

VLBI 和 GPS 观测联合解算地球自转参数和日长变化

魏二虎¹ 刘文杰¹ WEI Jianan² 金双根³ 刘经南⁴

1 武汉大学测绘学院,湖北 武汉,430079

2 新南威尔士大学建筑环境学院,澳大利亚新南威尔士,2052

3 中国科学院上海天文台,上海,200030

4 武汉大学 GNSS 中心,湖北 武汉,430079

摘要:利用 GAMIT 软件处理了 2005 年 9 月、2006 年 1 月和 2 月每天 17 个 IGS 国际 GNSS 服务(International GNSS Service, IGS)站的 GPS 观测数据,获得了地球自转参数(Earth rotation parameter, ERP)和日长变化(Δ LOD),并与 IGS 综合解进行了对比。利用 OCCAM 6.2 软件处理了相同时间内的甚长基线干涉测量(very long baseline interferometry, VLBI)观测数据,将解算结果与国际 VLBI 服务(International VLBI Service, IVS)结果进行了对比。分别采用基于内符合精度和 IERS 08C04 序列的定权方法对 VLBI 解算结果与 GPS 解算结果进行了加权平均,获得了 VLBI 和 GPS 技术对 ERP 和 Δ LOD 的协议结果。研究表明,VLBI 解算结果与采用的插值方法有较大的关系,基于 IERS 08C04 序列的加权平均方法达到了利用 VLBI 解算结果对 GPS 解算结果进行修正的目的。VLBI 和 GPS 技术的联合弥补了 VLBI 观测数据密度不够和 GPS 解算结果不稳定的缺陷,使解算结果的稳定性和可靠性有所提高。

关键词:地球自转参数;日长变化;联合;GPS;甚长基线干涉测量

中图法分类号:P228.42

文献标志码:A

高精度地球定向参数(Earth orientation parameter, EOP)是地球参考框架和天球参考框架之间相互转换的重要参数,也影响时间系统(协调世界时 UTC 与世界时 UT1)的相互转换,在飞行器的精密定位和导航方面^[1-2]应用广泛并且包含了丰富的地球动力学信息。目前主要利用甚长基线干涉测量(very long baseline interferometry, VLBI)观测数据解算 EOP,精度高且稳定性强^[3],但是测站较少且不连续;而全球定位系统(GPS)数据能够解算地球自转参数,在 GPS 测站很多且分布较为理想的情况下,其解算精度可以与 VLBI 解算精度相当。GPS 技术能够提供高精度、高分辨率的地球自转参数(Earth rotation parameter, ERP)序列值,有效地弥补了 VLBI 技术观测密度不够的缺陷,但是,GPS 解算地球自转参数的稳定性有待提高。联合 GPS 和 VLBI 技术解算地球自转参数能较好地利用两者

的优势,弥补互相的不足,有望获得精度高和稳定性好的 ERP 和日长变化解算结果。

1 GPS 与 VLBI 解算原理

1.1 GPS 估计地球自转参数基本原理

采用双差模型解算地球自转参数^[4-5],待估参数为站坐标、卫星坐标、地球自转参数和中性大气延迟。GPS 载波相位观测值表示为待估参数的函数模型:

$$L = M(t, X_{SP}, X_T, X_N, X_{erp}, X_{atm}) + \epsilon \quad (1)$$

式中, M 表示观测量与待估参数的函数模型; t 为时间; X_{SP} 为初始时刻的轨道根数和摄动参数(辐射压模型); X_T 为测站坐标; X_N 为相位模糊度; X_{erp} 为地球自转参数; X_{atm} 为大气延迟; ϵ 为观测噪声。

将式(1)线性化为:

收稿日期:2013-08-24

项目资助:国家自然科学基金(41374012);武汉大学测绘学院 2012 年本科专业综合改革教学研究项目(201220);卫星导航定位系列课程国家级教学团队(214275482)。

第一作者:魏二虎,博士,教授,现主要从事空间大地测量和地球动力学研究。ehwei@sgg.whu.edu.cn

$$L = C_0 + \frac{\partial M}{\partial X_{SP}} \delta X_{SP} + \frac{\partial M}{\partial X_T} \delta X_T + \frac{\partial M}{\partial X_N} \delta X_N + \frac{\partial M}{\partial X_{erp}} \delta X_{erp} + \frac{\partial M}{\partial X_{atm}} \delta X_{atm} + \epsilon \quad (2)$$

式中, C_0 表示由近似参数计算出的理论观测值。地球自转参数偏导数可表示为:

$$\frac{\partial M}{\partial X_{erp}} = \frac{\partial M}{\partial \rho} \frac{\partial \rho}{\partial \mathbf{R}_1} \frac{\partial \mathbf{R}_1}{\partial X_{erp}} = \frac{(\mathbf{r} - \mathbf{R}_1)}{\rho} \frac{\partial \mathbf{R}_1}{\partial X_{erp}} \quad (3)$$

式中, \mathbf{r} 和 \mathbf{R}_1 分别表示为卫星和测站在惯性坐标系中的位置矢量; ρ 为站星之间的距离; $\frac{\partial \mathbf{R}_1}{\partial X_{erp}}$ 分别包括 $\frac{\partial \mathbf{R}_1}{\partial x_p}$ 、 $\frac{\partial \mathbf{R}_1}{\partial y_p}$ 和 $\frac{\partial \mathbf{R}_1}{\partial D_R}$ 3 部分, x_p 和 y_p 表示极移在 x 、 y 方向的分量, D_R 表示 UT1-TAI 的一阶变化率。

计算星间距离 ρ 时, 卫星及接收机的位置矢量要换算到同一坐标系下, 通常为天球参考系统 ICRS。但是, 接收机的坐标一般都是在国际地球参考系统 ITRS 下给出的。所以需要将 ITRS 转换到 ICRS 下, 其转换关系为 $R(t_i) = \mathbf{PNSWR}_i^0$ 。其中, \mathbf{P} 、 \mathbf{N} 为岁差、章动旋转矩阵, \mathbf{S} 为地球自转矩阵, \mathbf{W} 为极移矩阵。

其中, 站坐标与卫星轨道参数来自 IGS 结果。通过以上解算, 可求出地球自转参数信息。

通常用日长 (length of day, LOD) 的观测值相对于标准日长 (86 400 国际时秒) 的变化 ΔLOD 来表示地球自转速率的变化^[6]。通过对 GPS 观测测量进行解算便可得到相应的 UT1-TAI。 ΔLOD 的计算方法为:

$$\Delta LOD = \frac{(UT1-TAI)_t - (UT1-TAI)_{t+\Delta t}}{\Delta t} \quad (4)$$

1.2 VLBI 解算大地测量参数^[7]

设 VLBI 的基本观测方程为:

$$\mathbf{O}_t = C(\mathbf{X}, t) + \mathbf{V}_t \quad (5)$$

式中, \mathbf{O}_t 是在 t 时刻获得的时间延迟和延迟率观测量; \mathbf{X} 是由与观测量有关的参数组成的向量; $C(\mathbf{X}, t)$ 为参数 \mathbf{X} 对观测量 \mathbf{O}_t 影响的数学模型, 也是观测量的理论值; \mathbf{V}_t 是观测量的噪声残差向量。

设参数 \mathbf{X} 由先验值 \mathbf{X}_0 和改正值 \mathbf{x} 两部分组成, 则将观测方程线性化有:

$$\mathbf{O}_t = C(\mathbf{x}_0, t) + \left. \frac{\partial C(\mathbf{X}, t)}{\partial \mathbf{X}} \right|_{\mathbf{X}_0} \cdot \mathbf{x} + \mathbf{V}_t \quad (6)$$

由式(6)整理得线性化观测方程为:

$$\mathbf{y}_t = \mathbf{A}_t \mathbf{x}_t + \mathbf{V}_t \quad (7)$$

式中, $\mathbf{y}_t = \mathbf{O}_t - C(\mathbf{X}, t)$, 是 t 时刻观测值与理论值之差; \mathbf{A}_t 为偏导系数矩阵, 它与参数值相对于观测值的变化有关。

若将观测方程用矩阵形式表示, 则有:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{V} \quad (8)$$

并设观测权阵为 \mathbf{P} , 则根据最小二乘理论可求接触参数的修正值为:

$$\mathbf{x} = (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{P} \mathbf{A}^T \mathbf{Y} \quad (9)$$

利用卡尔曼滤波进行 VLBI 大地测量的参数解算^[8]时, 将用随机模型取代钟和大气延迟的多项式参数模型, 对于非随机参数随机扰动矢量为零, 这些参数包括台站位置、射电源坐标和地球定向参数等, 而随机参数则包括用于表示钟和大气延迟扰动的随机过程分量。

2 数据处理

对 GPS 和 VLBI 的解算结果进行联合, 需要选取 GPS 和 VLBI 同一观测时间段, 经过对比, 本文选取了 2005 年 9 月和 2006 年 1、2 月的数据。在 GPS 方面, 为了获得较好的精度而采用了 24 h 观测资料来进行求解。本文选取了全球均匀分布、几何结构良好、相对稳定的 17 个 IGS 站 (具体测站名见表 1) 的观测数据来解算地球自转参数。VLBI 方面, 本文选择国际上通用的 X 波段 (波长约为 3.6 cm) 中观测精度较高的 XA 和 XE 两种类型观测数据进行分析。

表 1 GPS 解算所选用的 IGS 测站

Tab. 1 List of IGS Sites for GPS Estimation

测站类型	测站名
IGS 核心站	ALGO、ALIC、AUCK、BJFS、BRAZ、DAGR、FAIR、GRAZ、HRAO、KELY、KIT3、KOKB、OH2、SANT、SYOG、TIXI、YELL

2.1 GPS 数据处理及分析^[9]

GAMIT 解算地球自转参数时, 大部分的参数设置为默认值, 详见文献^[9]。

用标准均方根 NRMS 的大小来评定解算结果, 一般为 0.25 左右。若大于 0.5, 表明处理结果有问题, 需要重新处理基线; 若 NRMS 小于 0.5, 则认为解算成功。本文解算的 NRMS 均在 0.18~0.25 范围内。最后得到的 ERP 和 ΔLOD 是每天 UTC12:00:00 的参数值, 将其与 IGS 结果进行对比来评定外符合精度。差值见图 1。

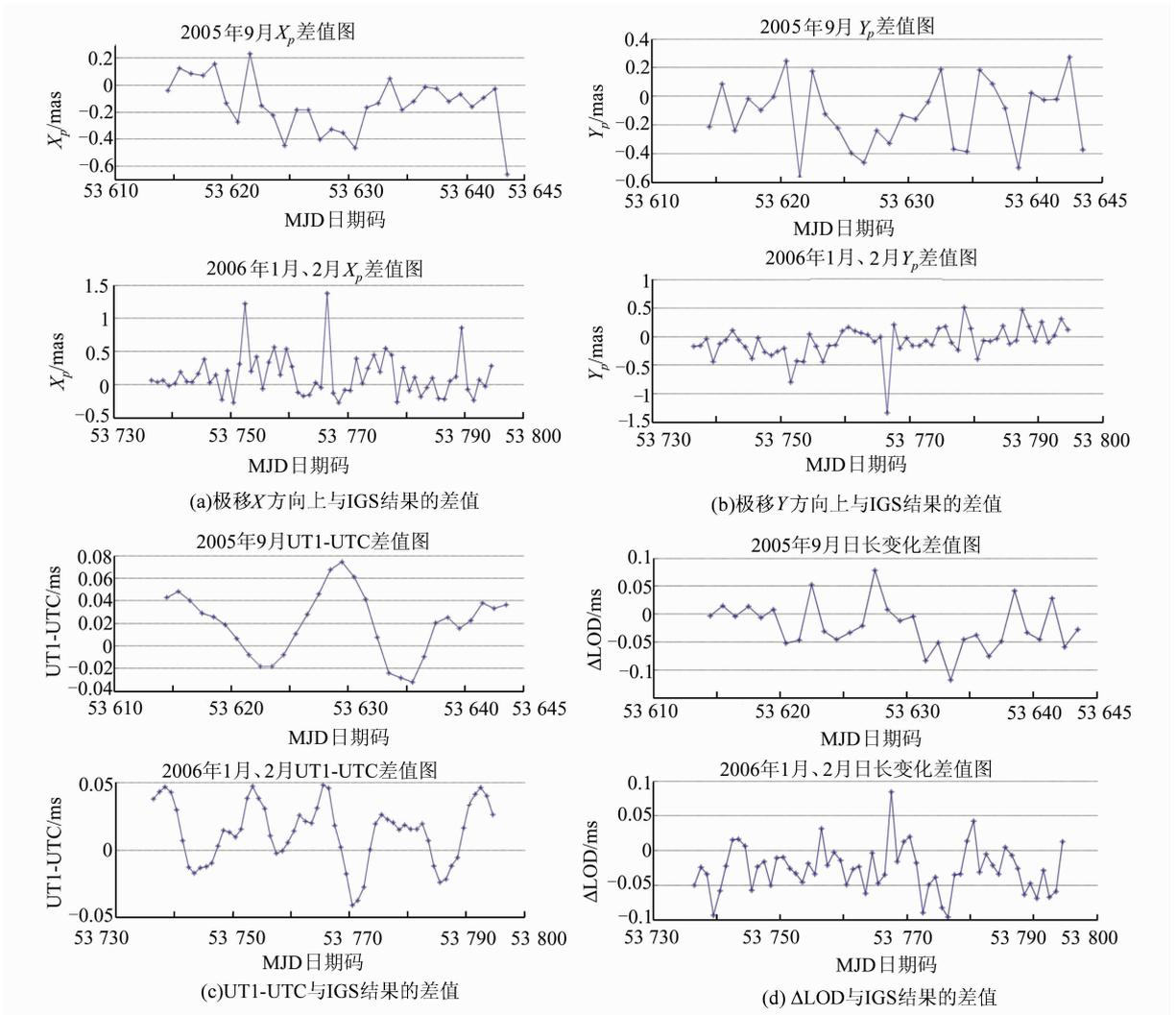


图1 GPS解算值与IGS结果比较

Fig. 1 Comparison of GPS-Estimated ERP and Δ LOD to IGS Solutions

计算得出极移在 X 与 Y 方向上的分量与 IGS 结果比较的均方根分别为 0.32 mas 与 0.28 mas, UT1-UTC 和 Δ LOD 的均方根分别为 0.029 ms 和 0.044 ms/d。

对 2006 年的解算结果先去除趋势项, 然后进行频谱分析, 发现极移在 X 方向与 Y 方向上的分量、UT1-UTC 和 Δ LOD 存在周期项, 分别在 14 d 和 7 d 左右。考虑到 IGS 是采用周解的方式得到结果, 故与其做差后的差值序列会有相应的周期项。

2.2 VLBI 数据处理及分析

本文用 OCCAM 6.2 处理 IVS 服务器上相同时段的 XA、XE 类型的 NGS 数据, 为了与 GAMIT 保持一致, 选择 MHB2000 章动模型。将解算结果与 IVS 结果进行比较, 差值见图 2。用差值的均方根来评定外符和精度, 计算得 VLBI 数据解算结果与 IVS 结果的差值在极移 X 方向与 Y 方向上的均方根分别为 0.45 mas 与 0.58

mas, UT1-UTC 和 Δ LOD 的均方根分别为 0.020 ms 和 0.059 ms/d。

2.3 基于内符合精度的加权平均

先用三次拉格朗日插值对 GPS 和 VLBI 的解算结果进行插值, 得到与 IERS 08C04 相同历元的 ERP 和 Δ LOD 序列; 再根据误差传播定律, 利用解算结果的中误差分别求出 VLBI 和 GPS 解算结果插值后序列的中误差; 再以此中误差平方的倒数为权做加权平均, 公见如下:

$$l_i(T) = \prod_{j=1, j \neq i}^4 \frac{T - t_j}{t_i - t_j} \quad (10)$$

$$\text{ERP}(T) = \sum_{i=1}^4 l_i(T) \cdot \text{ERP}_i \quad (11)$$

$$\sigma_{\text{ERP}(T)} = \sqrt{\sum_{i=1}^4 l_i^2 \cdot \sigma_{\text{ERP}_i}^2} \quad (12)$$

$$\text{ERP}_{G+V} = \frac{\text{ERP}_G \cdot \sigma_{\text{ERP}_V}^2 + \text{ERP}_V \cdot \sigma_{\text{ERP}_G}^2}{\sigma_{\text{ERP}_V}^2 + \sigma_{\text{ERP}_G}^2} \quad (13)$$

$$RMS_{G+V} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (ERP_{G+V} - ERP_{IERS})^2}{n}} \quad (14)$$

式中, l_i 为拉格朗日插值多项式的系数; t 表示解算结果对应的历元; ERP_t 表示解算结果序列; σ_{ERP_t} 表示 ERP_t 的中误差; T 表示 IERS08C04 公

布值的历元; $ERP(T)$ 表示插值后的序列; $\sigma_{ERP(T)}$ 为插值后的序列的中误差; ERP_G 和 ERP_V 分别表示利用 GPS 和 VLBI 结果插值后的序列; ERP_{G+V} 表示加权平均后的序列; ERP_{IERS} 表示 IERS 08C04 序列; RMS_{G+V} 表示加权平均后序列与 IERS 08C04 公布值的均方差。计算结果见表 2。

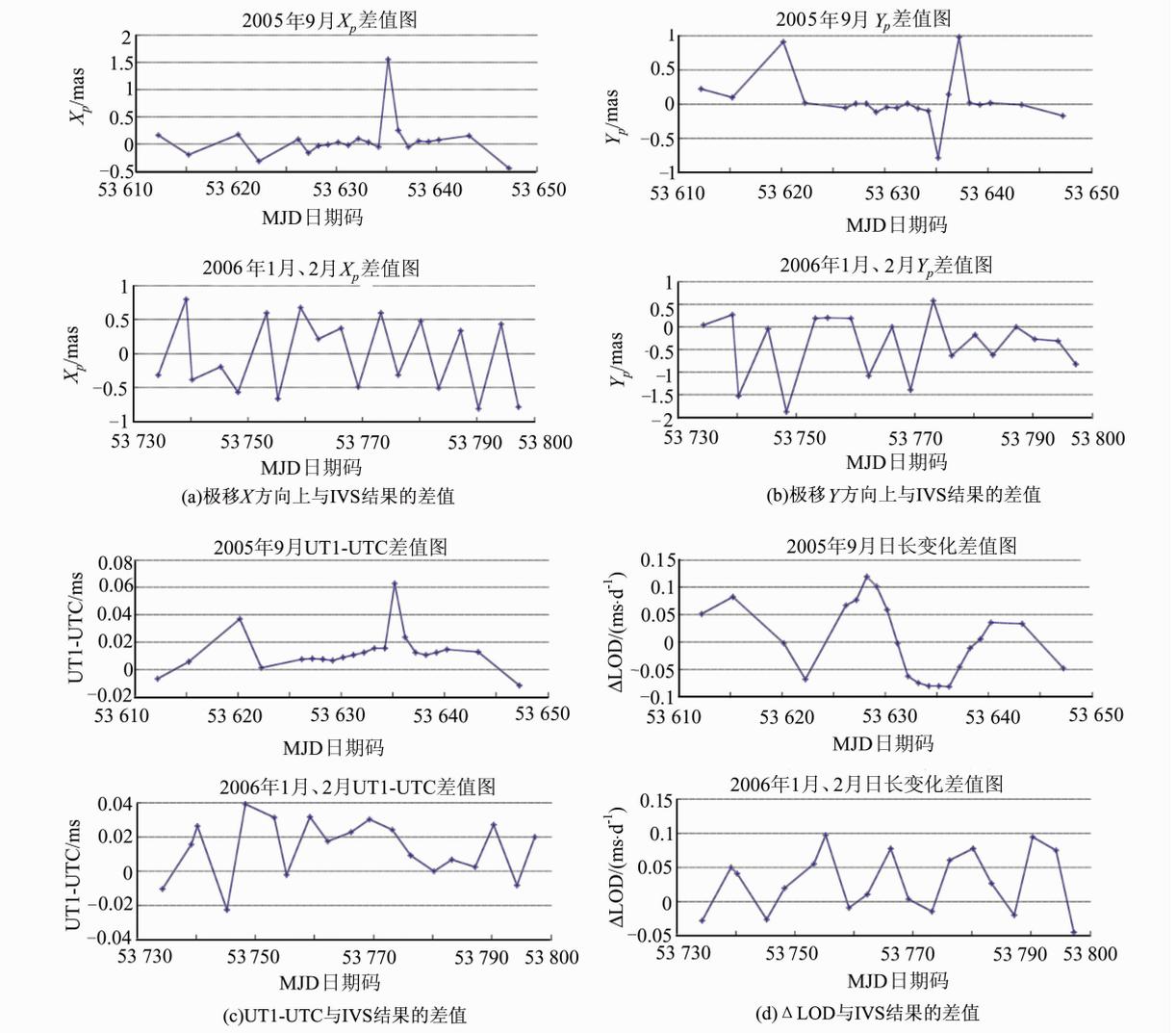


图 2 VLBI 解算值与 IVS 结果比较

Fig. 2 Comparison of VLBI-Estimated ERP and Δ LOD to IVS Solutions

表 2 GPS 和 VLBI 及基于内符合精度加权平均后结果的均方根

Tab. 2 RMS of ERP and Δ LOD from VLBI and GPS and Their Combination Based on Internal Accord Accuracy

解算数据源	GPS	VLBI	加权平均
RMS_ X_p /mas	0.33	0.60	0.46
RMS_ Y_p /mas	0.30	0.64	0.44
RMS_ UT1-UTC /ms	0.011	0.141	0.140
RMS_ Δ LOD / (ms · d ⁻¹)	0.049	0.113	0.101

加权平均后的均方根均位于两者之间, UT1-UTC 和 Δ LOD 的均方根比较靠近 VLBI 结果的均方根, 是由于 VLBI 的解算结果精度高、权

重大。

2.4 基于 IERS 08C04 序列的加权平均

将 2005 年 9 月以及 2006 年 1 月、2 月 IERS 08C04 的结果和 VLBI 的解算结果采用分段三次厄米多项式插值得到每天 UTC12:00:00 的参数值, 再计算 GPS 解算结果和 VLBI 解算结果与 IERS 08C04 结果相比较的均方根, 以均方根的平方的倒数作为权进行加权平均, 公式如下:

$$RMS_V = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (ERP_V - ERP_{IERS})^2}{n}} \quad (15)$$

$$RMS_G = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (ERP_G - ERP_{IERS})^2}{n}} \quad (16)$$

$$ERP_{G+V} = \frac{RMS_V^2 \cdot ERP_G + RMS_G^2 \cdot ERP_V}{RMS_V^2 + RMS_G^2} \quad (17)$$

$$RMS_{G+V} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (ERP_{G+V} - ERP_{IERS})^2}{n}} \quad (18)$$

式中, ERP_G 、 ERP_V 和 ERP_{G+V} 分别表示利用 GPS 和 VLBI 结果插值后的序列及加权平均后的序列; RMS_V 、 RMS_G 和 RMS_{G+V} 分别表示以上序列与 ERP_{IERS} 的均方根。计算后具体的差值见图 3。

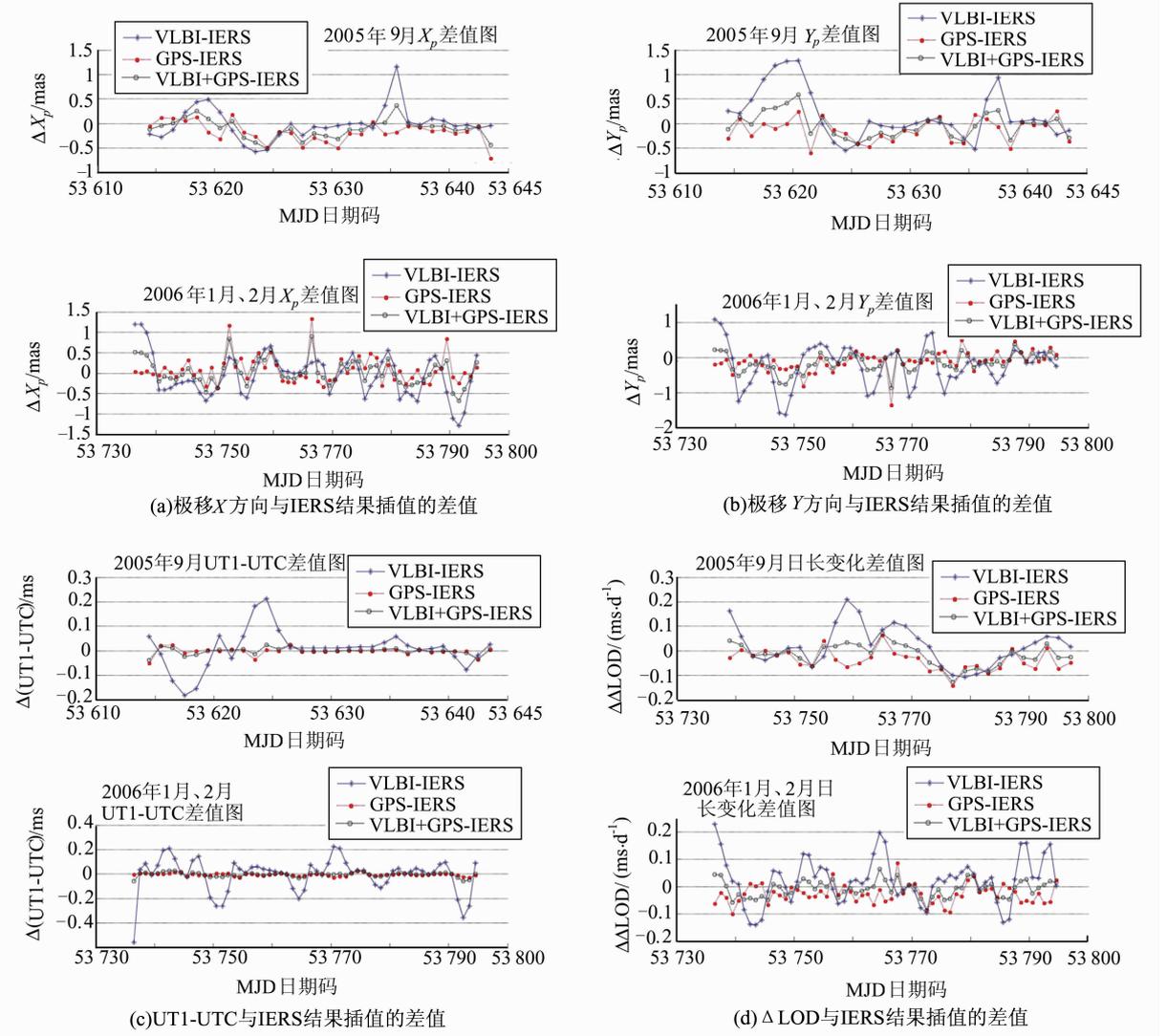


图 3 单独解算与加权平均后 ERP 和 Δ LOD 与 IERS 08C04 比较

Fig. 3 Comparison of ERP and Δ LOD Estimated from VLBI and GPS and GPS + VLBI Combined Solutions to IERS 08C04

最终计算得极移在 X 方向与 Y 方向上的分量与 IERS 08C04 公布值的均方根(见表 3)。由表 3 的数据可以看出,经过加权平均后,极移在 X 方向上的分量 X_p 、极移在 Y 方向上的分量 Y_p 、日长变化 Δ LOD 各参数的均方根(RMS_{X_p} 、 RMS_{Y_p} 、 RMS_{Δ LOD)有所下降,UT1-UTC 的均方根($RMS_{UT1-UTC}$)相当,总的来说,两者联合提高了解算结果的可靠性,而且与 IERS 08C04 公布值的差值的波动也更加平稳,即解算结果的稳

定性也有所提高。

表 3 GPS 和 VLBI 及加权平均后结果的均方根

Tab. 3 RMS of ERP and Δ LOD from VLBI and GPS and Their Combination

解算数据源	GPS	VLBI	加权平均
RMS_{X_p}/mas	0.31	0.46	0.28
RMS_{Y_p}/mas	0.29	0.59	0.28
$RMS_{UT1-UTC}/ms$	0.013	0.123	0.017
RMS_{Δ LOD)/(ms·d ⁻¹)	0.048	0.085	0.038

3 结 语

本文利用 GAMIT 软件处理了 2005 年 9 月和 2006 年 1 月、2 月的 GPS 数据,并用 OCCAM 6.2 软件处理了同时期的 VLBI 观测数据,解算的精度较高。在解算出 ERP 和 ΔLOD 的基础上,本文运用分段三次厄米多项式的插值,将 IERS 08C04 的公布值和 VLBI 的解算结果插值到与 GPS 结果相同的时刻, IERS 08C04 的数据密度大、精度高,所以插值效果好。VLBI 数据的解算结果插值后精度略微有所下降,拉格朗日插值的结果和分段三次厄米多项式插值的结果的均方根差别较大,表明插值方法对其结果有较大影响。

对 GPS 和 VLBI 数据的解算结果进行加权平均综合后,ERP 和 ΔLOD 的解算结果与 IERS 08C04 的公布值对比的均方根变小,差值的波动幅度变小,可靠性和稳定性都有所提高。

参 考 文 献

- [1] Wei Erhu, Jin Shuanggen, Yang Hongzhou, et al. Simulation and Results on Real-Time Positioning of Chang'E-3 Rover with the Same-Beam VLBI Observations[J]. *Planetary and Space Science*, 2013, 84: 20-27
- [2] Wei Erhu, Jin Shuanggen, Zhang Qi, et al. Autonomous Navigation of Mars Probe using X-ray Pulsars: Modeling and Results[J]. *Advances in Space Research*, 2013 (5): 849-857
- [3] Wei Erhu, Yan Wei, Jin Shuanggen, et al. Improvement of Earth Orientation Parameters Estimate with Chang'E-1 ΔVLBI observations[J]. *Journal of Geodynamics*, 2013, DOI: 10.1016/j.jog.2013.

- 04.001
- [4] He Zhanke, Yang Xuhai, Li Zhigang, et al. Estimation of Earth Rotation Parameters Based on GPS Observations[J]. *Journal of Time and Frequency*, 2010, 33(1): 69-76 (何战科, 杨旭海. 利用 GPS 观测资料解算地球自转参数[J]. 时间频率学报, 2010, 33(1): 69-76)
- [5] Wei Erhu, Li Guangwen, Chang Liu, et al. On the High-Frequency ERPs with GPS Observations[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(7): 818-821 (魏二虎, 李广文, 畅柳, 等. 利用 GPS 观测数据研究高频地球自转参数[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2013, 38(7): 818-821)
- [6] Wei Erhu, Tian Xiaojing, Liu Jingnan, et al. Analysis of the Length of Day with 2008-2009 VLBI Observations[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2010, 35(9): 1 009-1 011 (魏二虎, 田晓静, 刘经南, 等. 利用 2008-2009 年 VLBI 数据进行日长变化的研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2010, 35(9): 1 009-1 011)
- [7] Li Zhenghang, Wei Erhu, Wang Zhengtao, et al. Space Geodesy [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2010: 118-158 (李征航, 魏二虎, 王正涛, 等. 空间大地测量学[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2010: 118-158)
- [8] Zheng Yong, Yi Zhaohua, Xia Yifei. The Application of Kalman Filtering in Data Processing of VLBI [J]. *Acta Astronomica Sinica*, 1998, 39(2): 76-80 (郑勇, 易照华, 夏一飞. 卡尔曼滤波在 VLBI 数据处理中的应用[J]. 天文学报, 1998, 39(2): 76-80)
- [9] Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences, Massachusetts Institute of Technology. GAMIT Reference Manual [M]. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 2006

Estimation of Earth Rotation Parameters and ΔLOD with Combining VLBI and GPS Observations

WEI Erhu^{1,2} LIU Wenjie¹ WEI Jianan² JIN Shuanggen³ LIU Jingnan⁴

¹ School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

² Faculty of Built Environment, University of New South Wales, NSW 2052, Australia

³ Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China

⁴ GNSS Research Center, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: The Earth rotation parameters (ERP) and the variation of length of day (ΔLOD) are estimated by processing the seventeen IGS stations' data collected in September 2005, January and Febru-

(下转第 92 页)

An Algorithm of Filtering Noises in Multi-beam Data Based on Rolling Circle Transform

DONG Jian¹ PENG Rencan¹ ZHANG Lihua¹ WANG Zhijun²

1 Department of Hydrography and Cartography, Dalian Naval Academy, Dalian 116018, China

2 The Navigation Guarantee Department of the Chinese Navy Head Quarters, Beijing 100841, China

Abstract: After having analyzed the disadvantage of existing automatic filtering algorithm, which means deleting the micro morphology or obstacle caused by devilishly pursuing the smoothing effect of artificial filtering method, aims at Ping as the processing cell of multi-beam bathymetric survey data, and by means of rolling circle transform's characteristic of identifying and analyzing the concave (convex) part quantitatively under specific precision, the paper details an algorithm for filtering noises in multi-beam data based on a rolling circle transform, and details the keystone and solution steps of the model. At last, in a VC++ environment, some experiments were done to validate the algorithm's validity. The experiments show that the algorithm can filter noises in multi-beam data; maintaining marine topography completeness and enhancing the efficiency in gross error detection.

Key words: rolling circle transform; multi-beam data; filtering; algorithm

First author: DONG Jian, PhD, lecturer, specializes in the theories and methods of charting. E-mail: navydj@163.com

Corresponding author: PENG Rencan, PhD, professor. E-mail: pengrencan63@163.com

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41171349, 40801189, 41471380; the National High Technology Research and Development Program of China, No. 2012AA12A406.

.....
(上接第 71 页)

ary 2006 with GAMIT, the estimated results of which are compared with the IGS solutions. Secondly, the ERP and the Δ LOD are estimated by processing VLBI data during the same period with OC-CAM 6.2, the results of which are compared with the IVS solutions. Thirdly, the results of GPS and VLBI are combined in a weighted way, based on their internal accord accuracy and IERS 08C04 respectively. Finally, the conclusion not only shows that the interpolation methods have a significant impact on the VLBI results, but also shows that the combining of VLBI and GPS in the second way can improve the stability and reliability of ERP and Δ LOD, which can make up for the shortcoming of the single technique as VLBI or GPS.

Key words: Earth rotation parameters; variation of length of day; combining; GPS; VLBI

First author: WEI Erhu, PhD, professor, specializes in space geodesy and geodynamics. E-mail: ehwei@sgg.whu.edu.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, No. 41374012; Comprehensive Reform Research Program for 2012 Undergraduate Teaching in School of Geodesy and Geomatics of Wuhan University, No. 201220; Foundation for National Teaching Team of Satellite Navigation Courses, No. 214275482.