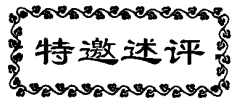


文章编号: 1000-8349(2008)01-0001-14



ITRF2005 简介和评析

朱文耀¹, 熊福文^{1,2,3}, 宋淑丽¹

(1. 中国科学院 上海天文台, 上海 200030; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039; 3. 上海市地质调查研究院, 上海 200072)

摘要: 该文对最新的国际地球参考框架 ITRF2005 进行了简单介绍, 指出了 ITRF2000 与 ITRF2005 之间在解的生成、基准的定义和实现等方面的差别, 特别评析了 ITRF2005 所作改进的理由和合理性。同时也指出了 ITRF2005 与 ITRF2000 一样, 没有满足协议地球参考系 (CTRS) 的定向随时间的演化需遵循相对于地壳无整体旋转 (NNR) 的约束条件, 并就此提出了解决办法。

关键词: 天体力学; ITRF2005; ITRF 基准; 无整体旋转 (NNR) 地球参考架; 非线性和季节性变化

中图分类号: P129

文献标识码: A

1 引 言

等待多年的最新的国际地球参考框架 ITRF2005 终于面世。ITRF2005 仍由一组空间技术 (VLBI、SLR、GPAS 和 DORIS) 地面观测站的历元 (ITRF2005 取为 2000.0) 站坐标和速度场来实现^[1]。相对于 ITRF2000, ITRF2005 基准站在全球的分布更为合理 (见图 1), 其站坐标和速度场的解算精度有成倍甚至数量级的提高 (见表 1); 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。为了便于广大用户了解和应用 ITRF2005, 拓展 ITRF 的研究课题, 本文在简单介绍 ITRF2005 的基础上, 对 ITRF2005 在解的生成、基准的定义和实现等方面所作改进的理由, 以及存在的问题进行了评析和思考; 并叙述了利用 ITRF2005 的产品可开拓的研究课题及意义。本文还特别指出了 ITRF2005 与 ITRF2000 一样并没有满足协议地球参考系 (CTRS) 的定向随时间的演化须遵循相对于地壳无整体旋转 (NNR) 的约束条件, 对此提出了两种解决途径。

收稿日期: 2007-10-15; 修回日期: 2007-11-23

基金项目: 上海市科研计划资助项目 (06DZ22101)

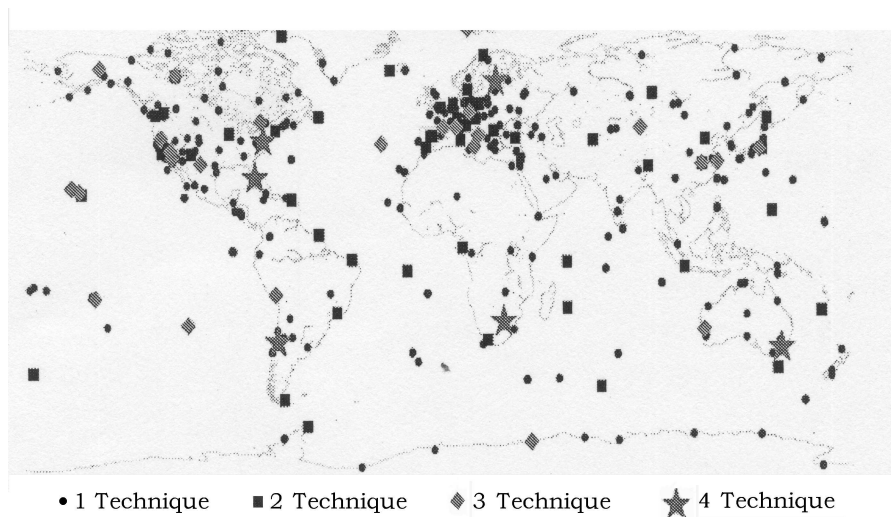


图 1 ITRF2005 基准站在全球的分布

表 1 ITRF2005 中的我国 GPS 基准站站坐标和速度场的解算精度

m, m·a⁻¹

	ITRF2000						ITRF2005					
	σ_x	σ_y	σ_z	$\sigma_{\dot{x}}$	$\sigma_{\dot{y}}$	$\sigma_{\dot{z}}$	σ_x	σ_y	σ_z	$\sigma_{\dot{x}}$	$\sigma_{\dot{y}}$	$\sigma_{\dot{z}}$
SHAO	0.001	0.002	0.002	0.0004	0.0005	0.0005	0.001	0.001	0.001	0.0001	0.0001	0.0001
LHAS	0.001	0.003	0.002	0.0005	0.0011	0.0007	0.000	0.001	0.001	0.0001	0.0001	0.0001
BJFS	0.014	0.019	0.017	0.0040	0.0055	0.0049	0.001	0.001	0.001	0.0001	0.0002	0.0002
WUHN	0.002	0.003	0.002	0.0007	0.0012	0.0009	0.001	0.001	0.001	0.0002	0.0004	0.0002
KUNM	0.010	0.022	0.012	0.0037	0.0083	0.0043	0.001	0.001	0.001	0.0002	0.0004	0.0002
URUM	0.003	0.006	0.006	0.0009	0.0022	0.0020	0.001	0.001	0.001	0.0001	0.0002	0.0002

2 ITRF2005 解的生成

ITRF2005 解包括 VLBI、SLR、GPS 和 DORIS 四种空间测量技术的基准站的历元 (2000.0) 站坐标和速度场, 以及由四种技术综合的周日地球定向参数 (EOP) 序列。其中各种技术基准站的站坐标和速度场可分别由参考文献 [2-4] 获得。

ITRF2005 的周日地球定向参数 (EOP) 序列自 1982 年开始, EOP 的生成在 1982—1993 年期间取自 VLBI, 1993—1999 年 5 月期间由 VLBI、SLR 和 DORIS 综合而成, 1999 年 5 月后又加上 GPS。

2.1 ITRF2005 解的生成与 ITRF2000 在解的生成上的两点差别

1) ITRF2000 解来自各种技术的各个分析中心各自建立地球参考框架 TRF (包括测站的历元站坐标和速度场, 以及地球定向参数 (EOP) 序列), 通过 14 个转换参数 (7 个 H 氏坐标转换参数和 7 个速度场转换参数) 和用方差、协方差严格加权的方法, 将各个 TRF 综合

成 ITRF2000 的综合解和在该框架内的 EOP 序列。1999 年后, 各技术的协调中心根据 GPS 建立国际 GPS 服务 IGS(International GNSS Service) 的成功经验, 分别建立了各门技术的国际服务: 国际 VLBI 服务 IVS、国际 SLR 服务 ILRS 和国际 DORIS 服务 IDS。ITRF2005 解的输入文件就是由 IVS、ILRS、IGS 和 IDS 提供的站坐标和 EOP 时间序列 (这些时间序列是由 IVS 等各空间技术服务中心根据其各个分析中心得到的站坐标和 EOP 解综合而成) 以及它们的方差、协方差。其中 IVS 解时间序列的跨度为 1980.0—2006.0, 采样率对站坐标和 EOP 均为天; ILRS、IGS 和 IDS 解时间序列的跨度分别为: 1992.9—2005.9, 1996.0—2006.0 和 1993.0—2006.0, 其采样率对站坐标均为周, 对 EOP 为天。ITRF2005 由 IVS、ILRS、IGS 和 IDS 的站坐标时间序列和其对应的方差、协方差, 生成各技术观测站对应的历元 (2000.0) 站坐标和速度场, 即 $TRF(X, V)$ 。然后由各技术的 $TRF(X, V)$ 加上 EOP 时间序列, 通过并置台站的归心测量值 (Local Ties) 实现并置台站间的连接, 综合生成 ITRF2005 的综合解, 它包括 ITRF2005 的地球参考框架 $TRF(X, V)$ 和相应的 EOP 时间序列。图 2 表示了生成 ITRF2005 解的过程。

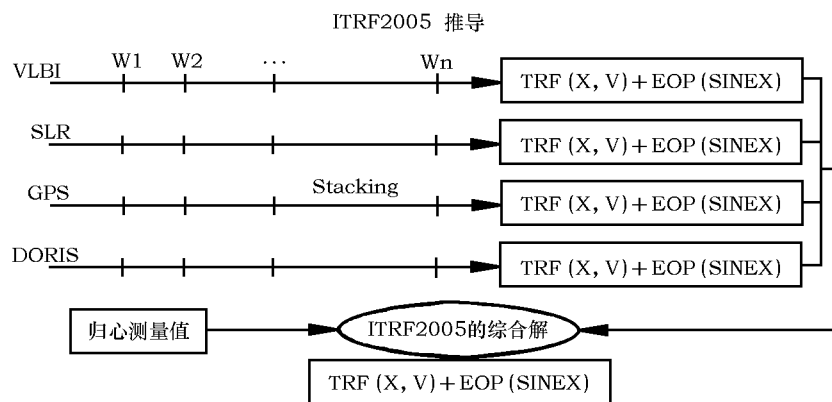


图 2 生成 ITRF2005 综合解的过程

2) 为了实现各技术解算结果的比较和检核, 在 ITRF 中同一地区 (称 site) 经常设置若干个不同技术的并置观测站 (称 colocation station)。每个 site 用一个 DOMES 号码来标称, 例如上海台的 DOMES 号是 21605, 下设 4 个 stations: 2 个 VLBI 站, 站名为 7226、7227; 一个 SLR 站, 站名为 7837; 一个 GPS 站, 站名为 SHAO。两个 station 间的坐标由归心测量值 (Local Ties) 进行连接, Local Ties 的精度为毫米级。ITRF2000 以及以前的 ITRF 序列中, 同一个 DOMES 下不同技术的并置观测站采用同一速度场, 它由不同技术求得的速度场综合而成。而在 ITRF2005 中, 同一个 DOMES 下不同技术的并置观测站采用各技术独立解算得到的速度场。表 2 列出了上海台 (DOMES NB 21605) 各观测站 (7227、7837 和 SHAO) 在 ITRF2000 和 ITRF2005 中的速度场及精度。

表 2 上海天文台各空间技术观测站在 ITRF2000 和 ITRF2005 中的速度场及精度
m·a⁻¹

DOMES NB	\dot{x}	$\sigma_{\dot{x}}$	\dot{y}	$\sigma_{\dot{y}}$	\dot{z}	$\sigma_{\dot{z}}$
21605(上海)						
7227 ITRF2000	-0.030 7	0.000 4	-0.011 2	0.000 4	-0.013 4	0.000 5
ITRF2005	-0.029 7	0.000 3	-0.012 4	0.000 3	-0.011 8	0.000 3
7837 ITRF2000	-0.030 7	0.000 4	-0.011 2	0.000 4	-0.013 4	0.000 5
ITRF2005	-0.030 4	0.000 2	-0.011 7	0.000 2	-0.011 6	0.000 2
SHAO ITRF2000	-0.030 7	0.000 4	-0.011 2	0.000 4	-0.013 4	0.000 5
ITRF2005	-0.029 7	0.000 1	-0.011 4	0.000 1	-0.012 0	0.000 1

2.2 评析和思考

ITRF2005 解生成中相对于 ITRF2000 所作的改进, 得益于最近五年来 GPS 等空间技术观测精度的提高和观测资料的积累, 以及 IVS、ILRS 和 IDS 的建立。如今 IVS 等空间技术协调中心综合各分析中心日常处理结果, 生成的高精度、高分辨率的站坐标时间序列, 已完全可独立解算出可靠、精确, 又能真正反映本技术特点的历元站坐标和速度场。不同技术并置的台站建立自己独立的速度场, 可真正实现各技术解算结果的比较和检核, 以利于发现各技术之间可能存在的系统差。仍用上海天文台各空间技术观测站的解算结果为例。为了便于比较, 利用下面的公式:

$$\begin{aligned} v_r &= \dot{x} \cos \phi \cos \lambda + \dot{y} \cos \phi \sin \lambda + \dot{z} \sin \phi; \\ v_e &= \dot{y} \cos \lambda - \dot{x} \sin \lambda; \\ v_n &= \dot{z} \cos \phi - \dot{x} \sin \phi \cos \lambda - \dot{y} \sin \phi \sin \lambda. \end{aligned}$$

将 7227、7837 和 SHAO 三站直角坐标的速度场 ($\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}$) 转化成径向、东向和北向三个方向的速度场 (v_r, v_e, v_n), 分别列于表 3。

表 3 上海天文台 3 个空间技术观测站在径向、东向和北向三个方向的速度场
m·a⁻¹

	v_r	v_e	v_n
VLBI(7227)	-0.001 97	0.031 8	-0.012 6
SLR(7837)	-0.001 04	0.032 1	-0.012 9
GPS(SHAO)	-0.001 13	0.031 5	-0.012 5

从表 3 中三站速度场的比较, 可看到三技术测定的水平速度 (v_e, v_n) 符合得很好, 而在径向 VLBI 站相对于 SLR 和 GPS 站有一个明显的、约达 1 mm/a 的系统偏差。这个偏差似可由 VLBI(7227) 站本身的特点来解释。7227、7837 和 SHAO 三站均建在上海佘山, SLR(7837) 站建在山顶基岩上, 离山下的 VLBI(7227) 和 GPS(SHAO) 站约达 1 km。VLBI(7227) 和 GPS(SHAO) 站相距不到 100 m, 两站基墩深埋地下 10 余米, 却均未及基岩。这两站水平方

向的运动速度非常接近, 而 VLBI(7227) 站径向的速率比 GPS(SHAO) 站大 1 mm/a , 似乎可用笨重 VLBI 设备使未能建在基岩上的 VLBI(7227) 站发生约达 1 mm/a 的下沉来解释。

ITRF2005 的解 $\text{TRF}(X, V)$ 直接来自各技术协调中心 IVS 等生成的站坐标时间序列。根据当前空间技术定位的精度, ITRF2005 提供的站坐标残差时间序列文件已不完全是空间技术定位的噪声, 其中包含了各种地球物理因素引起的测站非线性运动的有用信息。地壳非线性运动特征的监测和研究正是当今地球科学的前沿研究课题。图 3 给出了 DOMES10317 NY-ALESUND 的 GPS 站 (NYA1) 和 VLBI 站 (7331) 经 (X, V) 拟合后, 在东、北和径向三个方向的站坐标残差图。图中的站坐标残差变化图像, 明显呈现测站的非线性运动特征, 特别是高程方向呈现的振幅约达 5 mm 的周年运动。

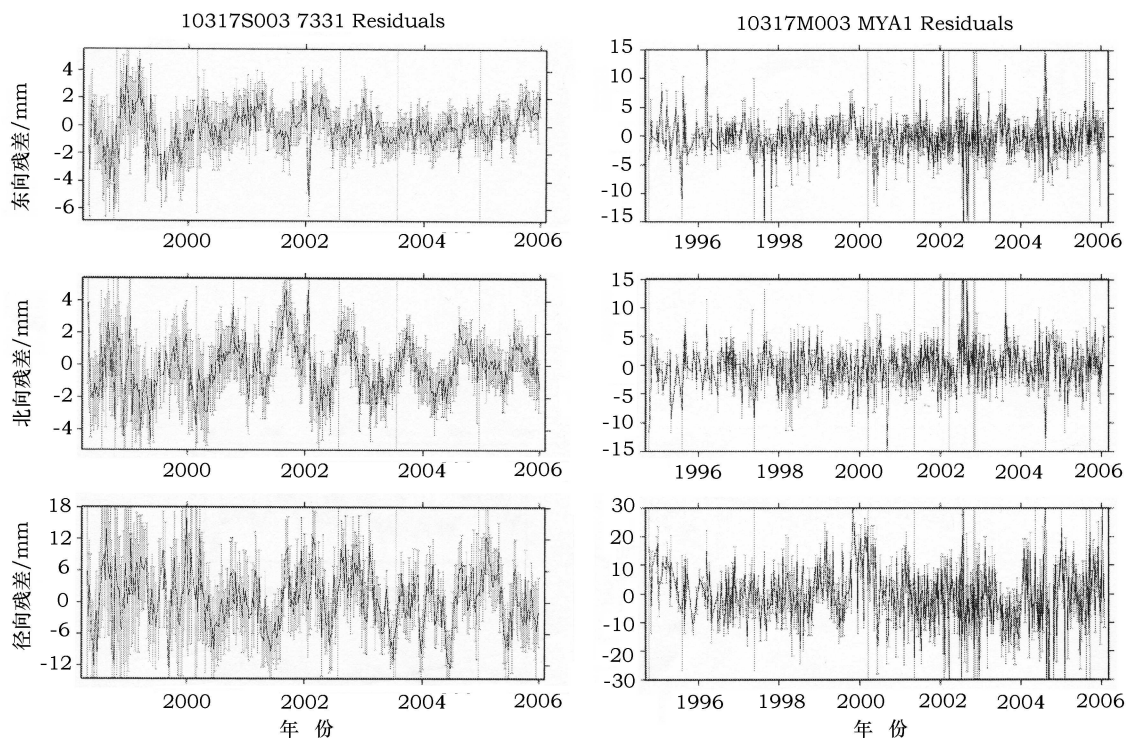


图 3 NYA1 和 7331 站经线性拟合后的站坐标残差变化图^[1]

对 ITRF2005 站坐标残差时间序列的精细分析, 可获得由于地球环境的变化引起的地壳弹性形变的动态过程。图 3 高程方向的周年运动, 就显然与地球表面流体圈中的大气和各态水的质量迁移引起的地表负荷变化 (主要包括大气的质量负载、非潮汐海洋质量负载、积雪和土壤贮水量的质量负载等) 有关^[6-8]。这些质量负载具有明显的季节性变化特征, 由此引起季节性的地壳弹性形变 (主要是高程方向)。现代地球科学要作环境预测, 就只有通过过程观测才能揭示机理。对于动态的过程都要求连续观测。ITRF2005 站坐标残差时间序列给出的地壳弹性形变的动态过程, 可成为反演地球环境动态变化过程的一个窗口。目前三门空间技术的站坐标残差时间序列中, VLBI 和 SLR 技术由于其观测条件的限制, 大部分台站的站坐标残差时间序列比较稀疏, 难以给出非线性运动特征的可靠结果。而 GPS

提供的时间序列较为完整,具有较高的时空分辨率,有利于非线性运动特征的精细分析。但问题是,由于 GPS 观测技术的复杂性,由 GPS 给出的站坐标非线性变化的特征可能包含两方面的因素。

1) 确实是由于地球环境的变化引起的测站坐标的非线性运动。

2) 也可能是由 GPS 观测技术本身存在的问题引起。以周年运动为例,已发现 GPS 的周年效应有如下三种:

(1) GPS 卫星辐射压摄动的周年效应:太阳辐射压摄动是 GPS 卫星定轨的主要误差源,它主要来自 GPS 卫星太阳翼板的指向误差(设计时太阳翼板应朝向太阳),这个指向误差显然有一个周年周期。

(2) 测站与 GPS 星座配置的周年效应:由于 GPS 卫星的运行周期是半个恒星日(11 h 58 min),对同一测站而言每天早 4 min 回到前一天测站与 GPS 星座同样的几何配置,这就使测站与卫星星座的几何配置有一个周年周期的变化,而 GPS 的多路径效应强烈地依赖于这个几何配置。

(3) 卫星天线相位中心偏差的不确定性^[9],一直是精密的 GPS 测地应用中难于解决的重要问题。由于每颗卫星的天线相位中心的位置在星固坐标系中都在变化,而且卫星天线相位中心的可测性颇低,致使卫星天线相位中心偏差难于确定。目前 IGS 的几个分析中心 CODE、GFZ 和 JPL 等,对每个天线相位中心的偏差进行了估计,但相互之间仍有分米级的差异。研究发现^[10],GPS 坐标解序列中出现的季节性变化与接收机天线相位中心模型有一定的关系,相位中心模型误差将使测站位置季节性变化振幅增大几毫米。

解决上述问题的最好办法就是把 GPS 结果与 VLBI、SLR 技术的结果进行比较。选一些站坐标时间序列较理想的有 GPS 站并置的 VLBI 或 SLR 站(例如 NY-ALESUND 的 7331VLBI 站),将其与并置的 GPS 站的结果进行比对就有助于解决 GPS 技术可能存在的周年效应。

3 ITRF2005 基准的定义、评析和思考

3.1 ITRF2005 基准的定义^[11]

原点: ITRF2005 的原点定义为,在历元 2000.0 时刻 ITRF2005 与 ILRS 的 SLR 时间序列间的平移参数及其速率为零。

尺度: ITRF2005 的尺度定义为,在历元 2000.0 时刻 ITRF2005 与 IVS 的 VLBI 时间序列间的尺度因子及其速率为零。

定向: ITRF2005 的定向定义为,在历元 2000.0 时刻 ITRF2005 与 ITRF2000 间的旋转参数及其速率为零。这两个条件适用于 ITRF 的一个核心网,包括 38 个 GPS 站、21 个 VLBI 站和 11 个 SLR 站,其中有中国的 LHAS 和 7837 站。

3.2 ITRF2000 基准的定义^[12]

为了便于将 ITRF2005 与 ITRF2000 相比较,下面列出了 ITRF2000 基准的定义。

原点: ITRF2000 的原点的平移参数及其速率取自 SLR 解(包括全球 SLR 的各分析中心,CGS、CRL、CSR、DGFI、JCET)的加权平均。

尺度: ITRF2000 的尺度因子及其速率取自 SLR 解(包括全球 SLR 的各分析中心, CGS、CRL、CSR、DGFI、JCET)和 VLBI 解(包括全球 VLBI 的各分析中心: GIUB、GSFC、SHA)的加权平均。

定向: ITRF2000 选取一些高质量的 ITRF 台站(选了 54 个 sites)以保证在历元 1997.0 其旋转参数取自 ITRF97; 旋转参数的速率相对于 NNR-NUVEL1A 无整体旋转。

3.3 评析和思考

3.3.1 评析

ITRF2005 基准的定义相对于 ITRF2000 做了较大调整。事实上在 ITRF 序列的建立过程中, ITRF 基准的定义作了多次调整, 这也反映了 ITRF 在基准定义上的不成熟。下面我们将根据 IERS 的最新规范(IERS Convention 2003), 协议的地球参考系(Conventional Terrestrial Reference System, CTRS)的定义^[13], 对 ITRF2005 基准定义所作的调整进行评析。

3.3.1.1 原点(origin)

CTRS 的原点定义在整个地球(包括海洋和大气)的质量中心。VLBI 是一种相对测量观测技术, 与地球的质量中心无关。SLR、GPS 和 DORIS 等卫星测量技术的数据处理方法通常是一种动力学测地方法, 卫星轨道参数、测站坐标(包括速度)和地球自转参数同时解算。在卫星轨道确定中用的地球引力场模型的三个一阶系数为零($C_{10} = C_{11} = S_{11} = 0$), 这样就从理论概念上把 SLR 地球参考架的原点定义到了质心。由于 GPS、DORIS 技术观测的复杂性和存在的问题(如天线相位中心的不确定性等), ITRF2000 的原点仅取 SLR 解的加权平均来定义。但仍有一个问题没有解决, 这个问题是由地球质心的运动引起的, 地球的质心是由整个地球(包括海洋和大气)的质量分布所决定的, 它也是地球卫星绕其旋转的动力学中心。而作为协议地球参考系的参考点的观测台站则位于固体地球的表面, 由这些观测台站组成地球参考框架的几何中心与地球的质量中心当然不一定重合。近几年已由 SLR、GPS 等空间大地测量技术和绝对重力测量技术监测得到较可靠的地球质心运动的定量结果, 这里所指的地球质心的运动就是地球质心相对于地球参考框架几何中心的运动。地球质心的运动使协议地球参考系物理框架的地壳(与质量无关)相对于质心是运动的, 两者之间显然是不相容的。为此 ITRF2005 基准中, 对原点的定义作了合理的调整。如今 ITRF2005 原点的定义实际上就是将 ITRF2005 的原点仅靠在历元 2000.0 时刻的地球质心(由 ILRS 解得)上, 其他历元地球的质心相对于 ITRF2005 原点的位置变化就是地球质心的运动。这时 i 测站在某时刻 t 的瞬时位置 $X^i(t)$ 可表示为:

$$X^i(t) = X^i(t_0) + V^i(t - t_0) + \sum_R \Delta_1 X_R^i(t) + \sum_R \Delta_2 X_R^i(t) + \Delta X_0(t), \quad (1)$$

式中, $X^i(t_0)$ 、 V^i 取自 ITRF2005 的 TRF(X, V); $\sum_R \Delta_1 X_R^i(t)$ 为已模型化的各种地球物理因素(包括固体潮、海洋潮和极潮等)引起测站位置各种短期和短周期的变化; $\sum_R \Delta_2 X_R^i(t)$ 为非模型化的各种地球物理因素的影响(即上面提到的非线性运动); $\Delta X_0(t)$ 是 t 时刻地球质心在 ITRF2005 框架内的位置, 且有 $\Delta X_0(t_0) = 0$ 。式(1)中的 $\Delta X_0(t)$ 影响 ITRF 参考站的绝对坐标, 但并不影响参考站站间基线矢量的相对坐标, 保持参考站在地壳上组成的几何构形不变。ILRS 解的原点相对于 ITRF2005 原点的变化(实际上主要就是地球质心在 ITRF2005

内的运动) 在图 4 标出。图中的前三张子图, 就是由 ILRS 解得的地球质心相对于 ITRF2005 框架在 (X, Y, Z) 三个方向的运动。

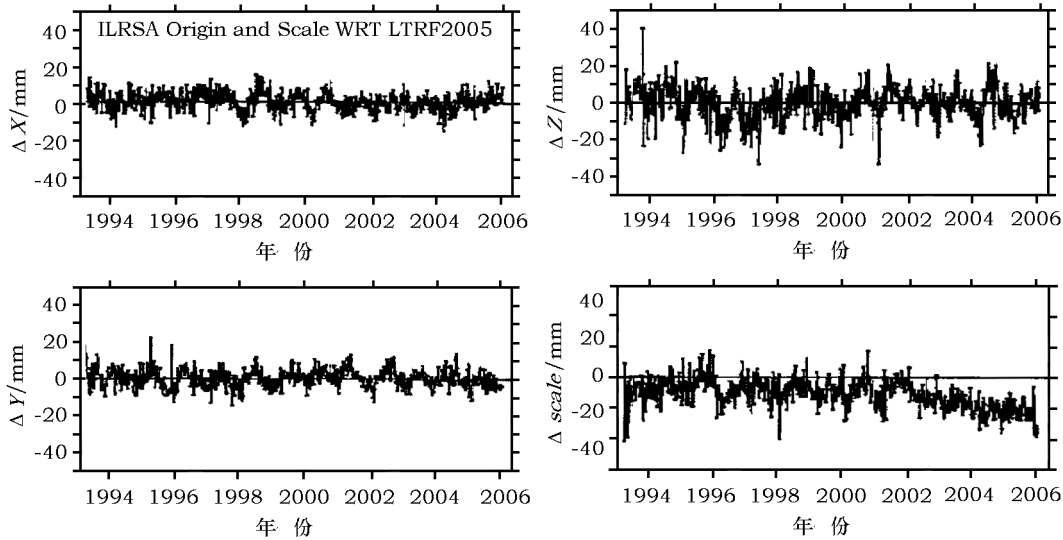


图 4 ILRS 解的原点 (即地球质心)、尺度相对于 ITRF2005 的变化^[11]

3.3.1.2 尺度 (scale)

从理论概念上, CTRS 的尺度定义为在引力相对论意义下, 一局部地球框架下的尺度。它与地心坐标时 (TCG) 一致, 长度单位是 SI 单位。实用中通常是由光速 c 和地球引力常数 GM 以及在数据处理中采用的相对论改正模型共同确定的。VLBI 数据处理用的是几何方法, 基本上与地球引力场无关, 其尺度因子主要取决于光速 c , 这使得 VLBI 在地球参考架的建立和维持中, 其尺度因子的长期稳定度远优于 SLR、GPS 技术。对 SLR 技术, 根据已有的研究^[14,15], 地球引力常数 GM 的误差 dGM 引起地球参考架尺度的变化可用下式估算:

$$\Delta scale = \frac{dGM}{3GM} \frac{r_{sat}}{a_e}, \quad (2)$$

式中, r_{sat} 、 a_e 分别为卫星的地心距和地球半径。尺度的变化不仅取决于 dGM , 还与卫星的高度有关。对 GPS 等技术, 除了 GM 的影响, 卫星天线相位中心的 z 偏差 (卫星指向地心的方向为 z 方向) 是影响尺度的重要因素。 z 偏差的不确定性更使问题复杂化^[9,16,17]。 z 偏差的误差 $\sigma_{z,offset}$ (以 m 为单位) 引起的尺度变化 $\Delta scale$ (以 10^{-9} 为单位), 大致可表为^[18]:

$$\Delta scale = 7.8\sigma_{z,offset}, \quad (3)$$

因此 SLR、GPS 等卫星测量技术, 由于地球引力常数 GM 和卫星天线相位中心的不确定性, 在地球参考架的建立和维持中, 其尺度因子的稳定度较差, 不宜用作 ITRF 的基准尺度。图 5 给出了各技术分析中心解的尺度因子相对于 ITRF2000 尺度的变化。从图中可看到, 只由 VLBI 各分析中心解得尺度因子是比较稳定的。从图 5 和上面的分析, 不难作出如下的结

论: SLR、GPS 等卫星大地测量技术不宜作为地球参考框架的尺度基准。将 ITRF2005 的尺度基准调整为仅依赖于 VLBI 技术, 显然是合理的。

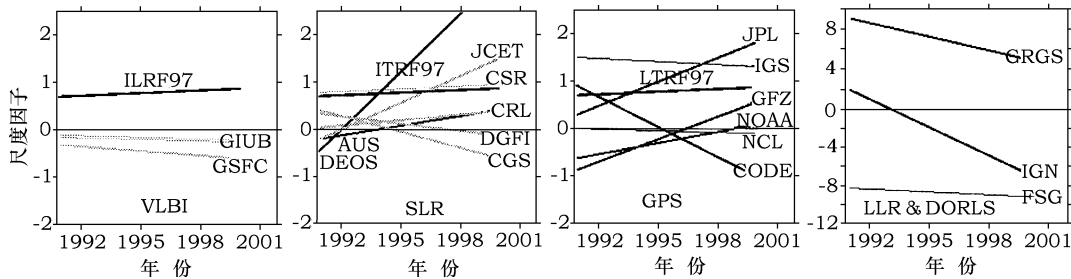


图 5 各技术分析中心解的尺度因子相对于 ITRF2000 尺度的变化

另外, 由于数据处理中的各种误差 (包括所采用的引力相对论的度规等) 的影响, IVS 的 VLBI 时间序列间各个时刻的尺度因子及其速率也是不同的。为了保证 ITRF2005 基准尺度及其速率的唯一性, ITRF2005 的尺度定义为, 在历元 2000.0 时刻与 IVS 的 VLBI 时间序列的尺度及其速率保持一致。图 6 为 IVS 时间序列的尺度相对于 ITRF2005 尺度随时间的变化。

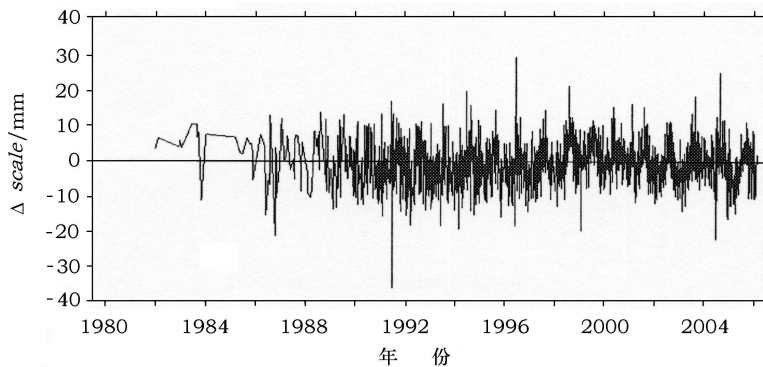


图 6 IVS 时间序列的尺度相对于 ITRF2005 的变化

根据 IAU/IUGG 的推荐, 按 CTRS 的尺度为引力相对论意义下一局部地球框架内的尺度的严格定义, 采用的时间尺度应为地心时 TCG。而在 VLBI 等空间测地技术的观测和解算中, 实际应用的时间尺度是地球时 TDT/TT (国际原子时 $\text{TAI} + 32^s.184 = \text{TDT/TT}$)。TCG 与 TDT/TT 的不同引起地球参考架尺度的偏差约为 0.7×10^{-9} (相当于对测站和 GPS 卫星高度的偏差约为 4.5、18 mm)。为了满足 CTRS 尺度的严格定义, 在 ITRF94、ITRF96 和 ITRF97 以及当时的 IGS 轨道中对原来解算的结果作了 $[1 + (0.696\ 929\ 013\ 4 \times 10^{-9})]$ 的尺度调整。但问题是对大多数 ITRF 的用户来说, 并不知道这个调整, 而且他们用的总是 TDT/TT (即 TAI), 这就对 ITRF 的应用带来不必要的麻烦。实际上, ITRF 时间尺度的选取纯粹是一个方便观测和应用的问题, 而且采用 TDT/TT 构架引入的误差约为 10×10^{-17} 量级, 比目前空间测地技术能达到的测地精度小 7 个量级, 这对测地应用完全可以忽略。因此在 ITRF2000 和 ITRF2005 的尺度中仍用 TDT/TT 作为时间尺度, 将 ITRF97 等所作的 $[1 + (0.696\ 929\ 013\ 4 \times 10^{-9})]$ 的尺度调整再改回来。对一些强调要用地心时 TCG 作为时间尺度的研究工作, 可对 ITRF2005

的尺度作 $[1+(0.696\ 929\ 013\ 4 \times 10^{-9})]$ 的尺度调整。

3.3.1.3 定向 (orientation)

根据协议地球参考系的定义, CTRS 的定向由国际时间局 (BIH) 给出的在历元 1984.0 的地球自转参数确定。但自 1988 年开始由 VLBI 等空间技术取代经典天体测量技术监测地球自转参数后, 国际地球参考架 ITRF 的定向主要依赖于综合 VLBI 等空间技术所得到的 $TRF(X, V)$ (早先的 ITRF 依赖于 $TRF(X, V) + ERPs$)。为了保持地球自转参数序列的连续性, 新的 ITRF 的定向总是在其初始历元与前一个 ITRF 保持同向 (alignment)。如 ITRF2000 的定向在历元 1997.0 与 ITRF97 保持同向; ITRF2005 的定向在历元 2000.0 与 ITRF2000 保持同向。所谓两个 ITRF 在某历元保持同向, 意指在该历元两个 ITRF 的 Helmert 转换中的三个旋转参数为零。

3.3.1.4 定向速度 (orientation rate)

根据协议地球参考系的定义, CTRS 的定向随时间的演变遵循相对于地壳无整体旋转的约束条件。提出这个约束条件起因于地球参考系的理论概念, 即理想的地球参考系应是这样一种固连于地球的地固系统: 相对于它地球只存在形变, 而无整体的旋转或平移, 而它相对于惯性参考系只包括地球的整体运动, 即地球的轨道运动和地球的定向运动 (岁差、章动和自转)。也就是采用所谓 Tisserand 条件来定义一个理想的地球参考系, 其主要特征是: 相对于它, 整个地球的线性动量和角动量为零^[19,20]。早先的 IERS 规范中^[21,22], 约定 CTRS 随时间的演变遵循相对于地球无整体旋转和平移的约束条件。后随着地球质心运动的发现和监测, 并考虑到目前建立的地球参考架, 是用固定在固体地球地壳上的测站的位置来描述参考架, 这个协议地球参考系的约定如今改为“CTRS 的定向随时间的演变遵循相对于地壳无整体旋转的约束条件”^[23]。实现地球参考架相对于地壳无整体旋转的约束条件, 数学上可表为:

$$\mathbf{L} = \int_c \mathbf{r} \times \mathbf{v} dm = 0, \quad (4)$$

式中, \mathbf{L} 是整个地壳角动量和, \mathbf{v} 和 \mathbf{r} 是台站在地固系中的速度和位置矢量, c 代表对整个地壳积分, dm 是地壳面元。式 (4) 中, \mathbf{v} 只有其水平分量 $\mathbf{v}_p (\mathbf{v} = \mathbf{v}_i + \mathbf{v}_p)$ 才对 \mathbf{L} 有贡献。而地壳水平方向大尺度、整体性的运动主要由板块运动, 即:

$$\mathbf{v}_p = \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r}, \quad (5)$$

式中 $\boldsymbol{\Omega}$ 是板块的欧拉矢量, 这时式 (4) 可表为:

$$\mathbf{L} = \int_c \mathbf{r} \times (\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r}) dm = 0. \quad (6)$$

假定地球为球形, 并且地壳质量均匀分布, 式 (6) 可近似为:

$$\mathbf{L} = \sum_{i=1}^{14} \mathbf{Q}_i \cdot \boldsymbol{\Omega}_i = 0, \quad (7)$$

式中, \mathbf{Q}_i 是第 i 个板块的转动惯量矩阵^[24]。将式 (7) 应用于地质、地球物理板块相对运动模型 NUVEL1, 建立了无整体旋转 (No Net Rotation) 的板块绝对运动模型 NNR-NUVEL1A^[25]。

从 ITRF91 到 ITRF94, ITRF 以地质模型 NNR NUVEL1A 为基准维持其相对地壳无整体旋转的条件(当时的速度场主要由 NNR NUVEL1A 模型求得, 即 $v_p = \Omega \times r$)。在 ITRF96 以后, 实测速度场的精度已达到 mm/a 级, 且与地质板块模型无关^[26,27], 这样就面临如何利用实测速度场实现无整体旋转条件的问题。在 ITRF96 和 ITRF97 中没有明显提出维持无整体旋转的条件, Zhang 和 Zhu 等人^[28-30]利用 ITRF96 和 ITRF97 的速度场建立了完全基于空间技术实测结果的现今全球板块运动模型, 并指出了 ITRF96 和 ITRF97 框架存在整体旋转的问题。ITRF2000 选取了 54 个高质量的核心站, 来维持无整体旋转特性(旋转参数的速率满足相对于 NNR-NUVEL1A 无整体旋转)。Zhu 等人^[31]对 ITRF2000 中关于定向速度基准的实现提出了质疑。指出了 54 个核心站的速度场与地质板块模型 NNR-NUVEL1A 无关, 其运动状况也不能代表整个地壳的运动; 全球板块运动的 14 个主要板块仅有 6 个板块的运动可由这 54 个核心站的运动来确定, 而且这 6 个板块运动的角动量之和也不等于 NNR-NUVEL1A 模型中这 6 个板块运动的角动量之和, 也就是说 ITRF2000 相对于 NNR-NUVEL1A 存在整体旋转。在该文中, 利用 ITRF2000 中数百个基准站的速度场, 经适当选取, 建立了独立于地质模型的、包括 14 个主要板块的现今全球板块运动模型 ITRF2000VEL, 由此可得整个地壳的角动量和 $|L| = 0.35 \times 10^{-2}$ 立体角 /Ma, 而对 NNR-NUVEL1A 模型, 其 $|L| = 0.0865 \times 10^{-4}$ 立体角 /Ma ≈ 0 , 这就较严格地证明了 ITRF2000 相对于地壳确实存在整体旋转。事实上, 在 ITRF 工作组内部对这一问题也一直未有一致的意见^[32]。在 ITRF2005 的定向定义中, 仅笼统提在历元 2000.0 与 ITRF2000 的旋转参数及其速率为零, 依此保持 EOP 序列的连续性。再也不提相对于地壳或相对于 NNR-NUVEL1A 无整体旋转的约束条件。ITRF 中关于定向速度基准的问题仍然没有得到解决。

建议通过下面两个途径来解决关于 ITRF 定向速度基准的问题:

1) 严格遵循“CTRS 的定向随时间的演变遵循相对于地壳无整体旋转的约束条件”的 IERS 规范^[23,31]。这就要对由空间技术确定的 ITRF 速度场作一个整体的调整。调整的步骤如下:

(1) 先由 ITRF 实测的速度场建立现今的全球板块运动模型(即利用式(5)确定各大板块的的欧拉矢量 Ω_i);

(2) 利用式(7)计算全球板块运动角动量之和 L , 一般情况下 $L \neq 0$, 表示不满足无整体旋转的条件;

(3) 遵循相对于地壳无整体旋转的约束条件, 令

$$\Omega_c = \frac{3}{8\pi} I \cdot L; \quad (8)$$

$$\Omega'_i = \Omega_i - \Omega_c. \quad (9)$$

式(8)中 I 是单位矩阵;

(4) 相应的速度场作如下的调整:

$$v' = v - \Omega_c \times r. \quad (10)$$

由 $TRF(r, v')$ 定义 ITRF 将严格遵循“CTRS 的定向随时间的演变遵循相对于地壳无整体旋转的约束条件”。值得注意的是, 这时的 $EOPs$ 系列也要作由 Ω_c 产生的相应的调整。

2) 在 IERS 的新规范中去除“CTRS 的定向随时间的演变遵循相对于地壳无整体旋转的约束条件”这一定向速度基准。这相当于以前的 IERS 规范^[21,22]中有“CTRS 随时间的演变遵循相对于地球无整体平移”的约束条件,后发现了地球质心相对于 TRF 的运动,在新的 IERS 规范^[23]中去除了这个约束条件。当前 ITRF 的建立和维持完全基于空间技术的实测结果 TRF(\mathbf{r}, \mathbf{v}), 而给出的 EOPs 序列也对应于 TRF(\mathbf{r}, \mathbf{v}) 框架。对 ITRF 的用户来说,应用 TRF(\mathbf{r}, \mathbf{v}) 和 EOP 完全是一个自洽系统,应该没有任何问题;他们也并不关心 TRF(\mathbf{r}, \mathbf{v}) 的定向随时间的演变是否遵循相对于地壳无整体旋转的问题。既然对当前实测的 TRF(\mathbf{r}, \mathbf{v}) 发现相对于地壳存在整体旋转,可像过去 IERS 规范中去除“无整体平移”一样,在以后的 IERS 规范中去除“相对于地壳无整体旋转”的约定。事实上,除了早先的 ITRF,由于其速度场完全基于 NNR-NUVEL1A,满足“相对于地壳无整体旋转”的约定外,以后的 ITRF 均未真正满足这一约定^[28-31]。它们对地球科学的实测和研究工作也没有带来任何问题。

3.3.2 关于地球参考架基准的几点思考

1) 从概念上讲,地球参考架原点的坐标在几何上应定义为(0, 0, 0)。CTRS 的原点定义在整个地球(包括海洋和大气)的质量中心,按此定义由于地球质心的运动,CTRS 的原点并不是固定的,而是在不断的运动中(呈现出振幅约达 10mm 的高频运动)。这两者显然是不相容的,ITRF2005 把 CTRS 的原点定义在起始历元 2000.0 的地球质心,从而保证了其参考架原点的坐标在不同的历元始终保持为(0, 0, 0),而其他历元地球质心的位置,即 $\Delta \mathbf{X}_0(t)$ 由 SLR 等技术的实测得到。这样做,应该说在当前的条件下是最合理的。

2) 作为地球参考架的尺度因子,应保证在相当长的时间内其基准尺度及其速率的唯一性(即不变性)。由 IVS 站坐标时间序列维持的尺度因子,在不同历元是不同的(见图 6),就相当于在不同历元,一把尺的长度是变化的,这显然是不合理的。为了解决这一问题,维持 ITRF 基准尺度的唯一性,ITRF2005 取历元 2000.0 的 VLBI 时间序列间的尺度因子作为它的基准尺度。图 6 显示了 IVS 时间序列的尺度相对于 ITRF2005 尺度随时间的变化,从图中可看到,IVS 解尺度的长期稳定性是好的,短期变化较有规律,呈现周年变化的特性,产生这变化的原因,可能来自 VLBI 数据处理中所采用的引力相对论的度规,对此有进行深入研究的价值。

3) 当前的空间大地测量的地球参考架,采用固定在固体地球地壳上的参考点的位置来描述参考架,是建立在地壳上的地球参考架(严格地讲,应称地壳参考架)。这个地球参考架可用来描述和反映地壳表面(包括与地壳直接有关的大气圈、水圈和上地幔)的运动状态,而不能反映地球内部(下地幔、地核等)的运动状态。Solomon 等许多学者的研究表明^[24,25,33],地壳(岩石圈)相对于地球内部存在整体旋转。我们可以保证采用的地球参考架相对于地壳无整体旋转,却无法保证它相对于整个地球无整体旋转。

4) 地球定向参数 EOPs 的监测由这个地壳参考架的参考点通过空间技术的观测来实现,解算得到的 EOP 序列与这个地壳参考架是一个自洽系统,所以严格地讲,也应称为地壳定向参数。只有与地壳直接有关的大气圈、水圈和上地幔的运动和变化(如角动量变化等)能从这个地壳定向参数的变化中反映出来,而地球内部的运动状态只有通过于地壳的间接耦合,才能在地壳定向参数得到反映。为了遵循地球参考架相对于地壳无整体旋转的约束条件,由实测得到的地壳参考架应去除其整体旋转部分(即速度场作如式(10)的调整),而这个整体旋转又必须加到 EOP 序列中去,以保证处理后的地壳参考架和 EOP 序列达到新的自洽。

4 结束语

高精度、高分辨率的 ITRF2005 将取代 ITRF2000, 成为广大地学工作者描述和研究地壳定量变化的基准框架。ITRF2005 在其解的生成和基准定义等方面进行了较大的改进, 对地球科学的研究和发展, 具有深刻的内涵; 也开拓了一些新的地学研究课题。

参考文献:

- [1] http://itrf.ensg.ign.fr/ITRF_solutions/2005/ITRF2005_ts.php, 2007
- [2] http://itrf.ensg.ign.fr/ITRF_solutions/2000/ITRF2000.php, 2007
- [3] http://itrf.ensg.ign.fr/ITRF_solutions/2005/doc/ITRF2005_VLBI.SSC.txt, 2007
- [4] http://itrf.ensg.ign.fr/ITRF_solutions/2005/doc/ITRF2005_SLR.SSC.txt, 2007
- [5] http://itrf.ensg.ign.fr/ITRF_solutions/2005/doc/ITRF2005_GPS.SSC.txt, 2007
- [6] Farrell W E. Reviews of Geophysics and Space physics, 1972, 10(3): 761–797
- [7] Dong D N, Fang P, Bock Y et al. JGR, 2002, 107(B4): ETG 9-1–16
- [8] Zhu W Y, Fu Y, Li Y. Science in China, Series(D), 2003, 46(8): 765–778
- [9] Gendt G, Dick G, Sohne W. In: IGS General Bureau eds., IGS 1998 Technical Reports, Pasadena, JPL, 1999: 79–84
- [10] Hatamaka Y, Sawada M, Horeca A et al. Earth Planets and Space, 2001, 53(1): 23–30
- [11] http://itrf.ensg.ign.fr/ITRF_solutions/2005/datum_ITRF2005.php
- [12] http://itrf.ensg.ign.fr/ITRF_solutions/2000/datum.php
- [13] Dennis D, McCarthy D D(eds.). IERS Conventions(2003), IERS Technical Note 32, 2003
- [14] Lerch F G. Geophys.Res.Lett., 1988, 1031–1034
- [15] Zhu S Y, Massmann F-H, Yu Y et al. GFZ Scientific Technical Report STR01/12, 2001
- [16] Springer T A. PhD thesis, Berne: Astronomical Institute, University of Berne, 1999, 3–12
- [17] Springer T A. In: Vandenberg N R, Bayer K D eds., IVS 2000 General Meeting Proceedings, Germany: Kötzing, 2000: 296–303
- [18] Zhu S Y, Massmann F H, Yu Y et al. Journal of Geodesy, 2003, 76: 668–672
- [19] Kovalevsky J, Mueller I I. Reference Frames in Astronomy and Geophysics, Ohio: Kluwer Academic Publishers, 1989: 1–12
- [20] Kovalevsky J, Mueller I I eds. Reference Frames in Astronomy and Geophysics, Ohio: Kluwer Academic Publishers, 1989: 145–162
- [21] McCarthy D D. IERS Standards(1989) , IERS Technical Note 3, 1989
- [22] McCarthy D D. IERS Standards(1992) , IERS Technical Note 13, 1992
- [23] Dennis D, McCarthy D D. IERS Conventions(1996), IERS Technical Note 21, 1996
- [24] Solomon S C, Sleep N H. JGR, 1974, 79: 2557–2567
- [25] Argus D F, Gordon R G. Geophys. Res. Lett., 1991, 18: 2039–2042
- [26] Boucher C, Altamimi Z, Sillard P. IERS Technical Note 24, 1998
- [27] Boucher C, Altamimi Z, Sillard P. IERS Technical Note 27, 1999
- [28] Zhang Q, Zhu W Y. Geophys. Res. Lett., 1999, 26(18): 2813–2816
- [29] Zhang Q, Zhu W Y. Chinese Journal of Geophysics, 2000, 43(5): 598–606
- [30] Zhu W Y. ACTA ASTRONOMICA SINICA, 2000, 41(3): 312–320
- [31] Zhu W Y, Fu Y, Li Y. SCIENCE IN CHINA, 2003, 46(Supp.): 1–12
- [32] http://itrf.ensg.ign.fr/ITRF_solutions/2000/ITRF2000.RECOM.php, 2007
- [33] Harper J F. Geophys. J. R. Astron. Soc. 1986, 87: 155–171

Notes and Commentary on the ITRF2005

ZHU Wen-Yao¹, XIONG Fu-Wen^{1,2,3}, SONG Shu-li¹

(1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China; 2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China; 3. Shanghai Institute of Geological Survey, Shanghai 200072, China)

Abstract: Waiting for a long time after the ITRF2000, the ITRF2005 is coming on. In comparison with the ITRF2000, the ITRF2005 make a lot of improvement on the ITRF datum (including origin, scale and orientation) definition and realization, ITRF solution generation, ITRF products and so on. These improvements have important significance for monitoring and studying the Earth's motion and variation. In this paper, the roles of each space geodesy technique (VLBI, SLR, GPS and DORIS) in the ITRF datum and realization have been analyzed in detail. For satellite geodesy techniques (SLR, GPS and DORIS), the geocentric gravitational constant (GM) and satellite antenna phase center offsets will affect the scale of the terrestrial reference frame (TRF). So the scale of the TRF defined by satellite geodesy techniques is variable and unstable. The ITRF2005 scale defined by the scale at epoch 2000.0 of IVS VLBI time series ensures the sole value and stability of the TRF scale. The motion of the Earth's mass center is a trouble problem for TRF origin definition, the ITRF2005 origin defined by the origin at epoch 2000.0 of ILRS SLR time series solves this trouble problem. In the orientation definition, one criterion of Conventional Terrestrial Reference System (CTRS) should be met that the time evolution of the orientation is ensured by using a No Net Rotation (NNR) condition with regards to horizontal tectonic motion. The research results indicate that the ITRF2005 is not sufficiently concordant with this criterion of the CTRS. The ITRF2005 is not an NNR reference frame as the ITRF2000. The two ways have been put forward to solve the problem of the NNR reference frame. In the paper, it is also indicated that the station position residual time series provided by the ITRF2005 contain many significant non-linear and seasonal variation information caused by the contribution of the Earth's surface mass redistribution. It is a worth developing research topic on ITRF2005.

Key words: celestial mechanics; ITRF2005; ITRF datum (origin, scale, orientation); NNR reference frame; non-linear and seasonal variations