

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2018.02.06

多种空间大地测量技术内综合方法研究 及精度分析

何 冰^{1,2,3,4}, 王小亚^{1,2,3}, 王家松³

(1. 中国科学院 上海天文台, 上海 200030; 2. 中国科学院大学 天文与空间科学学院, 北京 100049; 3. 宇航动力学国家重点实验室, 西安 710043; 4. 浙江水利水电学院, 杭州 310018)

摘要: 详细地叙述了国际空间大地测量技术服务组织 ILRS (International Laser Ranging Service), IVS (International VLBI Service), IGS (International GNSS Service) 和 IDS (International DORIS Service) 分别采用 SLR (satellite laser ranging), VLBI (very long baseline interferometry), GPS (global positioning system) 和 DORIS (Doppler orbitography and radio-positioning intergrated by satellite) 四种技术, 并由多家分析中心的站坐标和地球定向参数的 SINEX (solution in independent exchange format) 周解 (或 24 h 观测解) 进行技术内综合解算的方法, 包括技术内综合模型的建立、参考架基准约束问题和不同分析中心解的定权方法等主要内容, 并对 ILRS, IVS, IGS 和 IDS 提供的技术内综合周 (日) 解的长期序列进行了站坐标和地球定向参数 (earth orientation parameters, EOP) 的精度评估, 分析了地球参考架基准参数的长期特性。由地球参考架基准定义可知, SLR 技术内 SINEX 综合解相对于 ITRF2014 的平移参数时间跨度最长, 且没有明显的偏差或漂移; GPS 技术的三个方向平移参数虽然弥散度最低, 但是在 X 方向和 Y 方向存在长期的线性变化, 在 Z 方向存在跳变; DORIS 技术也有类似 GPS 技术的现象。这些结果说明 ITRF2014 选择 SLR 定义的地心作为参考架原点是有道理的。通过分析台站坐标精度可知, 利用各种技术对核心站和非核心站进行区分非常重要, 所分别得到的精度有明显的不同。由于 GNSS (global navigation satellite system) 台站多且分布广, 因此地球定向参数的确定精度要高于其他三种技术。

关键词: 空间大地测量技术; 地球参考架; 地球定向参数; 技术内综合

中图分类号: P135

文献标识码: A

收稿日期: 2017-10-13; 修回日期: 2017-12-18

资助项目: 科技部基础性工作专项 (2015FY310200); 国家重点研发计划 (2016YFB0501405); 国家自然科学基金 (11173048, 10873029); 宇航动力学国家重点实验室和上海市空间导航与定位技术重点实验室 (06DZ22101); 浙江省自然科学基金 (LQ15D010001)

通讯作者: 王小亚, wxy@shao.ac.cn

1 引言

自主确定高精度地球参考架和地球定向参数是中国卫星导航、深空探测等空间飞行器精密测定轨和高精度大地基准及其应用研究的迫切需要,在用多种空间大地测量技术综合确定地球参考架和地球定向参数前,需要对各个空间大地测量技术进行技术内综合。以国际地球参考框架 ITRF2005 (international terrestrial reference frame, ITRF) 为基础,国际地球自转服务 (International Earth Rotation Service, IERS) 采用卫星激光测距 (satellite laser ranging, SLR)、甚长基线干涉测量 (very long baseline interferometry, VLBI)、全球定位系统 (global positioning system, GPS) 和星基多普勒轨道和无线电定位组合系统 (Doppler orbitography and radio positioning intergrated by satellite, DORIS) 四种技术的技术内综合后的台站坐标和地球定向参数 *EOP* 周解 (VLBI 技术为 24 h 观测解, 下简称日解) 作为建立 ITRF 时各个技术的输入数据, 结束了以往技术内站坐标长期用线性解作为输入的情况^[1]。自此以后, ITRF^[2,3] 或者其他机构, 如德国大地测量研究所-慕尼黑技术大学 (Deutsches Geodätisches Forschungs Institut-Technische Universität München, DGFI-TUM) 实现的地球参考架 DTRF (DGFI Terrestrial Reference Frame)^[4] 等, 均是利用技术内综合的站坐标和 *EOP* 周 (日) 解进行综合地球参考架和 *EOP* 确定 (通过对站坐标和 *EOP* 的 SINEX (solution in independent exchange format) 输入文件进行法方程的恢复和重构, 再对各技术法方程组进行迭加)。定向参数包括站坐标参数, 还包括 *EOP* 同时综合解算, 因此在综合地球参考架的基础上, ITRF 给出了与之自洽的高精度 *EOP*。

SLR, GPS, DORIS 和 VLBI 四种技术对应四个国际服务组织, 即国际激光测距服务 (International Laser Ranging Service, ILRS)^[5]、国际 GNSS 服务 (International GNSS Service, IGS)^[6]、国际 DORIS 服务 (International DORIS Service, IDS)^[7] 和国际 VLBI 服务 (International VLBI Service, IVS)^[8]。作为 IERS 的技术中心 (Technique Center, TC), 这四个组织会定期向 IERS 提供站坐标和 *EOP* 的技术内综合解序列。该解是采用一定的模型和策略, 对各技术内多家数据分析中心 (analysis center, AS) 的结果进行二次解算, 从而得到技术内综合 SINEX 周解 (或日解)^[9-12]。许多研究表明, 在每一种空间大地测量技术之内, 综合多家分析中心的结果, 能够提高最终的多技术综合地球参考架的稳健程度和长期稳定性^[13-17], 因此, 我们对国际上权威机构进行的技术内综合方法进行了介绍, 并对其综合后产品进行了精度分析和长期特性研究。

目前, IVS, IGS, ILRS 和 IDS 分别提供的四种技术内综合解均采用统一的文件格式——SINEX。它起初是由 IGS 为了发布其周解而开发的一种文件格式。鉴于该格式的模块化和灵活性等优点, ILRS, IVS, IDS 等机构也采用了该文件格式。经过不断地更新和增补, SINEX 已发展成四种空间技术通用的文件格式。SINEX 既能够提供参数的估值和相应的方差-协方差矩阵, 又能够提供法方程和参数的先验初值形式及其他重要信息, 还可以参与技术内综合的多个分析中心列表、观测值总数、自由度、单位权中误差、测站经纬度、测站相位中心偏差等的确定。

对不同空间大地测量技术内综合进行方法研究和结果的分析比较, 对于研究多种技术综合确定毫米级高精度地球参考架和与之自洽的地球定向参数具有重要作用, 因为各技术内综合解的精度和稳定度, 是决定多技术综合地球参考架精度的重要因素之一。随着中国卫星导航、深空探测、航空航天、大地测量、工程测量、气象和国土资源等领域迅速发展, 人们对自主高精度地球参考架建立和地球定向参数确定的需求越来越迫切, 因此, 研究多种空间大地测量技术内的一系列与地球参考架和地球定向参数确定相关的工作, 在科学研究、国民经济和国防安全等方面具有十分重要的意义。

2 ILRS, IVS, IGS, IDS 技术内综合 SINEX 解方法研究

技术内综合的目的是, 通过对空间大地测量各技术测站网不同分析中心解的综合来提高该技术全球测站的空间覆盖率、测站密度和可靠性, 以及通过野值剔除、方差估计等手段来提高测站坐标和 EOP 等参数的估计精度。GPS 测站分布众多, 且有全球测站和区域测站之分, 每个分析中心参与周解的测站既有重复的, 也有不同的。通过技术内综合, 我们能够将这些不同类型的测站统一到一个地球参考框架下, 并且提高全球 GPS 测站的坐标精度和稳定性。

2.1 ILRS 的 SLR 技术内综合方法

ILRS 下属各分析中心的 SINEX 周解主要包括松约束条件下的站坐标和 EOP 参数估值, 松约束即对测站坐标和测站速度分别给予精度 $\sigma \geq 1 \text{ m}$ 和 $\sigma_0 \geq 10 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$ 的不确定度约束^[18,19]。ILRS 的官方综合中心 (combination center, CC)——ASI (Italian Space Agency) 采用基于松约束解的“直接”综合策略^[20]。该方法的优点在于, 将作为输入的各 SINEX 解中的参考框架当作具有很大不确定度的随机噪声, 在综合时无需考虑各 SINEX 解之间的坐标转换关系, 也不需要加入任何外部的参考基准约束, 求得的综合解也是松约束解, 而且定期更新的新数据方便自动加入计算。

在经典的最小二乘平差理论中, 通常通过如下法方程求解待估参数 $\hat{\mathbf{X}}$:

$$\hat{\mathbf{X}} = \mathbf{X}^0 + \hat{\mathbf{x}}, \quad \mathbf{N} \cdot \hat{\mathbf{x}} = \mathbf{W} \quad (1)$$

其中, 法方程矩阵 \mathbf{N} 和右边项 \mathbf{W} 由观测向量、待估参数初值及两者之间的函数关系式计算而来, \mathbf{X}^0 为初值, $\hat{\mathbf{x}}$ 为初值改正数。

对于 SLR 技术各个分析中心的 SINEX 解而言, 已知第 i 个分析中心的估值向量 $\hat{\mathbf{X}}_i$, 验后单位权中误差 $\hat{\sigma}_i$ 和 $\hat{\mathbf{X}}_i$ 对应的完整方差-协方差矩阵 $\mathbf{C}_{X_i X_i}$, 则可得重构的法方程:

$$\mathbf{N}_i \cdot \hat{\mathbf{X}}_i = \mathbf{W}_i \quad (2)$$

其中, 法方程矩阵 \mathbf{N}_i 和右边项 \mathbf{W}_i 可以通过以下两式计算:

$$\mathbf{N}_i = \hat{\sigma}_i^2 \mathbf{C}_{X_i X_i}^{-1}, \quad (3)$$

$$\mathbf{W}_i = \mathbf{N}_i \cdot \hat{\mathbf{X}}_i = \hat{\sigma}_i^2 \mathbf{C}_{X_i X_i}^{-1} \cdot \hat{\mathbf{X}}_i \quad (4)$$

待求的综合解 $\hat{\mathbf{X}}_c$ 与第 i 个分析中心解 $\hat{\mathbf{X}}_i$ 之间的关系可以表示为:

$$\hat{\mathbf{X}}_i = \mathbf{A}_i \cdot \hat{\mathbf{X}}_c, \quad (5)$$

其中, 待求参数与已知参数之间的关系 (即设计矩阵) \mathbf{A}_i 为: 当 $\hat{\mathbf{X}}_c$ 中的第 m 个参数和 $\hat{\mathbf{X}}_i$ 中第 j 个参数一样时 (例如 $\hat{\mathbf{X}}_c$ 中的第 m 个参数是某测站的站坐标综合解, $\hat{\mathbf{X}}_i$ 中第 j 个参数也是相同测站的分析中心解), 两个参数之间的关系 $a_{jm} = 1$, 否则等于 0。

利用式 (5), 可以把式 (2) 中的法方程改写成待估参数为 $\hat{\mathbf{X}}_c$ 所对应的法方程, 即:

$$\mathbf{N}_{ic} \cdot \hat{\mathbf{X}}_c = \mathbf{W}_{ic}, \quad (6)$$

其中,

$$\mathbf{N}_{ic} = \mathbf{A}_i^T \mathbf{N}_i \mathbf{A}_i, \quad (7)$$

$$\mathbf{W}_{ic} = \mathbf{A}_i^T \mathbf{W}_i. \quad (8)$$

将式 (3) 和 (4) 分别代入式 (7) 和 (8), 随后再代入式 (6), 约去等式两边的 σ_i^2 , 即可得到由第 i 个分析中心解重构的关于综合解 $\hat{\mathbf{X}}_c$ 的法方程:

$$(\mathbf{A}_i^T \mathbf{C}_{X_i X_i}^{-1} \mathbf{A}_i) \cdot \hat{\mathbf{X}}_c = \mathbf{A}_i^T \mathbf{C}_{X_i X_i}^{-1} \hat{\mathbf{X}}_i. \quad (9)$$

尽管各分析中心的 SINEX 解提供了参数的方差-协方差矩阵, 但是由于各分析中心解算软件和策略存在差异, 其相对权重是待定的, 因此, 在综合时, 对 $\mathbf{C}_{X_i X_i}$ 赋予一个相对权因子 ε_i , 以调整各分析中心的权重。在引入相对权因子的同时, 将各分析中心推导的解如式 (9) 的法方程迭加起来, 即可得到综合的法方程组:

$$\sum_i [\mathbf{A}_i^T (\varepsilon_i \mathbf{C}_{X_i X_i})^{-1} \mathbf{A}_i] \cdot \hat{\mathbf{X}}_c = \sum_i [\mathbf{A}_i^T (\varepsilon_i \mathbf{C}_{X_i X_i})^{-1} \hat{\mathbf{X}}_i]. \quad (10)$$

最终可得出,

$$\hat{\mathbf{X}}_c = \left\{ \sum_i [\mathbf{A}_i^T (\varepsilon_i \mathbf{C}_{X_i X_i})^{-1} \mathbf{A}_i] \right\}^{-1} \cdot \sum_i [\mathbf{A}_i^T (\varepsilon_i \mathbf{C}_{X_i X_i})^{-1} \hat{\mathbf{X}}_i], \quad (11)$$

其中, 相对权因子初始值均设为 1。在综合的过程中, 通过迭代的形式来计算, 最终应满足如下收敛条件:

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_1^T (\varepsilon_1 \mathbf{C}_{X_1 X_1})^{-1} \mathbf{V}_1 = \cdots = \mathbf{V}_i^T (\varepsilon_i \mathbf{C}_{X_i X_i})^{-1} \mathbf{V}_i, \\ \chi^2 = \mathbf{V}_1^T \mathbf{C}_{X_1 X_1}^{-1} \mathbf{V}_1 + \cdots + \mathbf{V}_i^T \mathbf{C}_{X_i X_i}^{-1} \mathbf{V}_i = 1, \end{aligned} \quad (12)$$

其中, \mathbf{V}_i 为 $\hat{\mathbf{X}}_i$ 在综合过程中得到的残差。

ILRS 提供的 SINEX 综合解中, 对于各分析中心 SINEX 解中存在以下情况的测站被认定为野值, 会在解算过程中予以严格消除: (1) 观测数小于 10 个标准点 (normal point, NP) 的测站; (2) 将站坐标转换到最新的 ITRF 参考架下后, 站坐标的任一坐标轴方向分量的不确定度大于 0.8 m; (3) 转换到最新的 ITRF 参考架下后, 非核心站和核心站的站坐标与 ITRF 结果的差分别大于 0.5 m 和 0.3 m; (4) 验后残差大于 5σ 。

2.2 IVS 的 VLBI 技术内综合方法

IVS 下属的多家分析中心均提供了各自独立解算的基于 24 h 观测的无基准约束的法方程 SINEX 文件。文件详细地给出了法方程矩阵、右边项和参数初值等信息, 而且通常包含了观测时段中点历元的台站坐标、*EOP* 等待估参数。IVS 下属的综合中心以多个分析中心给出的 SINEX 文件作为“输入”, 继而对其进行综合。给出的综合后的“输出”依然是无约束的法方程组形式的 SINEX 文件, 其待估参数是综合后的台站坐标和 *EOP* 参数。VLBI 技术内的综合过程主要包含历元和初值转换、定权, 以及求解三部分的内容。

2.2.1 历元和初值转换

由于解算时的差异, 会导致各分析中心提供的法方程中, 相同参数的初值与参考历元有所不同, 因此, 在综合之前我们必须将其转换成一致的初值和参考历元, 并以此作为综合后法方程组中待估参数的初值和参考历元。

为保证后续公式推导的连贯性, 我们首先列出每个分析中心提供的法方程:

$$\mathbf{N} \cdot \hat{\mathbf{x}} = \mathbf{W} \quad , \quad (13)$$

其中,

$$\mathbf{N} = \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A} \quad , \quad \mathbf{W} = \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{l} \quad , \quad (14)$$

其中, \mathbf{l} 为观测值与相应的函数值之差, \mathbf{P} 为权矩阵。

无论是处理初值的转换, 还是参考历元的转换的情形, 新的参数改正数 $\Delta \tilde{\mathbf{x}}$ 与原来的改正数 $\hat{\mathbf{x}}$ 满足以下关系:

$$\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{B} \Delta \tilde{\mathbf{x}} + \mathbf{d}\mathbf{x} \quad . \quad (15)$$

其中, 对于处理历元转换的情形, $\mathbf{d}\mathbf{x} = 0$, \mathbf{B} 为实现历元转换的线性关系的系数矩阵。在 24 h 之内, 可将站坐标看作一个固定值, 此时 \mathbf{B} 中相应的元素 $b_{ij} = 1$ ($\hat{\mathbf{x}}$ 中的第 i 个参数和 $\Delta \tilde{\mathbf{x}}$ 中的第 j 个参数分别为历元转换前后的某站坐标分量)。其他情况下, $b_{ik} = 0$ ($k \neq j$)。对于初值转换的情形, 此时 $\mathbf{B} = \mathbf{I}$ 为单位矩阵, 而初值之间的差体现在 $\mathbf{d}\mathbf{x}$ 里。

将式 (15) 代入 (14) 中, 得到关于转换后的新法方程:

$$\tilde{\mathbf{N}} \Delta \tilde{\mathbf{x}} = \tilde{\mathbf{W}} \quad , \quad (16)$$

其中,

$$\tilde{\mathbf{N}} = \mathbf{B}^T \mathbf{N} \mathbf{B} \quad , \quad \tilde{\mathbf{W}} = \mathbf{B}^T (\mathbf{W} - \mathbf{N} \mathbf{d}\mathbf{x}) \quad . \quad (17)$$

2.2.2 定权

经过历元和初值转换, 各分析中心提供的无约束法方程已经转换到相同历元和初值的待估参数。将各分析中心法方程加权迭加, 即可生成无约束的综合法方程组。对各分析中心定权, 是通过迭代的方式对综合的无约束法方程组施加一定的基准定义约束条件, 即通过无整体旋转 (no-net-rotation, NNR) 和无整体平移 (no-net-translation, NNT) 约束条件^[21], 求出站坐标和 *EOP* 参数的解, 然后用方差分量估计法^[21]求得各分析中心的权重。当对坐标参数

的先验值改正数超过一定阈值 (水平方向为 5 cm, 垂直方向为 7.5 cm 或者超过 3σ), 以及 *EOP* 参数改正数超过 3σ 时, 我们将其剔除。此时约束后的参数解并不是最终解, 仅是用以迭代求权和剔除野值等。

2.2.3 求解

利用定权中迭代求得的各分析中心权重 α_i , 将各分析中心法方程迭加起来, 我们可以得到最终的无约束综合法方程组:

$$\sum_i (\alpha_i \tilde{\mathbf{N}}_i) \Delta \tilde{\mathbf{x}} = \sum_i (\alpha_i \tilde{\mathbf{W}}_i) \quad (18)$$

2.3 IGS 的 GPS 和 IDS 的 DORIS 技术内综合方法

在 2010 年 1 月之前, IGS 的 SINEX 综合周解由加拿大自然资源部 (Natural Resources Canada, NRCAN) 给出, 而后由 IGN (Institut Geographique National) 接手该项工作。尽管处理方法有了一些改变, 但是核心的基本原则依然不变: 基于最小二乘法, 对各分析中心提供的站坐标和 *EOP* 解及其完整方差-协方差阵进行综合。国际 DORIS 服务 IDS 的 SINEX 综合周解也由 IGN 完成, 且使用的是同样的软件, 即 CATREF (combination and analysis of terrestrial reference frame) 软件, 因此, 本小节将这两种技术的技术内综合方法合并进行介绍。

与 ILRS 和 IVS 不同的是, IGS 和 IDS 提供的是最小约束条件下的 SINEX 周解。而且最小约束是施加于各个分析中心解之上, 随后再进行技术内综合。以下简述最小约束公式的推导过程。

假设要将一组测站坐标 $\mathbf{X} = (x^1, y^1, z^1, x^2, \dots, z^N)^T$ 所隐含的 TRF 转换到另一种参考 TRF 基准定义之下, $\mathbf{X}_R = (x_R^1, y_R^1, z_R^1, x_R^2, \dots, z_R^N)^T$ 表示其参考坐标。两者之间的转换可以表达为:

$$\mathbf{X} = \mathbf{X}_R + \mathbf{G}\theta \quad (19)$$

其中, θ 为坐标 (基准) 转换的 14 参数, \mathbf{G} 为 14 参数转换的系数矩阵, 具体形式为:

$$\mathbf{G} = \left\{ \begin{array}{cccccccccccccccc} \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & 0 & 0 & x_0^i & 0 & z_0^i & -y_0^i & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & y_0^i & -z_0^i & 0 & x_0^i & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & z_0^i & y_0^i & -x_0^i & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & x_0^i & 0 & z_0^i & -y_0^i \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & y_0^i & -z_0^i & 0 & x_0^i \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & z_0^i & y_0^i & -x_0^i & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{array} \right\} \quad (20)$$

若以 $\Delta \mathbf{X}_R = \mathbf{X} - \mathbf{X}_R$ 作为观测值, \mathbf{v}_x 作为观测值的改正数, θ 的初值设为 0, 则可得关于其估值 $\hat{\theta}$ 的方程:

$$\Delta \mathbf{X}_R + \mathbf{v}_x = \mathbf{G}\hat{\theta} \quad (21)$$

再由最小二乘法理论可知:

$$\hat{\theta} = (\mathbf{G}^T \mathbf{G})^{-1} \mathbf{G}^T \Delta \mathbf{X}_R = \mathbf{B} \cdot \Delta \mathbf{X}_R \quad (22)$$

为了使 \mathbf{X} 和 \mathbf{X}_R 的参考基准一致, 转换参数或者其中一部分参数需要满足:

$$\hat{\theta} = \mathbf{B} \cdot \Delta \mathbf{X}_R = 0 \quad (23)$$

设 Σ_{θ} 为式 (21) 解算所对应的协方差矩阵, 再联合式 (23), 依据最小二乘法原理, 我们可得到法方程, 表示为:

$$\mathbf{B}^T \Sigma_{\theta}^{-1} \mathbf{B} \hat{\mathbf{X}}_c = \mathbf{B}^T \Sigma_{\theta}^{-1} \mathbf{B} (\mathbf{X}_R - \mathbf{X}_0) \quad (24)$$

其中, $\mathbf{X}_0 = (x_0^1, y_0^1, z_0^1, x_0^2, \dots, z_0^N)^T$ 。将式 (24) 代入到技术内综合 SINEX 解还原的法方程, 得到:

$$(\mathbf{N} + \mathbf{B}^T \Sigma_{\theta}^{-1} \mathbf{B}) \hat{\mathbf{X}}_c = \mathbf{W} + \mathbf{B}^T \Sigma_{\theta}^{-1} \mathbf{B} (\mathbf{X}_R - \mathbf{X}_0) \quad (25)$$

以上就是最小约束的公式。最小约束的意义是令两个坐标系之间的转换参数或者其中一部分参数能够满足式 (23)。对于卫星技术 SLR, GPS 和 DORIS, 式 (23) 被应用于 3 个旋转参数及其速率上; 对于 VLBI 技术, 该式被应用到 3 个平移参数和 3 个旋转参数及各自速率上。在本节的工作中, 由于 SINEX 周 (日) 解中并没有涉及到测站速率, 因此, 系数矩阵 \mathbf{G} 简化为前 7 行 7 列部分, 相应的, 式 (23) 也不再包含速率部分。

施加了最小约束后的各分析中心解, 再通过与其他外部坐标系 (如 ITRF 等) 进行比较并剔除野值后, 可采用式 (26) 的综合模型进行技术内的综合:

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{X}_s^i = \mathbf{X}_c^i + \mathbf{T}_k + \begin{pmatrix} D_k & -R_{3k} & R_{2k} \\ R_{3k} & D_k & -R_{1k} \\ -R_{2k} & R_{1k} & D_k \end{pmatrix} \mathbf{x}_c^i \\ x_s^p = x_c^p + R_{2k} \\ y_s^p = y_c^p + R_{1k} \\ \dot{x}_s^p = \dot{x}_c^p \\ \dot{y}_s^p = \dot{y}_c^p \\ LOD_s = LOD_c \end{array} \right. \quad (26)$$

式中, 对于任一一站 i , \mathbf{X}_s^i (在 t_s^i 时刻) 是第 s 个分析中心解中的站坐标 $(x_{1s}^i, x_{2s}^i, x_{3s}^i)^T$, 相应地, \mathbf{X}_c^i 则是同一台站在综合解中的站坐标 $(x_{1c}^i, x_{2c}^i, x_{3c}^i)^T$; \mathbf{T}_k 和 D_k 分别是该次周解暗含的参考架 k 与综合解的参考架之间进行转换的平移参数 $(T_{1k}, T_{2k}, T_{3k})^T$ 和尺度参数; R_{1k} 、 R_{2k} 和 R_{3k} 为两个参考架之间转换时在 3 个坐标轴方向上的旋转参数; x^p 和 y^p 分别代表极移参数的两个分量; \dot{x}^p 和 \dot{y}^p 分别代表极移参数两个分量的变化率; LOD 为日长参数。

与另外两种技术相似的是, 在进行技术内综合时, 必须对各个分析中心解进行重新加权, 因此, 每一个综合周解都是对各分析中心给出的协方差矩阵进行重新加权后综合的结果。为

了不影响各分析中心已经给出的内部精度, 通常采用给每个分析中心提供的方差-协方差矩阵增加一个加权因子 σ_i 的方法。这个加权因子可采用方差分量估计法得到:

$$\sigma_i = \frac{\mathbf{v}_i^T \mathbf{P}_i \mathbf{v}_i}{n_i - \text{tr}(\mathbf{N}^{-1} \mathbf{A}_i^T \mathbf{P}_i \mathbf{A}_i)}, \quad (27)$$

其中, $\mathbf{v}_i^T \mathbf{P}_i \mathbf{v}_i$ 为第 i 个分析中心的加权残差平方和, n_i 为其观测值数量, \mathbf{N} 为技术内综合的法方程, \mathbf{A}_i 为第 i 个分析中心的误差方程中未知数的系数矩阵, \mathbf{P}_i 为其上一次迭代时第 i 个分析中心的权矩阵, 其原始值来自 SINEX 解中给出的协方差矩阵对应的权矩阵, $\text{tr}(\mathbf{N}^{-1} \mathbf{A}_i^T \mathbf{P}_i \mathbf{A}_i)$ 为第 i 个分析中心的必要观测数^[22]。

3 技术内综合解精度分析

本文对截止到 2015 年, IGS, ILRS, IDS 和 IVS 分别提供的 GPS, SLR, DORIS 和 VLBI 四种技术内综合 SINEX 周(日)解中的站坐标和 EOP 参数的精度进行了评估, 并且对各技术 SINEX 解中的参考架基准的长期特性进行了分析。对四种技术内综合解精度进行比较和分析, 我们在利用以上技术内综合解进行多种技术间综合时, 能更充分吸收各个技术的优点, 弥补单一技术的缺点, 以获得最优的地球参考架和地球定向参数结果。

我们总结了本文所分析的四种技术内综合 SINEX 解的主要特点, 如表 1 所示。其中, SLR, GPS, DORIS 三种技术的 SINEX 解提供了测站坐标周解、 EOP 日解, 以及对应的完整方差-协方差矩阵, 而 VLBI 技术内综合解为法方程形式的日解。另外 VLBI 技术提供的日解是基于有观测发生的日期, 因此并不是等间隔的。

表 1 IGS, IVS, ILRS 及 IDS 提供的技术内综合周(日)解的主要特点

观测技术	技术内综合的分析中心	为技术内综合提供输入的分析中心	数据年份	解的时间间隔	解的形式	约束方法
SLR	ASI, DGFI (备用)	ASI, DGFI, GFZ, JCET, NSGF 等	1983—1992, 1993—2015	每 14 d 1 解、周解	站坐标周解和 EOP 日解	松约束
GPS	NRCan (2010 年 1 月以前)、IGN (2010 年 1 月以后)	CODE, ESOC, GFZ, JPL, NOAA, NRCan 等	1997—2015	周解	站坐标周解和 EOP 日解	最小约束
VLBI	GIUB	BKG, DGFI, GSFC, SHAO 等	1980—2015	24 h 观测的日解	站坐标和 EOP 的法方程	无约束
DORIS	IGN	IGN, LCA, ESA, GAU, GOP 等	1993—2015	周解	站坐标周解和 EOP 日解	最小约束

3.1 原点和尺度因子分析

为了便于分析和比较不同技术对地球参考架原点和尺度的观测精度, 我们利用上述方法对 SLR 和 VLBI 技术内综合解引入最小约束, 使其与 GPS 和 DORIS 技术原本提供的技术内综合解在约束方法上保持一致。本文引入最小约束, 不会改变技术内综合解中原本保留的基准信息, 包括卫星技术的地心信息和所有技术的尺度因子信息。在保证约束方法一致以后, 我们将各技术的综合解与 ITRF2014 做 7 参数变换。由于各技术采用了最小约束, 即定向与 ITRF 基本保持一致, 因此旋转参数没有比较价值, 需要比较的是各技术相对于 ITRF 的平移和尺度参数, 结果如图 1—3 所示。可以看出, SLR 技术的平移参数时间跨度最长, 且没有明显的偏差或者漂移。GPS 技术的三个方向平移参数虽然弥散度最低, 但是在 X 方向和 Y 方向存在长期的线性变化, 在 Z 方向存在跳变。这里的系统差和跳变可能与 GPS 轨道误差和 GPS 众多台站发生非线性跳变等有关, 这也是 GPS 不适合确定参考架原点的原因。DORIS 技术的平移参数也存在不稳定性, 与 Altamimi 和 Collilieux^[23] 针对 DORIS 平移参数的分析结果相符合。这可能是模型误差造成的, 如太阳辐射压^[24]。以上结果证实, 采用这些技术内综合 SINEX 解作为多技术综合的输入数据时, SLR 技术观测确定的地心最适合作为长期稳定的地球参考架原点。

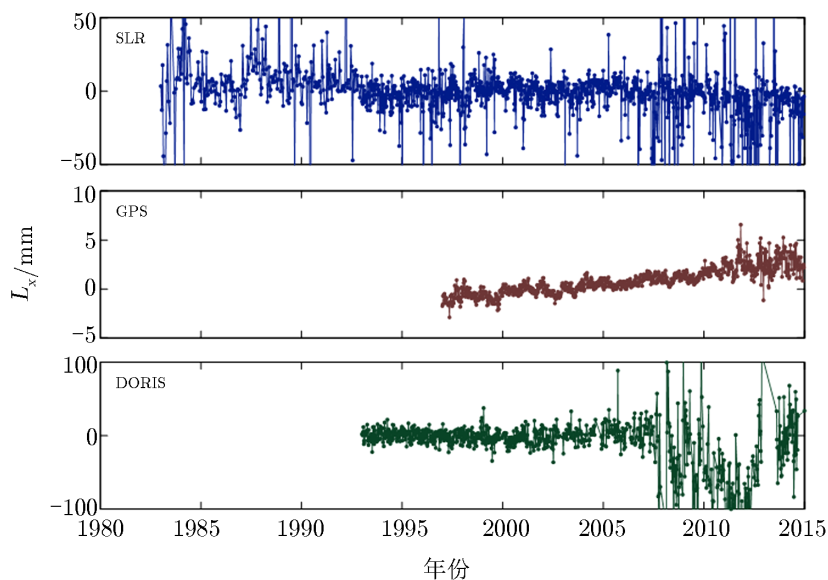


图 1 SLR, GPS 和 DORIS 三种技术内综合周解相对于 ITRF2014 的 X 方向平移参数时间序列

图 4 为四种技术的技术内综合周解 (VLBI 技术为 24 h 观测解) 相对于 ITRF2014 尺度因子的时间序列。由图 4 可知, SLR 技术和 VLBI 技术尺度因子无明显的偏移, 且数据覆盖时间长; GPS 技术因接收机天线和卫星天线的相位变化等造成 GPS 技术无法给出精确且长期稳定的尺度因子, 有台阶状跳变; DORIS 技术也存在不稳定性, 可能与运行的卫星数和所采取模型有关。

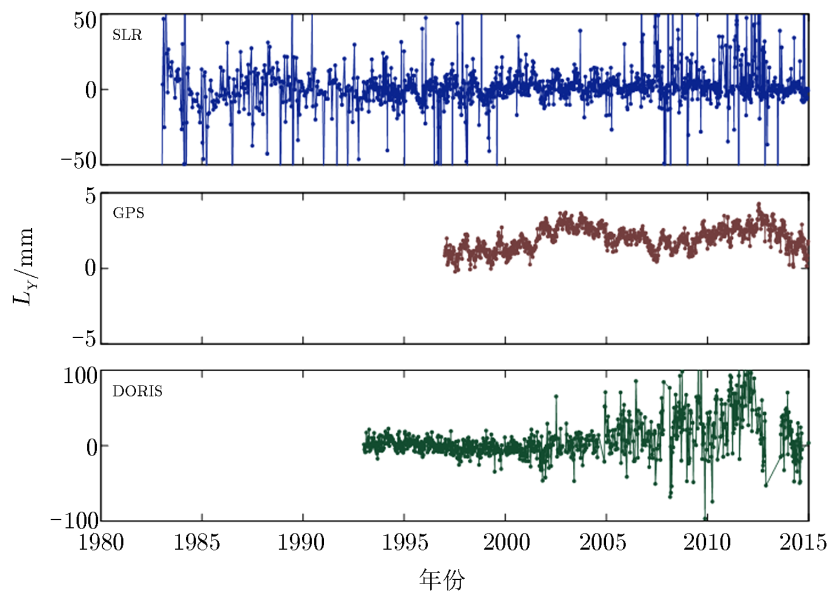


图 2 SLR, GPS 和 DORIS 三种技术内综合周解相对于 ITRF2014 的 Y 方向平移参数时间序列

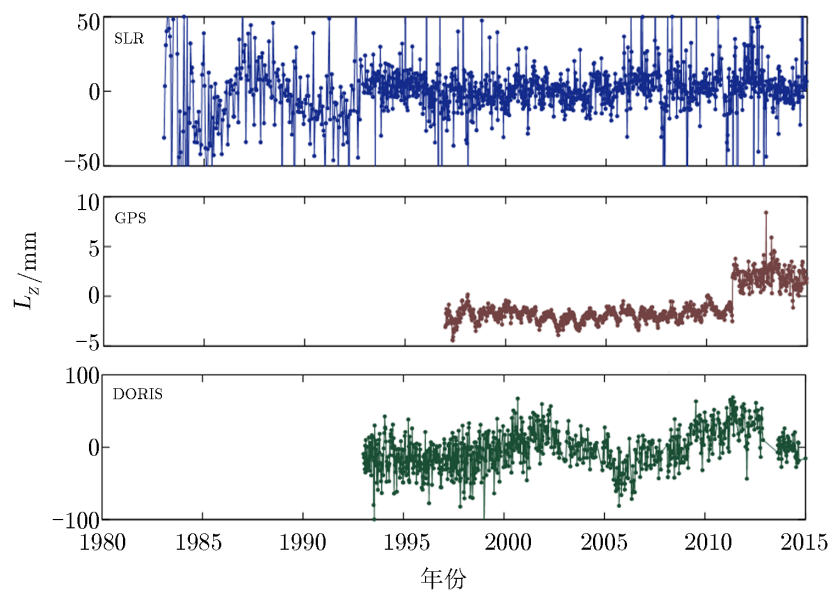


图 3 SLR, GPS 和 DORIS 三种技术内综合周解相对于 ITRF2014 的 Z 方向平移参数时间序列

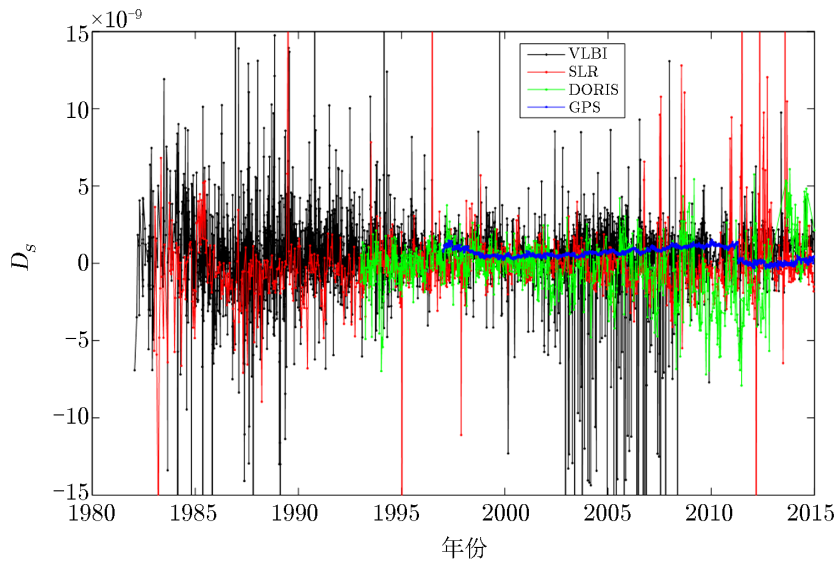


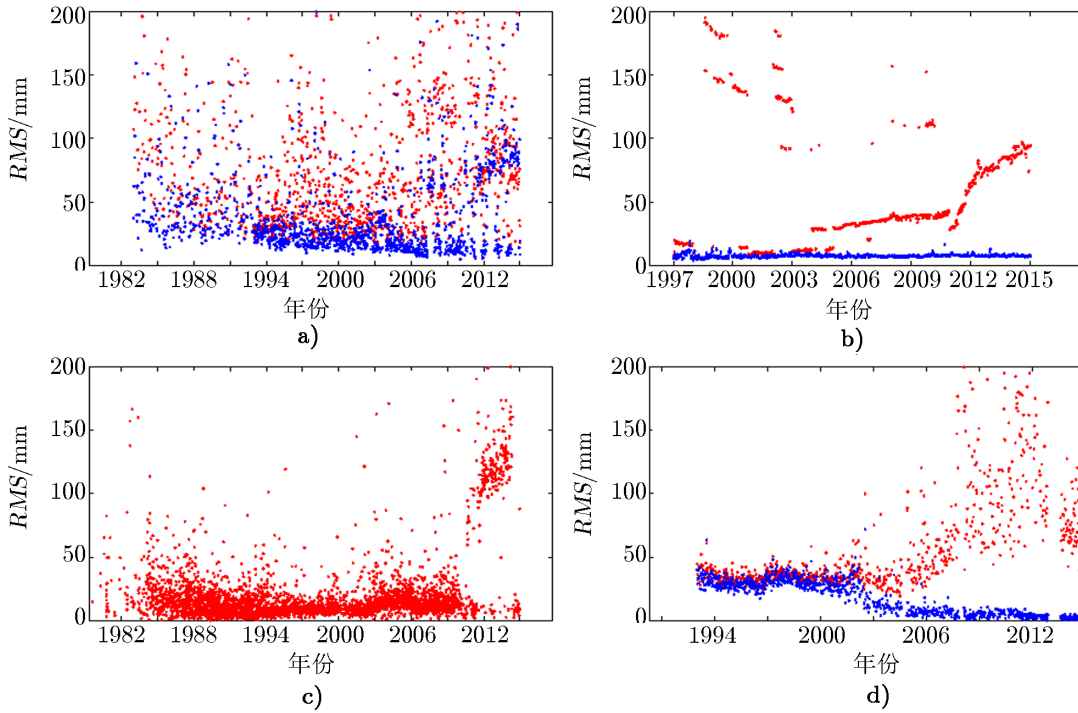
图 4 四种技术内综合周/日解相对于 ITRF2014 的尺度因子时间序列

3.2 台站坐标残差分析

图 5 给出四种技术内综合周(日)解(VLBI 和 SLR 引入最小约束, GPS 和 DORIS 保持原有的最小约束解)转换到 ITRF2014 参考架下时站坐标的残差均方根(root mean square, RMS)统计结果,其中,红色代表每个周解中所有参与解算测站的统计结果,蓝色只表示核心站的统计结果。核心站是经过慎重筛选后,用来参与实现多技术综合地球参考架基准定义的台站^[25]。由于 VLBI 每次日解中参与的测站数量十分有限,所有测站都十分重要,因此并没有区分出核心站,所以没有蓝色部分。由图 5 可以看出, GPS, DORIS 和 SLR 三种技术的核心站精度高且稳定,非核心站则会存在着较大误差,这也证明了在多种技术综合中,仅由谨慎挑选的核心站来参与确定地球参考架基准的重要性和必要性。图 5 还给出四种技术的站坐标 SINEX 周(日)解转换到 ITRF2014 的残差 RMS 统计结果: GPS 台站精度最高,尤其是其核心站; SLR 核心站与非核心站之间精度差异较大,非核心站中部分测站由于其观测质量低和观测稳定度差等,导致其精度过低,有些核心站也因观测台站观测质量、数量的精度下降而有所变动,这也是为什么 ILRS 核心站会随时间有所调整;各技术所有测站的总体 RMS (红色)在最近若干年反而有明显的上升,并且与核心站统计结果(蓝色)的差异较大,其原因有待进一步探讨。

3.3 EOP 精度分析

为了分析 SINEX 解中 EOP 结果的精度,我们对各技术内综合的 SINEX 解作了长期解分析,求得单技术地球参考架长期解和与之对应的 EOP 时间序列。本文所述的某一技术的 TRF 线性长期解,是通过拟合该技术的数十年 SINEX 周(日)解来实现的线性地球参考架 L 。解算出的参数包括全球分布测站在参考历元 J2005.0 的测站坐标及其线性速率,以及与该参考架自洽的 EOP 时间序列,因此,待求的未知数为: $\mathbf{X}_L, x_L^p, y_L^p, LOD_L, (UT1 - UTC)_L$ 。



注: a) SLR; b) GPS; c) VLBI; d) DORIS。红色表示周解内所有参与 ITRF 的测站统计 RMS; 蓝色表示仅统计核心站 RMS。

图 5 四种技术内综合周(日)解相对于 ITRF2014 的残差 RMS 统计时间序列

\mathbf{X}_L 为该观测技术应用于全球的测站在参考时刻 t_0 (J2005.0) 时的三维坐标和线性速度, 假设该技术内一共有 N 个测站, 则 \mathbf{X}_L 的具体形式为:

$$\mathbf{X}_L = (x_L^1(t_0), y_L^1(t_0), z_L^1(t_0), \dot{x}_L^1, \dot{y}_L^1, \dot{z}_L^1, \dots, x_L^N(t_0), y_L^N(t_0), z_L^N(t_0), \dot{x}_L^N, \dot{y}_L^N, \dot{z}_L^N)^T.$$

$x_L^p, y_L^p, LOD_L, (UT1 - UTC)_L$ 表示与参考架 L 同时综合的极移 x 序列、 y 序列、日长 LOD 时间序列以及世界时与协调世界时之差序列, 只有 VLBI 技术解算 $UT1 - UTC$ 。另外, 我们假设待求的 EOP 与输入的 EOP 是在同一参考时刻, 以避免时刻转换带来的误差。经过众多输入文件的累积, 待求的 EOP 时间序列涵盖了所有输入文件中给出的 EOP 的参考时刻, 假设 EOP 时间序列为 $t_L^1, t_L^2, \dots, t_L^m$, 那么 x_L^p 的具体形式为 $(x_L^p(t_L^1), x_L^p(t_L^2), \dots, x_L^p(t_L^m))^T$ 。 $y_L^p, LOD_L, (UT1 - UTC)_L$ 与之类似。

对某一技术而言, 若一共有 S 个 SINEX 周(日)解, 那么已知参数包括: $\mathbf{X}_s, x_s^p, y_s^p, LOD_s, (UT1 - UTC)_s$ ($s = 1, 2, \dots, S$), 其中, \mathbf{X}_s 为周解中提供的各个测站在时刻 t_s 的坐标周(日)解, 对于三种卫星技术而言, 其与前一个或者后一个周解中坐标的参考时刻之间通常相差 7 d (SLR 技术在 1993 年之前是相差 14 d, 而非 7 d); VLBI 为日解, 时间间隔不等。对于 SLR, GPS 和 DORIS 技术而言, 一般一个周解包含了连续 7 d 在每天同一时刻的 EOP , 可以表示为: $(x_s^p(t_1), x_s^p(t_2), \dots, x_s^p(t_7))^T, (y_s^p(t_1), y_s^p(t_2), \dots, y_s^p(t_7))^T,$

$(LOD_s(t_1), LOD_s(t_2), \dots, LOD_s(t_7))^T$ 。

$UT1 - UTC$ 解只有 VLBI 技术能够提供, 除此以外, SINEX 解还提供了已知的上述观测向量的协方差矩阵 $D_{\mathbf{X}\mathbf{X}}$ (VLBI 提供的是参数初值、法方程系数矩阵和右边项)。

观测方程的建立主要涉及两个基本模型: 一个是作为输入的技术内周解中所暗含的参考架 s 与待估的长期线性参考架 L 之间的参考架转换模型, 即 7 参数变换模型; 另一个则是长期线性参考架的坐标参数模型。最终的观测方程为:

$$\left\{ \begin{array}{l} \vdots \\ x_s^i(t^j) = x_L^i(t^0) + (t^j - t^0) \cdot \dot{x}_L^i + T_s^1 + D_s \cdot x_L^i(t^0) + (-R_s^3) \cdot y_L^i(t^0) + R_s^2 \cdot z_L^i(t^0) \\ y_s^i(t^j) = y_L^i(t^0) + (t^j - t^0) \cdot \dot{y}_L^i + T_s^2 + D_s \cdot y_L^i(t^0) + (-R_s^1) \cdot z_L^i(t^0) + R_s^3 \cdot x_L^i(t^0) \\ z_s^i(t^j) = z_L^i(t^0) + (t^j - t^0) \cdot \dot{z}_L^i + T_s^3 + D_s \cdot z_L^i(t^0) + R_s^1 \cdot y_L^i(t^0) + (-R_s^2)_s \cdot x_L^i(t^0) \\ \vdots \\ x_s^p = x_L^p + R_s^2 \\ y_s^p = y_L^p + R_s^1 \\ UT_s = UT_L - \frac{1}{f} R_s^3 \\ LOD_s = LOD_L \end{array} \right. \quad (28)$$

式中, $x_s^i(t^j)$, $y_s^i(t^j)$, $z_s^i(t^j)$ 为第 s 个 SINEX 周 (日) 解中的第 i 个测站在历元 t^j 时刻的三维站坐标; x_L^i , y_L^i , z_L^i 和 \dot{x}_L^i , \dot{y}_L^i , \dot{z}_L^i 为该测站在长期线性参考架 L 下的参考历元 t^0 时的三维坐标及其线性速率; T_s^1 , T_s^2 , T_s^3 为周解的坐标转换的平移参数; D_s 表示尺度参数; R_s^1 , R_s^2 , R_s^3 为旋转参数; x_s^p , y_s^p 为 SINEX 周解中提供的极移参数两个分量; x_L^p 和 y_L^p 则是转换到参考架 L 下的极移参数两个分量, 历元不变; LOD_s 和 LOD_L 分别是周解和长期解里的日长参数值; UT 表示 $UT1 - UTC$; $f = 1.002737909350795$, 是世界时与恒星时之间的转换系数。

根据最小二乘法定律, 再结合式 (28), 我们可建立以 SINEX 周解作为“伪观测值”的法方程组。将所有的 SINEX 周解建立的法方程组迭加起来, 即可得到累积数十年数据的大型法方程组。但是, 从 SINEX 周 (日) 解累积得到的法方程组还不能直接求解, 因为该方程组缺少长期解的参考框架的定义。我们在计算中采用两种约束方法结合的方式来实现所定义的地球参考架: 即最小约束和内在约束。对于技术本身无法准确确定的基准要素, 如四种技术的定向、VLBI 技术的原点、GPS 和 DORIS 技术的原点和尺度 (图 1 至 4 已列出 GPS 和 DORIS 技术 SINEX 解中的原点和尺度上的漂移和偏差) 等, 采用最小约束 (GPS 和 DORIS 只需要保有其原有的最小约束), 详见 2.3 节中相关描述; 对于技术本身暗含的精确信息的要素, 如 SLR 技术的原点和尺度, 以及 VLBI 技术的尺度, 则采用内在约束的方法^[2]。最小约束是以 ITRF2008 作为参照的地球参考架。上述介绍的参考架基准定义的约束均以约束方程的形式, 迭加到原本的法方程组中, 随后即可解算法方程, 得到各个技术的参考架长期线性解。该解不仅包括全球台站的三维坐标和速率, 也包含与之自洽的高精度地球定向参数, 其详细介绍见参考文献 [25]。

本文结果与 IERS C04 较差 RMS 统计结果的对比如表 2 所示。在计算中, 为了使参考

历元一致, 采用拉格朗日插值方法对 C04 结果进行了插值, 然后换算到同一历元再进行比对。DGFI^[4] 结果评估详情参见文献 [26], 其中的加权方法是 *EOP* 参数的验后标准差的平方的倒数。如表 2 所示, 在数据完全一样的情况下, 本文给出的结果与 DGFI 对 GPS, VLBI 和 SLR 三种技术解算结果比较接近, 而与 DORIS 技术的解算结果相差较大, 还有待进一步提高。另外, 两家机构各自解算结果的对比, 反映了不同技术 SINEX 综合周 (日) 解估计 *EOP* 的精度水平。

表 2 本文结果和 DGFI 结果与 IERS C04 较差后均方根的对比

EOP	观测技术	加权均方根	
		DGFI	本文结果
极移 <i>X</i> 分量/($''$)	GPS	0.063	0.061
	VLBI	0.163	0.205
	SLR	0.205	0.291
	DORIS	0.234	0.850
极移 <i>Y</i> 分量/($''$)	GPS	0.055	0.071
	VLBI	0.232	0.184
	SLR	0.204	0.242
	DORIS	0.357	0.853
<i>UT1 - UTC</i> /ms	VLBI	0.013	0.017
<i>LOD</i> /(ms·d ⁻¹)	VLBI	0.027	0.048
	GPS	0.022	0.007
	SLR	—	0.042

4 结 论

本文对 ILRS, IGS, IVS 和 IDS 分别提供的不同空间大地测量技术内综合解算台站坐标和 *EOP* 的方法进行了研究与对比, 主要介绍技术内综合模型的建立、参考架基准约束方法、相对权因子估计方法等。此外, 对截止到 2015 年以前的各技术内综合解所有数据进行了精度评估和参考架基准参数的长期特性分析, 结果发现 SLR 技术内 SINEX 综合解相对于 ITRF2014 的平移参数时间跨度最长, 且没有明显的偏差或者漂移; GPS 技术的三个方向平移参数虽然弥散度最低, 但是在 *X* 方向和 *Y* 方向上存在长期的线性变化, 在 *Z* 方向上存在跳变, 其原因可能是因受到轨道模型误差和 GPS 众多台站发生非线性跳变等影响, 因此 GPS 技术不适合用来确定地球参考架原点; 对于 DORIS 技术也得出类似结果。这些说明了 ITRF2014 选择 SLR 定义的地心作为参考架原点是合理的。另外, 在台站坐标精度方面, 通过比较得出, 在实现地球参考框架基准定义时, 核心站和非核心站的区分非常重要。尽管 GPS 台站的形式精度最高, 但是却由于常常发生跳变, 在长期稳定性上有所欠缺。另外, GPS 台站坐标精度高, 且台站在空间分布和布站密度上都拥有绝对优势, 因此 GPS 的 *EOP* 精度要高于其他三种技术。这些研究结果为多种技术综合确定全球地球参考架服务提供了技术支持。

参考文献:

- [1] Altamimi Z, Collilieux X, Legrand J, et al. JGR, 2007, 112(B9): 83
- [2] Altamimi Z, Collilieux X, Métivier L. Geodesy, 2011, 85(8): 457
- [3] Altamimi Z, Rebischung P, Métivier L, et al. IERS, 2017, 38: 76
- [4] Seitz M, Angermann D, Bloßfeld M, et al. Geodesy, 2012, 86(12): 1097
- [5] Pearlman M R, Degnan J J, Bosworth J M. Adv, 2002, 30(2): 135
- [6] Dow J M, Neilan R E, Rizos C. Geodesy, 2009, 83(3): 191
- [7] Willis P, Fagard H, Ferrage P, et al. Adv, 2010, 45(12): 1408
- [8] Schuh H, Behrend D. J Geodynamics, 2012, 61: 68
- [9] Böckmann S, Artz T, Nothnagel A, et al. JGR, 2010, 115(B4): 2500
- [10] Pavlis E C, Luceri V, Sciarretta C, et al. Egu General Assembly, 2012, 14: 10909
- [11] Ferland R, Piraszewski M. Geodesy, 2009, 83(3): 385
- [12] Valette J J, Lemoine F G, Ferrage P, et al. Adv, 2010, 46(12): 1614
- [13] Beutler G, Kouba J, Springer T. Geodesy, 1995, 69(4): 200
- [14] Kouba J, Mireault Y. IGS Annual Report, 1996: 55
- [15] Pearlman M, Noll C, Dunn P, et al. J Geodynamics, 2005, 40: 470
- [16] Gambis D. Geodesy, 2006, 80(8): 649
- [17] Böckmann S, Artz T, Nothnagel A. Geodesy, 2010, 84(3): 201
- [18] Altamimi Z, Boucher C, Sillard P. Adv, 2002, 30(2): 175
- [19] 邹蓉. 博士论文. 武汉: 武汉大学, 2009: 29
- [20] Davies P, Blewitt G. JGR, 2000, 105(B5): 11083
- [21] Vennebusch M, Böckmann S, Nothnagel A. J. Geodesy, 2007, 81: 553
- [22] Bähr H, Altamimi Z, Heck B. Schriftenreihe des Studiengangs Geodäsie und Geoinformatik. Karlsruhe: Universität Karlsruhe, 2007
- [23] Altamimi Z, Collilieux X. Adv, 2010, 45(12): 1500
- [24] Gobinddass M L, Willis P, Viron O D, et al. Geodesy, 2009, 83(9): 849
- [25] He B, Wang X Y, Hu X G, et al. RAA, 2017, 17(9): 1
- [26] ftp://ftp.dgfi.badw.de/pub/DTRF2008, 2018

Method Research and Accuracy Analysis on the Intra-Technique Combination from Various Space Geodetic Techniques

HE Bing^{1,2,3,4}, WANG Xiao-ya^{1,2,3}, WANG Jia-song³

(1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China; 2. School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. State Key Laboratory of Aerospace Dynamics, Xi'an 710043, China; 4. Zhejiang University of Water Resources and Electric Power, Hangzhou 310018, China)

Abstract: In this paper, we described in detail the intra-technique combination methods of international space geodesy technology services such as ILRS, IVS, IGS and IDS for SLR,

VLBI, GPS and DORIS respectively. The combination is based on the SINEX weekly solutions or 24 h session solution(for VLBI) about the station positions and the earth orientation parameters(EOPs) from various analysis centers. The method mainly focused on the establishment of the intra-technique combination model, constraint problems of reference frame datum definition, the re-weighting of different analysis center solutions and so on. Then, the accuracy of the station coordinates and EOPs of the intra-technique combination solutions from ILRS, IVS, IGS and IDS were evaluated and the long-term characteristic of the reference frame datum definition was analyzed. From the perspective of datum definition, the translation of SLR intra-technique combined SINEX series w.r.t the ITRF2014 has no significant bias and drift with the longest time-span; the series of the GPS intra-technique combined weekly solutions have the smallest scatters in the translation w.r.t. the ITRF2014 but have drifts in X and Y translation and jumps in Z translation; it is similar for the DORIS intra-technique combined solutions as that of GPS. From the perspective of the station coordinates' accuracy, the distinguishment of the core and non-core stations is of great importance. Moreover, due to the good global distribution of GPS stations, the EOP from GPS is more accurate than that from other techniques.

Key words: space geodetic techniques; terrestrial reference frame; earth orientation parameters; intra-technique combination