

POD of One GNSS Satellite Based on Multi-Model GNSS Receiver on Ground Stations and LEOs

ZHAO Qile^{1,2}, LI Min³, HOU Fen³

²GNSS Research Center, Wuhan University, 129 Luoyu Road,

²State key laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China

³School of geodesy and geomatics, Wuhan University, Wuhan, China
e-mail: Zhaoql@whu.edu.cn

Abstract: Compatibility and Interoperability of GNSS is a important and rapidly developing research area. In order to study compatibility of the reference frames of different GNSS, precise orbit determination (POD) of one navigational satellite of new GNSS with the help of the exit GPS system using the data from multi-model GNSS receivers, was analyzed in this contribution. The approach used is the same as what was used in the POD of GIOVE-A satellite based on GPS/Galileo receivers. After that the integrated solution of onboard and ground multi-model GNSS data were studied, the result shows, adding the multi-model GNSS data onboard LEOs, can improve the quality of the determined orbit and clock of the new GNSS satellite, and is useful for improving the compatibility of the reference frames of different GNSS.

Keywords: LEO; multi-model GNSS receiver; POD; integrated solution

基于星载与地面多模接收机的导航卫星 单星定轨仿真分析

赵齐乐^{1,2}, 李 敏³, 侯芬³

¹武汉大学卫星导航定位工程技术研究中心, 武汉市珞瑜路 129 号, 中国, 430079

²武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉市珞瑜路 129 号, 中国, 430079

³武汉大学 测绘学院, 武汉, 中国, 430079

e-mail: Zhaoql@whu.edu.cn

摘 要: 多卫星导航系统的兼容和互操作是目前导航系统建设和相关研究的重要方向。本文瞄准的是多卫星导航系统时空基准之间兼容性问题, 以 GPS 实测数据仿真为手段, 首先研究了基于已有导航系统时空基准, 利用多模接收机数据的新建卫星导航系统单星定轨, 这与目前 Galileo 卫星导航系统在轨验证阶段采用地面 GPS/Galileo 多模接收机确定实验卫星轨道的方法是一致的; 同时, 本文还将地面多模接收机拓展到了低轨卫星搭载的情况, 结果显示, 星载多模接收机数据的加入有利于提高新建单颗导航卫星轨道的确定精度, 从而促进多导航系统时空基准的一致性。

关键词: 低轨卫星; GNSS 多模接收机; 精密定轨; 联合求解

1 引言

随着 Galileo/COMPASS 等卫星导航系统的建成, 多系统兼容和互操作将成为导航领域研究的重要主题。多系统导航信息的兼容性主要体现在导航系统时

空基准之间的一致性。多模接收机必然成为未来解决多系统联合应用最为关键的终端设备。基于多模接收机基准站的观测数据, 卫星导航系统及相关服务系统将可为用户提供更为高精度的多系统融合导航和精密定位服务信息。

多系统之间高精度时空基准的统一主要依赖于多模接收机提供的观测数据, 时空基准实现手段主要是地面基准站的坐标系列和导航卫星轨道和钟差序列

本文得到了国家自然科学基金 (No: 40874004)、973 项目 (No:2006CB701301)、863 项目(2006AA12Z326 和 2007AA12Z345)以及高等学校学科创新引智计划 (B07037) 的资助

[1]。Galileo 卫星导航系统在轨验证阶段，就充分利用了全球分布的 13 个多模接收机基准站的数据^[2]，基于 GPS 系统提供的时空基准实现了实验卫星（GIOVE-A 和 GIOVE-B）的精密定轨和时间同步^[3,4]。

近年来，低轨卫星的星载 GPS 数据与地面数据的联合精密定轨的研究显示：低轨卫星星载数据与地面数据的联合处理，可以有效提高 GPS 卫星轨道精度、增强坐标框架解的强度^[5-7]。本文以 GPS 实测数据，仿真研究了在低轨卫星上搭载多模接收机的情况下，星地数据联合处理对新建卫星导航系统单星定轨精度的影响。文中给出了较为详细的数据处理策略和结果分析。

2 数据处理策略

基于 GPS 实测数据的仿真分析，利用 PRN5 卫星仿真新建导航系统（Galileo/COMPASS 系统）单颗导航卫星。采用以下 3 步。

（1）利用 IGS 精密轨道和钟差作为时空基准（不包含 PRN5），以三天作为一个观测弧段，实现地面站和低轨卫星的时间同步和精密定轨；

（2）在固定地面站位置、接收机钟差和对流层模型参数的基础上，实施 PRN5 卫星单星定轨，本策略与 Galileo 实验卫星单星定轨一致；

（3）在前两步的基础上，固定 LEO 轨道和钟差后，联合地面数据实施导航卫星单星精密定轨和时间同步。

以上 3 步数据处理策略，与地面站和低轨卫星搭载多模（如 GPS/COMPASS）接收机，对新建卫星星座（如 COMPASS）实施精密定轨的原理是等效的。具体数据处理流程如下图：

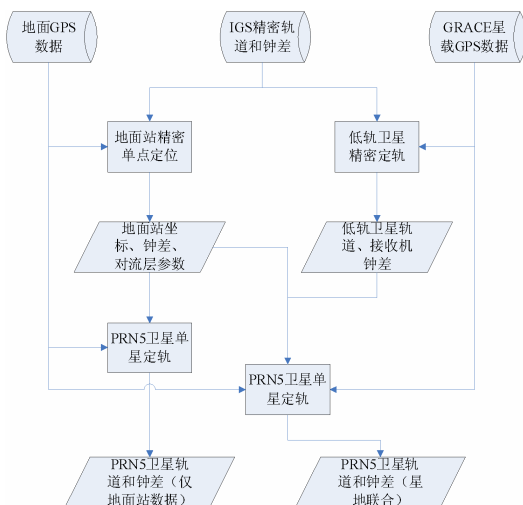


Figure 1. Flow chart of the orbit determination
图 1. 单星精密定轨数据处理流程图

相关模型及待估参数设置如下表所示。

3 结果及分析

按照上述数据处理策略，本文选取了 7 个 IGS 基准站的数据，测站分布如下图所示。将 GPS 卫星的 PRN5 卫星作为仿真新建卫星导航系统卫星（如 Galileo 和 COMPASS 卫星）。数据处理过程中，时空基准来自 IGS 的精密轨道和钟差产品。

Table 1. Models and parameter settings
表 1. 模型和参数设置

模型与参数设置	说明
模型	
重力场模型	EIGEN-GL04C,GPS: 12 阶次; GRACE: 120 阶次
固体潮	IERS 2003 conventions
海潮	FES2004
三体引力	JPL DE 405
极移潮汐	IERS2003
相对论效应	IERS2003
大气阻力	GPS 无, GRACE:DTM94
参考框架	
惯性系	J2000
地固系	ITRF2005
EOP	IERS C-04
估计参数	
轨道初值	3 位置和 3 速度参数
大气阻力	每弧段一个
经验加速	1.5 小时 6 个周期性参数
太阳光压	GPS:采用 BERN 光压模型, 每弧段估计一套; GRACE: 基于表面积积分 每 2 小时估计一次
地面站对流层延迟	

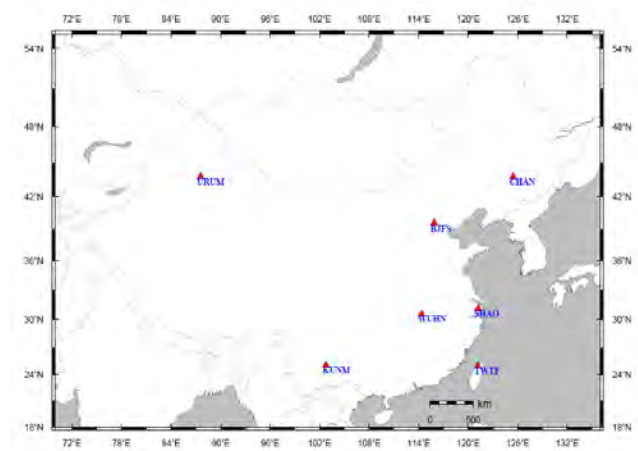


Figure 2. Map of 7 IGS stations used
图 2. 7 个 IGS 监测站分布图

数据处理软件采用了武汉大学自主开发的卫星导航数据综合处理软件-PANDA 软件^[8,9]，地面站的精密定位精度可达到优于 1cm 的水平^[9]，GRACE 卫星的精密定轨精度可以达到 2-3cm^[10]。

在仅采用地面站数据的条件下，得到了 PRN5 精密轨道和钟差，结果与 IGS 事后精密轨道比较，得到 10 个观测弧段解的统计结果，如图 3 所示。

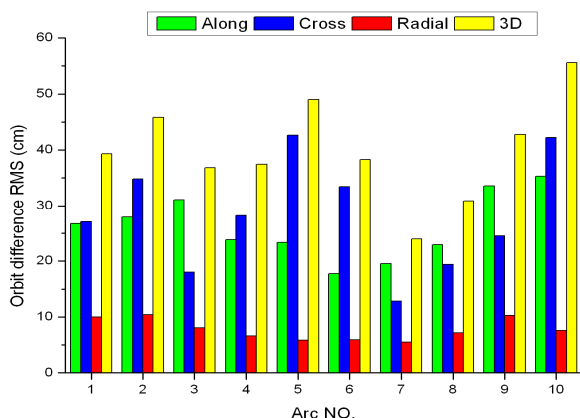


Figure 3. Difference between IGS final orbits products and the ones obtained from data only of ground stations

图 3. 仅采用地面站计算得到的 PRN5 卫星轨道的精度

仅采用地面站数据的条件下，采用 IGS 提供的精确的时空基准，可以较好地确定地面站的坐标、钟差和对流层参数。从图 3 可知，在仅有 7 个分布于中国区域的基准站的条件下，仿真导航卫星的单星定轨精度可以达到径向 8-10cm，三维 40-50cm。和利用全球分布的 13 个 Galileo 基准站确定的在轨实验卫星 GIOVE-A 卫星的精度^[3]相当。

将 GRACE 卫星的轨道和钟差固定，可将其视为一个流动的基准站，将星载的数据与地面的数据联合处理可以得到 PRN5 卫星的轨道，轨道与 IGS 精密轨道比较可以得到如下结果（见图 4）。

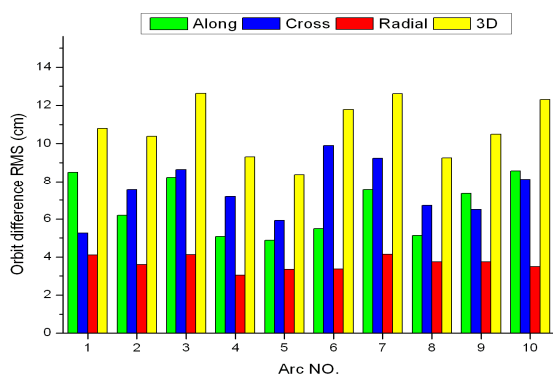


Figure 4. Difference between IGS final orbits products and the ones obtained from data of GRACE and ground stations

图 4. 加入 GRACE 星载数据后计算得到的 PRN5 卫星轨道的精度

从图 4 可知，在有 GRACE 星载数据联合处理的条件下，PRN5 单星定轨精度达到了径向 3cm 和三维 11cm 左右精度。比较图 3 和图 4 可知，星载数据的加入，可以有效地提高导航卫星单星定轨的精度，在区域站分布条件下，提高幅度可达 2-3 倍。由于本文采用时间同步采用的是 IGS 卫星轨道和钟差，上述与 IGS 精密轨道的比较有一定的自相关性，为了进一步验证上述卫星轨道的精度，我们采用 SLR 数据对 PRN5 卫星轨道进行检验，结果如图 5 所示。

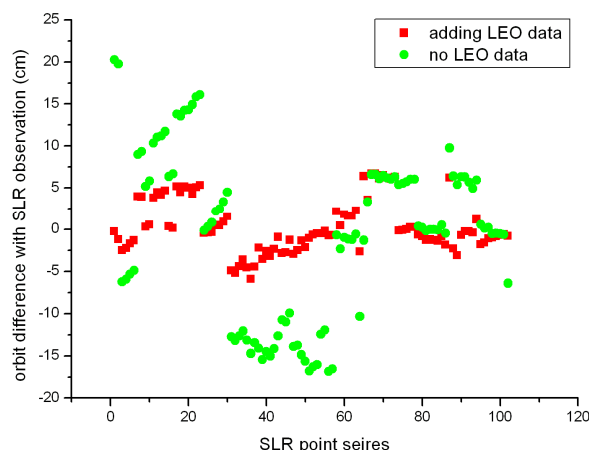


Figure 5. Validation by SLR residuals

图 5. SLR 检验残差序列图

SLR 观测值检验结果显示，仅采用地面站时，SLR 的检验残差在 ± 20 cm 区间，而采用星载数据后，SLR 的检验残差在 ± 5 cm 区间，结果同样有明显提高，幅度为 2-3 倍。

对于地面用户来说，卫星轨道和卫星钟差是一对相关的参数，卫星钟差的精度与卫星轨道同样重要，为了衡量导航产品对地面定位用户的影响，我们有必要引入空间信号等效距离误差（SISRE）^[11] 这样一个概念来评价卫星轨道和钟差的综合性能。SISRE 可以用如下的一个简化公式来描述：

$$SISRE = \sqrt{(R - CLK)^2 + \frac{1}{49}(A^2 + C^2)} \quad (1)$$

其中 R、A、C 分别为径向、切向和法向的轨道偏差，CLK 为卫星钟差的偏差。

文中对两种情况下的 SISRE 进行了统计，考虑到地面测站为区域分布特点，仅对可视弧段（即至少有一个地面站对该导航卫星有观测值）进行了统计，统计结果如图 6 所示。

从统计结果分析来看，在可视弧段，在仅有地面基准站条件下，卫星轨道和钟差所引起的 SISRE 分别为 10cm，在加入低轨卫星流动基准站后，SISRE 精度

有大幅提高, 达到了 3 cm 左右, 提高了 2-3 倍。这说明低轨卫星数据的加入, 有利于提高导航卫星轨道和钟差的精度, 提高导航定位用户的精度水平。

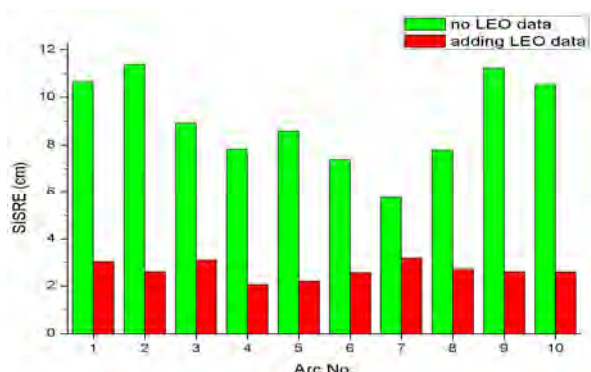


Figure 6. SISRE of the computed orbit and clock products of PRN5
图 6. 本文计算的 PRN5 卫星轨道和钟差的空间信号等效距离误差统计图

4 结语

本文利用地面和星载实测 GPS 数据仿真分析了在地面以及低轨卫星搭载多模 GNSS 接收机条件下, 利用已有导航卫星系统实施精密定位和时间同步的基础上, 对新卫星导航卫星精密定轨的情况。

文中利用我国境内 7 个 IGS 基准站和 1 颗 GRACE 卫星实测数据仿真结果显示, 如果利用 GPS 系统的精密轨道和钟差来为兴建系统卫星提供时空基准, 三天弧段, 导航卫星单星定轨的精度可以达到径向 8-10, 三维 40-50cm 的定轨精度; 如果结合低轨卫星搭载的多模接收机, 单星定轨精度可达到径向 3cm 三维 11cm 左右的精度, 相对仅采用地面基准站的结果, 可提高 2-3 倍, 效果非常明显。

文中在中国境外无可视基准站时, 仅利用基准站无法获取卫星钟差, 加入低轨卫星后可以获得卫星钟差, 但无法比较。文中仅对我国基准站可视弧段进行统计, 加入低轨卫星星载多模数据, 可以将导航卫星轨道和钟差所对应的空间信号等效距离误差提高 2-3 倍, 由原有的 10cm 左右提高到 3cm 左右。

本文仿真分析的结果说明, 在事后处理模式下, 低轨卫星搭载多模接收机数据与地面数据联合求解, 有利于促进导航系统之间的时空基准之间一致性, 特别是对于新建区域卫星导航系统, 星载多模接收机可以大幅提高其精密定位服务水平。

References (参考文献)

- [1] McCarthy, D. D. (ed.). IERS Technical Note, IERS Conventions [M]. Paris: Observatoire de Paris, 1996.
- [2] Crisci M, Hollreiser M, Falcone M, *et al.* GIOVE Mission Sensor Station Receiver Performance Characterization: Preliminary Results[C]. NAVITEC, Noordwijk, 2006.
- [3] Mercier F, Laurichesse D, Delporte J, *et al.* First GIOVE-A Orbit Determination at CNES[C]. EGU General Assembly, Vienne, 2007.
- [4] Pririz R, Mozo A, Tobias G, *et al.* Estimation and Prediction of the GIOVE Clocks[C]. 40th annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting, Virginia, Dec. 01-04, 2008
- [5] Zhu S, Reigber. Ch., Konig. R. (2004) Integrated adjustment of CHAMP, GRACE, and GPS data. Journal of Geodesy, 2004.
- [6] Zhao Qile Liu Jingnan, Ge Maorong, *et al.* Precise Orbit Determination OF GPS and CHAMP Satellites with PANDA Software [J], Journal of Geodesy and Geodynamics. 2005, 25(2), P133-137(Ch).
赵齐乐, 刘经南, 葛茂荣等. 用PANDA对GPS和CHAMP卫星精密定轨, 大地测量与地球动力学 2005, 25(2), P133-137.
- [7] Geng Jianghui, Shi Chuang, Zhao qile, *et al.* GPS Precision Orbit Determination from Combined Ground and Space-borne Data. Geomatics and Information Science of Wuhan, 2007, 32(10), P 906-909.(Ch)
耿江辉, 施闯, 赵齐乐等. 联合地面和星载数据精密确定GPS卫星轨道, 武汉大学学报(信息科学版), 2007, 32(10), P 906-909.
- [8] Liu Jingnan, Ge Maorong, PANDA Software and Its Preliminary Result of Positioning and Orbit Determination[J], Wuhan University Journal of Natural Sciences, 2003-6, Volume 8, No.2 B, pp. 603-609.
- [9] Zhao Qile, Research on Precision Orbit Determination Theory and Software of both GPS Constellation and LEO Satellites [D], Wuhan University, Wuhan, 2004 (Ch).
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], 武汉大学博士学位论文, 2004.
- [10] Zhao Qile, Liu Jingnan, Ge Maorong. High Precision Orbit Determination of CHAMP Satellite [J]. Geospatial Information Scienc, 2006, 9 (3), P180-186.
- [11] David L. M. Warren1 and John F. Raquet. Broadcast vs. precise GPS ephemerides: a historical perspective[J], GPS Solutions, 2003, 7(4), pp. 151-156.