文章编号: 1001- 2486(2009) 03- 0060- 05

高精度 GPS 观测数据的实时仿真研究*

范国清, 王 威, 郗晓宁
(国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

摘 要: 针对高精度 GPS 观测数据实时仿真的需求, 研究了观测数据仿真的基本原理、系统功能组成及适用于实时仿真的数学模型。考虑到模型实现的时间约束特性, 将仿真系统结构划分为非实时层、弱实时层和强实时层, 并采用分布式仿真结构建立了卫星导航观测数据实时仿真系统。算例结果表明: 系统满足强实时性要求, 观测数据仿真具有较高精度。

关键词: 卫星导航; GPS 观测数据; 分布式仿真; 实时仿真
中图分类号: P228 文献标识码: A

High Precision Real-time Simulation of GPS Measurement

FAN Gue-qing, WANG Wei, XI Xiao-ning
(College of Mechatronics Engineering and Automation, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: This paper presents a real-time system structure for high precision GPS measurement simulation. Firstly, the principle, function composing and appropriate mathematical models used in measurement simulation were studied. Secondly, according to different time constrains of different models' realization, a distributed simulation system was proposed to simulate GPS measurement. The system was divided into negative real time part, week real time part and strong real time part accordingly. Finally, an investigation experiment was made. The results showed that simulation system could satisfy the strong real time demand, and the simulated measurement reached a good degree of accuracy.

Key words: satellite navigation; GPS measurement; distributed simulation; real-time simulation

在卫星导航系统的建设初期, 由于导航星座组网尚未全部完成, 系统不能或者只能有限地提供卫星导航信息, 需要利用卫星导航仿真系统生成信号层面上的观测数据, 与实际的卫星导航数据融合组成完整的导航信息, 用于完成导航系统的体制验证、地面信息处理及接收机的功能和性能测试。这种半实物卫星导航仿真系统有别于一般的卫星导航仿真系统, 具有如下特点和要求: (1) 高精度要求, 与一般的卫星导航信号模拟源不同, 该仿真系统产生的数据首先转换为射频信号, 供监测接收机接收后可回传给地面信息处理中心用于定轨和星历预报, 因此对仿真数据的精度提出了很高的要求; (2) 强实时性要求, 仿真系统需要与外部硬件设备进行实时数据交互, 要求仿真系统与外部时钟严格同步, 对系统的实时性提出了很高的要求; (3) 系统繁杂, 且存在众多难以建模的误差因素, 如动态用户的多路径影响、接收机噪声干扰等。目前, 虽然已有不少学者在进行 GPS 观测数据仿真研究[1-3], 但大多没有同时考虑到高精度和强实时性的需求, 因此有必要针对此类半实物卫星导航仿真系统的特点, 开展高精度观测数据实时仿真的深入研究。

1 观测数据仿真原理及系统组成

GPS 观测数据仿真可以简单地看成是 GPS 导航定位的逆过程。导航定位是利用已有的观测值, 在尽可能减少和消除误差的基础上, 对测站的三维位置进行解算; 而观测数据仿真的原理则是利用信号发射时刻的卫星位置和接收时刻的测站位置计算两者之间的几何距离, 进一步叠加卫星、接收机钟差和信

* 收稿日期: 2008- 10- 17
基金项目: 国家 863 计划资助项目(2007AA12Z307)
作者简介: 范国清(1979—), 男, 博士生。

号传播过程中的各种误差得到仿真观测数据。根据仿真原理, 系统的主要功能模块可分为三个组成部分: 空间部分、环境部分和地面部分, 具体功能如图 1 所示。

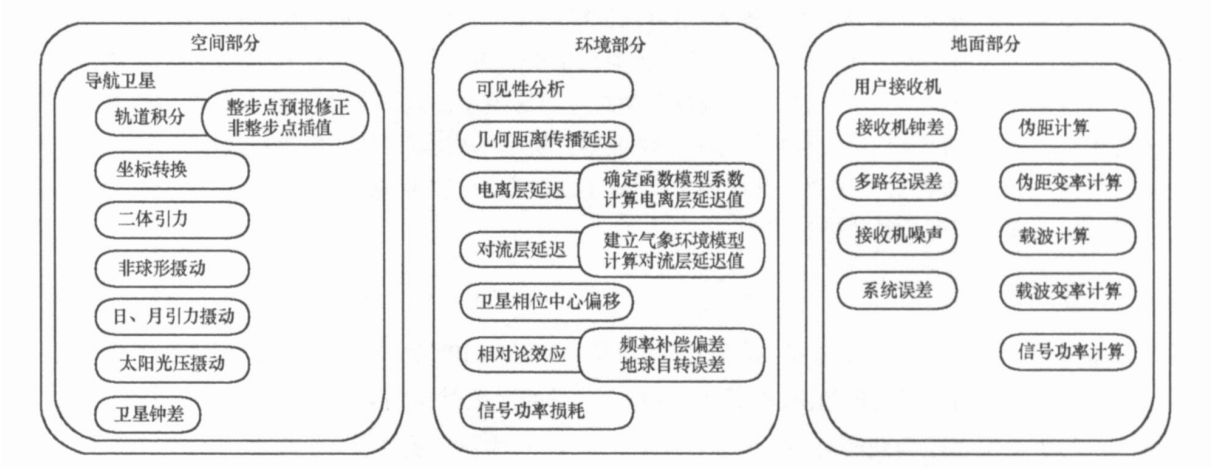


图 1 系统组成及模块功能

Fig. 1 Function composing of simulation system

2 观测数据仿真的数学模型

2.1 伪距及其变率模型

为了得到信号层面上的仿真数据, 需要利用射频发生器将仿真数据转换为射频信号。在射频信号生成时, 为了保证信号的精度和连续性, 需利用伪距及其各阶变率内插生成步长为微秒级的插值伪距。因此本系统除了需计算伪距外, 还需生成伪距一阶、二阶和三阶变率, 其中伪距 ρ 表达式为

$$\rho = R + \sigma, \quad R = \sqrt{(x_s - x_u)^2 + (y_s - y_u)^2 + (z_s - z_u)^2} \tag{1}$$

其中, R 为卫星发射天线到接收机天线的几何距离; (x_s, y_s, z_s)、(x_u, y_u, z_u) 分别为卫星和用户在地固坐标系中的坐标; σ 为各种误差延迟; 对(1)式求导可得到伪距各阶变率的表达式。各阶变率由几何距离变率和误差变率组成, 其中几何距离变率可用解析式表达。考虑到误差的特性及误差模型的复杂度, 误差各阶变率采用数值法进行求解, 具体表达式为

$$\dot{\rho}^k = \frac{\rho^{k+1} - \rho^k}{\Delta t}, \quad \dot{\sigma}^k = \frac{\rho^{k+1} - \rho^k}{\Delta t}, \quad \ddot{\sigma}^k = \frac{\dot{\sigma}^{k+1} - \dot{\sigma}^k}{\Delta t} \tag{2}$$

其中, ρ、$\dot{\sigma}$ 和 $\ddot{\sigma}$ 为伪距误差的一阶、二阶和三阶变率, k、$k+1$ 表示系统的仿真步数, Δt 为系统仿真步长。载波及其变率模型与伪距类似, 在此不再描述。

2.2 卫星轨道模型

由于卫星运动受多种摄动因素影响, 不可能用解析方式得出严格的卫星状态解析解, 故在精密轨道计算中普遍采用数值积分方法计算卫星状态。本文采用了通用的 PECE(Predictor-Evaluation-Corrector-Evaluation) 多步积分算法[4], 按是否计算摄动加速度, 可将该算法分为两部分: 积分整步点和非整步点的状态计算。在整步点时首先将卫星状态从 t_i 点预报到 t_{i+1} 点, 再利用 t_{i+1} 点的预报值计算摄动加速度, 并用计算出的结果修正预报值, 用修正后的 t_{i+1} 点的卫星状态重新计算摄动加速度, 如此循环计算卫星状态直至满足收敛标准。而非整步点的卫星状态可以利用整步点计算得到的后插信息通过内插公式计算, 无需计算摄动加速度, 因此其计算量远小于整步点的计算量, 为实时计算卫星状态提供了可能。具体的卫星运动方程和积分公式参见文献[4]。

2.3 电离层延迟模型

电离层延迟的模型众多[5], 其精度和复杂程度也各不相同, 根据不同的研究目的可选用不同的模型。考虑到仿真观测数据需要与实际的导航信息进行数据融合, 对特定区域的电离层延迟仿真提出了

较高的精度要求,因此本文采用了高精度的多项式电离层模型。该模型属于实时区域函数模型,利用实测的观测数据进行模型系数的实时确定,在实测数据充足的区域内模型精度可达90%以上。但该模型的精度受实测数据的密度及分布影响较大,难以保证模型在实测数据不足的区域内的精度,在实测数据的空白区域甚至会出现模型计算的垂直电子总量为负值的情况。针对这一不足,本文提出了以IGS的全球格网数据作为背景场,联合实测数据进行多项式电离层模型确定的方法。该方法将两种数据的特性进行相互补足:一方面,利用实测数据弥补格网数据分辨率不高,难以体现电离层局部特性的缺陷[5];另一方面,利用格网数据对实测数据进行补充,消除实测数据的空白区域。

多项式电离层模型的具体表达式为

$$I_{\mathrm{VTEC}}=\sum_{i=0}^{n1}\sum_{k=0}^{m1}E_{ik}(\varphi-\varphi_0)^i(s-s_0)^k \tag{3}$$

其中,I_{VTEC}为天顶方向的总电子含量,以TECu为单位(1TECu=10^{16}个电子/m^2);(φ_0, λ_0)为模型展开点的地理经纬度;s_0为模型展开点在该时段中央时刻t_0时的太阳时角,$s-s_0=(\lambda-\lambda_0)+(t-t_0)$;$\lambda$为穿刺点$p$的地理经度;$t$为观测时刻;$n1$、$m1$为模型阶数;$E_{ik}$为模型系数。

对于双频GPS实测数据,VTEC观测方程如下:

$$I_{\mathrm{VTEC}}=9.52437\cos z'(P_{i2}^j-P_{i1}^j+\Delta q^j+\Delta q_i) \tag{4}$$

其中,z'为天顶距;P_{i2}^j为测站i观测卫星j的第二频点伪距;P_{i1}^j为测站i观测卫星j的第一频点伪距;Δq^j为卫星j的频率间偏差;Δq_i为测站i的频率间偏差。将(3)式代入(4)式可得到利用伪距观测值之差($P_{i2}^j-P_{i1}^j$)来确定多项式电离层模型的观测方程:

$$\sum_{i=0}^{n1}\sum_{k=0}^{m1}E_{ik}(\varphi-\varphi_0)^i(s-s_0)^k-9.52437\cos z'(\Delta q^j+\Delta q_i)=9.52437\cos z'(P_{i2}^j-P_{i1}^j) \tag{5}$$

GIM是国际IGS组织对外公布的全球电离层VTEC的二维时变模型:

$$I_{\mathrm{VTEC}}=\sum_{n=0}^{n_{\max}}\sum_{m=0}^{n}P_{nm}\sin\beta[C_{nm}\cos(ms)+S_{nm}\sin(ms)] \tag{6}$$

IGS背景场数据不包括卫星和接收机的频率间偏差。将(6)式代入(3)式可得其观测方程,进一步联合(5)式可得到利用实测GPS数据和IGS背景场数据确定多项式电离层模型的观测方程的最终形式:

$$\begin{cases}\sum_{i=0}^{n1}\sum_{k=0}^{m1}E_{ik}(\varphi-\varphi_0)^i(s-s_0)^k-9.52437\cos z'(\Delta q^j+\Delta q_i)=9.52437\cos z'(P_{i2}^j-P_{i1}^j)\\ \sum_{i=0}^{n1}\sum_{k=0}^{m1}E_{ik}(\varphi-\varphi_0)^i(s-s_0)^k=\sum_{n=0}^{n_{\max}}\sum_{m=0}^{n}P_{nm}\sin\beta[C_{nm}\cos(ms)+S_{nm}\sin(ms)]\end{cases} \tag{7}$$

由(7)式,利用实测的GPS观测数据和GIM背景场数据,考虑两种不同数据的权重,采用加权最小二乘方法可拟合出联合模型的系数,从而确定多项式电离层模型,并将其应用于观测数据仿真系统中。

2.4 对流层延迟模型

采用在卫星导航定位中广泛应用的Hopfield模型作为对流层延迟的仿真模型。该模型利用天顶方向的干、湿折射分量和映射函数计算对流层延迟量。在具有准确气象参数的情况下,该模型精度可以满足系统要求,其中的干分量改正精度可以达到1%~2%,就天顶方向而言,改正误差为2~4cm;湿分量改正精度约为10%~15%,天顶方向的改正误差为3~5cm[6]。但在缺少准确气象参数的情况下,由气象参数的偏差而导致的模型改正误差为dm级甚至m级,远大于模型本身的误差[7]。故在精度要求较高的情况下,气象参数的准确性就成为影响模型改正精度的主要因素之一。考虑到仿真系统需要仿真大范围的观测数据,涉及较大跨度的气象环境,且仿真精度要求较高,因此本文深入分析了气象参数在不同气象环境下对计算对流层延迟的影响,在此基础上栅格化气象站资料,建立了大范围的气象环境模型,并将其应用于卫星导航观测数据实时仿真,将由气象参数的不准确而导致的对流层延迟量误差从dm级减小至cm级,提高了对流层延迟的仿真精度。

2.5 其他模型

在观测数据仿真中还涉及卫星和接收机钟差模型。为了满足系统的精度要求, 本文采用根据实测钟差数据拟合得到的多项式作为钟差模型。另外, 观测数据仿真中还要考虑相位中心偏移、相对论效应、地球自转效应、多路径效应、观测噪声和系统误差等影响。由于受篇幅所限, 这里没有给出各项误差的仿真模型, 其具体描述参见文献[6, 8]。

3 仿真系统体系结构与模型分配

由以上分析可知, 在进行数学模型的程序实现时, 由于部分模型涉及文件的读取操作, 难以实现模型实时计算, 因此基于模型实现的时间约束特性将仿真系统划分为非实时、弱实时和强实时三层结构以及控制管理和数据转发模块[9], 如图 2 所示。其中的控制管理模块负责对系统的仿真运行提供全程控制, 数据转发模块担任非实时层、弱实时层和强实时层之间的数据中转任务, 三层结构完成观测数据的仿真计算, 根据模型实现的时间约束特性, 将模型的仿真计算分布于三层结构中, 具体描述如下。

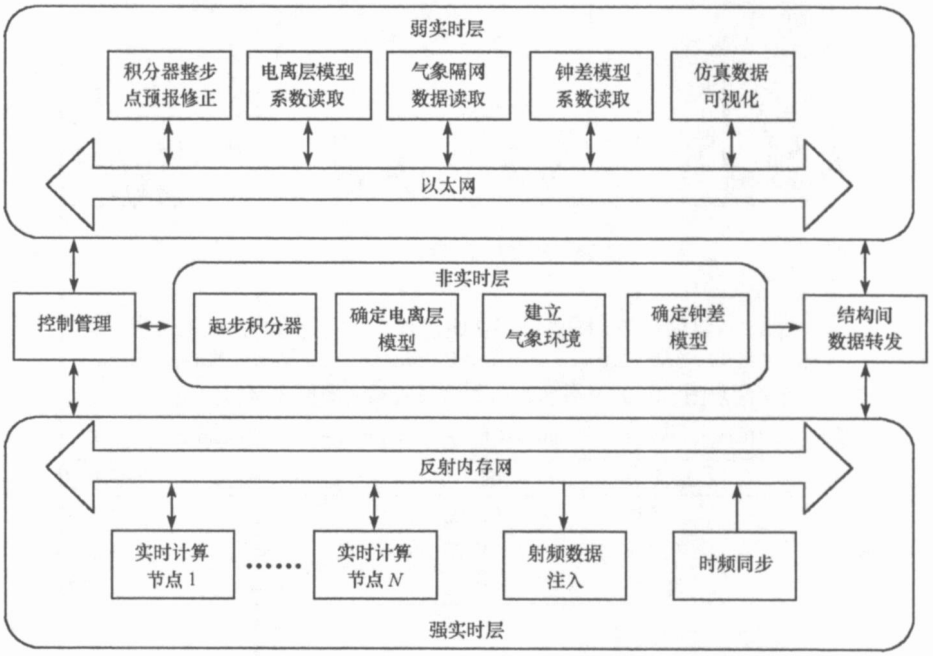


图 2 实时仿真系统结构示意

Fig. 2 The structure of real time simulation system

非实时层是实时仿真之前的准备阶段, 没有实时性约束, 主要完成模型和数据的预处理, 具体包括: 轨道模型的积分起步, 多项式电离层模型系数确定, 利用气象资料建立气象格网模型, 多项式钟差模型确定等。弱实时层处理实时仿真中实时性能要求不高或者难以实时仿真的模块, 在系统总体结构中占据辅助地位。其功能具体包括: 轨道积分器整步点的卫星状态预报修正, 电离层模型系数、气象格网数据和钟差模型系数的读取, 实时仿真数据的记录和可视化等。弱实时层采用以太网技术以打包方式实现模块之间的数据交互, 既满足实时性需求, 又使得系统具有灵活的接口, 便于扩充。强实时层处理实时仿真中存在严格实时性约束的部分, 是系统结构的核心, 担负系统的主要计算任务。具体包括实时模型计算: 插值卫星状态、用户轨迹计算、可见性分析、电离层延迟计算、对流层计算、卫星和接收机钟差计算、其他各种误差计算、伪距及其变率计算、载波及其变率计算和信号功率计算等。强实时层任务繁重, 并要求与外部时钟严格同步, 因此采用反射内存网扩展的分布式体系结构来实现强实时层模块, 将繁重的实时计算任务分布在多台计算机节点上并行处理。如此设计不但能满足系统实时性要求, 而且有利于实现系统的多用户、多星座功能的扩充。

4 仿真算例

为了验证观测数据的仿真精度和系统的实时性能, 仿真了武汉站 2004- 01- 01- 0:00 到 24:00 共 24h 的 GPS 观测数据。由于缺少 GPS 卫星的太阳帆板反射系数、频率间延迟偏差等数据, 在此算例中采用 IGS 提供的精密轨道数据代替 GPS 卫星的轨道积分计算。算例中用到的实测 GPS 观测数据来自中国地壳运动 GPS 监测网, 其数据采样间隔为 30s, 截止高度角为 15°。

在实时仿真过程中, 强实时层所有模块的仿真步长严格一致为 20ms, 即要求系统在每 20ms 内产生一组武汉站观测 GPS 卫星的数据, 包括伪距、载波以及它们的变率数据。为了验证系统是否满足实时性要求, 对强实时层的最大计算耗时进行监视, 结果表明强实时层的最大计算时间小于 20ms, 平均每颗可见星对应的计算时间约为 1.3ms。为了验证观测数据的仿真精度, 比较了双频 P 码伪距的仿真值与实测值的偏差, 限于篇幅, 本文仅给出三颗 GPS 卫星在可见时段内的比较结果, 采样间隔采用实测数据的间隔 30s, 具体如图 3 和表 1 所示。其中图 3 为两者的差值绝对值, 表 1 为差值绝对值的统计结果。

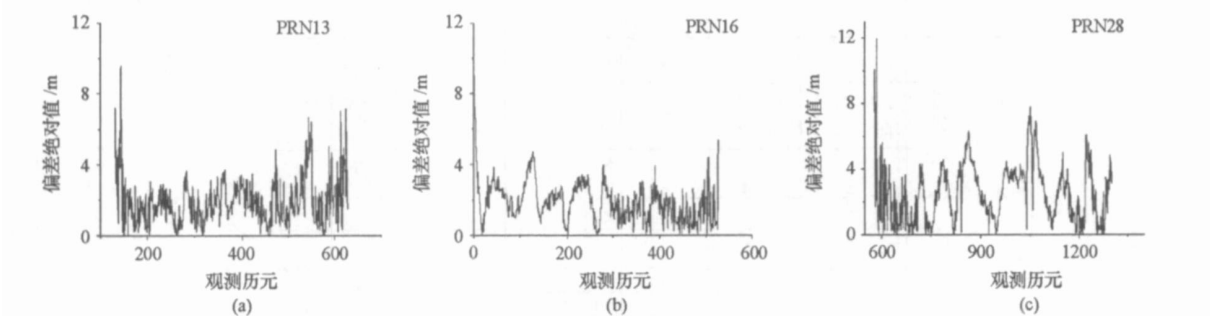


图 3 武汉站观测 GPS 的 P 码伪距仿真值与实测值的偏差绝对值

Fig. 3 Absolute bias between simulated P codes and real ones of Wuhan station

表 1 武汉站观测 GPS 的 P 码伪距仿真值与实测值的偏差绝对值统计结果(m)

Tab. 1 Statistical results of simulated P codes and real ones of Wuhan station (m)

GPS 卫星	最大值	最小值	平均值	标准方差
PRN13	9.58	0.00	1.95	1.32
PRN16	9.04	0.00	1.88	1.13
PRN28	11.98	0.00	2.54	1.72

5 结 论

从武汉站的仿真算例结果可知: 本系统的观测数据仿真具有较高精度, P 码伪距的平均偏差绝对值约为 2m, 可以用于导航系统的体制验证、地面运控系统及接收机的功能和性能测试; 单用户的 GPS 观测数据仿真耗时小于 20ms, 满足半实物仿真系统的强实时性要求。但也应看到, 当观测仰角较小时, 即可见历元的开始和结束时段, 电离层和对流层模型精度较差, 影响了观测数据的仿真精度, 因此必须仔细研究电离层和对流层模型的投影函数, 以提高观测数据的仿真精度。

参 考 文 献:

[1] 韩保民, 欧吉坤, 曲国庆. GPS 观测数据模拟研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2005, 30(3): 246- 250.
[2] 匡翠林, 邹璇, 李陶. 利用 IGS 数据产品进行高精度 GPS 观测数据仿真[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(12): 2857- 2859.
[3] 赵春梅, 欧吉坤. 星载 GPS 低轨卫星跟踪数据的建模与仿真[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(6): 250- 254.
[4] 李济生. 人造卫星精密轨道确定[M]. 北京: 解放军出版社, 1995: 189- 197.
[5] 章红平, 平劲松, 朱文耀. 电离层延迟改正模型综述[J]. 天文学进展, 2006, 24(1): 564- 571.
[6] 魏子卿. GPS 相对定位的数学模型[M]. 北京: 测绘出版社, 1998: 56- 61.
[7] 欧吉坤. GPS 测量的中性大气折射改正的研究[J]. 测绘学报, 1998, 27(1): 563- 568.
[8] Bradford W, James J, Spilker J. Global Positioning System: Theory and Applications[M]. American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc., 1996: 456- 467.
[9] Li G, Yao X Y, Huang K D. An Architecture for Satellite Navigation Signal Simulation[C]// The 2006 International Symposium on GNSS/GPS, Australia, 2006: 1304- 1310.