

王紫燕、林树、武艳强等, 2013, 布尔莎模型在 GPS 时间序列融合中的应用, 中国地震, 29 (1), 68 ~ 74。

布尔莎模型在 GPS 时间序列融合中的应用

王紫燕¹⁾ 林树¹⁾ 武艳强²⁾ 占伟³⁾ 丁晓光⁴⁾

1) 福建省地震局, 福州市华鸿路 7 号 350003

2) 中国地震局地震预测研究所, 北京 100036

3) 中国地震局第一监测中心, 天津 300180

4) 陕西省地震局, 西安 710068

摘要 利用“中国地壳运动观测网络”基准网与全球 IGS 站的公共站点, 采用布尔莎模型求取坐标转换 7 参数, 将地壳观测网络工程基准站点时间序列与全球解进行绑定。结果显示, 转换得到的时间序列 N/E 向中误差约为 2、3mm, 与直接融合得到的时间序列的单天误差水平相当, 转换得到的站间大地线误差大部分在 6mm 内, 表明该转换方法是可行的。

关键词: GPS 时间序列 融合 布尔莎模型

[文章编号] 1001-4683 (2013) 01-0068-07 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

GPS 最大的优点在于全球参考框架的建立, 该参考框架可以保证大尺度的观测数据具有空间可比性。随着 GPS 连续站的分布密度越来越高, 不同区域往往给出自己独立的时间序列。研究大尺度地壳运动问题 (比如板块运动问题) 往往需要联合多个区域的 GPS 时间序列结果进行分析。因此就需要解决不同区域、不同解算方案的 GPS 时间序列的融合问题。如果有上述测站的单日松弛解结果 (h 文件), 只要利用 GLOBK、QOCA 等平差软件, 绑定全球 IGS 站的 h 文件, 就可以将区域站的结果进行融合。但如果仅有 GPS 点位时间序列, 能否直接利用公共点的时间序列进行转换, 并将这些区域站的点位时间序列进行融合分析呢, 对此本文进行了探讨。

目前速度场的数据融合已成为 GPS 数据处理的常规步骤和过程。许多学者 (Altamimi et al, 2000; Boucher et al, 1999; Sillard et al, 1998; Soler, 1998、2001) 对 GPS 速度场的数据融合进行了大量研究, 马青等 (2003) 详细介绍了利用公共点坐标转换将各个不同区域站的速度场融合为一个综合解的方法与步骤。郭冬美等 (2008) 针对速度场融合中公共点的筛选、公共点的数量对求解参数的影响进行了较为深入的研究, 认为选取分布均匀、站速度相对稳定的公共点进行转换得到的速度场精度更高, 同时至少要有 10 个以上的公共点才能保证转换参数的确定和数据融合结果的可靠性。本文借鉴速度场的融合方法, 对 GPS 站点的位

[收稿日期] 2012-09-14; [修定日期] 2012-10-30

[项目类别] 2012 年震情跟踪合同制任务 (2012020205) 资助

[作者简介] 王紫燕, 女, 1983 年生, 工程师, 主要从事 GPS 数据处理工作。E-mail: ziyaw@163.com

移时间序列进行融合处理。具体步骤为采用布尔莎模型求取公共点的坐标转换 7 参数,然后利用这些参数对其他站点的时间序列进行转换,得到相对统一参考基准的时间序列结果。利用“中国地壳运动观测网络”GPS 基准站的时间序列进行了上述转换,并对转换后数据离散度、基线变化等进行了分析,验证了转换方法的有效性。

1 计算方法及处理流程

GPS 时间序列的数据融合操作主要包括剔除质量较差的数据、数据插值、坐标转换、数据融合等工作。

1.1 剔除品质较差的数据

位移时间序列结果中给出了站点 X 、 Y 、 Z 等 3 个方向的日坐标分量及其误差。当测站的原始观测数据有效历元过少或者观测到的卫星数过少,那么这一天的计算结果就会较差,坐标分量的误差可能会比较大,或者坐标分量偏离正常值较多。进行融合的时候,首先要剔除这些品质较差的资料。本文分 3 步进行数据剔除:

(1) 去除误差较大的数据 ($\sigma_E > 5\text{mm}$ 、 $\sigma_N > 5\text{mm}$ 、 $\sigma_U > 10\text{mm}$)。

(2) 剔除坐标分量明显错误的的数据。给定各个台站 3 个坐标分量的大致变化区间,不处于该区间的数据将被剔除。

(3) 采用 3σ 法去除“离群点”(武汉测绘科技大学测量平差教研室,1996)。即对时间序列进行去线性及周年、半周年变化处理,然后求取标准差,剔除偏离 3 倍标准的数据。进行多次循环直至所有数据都在 3 倍标准差范围内。

1.2 插补数据

经过上述处理后,各个台站的时间序列很有可能出现数据缺失的情况,因此在融合处理之前,还需要对这些数据进行数据插补。采用最小二乘配置方法对各个台站的时间序列分别进行处理(武艳强等,2007)。

1.3 数据融合

由于本文选用下式的布尔莎模型(徐绍铨等,2003)进行分析,该模型的公式推导是在空间直角坐标下进行的,因此如果选用非空间直角坐标系(比如 GLOBK 软件给出的弧长 NEU 坐标(黄立人等,2006)),需要进行坐标转换处理后再进行融合。

$$\mathbf{X}_{\text{global}} = \Delta\mathbf{X} + (1 + k)\mathbf{X}_{\text{regional}} + \begin{bmatrix} 0 & \varepsilon_z & -\varepsilon_y \\ -\varepsilon_z & 0 & \varepsilon_x \\ \varepsilon_y & -\varepsilon_x & 0 \end{bmatrix} \mathbf{X}_{\text{regional}} \quad (1)$$

式中 $\mathbf{X}_{\text{global}} = [x_{\text{global}}, y_{\text{global}}, z_{\text{global}}]$ 为全球解的站点坐标向量, $\mathbf{X}_{\text{regional}} = [x_{\text{regional}}, y_{\text{regional}}, z_{\text{regional}}]$ 为区域解的站点坐标向量, $\Delta\mathbf{X} = [\Delta x, \Delta y, \Delta z]$ 为平移参数矩阵, k 为尺度变化因子, ε_x 、 ε_y 、 ε_z 为旋转参数。

将式(1)写成矩阵形式得式(2),由式(2)采用经典测量平差方法即可进行 7 参数的计算。

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_{\text{regional}} & 0 & -z_{\text{regional}} & y_{\text{regional}} \\ 0 & 1 & 0 & y_{\text{regional}} & z_{\text{regional}} & 0 & -x_{\text{regional}} \\ 0 & 0 & 1 & z_{\text{regional}} & -y_{\text{regional}} & x_{\text{regional}} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ k \\ \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \end{bmatrix} = X_{\text{global}} - X_{\text{regional}} \quad (2)$$

2 算例分析

2.1 转换方案及评价指标

本文采用“中国地壳运动观测网络”基准站(2000.0014 ~ 2011.2014)的时间序列(NEU)对前文提到的时间序列融合方法进行检验。其中,作为区域解的时间序列由“中国地壳运动观测网络”GPS 数据处理中心计算得到;作为全球解的时间序列是直接利用 GAMIT 软件的单天 h 文件进行融合得到的。由于 2 套时间序列结果分别由 2 个单位的研究人员单独计算得到,采用的技术路线、计算参数、选用的各种改正模型、框架点的选取等都不完全相同,因而计算的结果存在着差异。本文采用前文中提到的时间序列融合方法对 2 套数据进行处理,将区域解融合到全球解中。融合处理时选取了 12 个台站为公共点,其余 16 个台站为外部检核点,对本文方法进行检验(图 1)。

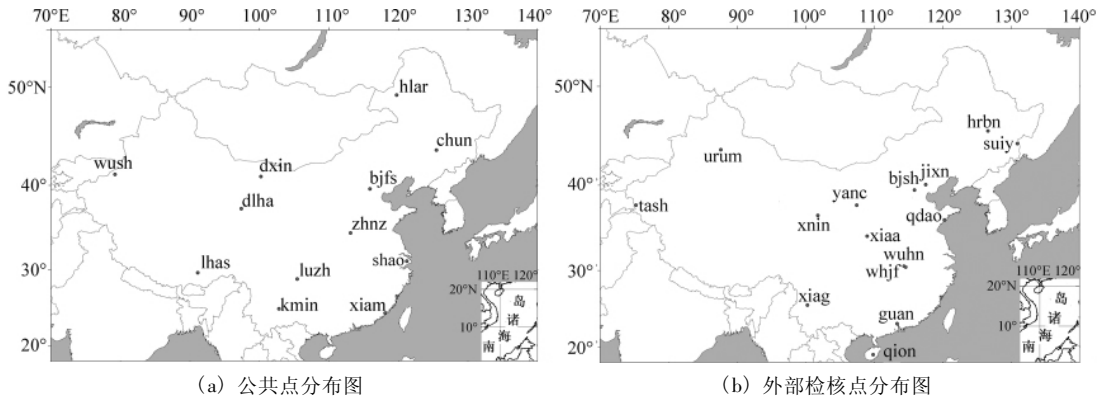


图 1 公共点和外部检核 GPS 站点分布图

为了评价数据融合结果的可靠性,本文以转换的坐标与直接融合 h 文件平差得到的坐标符合程度(即均方差(式 3))作为主要指标进行分析。均方差越小,说明两者符合的越好、转换效果越好。式中 e_N 、 e_E 、 e_U 为 N、E、U 向的中误差, N_{tran} 、 E_{tran} 、 U_{tran} 为转换后 N、E、U 向坐标, N_{global} 、 E_{global} 、 U_{global} 为直接融合 h 文件得到的全球解的测站坐标。

$$e_N = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (N_{\text{tran}} - N_{\text{global}})^2}{n}}, \quad e_E = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_{\text{tran}} - E_{\text{global}})^2}{n}}, \quad e_U = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (U_{\text{tran}} - U_{\text{global}})^2}{n}} \quad (3)$$

2.2 转换效果评价

2.2.1 时间序列比较

12 个用于计算转换参数的公共点的误差统计结果见表 1。

表 1 公共点的误差统计表

台站	转换后的误差 (mm)			直接融合的单天误差算术平均值 (mm)		
	N 向	E 向	U 向	N 向	E 向	U 向
hlar	2.02	2.29	4.21	1.92	2.34	4.21
chun	1.78	2.30	5.05	2.76	3.08	7.28
dxin	1.68	2.27	3.92	2.61	3.30	8.04
wush	1.79	2.66	4.02	1.97	2.56	5.53
kmin	2.75	3.07	6.59	3.27	4.28	9.09
xiam	2.23	2.91	5.32	2.83	3.83	8.72
luzh	2.03	2.68	4.39	1.87	2.57	4.82
zhnz	2.08	3.25	6.47	2.37	2.93	6.92
lhas	1.68	2.53	6.68	1.84	2.80	5.66
bjfs	1.95	2.52	8.29	2.26	2.75	6.09
shao	2.22	3.29	7.11	2.56	3.42	7.73
dlha	1.44	2.38	5.90	2.18	2.84	6.06

从表 1 可以看出:①12 个公共点 N 向、E 向内符合较好,误差一般都在 3mm 内;转换得到的坐标的 N 向、E 向中误差与直接融合得到的时间序列的单天误差算术平均值差不多。②U 向内符合相对较差,bjfs、shao 两个台站转换后的误差超过了 7mm;直接融合得到的 U 向的误差算术平均值大部分在 5 ~ 10mm 之间,5 个台站超过 7mm。

为了检核本文融合方法的可靠性,考察了其余 16 个 GPS 站的符合情况,结果见表 2。

表 2 外部检核点的误差统计表

台站	转换后的误差 (mm)			直接融合的单天误差算术平均值 (mm)		
	N 向	E 向	U 向	N 向	E 向	U 向
hrbn	3.43	3.77	7.20	2.38	2.54	6.00
jixn	1.60	2.86	7.66	2.42	2.93	6.49
suiy	2.43	3.42	6.48	2.77	3.30	7.56
urum	2.34	3.77	4.99	2.43	3.04	6.75
yanc	1.67	2.29	4.51	2.33	2.99	6.91
bjsh	1.53	2.11	6.89	2.36	2.85	6.23
xiaa	3.20	3.46	4.68	2.32	3.08	6.85
xnin	3.73	3.60	6.63	2.15	2.78	6.17
whjf	2.64	3.57	5.61	2.42	3.10	7.93
qdao	1.99	3.73	4.19	2.06	2.19	5.92
qion	1.04	2.12	7.12	2.90	3.46	9.01
tash	2.35	3.28	9.40	2.48	3.34	8.09
wuhn	2.44	3.23	12.14	2.41	3.04	8.38
yong	3.38	4.86	10.25	3.40	3.82	9.55
guan	2.72	4.09	8.08	3.09	3.87	9.13
xiag	2.90	3.65	6.96	2.64	3.29	8.45

从表 2 可以看出,16 个 GPS 台站的 N、E 向内符合较好,误差一般都小于 3mm,只有 2 个台站的 E 向误差超过 4mm;U 向内符合相对较差,转换得到的坐标的中误差与直接融合

得到的时间序列的单天误差算术平均值差不多;有两个台站 U 向误差超过 10mm, U 向误差较大的台站单天误差算术平均值也较大,接近 10mm。

2.2.2 基线比较

为了检核本文的时间序列融合方法的可靠性,还计算对比了 2 套时间序列的台站间的大地线(地球旋转椭球面上 2 点之间的最短弧线)(武艳强等,2007)。首先根据 GPS 台站的坐标时间序列,计算出 2 个端点精确经纬度时间序列,然后根据大地主题解算公式(孔祥元等,2001)计算得到大地线的时间序列图。本文将转换得到的大地线和直接融合 h 文件进行平差得到的相应的大地线进行了对比(图 2),计算出 2 套大地线的中误差。表 3 统计了 12 个用于计算转换参数的 GPS 台站之间的大地线的误差分布情况。图 3 统计了 GPS 台站之间的其他 19 条大地线的误差分布情况。

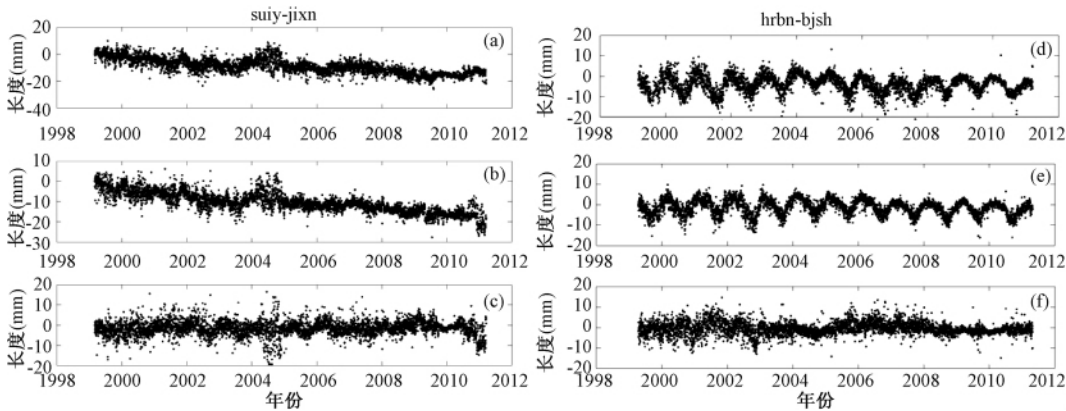


图2 两条大地线对比图

(a)、(d) 直接融合得到的大地线;(b)、(e) 转换得到的大地线;(c)、(f) 两套大地线之差

表3 大地线的误差

大地线	测站	lhas	dxin	hlar	dxin	dxin	kmin	zhnz	wush	wush
	测站	luzh	chun	chun	luzh	kmin	xiam	xiam	lhas	zhnz
误差(mm)		3.65	3.46	2.81	3.72	4.10	5.04	3.94	3.03	4.28

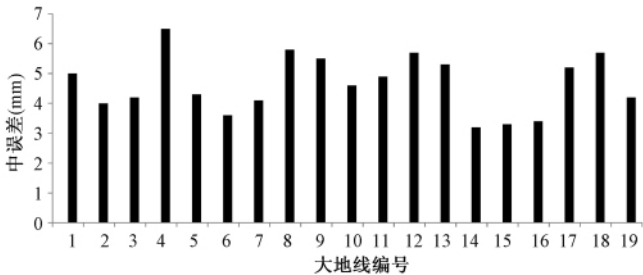


图3 GPS 站间的大地线中误差分布图

1. tash-urum; 2. xnin-xiag; 3. yanc-qion; 4. xiaa-yong; 5. whjf-guan; 6. hrbn-bjsh;
7. suiy-jixn; 8. tash-xiag; 9. nin-wuhn; 10. yanc-shao; 11. xiaa-guan; 12. hrbn-suiy; 13. yanc-qion;
14. qdao-shao; 15. jian-shao; 16. dlha-xiag; 17. dlha-whjf; 18. wuhn-bjfs; 19. urum-dlha

从表 3 可以看出,转换得到的坐标时间序列计算得到的大地线和直接融合得到的大地线中误差大部分小于 5mm,只有 1 条大地线(kmin-xiam)中误差为 5.04mm,因此认为大地线的差异性不显著。kmin-xiam 大地线误差较大,是因为这 2 个台站原始解算的数据 U 向精度不高,误差分别为 9.09、8.72mm,均大于其他 10 个用作公共转换点的台站计算误差。

从图 3 可以看出,站间大地线中误差一般小于 6mm,只有 1 条大地线(xiaa-yong)中误差大于 6mm。xiaa-yong 大地线误差较大,是因为 yong 这个台站原始时间序列质量较差。

3 小结与讨论

本文采用坐标转换 7 参数模型的方法对时间序列融合进行了研究,并对“中国地壳运动观测网络”GPS 站点的时间序列进行了实验,转换得到的时间序列 N、E 向中误差约为 2、3mm;转换得到的站间大地线精度约为 6mm。目前 GPS 时间序列分析应用侧重于 N、E 向,本文转换得到的时间序列 N、E 向精度与直接融合得到的时间序列的单天误差精度相当,表明文中所提的转换方法是可行的。特别是在没有原始的单天解 h 文件的情况下可以考虑用本文的转换方法将区域站的时间序列绑定到全球框架中。

实际应用中,选取公共站点应遵循几个原则:①尽量选取自身变化较稳定,线性变化较好的台站;②选择公共站点数量多一些;③公共点组成的网型较好。由于各个台站的起始观测时间不一致,数据融合时,需要选取区域站和全球 IGS 站中公共点较多的时间段。如果某一时段部分站点受大地震等突发性事件影响较严重,需要对这些时间段的数据进行预处理再进行转换。

如果需要将多个不同区域的时间序列结果进行融合,则需要分成 2 步进行。首先对各个区域的站点逐个融合;其次选择各个区域的公共点,将这些站点转换后的时间序列取平均,以平均解作为公共点的解,再进行一次融合,并以这 7 个转换参数为依据,对各个区域的其他站点进行融合。

参考文献

- 郭东美、李军、熊熊等,2008,地壳运动速度场的数据融合研究,武汉大学学报(信息科学版),**33**(2),212~215。
- 黄立人、高砚龙、任立生,2006,关于 NEU(ENU)坐标系统,大地测量与地球动力学,**26**(1),97~99。
- 马青、黄立人,2003,速度场解的融合,大地测量与地球动力学,**23**(2),52~54。
- 孔祥元、郭际明、刘宗泉等,2001,大地测量学基础,武汉:武汉大学出版社。
- 武艳强、江在森、杨国华,2007,最小二乘配置方法在提取 GPS 时间序列信息中的应用,国际地震动态,**343**(7),100~103。
- 武汉测绘科技大学测量平差教研室,1996,测量平差基础(第3版),北京:测绘出版社。
- 徐绍铨、张华海、杨志强等,2003,GPS 测量原理及应用,19~21,武汉:武汉大学出版社。
- Altamimi A, Boucher C, Sillard P, 2000, ITRF97 and quality analysis of IGS reference stations, 1999 Technical Report, International GPS Service for Geodynamics, Pasadena.
- Boucher C, Altamimi Z, Sillard P, 1999, The international reference frame (ITRF97), IERS technical note 27, central bureau of IERS, observation de Paris, Paris.
- Sillard P, Altamimi Z, Boucher C, 1998, The ITRF 1996 realization and its associated velocity field, Geophysical Research Letters,**25**, 3223~3226.
- Soler T, 1998, A compendium of transformation formulas useful in GPS work, Journal of Geodesy,**72**,482~490.

Soler T, 2001, Densifying 3D networks by accurate transformation of GPS-determined vector components, GPS Solution, 4 (3), 27 ~ 33.

The application of the Bursa model in the method of integrate GPS time series

Wang Ziyan¹⁾ Lin Shu¹⁾ Wu Yanqiang²⁾ Zhan Wei³⁾ Ding Xiaoguang⁴⁾

1) Earthquake Administration of Fujian Province, Fuzhou 350003, China

2) Institute of Earthquake Science, Beijing 100036, China

3) First Crustal Monitoring and Application Center, Tianjin 300180, China

4) Earthquake Administration of Shaanxi Province, Xi'an 710068, China

Abstract The paper first introduces in detail the combination method with the Bursa model to integrate several regional time series to derive a unified global time series. Then an example from CMONOC (Crustal Movement Observation Network of China) is taken to test if the combination method is feasible. The precision of the integrated time series with the combination method is below 2mm (North), 3mm (East), which is the same as the results from the direct integration of the time series. The precision of the baseline is below 6mm; which proves that the combination method can be used to integrate several regional time series to derive a unified global time series.

Key words: GPS time series Integrate Bursa model