

亚太网三期 GPS 观测数据处理结果 及地壳形变特征分析

冯金涛^{1,2}

(1. 同济大学测量与国土信息工程系, 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:本文对亚洲太平洋地区地球动力学计划(APRGP, 简称亚太网)在1999—2001年采集的三期GPS观测数据, 利用GAMIT/GLOBK软件进行了分析处理, 得出各期的观测站在ITRF97框架下的三维直角坐标, 并根据三期观测数据中的重复观测站进行了速度场计算和地壳形变特征分析。结果表明亚洲大陆板块具有明显的顺时针旋转运动特征; 印度板块和澳大利亚板块从西南方向对亚洲大陆板块进行挤压; 而西太平洋地区各观测站则向西北方向运动。这些特征与国内GPS区域网观测数据处理得出的结论是一致的, 而本文则揭示了更大范围的亚洲太平洋地区地壳形变信息。

关键词: 亚太网; GPS; GAMIT; 数据处理; 地壳形变

中图分类号: P227 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2006)03-0221-04

Data Processing of APRGP GPS in 3 Epoch Observations and Crust Deformation Analysis

FENG Jin-tao^{1,2}

(1. Department of Surveying and Geo-informatics, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Key Laboratory of Modern Engineering Surveying, State Bureau of Surveying and Mapping, Shanghai 200092, China)

Abstract: In this paper, the data processing solution of APRGP GPS 3 observation epochs from 1999 to 2001 is given. The position estimation of each station in 3D rectangular coordinate system under ITRF97 frame is given by using GAMIT/GLOBK software, while the velocity field based on the data of re-occupied sites is computed and crust deformation of this region is also analyzed. The result shows that Asian mainland plate rotates clockwise, and been extruded by Indian plate and Australian plate from south-west, while the stations in western Pacific Ocean move toward northwest. All these features are consistent with those conclusions achieved by using GPS data from regional networks in China, while this paper provides the information on crust deformation in a wider region within Asia and the Pacific Ocean.

Key words: APRGP; GPS; GAMIT; Data processing; Crust deformation

0 引言

亚洲太平洋地区地球动力学计划(APRGP)旨在联合各国有关技术力量和设备条件, 建立该地区统一的地球空间数据参考框架, 广泛而深入地研究亚洲和太平洋地区的地壳构造运动特征, 为开展地

球科学研究和预测地震等自然灾害服务。GPS技术是APRGP进行大地测量观测的主要技术手段之一, 该项目分别在1999年10月31日—11月9日、2000年10月8—15日、2001年10月7—18日年进行了三期GPS同步观测。本文根据该项目的三期

GPS 观测数据,利用 GAMIT/GLOBK 软件进行了计算和分析,得出各期的观测站在 ITRF97 框架下的三维直角坐标。另外该地区因位于欧亚板块、菲律宾板块、印度板块、澳大利亚板块、太平洋板块等的碰撞交会地带,地质构造运动非常显著,为此本文结合这三期 GPS 观测数据的处理结果,对该地区的观测站运动速度场进行了计算和分析。

国内专家曾经利用有关数据,计算了中国大陆水平运动速度场。王琪将中国大陆内外的 IGS 永久性连续观测与国内不同时期的流动观测数据相结合,利用 GIPSY/OASIS-Ⅱ 软件进行统一处理,得到中国大陆的地壳运动速度场^[1]。王敏收集全国 GPS 一、二级网,国家高精度 GPS A、B 级网,全国 GPS 地壳运动监测网,若干区域 GPS 地壳形变监测网,以及国家重大科学工程“中国地壳运动观测网络”等的大量数据,利用 GAMIT/GLOBK 软件进行数据处理,得到一个包含观测站位置、极移和卫星参数的松弛解及方差—协方差矩阵,并利用 QOCA 软件求解实测速度场^[2]。他们得出的中国大陆相对于稳定的欧亚板块的速度场图像,都揭示青藏高原地区具有顺时针旋转运动特征,而东北地区则相对较为稳定,华南地区内部不存在明显的速度梯度带,作为一个整体有向东南方向运动的趋势。

1 数据处理方案

各期观测数据的统计情况如表 1 所示。应当说明的是,由于受到亚洲太平洋地区的地理特征限制,参加联测的这些观测站的空间分布是很不均匀的,而且仅一部分观测站进行了两期或三期的重复观测。在这些数据中,马来西亚参加联测的观测站数量最多,提供的数据相对较丰富(参加三期联测的观测站数分别为 28,23,31);而香港地区的观测站密度最大(参加三期联测的观测站数分别为 8,14,14);中国大陆地区仅有 URMQ、BEIJ、CC06 等三个站参加了 1999 年的联测。由于各期参与联测的观测站比较多,受计算机硬件和软件条件限制,对这些观测站按地理位置进行了分区处理,各区的观测站数目如表 1 所示。另外为了引入基准条件,从互联网下载了约 18 个 IGS 跟踪站的观测数据,分别与所在区域的观测站一并处理。

这些 IGS 跟踪站的位置精度并不一致,在引用其位置数据时必须注意它们的这个区别,因此只对其中坐标精度较高的几个观测站采用强约束(X, Y, Z 方向的约束值分别为 1 cm, 1 cm, 1 cm),如

SHAO、BAHR、IRKT、IISC、GUAM、KWJ1、HOB2、AUCK、CHAT 等跟踪站。在保证各区至少强约束 3~4 个 IGS 跟踪站的前提下,引入松约束 IGS 站的意义仅在于增加了部分观测数据。

表 1 APRGP 三期观测数据和引用 IGS 跟踪站数目统计

观测日期(年积日)	分区编号	APRGP	IGS
		观测站数	跟踪站数
1999 年 304—313	reg9901	36	6
	reg9902	44	6
	reg9903	26	6
2000 年 282—288	reg0001	44	5
	reg0002	32	6
	reg0003	18	7
2001 年 280—290	reg0101	25	7
	reg0102	25	5
	reg0103	36	5
	reg0104	28	7

数据处理采用 IGS 的精密星历文件,作为位置基准的 IGS 跟踪站坐标值取自 ITRF(国际地球参考框架)提供的数据,并归算到各观测区间中点对应的历元,数据参考框架采用 ITRF97。严格地讲,在得到的最后结果中,卫星位置、跟踪站位置、观测站位置应该是相互统一的,都属于 ITRF97 框架,但是在解算过程中必须考虑到各种误差源的影响。例如一般认为目前 IGS 精密星历的误差 $\leq \pm 5$ cm,根据误差传播定律可推导出它对解算基线长度的影响为^[3]

$$\frac{|\Delta r|}{10|r|} < \frac{|\Delta b|}{|b|} < \frac{|\Delta r|}{4|r|} \quad (1)$$

其中 Δr 为卫星的轨道误差; r 为卫星的地心位置向量; Δb 为基线向量 b 的误差。假设 $|r| = 25\ 000$ km, $|\Delta r| = 5$ cm, 基线长度 $|b| = 10\ 000$ km, 则轨道误差对计算基线长度的影响将达到 0.5 cm。由于在这三期 GPS 观测数据中,有相当数量的基线长度接近 10 000 km, 为此我们必须考虑卫星位置误差的影响,将它们作为随机参数并给予适当的强约束。另外由于 IGS 跟踪站的坐标是利用全球长距离基线观测数据计算得出的,其地心坐标值不一定适合作为固定基准引入地区网中,因此应该采用基准点组的计算方法^[4]。

利用 GAMIT 软件对各单天观测数据进行解算,得出各待求参数(观测站坐标、卫星位置、对流层天顶延迟量、地球自转参数等)的估值和协方差矩阵,然后将它们作为伪观测值利用 GLOBK 软件进行综合计算。GLOBK 按照 Kalman 滤波的方法,综

合全部伪观测值计算出观测站坐标和速度。设对应历元 t_k 的线性化伪观测值向量为 $\delta l_k = l_k - l_{0k}$, 其中 l_{0k} 表示初始值, l_k 为 GAMIT 解算得出的伪观测值估值, 则 Kalman 滤波的观测方程^[5-7]

$$\delta l_k = A_k \delta x_k + \varepsilon_k \quad (2)$$

其中 δx_k 为待估参数; A_k 为系数矩阵; ε_k 为伪观测值 l_k 对应的观测噪声, 并且 $E\{\varepsilon_k\} = 0$, $E\{\varepsilon_k \varepsilon_k^T\} = P_k$, $E\{\varepsilon_{k+1} \varepsilon_k^T\} = 0_k$ 。Kalman 滤波的状态方程为

$$\delta x_{k+1} = S_k \delta x_k + q_k \quad (3)$$

其中 S_k 为状态转移矩阵; q_k 为状态噪声; 其协方差

矩阵为 Q_k , 且 $E\{q_k \varepsilon_k^T\} = 0$ 。则 Kalman 滤波从 t_k 到 t_{k+1} 历元的预测方程和改进方程分别为

$$\hat{\delta x}_{k+1|k} = S_k \hat{\delta x}_k \quad (4)$$

$$C_{k+1|k} = S_k C_k S_k^T + Q_k \quad (5)$$

$$\hat{\delta x}_{k+1} = \hat{\delta x}_{k+1|k} + K_{k+1} (\delta l_{k+1} - A_{k+1} \hat{\delta x}_{k+1|k}) \quad (6)$$

$$C_{k+1} = C_{k+1|k} - K_{k+1} A_{k+1} C_{k+1|k} \quad (7)$$

其中 C_k 为参数 δx_k 估值的协方差矩阵, $K_{k+1} = C_{k+1|k} A_{k+1}^T (P_{k+1} + A_{k+1} C_{k+1|k} A_{k+1}^T)^{-1}$ 即所谓的 Kalman 增益矩阵。

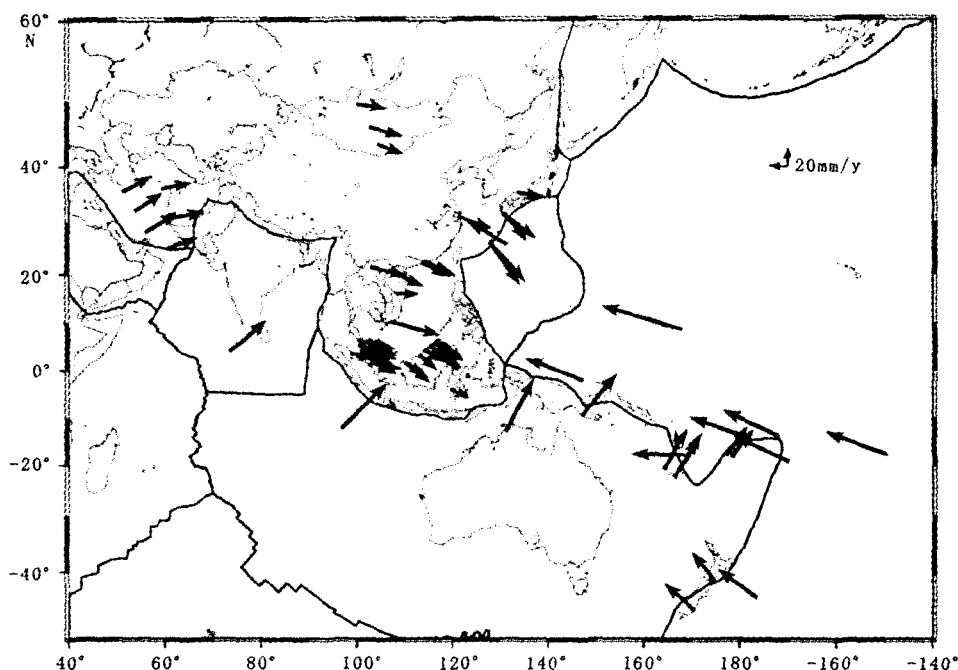


图1 APRGP 1999—2001 年三期观测数据得出的速度场分布

Fig.1 The velocity field resulted from APRGP data in 1999—2001.

2 观测站运动速度场分析

利用 GLOBK 软件求出 APRGP 这三期观测数据中重复测站的速度结果, 如图 1 所示。其中马来西亚地区观测站比较密集, 将该地区图形放大后如图 2 所示。另外根据 UNAVCO(大学导航卫星联盟)提供的全球板块边界数据, 在图 1 和图 2 中绘出了各板块的相应范围。

很明显, 位于伊朗境内和蒙古境内的几个观测站, 由于与中国大陆同位于欧亚板块, 所以具有相同的顺时针旋转运动趋势, 这个特征恰好与文献[1—2]的结论是一致的, 可以认为是关于中国大陆内部构造运动分析结果的外延, 说明亚洲大陆的地质构造运动具有一定的整体性。

关于太平洋西部诸岛国观测站的情况则比较

复杂。事实上这里是欧亚板块、澳大利亚板块、太平洋板块、菲律宾板块等的碰撞交汇地带, 因此该地区频发地震、火山等地质灾害。从图 1 可以明显看出, 位于太平洋板块的观测站运动方向与位于澳大利亚板块的观测站运动方向是完全不同的, 前者以较大的速度向西北方向运动, 对菲律宾板块和澳大利亚板块进行挤压, 而后者则以同样速度从西南方向对欧亚板块和太平洋板块进行挤压。

在图 2 上部, 我们可以看到在临近的两个岛屿上, 观测站位置具有相向运动的趋势。根据板块边界图来看, 它们分别位于菲律宾板块与欧亚板块交界线的两侧, 可见这个结果与板块构造运动理论是一致的。另外马来西亚参加这三期联测的众多观测站分别位于马来半岛和加里曼丹岛, 从图 2 可以看出它们很明显都具有向东南方向的运动特征。

但是位于马来半岛的观测站与位于加里曼丹岛的观测站在速度方向上存在明显的差别,说明这里的

板块构造运动可以相应地划分为两个较小的块体。

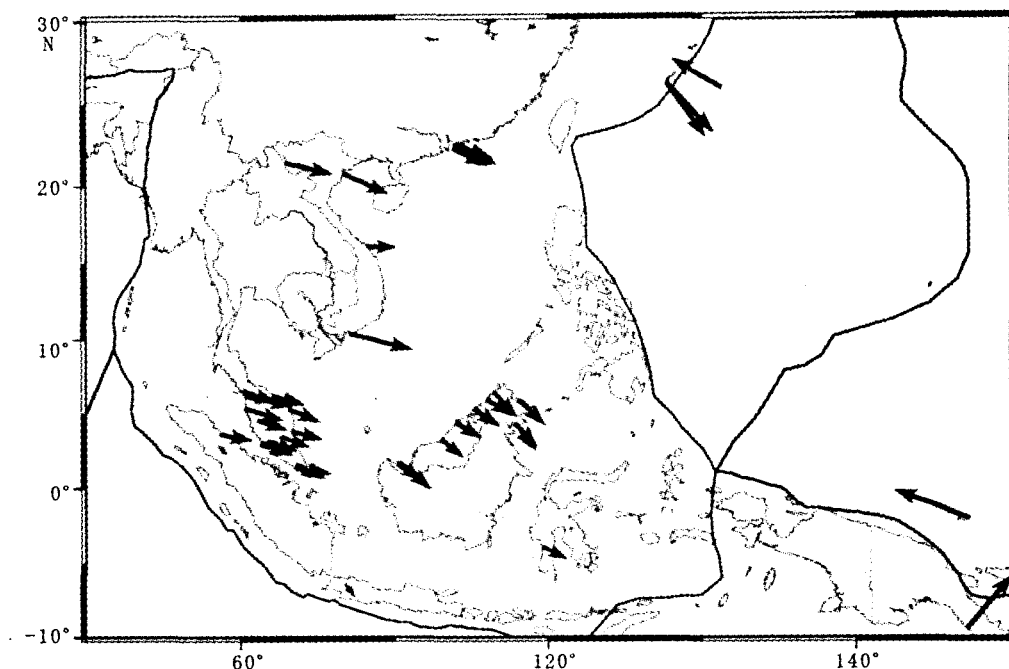


图 2 APRGP 1999—2001 年三期观测数据得出马来西亚地区的速度场分布

Fig. 2 The Malaysia velocity field resulted from APRGP data in 1999—2001.

3 讨论与总结

从数据获取结果来看,APRGP 组织的这三期 GPS 联测得到了丰富的观测数据,对于开展该地区的大地测量和地球动力学研究是非常有意义的。但是在数据处理中也发现了一些问题,例如参加 1999 年观测的 SIHA 站采用的是单频 GPS 接收机天线 (LEIAT201),不适合用 GAMIT 软件与其他观测站进行统一处理,于是本文决定不采用这个观测站的数据。另外有少数观测站的数据中混入了过多的说明信息,经过检查是因为在外业观测时按照每小时记录一次数据,然后传输至计算机就得到多个观测数据文件,将它们合并成一个 RINEX 文件时就产生了这些冗余的内容,对 GAMIT 读入观测数据是很不利的,对此只有将它们逐一删除,这样增加了非常多的手工操作。更重要的一个问题是,这些观测站没有采用统一的观测站标志,它们一部分是利用本国的形变监测网点,将 GPS 接收机天线安置在强制对中观测墩上,也有一部分是用三脚架将 GPS 接收机天线安置在大地测量控制点上。由于采用三脚架联结不利于准确量测天线高,稳定性也不如强制对中观测墩,因此对于开展地壳形变监测来说,建

议统一采用强制对中观测墩的测量标志。

根据本文的数据处理结果,位于伊朗境内和蒙古境内几个观测站揭示的地壳形变特征与国内专家利用有关数据得出的中国大陆地壳运动速度场具有很好的一致性,从而我们有理由认为亚洲大陆的地质构造运动具有一定的整体性。另外太平洋西部岛屿各观测站速度反映了该地区复杂的地质构造运动特征,这进一步验证了当今的地球动力学和板块构造理论对于该地区的解释,特别是发现菲律宾板块与欧亚板块交界处两侧的观测站具有明显的相向运动趋势。由于亚洲太平洋地区为全球的主要地质灾害多发地带,建议持续进行相关的大地测量和地壳形变监测工作,并对观测数据进行更细致更深入的分析,研究预测地震和火山活动的新方法。另外我们看到,参加 APRGP 联测的单位仍然很有限,如果有更多的国家参与到这个项目的观测活动中,必然可以得到该地区更全面的地壳形变特征信息。

感谢中国测绘科学研究院程鹏飞研究员和同济大学沈云中教授、陈义教授对作者的关怀和帮助!

$$\sum_{a=1}^N \Delta c_{ijml}^a \int_{V_a} \bar{G}_{ik,j'}(X', X) \bar{u}_{m,l'}(X') dV_{X'} \quad (22)$$

将式(20(a)、(b)、(c))和式(22)代入式(18),整理后可得

$$\bar{u}_k(X) = \bar{u}_k^{(i)}(X) + \sum_{a=1}^N \Delta \rho p^2 \int_{V_a} \bar{G}_{ki}(X, X') \bar{u}_i(X') dV_{X'} - \sum_{a=1}^N \Delta c_{ijml}^a \int_{V_a} \bar{G}_{ik,j'}(X', X) \bar{u}_{m,l'}(X') dV_{X'} \quad (23)$$

根据格林函数的性质,有 $\bar{G}_{ik,j'}(X', X) = -\bar{G}_{ik,j}(X', X) = -\bar{G}_{ki,j}(X, X')$, 最终可以得到含多个异质体的弹性区域在 Laplace 变换域位移场的积分方程:

$$\begin{aligned} \bar{u}_k(X, p) = & \bar{u}_k^{(i)}(X, p) + \sum_{a=1}^N \Delta \rho p^2 \int_{V_a} \bar{G}_{ki}(X, p; X', 0) \bar{u}_i(X', p) dV_{X'} + \\ & \sum_{a=1}^N \Delta c_{ijml}^a \int_{V_a} \bar{G}_{ki,j}(X, p; X', 0) \bar{u}_{m,l'}(X', p) dV_{X'} \end{aligned} \quad (24)$$

3 结论

对瞬态弹性波的散射问题,由于难以将时间从变量中分离出来,使得在稳态波动条件下推导的弹性波散射的积分方程难以运用。本文从弹性动力学的积分表示定理出发,在 Laplace 变换域内得到了一个和稳态问题在时间域内一个相似的位移场积分方程。相比钟伟芳的多个步函数方法,本文的推导方法不需要进行坐标的来回替换,简化了推导过程,推导的变换域位移场积分方程适合于求解瞬态波散射问题。根据推导的变换域位移场积分方程,结合问题的 Laplace 域内的 Green 函数,采用 Born 近似的方法,我们就可以求出散射远场任意一点在变换域内的位移,然后通过数值 Laplace 逆变换来得到相应的时域散射远场各点的位移。

【参考文献】

- [1] 钟伟芳,聂国华. 弹性波的散射理论[M]. 武汉:华中理工大学出版社,1997.
- [2] Gubernatis J E, Domang E, Krumhansl J A. Formal aspect of the theory of the scattering of ultrasound by flaws in elastic materials [J]. Journal applied physics, 1977, 48(7): 2804 - 2811.
- [3] 钟伟芳. 异质体弹性动力学问题的积分方程法和散射场[J]. 华中工学院学报, 1987, 15(3): 35-40.
- [4] 钟伟芳,聂国华. 含有两个异质体时弹性动力学问题在 Born 近似下的散射场[J]. 华中工学院学报, 1987, 15(3): 41 - 46.
- [5] 钟伟芳,聂国华. An integral equation of the scattering problem by many in-homogeneities and the scattered effect[J]. Appl. Mech., IAP Pergamon Press, 1989, 2: 1003-1008.
- [6] 邱畅. 连续屏障和非连续屏障远场被动隔振三维分析[D]. 同济大学, 2003.
- [7] 高广运,李志毅,邱畅. 弹性半空间不规则异质体引起的瑞利波散射[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(4): 378-382.
- [8] 冯文杰,邹振祝,薛德庆. 二维弹性波散射时域 Born 近似[J]. 工程力学, 1999, 16(5): 17-20.

(上接 224 页)

【参考文献】

- [1] Wang Qi, Zhang Peizhen, Freymueller J T, et al. Present-day crustal movement and tectonic deformation in China continent[J]. Science in China (Series D), 2002, 45(10): 865 - 874.
- [2] 王敏,张祖胜,许明元,等. 2000 国家 GPS 大地控制网的数据处理和精度评估[J]. 地球物理学报, 2005, 48(4): 817-823.
- [3] Jiang Weiping, Chen Junyong, Liu Jingnan, et al. Data Analysis and Final Solution for the APRGP97 GPS Campaign[A], PCGIAP Working Group 1 - Regional Geodetic Network Workshop[R]. Canberra 2-4, 1998: 50-60.
- [4] 顾国华,申旭辉,王敏,等. 中国大陆现今地壳水平运动基本特征[J]. 地震学报, 2001, 23(4): 362-369.
- [5] King R W, Bock Y. Documentation for the GAMIT GPS Analysis Software (Ver 10. 0) [R], Massachusetts Institute of Technology, 2002.
- [6] Herring T A. GLOBK: Global Kalman filter VLBI and GPS analysis program (Ver 10. 0) [R], Massachusetts Institute of Technology, 2002.
- [7] D Dong, Y Bock. Global Positioning System Network Analysis With Phase Ambiguity Resolution Applied to Crustal Deformation Studies in California[J]. Journal of Geophysical Research, 1989, 94(B4): 3 949-3 966.