



引文格式:马一方,周晓慧,杨艺林.顾及测站非线性变化的GPS地球参考框架建立与比较[J].武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(9):1435-1443.DOI:10.13203/j.whugis20210205

Citation: MA Yifang, ZHOU Xiaohui, YANG Yilin. Realization and Comparison of Different Strategies Applied for GPS Terrestrial Reference Frame Modeling Nonlinear Station Motions[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2023, 48(9):1435-1443.DOI:10.13203/j.whugis20210205

顾及测站非线性变化的GPS地球参考框架建立与比较

马一方¹ 周晓慧² 杨艺林²

¹ 北京市地震局,北京,100080

² 武汉大学测绘学院,湖北 武汉,430079

摘要:国际地球参考框架最新版本已将测站非线性变化纳入模型之中,然而目前最优的顾及测站非线性变化的地球参考框架建立方式仍有待深入研究。首先重新处理了全球分布的全球定位系统测站2004—2016年的观测数据,获取了自洽精确的基础数据;然后改正了13个CMONOC(crustal movement observation network of China)基准站的震后形变,分别建立了基于函数模型的FREQ2016以及顾及环境负载改正的GFZ2016和EOST2016地球参考框架;最后通过对比分析模型拟合度、速度场和周期性信号,探讨了目前最优的顾及测站非线性变化的地球参考框架建立方式。结果表明,FREQ2016的验后残差WRMS(weighted root mean square)平均值最小;FREQ2016测站季节性信号更为显著,尤其是半年信号;三者的水平速度差异可以忽略(<0.08 mm/a),个别测站垂向速度差异较大,最大可达1.3 mm/a,FREQ2016水平速度场的形式误差减小约10%。因此,目前基于函数模型的建立方式优于顾及环境负载改正的建立方式。

关键词:地球参考框架;全球定位系统;环境负载;非线性变化

中图分类号:P228

文献标识码:A

收稿日期:2021-04-26

DOI: 10.13203/j.whugis20210205

文章编号:1671-8860(2023)09-1435-09

Realization and Comparison of Different Strategies Applied for GPS Terrestrial Reference Frame Modeling Nonlinear Station Motions

MA Yifang¹ ZHOU Xiaohui² YANG Yilin²

¹ Beijing Earthquake Agency, Beijing 100080, China

² School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: Objectives: Latest release of international terrestrial reference frame has been generated with an enhanced modeling of nonlinear station motions, while more investigations on the strategies applied for the terrestrial reference frame modeling nonlinear station motions still needed. **Methods:** A global GPS (global positioning system) network has been reprocessed, using the latest GNSS (global navigation satellite system) data processing models and an integrated strategy, and then accurate and consistent input data are obtained; the post-seismic deformation models of 13 CMONOC (crustal movement observation network of China) stations are established and used as the input data, and FREQ2016 based on the function model, and GFZ2016 and EOST2016 considering the environmental loading correction are realized; these GPS terrestrial reference frames with different models are compared in terms of the goodness for fit, velocities and seasonal signals, and then the optimal model is explored. **Results:** The results show that the weighted root mean square averages of the postfit residuals of FREQ2016 are smaller than those of GFZ2016 and of

基金项目:国家重点研发计划(2018YFC1503600);国家自然科学基金(41874007);中国地震局震情跟踪定向任务(2021010201);湖北省自然科学基金(2019CFB468)。

第一作者:马一方,博士,高级工程师,主要从事GNSS数据处理研究。csumyf2008@126.com

通讯作者:周晓慧,博士,副教授。xhzhou@sgg.whu.edu.cn

EOST2016; FREQ2016 shows more significant seasonal signals, especially for semi-annual signals; the horizontal velocity field differences of these three are almost negligible (<0.08 mm/a), and the large vertical velocity differences, for some stations, reach 1.3 mm/a; the reduction of FREQ2016 horizontal velocity formal errors is about 10%. **Conclusions:** This paper suggests that the strategy based on the function model is better than that of considering the environmental loading correction.

Key words: terrestrial reference frame; global positioning system; environmental loading; nonlinear station motion

长期稳定精确的地球参考框架(terrestrial reference frame, TRF)是大地测量学等领域中用于描述位置信息及其变化的基石^[1]。在 TRF 建立过程中,测站坐标时间序列的误差改正模型并不包含环境负载、热膨胀等地球物理效应引起的测站非线性位移^[2-4]。然而,观测网的公共非线性运动会混叠至平移、尺度和旋转参数,并且受到其几何分布的影响^[5-7];此外,非线性运动会通过框架点传递到未知点,影响未知点的坐标

精度^[8-10]。

国际地球参考系统(international terrestrial reference system, ITRS)的 3 个最新实现版本(ITRF2014、DTRF2014 和 JTRF2014),将测站的非线性变化纳入测站的运动模型中,如表 1 所示。表 1 中,EOPs 为地球定向参数(earth orientation parameters),PSD 为震后形变(post-seismic deformations),CATREF 表示 combination and analysis of terrestrial reference frames。

表 1 ITRF2014、DTRF2014 和 JTRF2014 总结

Tab. 1 Summary on ITRF2014, DTRF2014 and JTRF2014

版本	ITRF2014	DTRF2014	JTRF2014
发布机构	法国国家地理研究所	德国大地测量研究所	美国喷气推进实验室
软件	CATREF	DOGS-CS	CATREF+Kalman
组合算法	参数层面	法方程层面	参数层面
发布的主要产品	测站坐标(J2010.0)+速度(J2010.0)+PSD 模型+周年信号+EOPs	测站坐标(J2010.0)+速度(J2010.0)+非潮 汐大气负载和水文负载改正+EOPs	测站坐标(每周)+EOPs

目前,顾及测站非线性变化的 TRF 建立方式主要包括:(1)基于分段线性函数模型新增正、余弦函数,用以描述测站位置的周期性信号^[11-12]。本文将这种方式称为基于函数模型的 TRF 建立方式,ITRF2014 主要采用该方式并改正了震中附近测站的震后形变。(2)在坐标层面修正环境负载、地震等影响,并将修正后的结果作为输入数据,然后利用分段线性函数建立 TRF^[13]。本文将这种方式称为顾及环境负载改正的 TRF 建立方式,DTRF2014 主要采用该方式,修正了非潮汐大气负载(non-tidal atmospheric loading, NTAL)和水文负载(hydrological loading, HYDL)的影响,但并未考虑非潮汐海洋负载(non-tidal oceanic loading, NTOL)及震后形变。(3)基于短期测站坐标时间序列,如跨度为 1 周的序列,利用卡尔曼滤波、均方根信息滤波等方法建立历元参考框架^[14-18],JTRF2014 采用该方式。

尽管 ITRF2014 发布前,评估了 NTAL 对上述(1)和(2)两种方式建立的 TRFs 的影响,验后残差结果表明,基于函数模型的 TRF 优于顾及环境负载改正的结果^[12]。然而,环境负载改正未考

虑 HYDL 以及 NTOL 引起的地表形变,因此,上述两种 TRF 建立方式仍有待进一步比较。与 ITRF2014 和 DTRF2014 相比,JTRF2014 获取的坐标虽然能够更加真实地反映测站运动,但是在估算地球旋转参数和稳定性等方面表现较差^[19-20]。此外,非参数方法如主成分分析、奇异谱分析等^[21-25]能够较好提取测站坐标时间序列中的非线性信号,但较难有效应用于目前 TRF 的建立中^[26]。

本文统一重新处理中国区域基准站和全球分布的 IGS(international GNSS service)基准站数据,分别建立基于函数模型和顾及环境负载(综合 NTAL、HYDL 和 NTOL)改正的 GPS TRFs,探讨目前最优的顾及测站非线性变化的长期 TRF 建立方式。

1 GPS 数据处理

本文利用 PANDA(positioning and navigation data analyst)软件统一处理全球均匀分布的 188 个 GPS 测站观测数据,测站空间分布见图 1。

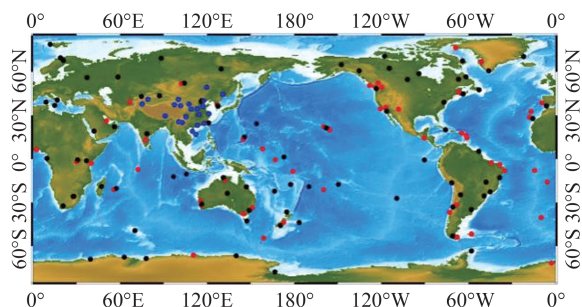


图 1 GPS 测站空间分布

Fig. 1 Location of GPS Stations

图 1 中的测站包括 26 个中国大陆构造环境监测网络 (crustal movement observation network of China, CMONOC) 基准站 (蓝色圆点) 和 162 个 IGS 基准站 (黑色圆点代表 IGS 测站后续建立参考框架的参考站, 红色代表参与解算的 IGS 测站)。IGS 第二次重新处理结果表明, 自 2004 年开始, 全球 GPS 观测网逐渐成熟完善^[27], 因此本文观测数据起始时间从 2004 年开始; 另外, 本文后续建立的 TRF 引入的基准为 ITRF2014, 其 GPS 输入数据的截止时间为 2015-02, 考虑到 ITRF2014 的现势性和有效性, 因此本文数据截止时间延长至 2016 年。

完成数据质量检查和观测信息核对等预处理后, 根据 IERS 协议 2010 推荐的最新模型, 利用 GPS 观测网整体快速解算新方法^[28]对 2004—2016 共计 13 年的数据进行了重新处理。数据处理策略主要包括: (1) 单天松弛解, 同时解算卫星轨道、EOPs、测站坐标、对流层延迟及其水平梯度参数等; (2) IGS 和 CMONOC 基准站坐标各方向分别施加 1 m 和 100 m 的约束; (3) 截止高度角为 10°; (4) 构建无电离层组合观测值, 选取 GMF 模型作为对流层投影函数; (5) 计算固体潮、海潮 (FES2004)、极潮改正; (6) 绝对天线相位中心改正 (igs14_1930.atx)。对 GPS 单天解开展如图 2 所示的各项工作, 获取 GPS TRF 的输入数据。

2 两种顾及测站非线性变化的 GPS TRF 的建立

2.1 采用的软件和数据

CATREF 软件由法国国家地理研究所研发, IERS 发布的 ITRF2005、ITRF2008、ITRF2014 等版本均由 CATREF 软件实现^[12, 29-30], 本文基于相同平台建立 GPS TRFs。

建立 TRF 的输入数据包括 GPS 单天解、阶跃信息、测站的 PSD 改正模型等。本文的 GPS 单天解统一由数据处理得到, 依据测站日志文件

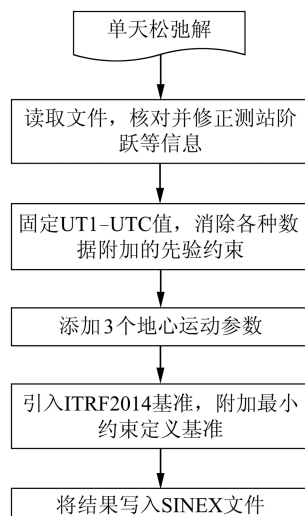


图 2 GPS 单天解后续处理流程

Fig. 2 Flowchart of Post-Processing of GPS Daily Solution

及 IGS 发布的阶跃文件在 GPS TRF 建立过程中更新阶跃信息。PSD 模型的选取策略为: (1) IGS 基准站采用 ITRF2014 产品; (2) CMONOC 基准站采取参数拟合方法自行建模。

共计 13 个参与计算的 CMONOC 基准站受到 2004-12-26 印尼海啸和 2011-03-11 东日本大地震的影响, 不同方向分量震后形变存在较大差异, 部分基准站仅坐标发生阶跃。因此, 本文共建立了 13 个 PSD 模型, 均为指数函数模型。以 JIXN 的 E 方向分量为例 (图 3), PSD 模型改正效果较为显著。尽管 2011-03-11 东日本大地震对 JIXN 的影响时间较短, 然而本文计算的整个时段 (2004—2016 年) 的 PSD 模型改正前、后拟合残差 WRMS (weighted root mean square) 分别为 2.25 mm、2.10 mm, 表明自行建立的 PSD 模型能够有效修正地震引起的测站非线性变化。此外, 本文在建立 PSD 模型时, 选取贝叶斯信息量准则 (Bayesian information criterion, BIC) 值最低的拟合模型作为最后的 PSD 模型, JIXN 坐标 E 分量改正前、后对应的 BIC 值分别为 -42 679.5、-43 265.8。

本文使用的环境负载 (NTAL、NTOL 以及 HYDL) 改正产品为全球格网形式的环境负载引起的三维地表弹性形变数据, 格网的空间分辨率均为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, 由 GFZ 和 EOST 两个机构提供^[31-32]。除了 GFZ 的 NTAL 和 NTOL 时间分辨率为 3 h, 其余产品的时间分辨率均为 24 h。本文利用双三次内插方法, 计算每个测站的三维地表形变。另外, 为保证负载产品与 GPS 数据时间分辨率的一致性, 本文将 3 h 采样率的 NTAL 和 NTOL 按天取平均值。

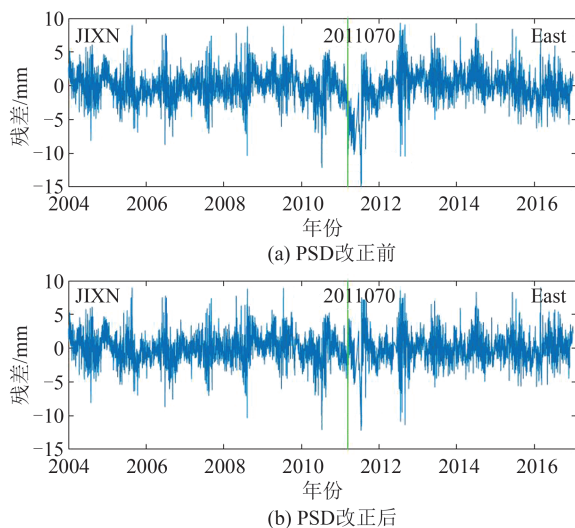


图3 PSD模型改正效果对比

Fig. 3 Residuals Time Series Obtained Without PSD and with PSD

2.2 基于函数模型的GPS TRF的建立

本文采用分段线性函数加反映测站季节性信号的正余弦函数建立TRF,其坐标为:

$$\begin{cases} X^i = X^c + (t^i - t^{\text{ref}}) \dot{X}^c + t_x^i + d^i X^c - r_z^i Y^c + \\ r_y^i Z^c + a_x^c \cos(2\pi t^i) + b_x^c \sin(2\pi t^i) + \\ c_x^c \cos(4\pi t^i) + d_x^c \sin(4\pi t^i) \\ Y^i = Y^c + (t^i - t^{\text{ref}}) \dot{Y}^c + t_y^i + d^i Y^c + r_z^i X^c - \\ r_x^i Z^c + a_y^c \cos(2\pi t^i) + b_y^c \sin(2\pi t^i) + \\ c_y^c \cos(4\pi t^i) + d_y^c \sin(4\pi t^i) \\ Z^i = Z^c + (t^i - t^{\text{ref}}) \dot{Z}^c + t_z^i + d^i Z^c - r_y^i X^c + \\ r_x^i Y^c + a_z^c \cos(2\pi t^i) + b_z^c \sin(2\pi t^i) + \\ c_z^c \cos(4\pi t^i) + d_z^c \sin(4\pi t^i) \end{cases} \quad (1)$$

式中,未知参数 X^c 、 Y^c 和 Z^c 分别为测站在参考历元 t^{ref} 处的坐标; \dot{X}^c 、 \dot{Y}^c 和 \dot{Z}^c 分别为对应的测站速度;单天解与待建立的TRF之间的7个转换参数分别为 t_x^i 、 t_y^i 、 t_z^i 、 d^i 、 r_x^i 、 r_y^i 、 r_z^i ;测站的周年、半年项系数分别为 $(a_x^c, a_y^c, a_z^c, b_x^c, b_y^c, b_z^c)$ 以及 $(c_x^c, c_y^c, c_z^c, d_x^c, d_y^c, d_z^c)$ 。

式(1)可写成如下形式:

$$\begin{bmatrix} x^1 & x^2 & \cdots & x^s \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} J^1 & (t^1 - t^{\text{ref}})J^1 & A^1 & 0 & \cdots & 0 & J^1 A^1 \\ J^2 & (t^2 - t^{\text{ref}})J^2 & 0 & A^2 & \cdots & 0 & J^2 A^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ J^s & (t^s - t^{\text{ref}})J^s & 0 & 0 & \cdots & A^s & J^s A^s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}^c \\ \theta^1 \\ \theta^2 \\ \vdots \\ \theta^s \\ F \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, $(x^i)_{1 \leq i \leq s}$ 表示单天解文件中包含的测站坐标, $s=4749$; x^c 表示所有测站在参考历元处的坐标,其参考框架即为待求的TRF; $(\theta^i)_{1 \leq i \leq s}$ 表示单天解与待求的TRF之间的7个转换参数; F 表示所有测站的周年/半年项系数; $J^i = \partial x^i / \partial x^c$; A^i 与 A^j 形式如下:

$$\begin{cases} A^i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & X_1 & 0 & Z_1 & -Y_1 \\ 0 & 1 & 0 & Y_1 & -Z_1 & 0 & X_1 \\ 0 & 0 & 1 & Z_1 & Y_1 & -X_1 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & 0 & 0 & X_k & 0 & Z_k & -Y_k \\ 0 & 1 & 0 & Y_k & -Z_k & 0 & X_k \\ 0 & 0 & 1 & Z_k & Y_k & -X_k & 0 \end{bmatrix} \\ A^j = \begin{bmatrix} A_1^j & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & A_2^j & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & A_k^j \end{bmatrix} \end{cases} \quad (3)$$

为了避免建立TRF时的法方程秩亏问题,引入ITRF2014基准,并附加最小约束。选取南(41个)、北半球(45个)共计85个参考站(如图1中黑色圆点所示)用于基准定义,选取原则包括:(1)全球均匀分布;(2)有效观测率超过80%;(3)数据质量好、受地震或仪器更换等因素影响少。

当某个测站任一方向坐标残差超过5 cm或者标准化残差(残差与标准差的比值)超过5.0时,判断存在粗差。历元J2010.0下,FREQ2016的产品包括测站坐标、速度以及测站周年、半年项系数等。FREQ2016验后残差WRMS(如图4所示)及其平均值(如表2所示)验证了FREQ2016的高精度与高可靠性。

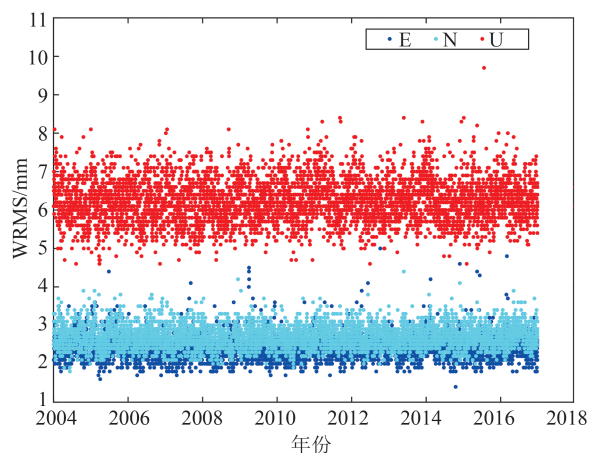


图4 FREQ2016验后残差WRMS散点图

Fig. 4 WRMS of FREQ2016 Postfit Residuals

表 2 验后残差 WRMS 平均值/mm
Tab. 2 WRMS Averages of Postfit Residuals/mm

分类	E	N	U
FREQ2016	2.42	2.70	6.24
GFZ2016	2.58	2.87	6.28
EOST2016	2.54	2.84	6.29

FREQ2016 与 ITRF2014(J2010.0)间的 Helmert 转换参数及其速率均为 0(如表 3 所示),表明两者基准的一致性。

表 3 FREQ2016、GFZ2016 和 EOST2016 与 ITRF2014 之间的 Helmert 转换参数(J2010.0)及其速率

Tab. 3 Helmert Transformation Parameters at Epoch J2010.0 and Their Rates from FREQ2016, GFZ2016 and EOST2016 to ITRF2014

分类	FREQ2016	GFZ2016	EOST2016
T_x/mm	0 ± 0.2	0 ± 0.2	0 ± 0.2
$\dot{T}_x/(\text{mm} \cdot \text{a}^{-1})$	0 ± 0.2	0 ± 0.2	0 ± 0.2
T_y/mm	0 ± 0.2	0 ± 0.2	0 ± 0.2
$\dot{T}_y/(\text{mm} \cdot \text{a}^{-1})$	0 ± 0.2	0 ± 0.2	0 ± 0.2
T_z/mm	0 ± 0.2	0 ± 0.2	0 ± 0.2
$\dot{T}_z/(\text{mm} \cdot \text{a}^{-1})$	0 ± 0.2	0 ± 0.2	0 ± 0.2
$D/10^{-9}$	0 ± 0.03	0 ± 0.03	0 ± 0.03
$\dot{D}/(10^{-9} \cdot \text{a}^{-1})$	0 ± 0.03	0 ± 0.03	0 ± 0.03
R_x/mas	0 ± 0.007	0 ± 0.006	0 ± 0.007
$\dot{R}_x/(\text{mas} \cdot \text{a}^{-1})$	0 ± 0.007	0 ± 0.006	0 ± 0.007
R_y/mas	0 ± 0.008	0 ± 0.007	0 ± 0.007
$\dot{R}_y/(\text{mas} \cdot \text{a}^{-1})$	0 ± 0.008	0 ± 0.007	0 ± 0.007
R_z/mas	0 ± 0.008	0 ± 0.007	0 ± 0.007
$\dot{R}_z/(\text{mas} \cdot \text{a}^{-1})$	0 ± 0.008	0 ± 0.007	0 ± 0.007

FREQ2016 测站速度的形式误差均小于 0.2 mm/a, FREQ2016 与 ITRF2014 的垂直速度场呈现出区域特征一致性,尤其是北美地区、格陵兰岛以及芬诺斯坎底亚地区均表现为地面隆升,推测与冰川均衡以及冰川消融等因素有关。

2.3 顾及环境负载改正的 GPS TRF 的建立

利用环境负载改正后的单天解结果建立顾及环境负载改正的 GPS TRFs (GFZ2016 和 EOST2016),相较于函数模型,其不再进行季节性信号部分的估计。历元 J2010.0 下,GFZ2016 和 EOST2016 的产品包括测站坐标和速度场等。GFZ2016 和 EOST2016 验后残差 WRMS 散点图如图 5 所示。

根据两者验后残差 WRMS(如图 5 所示)及其平均值(如表 2 所示)可知,两种环境负载改正结果具有一致性,验证了本文建立的顾及环境负载改正的 GPS TRFs 的可靠性。GFZ2016 和 EOST2016 与 ITRF2014(J2010.0)的 Helmert 转换参数结果(如表 3 所示)表明,GFZ2016 和

EOST2016 与 ITRF2014 基准一致,环境负载改正不会对 TRF 基准造成影响。

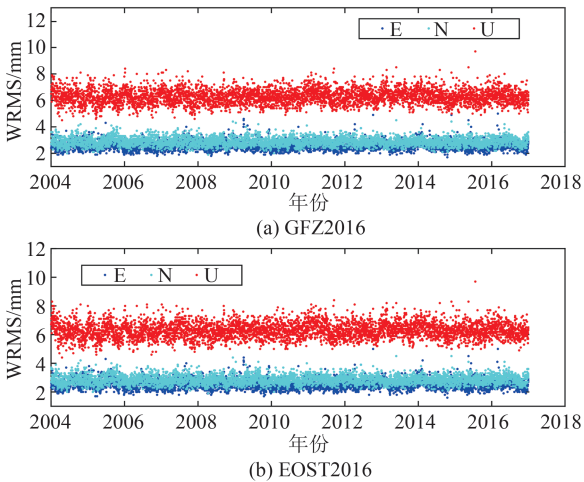


图 5 GFZ2016 和 EOST2016 验后残差 WRMS 散点图
Fig. 5 WRMS of the GFZ2016 and EOST2016 Postfit Residuals

GFZ2016 和 EOST2016 的速度场形式误差也均小于 0.2 mm/a,二者水平速度差异可以忽略,大部分测站的垂向速度差异均小于 1 mm/a,最大的垂向速度差异为 1.7 mm/a,出现在 MBAR 测站。与 FREQ2016 垂直速度场相似,GFZ2016 和 EOST2016 结果也呈现出明显的区域特征。

2.4 对比分析

本文对比了 188 个测站的坐标残差 WRMS,如图 6~图 8 所示。FREQ2016 与 GFZ2016 和 EOST2016 的水平分量 WRMS 差异为负值的测站占比均超过 90%,差异范围为 $-0.81 \sim 0.08$ mm,表明了 FREQ2016 较 GFZ2016/EOST2016 更优;类似地,垂直分量的 WRMS 差异为负值的测站百分比分别为 53% 和 54%,差异范围为 $-1.61 \sim 1.38$ mm,三者结果相近。其原因可能是函数模型仅考虑了季节性信号,而环境负载能够改正周日、半周日等部分短周期信号。FREQ2016 的 WRMS 平均值均小于 GFZ2016 和 EOST2016 结果(表 2),尤其在水平方向上更具优越性。由此认为,基于函数模型的 FREQ2016 优于顾及环境负载改正的 GFZ2016 和 EOST2016。

FREQ2016 与 GFZ 或 EOST 环境负载估计的测站周年/半周年信号振幅对比结果如图 9 和图 10 所示。图 9 和图 10 中,各子图右上的数字表示 FREQ2016 结果大于 GFZ 或 EOST 结果的测站与总测站的百分比,结果靠近对角线的程度反

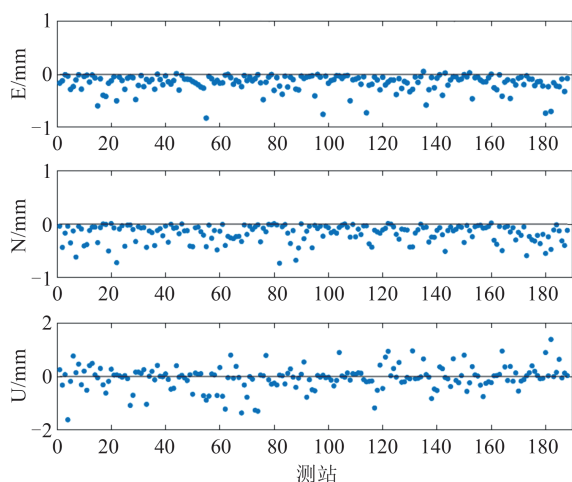


图6 测站坐标残差WRMS差异(FREQ2016和GFZ2016)

Fig. 6 WRMS Differences per Station Between FREQ2016 and GFZ2016

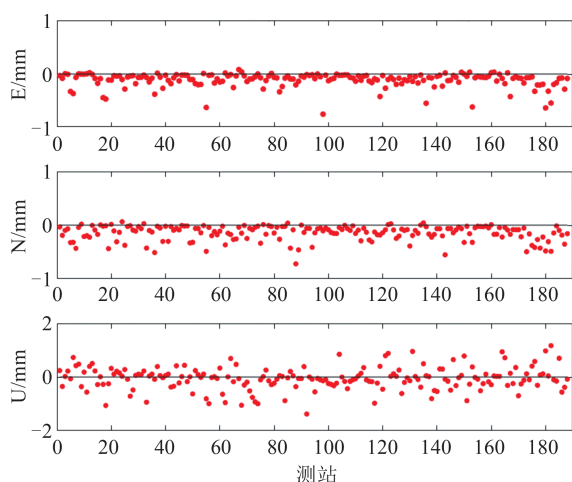


图7 测站坐标残差WRMS差异(FREQ2016和EOST2016)

Fig. 7 WRMS Differences per Station Between FREQ2016 and EOST2016

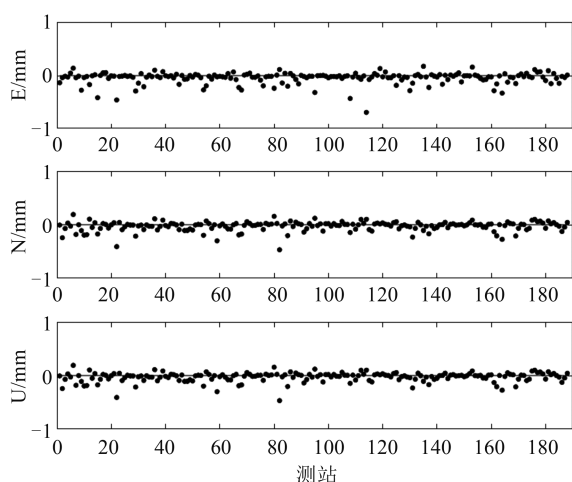


图8 测站坐标残差WRMS差异(EOST2016和GFZ2016)

Fig. 8 WRMS Differences per Station Between EOST2016 and GFZ2016

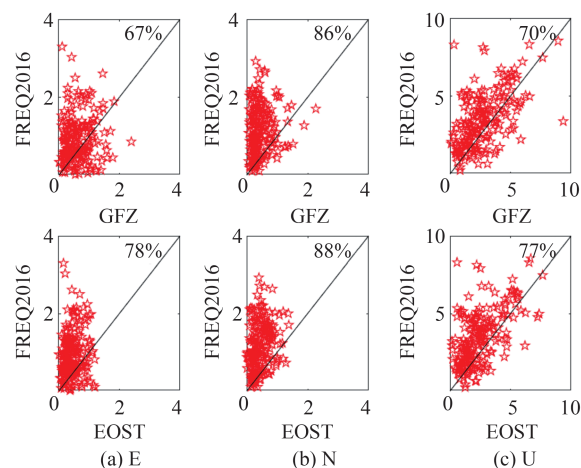


图9 FREQ2016测站周年振幅与GFZ、EOST对比

Fig. 9 Annual Amplitude Estimated in the FREQ2016 Plotted as a Function of Annual Amplitude Estimated with GFZ Loading and EOST Loading

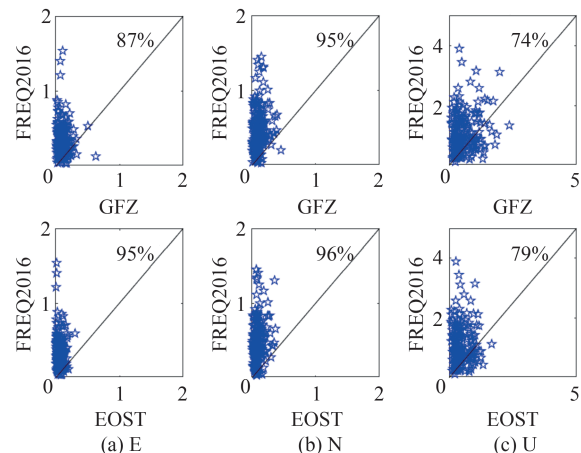


图10 FREQ2016测站半周年振幅与GFZ、EOST对比

Fig. 10 Semi-Annual Amplitude Estimated in the FREQ2016 Plotted as a Function of Semi-Annual Amplitude Estimated with GFZ Loading and EOST Loading

映了两者的差异。对比分析发现,FREQ2016的测站季节性信号,尤其是半周年信号更为显著,而GFZ2016和EOST2016测站残差中仍含有部分季节性信号。例如,测站DLHA在FREQ2016和GFZ2016下的去趋势坐标残差序列(图11)表明,FREQ2016的DLHA测站水平方向上季节性信号明显较弱。图12比较了FREQ2016、GFZ2016和EOST2016的速度场差异。结果表明:(1)所有测站水平速度差异小于0.08 mm/a。(2)个别测站垂向速度差异相对较大,FREQ2016与GFZ2016之间有3个测站差异超过1 mm/a,最大为DARW测站(1.2 mm/a);FREQ2016与EOST2016之间仅LUZH测站差异达1.3 mm/a;其余测站差异均不超过1 mm/a。

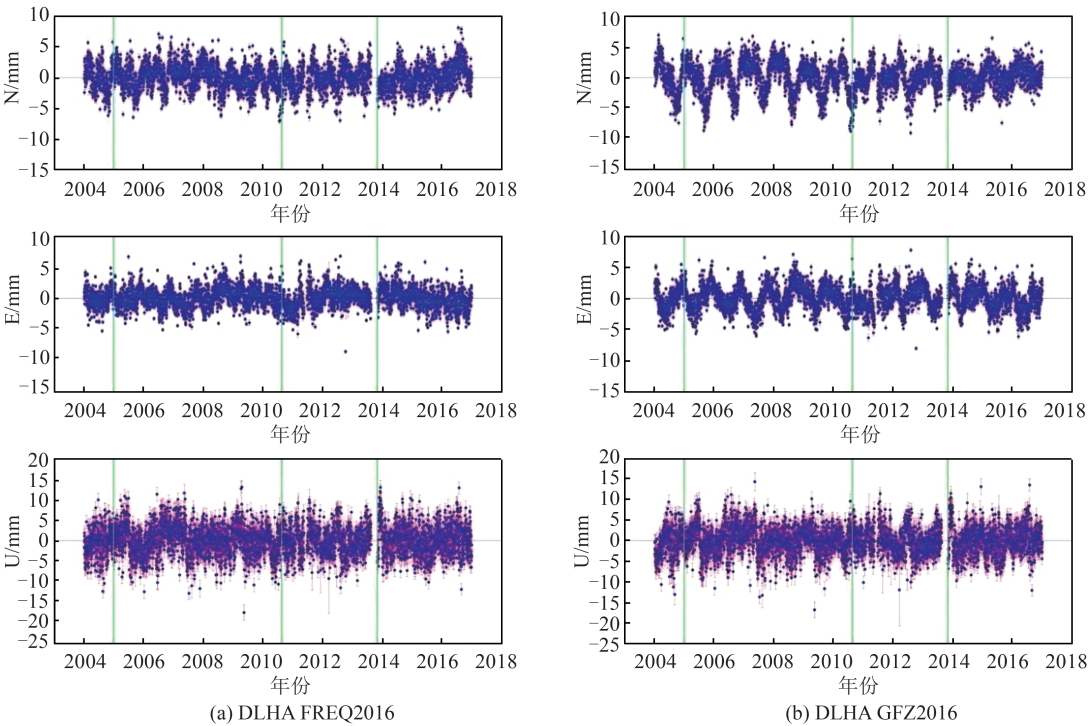


图 11 DLHA 去趋势项坐标残差
Fig. 11 Detrended Residuals of DLHA

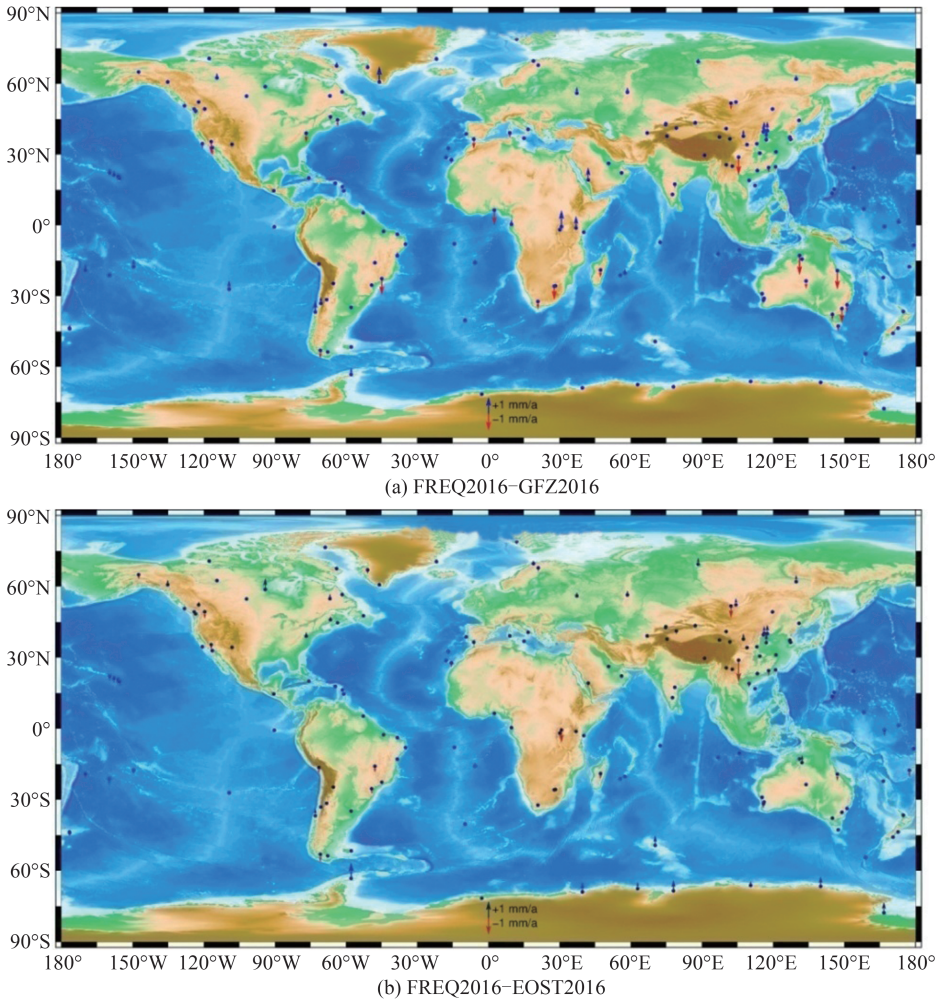


图 12 FREQ2016、GFZ2016 和 EOST2016 垂直速度差异
Fig. 12 Vertical Velocity Differences Between FREQ2016, GFZ2016 and EOST2016

相比于GFZ2016和EOST2016,FREQ2016测站水平速度的形式误差平均减小约10%。

3 结 语

基于函数模型的FREQ2016和顾及环境负载改正的GFZ2016、EOST2016的对比分析表明:

1)FREQ2016的验后残差WRMS平均值最小,尤其是在水平方向上。

2)FREQ2016估计的测站季节性信号更为显著,尤其是半周年信号。

3)在速度场方面,三者水平方向上差异可以忽略,个别测站垂直方向上差异较大,最大达1.3 mm/a,FREQ2016水平速度场的形式误差相较于其他二者结果平均减小约10%。

基于函数模型的GPS TRF 优于顾及环境负载改正的GPS TRF。

由于真实的测站坐标未知以及缺少足够精确的外部数据源,TRF精确度与稳定性的评估仍然面临挑战,如何全面合理地进行TRF的比较与评估是今后需要进一步研究的方向。

参 考 文 献

- [1] Liu Jingnan, Wei Na, Shi Chuang. Status and Prospects of the International Terrestrial Reference Frame (ITRF) [J]. *Chinese Journal of Nature*, 2013, 35(4): 243-250. (刘经南, 魏娜, 施闯. 国际地球参考框架(ITRF)的研究现状及展望[J]. 自然杂志, 2013, 35(4): 243-250.)
- [2] Petit G, Luzum B. IERS Conventions (2010) [EB/OL]. (2010-10-15) [2019-04-01]. <https://www.iers.org/IERS/EN/Publications/Technical-Notes/tn36.html>.
- [3] Jiang Weiping, Ma Yifang, Deng Liansheng, et al. Establishment of mm-Level Terrestrial Reference Frame and Its Prospect [J]. *Journal of Geomatics*, 2016, 41(4): 1-6. (姜卫平, 马一方, 邓连生, 等. 毫米级地球参考框架的建立方法与展望[J]. 测绘地理信息, 2016, 41(4): 1-6.)
- [4] Jiang Weiping, Wang Kaihua, Li Zhao, et al. Prospect and Theory of GNSS Coordinate Time Series Analysis [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(12): 2112-2123. (姜卫平, 王锴华, 李昭, 等. GNSS坐标时间序列分析理论与方法展望[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(12): 2112-2123.)
- [5] Collilieux X, Altamimi Z, Ray J, et al. Effect of the Satellite Laser Ranging Network Distribution on Geocenter Motion Estimation [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2009, 114 (B4): B04402.
- [6] Wei Na, Shi Chuang, Liu Jingnan. Effects of Surface Loading and Heterogeneous GPS Network on Helmert Transformation [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2016, 59(2): 484-493. (魏娜, 施闯, 刘经南. 地表负载及GPS测站分布对参考框架转换的影响分析[J]. 地球物理学报, 2016, 59(2): 484-493.)
- [7] Ma Yifang, Zhou Xiaohui. Analysis of Impact of the Satellite Antenna Phase Center Correction Model on Scale Parameters of Helmert Transformation [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2021, 41 (1): 39-42. (马一方, 周晓慧. 卫星天线相位中心改正模型对参考框架转换中尺度参数的影响分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2021, 41(1): 39-42.)
- [8] Deng Liansheng. Research on the Effects of Unmodeled Errors and Environmental Loading on GPS Coordinate Time Series [D]. Wuhan: Wuhan University, 2016. (邓连生. GPS坐标时间序列中未模型化误差和环境负载的影响研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2016.)
- [9] Collilieux X, Altamimi Z, Coulot D, et al. Impact of Loading Effects on Determination of the International Terrestrial Reference Frame [J]. *Advances in Space Research*, 2010, 45(1): 144-154.
- [10] Dam T, Böhm J. Loading Effects and Reference Frames [M]//Encyclopedia of Geodesy. Cham: Springer, 2016.
- [11] Altamimi Z, Collilieux X, Metivier L. Preliminary Analysis in Preparation for the ITRF2013 [C]//EGU General Assembly Conference, Vienna, The Republic of Austria, 2013.
- [12] Altamimi Z, Rebischung P, Métivier L, et al. ITRF2014: A New Release of the International Terrestrial Reference Frame Modeling Nonlinear Station Motions [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2016, 121(8): 6109-6131.
- [13] Seitz M, Angermann D, Bloßfeld M. ITRS 2014 Realization of DGFI [C]//EGU General Assembly Conference, Vienna, The Republic of Austria, 2015.
- [14] Wu X P, Abbondanza C, Altamimi Z, et al. KAL-REF: A Kalman Filter and Time Series Approach to

- the International Terrestrial Reference Frame Realization [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2015, 120(5): 3775–3802.
- [15] Soja B, Gross R S, Abbondanza C, et al. On the Long-Term Stability of Terrestrial Reference Frame Solutions Based on Kalman Filtering[J]. *Journal of Geodesy*, 2018, 92(9): 1063–1077.
- [16] Abbondanza C, Chin T M, Gross R S, et al. A Sequential Estimation Approach to Terrestrial Reference Frame Determination [J]. *Advances in Space Research*, 2020, 65(4): 1235–1249.
- [17] Abbondanza C, Chin T M, Gross R S, et al. JTRF2014, the JPL Kalman Filter and Smoother Realization of the International Terrestrial Reference System[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2017, 122(10): 8474–8510.
- [18] Bloßfeld M, Seitz M, Angermann D. Non-linear Station Motions in Epoch and Multi-year Reference Frames [J]. *Journal of Geodesy*, 2014, 88 (1) : 45–63.
- [19] Angermann D, Blofeld M, Seitz M, et al. Comparison of Latest ITRS Realizations: ITRF2014, DTRF2014 and JTRF2014 [EB/OL]. [2020-03-20]. https://www.iers.org/SharedDocs/Publicationen/EN/IERS/Publications/tn/TechnNote40/tn40_004.pdf?__blob=publicationFile&v=3.
- [20] Dach R, Susnik A, Maier A, et al. Evaluation of ITRF2014 Solutions[C]//AGU Fall Meeting, San Francisco, USA, 2016.
- [21] Bennett R A. Instantaneous Deformation from Continuous GPS: Contributions from Quasi-Periodic Loads [J]. *Geophysical Journal International*, 2008, 174(3): 1052–1064.
- [22] Davis J L, Wernicke B P, Tamisiea M E. On Seasonal Signals in Geodetic Time Series[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2012, 117 (B1): 1403.
- [23] Chen Q, Dam T, Sneeuw N, et al. Singular Spectrum Analysis for Modeling Seasonal Signals from GPS Time Series [J]. *Journal of Geodynamics*, 2013, 72: 25–35.
- [24] Wang X M, Cheng Y Y, Wu S Q, et al. An Enhanced Singular Spectrum Analysis Method for Constructing Nonsecular Model of GPS Site Movement [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2016, 121(3): 2193–2211.
- [25] Dai Hailiang, Sun Fuping, Jiang Weiping, et al. Application of Wavelet Decomposition and Singular Spectrum Analysis to GNSS Station Coordinate Time Series[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(3): 371–380. (戴海亮, 孙付平, 姜卫平, 等. 小波多尺度分解和奇异谱分析在 GNSS 站坐标时间序列分析中的应用 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(3): 371–380.)
- [26] Rebischung P, Altamimi Z, Springer T. A Col-linearity Diagnosis of the GNSS Geocenter Determination [J]. *Journal of Geodesy*, 2014, 88 (1) : 65–85.
- [27] Rebischung P, Altamimi Z, Ray J, et al. The IGS Contribution to ITRF2014[J]. *Journal of Geodesy*, 2016, 90(7): 611–630.
- [28] Chen H, Jiang W P, Ge M R, et al. An Enhanced Strategy for GNSS Data Processing of Massive Networks [J]. *Journal of Geodesy*, 2014, 88 (9) : 857–867.
- [29] Altamimi Z, Collilieux X, Legrand J, et al. ITRF2005: A New Release of the International Terrestrial Reference Frame Based on Time Series of Station Positions and Earth Orientation Parameters [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112 (B9): B09401.
- [30] Altamimi Z, Collilieux X, Métivier L. ITRF2008: An Improved Solution of the International Terrestrial Reference Frame [J]. *Journal of Geodesy*, 2011, 85(8): 457–473.
- [31] Dill R, Döbslaw H. Numerical Simulations of Global-Scale High-Resolution Hydrological Crustal Deformations[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2013, 118(9): 5008–5017.
- [32] Petrov L. Study of the Atmospheric Pressure Loading Signal in Very Long Baseline Interferometry Observations [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109(B3): B03405.