

其初始状态为:

$$\begin{aligned} r_0 &= r(t_0; a, e, i, \Omega, \omega, u_0) \\ v_0 &= v(t_0; a, e, i, \Omega, \omega, u_0) \end{aligned} \quad (2)$$

式中各符号的具体意义参见文献[5]。

将式(1)、式(2)对参数 p 求导,有:

$$\dot{r}_p = \frac{\partial f_i}{\partial r_k} r_p + f_p = A \cdot r_p + f_p \quad (3)$$

$$\begin{aligned} r_{0,p} &= r_p(t_0; a, e, i, \Omega, \omega, u_0) \\ v_{0,p} &= v_p(t_0; a, e, i, \Omega, \omega, u_0) \end{aligned} \quad (4)$$

然后对以上变分方程用适当的方法进行积分,即可求得卫星的轨道参数。关于地球的运动模型,本文直接采用国际地球自转组织公布的极移、岁差及章动等的参数或预报参数。

2.2 卫星钟差模型和接收机钟差模型

卫星钟差一般可以用一个二阶多项式来表示。相对于卫星钟差,接收机的钟差稳定性相对较差,且因不同的接收机类型而异。因此,在模拟某种接收机类型的接收机钟差时,一般先根据这种类型的接收机观测到的数据求出该型号的接收机钟差,然后将其用一个 6 阶多项式来拟合^[5]。如果不知道接收机类型,还可以用一个白噪声模型来表示接收机钟差^[1, 12~13]。

2.3 电离层模型

电离层对无线电波的影响随地理位置变化而表现出不同的局部特性,而现有的 GPS 电离层建模方法一般通过整体拟合大范围 GPS 观测资料,确定电离层模型参数,忽略了电离层的局部特性,限制了建模精度,不利于分析建模方法对模型求解精度的影响。本文采用一种格网电离层模型的新方法——站际分区(different areas for different stations, DADS)格网法^[14~15],作为电离层延迟的精确模拟模型。

2.4 对流层映射函数模型

在模拟地面站 GPS 观测值时,需要考虑对流层对 GPS 信号的延迟影响。对流层延迟常用天顶方向的干、湿分量和相应的映射函数来表示。映射函数将天顶方向的对流层延迟映射表现为传播路径上的延迟量,并引入映射函数,也便于对流层误差的参数化。在已有的十几种映射函数中,对于卫星截止角很高的天顶对流延迟的改正效果相差不大,但对于低卫星截止角的对流层的天顶延迟改正则有所区别。其中精度较高的映射函数有 Lanyi 模型、Herring 模型和 Niell 模型。本文使用应用较广的 Niell 模型^[15],这是因为对于低卫星高度截止角($3^\circ \sim 12^\circ$)的 GPS 观测值的改正, Niell 模型的精度要优于 5 mm,这个精度要高于(至少相当于)其他模型精度^[16]。另外, Niell 模型中还考虑了对流层季节性变化,由于在模型中不包含气象元素,因而不受气象元素误差的影响。

2.5 伪距噪声模型

一般情况下,观测噪声为白噪声,不同卫星的观测噪声之间是相互独立的。观测噪声与码相关模式、接收机动态及卫星高度截止角有关。C/A 码的观测噪声一般为 1.5 m,但受信噪比的影响,C/A 码的观测噪声一般在 1.5~3 m 间变化。P 码的观测噪声为 0.1~0.3 m。载波相位的噪声一般为波长的 1%,对于不同的接收机类型和信噪比水平,载波相位的观测噪声一般在 0.1%~10%间变化。所以,模拟中为了简化程序,可简单地用实测观测噪声水平乘以由服从正态分布的随机发生器产生的随机数来模拟观测噪声。另外,也可以用文献[17]描述的噪声模型来表示。

2.6 粗差、周跳及其他

通过输入文件来控制粗差及周跳的个数、位置及大小。为了研究方便,一般直接在某颗卫星上施加一定大小的周跳值,在一些观测值上加粗差,这样可以用来检验、比较数据预处理方法的优劣:比较各种方法的定位粗差、周跳的能力,定位后估计及修复粗差及周跳的能力等。除以上模型外,还模拟了其他误差,如 GPS 卫星天线相位中心偏差、接收机天线相位中心偏差等,其具体公式见文献[10]。

3 模拟算例

下面用两种方案模拟武汉站 2002-01-03-5:

30 到 7:00 共 1.5 h 的数据。模拟时采用如下两种方案。

方案 1 模拟时采样率为 30 s,卫星高度截止角为 0°。其他模型如下:接收机钟差、卫星钟差采用多项式模型,武汉站的坐标采用 IGS 提供的坐标,GPS 卫星轨道采用广播星历提供的初始参数计算,电离层采用单层电离层模型,对流层采用 Neill 模型,观测噪声采用文献[17]描述的模型,相对论模型、海潮、固体潮等模型采用文献[10]描述的模型,地球运动模型采用 IGS 实际计算的模型,接收机和 GPS 卫星天线高都采用实际天线高的真实值。

方案 2 GPS 卫星的轨道采用该天 IGS 提供的精密轨道计算所得,电离层采用 DADS 模型,接收机钟差和卫星钟差采用实际观测值求出的值拟合而成。其他情况同方案 1。

笔者同时模拟了 GPS 双频 P 码及载波相位观测值,限于篇幅,本文仅以双频 P 码观测值的模拟为例来说明问题。用以上两种方案模拟出的武汉站 GPS 部分卫星的伪距观测值同实际观测值的比较结果见图 1~图 3、表 1。其中,图 1 是用方案 2 模拟出的 GPS 伪距观测值的示意图,图 2、图 3 分别为用方案 1 和方案 2 模拟出的伪距观测值与武汉站实测观测值的差值。表 1 为两者差值的部分统计结果。

表 1 武汉站 GPS 卫星模拟观测值与实际观测值差值统计结果/m

Tab. 1 Statistical Results of Simulated GPS Observations and Real Ones of Wuhan Station

方案	最大值(绝对值)	最小值(绝对值)	平均值(绝对值)	RMS	
方案 1	SVN2	32.476	23.106	13.033	23.425
	SVN11	50.907	37.139	19.216	37.926
	SVN27	28.393	20.948	13.773	21.121
方案 2	SVN2	10.923	4.269	0.048	4.836
	SVN11	13.792	4.616	0.022	5.356
	SVN27	10.175	3.628	0.107	4.255

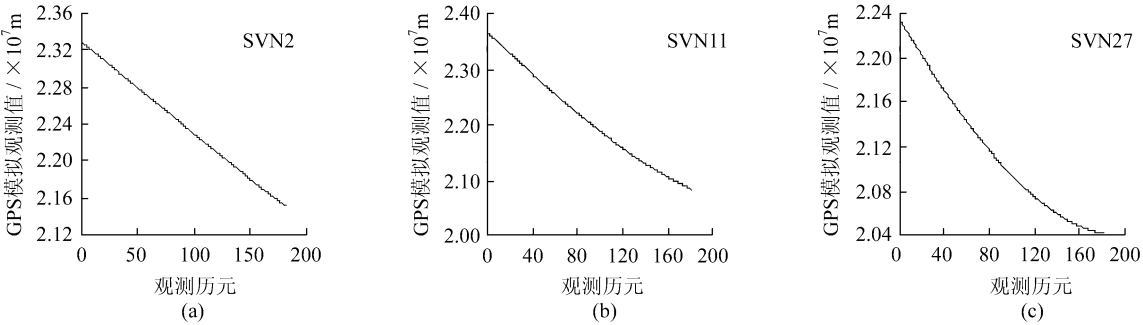


图 1 武汉站 GPS 伪距模拟值示意图(方案 2)

Fig. 1 Illustration of Simulated Codes of Wuhan Station

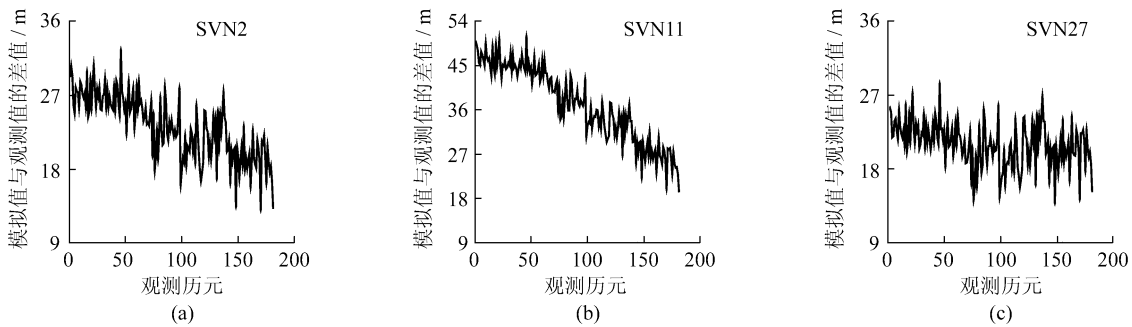


图 2 武汉站 GPS 伪距模拟值与实际观测值的差值(方案 1)

Fig. 2 Differences Between Simulated Codes and Real Ones of Wuhan Station

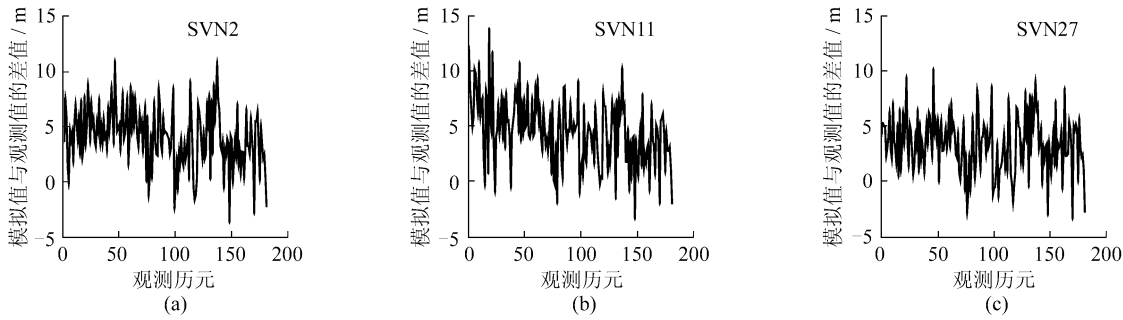


图 3 武汉站 GPS 伪距模拟值与实际观测值的差值(方案 2)

Fig. 3 Differences Between Simulated Codes and Real Ones of Wuhan Station

4 结 语

在武汉站的 GPS 观测值模拟中,由于站坐标采用了 IGS 提供的坐标,部分改正模型采用了处理实际观测值时的模型,因此,根据本文提供的模型编写模拟软件模拟出的 GPS 观测值和实际观测值很接近,说明模拟软件基本是正确的。这些 GPS 模拟观测值可以被用来进行各种定轨、定位方案试验,某些具体问题如粗差及周跳探测模糊度解算等的研究。但也应看到,观测值和模拟值还有一定的差值,特别是在方案 1 中,还存在一些系统误差,这主要是由于电离层模型还不精确,接收机钟差和卫星钟差很难用一个多项式来准确描述等。另外,还存在其他改正模型不太准确的问题。因此,必须仔细研究各种误差改正模型,以尽量提高 GPS 观测值的模拟精度。

参 考 文 献

1 Auton J R, Cruz J. Simulating GPS Receiver Measurement Errors. ION GPS 96, Kansas, Missouri, 1996

2 Illgen Report ISTI-R-087. Draft Standard for Interactive Simulation Protocols for Distributed Interactive Simulation Applications. Version 2.0 (4th Draft). Institute for Simulation and Training, 1994

3 Illgen Report IST96-R-111. Algorithm Characterization Report. Illgen Simulation Technologies, Inc., Goleta, CA, 1996

4 Webb F H, Zumberge J F. An Introduction to GIPSY/OASIS II. JPL D-11088, Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, CA, 1995

5 Schaer H S, Fridez P. Documentation for Bernese GPS Software. Version 4. 2. Astronomical Institute, University of Berne, 2001

6 刘俊,张思东,张宏科. GPS 系统建模与仿真技术研究. 系统仿真学报, 2001, 13(2): 329~330

7 焦文海,周建华. 基于 C/A 码观测量的星载 GPS 动力学定轨. 军事测绘, 1999(6): 46~50

8 文援兰. 航天器精密轨道抗差估计理论与应用的研究: [博士论文]. 长沙: 国防科技大学, 2001

9 刘瑞华,刘建业,姜长生. 利用神经网络仿真 GPS 误差信号. 南京航空航天大学学报, 2001, 33(2): 175~178

10 韩保民. 基于星载 GPS 的低轨卫星几何法定轨理论研究: [博士论文]. 武汉: 中国科学院测量与地球物理研究所, 2003

11 Rim H J. Topex Orbit Determination Using GPS Tracking System. Center for Space Research, The University of Texas at Austin, Texas, 1992

12 Van Dierendonck, McGraw A J, Brown R G. Relationship Between Allan Variances and Kalman Filter Parameters. The 16th Annual PTTI Applications and Planning Meeting, Maryland, 1984

13

Brown R G, Hwang P Y C. Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering (2nd ed). New York: John Wiley & Sons, 1992

14

Yuan Y B, Ou J K. Differential Areas for Differential Stations (DADS)-A New Method of Establishing Grid Ionospheric Model. Science Bulletin, 2002, 47 (12): 1 033~1 036

15

Neil A E. Global Mapping Functions for the Atmospheric Delay at Radio Wavelengths. Journal of Geophysical Research, 1996, 101(B2): 3 227~3 246

16

Bisnath S B, Mendes V B, Langley R B. Effects of Tropospheric Mapping Functions on Space Geodetic Data. The IGS Analysis Center Workshop, Pasadena, California, 1997

17

Flock W L, Smith E K. Natural Radio Noise-A Mini-Review. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1984, AP-32 (7): 754~757

第一作者简介:韩保民,博士,副教授。主要从事 GPS 快速定位、星载 GPS 低轨卫星精密定轨等方面的研究。
E-mail:hanbm@hotmail.com

GPS Observation Simulation

HAN Baomin¹ OU Jikun² QU Guoqing¹

(1 Shandong University of Technology, 12 Zhangzhou Road, Zhangdian District, Zibo 255049, China)
(2 Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 174 Xudong Road, Wuhan 430077, China)

Abstract: An efficient static GPS measurement simulation of ground stations is studied in this paper, especially the significant, principle, flow chart and mathematical models used in GPS measurement simulation are analyzed. Then the simulation of GPS observation of Wuhan station is made. The results show that the GPS observations gained by the simulation method presented in this paper are very close to those observed. Therefore, the simulated GPS observations can meet various demands.

Key words: GPS measurements; simulation; mathematical model

About the first author: HAN Baomin, Ph. D, associate professor, his major research orientation positioning and GPS-based precision orbit determination for low-earth orbiters.
E-mail: hanbm@hotmail.com

(责任编辑: 晓平)

第 10 届《武汉大学学报·信息科学版》编辑委员会

顾 问: 宁津生 张祖勋 李德仁
主任委员: 刘经南
委 员: 万幼川 毋河海 王新洲 申文斌 许才军 朱 庆 朱灼文 朱欣焰
关泽群 孙 洪 孙海燕 刘耀林 张正禄 张剑清 李征航 李建成
李清泉 李 斐 李 霖 杜清运 杜道生 易 帆 罗志才 郑肇葆
费立凡 祝国瑞 柳建乔 胡瑞敏 陶本藻 徐绍铨 袁修孝 秦前清
黄金水 龚健雅 舒 宁
主 编: 刘经南(兼)
常务副主编: 柳建乔