

中国新疆及其天山地区地壳运动特征分析

蒋志浩¹ 张 鹏¹ 秘金钟²

(1 国家基础地理信息中心, 北京市海淀区紫竹院百胜村 1 号, 100044)

(2 中国测绘科学研究院, 北京市海淀区北太平路 16 号, 100039)

摘 要: 介绍了 GPS 监测网的布网方案、点位的选取、观测方案、数据处理方案等, 并阐述了对两个监测网多期观测成果联合处理、分析的方法, 给出了新疆及其天山地区板内块体相互运动变化的趋势。

关键词: 新疆; 监测网; 地壳运动

中图法分类号: P227. 1; P228. 42

新疆 GPS 地壳形变监测网(新疆网)由国家测绘局建于 1995 年, 至 2000 年已完成该网的六期观测。天山地区 GPS 地壳形变监测网(天山网)建于 1998 年, 至 2002 年已经完成该网的三期观测。布设该监测网的主要目的是通过高精度的 GPS 测量手段, 监测新疆及其天山地区地壳运动变化, 为该地区的地壳形变及其地球动力学机制的研究提供基础数据。

1 布网方案和选点埋石

新疆地跨塔里木板块、西伯利亚板块、哈萨克斯坦板块、华南及印度板块, 采用 GPS 手段监测板块移动是目前有效途径之一。参考国际上类似的 GPS 监测网布设方案, 顾及在中国实施的现实性, 笔者设计了地壳形变监测网的布网方案。天山网由 3 个固定站(喀什、三岔口、乌鲁木齐)、14 个主站和 14 个辅点组成。点位集中分布在新疆南天山地区。新疆网由两个固定站(喀什、乌鲁木齐)、8 个主点和 9 个辅点组成, 点位较均匀地分布在新疆版图范围内。点位的选取考虑到所选点位能够充分体现该地区的地壳运动特征, 并且能够满足 GPS 观测的技术要求和实际需要, 利于长期保存以具备长期监测的可能性等条件。

2 观测技术方案

GPS 监测网的四期观测均采用 GPS 基准站

联测方式, 以喀什和乌鲁木齐跟踪站和三岔口主点为固定站。每期观测的流动站有 4-8 台接收机不等(Trimble 4000SSE, ASHTECH Z-XII), 仪器在每次作业前进行检验, 以保证观测精度和数据的可靠性。同时要求流动站之间进行同步观测, 以增强图形几何强度。固定站因各期的不同连续观测 20~30 GPS 日不等, 每天为一时段。流动站连续观测 3 个 GPS 日, 辅点和主点联测 8~14h, 数据采样间隔 30s, 卫星截止高度角 15° 。各期观测均符合技术要求。

3 GPS 监测网数据处理方案

新疆地区及其天山地区地壳运动 GPS 形变监测网是大尺度、高精度、具有多期复测成果的 GPS 网。通过该网各期原始观测数据的后处理可得到不同的解, 其中包括固定点解、约束解、无基准解等。对高精度 GPS 监测网, 若参考站有精确的坐标和运动速率, 强约束参考基准为首选方案。但有时位置基准存在误差, 并且 GPS 网有坚强的几何强度, 于是强约束参考基准可能会对网产生扭曲变形, 从而引起整个 GPS 网位置基准系统性的偏差。所以现在普遍认为无基准解最适宜于地壳运动分析, 而且无基准解相对位置精度最高。目前对无基准解有多种定义方式。同常规地面观测网中的自由网解一样, 无基准解的基本特点在于它所确定的观测点位几何形状只取决于观测数据的质量与数量, 而同地面基准解的已知

坐标(质量)无关,能最准确地求解观测的点所构成的几何形状及其形变。但这种三维的无基准解的空间坐标系常常是不定的,相应的椭球体定向与在地球内部的定位也就不同,例如,不同时期的解的结果可能属于不同的坐标系。因此无基准解必须变换为与一定(全球或局部)的坐标参考框架有关的解,才能计算位移,才能利用该框架中统一的椭球面上投影表示地壳的水平与垂直运动。因此,对于不同的解,特别是无基准解,统一(全球或局部)坐标参考框架是获得投影到同一椭球面上的地壳运动信息的必要条件之一。

3.1 数据处理软件和处理策略

新疆网和天山网的数据处理和分析采用 GAMIT10.4/GLO BK5.0 进行解算。不同期成果联合解算原则就是将单天解中无约束的协方差矩阵进行叠加处理得到最终的平差结果。首先需要确定的是确定统一的 ITRF 坐标参考框架,即引入国际 GPS 跟踪站在框架下的坐标以及相应的速度信息,确保测站位置成果的可靠性;根据国际站在 ITRF 框架中实际的地心坐标精度确定其点位约束值;在平差过程中进行相似变换以消除天与天之间、网与网之间的系统误差。

3.2 坐标参考框架的选取

各期监测网在数据处理时,采用的地面坐标基准为自由基准;星历和 EOP 的基准分别为 ITRF93、94、96、97、2000 坐标参考框架。因此分析五年来的测站的点位位移情况,必须首先将两个监测网多期数据处理成果化算至统一的 ITRF2000 坐标框架下。

为了将新疆网和天山网的坐标解和速度解更好地纳入统一的 ITRF2000 框架,在最终联合平差阶段,将全球大约 55 个 IGS 核心站的 H 文件与单天解中无约束的协方差矩阵(H 文件)联合处理。为了定义参考框架,将 IGS 核心站的 ITRF2000 框架下的坐标和速度加 1δ 的约束,同时给予轨道较松弛的约束。这样的处理结果是属于 ITRF2000 框架的。

4 监测网速度计算与精度分析

从 GPS 观测数据首先得到精密定位结果,然后得到地面点运动的位移信息。目前常采用如下两种方案计算位移:①利用各期观测得到的综合平差结果求得任两期测量间的位移及其协方差。②利用多期观测数据作为位移线性速率平差,得到各点的位移年速率及其协方差阵。

4.1 实测速度场计算

地壳运动图像由代表地质结构特征的一系列点的速度矢量描述。用 GPS 监测地壳运动,实质上是用 GPS 数据估算这些点的速度值。为了得到速度场,采取两个步骤:1)用 GPS 数据计算点位置的最小二乘估值。此步骤由 GAMIT 软件完成。2)根据复测的同一点坐标估值的时间历史序列,通过 Kalman 滤波方法估算点的速度。此步骤由 GLOBK 软件完成。计算中使用 ITRF2000 框架,得到的速度场属于这个全球框架。

由几期观测成果得到位移的协方差阵可估计位移的精度或误差椭圆。利用平差得到的中误差主要反映观测结果与几何图形、观测值数量及与起算点的关系,不一定能反映各点的实际观测质量。

4.2 坐标与速度场精度的统计分析

为了与 GLOBK 求出的坐标和速度场信息有一个比较,以及检验 GLOBK 解算结果实际能够达到的精度指标,本文利用多期观测成果的坐标差,通过拟合的方法求点位速度场和精度。具体步骤如下:用 GLOBK 软件将新疆网 6 期的成果归算到统一 ITRF2000 框架下,从每年的 ORG 文件中提取各个测站的坐标位置,这样 6 期的坐标成果是在相同的框架下,但不是相同的历元下。以监测网 1995 年的坐标位置为初值,以后每年的坐标位置减去坐标初值,从而得到每年坐标位置的相对变化量。通过每年的坐标变化量可以生成变化量的时间序列图。

速度场拟合方法为:设速度场变化曲线为 $y = ax + b$,其中 x 为 GPS 年数, y 为 GPS 年坐标位置, a 、 b 为未知数,分别代表斜率和截距。

令 $v = y - (ax + b)$,采用最小二乘法解算方程,即令 $v^T v = \min$,则得到未知数 $(a \ b)^T$ 的解和单位权中误差 σ_0 ,即

$$(a \ b)^T = [(x \ 1)^T(x \ 1)]^{-1}[(x \ 1)^T y]$$

$$\sigma_0^2 = \frac{v^T v}{n - 1}, \mathbf{D}_x = \sigma_0^2 [(x \ 1)^T(x \ 1)]^{-1}$$

式中, a 为年速度场信息, σ_0 为每年解坐标的离散度。 σ_0 的大小既反映每年解算坐标的精度,又反映速度场拟合的精度。当残差 v 是随机分布时, σ_0 为每年坐标的精度;当 v 存在系统偏差,则说明 a 不太可靠,存在其他系统偏差或误差。

由表 1 可见,纬度 N 的坐标离散在 $1 \sim 4\text{mm}$ 之间变化,经度 E 在 $2 \sim 7\text{mm}$ 之间变化,高程 U 在 $15 \sim 38\text{mm}$ 之间变化。从速度场精度来看, N 方向速度场精度为 $0.4 \sim 0.8\text{mm/a}$, E 方向速度

场精度为 $0.9 \sim 1.8 \text{ mm/a}$, U 速度场精度为 $3 \sim 8 \text{ mm/a}$ 。

表 1 通过拟合方法求出的速度场、速度场精度及坐标残差的离散度

Tab. 1 Results of Velocity, Precision of Velocity and Residual Error of Coordinate

点名	$V_N/\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$	N 速度场精度	N 离散度	$V_E/\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$	E 速度场精度	E 离散度	$V_U/\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$	U 速度场精度	U 离散度
博乐	0.043	0.470	1.968	42.963	0.963	4.029	16.171	4.386	18.348
库尔勒	4.734	0.604	2.526	40.500	1.257	5.256	15.897	3.622	15.151
且末	7.491	0.864	3.615	32.291	1.867	7.812	20.489	8.108	33.917
库车	5.630	0.826	1.968	40.970	0.634	2.004	18.500	5.827	18.427
喀什	15.549	0.125	0.524	37.237	1.194	4.997	32.146	9.274	38.795

图 1 为监测网喀什站坐标与速度场信息及其拟合残差统计图, 图中横轴为观测年份。图 1(a)、1(b)、1(c) 中的纵轴为各年坐标与初值坐标之差, 颜色较淡的线分别表示 N 、 E 、 U 每年解的实际位置, 颜色较深的线分别表示由拟合的速度场得到的 N 、 E 、 U 位置。可以看出, E 、 N 坐标随时间的变化位于速度场拟合直线两侧, 基

本上为随机分布; N 变化的振幅在 2 mm 以下, E 变化的振幅在 8 mm 以下, 但 U 变化的振幅则超过了 40 mm 。图 1(d)、1(e)、1(f) 中的纵轴为每年解的实际坐标与由拟合的速度场确定的坐标之差, 图中的线分别表示 N 、 E 、 U 二者之差。可以看出, 测站的 N 、 E 坐标残差随时间的变化为随机变化曲线, 而高程 U 坐标残差仍有大的跳变。

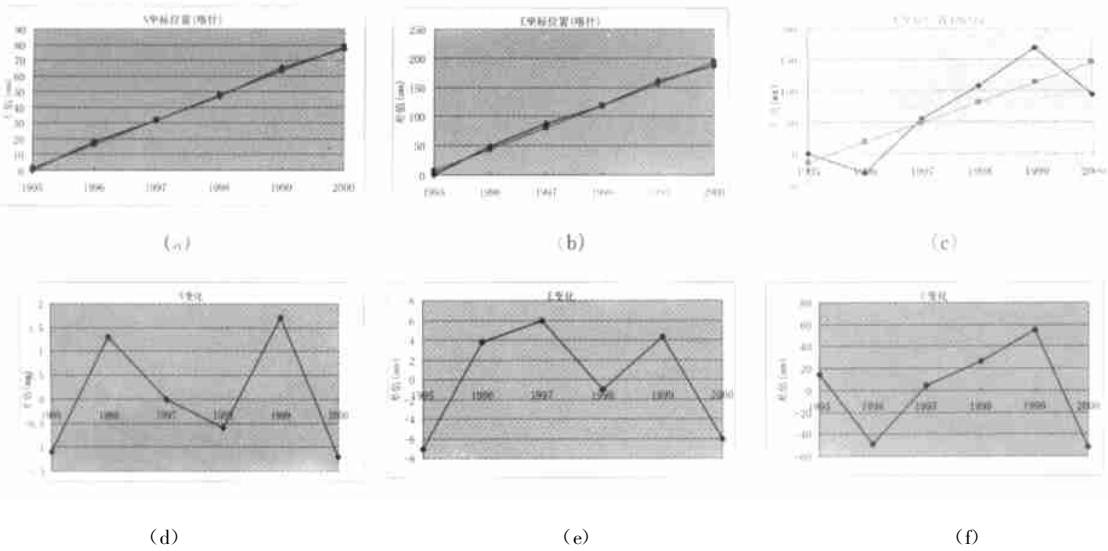


图 1 监测网喀什站坐标与速度场信息及其拟合残差统计图

Fig. 1 Information and Residual Error in Coordinate and Velocity of Kashi

5 新疆地区块体运动讨论

新疆地区地壳形变监测网 6 期成果的综合分析采用了欧亚块体定义参考框架, 并选取了欧亚板块全球站数据和中亚地区较为稳定的点作为实现参考框架的框架点。目前国际上以坐标和速度场最为精确的 ITRF 2000 坐标参考框架作为形变分析的坐标框架基准。由于各点在 ITRF2000 框架下的速度场包含有欧亚板块运动和大陆板内运动, 因而采取从 ITRF2000 框架下的绝对速度减去欧亚板块运动速度来得到大陆板内运动速度。

由于全球运动模型基准不一定适用于描述局部地区的地壳相对运动, 在 ITRF 2000 坐标框架

中求出的点位速度值, 不易分辨我国大陆内部的相对运动情况。图 2 列出了新疆网和天山网点在欧亚板块基准下的板内速度场。利用这一基准易于直接反映我国西部地壳的内部运动。

1) 新疆地区位于青藏高原板块北缘。从板内速度场描述可看出, 在新疆中部库尔勒和乌鲁木齐一带, 速度为 $5 \sim 10 \text{ mm/a}$, 方向北东; 西部距印度碰撞带较近, 地壳位移速度明显加大, 乌什、喀什一带, 速度达 $20 \sim 25 \text{ mm/a}$, 方向北东。在塔什库尔干、麻扎地区速度达 35 mm/a , 方向北东。

2) 由于印度板块向欧亚板块的挤压, 帕米尔-西昆仑山向西南塔里木盆地俯冲, 西塔里木盆地以约 20 mm/a 的速度向北东位移, 而东塔里木盆地则以约 14 mm/a 的速率向北位移。而且西塔里

木盆地以约 2mm/a 缩短(根据喀什、和田的北向位移速率得到), 而东塔里木盆地以 1mm/a 南北伸展(根据库车、库尔勒的北向位移得到)。

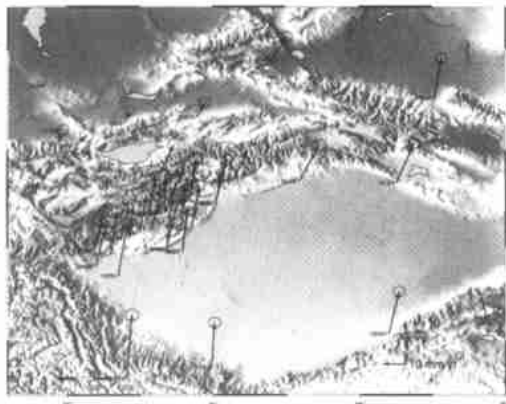


图2 新疆、天山监测网速度场(相对于欧亚板块)

Fig. 2 Velocity of GPS Monitoring Network in Xinjiang and Tianshan

3) 天山山脉横亘本块体中部, 以南是塔里木地块, 以北是准噶尔地块, 根据阿克苏、库尔勒、喀什和乌鲁木齐诸点的位移矢量, 可以判断出西天山以 10~12mm/a 南北缩短, 东天山约 3mm 缩短, 天山由西向东, 缩短速率明显减少, 其中喀什(KSSY)附近的西天山地区南北缩短比较明显, 天山山脉东西方向约有 2mm 的年伸缩率。

6 结 语

通过对新疆地区布设的 GPS 地壳形变监测网的处理和分析, 初步得到以下结论。

1) 为了研究新疆及其天山地区地壳运动与构造变形, 选择恰当的运动参考基准是最为关键的问题。

2) 为了获得点位位移时间序列, 本文阐述了由无基准解得到的全球精密坐标框架下的自由网解的方法, 同时为了不同的分析研究目的, 应选取适当的位移解基准及与基准有关的位移的时间过程。

3) 监测网点坐标残差随时间的变化基本上为随机变化曲线, 振幅在 5~30mm; 速度场拟合后的 NE 分量每年解坐标的离散度约为 5mm, 它比每年解给出的中误差要大 2~3 倍; 拟合的速度场精度在 N 、 E 方向为 1mm/a 左右, 优于点位坐标的精度, 可以反映点位的变化规律。从速度场数值与速度场精度的数值的大小可以看出, 解算的速度场及其精度是可靠的。

参 考 文 献

- 1 李毓麟, 刘经南, 葛茂荣, 等. 中国国家 A 级 GPS 网的数据处理和精度评估. 测绘学报, 1996(2)
- 2 顾国华, 牛红叶, 孟国杰. 中国地壳运动观测网络 GPS 数据处理进展. 高精度 GPS 观测资料处理、解释研讨会, 2001
- 3 黄立人. GPS 观测结果变形分析的参考框架及其合理性. 测绘学报, 2001(1)
- 4 魏子卿. 中国大陆大尺度现代地壳运动. 高精度 GPS 观测资料处理、解释研讨会论文集, 2001
- 5 蒋志浩, 张 鹏, 李毓麟. 中国新疆地区地壳运动监测网研究. 测绘通报, 2002

第一作者简介: 蒋志浩, 现从事 GPS 数据处理与成果分析工作。

Analysis of Crustal Movement in Xinjiang and Tianshan Area

JIANG Zhihao¹ ZHANG Peng¹ BI Jinzhong²

(1 National Geomatics Center of China, 1 Baishengcun, Zizhuyuan, Beijing, China 100044)

(2 Chinese Academy of Surveying and Mapping 16 Beitaiqing Road, Beijing, China, 100039)

Abstract: The network layout, site choice, observation project, data-processing methods are introduced in this paper. And the method of jointly processing and analysis with two GPS network and multi-period observation is demonstrated by GPS technology. Plate conformation and movement in Xinjiang area and Tianshan area are studied.

Key words: Xinjiang; monitoring network; crustal movement