

中国境内 IGS 站数据处理及地壳运动研究

陈俊平¹, 王解先^{1,2}

(1. 同济大学 测量与国土信息系, 上海 200092; 2. 现代工程测量国家测绘局重点实验室, 上海 200092)

摘要: 利用中国境内国际 GPS 大地测量和地球动力学服务(IGS)站的 GPS 单天数据, 使用 GAMIT 软件对其进行基线解算. 以单天解的基线结果作为输入量, 利用所介绍的台站漂移数学模型, 求解台站漂移速度, 得到地壳运动信息; 再根据板块运动欧拉定理, 求解中国大陆整体的欧拉矢量. 结果表明, 在 ITRF2000 框架下, 求解的台站漂移速度与 IGS 公布的结果相近, 由此求解的中国大陆整体的欧拉矢量与采用 IGS 公布数据计算的结果相近.

关键词: IGS 台站; 漂移速度; GAMIT 软件; 欧拉矢量

中图分类号: P 226

文献标识码: A

文章编号: 0253-374X(2005)10-1414-04

Data Processing of IGS Stations in China and Study of Crust Movement

CHEN Jun-ping¹, WANG Jie-xian^{1,2}

(1. Department of Surveying and Geomatics, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Key Laboratory of Modern Engineering Surveying, State Bureau of Surveying and Mapping, Shanghai 20092, China)

Abstract: GAMIT is effective in GPS baseline solution. One of the outputs of GAMIT is H-file. It contains the covariance matrix and adjusted coordinates. In order to study global plate movement and regional crust deformation, the H-file is used as inputs, we consider the relationship between each single session solution. Thus we obtain the floating velocities of the used International GPS Service (IGS) stations. According to Euler theorem, we calculate Euler vectors of Chinese mainland. Analysis shows that the results are consistent with what given by the IGS.

Key words: international GPS service station; floating velocity; GAMIT; Euler vector

国际 GPS 大地测量和地球动力学服务 (international GPS service, IGS) 自 1992 年起, 已在全球建立了多个数据存储及处理中心和百余个常年观测的台站, 我国也设立了上海(佘山)、武汉、西安、拉萨、北京、乌鲁木齐等多个常年观测台站. 这些台站的观测数据可以从 IGS 的数据存储中心获得. 对其连续的观测数据进行处理已经成为研究地壳运动的一个重要手段.

采用麻省理工学院的 GPS 大地测量分析软件 GAMIT 处理 GPS 网时, 一般一次只能处理一天或几天观测数据. 在用 GPS 的定位结果研究全球板块运动或区域性地壳形变时, 应该综合考虑各期计算结果相互之间的联系, 从而得出 GPS 网长期观测的综合结果(包括针对某历元的一套站坐标、漂移速度、精度)^[1]. 本文用 GAMIT 软件解算了中国大陆 IGS 台站单天的基线向量, 利用第二部分介绍的台

收稿日期: 2004-05-30

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(40234039)

作者简介: 陈俊平(1980-), 男, 江西宜春人, 博士生. E-mail: sunnpx@163.com

站漂移数学模型, 将 GAMIT 软件的解算结果作为输入量, 对长期观测的 GPS 网进行处理, 求解了在 ITRF 2000 框架下中国大陆地区地壳运动信息; 最后, 根据板块运动欧拉定理, 利用求得的台站速度解算出中国大陆板块的欧拉矢量.

1 台站漂移数学模型

1.1 平差模型

对于第 i 测段的观测, 可列出以下误差方程:

$$V_i = A_i x_i - L_i \quad (1)$$

式中: V_i 为观测量的改正数; A_i 为误差方程系数; x_i 是求解参数的改正数; L_i 为常数项. 相应的法方程式为:

$$N_i x_i = C_i \quad (2)$$

其中: 法方程系数 N_i 为协方差阵 Q_i 的逆阵; Q_i 为第 i 测段的坐标及其他参数的协因数阵; x_i 为改正数; Q_i 和 x_i 均可从 GAMIT 基线处理文件 H-file 中读取^[2], 按式(2)可反求出常数项 C_i .

扣除 GAMIT 解算时, 法方程系数阵中已加入的先验限制, 得到的法方程系数阵仍记为 N_i . 考虑到每测段采用的未知量近似值并不统一, 若要总体平差必须采用一致的近似值 P , 因为对每次观测值作平差所采用的近似值是比较接近的, 选用的 P 和 P_i 仍比较接近, 所以误差方程系数可不作改变, N_i 不变, 但常数项由 C_i 改变为 $C_i - N_i (P_i - P)$.

由于受地壳运动等因素的影响, 每个测站点的坐标是变化的. 定义站坐标在参考时刻 T_0 时的值为 $P + \hat{\alpha}$, 则第 i 测段观测 (T_i 时刻) 坐标为 $P + \hat{\alpha} + \omega_i \hat{\delta}$ (线性运动模型, $\omega_i = T_i - T_0$, $\hat{\delta}$ 为测站漂移速度, 起初值取为零). 加入测站漂移速度 $\hat{\delta}$ 后, 第 i 段的误差方程写成矩阵形式为

$$V_i = (A \quad \omega_i \quad A) \begin{pmatrix} \hat{\alpha} \\ \hat{\delta} \end{pmatrix} - L_i \quad (3)$$

将式(3)组成法方程为

$$\begin{bmatrix} N_i & \omega_i N_i \\ \omega_i N_i & \omega_i^2 N_i \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \hat{\alpha} \\ \hat{\delta} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} C_i \\ \omega_i C_i \end{bmatrix} \quad (4)$$

因此, 引入站坐标速度未知数, 直接将式(1)扩展到式(4)即可.

将 GPS 形变网各测段叠加, 得到形变网的最终法方程为

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n N_i & \sum_{i=1}^n \omega_i N_i \\ \sum_{i=1}^n \omega_i N_i & \sum_{i=1}^n \omega_i^2 N_i \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \hat{\alpha} \\ \hat{\delta} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n C_i \\ \sum_{i=1}^n \omega_i C_i \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中的 n 为监测网的观测测段数. 式(5)可简称为

$$N x = C \quad (6)$$

式(5)中, 参数 $\hat{\alpha}$ 是针对某一参考时刻的站坐标及各测段平差的非坐标参数的改正数; $\hat{\delta}$ 是测站运动速度参数. 值得注意的是, 式(5)中的法方程是秩亏的, 若要求解, 则必须给该方程加上下列条件之一或组合: ① 将某些点的坐标和速度固定为某一选定值; ② 给参数一定的先验精度, 其中某些点的先验精度要达到相当的程度; ③ 改正数的平方和为最小; ④ 根据地质情况确定限制条件.

本文在处理过程中, 采用 ITRF 2000 提供的上海站(SHAO)的坐标和速度, 固定上海站.

1.2 精度评定

对式(1), 近似值由 P_i 变为 P 后, 常数项 L_i 变为 $L_i + A_i (P_i - P)$, 而 $L_i^T D_i L_i$ 变为 $L_i^T D_i L_i + 2 C_i^T (P_i - P) + (P_i - P)^T N_i (P_i - P)$; 常数项由 C_i 改变为 $C_i - N_i (P_i - P)$, 而 $C_i^T x$ 变为 $C_i^T N_i^{-1} C_i + (P_i - P)^T N_i (P_i - P)$.

式中的 D_i 和 N_i 为第 i 测段的观测值权阵和法方程系数阵. 根据测量平差理论^[3], 有 $V^T D V = L^T D L - C^T x$, 从而得到

$$V^T D V = \sum_{i=1}^n L_i^T D_i L_i + 2 \sum_{i=1}^n C_i^T (P_i - P) - \sum_{i=1}^n C_i^T N_i^{-1} C_i \quad (7)$$

其中, $L_i^T D_i L_i = V_i^T D_i V_i + C_i^T x$. 式中的 $V_i^T D_i V_i$ 可由 GAMIT 单天解, 得结果文件(H-file)中的单位权中误差(nrms)以及观测值个数(double-difference observations)求得. 故最后解的单位权中误差为

$$\sigma_0 = \sqrt{V^T D V / (m - l)} \quad (8)$$

式中, m 为总的观测值个数, l 为未知数个数.

2 板块运动欧拉理论

全球大陆按地质构造和断裂带分布划分为大小不一的构造板块. 假设板块内的运动为刚体运动, 根据欧拉定理, 在球面上任意移动的点可等效为该点绕某一定轴的角速度转动. 用公式表示为^[4, 5]

$$v_i = \Omega \times r_i \quad (9)$$

式中: v_i 是板块中测站 i 的速度矢量(v_x, v_y, v_z), Ω 是板块运动的欧拉矢量($\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z$), r_i 是测站的位置矢量(x, y, z). 展开后即为

$$\begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{pmatrix}_i = \begin{pmatrix} 0 & z & -y \\ -z & 0 & x \\ y & -x & 0 \end{pmatrix}_i \begin{pmatrix} \Omega_x \\ \Omega_y \\ \Omega_z \end{pmatrix} \quad (10)$$

由于板块运动主要沿水平方向, 得到的是空间直角坐标系里的速度, 需通过下式转换为地面站心坐标系里的速度(v_n, v_e):

$$\begin{pmatrix} v_n \\ v_e \end{pmatrix}_i = \begin{pmatrix} -\cos \lambda \sin \varphi & -\sin \lambda \sin \varphi & \cos \varphi \\ -\sin \lambda & \cos \lambda & 0 \end{pmatrix}_i \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{pmatrix}_i$$

综合两式, 欧拉定理展开式可以表示为

$$\begin{pmatrix} v_n \\ v_e \end{pmatrix}_i = \begin{pmatrix} r \sin \lambda & -r \cos \lambda & 0 \\ -r \sin \varphi \cos \lambda & -r \sin \varphi \sin \lambda & r \cos \varphi \end{pmatrix}_i \begin{pmatrix} \Omega_x \\ \Omega_y \\ \Omega_z \end{pmatrix}_i \quad (11)$$

式中: v_n, v_e 分别为台站东向和北向速度; φ, λ 分别为台站的纬度和经度. 选取板块中的 IGS 常年观测台站, 获得其台站位置及运动速度, 通过最小二乘法, 就能求出该板块的欧拉矢量. 将欧拉矢量($\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z$)通过下式转换到球面坐标 $\Omega(\Omega, \lambda, \varphi)$:

$$\left. \begin{aligned} \Omega &= \sqrt{\Omega_x^2 + \Omega_y^2 + \Omega_z^2} \\ \lambda &= \tan^{-1}(\Omega_y / \Omega_x) \\ \varphi &= \tan^{-1}\left(\Omega_z / \sqrt{\Omega_x^2 + \Omega_y^2}\right) \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

表 2 各测站在 ITRF 框架下的漂移速度

Tab. 2 Calculated velocities under the ITRF frame

速度		测站					
方向	数值和误差	BJFS	LHAS	SHAO	URUM	WUHN	XIAN
v_x	数值/($m \cdot a^{-1}$)	-0.056 4	-0.054 2	-0.030 7	-0.051 5	-0.047 2	-0.047 5
	中误差	0.000 1	0.000 4	0	0.001 6	0.004 4	0.015 8
v_y	数值/($m \cdot a^{-1}$)	-0.018 1	-0.012 1	-0.011 2	-0.000 8	-0.004 1	-0.003 6
	中误差	0.000 5	0.000 6	0	0.001 1	0.000 2	0.001 1
v_z	数值/($m \cdot a^{-1}$)	-0.019 7	-0.010 2	-0.013 4	0.000 6	-0.005 2	-0.010 2
	中误差	0.005 5	0.004 0	0	0.001 0	0.002 2	0.001 1

通过对计算值与已知值的比较, 可以看出, 除了 URUM 站的 y 方向差值较大外, 其余各点的计算结果均较好, 漂移速度的大小和方向与 IGS 站提供的速度基本一致. 得出各台站在空间直角坐标系中的漂移速度后, 由式 (11) 求得各测站在地面站心坐标系北向和东向的漂移速度 v_n, v_e , 如表 4 所示. 从表中可以看出, 各台站都有向东漂移的趋势, 其中

3 数据处理

数据可从 IGS 站免费下载, 本文采用了 1998 ~ 2004 年中国境内的部分观测资料, 观测站点分别为北京(BJFS)、拉萨(LHAS)、上海(SHAO)、武汉(WUHN)、乌鲁木齐(URUM)和西安(XIAN). 选取的时间段如表 1 所示.

表 1 各测段观测站点分布情况

Tab. 1 Observation time span

年份	年积日	观测站点
1998	001 ~ 014	SHAO, WUHN, XIAN
1999	001 ~ 014	LHAS, SHAO, WUHN, XIAN
2000	001 ~ 014	BJFS, LHAS, SHAO, WUHN
2001	001 ~ 014	BJFS, LHAS, SHAO, URUM, WUHN
2002	001 ~ 014	BJFS, LHAS, SHAO, URUM, WUHN
2003	001 ~ 014	BJFS, LHAS, SHAO, URUM, WUHN
2004	031 ~ 044	BJFS, LHAS, SHAO, URUM, WUHN

先采用 GAMIT 软件, 固定上海站(SHAO), 求单天解, 得中间结果(H-file). 再采用上述台站漂移数学模型, 求解 ITRF 2000 框架下各台站在空间直角坐标系中的漂移速度. 结果如表 2 所示.

解算时, 引用了 ITRF 2000 中 SHAO 坐标($x = -2\ 831\ 733.268\ m, y = 4\ 675\ 666.039\ m, z = 3\ 275\ 36921\ m$)和速度($v_x = -0.030\ 7\ m \cdot a^{-1}, v_y = -0.011\ 2\ m \cdot a^{-1}, v_z = -0.013\ 4\ m \cdot a^{-1}$), 固定了上海站(SHAO), 所以解算得到的台站漂移速度是相对于上海站的. 与 IGS 公布的结果相比较, 如表 3 所示.

BJFS 站的漂移速度最大.

按照美国 UNAVCO 的 GPS 研究机构提供的, 以 NNR-NUVELIA 模型为背景的全球板块及板块形变区分布图, 符养^[4]等人将六大板块之一的欧亚板块划分为新欧亚板块和中国板块. 根据他们的划分, 本文采用的 IGS 台站 XIAN, LHAS, SHAO, WUHN 处在中国板块内. 利用表 2 中的结果, 运用

本文第三部分介绍的板块运动欧拉理论, 得到了中国板块的欧拉矢量, 如表 5 所示。

表 3 在 ITRF 框架下漂移速度计算值与已知值比较

Tab. 3 Comparison between the calculated velocity and the velocity given by the IGS under the ITRF2000 frame

测站	m · a ⁻¹					
	v _x		v _y		v _z	
	计算值	已知值	计算值	已知值	计算值	已知值
BJFS	-0.056 4	-0.044 4	-0.018 1	0.014 1	-0.019 7	-0.001 3
LHAS	-0.054 2	-0.046 2	-0.012 1	-0.007 6	-0.010 2	0.012 1
SHAO	-0.030 7	-0.030 7	-0.011 2	-0.011 2	-0.013 4	-0.013 4
URUM	-0.051 5	-0.030 6	-0.000 8	-0.005 5	0.000 6	-0.000 3
WUHN	-0.047 2	-0.032 5	-0.004 1	-0.007 7	-0.005 2	-0.011 9
XIAN	-0.047 5	-0.033 6	-0.003 6	-0.004 2	-0.010 2	-0.011 9

表 4 各测站在站心坐标系下的漂移速度

Tab. 4 Calculated velocities under the station defined frame

速度		测站					
方向	数值与误差	BJFS	LHAS	SHAO	URUM	WUHN	XIAN
v _n	数值/(m · a ⁻¹)	-0.024 1	-0.014 8	-0.014 7	-0.013 3	-0.015 9	-0.019 9
	中误差	0.004 5	0.003 1	0	0.008 1	0.001 8	0.008 6
v _e	数值/(m · a ⁻¹)	0.058 8	0.056 1	0.032 3	0.045 7	0.042 5	0.043 2
	中误差	0.000 2	0.000 3	0	0.000 6	0.008 4	0.000 4

表 5 中国板块的欧拉矢量

Tab. 5 Euler vector of China plate

Ω/(° · Ma ⁻¹)	λ/(°)	φ/(°)
0.421 ± 0.021	-94.0 ± 0.16	50.2 ± 0.10

采用 IGS 公布的 ITRF 2000 框架下四个台站的坐标及速度场, 求得板块欧拉矢量为: 0.419 ± 0.011, -104.2 ± 0.09, 60.2 ± 0.11. 此结果与本文的结果相比, 旋转速率基本一致, 旋转极纬度相差最大, 与 IGS 数据计算值差值达到了 16.7%. 原因可能在于: 本文采用的数据跨度为 1998 ~ 2004 年, 各个台站相对于 ITRF 2000 框架存在着不同程度的漂移. 为此, 本文又对 1998 ~ 2001 年的数据采用上述方法, 求得中国大陆板块欧拉矢量为

(0.405 ± 0.014, -100.1 ± 0.12, 56.8 ± 0.14)

此结果与用 IGS 公布数据所得结果基本一致。

4 结论

本文使用 GAMIT 软件解算了中国境内的 IGS 台站单天基线向量. 基线解算过程中, 为了得到在严格基准下的形变网地心坐标, 处理过程中固定了上海站(SHAO). 从 GAMIT 输出的中间结果出发, 利用台站漂移数学模型, 将多测段的单天解参与综合平差. 既考虑了各期计算结果之间的相互联系, 又考虑到了各个测站间的相互关系. 结论如下:

(1) 求得的各个台站速度与 IGS 公布的结果相

近, 结果表明, 中国大陆整体有向东漂移的趋势。

(2) 利用算得的台站速度, 根据欧拉定理算出中国板块的欧拉矢量. 本文模型的结果与采用 IGS 公布的台站的信息计算的结果相近。

参考文献:

- [1] 陆彩萍, 王解先. GPS 监测地壳运动数据处理[J]. 大地测量与地球动力学, 2002, (4): 56-60.
LU Cai-ping, WANG Jie-xian. Data processing for GPS crust movement monitoring network[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2002, (4): 56-60.
- [2] 王解先. GPS 精密定轨与定位[M]. 上海: 同济大学出版社, 1997.
WANG Jie-xian. Precise orbit determination and ground point positioning of GPS[M]. Shanghai: Tongji University Press, 1997.
- [3] 樊功瑜. 误差理论与测量平差[M]. 上海: 同济大学出版社, 1998.
FAN Gong-yu. Error and adjustment theory in surveying[M]. Shanghai: Tongji University Press, 1998.
- [4] 符 养. 中国大陆现今地壳形变与 GPS 坐标时间序列分析[D]. 上海: 中国科学院上海天文台, 2002.
FU Yang. Crust movement of China continent block and time series analyse by GPS[D]. Shanghai: Shanghai Astronomical Observatory Chinese Academy of Sciences, 2002.
- [5] 金双根, 朱文耀. 基于全球板块运动模型分析大西洋扩张运动[J]. 测绘科学, 2002, 27(1): 31-35.
JIN Shuang-gen, ZHU Wen-yao. Analysing the extending of atlantic based on global plate motion models[J]. Science of Surveying and Mapping, 2002, 27(1): 31-35.

(编辑: 陶文文)