

基于 CORS 的地壳运动变形监测分析 基准的合理选择方法

肖 鸾, 薛志清

(湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412008)

摘要: 介绍了 GPS 定位中有关坐标参考框架的一些重要概念, 对坐标参考框架的一致性问题及采用 GPS 协议地球坐标系 (ITRF 或 WGS-84) 作为变形基准的特点及其适用性进行了对比分析, 提出了采用 ITRF 作为变形分析基准时的坐标参考框架的转换与统一方法。

关键词: 变形分析基准; ITRF; WGS-84; 坐标框架转换

中图分类号: P22

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2009)04-0020-07

Reasonable Selection Methods of Deformation Monitoring Analysis Reference for Crustal Movement Based on CORS

Xiao Luan, Xue Zhiqing

(School of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412008, China)

Abstract: Some important concepts on the coordinate reference frames in GPS Positioning are introduced. The consistency issues of the coordinate reference frames are analyzed and the characteristics and applicability which using the GPS conventional terrestrial coordinate system (ITRF or WGS-84) as deformation reference are compared. The conversion and unified method of the coordinate reference frame using ITRF as deformation analysis reference is proposed.

Keywords: deformation analysis reference; ITRF; WGS-84; coordinate frame conversion

0 引言

我国是一个地震频发的国家, 地震和地壳形变及板块运动有密切的关系, GPS 技术是监测地壳形变和板块运动的有效手段^[1]。据有关资料介绍, 国外从 20 世纪 80 年代开始用 GPS 进行地壳变形监测^[2]; 从 90 年代以来, 世界上许多国家纷纷布设地壳运动 GPS 监测网, 为地球动力学研究和地震与火山喷发预报服务。日本国土地理院从 1993 年开始了 GPS 连续观测网 (CORS) 的筹建工作, 到 1994 年日本列岛已建立由 210 个 GPS 连续观测站组成的连续监测系统 (COSMOS), 目前的观测站总数已发展到 1 000 多个^[3]。该系统于 1994 年 10 月 1 日正式启用, 10 月 4 日就监测到北海道

东部近海 8.1 级大地震, 并清晰地记录了地震前后的地壳形变; 此后, 又成功地捕捉到三陆远海地震及兵库县南部地震的地壳形变; 1995 年 1 月 17 日, 在日本阪神 7.2 级大地震后, 该系统在进行快速、准确、精细地监测与分析地壳运动方面起到了较大的作用。

GPS 定位技术是用于地壳形变及板块运动变形监测的关键技术, 是针对被监视对象的特点和监测工作的具体要求, 对观测数据进行科学、合理、有效的处理和分析, 从而获得足够精确、可靠的被监测对象的位移量。在变形监测数据处理与分析中, 确定合理和统一的变形监测基准至关重要。如果基准不统一, 将使不同基准之间的系统误差与形变量混在一起, 很可

收稿日期: 2009-06-24

作者简介: 肖 鸾 (1965-), 男, 湖南浏阳人, 湖南工业大学高级工程师, 硕士, 主要从事 GPS 技术与应用研究,

E-mail: lanlan0500@sina.com

能得出错误的分析结果。如果选择的基准不合理, 难以清晰地显示形变图像, 将给变形分析带来极大的困难, 或者使变形分析结果失去意义。在 GPS 技术发展的不同时期采用了不同的坐标参考框架, 而不同参考框架之间存在系统性偏差, 这种偏差对于高精度的变形监测通常是不能忽视的。因此, 有必要对 GPS 变形监测分析基准进行合理的选择与统一。

1 GPS 定位的坐标参考框架

1.1 国际地球参考框架及其精度

国际地球参考框架 (International Terrestrial Reference Frame, ITRF) 是由国际地球自转服务 (IERS) 中央局 (CB) 的地球参考框架部建立的, 它是 IERS CB 的 3 项产品之一。

IERS 利用分布在世界各地的 IERS 观测网, 获取所需的各种观测数据。这些观测数据首先由不同技术各自的分析中心进行处理, 最后, IERS CB 对各分析中心的处理结果进行综合分析, 得出 ICRF、ITRF 和 EOP 的最终结果, 并由 IERS 年度报告 (IERS Annual Report) 和技术备忘录 (Technical Notes) 发布。

ITRF 不断地得到更新和精化, 其精度也不断提高。自 1998 年以来, IERS 已发布了 ITRF88/89/90/91/92/

93/94/96/97/2000/2005 等全球坐标参考框架, 其中 ITRF2005 于 2006 年 10 月最新发布、也是精度最高的坐标参考框架。与过去的 ITRF 版本不同, ITRF2005 的建立所用到的数据是站点坐标和地球定向参数 (EOPs) 的时间序列, 使用时间序列解的目的在于: 可以更好地监测测站的非线性运动; 更好地监测测站其它类型的不连续变化 (如地震、天线变化等); 从解的时间序列联合平差得到的 EOP 参数可以用来对 IERS 的 C04 序列 (IERS 发布的 EOP 产品) 进行再校准, 从而保证 ITRF 和 EOP 的一致性^[4]。

相对于 ITRF2000, ITRF2005 基准站在全球的分布更为合理, 其站坐标和速度场的解算精度有成倍甚至数量级的提高; 在解的生成、基准的定义和实现等方面, ITRF2005 作出了较大的改进和修正, 这些修正具有深刻的内涵, 将对今后的空间测地工作带来重要的影响^[5]。

1.2 不同地球参考框架 ITRF 之间的转换

由于不同的地球参考框架 ITRF 的定义不同, 造成了框架之间存在系统性的差异, 这种偏差必须在监测数据处理中加以考虑。不同 ITRF 之间的这种系统性的差异常用 7 个转换参数 T_1 、 T_2 、 T_3 、 D 、 R_1 、 R_2 、 R_3 及参数的变化率来反映, 如表 1 所列为 ITRF2000 和其它 ITRF_{yy} 间的转换参数, 表 2 所列为 ITRF2005 和 ITRF2000 间的转换参数^[6-8]。

表 1 ITRF2000 到其它 ITRF_{yy} 框架的坐标及速率转换参数

Table 1 The coordinate and rate conversion parameters between ITRF2000 and other ITRF_{yy}

ITRF _{yy}	转换参数及变化速率														
	T_1/cm	T_1 速率	T_2/cm	T_2 速率	T_3/cm	T_3 速率	$D \times 10^{-9}$	D 速率	R_1/mas	R_1 速率	R_2/mas	R_2 速率	R_3/mas	R_3 速率	参考历元
ITRF97	0.67	0.00	0.61	-0.06	-1.85	-0.14	1.55	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	1997.0
ITRF96	0.67	0.00	0.61	-0.06	-1.85	-0.14	1.55	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	1997.0
ITRF94	0.67	0.00	0.61	-0.06	-1.85	-0.14	1.55	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	1997.0
ITRF93	1.27	-0.29	0.65	-0.02	-2.09	-0.06	1.95	0.01	-0.39	-0.11	0.80	-0.19	-1.14	0.07	1998.0
ITRF92	1.47	0.00	1.35	-0.06	-1.39	-0.14	0.75	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.18	0.02	1998.0
ITRF91	2.67	0.00	2.75	-0.06	-1.99	-0.14	2.15	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.18	0.02	1998.0
ITRF90	2.47	0.00	2.35	-0.06	-3.59	-0.14	2.45	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.18	0.02	1998.0
ITRF89	2.97	0.00	4.75	-0.06	-7.39	-0.14	5.85	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.18	0.02	1998.0
ITRF88	2.47	0.00	1.15	-0.06	-9.79	-0.14	8.95	0.01	0.10	0.00	0.00	0.00	-0.18	0.02	1998.0

表 2 历元 2000.0 从 ITRF2005~ITRF2000 的转换参数及其速率

Table 2 Transformation parameters at epoch 2000.0 from ITRF2005 to ITRF2000 and their rates

转换参数及变化速率	T_1/cm	T_2/cm	T_3/cm	$D \times 10^{-9}$	R_1/mas	R_2/mas	R_3/mas
转换参数	0.01	-0.08	-0.58	0.40	0.000	0.000	0.000
+/-	0.03	0.03	0.03	0.05	0.012	0.012	0.012
速率	-0.02	0.01	-0.18	0.08	0.000	0.000	0.000
+/-	0.03	0.03	0.03	0.05	0.012	0.012	0.012

利用表 1、2 中的转换参数和下面的坐标转换公

式, 即可进行不同 ITRF 之间的相互转换。

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{(ITRF)'} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{ITRF} + \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D & -R_3 & R_2 \\ R_3 & D & -R_1 \\ -R_2 & R_1 & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{ITRF}, \quad (1)$$

式中: $\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{(ITRF)'}$ 、 $\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{ITRF}$ 分别为转换目标框架和被转换

框架的坐标;

T_1 、 T_2 、 T_3 、 D 、 R_1 、 R_2 、 R_3 分别为被转换框架到转换目标框架的转换参数;

式(1)中的转换参数由表1、2给出的基准历元参数 $P(t_0)$ 加上基准历元到转换历元的变化量得到, 即:

$$P(t) = P(t_0) + \dot{P} \times (t_1 - t_0)$$

如果用 \dot{T}_1 、 \dot{T}_2 、 \dot{T}_3 、 \dot{D} 、 \dot{R}_1 、 \dot{R}_2 、 \dot{R}_3 表示转换参数的变化率, 则式(1)同样适用^[4]。

ITRF的解是以空间直角坐标 x 、 y 和 z 给出的, 如果需要, 也可以将它们转换为相对于某个椭球的地理坐标 (B , L , H), 在这种情况下, 建议采用 GRS80 椭球(长半轴 $a = 6\,378\,137.0\text{ m}$, $e^2 = 0.006\,694\,380\,022\,90$)^[7]。

1.3 世界大地坐标系 WGS-84 及其精度

世界大地坐标系 WGS-84 是 GPS 定位中另一种重要的坐标系统, 该系统是由美国国防部 (DOD) 所建立的一个协议地球参考系统, 其是一个惯用地面参考系。美国海军最初于 1987 年建立世界大地坐标系 WGS-84, 主要是为导航服务的, 其精度较低, 约为 1~2 m。1994 年 6 月, 为了提高 WGS-84 系统的精度, 由美国国防制图局 (DMA) 将其与美国空军 (Air Force) 在全球的 GPS 跟踪站的数据上加上部分 IGS 站数据进行联合处理, 并以 IGS 站在 ITRF91 框架下的站坐标作为固定值, 重新计算了这些全球跟踪站在 1994.0 历元的站坐标 (Swift, 1994), 得到了一个更加精确的 WGS-84 坐标系统, 即 WGS-84 (G730)。WGS-84 系统中的站坐标与 ITRF92 的差异为 10 cm 量级 (Malys & Slater, 1994), 前者的坐标精度比后者的坐标精度低一些。1996 年, WGS-84 坐标系统再次更新, 产生了 WGS-84 (G873), WGS-84 系统的站坐标精度得到进一步提高, 与 ITRF94 框架的站坐标差异小于 2 cm (Malys & Slater, 1997)。2001 年美国再次改进了世界大地坐标系 1984 (WGS84) 的坐标框架, 标记为 WGS84 (G1150), 它与 ITRF2000 的符合程度在 $\pm 1\text{ cm}$ ^[9]。

1.4 地球板块运动模型及其应用条件

地球表面可以划分为若干个相对独立的块体, 这些块体处在不停的运动、变化之中。为了描述各块体的运动状态, 在地质学家们将地壳划分为若干个主要的刚性块体的前提下, 建立了全球板块运动模型。目前, 国际上推荐使用的地球板块运动模型是 NNR-NUVEL-1A 模型 (Argus and Gordon, 1991)。

按照 NNR-NUVEL-1 A 模型, 刚性块体上任意一点 (X , Y , Z) 随块体运动的速度可用下式求得:

$$V = \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -Z & Y \\ Z & 0 & -X \\ -Y & X & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix}, \quad (2)$$

由于地壳块体不完全是刚性的, 当考虑块体内部的运

动情况时, 如果块体上的某一测站点 i 在坐标参考框架 ITRF 下没有实测的速度场, 则可按下式计算其运动速度:

$$V_i = V + V'_i, \quad (3)$$

式中 V'_i 为测站点 i 在块体内部的运动速度。

通常情况下, NNR-NUVEL-1A 模型可作为计算地面板块运动的缺省值使用, 但在块体的边缘和交界处, 或块体内某些特殊的、非线性变化的子块体上, 中国地震局第一地形变监测中心的研究者发现, 板块内部也存在形变, 该模型的计算结果可能存在较大误差。为此, 他们提出了板块的刚性弹性运动模型, 并用这个模型建立了欧亚、太平洋、印度、澳大利亚和菲律宾板块的运动与应变模型。新模型模拟地壳运动的精度比 NNR-NUVEL-1A 模型平均提高了 4 倍。研究发现, 欧亚和太平洋板块以扩张为主, 存在 NW-SE 向的张应变; 而印度、澳大利亚、菲律宾海板块以压缩为主, 澳大利亚与印度板块存在 NE-SW 方向的主压应变, 菲律宾海板块存在近东西向的主压应变^[10], 此时应采用实测的站点速度场。

2 变形分析基准的选择与统一方法

2.1 全球地壳运动分析基准的选择与统一

目前, 在 GPS 变形监测中, WGS-84 和 ITRF 2 种坐标参考框架均被用作变形分析基准, 就定位来说具有基本相同的精度, 但从定义参考框架的本意来说, WGS-84 比较偏重于点的绝对位置的确定, 适用于相对静态的大地控制测量。当需要顾及地壳运动引起的站坐标变化时, 它需借助于板块运动模型给出运动参数来施加改正。而 ITRF 参考框架的确定则以某种方式顾及了地壳的运动 (顾及的方式为 ITRF_{yy} 随 yy 的不同而有所不同)。每一次新确定的 ITRF 参考框架, 不仅是不断地精化, 而且随着对地壳运动认识的不断深入, 其定义也有变化。由此可见, ITRF 比 WGS-84 更适合于用来作为分析全球地壳运动的参考框架。另外, 对于全球范围的地壳运动分析, 地球表面上的任何点均不宜作为“不动点”, 即不能采用经典变形分析中的所谓“固定基准”来进行监测数据处理与分析。因此, ITRF 坐标参考框架是目前比较理想的全球地壳运动分析基准。

但是, 由于 ITRF 参考框架不断地改进, 在不同时期的 ITRF 框架之间存在明显的系统性差异, 而现已建立的 GPS 连续运行参考站网络, 其观测数据大多涉及到不同的 ITRF 框架, 所以, 在变形监测数据处理与分析中, 必须消除因 ITRF 框架的不同而产生的系统误差, 亦即实现变形分析基准的统一。作者认为, 对基于 CORS 的变形监测数据处理与分析, 采用如下方法

进行 ITRF 基准的统一是可行的。

现假设利用 CORS 的 2 个不同时期的观测数据进行地壳形变分析, 定义:

第 1 期观测数据的平均观测历元为 t_1 , IGS 精密星历为 $O_{ITRF_{yy_1}}^t$, 所对应的 ITRF 框架为 $ITRF_{yy_1}$;

第 2 期观测数据的平均观测历元为 t_2 , IGS 精密星历为 $O_{ITRF_{yy_2}}^t$, 所对应的 ITRF 框架为 $ITRF_{yy_2}$, 选则的变形分析参考基准为 $ITRF_{yy_0}$, 变形分析网中某个监测点在该基准坐标框架 t_0 历元下的坐标记为 $X_{ITRF_{yy_0}}^{t_0}$, 速度场为 $V_{ITRF_{yy_0}}^{t_0}$; 地面基准站 (IGS 站) 的坐标为 $X_{ITRF_{yy_0}}^{t_0}$ 。

对第 1 期观测成果按下式统一精密星历和地面站坐标框架基准:

$$O_{ITRF_{yy_0}}^t = \left(1 + D_{ITRF_{yy_1} \rightarrow ITRF_{yy_0}}^t\right) \cdot R_{ITRF_{yy_1} \rightarrow ITRF_{yy_0}}^t \cdot O_{ITRF_{yy_1}}^t + T_{ITRF_{yy_1} \rightarrow ITRF_{yy_0}}^t$$

式中 $D_{ITRF_{yy_1} \rightarrow ITRF_{yy_0}}^t$ 、 $R_{ITRF_{yy_1} \rightarrow ITRF_{yy_0}}^t$ 、 $T_{ITRF_{yy_1} \rightarrow ITRF_{yy_0}}^t$ 分别为 $ITRF_{yy_1}$ 、 $ITRF_{yy_0}$ 在 t_1 历元的尺度、旋转和平移参数, 按下式转换地球自转参数:

$$ERP_{ITRF_{yy_0}}^n = ERP_{ITRF_{yy_1}}^n + R_{ITRF_{yy_1} \rightarrow ITRF_{yy_0}}^n$$

在进行 CORS 的观测数据处理时, 采用上述的地面基准站坐标和卫星精密星历作为固定基准, 则其解算结果即为 $ITRF_{yy_0}$ 框架下的 t_1 历元的成果。

同理, 可将第 2 期观测成果转换到 $ITRF_{yy_0}$ 框架下的 t_2 历元的成果, 然后就可利用各期数据处理后的坐标变化量进行变形分析了^[11]。

2.2 位移监测结果的转换

在 GPS 定位的坐标系中直接进行变形分析不直观, 其分析的结果也不便于实际应用。为了解决这一问题, 可以根据具体的需要, 将位移监测结果转换到站心坐标系。

由前所述, 对于 GPS 板块运动监测, 数据处理后是获得监测点 $ITRF_{yy_0}$ 在参考框架下的空间直角坐标 (X, Y, Z) 或地心大地坐标 (λ, φ, γ), 其转换关系为:

$$\begin{cases} X = r \cos \varphi \sin \lambda, \\ Y = r \cos \varphi \cos \lambda, \\ Z = r \sin \varphi, \end{cases} \quad (4)$$

令监测站在 $ITRF_{yy_0}$ 参考框架下的 2 期监测的坐标差为 ($\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$), 监测站的站心坐标为 (N_s, E_s, U_s), 则可以按下式将坐标差转换到站心坐标系中:

$$\begin{bmatrix} N_s \\ E_s \\ U_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin \varphi \cos \lambda & -\sin \varphi \sin \lambda & \cos \varphi \\ -\sin \lambda & \cos \lambda & 0 \\ \cos \varphi \cos \lambda & \cos \varphi \sin \lambda & \sin \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中: U_s 指向地心, 表示监测点沿着半径方向的位移; N_s 、 E_s 分别表示监测点在球面切线、法线方向

的位移^[12]。

式 (4) 是将地球表面近似为圆球面情况下的转换关系。由于地球表面更接近于椭球面, 因此, 可选取适当的椭球体来进行位移转换。首先, 由监测点的空间直角坐标计算大地坐标:

$$\begin{aligned} L &= \arctan\left(\frac{Y}{X}\right), \\ B &= \arctan\frac{Z(N+H)}{\sqrt{X^2+Y^2[N(1-e^2)+H]}}, \\ H &= \frac{Z}{\sin B} - N(1-e^2), \\ N &= \frac{a}{\sqrt{1-e^2 \sin^2 B}}, \end{aligned}$$

然后, 转换到监测点的站心坐标系中:

$$\begin{bmatrix} N_s \\ E_s \\ U_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin B \cos L & -\sin B \sin L & \cos \varphi \\ -\sin L & \cos L & 0 \\ \cos B \cos L & \cos B \sin L & \sin \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix}, \quad (6)$$

由式 (6) 和 (5) 进行位移量转换的差别与位移量本身的大小有关, 可用下式估算:

$$\delta = f \cdot M, \quad (7)$$

式中: f 为椭球的扁率 (约为 1/298);

M 为位移量, 当位移量达到 3 dm 时, 式 (5) 与 (6) 的转换结果的差别仅为 1 mm。

一般情况下, 监测点的位移量不超过 dm 量级, 可见, 在变形分析中可以直接用式 (5) 将位移量转换到站心坐标系中^[12-13]。

3 变形基准选择与统一的实例分析

3.1 ITRF2000 和其它 ITRF_{yy} 间的转换实例分析

下面以澳大利亚的 Victorian GPSnet 为例, 运用前面提出的变形基准选择与统一方法, 对该 GPS 网络进行数据处理与变形分析。

图 1 给出了 Victorian GPSnet 所在范围的某些地质要素 (地震震源、断层、滑坡等) 的分布及其与 GPS 网络参考站之间的空间位置关系。

该地区分布有 10 余条较大的断层, 某些参考站与地震震源、断层和 (或) 滑坡体很接近。维多利亚地区是地震震源和滑坡体分布较为集中的地区, 一直存在地震和滑坡的潜在危险, 而在 Yallourn 地区, 经常有地震发生。

选择 Victoria GPSnet 中的 11 个基准站组成一个变形分析子网络 (见图 2), 利用图中各基准站从 2002 年 4 月 14 日~2004 年 4 月 14 日 2 年的观测数据进行位移计算与分析。该子网络有 55 条同步观测基线, 其中最长的基线为 515.4 km, 最短的基线为 57.5 km, 平均基线长度为 245.0 km^[14]。

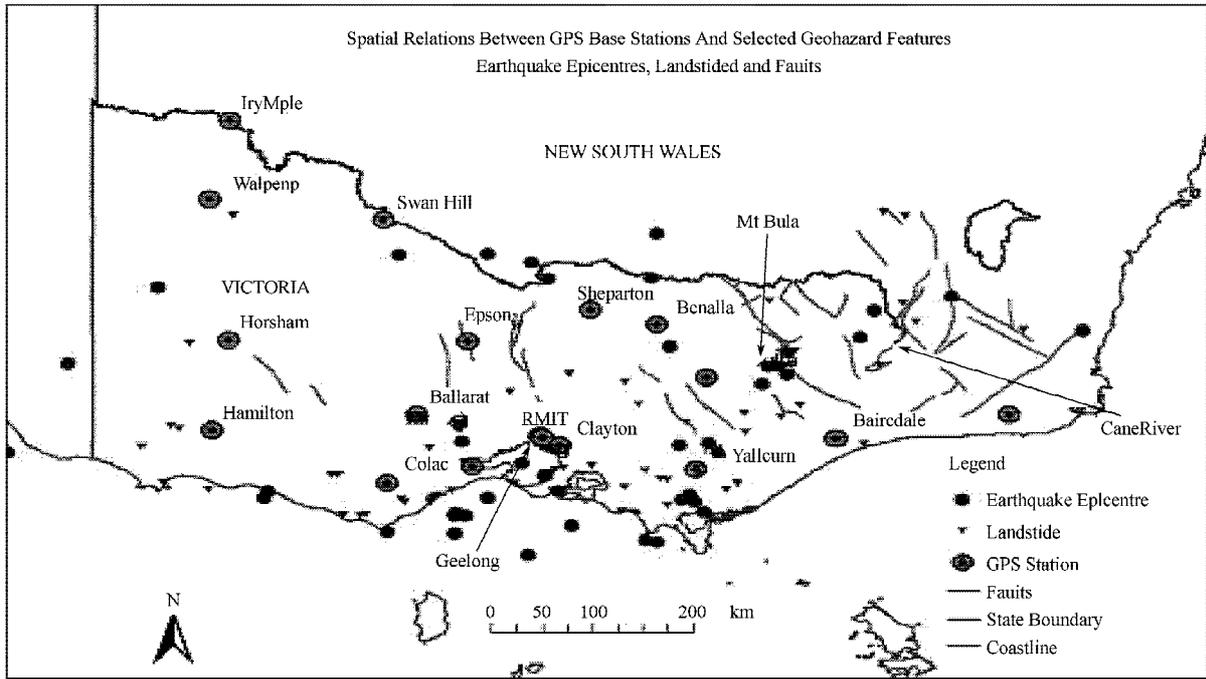


图1 Victorian GPSnet的基准站与某些地质要素之间的空间位置关系

Fig. 1 Spatial relations between Victorian GPSnet base station and some geologic elements

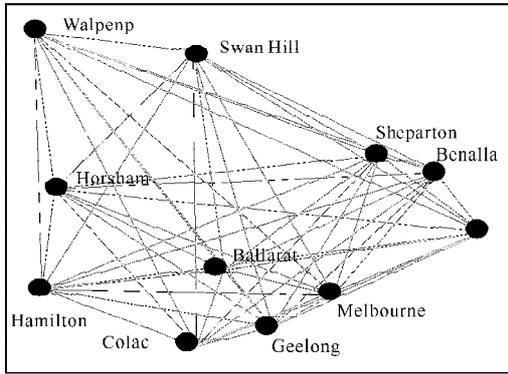


图2 地区整体性位移分析子网络

Fig. 2 Subnetwork for area integrity displacement analysis

采用 ITRF2000 作为变形分析的基准，利用高精度 GPS 数据处理软件 Bernese，对变形分析子网络进行数据处理^[15]。

各期数据处理均采用相同的网形和解算软件，以避免由于网形不同和不同软件所采用的解算模型不同而使位移计算结果产生系统误差。

首先，计算出 11 个基准站在 ITRF2000 中的三维空间直角坐标，利用 2 期坐标求得坐标差，然后，用下式将 ITRF2000 中的坐标差 ($\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$) 转换为澳大利亚地图格网坐标系 MGA (Map Grid of Australian) 中的平面坐标：

$$\Delta E = -\frac{R \sin \phi \sin \omega}{1 - \cos^2 \phi \sin^2 \omega} \left\{ -\frac{\sin \phi \cos \lambda}{R} \Delta x - \frac{\sin \phi \sin \lambda}{R} \Delta y + \frac{\cos \phi}{R} \Delta z \right\} + \frac{R \cos \phi \cos \omega}{1 - \cos^2 \phi \sin^2 \omega} \left\{ -\frac{\sin \lambda}{R \cos \phi} \Delta x + \frac{\cos \lambda}{R \cos \phi} \Delta y \right\}, \quad (10)$$

$$\Delta N = \frac{R \cos \omega}{1 - \cos^2 \phi \sin^2 \omega} \left\{ -\frac{\sin \phi \cos \lambda}{R} \Delta x - \frac{\sin \phi \sin \lambda}{R} \Delta y + \frac{\cos \phi}{R} \Delta z \right\} + \frac{R \sin \phi \cos \phi \sin \omega}{1 - \cos^2 \phi \sin^2 \omega} \left\{ -\frac{\sin \lambda}{R \cos \phi} \Delta x + \frac{\cos \lambda}{R \cos \phi} \Delta y \right\}, \quad (11)$$

式中： ΔE 、 ΔN 分别为 MGA 中的东坐标差和北坐标差；

λ 和 ϕ 分别为监测站在 GDA94 中的经度和纬度；

$\omega = \lambda - \lambda_0$ ， λ_0 为投影带的中央子午线经度；

$R = k_0 \sqrt{\rho v}$ ， $k_0 = 0.999 6$ ， ρ 和 v 分别为子午圈和卯酉圈的曲率半径。

求得各基准站在澳大利亚 MGA 和地方高程系统中的平面坐标和高程变化量列入表 3。

根据对表 3 中绝对坐标差的显著性的检验结果 (检验方法参见文献[11])，各基准站的绝对位移均显著。图 3 直观地表示了各基准站的绝对位移量和位移方向，求得其平均位移速度为 6.8 cm/a，图 4 是澳大利亚地球科学研究部门利用其它 IGS 测量成果得到的澳大利亚板块运动的速度和方向，位移速度为 7 cm/a^[16] (Geoscience Australia, 2004b)。

表3 地区整体性位移分析子网络的基准站绝对坐标差和相对坐标差

Table 3 Absolute and relative coordinate differences of base stations for area integrity displacement analysis subnetwork

基准站	绝对坐标差 d_E			位移速度 / ($\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$)		相对坐标差 / mm	
	东坐标差 d_E	北坐标差 d_N	垂直方向坐标差 d_U	V	$V/2$	d_{Er}	d_{Nr}
Melbourne	21	124	32	130	65	-6	-6
Ballarat	24	121	25	125	62	-3	-9
Colac	32	125	18	128	64	+5	-5
Hamilton	35	128	16	134	67	+8	-2
Horsham	20	135	34	139	70	-7	5
Walpeup	33	138	47	148	74	+1	+8
Swan Hill	27	131	45	142	71	0	+1
Benalla	29	141	27	150	75	+2	+7
Geelong	23	131	31	137	68	-4	+1
Mt Bulla	30	129	44	140	70	+3	-1
Shepparton	26	127	22	131	66	-1	-3

注: $V = \sqrt{(d_E)^2 + (d_N)^2 + (d_U)^2}$ 。

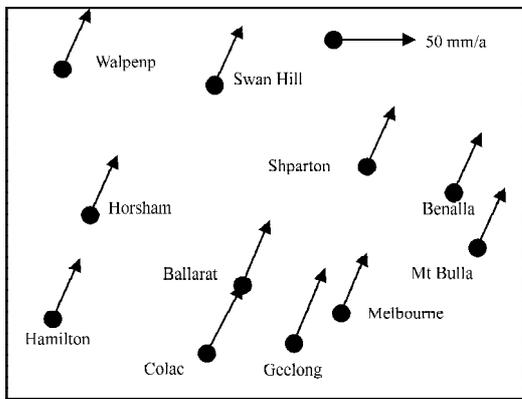


图3 Victorian GPSnet 的整体性位移

Fig. 3 Integrity displacement of the Victorian GPSnet

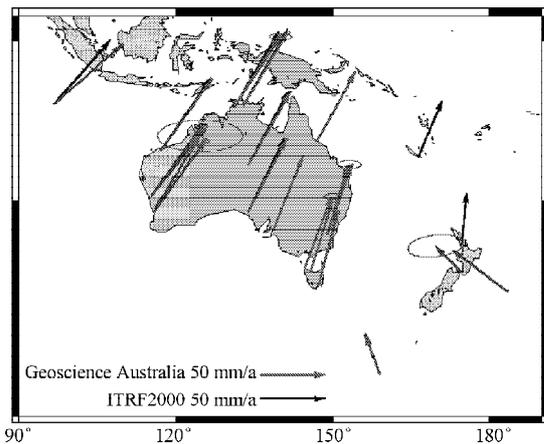


图4 澳大利亚板块运动矢量

Fig. 4 Motion vectors of the Australia plate

按本文提出的方法, 利用 Victorian GPSnet 的观测数据求得的地区整体性位移速度及其运动方向与目前澳大利亚板块运动的速度和方向基本一致。可见, 用 ITRF 作为绝对位移分析的坐标参考框架可以得到很清晰的整体位移趋势图像和正确的位移分析结果, 但

是, 以 ITRF2000 坐标参考框架作为变形分析基准得到的位移图像, 却难以观察和分析各基准站之间的相对稳定性。为便于进行各个基准站之间的相对稳定性分析, 可采用 ITRF 与局部固定基准 (网的重心基准) 相结合的变形分析方法, 即将各基准站的绝对位移量分别减去澳大利亚板块的位移量, 由此得到的相对坐标差列入表 3, 并将相对坐标差示于图 5。

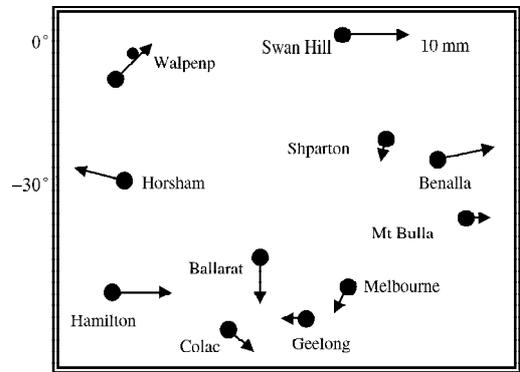


图5 基准站的相对坐标差

Fig. 5 Relative coordinate differences of the base stations

对表 3 中各基准站的相对坐标差进行显著性检验的结果表明, 其相对水平位移均不显著, 这说明图 2 中的 11 个基准站的位置尚未受到局部地质因素的明显影响, 目前其运动形式主要表现为随澳大利亚板块的整体性运动。

3.2 实例分析

ITRF2005 和其它 ITRF_{yy} 间的转换实例分析参见文献 [8]。

4 结语

本文介绍了 GPS 定位中各个时期坐标参考框架和世界大地坐标系 WGS-84 的变化过程, 由于地壳运动变

形是一个缓慢的过程,在对地壳运动变形观测过程中,其数据观测和处理必将涉及到各个不同时期的坐标参考框架,而不同时期的坐标参考框架均有一定的差异性。为了准确测定地壳运动变形的位移量和方向,有必要将不同时期、相对不同坐标参考框架的观测数据作一致性处理。澳大利亚的Victorian GPSnet是一个开放性的CORS系统,以ITRF作为变形基准,通过对澳大利亚板块运动的速度和方向问题进行对比分析,重点研究并提出了采用ITRF作为变形分析基准时的坐标参考框架的转换与统一方法。通过实例计算与分析,验证了本文提出的采用ITRF作为变形分析基准的合理性及有效性。

参考文献:

- [1] 陈永奇,吴子安,吴中如.变形监测分析与预报[M].北京:测绘出版社,1998:11-13;107-115.
Chen Yongqi, Wu Zi'an, Wu Zhongru. Deformation Monitoring Analysis and Prediction[M]. Beijing: Surveying and Mapping Publishing House, 1998: 11-13; 107-115.
- [2] 王静瑶,吴云.现代地壳运动与地震监测预报研究现状和发展趋势[J].地球科学进展,2000,15(1):84-89.
Wang Jingyao, Wu Yun. Present Situation and Trends in Monitoring and Prediction Researches on Current Crustal Movement and Earthquakes[J]. Advance in Earth Sciences, 2000, 15(1): 84-89.
- [3] 胡友健,罗云,曾云.全球定位系统GPS原理与应用[M].武汉:中国地质大学出版社,2003:154-155.
Hu Youjian, Luo Yun, Zeng Yun. Global Positioning System Principles and Applications[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2003: 154-155.
- [4] 张西光,吕志平.ITRF2005的实现与改进[J].测绘通报,2007(7):16-18.
Zhang Xiguang, Lv Zhiping. Realization and Improvement of ITRF2005[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2007(7): 16-18.
- [5] 朱文耀,熊福文,宋淑丽.ITRF2005简介和评析[J].天文科学进展,2008,26(1):1-14.
Zhu Wenyao, Xiong Fuwen, Song Shuli. Notes and Commentary on the ITRF2005[J]. Progress in Astronomy, 2008, 26(1): 1-14.
- [6] 陈俊勇.国际地球参考框架2000的定义及参数[J].武汉大学学报,2005,30(9):753-761.
Chen Junyong. On the Definition and Adopted Parameters of International Terrestrial Reference Frame 2000[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2005, 30(9): 753-761.
- [7] 陈俊勇.IERS地球参考系统、大地测量常数及其实现[J].大地测量与地球动力学,2005,25(3):1-6.
Chen Junyong. Terrestrial Reference System、Geodetic Constants and Their Realization[J]. Journal of Geodesy and Dynamics, 2005, 25(3): 1-6.
- [8] 张灿.基于ITRFyy框架下坐标之间的转换[J].工程与建设,2008,22(4):474.
Zhang Can. Conversion between Coordinates Based on the Framework of ITRFyy[J]. Engineering and Construction, 2008, 22(4): 474.
- [9] 陈俊勇.世界大地坐标系统1984的最新精化[J].测绘通报,2003(2):1-3.
Chen Junyong. A Recent Refinement to World Geodetic System 1984 [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2003 (2): 1-3.
- [10] 李延兴,黄斌,胡新康,等.板内块体的刚性弹塑性运动模型与中国大陆主要块体的应变状态[J].地震学报,2001,24(6):1-6.
Li Yanxing, Huang Cheng, Hu Xinkang, et al. The Rigid and Elastic-Plastic Model of the Blocks in Intra-Plate and Strain Status of Principal Blocks in the Continent of China[J]. Acta Seismologica Sinica, 2001, 24(6): 1-6.
- [11] 刘经南,施闯,陈俊勇.92,96国家高精度GPS A级网整体结果分析与我国块体运动模型研究[J].武汉测绘科技大学学报,1998,23(4):314-319.
Liu Jingnan, Shi Chuang, Chen Junyong. The Analysis for '92、'96 Integrated Adjustment Result of National High Precision GPS A order Network and the Research for the Rigid Block Movement Model of China[J]. Journal of Wuhan Technical University of Surveying and Mapping, 1998, 23(4): 314-319.
- [12] 施闯.大规模、高精度GPS网平差处理与分析理论及其应用[D].武汉:武汉测绘科技大学,2002.
Shi Chuang. Large-Scale, High-Precision GPS Network Adjustment Processing Analysis Theory and Its Application [D]. Wuhan: Wuhan Technical University of Surveying and Mapping, 1999.
- [13] 伍吉仓,邓康伟,陈永奇.地心坐标系与站心坐标系中的速度转换及误差传播[J].大地测量与地球动力学,2005,25(3):13-18.
Wu Jicang, Deng Kangwei, Chen Yongqi. Velocity Transformation and Error Propagation between Geocentric Coordinate System and Site-Centric Coordinate System[J]. Journal of Geodesy and Dynamics, 2005, 25(3): 13-18.
- [14] [Anon]. Land Victoria (2003) GPSnet GPS Base Station Logon and Site Details[EB/OL]. [2008-07-15]. <http://www.land.vic.gov.au/>.
- [15] [Anon]. Bernese GPS Data Processing Software Package, Version 4.2[EB/OL]. [2008-08-01]. <http://www.bernese.unibe.ch/index.html>.
- [16] Geoscience Australia.(2004b) Australia Space Geodesy Analysis Center[EB/OL]. [2009-06-19]. http://www.ga.gov.au/oceans/pgga_ogra_2004.jsp.

(责任编辑:张亦静)