

ITRF2000 参考架的评价及其探讨

金双根¹ 朱文耀¹

(1 中国科学院上海天文台, 上海市南丹路 80 号, 200030)

摘要: 通过 ITRF2000 速度场建立完全独立于任何地质模型假设的 ITRF2000VEL 模型, 求出总角动量 $|L|$ 为 $0.127^{\circ}/m^{\circ}a$, 在运动中应加以改正, 从而实现无整体旋转参考架。

关键词: 国际地球参考架 (ITRF); 协议参考架 (CTRF); 无整体旋转 (NNR)

中图法分类号: P312.1; P228.42

目前最完善的国际地球参考架是由国际地球自转服务机构 (IERS) 根据现代空间大地测量手段, 利用 GPS、SLR、VLBI、DORIS 等空间测量技术实测资料, 建立 ITRF96 和 ITRF97 参考架。然而它仍不满足协议地球参考架 (CTRF) 原则^[1], 即 Tisserand 条件。最近, 国际地球自转服务组织 (IERS) 发布了 ITRF2000 参考架, 它的建立方法、台站数量以及精度较 ITRF96 和 ITRF97 参考架有了质的变化, 包括全球 364 个并置站上的 650 多测站, 其精度高于 ITRF96 和 ITRF97。本文对 ITRF2000 速度场和参考架定义进行了剖析, ITRF2000 参考架定义用 VLBI 和 SLR 两种空间技术解加权平均得到, 相比 ITRF96 和 ITRF97 参考架, 去掉 GPS 解。通过对 GPS 技术在参考架应用误差分析和 ITRF 序列速度场的比较, 不难得出 ITRF2000 参考架具有相当高的精度。但 ITRF2000 参考架旋转速率由所选的 54 个测站并附加 NNR-NUVEL1A 模型约束, 由这 54 个测站与 NNR-NUVEL1A 模型捆绑在一起的参考架 ITRF2000, 仍存在着整体性旋转。

1 ITRF2000 参考架

ITRF2000 参考架定义为^[2]: 其原点通过 SLR(CGS, CRL, CSR, DGFI 和 JCET 中心) 数据处理结果加权平均得到; 尺度因子和变化通过 VLBI(GUIB, GSFC, SHA) 和 SLR(CGS, CRL, CSR, DGFI 和 JCET 中心) 数据处理结果加权平

均得到; 定向参数选择为历元 1997.0 的 ITRF97 的地球自转参数, 旋转速率是在 ITRF2000 速度场的基础上按照以下 4 个标准选择 54 个台站并附加 NNR-NUVEL1A 模型的无整体旋转约束。其 4 个标准为: ①测站连续观测 3 年以上; ②位于刚性板块并远离形变区域; ③综合解速度误差好于 $3mm/a$; ④至少 3 种观测技术, 且速度残差好于 $3mm/a$ 。

2 ITRF 序列参考架比较

ITRF96 和 ITRF97 参考架完全基于空间测量数据得到, 没有任何地质模型假设。而由 ITRF2000 参考架定义可知, ITRF2000 参考架实际上附加百万年平均模型 NNR-NUVEL1A 的约束, 并不是完全基于空间技术观测资料得到的。但相对于 ITRF96 和 ITRF97 参考架, 主要改进了以下几个方面。

2.1 ITRF 序列参考架原点、尺度因子和变化

它们的定义都是由空间技术观测结果加权平均得到, 但 ITRF2000 参考架相对于 ITRF96 和 ITRF97 去掉了 GPS 解, 而在 ITRF96 和 ITRF97 参考架中, VLBI、SLR 和 GPS 3 种观测技术是同等地位。

随着 GPS 连续观测资料的不断积累, 探测出 GPS 高精度测量存在着问题。例如, 最近已发现 GPS 高程具有明显的季节性变化, 而且有的测站垂直方向季节性变化振幅大于长期项。以上海

GPS 测站为例(见图 1), 明显具有周期变化, 振幅跳动很大, 而其长期项很小, 仅为 $+0.8 \text{ mm/a}$, 远远小于振幅跳动, 导致其高程结果精度低。另外, 不同 GPS 卫星轨道相差达 5cm(见图 2)^[3], 因而也影响了 GPS 测量精度。卫星星座恢复需要一定的周期, 以及 GPS 卫星天线相位中心一直无法确定等, 直接影响地球参考架尺度因子的精度。

从表 1 可明显看出, 激光测距(SLR)是测量地心变化的最佳手段, 甚长基线干涉测量(VLBI)主要是建立射电参考架和地固参考架及其连接。另外, VLBI 是观测河外射电源到地球上两个 VLBI 观测天线之间的距离变化, 与地心无关, 因

此未列入参考架原点定义。卫星轨道对地球引力场十分敏感, 而地球引力场一阶项变化直接体现地球质心变化。吴斌等(1999)用 SLR 观测 Lages 卫星观测数据求得地心变化为几个厘米, 而 GPS 观测量 GPS 测量高程精度超出了地心变化范围, 因而对地心变化的敏感性较差。因此, SLR 技术是测量地心变化的最佳手段。

综合上面的分析可看出, ITRF 2000 参考架相对于 ITRF96 和 ITRF97 参考架定义去掉 GPS 解, 仅利用 SLR 和 VLBI 解加权平均得到, 这样 ITRF2000 参考架相比 ITRF96 和 ITRF97 精度更高。

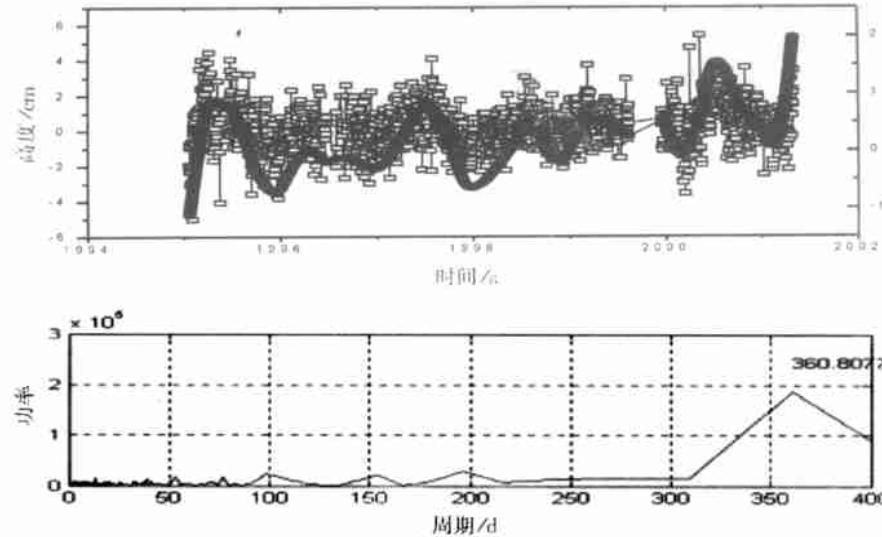


图 1 上海 GPS 台站高程季节性变化及其功率谱

Fig. 1 Seasonal Variation of Shanghai GPS Height and Its Power Chart

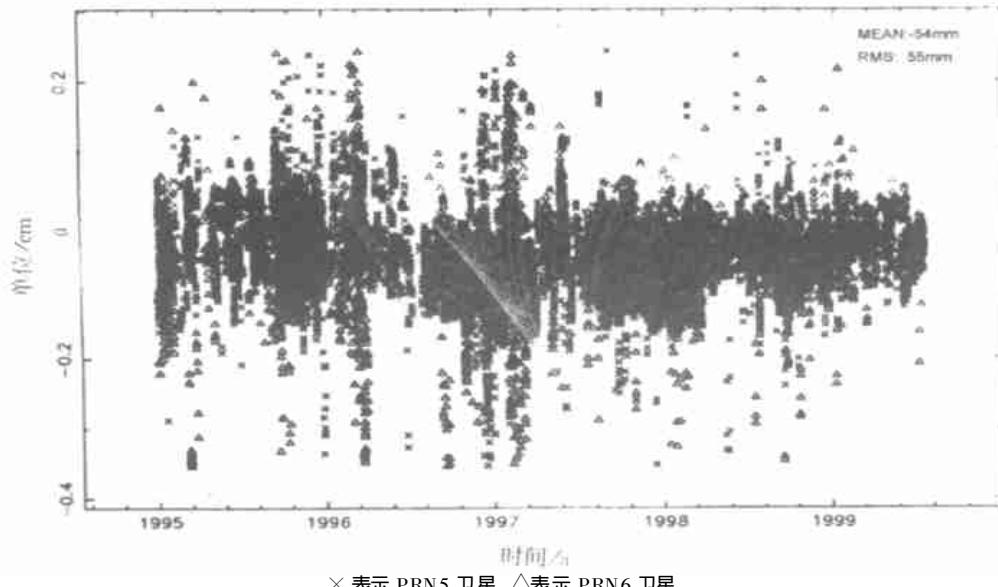


图 2 不同卫星 SLR 测距残差比较

Fig. 2 Range Residuals of the SLR Observations from GPS Satellites PRN 5 and PRN 6

表 1 各种空间技术应用比较

Tab. 1 Comparison Between Different Space Techniques

技术	涉及的参考系	章动	UT1	日长	X_p	Y_p	地心坐标	测站坐标
VLBI	射电和地固	好	好	好	好	好	一般	好
GPS	动力和地固			好	好	好	一般	好
SLR	动力和地固			一般	一般	一般	好	好
DORIS	动力和地固			一般	一般	一般	一般	一般

2.2 ITRF2000 速度场比较

ITRF2000 参考架相对于 ITRF96 和 ITRF97 在台站数目和精度都有了较大的提高, 其水平运动速度的监测精度绝大多数优于 1mm/a , 而且分布更广。例如, 台站数目从 500 增加到 650 个, 并置站从 325 增加到 360 多个。另外, 从全球板块运动模型 ITRF2000VEL 各板块运动欧拉参数的精度也可反映 ITRF2000 速度场比 ITRF96 和 ITRF97 高。因此, ITRF2000 参考架能提供更高精度的参考架。

2.3 ITRF2000 参考架整体旋转性

由于 ITRF2000 参考架所给的速度场是三维迪卡尔坐标系, 通过式(1)坐标转换, 将 54 个测站从地球坐标转换到地面坐标:

$$V_{HEN} = RV_{XYZ} \quad (1)$$

式中, V_{HEN} 为水平速度; R 为地球坐标转换到地

面坐标转换矩阵; V_{XYZ} 为地球坐标三维速度。ITRF2000 参考架所选的 54 个测站主要分布在 14 个板块中的 9 个板块里, 且阿拉伯和纳兹卡板块只有一个测站, 非洲仅两个测站, 其中一个测站在板块边界附近, 接近大西洋中脊。由于欧拉定理在刚体板块的假设下, 至少通过两个或者两个以上稳定的测站才可能确定刚体板块的运动欧拉参数, 因此, ITRF2000 参考架所选得测站只能准确地确定 EURA、ANTA、AUST、NOAM、PCFC 和 SOAM 6 个板块的欧拉参数。根据板块运动理论, 每块板块服从欧拉定律, 即 $V_p = \Omega \times r$, 其中 Ω 为板块的运动欧拉矢量; V_p 和 r 分别为板块各测站水平位移速度和位置矢量。利用 ITRF2000 参考架所选的速度场, 通过最小二乘法分别求出南极洲、澳洲、欧亚、北美、太平洋和南美板块运动欧拉矢量, 如表 2 所示。

表 2 54 个测站确定的板块运动欧拉矢量

Tab. 2 Euler Vector of Plate Derived from 54 Stations

板块	$\Omega/(\text{°}\text{m}^{-1}\text{a})$	$\lambda/(\text{°})$	$\varphi/(\text{°})$	N_i
PCFC	0.674 ± 0.003	109.2 ± 0.450	-65.1 ± 0.32	4
EUR A	0.259 ± 0.001	-100.1 ± 0.610	57.1 ± 0.44	20
NOAM	0.197 ± 0.002	-83.5 ± 0.003	-3.1 ± 0.40	15
AUST	0.622 ± 0.004	38.7 ± 0.520	32.5 ± 0.35	4
ANTA	0.238 ± 0.007	-125.0 ± 2.100	62.3 ± 0.96	4
SOAM	0.116 ± 0.006	-131.7 ± 3.500	-19.4 ± 1.90	3

注: Ω 为旋转速率; λ 和 φ 为旋转极经度和纬度; N_i 为观测台站。

由这 54 个测站确定的 6 板块总动量关于极 $(111.2\text{E}, 58.7\text{S})$ 以 $0.87^\circ/\text{m}$ 旋转速率旋转, 而同样的 6 板块 NNR-NUVEL1A 模型的总角动量关于极 $(109.1\text{E}, 59.1\text{S})$ 以 $0.85^\circ/\text{m}$ 的速度旋转, 表明这 54 个站的约束已和 NNR-NUVEL1A 模型捆绑在一起, 而其他 8 个板块由于没有或不足够的测站, 不受 NNR-NUVEL1A 模型的约束, 因此, 由这 54 个测站约束的参考架存在整体旋转。另外, 这 54 个台站利用 7 参数转换公式转换到 NNR-NUVEL1A 上, 使 ITRF2000 满足 Tisserand 条件, 但必须有足够的参考站, 且均匀分布, 显然 54 个测站不满足上述要求, 而不满足 NRR 条件。

由此可知, ITRF2000 参考架既不是无整体旋转参考架, 也不是完全独立于地质模型假设的

参考架, 而是由这 54 个测站决定, 向 NNR-NUVEL1A 参考架下转换得到。另外转换的时间也存在着历元不同的问题, ITRF2000 参考架和 NNR-NUVEL1A 参考架历元也不一样。历元是由地球定向参数和地心定义的, 因此, 这必然影响到 ITRF2000 参考架精度。

3 ITRF2000VEL 模型

ITRF2000 包括了全球 359 个并置站上的 650 多测站的位置和速度矢量。根据 NUVEL1A 模型, 全球主要划分为 14 个板块, 由于各板块测站数目、分布及其测站精度不同, 因此, 在欧拉矢量计算中按照以下标准进行筛选: ①去掉位于板

块边界带和形变较大的测站。②去掉测站精度 $\sigma_v > 5\text{mm/a}$ 站点。全球 70% 台站 $\sigma_v < 3\text{mm/a}$, 测站精度较好。而台站精度 $\sigma_v > 5\text{mm/a}$ 的站点, 精度较差, 不能真正反映板块整体和刚性运动特征, 因此, 去掉这些台站。③去掉建站时间少于 3a 的站点。根据板块运动理论, 每块板块服从欧拉定律, 通过上面三个标准, 从 ITRF2000 速度场共选择 239 测站。通过最小二乘法分别求出非洲、南极洲、澳洲、欧亚、纳兹卡、北美、太平洋和南美板块欧拉运动矢量。由于没有或缺少足够多的测站, 不能直接获得印度、阿拉伯、可可斯和菲律宾欧拉运动矢量, 它可以通过相邻板块间的相对欧拉矢量^[4]求得, 即利用 $\Omega_i = \Omega_{ij} + \Omega_j$, 最后求出所有板块欧拉矢量, 结果如表 3 所示。

从表 3 可以看出, 由 VLBI、SLR 和 GPS 等空间技术建立的全球板块运动模型 ITRF96VEL、ITRF97VEL 和 ITRF2000VEL 等精度都是很高的, 特别是 ITRF2000VEL 模型, 其旋转速率、旋转极经度和纬度精度明显比 ITRF96VEL 和 ITRF97VEL 模型高。例如, 对一些大板块, 如欧亚、北美等板块的运动欧拉参数的精度, ITRF2000VEL 均比 ITRF96VEL 和 ITRF97VEL 参数的精度高。另外, ITRF2000VEL 对一些大板块运动欧拉极的监测精度可达 1°, 欧拉旋转角速度为 $0.002^\circ/\text{m} \cdot \text{a}^{-1}$, 而与百万年地质模型 NNR-NUVEL1A 相比, 对一些大块体(例如欧亚板块), 欧拉极两者之差达 13°, 旋转速度的差达 $0.02^\circ/\text{m} \cdot \text{a}^{-1}$, 这个差异比 ITRF2000VEL 本身精度大了一个量级, 远远超出了空间技术解算欧拉矢量的误差范围。在台站数目上, ITRF2000VEL 模型所用的台站数最多。这些都表明 ITRF2000VEL 模型精度最高, 反映了 ITRF2000 参考架具有相当高的精度。

4 ITRF2000 参考架整体旋转性探讨

根据 IERS 给出的协议地球参考架的定义, CTRF 是一个无整体旋转的地球参考架, 即满足:

$$\int_D \mathbf{r} \times V \mathrm{d}m = 0 \quad (2)$$

式中, D 和 $\mathrm{d}m$ 是包括地壳的积分区域和地壳质量元; \mathbf{r} 和 V 是 $\mathrm{d}m$ 所处的位置和速度。

假定地壳为球形且密度均匀, 则式(2)可以近似写为:

$$\mathbf{L} = \sum_{i=1}^k \mathbf{Q}_i \Omega_i = 0 \quad (3)$$

式中, \mathbf{L} 和 \mathbf{Q}_i 分别是构造板块的总角动量和第 i 个板块的旋转张量, 根据式(3), 并利用 Argus 和 Cordon(1991) 定义的各板块旋转张量 \mathbf{Q}_i 的值, 通过 ITRF2000 速度场建立的全球板块运动模型进行计算, $|\mathbf{L}| = 0.127$, 不等于零, 即 ITRF2000 参考架不满足无整体旋转的要求, 存在一个右旋的转动。因此, ITRF2000 与协议地球参考架 CTRF 定义不符, 在监测地球自转参数时要加以改正。例如为了使 ITRF2000VEL 模型随时间的演变遵循无整体旋转 (no-net-rotation) 的准则, 只要将它们的速度场做如下转换^[1]:

$$\mathbf{r}' = \mathbf{r} - (\sum_i \mathbf{Q}_i)^{-1} \mathbf{L} \times \mathbf{r} = \mathbf{r} - (3/8\pi) \mathbf{L} \times \mathbf{r}$$

式中, \mathbf{r} 和 \mathbf{r}' 为 ITRF2000 中测站的速度矢量和坐标矢量; \mathbf{L} 是前面所求得的 ITRF2000 总角动量; \mathbf{r}' 是无整体旋转的 ITRF2000 的速度场, 相对于无整体旋转的 ITRF2000 参考架, 各板块运动的欧拉矢量 Ω'_i 可由下列关系^[1]求得:

$$\Omega'_i = \Omega_i - (\sum_i \mathbf{Q}_i)^{-1} \sum_i \mathbf{Q}_i \Omega_i = \Omega_i - (3/8\pi) \mathbf{L}$$

式中, Ω'_i 为 ITRF2000VEL 的欧拉矢量。这样, 就可以求出 Ω'_i 矢量值, 即 NNR-ITRF2000VEL 模型。

5 结 论

通过对 GPS 连续观测资料谱分析, 探测到 GPS 高程具有明显的季节性变化, 而且有的测站垂直方向季节性变化振幅大于长期项, 导致其高程测量精度低。另外, 不同 GPS 卫星轨道相差达 5cm, 因而也影响了 GPS 测量精度。GPS 卫星星座恢复需要一定的周期以及 GPS 卫星相位中心一直无法确定等是影响 GPS 测量精度的重要因素, 直接影响地球参考架尺度因子。因此, ITRF2000 参考架去掉 GPS 解是一大提高。另外, ITRF2000 速度场相比 ITRF96 和 ITRF97 有了质的变化, 无论是台站数、测站精度还是分布, 都有了较大提高。然而 ITRF2000 参考架旋转速率由所选 54 个测站并附加 NNR-NUVEL1A 模型约束, 通过分析, 由这 54 个站的约束和 NNR-NUVEL1A 模型捆绑在一起的参考架 ITRF2000, 仍存在整体性旋转。本文通过 ITRF2000 速度场建立完全独立于地质模型假设的 ITRF2000VEL 模型, 可求出总角动量 $|\mathbf{L}|$ 为 $0.127^\circ/\text{m} \cdot \text{a}^{-1}$, 在运用中应加以改正, 从而实现无整体旋转参考架 ITRF2000 的目的。

表3 不同板块模型欧拉矢量比较

Tab. 3 Comparison Between Euler Vectors of Different Models

板块	模型	$\Omega/(\text{°}) \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{a}$	$\lambda/(\text{°})$	$\varphi/(\text{°})$	N_i
AFRC	NNR-NUVEL1A	0.291	—74.0	50.6	
	IT RF96VEL	0.275±0.002 8	—84.8±1.44	51.3±0.54	12
	IT RF97VEL	0.274±0.002 0	—86.1±1.00	53.0±0.42	13
	IT RF2000VEL	0.272±0.001 7	—86.4±1.10	50.3±0.51	15
ANTA	NNR-NUVEL1A	0.238	—115.8	63.0	
	IT RF96VEL	0.250±0.002 8	—138.2±3.0	57.5±2.5	8
	IT RF97VEL	0.255±0.000 8	—135.1±1.8	62.6±1.2	8
	IT RF2000VEL	0.231±0.000 7	—126.9±1.6	62.3±1.1	9
ARAB	NNR-NUVEL1A	0.543	—4.5	45.0	
	IT RF96VEL	0.580	—2.4	45.84	2
	IT RF97VEL	0.670±0.068	16.3±11.0	47.0±6.0	2
	IT RF2000VEL	0.611±0.051	7.44±7.0	46.5±4.4	3
AUST	NNR-NUVEL1A	0.646	33.2	33.9	
	IT RF96VEL	0.636±0.006	40.2±0.74	35.0±0.52	9
	IT RF97VEL	0.606±0.004	39.0±0.50	34.0±0.42	10
	IT RF2000VEL	0.622±0.003	37.9±0.29	32.5±0.24	15
CARB	NNR-NUVEL1A	0.214	—93.0	25.0	
	IT RF96VEL	0.216	—94.3	30.3	
	IT RF97VEL	0.310±0.140	—85.1±17.5	34.0±19.4	4
	IT RF2000VEL	0.226±0.120	—92.8±9.4	27.8±8.6	5
COCS	NNR-NUVEL1A	1.510	—115.8	24.5	
	IT RF96VEL	1.536	—114.5	24.7	
	IT RF97VEL	1.544	—114.6	24.6	
	IT RF2000VEL	1.532	—115.6	24.1	
EURA	NNR-NUVEL1A	0.234	—112.3	50.6	
	IT RF96VEL	0.262±0.002 5	—98.3±1.0	59.6±0.34	74
	IT RF97VEL	0.263±0.001 8	—97.6±0.68	59.3±0.28	87
	IT RF2000VEL	0.258±0.001 0	—99.7±0.31	57.5±0.18	98
INDI	NNR-NUVEL1A	0.545	0.3	45.5	
	IT RF96VEL	0.558	3.85	47.2	
	IT RF97VEL	0.550	2.93	47.1	
	IT RF2000VEL	0.557	3.9	53.6	
NAZC	NNR-NUVEL1A	0.743	—100.1	47.8	
	IT RF96VEL	0.764	—99.8	48.9	
	IT RF97VEL	0.690±0.093	—100.6±4.5	36.7±6.66	2
	IT RF2000VEL	0.722±0.083	—97.7±4.3	44.7±6.0	2
NOAM	NNR-NUVEL1A	0.207	—85.9	—2.4	
	IT RF96VEL	0.200±0.002 2	—84.4±0.35	—4.4±0.57	44
	IT RF97VEL	0.186±0.001 6	—81.95±0.26	—9.14±0.46	62
	IT RF2000VEL	0.197±0.001 0	—83.5±0.17	7.33±0.25	57
PCFC	NNR-NUVEL1A	0.641	107.3	—63.0	
	IT RF96VEL	0.700±0.002 8	91.8±0.62	—62.4±0.26	27
	IT RF97VEL	0.670±0.002 4	94.5±0.59	—64.0±0.22	25
	IT RF2000VEL	0.635±0.001 7	120.3±0.48	—63.3±0.20	28
PHIL	NNR-NUVEL1A	0.900	—35.35	—38.0	
	IT RF96VEL	0.894	—33.22	—34.7	
	IT RF97VEL	0.896	—33.38	—34.6	
	IT RF2000VEL	0.877±0.084	—34.52±4.4	—36.7±6.1	2
SOAM	NNR-NUVEL1A	0.116	—124.4	—25.3	
	IT RF96VEL	0.105±0.017	—133.6±9.4	—10.15±5.3	5
	IT RF97VEL	0.096±0.007	—139.4±4.8	—21.7±2.5	6
	IT RF2000VEL	0.109±0.006	—133.2±2.6	—19.3±1.6	7

注: Ω 为旋转速率; λ 和 φ 为旋转极经度和纬度; N_i 为观测台站。

参 考 文 献

- 1 朱文耀, 韩继龙, 马文章. 基于 ITRF96 和 ITRF97 板块运动模型. 天文学报, 2000, 41(3): 312~319
- 2 IERS. ITRF2000 Datum Definition. http://large.ensg.ign.fr/ITRF/ITRF2000_2001
- 3 IGS Central Bureau. Annual Report 1998 of the CODE Analysis Center of the IGS. CA: JPL, 1999
- 4 Zhang Q, Zhu W Y, Xiong Y Q. Global Plate Motion Models Incorporating the Velocity, Field of ITRF96. Geophys. Res. Lett., 1999, 26(18): 2 813~2 816
- 5 吴斌, 彭碧波, 高布锡. 地心变化的测定. 科学通报, 1999, 41(10): 1 106~1 108
- 6 Demets C R, Gordon D A, Stein S. Effect of Recent Revisions to the Geomagnetic Reversal Time Scale on Estimates of Current Plate Motions. Geophys. Res. Lett., 1994, 21: 2 191~2 194
- 7 Argus D F, Gordon R G. No-net-rotation Model PF Current Plate Velocities Incorporating Plate Motion Model NUVEL1. Geophys. Res. Lett., 1991, 18(11): 2 039~2 042
- 8 Larson K M. Global Plate Velocities from the Global Positioning System. JGR, 1997, 102(B5): 9 961~9 981
- 9 张强, 朱文耀, 熊永清. 关于 ITRF96 参考架整体旋转性的探讨. 地球物理学报, 2000, 43(5): 598~605
- 10 Alice E G. Current Plate Velocities Relative to the Hotspots Incorporating the NUVEL-1 Global Plate Motion Model. JGR, 1990, 17(8): 1 109~1 112

作者简介: 金双根, 博士生。现主要从事 GPS 应用研究。

E-mail: sgjin@center.shao.ac.cn

Appraisement and Discussion of ITRF2000

JIN Shuanggen¹ ZHU Wenyao¹

(1 Shanghai Observatory, Chinese Academy of Sciences, 80 Nandan Road, Shanghai, China 200030)

Abstract: Anatomizing the velocity field and definition of ITRF2000, we find that the precise of ITRF2000 frame is better than these of ITRF96 and ITRF97. ITRF96 and ITRF97 are defined through a weighted least squares algorithm with SLR, VLBI and GPS data equally, but ITRF2000 only uses VLBI and SLR data, excluding GPS data. Because GPS technique is deficient in definition of ITRF2000 origin, orientation and scale and rate, the accuracy of ITRF2000 is improved compared with ITRF96 and ITRF97 without using GPS data. However, the linear rates of change of ITRF2000 orientation angles are determined by only 54 sites imposing a geological plate model NNR-NUVEL1A to achieve no net rotation of global frame with respect to the Earth's crust. Analyzing the total angle momentum, we find that ITRF2000 also has net rotation with respect to the Earth's crust. In this paper, a new global plate motion model of ITRF2000VEL is determined based on the ITRF2000 velocity field. In order to achieve no net rotation of ITRF2000 frame, we calculate the total angle momentum $|L|$ of ITRF2000VEL, $0.127^{\circ}/m^{\circ}a^{-1}$ to rectify in practice.

Key words: ITRF (international terrestrial reference frame); CTRF; NNR (no net rotation)

About the author: JIN Shuanggen, Ph. D candidate. His major research is on the plate motion and GPS meteorology.

E-mail: sgjin@center.shao.ac.cn