

文章编号: 1001-1595(2011)S-0026-05

多模全球导航卫星系统融合精密定轨

李 敏^{1,2}, 施 闯¹, 赵齐乐¹, 刘经南¹

1. 武汉大学 卫星导航定位技术研究中心, 湖北 武汉 430079; 2. 武汉大学 测绘学院, 湖北 武汉 430079

Multi GNSS Precision Orbit Determination

LI Min^{1,2}, SHI Chuang¹, ZHAO Qile¹, LIU Jingnan¹

1. Research Center of GNSS, Wuhan University, Wuhan 430079, China; 2. School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: Based on the self developed software PANDA, this paper carries out investigations on integrated precise orbit and clock offset determination of multi GNSS. Then precise orbit and clock offset determination of GPS, GLONASS and GIOVE have been implemented through actual global multi mode receiver data, including GPS/GLONASS, GPS/Galileo experimental satellites (GIOVE). By comparison with IGS provided precise orbits for GPS and GLONASS, together with differences of orbit overlap arc, and SLR observable validation, accuracy of the integrated precise orbit have been evaluated.

Key words: multi GNSS; precise orbit determination; satellite clock offset determination; PANDA

摘 要: 基于武汉大学自主研制的卫星导航系统综合处理软件(PANDA), 利用全球实测的 GPS/GLONASS、GPS/Galileo 试验卫星(GIOVE)多模接收机数据进行 GPS、GLONASS、GIOVE 卫星的融合精密定轨理论与方法研究。通过与 IGS 提供的 GPS 与 GLONASS 卫星精密轨道比较、轨道重叠弧段互差以及 SLR 观测数据检核等多种方法对融合计算的精密轨道精度进行了评定。

关键词: 多模 GNSS; 精密定轨; 钟差确定; PANDA 软件

中图分类号: P228 文献标识码: A

基金项目: 国家自然科学基金(40904007, 40804004); 湖北省自然科学基金(2010CDA069)

1 引 言

卫星导航定位技术在近 30 年得到了迅猛发展, 已广泛地渗透到国家经济建设的各个领域, 极大地推动了国民经济发展和相关领域的技术进步。继美国的 GPS、俄罗斯 GLONASS 后, 目前, 欧洲正在开发 Galileo 卫星导航系统, 我国也正在着手建立功能完善的第二代北斗卫星导航系统(Compass)。这些已建成或正在建设的全球导航卫星系统将组成新一代的全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)。多模接收机将成为卫星导航定位从 GPS 向 GNSS 转变的必然选择, 从而促进多导航系统数据融合这一新的研究方向的形成与发展。各全球卫星导航系统都是基于其特定的时空基准通过导航与精密轨道与卫星钟差, 如 GPS 系统采用 WGS-84 参考框架, GLONASS 系统采用 PZ-90 参考框架, Galileo 系统采用 GTRF 参考框架, Compass 系统也将形成该系统特定的参考框架。因此解决各导

航系统的兼容与互操作问题, 实现多模 GNSS 数据融合, 关键在于提供统一时空基准的导航卫星轨道与钟差产品。

2 多模 GNSS 融合精密定轨数学模型

2.1 PANDA 软件算法介绍

笔者在 PANDA 软件的基础上开展多模 GNSS 融合精密定轨与钟差确定研究, 在详细叙述多模 GNSS 融合精密定轨数学模型前, 有必要介绍 PANDA 软件的基础算法。

(1) 数据编辑采取 Blewitt 在 1990 年提出的单站单卫星数据自动方法, 因此也适用于多模数据处理。对未修复的周跳引入新的模糊度参数, 对未探测的周跳与粗差观测值, 在估计模块的质量控制中进行处理。

(2) 卫星轨道通过其初始时刻的参考状态和力学模型参数描述。轨道积分器采用 Runge-Kutta 起步, Adams-Moulton 多步法预报校正。固体潮汐力、海洋潮汐力、太阳、月亮等第三体行

星引力以及相对论效应引起的轨道摄动力模型参照 IERS2003 标准。重力场模型采用 EGM 96 和 EIGEN 等通用重力场模型。卫星轨道积分算法和模型对多模导航系统基本一致。

(3) 软件采用的观测模型与 IERS 规范一致, 考虑尽可能多的改正项, 包括所有被各 IGS 数据分析中心运行软件所采用的改正模型。未能精确模型化的误差因素, 通过参数估计吸收。

(4) PANDA 软件采用非差处理模式, 非差数据处理获取单卫星观测方程, 易于实现多模数据融合处理。参数估计模块采用均方根信息滤波与最小二乘两个并置的估计器, 均方根信息滤波包括前向均方根信息滤波器(SRIF)和后向均方根信息平滑器(SRIS), SRIF 能有效克服滤波器的发散, 具有较高的数值稳健性和计算高效性, 适合于观测数据实时处理。最小二乘估计器主要应用于事后处理, 这有利于节省计算时间和基于观测值残差的数据再编辑。PANDA 软件采用的观测值模型、摄动力模型以及数据处理流程详细可参见文献[1—3]。

2.2 多模 GNSS 融合精密定轨观测方程

GNSS 观测值中一般采用两种最基本的观测值, 即伪距和载波相位观测值。相比于单一导航卫星系统, 由于不同导航系统间信号延迟的存在, 因此在观测方程中需顾及多模 GNSS 系统间信号延迟量 δt_g 。GPS 卫星轨道与卫星钟差产品精度在已有四大 GNSS 导航系统中依然具有绝对领先优势, 因此在考虑 δt_g 时, 通常以 GPS 卫星信号计算的接收机钟差为参考。从而, 伪距和载波相位非差观测方程可描述为

$$\left. \begin{aligned} P(t_r) &= \rho(t_r) - cdt(t_r) + cdt(t_r) + \\ &\quad c\delta t_g(t_r) + d\rho_{\text{trop}}(t_r) + d\rho_{\text{iono}}(t_r) + \mathcal{E}_p \\ \Phi(t_r) &= \varphi(t_r) - cdt(t_r) + cdt(t_r) + \\ &\quad c\delta t_g(t_r) + d\rho_{\text{trop}}(t_r) - d\rho_{\text{iono}}(t_r) + N + \mathcal{E}_\phi \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中, t_r 为观测历元真时刻; c 为真空中光速; f_i 为接收到的 GNSS 卫星发射的 i 信号频率; $P(t_r)$ 、 $\Phi(t_r)$ 分别表示伪距、载波相位观测值; $dt(t_r)$ 为卫星钟差; $dt(t_r)$ 为接收机钟差; $\delta t_g(t_r)$ 为其他导航系统与 GPS 系统硬件信号延迟量; $d\rho_{\text{trop}}(t_r)$ 为对流层延迟; $d\rho_{\text{iono}}(t_r)$ 为电离层延迟; \mathcal{E}_p 、 \mathcal{E}_ϕ 分别表示伪距、载波相位的多路径、观测噪声等未模型化的影响; $\rho(t_r)$ 为信号发射时刻的卫星位置到信号接收时刻接收机位置之间的几何距

离; N 为模糊度参数。

为消除电离层影响, 非差数据处理基于消电离层组合观测值建立观测方程, 在式(1)的基础上, 可获得多模 GNSS 融合精密定轨消电离层组合伪距 (PC) 观测方程(2)和相位 (LC) 观测方程(3)。

$$PC(t_r) = (f_1^2 P_1 - f_2^2 P_2) / (f_1^2 - f_2^2) = \varphi(t_r) - cdt(t_r) + cdt(t_r) + c\delta t_g(t_r) + d\rho_{\text{trop}}(t_r) + \mathcal{E} \quad (2)$$

$$LC(t_r) = (f_1^2 \Phi_1 - f_2^2 \Phi_2) / (f_1^2 - f_2^2) = \varphi(t_r) - cdt(t_r) + cdt(t_r) + \delta t_g(t_r) + d\rho_{\text{trop}}(t_r) + N + \mathcal{E} \quad (3)$$

2.3 多模 GNSS 融合精密定轨观测模型与动力学模型

在导航卫星精密定轨中, 动力学信息和几何观测信息是可以被利用的两大类信息。几何观测信息能提供离散的高精度观测值; 而动力学信息能够在一定弧段内提供较为精确的连续运动状态。GNSS 融合精密定轨观测模型与动力学模型与单导航系统精密轨道确定模型没有实质差异, 主要差异在于观测模型中各导航系统观测测量精度不一致性以及需要顾及导航系统间信号延迟量。详细观测模型如表 1 所示。动力学模型如表 2 所示。

表 1 多模 GNSS 融合精密定轨观测模型

Tab. 1 Observation mode of multi GNSS precise orbit determination

| 模型 | 描述 |
|-----------|--|
| 观测量 | 双频无线电离层载波相位组合和伪距组合 LC 和 PC |
| 数据采集间隔 | 10 s |
| 观测值加权方式 | 不同导航系统观测值分别给点先验权; $p = 1, e > 30^\circ; p = \sin e, e \leq 30^\circ$ |
| 截止高度角 | 7° |
| 天线相位中心改正 | 考虑 |
| 相位缠绕 | 考虑 |
| 激光偏心改正 | 考虑 |
| 对流层改正 | 模型: Saastamoinen 模型 投影函数: GMF 模型 |
| 电离层改正 | 无线电离层组合 |
| 相对论改正 | 考虑 |
| 潮汐改正 | 固体潮、海潮、极潮 |
| 卫星钟差 | 随机过程估计 |
| 接收机钟差 | 随机过程估计 |
| 系统间硬件信号延迟 | 随机过程估计 |
| 测站坐标 | 固定 |
| 模糊度 | 浮点解 |
| 卫星初始轨道参数 | 卫星位置、速度、5 个 Bern 参数 (D_0 、 Y_0 、 B_0 、 B_C 、 B_S) |

表2 多模 GNSS 融合精密定轨动力学模型
 Tab. 2 Dynamic mode of multi GNSS precise orbit determination

| 模型 | 描述 |
|-------|---------------------------|
| 地球重力场 | EIGEN_GLO4 前 8 阶 |
| n 体引力 | 太阳、月亮和其他行星(DE405) |
| 潮汐 | 固体潮、海潮和极潮 |
| 相对论效应 | 考虑 |
| 太阳光压 | BERN 光压模型 |
| 大气阻力 | 不考虑 |
| 轨道积分 | RKF6(7) 起步, Adams 预报校正多步法 |

3 多模 GNSS 融合精密定轨结果及分析

基于以上介绍的多模 GNSS 融合精密定轨理论和方法,利用实测和仿真观测数据进行了多模 GNSS 融合精密定轨方法验证,包括分别利用真实双模观测数据实现 GPS/GLONASS、GPS/Galileo 导航系统融合精密定轨。

3.1 GPS/GLONASS 融合精密定轨

GPS 和 GLONASS 是目前仅有能提供正常导航定位服务的导航卫星系统,在全球 IGS 跟踪站中,双模接收机跟踪站数量已达到 130 个左右,本文选取其中分布较为均匀的 75 个观测站,计算统一时空框架下的 GPS 和 GLONASS 卫星轨道,跟踪站分布如图 1 所示。

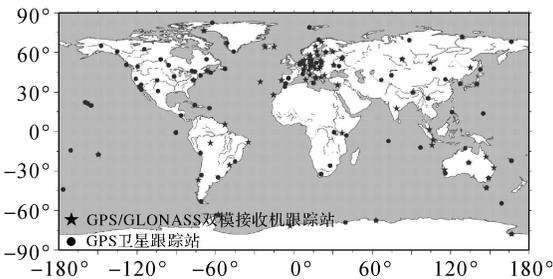


图 1 GPS/GLONASS 多模基准站分布图

Fig. 1 GPS/GLONASS multi mode stations

GPS/GLONASS 融合精密定轨时间选取为 2010 年年积日第 250 天观测数据,采用单天弧度模糊度浮点解策略,计算的 GPS/GLONASS 卫星轨道采取与 COD 分析中心提供的精密轨道产品比较的策略进行轨道精度评定。轨道三维平均精度和径向精度如图 2 所示。

由于动力学模型精度,星座完整性以及观测数据精度等各方面差异的存在,即使采用融合定轨算法,GPS 与 GLONASS 卫星轨道精度依然存在明显的差异。从图 2 可以看出 GPS 星座(G01~ G32)

平均三维轨道精度 3 cm,而 GLONASS 星座(R1~ R24) 平均三维轨道精度在 6 cm 左右,与 IGS 发布的精密轨道精度相当。与导航定位紧密相关的轨道径向精度均达到优于 5 cm 的精度。

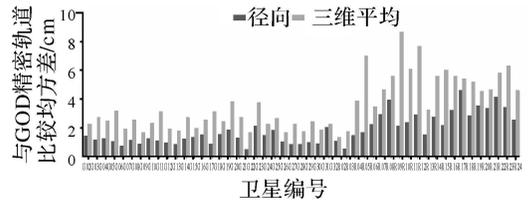


图 2 GPS/GLONASS 融合定轨精度

Fig. 2 GPS/GLONASS orbit precision

图 3 为采用 GPS/GLONASS 多模 GNSS 融合精密定轨算法与 GPS 单导航星座定轨精度对比。

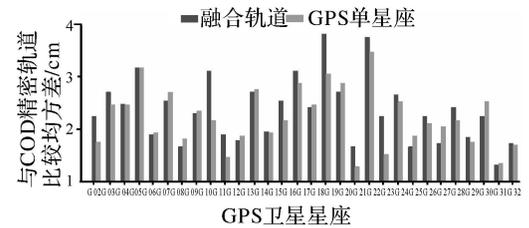


图 3 多模 GNSS 融合定轨与单星座精密定轨比较

Fig. 3 Multi GNSS orbit determination compared with single GNSS orbit determination

从图 3 可以看出融合轨道精度与单星座轨道精度基本一致,存在稍微降低,约 2 mm 的精度损失,GPS 单星座三维平均轨道精度为 2.2 cm,采用融合算法后精度为 2.4 mm,这主要由于多模 GNSS 观测数据精度差异所致,在此处融合尚将不同导航系统观测值视为等权精度。

3.2 GPS/Galileo 融合精密定轨

为试验和调试 Galileo 系统的导航信号和服务质量,欧空局于 2003 年计划发射两颗试验卫星 GIOVE。GIOVE 卫星跟踪站由 13 个全球分布的 Galileo 传感器试验站 GESS (Galileo experimental sensor stations) 组成^[4-5],其中国区域的唯一建位于武汉大学校内。GESS 跟踪网配备有双模接收机(Galileo experimental test receiver, GETR)。GESS 跟踪网分布图如图 4 所示。

利用图 4 所示的 13 个 GPS/Galileo 双模观测站数据,计算统一时空框架下的 GPS 和 Galileo 试验卫星轨道。采用 2007 年年积日第 125 天—第 131 天一周观测数据,以 2 d 为计算弧长定轨计算,该时期尚未发射 GIOVE-B 卫星,融合定轨

- System Test Bed V2 for Orbit and Clock Modeling [C] // Proceedings of ION GNSS 2006. Fort Worth: [s. n.], 2006.
- [5] URSCHL C, BEUTLER G, GURTNER W. Orbit Determination for GIOVE A Using SLR Tracking Data [C] // Proceedings of the 15th International Workshop on Laser Ranging. Auckland: EOS Space Systems Pty Limited, 2008: 40-46.
- [6] ZHAO Qile, LIU Jingnan, GE Maorong. High Precision Orbit Determination of CHAMP Satellite [J]. Geospatial Information Sciences, 2006, 9(3): 180-186.
- [7] CRISI M, HOLLREISER M, FALCONE M, et al. GIOVE Mission Sensor Station Receiver Performance Characterization: Preliminary Results [C] // Navitec 2006. Noordwijk: ESTEC, 2006.
- [8] SIMSKY A, SLEEWAEGEN J M, HOLLREISER M, et al. Performance Assessment of Galileo Ranging Signals Transmitted by Gstr V2 Satellites [C] // Proceedings of ION GNSS 2006. Fort Worth: [s. n.], 2006.
- [9] SPRINGER T A, BEUTLER G, ROTHACHER M. A New Solar Radiation Pressure Model for GPS Satellites [J]. GPS Solutions, 1999, 2(3): 50-62.
- [10] PANY T, IRSIGLER M, EISSFELLER B, et al. Code and Carrier Phase Tracking Performance of a Future Galileo RTK [C] // Proceedings of the European Navigation Conference ENG-GNSS 2002. Copenhagen: [s. n.], 2002: 27-30.
- [11] GATTI G, GARUTTI A, MANDORLO G, et al. The GIOVE A Satellite: From Design to in-orbit Commissioning [C] // Proceedings of ION GNSS 2006. Fort Worth: [s. n.], 2006.
- [12] MERCIER F, LAURICHESSE D, DELPORTE J, et al. First GIOVE A Orbit Determination at CNES [C] // Proceedings of EGU General Assembly. Vienne: [s. n.], 2007.
- [13] GENG Tao. Real-time Precise Orbit Determination Theory for Navigation Satellite and Its Experimental Application Based on Regional Reference Stations [D]. Wuhan: Wuhan University, 2009. (耿涛. 基于区域基准站的导航卫星实时精密定轨理论与试验应用 [D]. 武汉: 武汉大学, 2009.)

(责任编辑:雷秀丽)

收稿日期: 2011-01-12

修回日期: 2011-03-20

第一作者简介: 李敏(1983-), 男, 博士生, 主要研究方向为导航卫星精密定轨与精密定位。

First author: LI Min (1983-), male, PhD candidate, majors in GNSS satellite orbit determination.

E-mail: lim@whu.edu.cn

(上接第 25 页)

224-228. (瞿锋, 王谭强, 陈现军, 等. 用 SLR 资料精密确定 GPS35 卫星轨道 [J]. 测绘学报, 2003, 32(3): 224-228.)

- [10] PENG Dongju, WU Bin. Zero-difference and Single-difference Precise Orbit Determination for LEO Using GPS [J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(6): 715-719. (彭冬菊, 吴斌. 非差和单差 LEO 星载 GPS 精密定轨探讨 [J]. 科学通报, 2007, 52(6): 715-719.)
- [11] ZHANG Qiang, LIAO Xinhao, HUANG Cheng. An Investigation of the Precise Orbit Determination by Combination of Two Kinds of Measurements [J]. Acta Astronomica Sinica, 2000, 41(4): 347-354. (张强, 廖新

浩, 黄斌. 两种观测技术综合精密定轨的探讨 [J]. 天文学报, 2000, 41(4): 347-354.)

(责任编辑:雷秀丽)

收稿日期: 2011-01-10

修回日期: 2011-03-20

第一作者简介: 郭睿(1982-), 男, 博士, 工程师, 主要从事卫星导航与精密定轨技术研究。

First author: GUO Rui (1982-), male, PhD, engineer, majors in the research of satellite navigation and precise orbit determination.

E-mail: guorui@shao.ac.cn