

顾及环境负载的区域 GPS 坐标时间序列分析

刘宗强^{1,2}, 党亚民¹, 杨 强¹, 张光茹¹

(1. 中国测绘科学研究院, 北京 100830; 2. 中国空间技术研究院钱学森空间技术实验室, 北京 100094)

摘 要:环境负载对于测站位移的影响往往与构造形变处于同一量级,其引起的测站非线性变化不可忽视。本文主要针对环渤海区域 42 个 CORS 的 2011—2015 年共 5 年的数据,以 GAMIT/GLOBK 软件解算的 ITRF2008 下坐标时间序列为研究对象,研究分析了环境负载对区域 GPS 坐标时间序列的影响。研究结果表明,环境负载对测站位移的影响主要表现在高程方向且呈现周期性;环渤海区域 CORS 环境负载时间序列 RMS 值呈现显著的区域特征;经过环境负载改正后,73.2%的测站 U 向坐标时间序列都能得到优化;经过环境负载改正,测站 3 个方向噪声模型发生变化,被闪烁噪声掩盖的随机漫步噪声显现出来;基于 GPS 坐标时间序列估计基准站速度时,应当顾及有色噪声的影响。

关键词:环境负载;GPS 坐标时间序列;噪声模型;速度场

1 引 言

大量 GNSS 观测数据的积累,为研究该区域地壳形变特征提供了宝贵的可靠数据基础。通过 GPS 坐标时间序列可以反映测站的趋势变化,然而坐标时间序列中存在着一些系统误差,尤其是环境负载(如大气负载、非潮汐海洋负载、积雪与土壤湿度负载等)因素引起的测站非线性变化不可忽视,对于测站位移的影响往往与构造形变处于同一量级。此外,区域 CORS 网中时间序列还存在共模误差、有色噪声等误差。因此,从 GPS 坐标时间序列中有效分离并剔除各种负载以及误差的影响,准确估计测站噪声模型,对于本文更加精细地研究区域构造变形以及动力学机制具有重要的意义。

近年来,不少国内外的专家学者对于环境负载对基准站位移的影响进行了研究。Farrell 于 1972 年提出,基于相关环境观测资料,通过弹性格林函数进行积分,即可获得环境负载对测站位移的形变量;王敏等人在 2005 年研究发现,通过地球物理模型定量计算环境负载对测站位移的影响并改正,是剥离非构造形变的根本途径;姜卫平等人在 2015 年研究发现,环境负载时间序列 U 方向 RMS 呈现明显区域化特征,同时环境负载改正对测站坐标时间序列有一定的改善,但各个方向的量值各不相同。本文主要针对环渤海区域 42 个 CORS 的 2011—2015 年共 5 年的 GPS 观测数据,以 GAMIT/GLOBK 软件解算的坐标时间序列为研究对象,基于前人的研究工作,研究分析了环境负载对区域 GPS 坐标时间序列的影响。

2 数 据

2.1 GPS 观测数据

本文研究所选取的 CORS 观测数据源自“中国大陆构造环境监测网络”和“国家级基准站网络”中环渤海地区共计 42 个测站在 2011 年 1 月 1 日至 2015 年 12 月 31 日的 GPS 连续观测数据,同时选取中国大陆及周边 11 个 IGS 站进行联合解算,即可获得本文研究需要的 CORS 5 年的坐标时间序列。

2.2 环境负载相关数据

本文采用独立地球物理模型计算不同环境负载造成的测站位移,利用此结果对区域 GPS 坐标时间序

列进行修正。本次计算大气负载的大气数据使用 NCEP/NCAR 再分析月平均资料集(<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.surface.html>),该数据资料时间分辨率为 6 h,空间分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$,垂直 17 层,包含地面层资料,本文主要用到其中的地表气压(NP);计算非潮汐海洋负载的数据采用 ECCO 模型中的全球海底压力格网数据(<http://ecco.jpl.nasa.gov/thredds/las/kf080/catalog.html>),时间分辨率为 12 h,空间分辨率为 $1^{\circ} \times (0.3^{\circ} \sim 1^{\circ})$;计算积雪与土壤水湿度负载的数据采用 NCEP/DOE AMIP-II (Reanalysis-2)模型,提供了积雪与土壤湿度等陆地水质量迁移变化数据(<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.surfaceflux.html>),该数据时间分辨率为 1 天,空间分辨率为 $1.875^{\circ} \times 1.875^{\circ}$ 。

3 数据处理

3.1 GPS 数据处理策略

本文使用 GAMIT/GLOBK 软件对 GPS 观测数据进行处理。其中 11 个 IGS 站设置为固定站,地心纬度 N 、经度 L 松弛量设定为 0.05 m,矢径 R 松弛量设定为 0.10 m;将 42 个环渤海区域 CORS 设置为非固定站,站坐标约束为 9.999 m、9.999 m、9.999 m。采用 SP3 精密星历,基线处理类型为松弛解(relax.),使用无电离层线性组合(LC_AUTCLN)观测值的选择类型,对流层折射模型使用萨斯塔莫伊宁(Saastamoinen)模型,天顶延迟模型为 13 个,参考框架采用 ITRF2008,光压模型为 BERNE 模型,使用 J2000 空间惯性参考系,并基于 IQRC(interquartile range)判别准则对测站坐标时间序列中存在的少量异常跳跃点进行剔除。

3.2 环境负载数据分辨率统一

由于本次研究基于 GAMIT/GLOBK 软件获取的测站坐标时间序列均用每个年积日正午时刻,而环境负载相关模型的时间分辨率各不相同,为了进行严谨准确的分析,需要对环境负载相关模型的时间分辨率按照测站坐标时间序列的时间标准进行统一。针对 NCEP 提供的全球地表气压模型具有一日四解的大气负载数据,对每日的 4 个数据取均值,便可获得对应正午时刻的一日一解的大气负载数据;全球海底压力格网具有一日两解的观测数据,因此主要对每日两个数据取均值,便可获得对应正午时刻的一日一解海底压力数据;对于积雪与土壤湿度负载数据,具有对应每日 12 点的单日解数据,与区域 GPS 坐标时间序列的时间尺度相匹配,因此可以直接使用。

3.3 环境负载对测站位移计算

基于负荷格林函数计算环境负载引起的地球形变是一种经典方法。主要是通过地表环境负载观测值(大气压、海洋质量及陆地储水量)与负荷格林函数进行卷积积分,即可获得测站形变量。

地表负载引起的水平方向及径向位移的负荷格林函数为

$$V(\xi) = -\frac{al_{\infty}}{M_e} \frac{\cos\left(\frac{\xi}{2}\right) \left[1 + 2\sin\left(\frac{\xi}{2}\right)\right]}{2\sin\left(\frac{\xi}{2}\right) \left[1 + \sin\left(\frac{\xi}{2}\right)\right]} + \frac{a}{M} \sum_{n=0}^{N'} (nl'_n - l'_{\infty}) \frac{1}{n} \frac{\partial_n(\cos\xi)}{\partial\xi} \quad (1)$$

$$U(\xi) = \frac{ah'_n}{M\sin\left(\frac{\xi}{2}\right)} + \frac{a}{M} \sum_{n=0}^N (h'_n - h'_{\infty}) P_n(\cos\xi) \quad (2)$$

式(1)、式(2)中, h'_n 、 l'_n 和 k'_n 称为 n 阶球面负荷勒夫数, h'_n 代表地球表面径向位移变化有关特征数, l'_n 及 k'_n 表示地球表面引力场变化和水平方向变化相关特征数,这两个参数是由地球内部密度分布以及弹性决定的; ξ 表示负载点至参考点的角距; M 和 a 分别表示地球质量和平均半径; $V(\xi)$ 、 $U(\xi)$ 分别代表水平方向和垂直方向的负荷格林函数。

$$v(\varphi, \lambda) = \frac{3}{\rho_e} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{h'_n}{2n+1} \frac{\partial q_n(\varphi, \lambda)}{\partial \xi} \quad (3)$$

$$u(\varphi, \lambda) = \frac{3}{\rho_e} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{h'_n}{2n+1} q_n(\varphi, \lambda) \quad (4)$$

式中, $v(\varphi, \lambda)$ 和 $u(\varphi, \lambda)$ 分别代表水平方向及垂直方向上的地壳形变; φ, λ 分别代表测站纬度和经度; ρ_e 表示地球平均密度; h'_n 代表负荷勒夫数; ξ 表示测站带负载点角距; $q_n(\varphi, \lambda)$ 表示负载值的球谐展开, 可通过下式计算, 即

$$q_n = \sum_{m=0}^n [q_{n,m}^c(\varphi, \lambda) \cos m\lambda + q_{n,m}^s(\varphi, \lambda) \sin m\lambda] p_{n,m}(\sin \varphi) \quad (5)$$

式中, $q_{n,m}^c(\varphi, \lambda)$ 和 $q_{n,m}^s(\varphi, \lambda)$ 表示斯托克斯系数 n 阶展开式, $p_{n,m}$ 代表缔合勒让德函数。

综上所述, 环境负载引起的地壳形变可用下述公式计算, 即

$$v(\varphi, \lambda) = \sum_{m=1}^N V(\xi) q_m(\varphi, \lambda) \quad (6)$$

$$u(\varphi, \lambda) = \sum_{m=1}^N U(\xi) q_m(\varphi, \lambda) \quad (7)$$

式中, $v(\varphi, \lambda)$ 和 $u(\varphi, \lambda)$ 分别代表水平方向及垂直方向上的地壳形变, φ, λ 分别代表测站纬度和经度, $V(\xi)$ 、 $U(\xi)$ 分别代表水平方向和垂直方向的负荷格林函数, $q_m(\varphi, \lambda)$ 表示斯托克斯系数 m 阶展开式。

3.4 环境负载评价指标

为了定量分析环境负载对区域 GPS 坐标时间序列的影响, 本文将均方根 (root mean square, RMS) 作为影响指标之一。RMS 计算公式为

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \left[load(i) - \frac{\sum_{i=1}^N load(i)}{N} \right]^2}{N-1}} \quad (8)$$

式中, N 表示观测总数, $load(i)$ 表示环境负载造成的测站位移。RMS 值越大, 说明环境负载对测站的影响越大; 反之, 影响越小。

为了评价环境负载对区域 GPS 坐标时间序列的影响, 通过计算环境负载改正前后加权均方根 (weighted root mean square, WRMS) 的差值来表示, WRMS 定义为

$$WRMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \lambda(i) \left[G(i) - \frac{\sum_{i=1}^N G(i) \lambda(i)}{\sum_{i=1}^N \lambda(i)} \right]^2}{\sum_{i=1}^N \lambda(i)}} \quad (9)$$

式中, $\lambda(i) = 1/S(i)^2$, $G(i)$ 、 $S(i)$ 表示 i 时刻测站位移值及精度。环境负载改正前后差值为

$$WRMS_{\text{differ}} = WRMS_M - WRMS_N \quad (10)$$

式中, $WRMS_M$ 、 $WRMS_N$ 分别表示环境负载改正前和改正后的区域 GPS 坐标时间序列 WRMS 值; $WRMS_{\text{differ}}$ 表示负载改正前后 WRMS 差值, 若 $WRMS_{\text{differ}}$ 大于 0, 则表示环境负载改正后测站非线性变化幅度变小。

4 数据分析与讨论

4.1 环境负载对测站位移的影响

图 1 给出大气负载、非潮汐海洋负载、积雪与土壤湿度负载及总体环境负载引起的测站 SDRC 在 N、

E、U 3 个方向上的位移。从图中可以看出,大气负载引起的测站 SDRC 位移在垂直方向上绝大多数在 $-10\sim 10$ mm,在水平方向上基本在 $-1\sim 1$ mm;非潮汐海洋负载对测站 SDRC 在垂直方向上影响在 $-5\sim 5$ mm,而对水平方向上的影响相对小很多;积雪与土壤湿度负载引起测站 SDRC 垂直方向位移量一般在 $-4\sim 4$ mm;水平方向上的位移一般在 ± 1 mm 以内,其中 E 方向上位移量最小。因此环境负载对测站位移的影响主要表现在高程方向且呈现周期性,单日环境负载对基准站高程方向的影响具有偶然性,多日大气负载对基准站高程方向的影响具有统计性的特性。

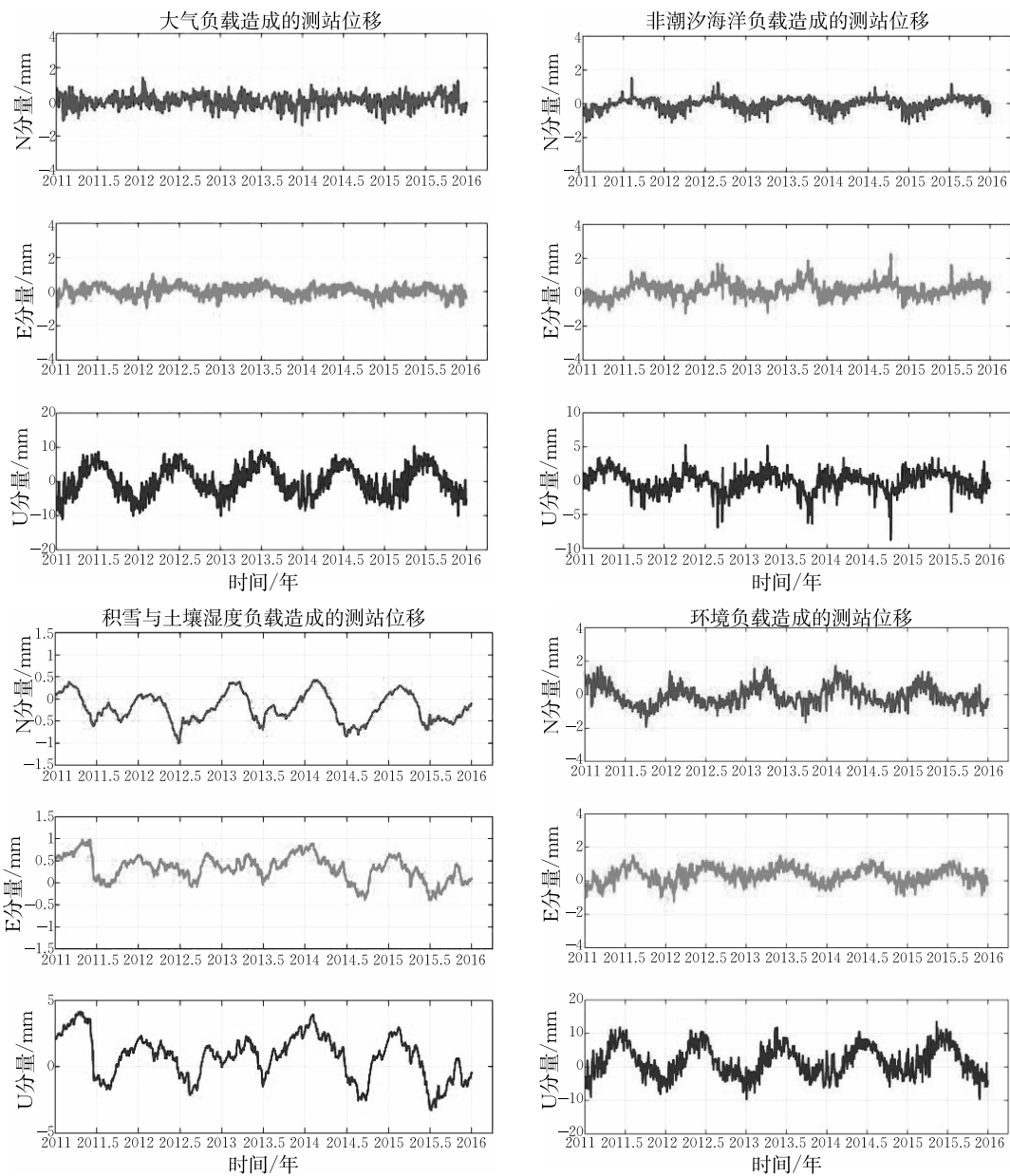


图 1 环境负载引起的测站 SDRC 在 N、E、U 3 个方向上的位移

4.2 环境负载对测站位移的 RMS 分布

由于环境负载引起测站水平方向的位移远小于高程方向,因此本文计算了环渤海区域 42 个测站 U 方向大气负载位移时间序列 RMS 值,其分布如图 2 所示。从图 2 可以看出,环渤海区域 CORS 站环境负载时间序列 RMS 值呈现显著的区域特征。东北区域信号较强,最大可达 6.81 mm,这是由于该区域纬度相对较高,濒临海域,降雪较多,所以受到环境负载影响较大;临海区域 RMS 表现一致且相比于内陆地区要大,主要受非潮汐海洋负载的影响。

噪声+闪烁噪声+随机漫步噪声(WN+FN+RWN),并使用 CATS 软件估计了环境负载修正后环渤海区域 CORS 坐标时间序列的最佳噪声模型。限于篇幅,表 2 列出了环渤海区域其中 20 个 CORS 环境负载改正前后 3 个方向上的最优噪声模型,其中 WF 代表 WN+FN 模型,WFR 代表 WN+FN+RWN 模型。

从表 2 可以看出,经过环境负载改正后测站 3 个方向噪声模型发生变化(占总数的 16.67%),N、E、U 3 个方向均有体现,主要变化为噪声模型由 WN+FN 变化为 WN+FN+RWN,其中 WN+FN+RWN 占比提高 11.67%。由此看来,通过环境负载改正可以将被闪烁噪声掩盖的随机漫步噪声显现出来。因此,为了更加准确地分析 GPS 坐标时间序列的噪声模型,不能忽视环境负载对测站的影响。

表 2 环境负载修正前后测站各分量的最优噪声模型对比

测站名	N 方向最优噪声模型		E 方向最优噪声模型		U 方向最优噪声模型	
	环境负载改正前	环境负载改正后	环境负载改正前	环境负载改正后	环境负载改正前	环境负载改正后
LNZH	WF	WF	WF	WFR	WF	WF
LNYS	WF	WF	WF	WF	WF	WF
SDYT	WF	WF	WF	WF	WF	WFR
LNJZ	WF	WFR	WF	WF	WF	WF
LNDL	WF	WF	WFR	WFR	WF	WF
SDQD	WF	WF	WF	WF	WF	WF
LNCY	WF	WF	WF	WF	WF	WF
LNHL	WF	WF	WF	WF	WF	WF
SDCY	WF	WF	WF	WFR	WF	WF
HEZJ	WFR	WFR	WF	WF	WF	WFR
HETS	WF	WF	WF	WF	WFR	WFR
SDAQ	WF	WF	WF	WF	WF	WF
SDZH	WF	WF	WF	WF	WF	WF
BJGB	WF	WF	WF	WF	WF	WF
SDZB	WF	WF	WFR	WFR	WF	WFR
SDLL	WF	WF	WF	WF	WF	WF
TJBD	WF	WFR	WF	WF	WF	WF
SDMY	WF	WF	WF	WF	WF	WF
HELQ	WF	WF	WF	WF	WF	WF
SDNY	WF	WFR	WF	WF	WF	WFR

4.5 基于有色噪声的区域速度场分析

根据上文环渤海区域 GPS 坐标时间序列噪声分析得到的结论,使用 CATS 软件分别基于白噪声模型以及各测站最优噪声模型进行速度和精度估计,限于篇幅,表 3 列出了环渤海区域其中 20 个 CORS 的速度场信息。

由表 3 可知,相比于仅采用白噪声模型,在采用最佳模型组合的情况下,各测站 N 方向上的速度中误差增加 1.32 mm,E 方向增加 1.29 mm,U 向增加 2.11 mm,估计有色噪声的速度中误差明显大于仅考虑白噪声情况下的速度中误差。因此,仅考虑白噪声获取的速度精度并不能反映速度场实际精度。

此外,仅考虑白噪声得到的速度估值与基于最优噪声模型获取的速度估值也存在偏差,其中各个测站在两种模型下 N、E、U 3 个方向速度估值的平均偏差为 0.21 mm·a⁻¹、0.34 mm·a⁻¹、0.64 mm·a⁻¹。因此,在根据 CORS 坐标时间序列估计基准站速度时,应当顾及有色噪声的影响。

表 3 ITRF08 框架下部分渤海区域 CORS 站点速度 单位: mm · a⁻¹

测站名	N 方向速度估值		E 方向速度估值		U 方向速度估值	
	白噪声模型	最优噪声模型	白噪声模型	最优噪声模型	白噪声模型	最优噪声模型
LNZH	-2.6±0.45	-2.4±1.54	5.43±0.32	4.68±1.43	4.18±0.78	3.60±3.03
LNKY	-4.4±0.39	-4.3±2.18	2.93±0.45	2.63±1.45	7.11±0.77	6.52±2.57
SDYT	-2.0±0.48	-1.8±1.29	3.12±0.57	2.68±1.78	2.96±0.80	2.53±4.07
LNJZ	-3.0±0.37	-2.6±1.28	2.88±0.58	2.55±1.99	4.00±0.58	3.19±3.09
LNDL	-4.3±0.57	-3.7±2.21	3.15±0.53	2.94±1.92	4.09±0.72	3.27±3.61
SDQD	-1.8±0.41	-2.1±1.35	5.14±0.59	4.82±2.34	7.54±0.98	7.59±2.17
LNCY	-2.3±0.33	-2.0±1.85	2.65±0.51	2.23±1.41	3.79±0.61	2.86±1.76
LNHL	-2.2±0.34	-1.9±1.71	3.08±0.33	2.94±1.77	5.88±0.67	4.79±2.30
SDCY	-2.7±0.48	-2.4±2.25	4.39±0.31	4.16±1.37	5.79±0.99	4.99±2.95
HEZJ	-2.3±0.51	-2.2±1.36	3.04±0.39	3.60±2.14	3.11±0.65	2.29±2.41
HETS	-0.7±0.51	-0.6±1.59	2.88±0.50	2.55±1.50	8.97±0.89	8.20±2.78
SDAQ	-2.0±0.36	-1.8±2.16	3.12±0.49	2.91±1.33	2.96±0.83	2.28±2.13
SDZH	-2.7±0.44	-2.5±1.27	4.39±0.35	4.01±2.20	5.79±0.81	5.38±3.11
BJGB	-2.2±0.34	-2.3±2.21	2.98±0.43	2.70±1.70	4.19±0.60	3.72±2.31
SDZB	-2.9±0.56	-2.6±1.75	5.07±0.42	4.23±1.39	4.30±0.86	3.50±3.40
SDLL	-4.3±0.38	-4.1±1.95	5.20±0.34	4.69±1.85	7.33±0.77	6.81±2.70
TJBD	-3.2±0.47	-2.8±2.11	3.94±0.38	3.63±2.15	4.65±0.93	5.38±4.01
SDMY	-3.2±0.45	-2.9±2.20	5.73±0.52	5.36±1.31	3.94±0.98	2.88±2.84
HELQ	-2.8±0.53	-2.5±1.68	4.26±0.34	3.74±1.66	9.21±0.82	8.60±2.43
SDNY	-2.7±0.33	-2.6±1.36	4.83±0.58	4.39±1.75	6.43±0.63	5.05±4.21

5 结束语

本文首先使用 GAMIT/GLOBK 软件对环渤海区域 42 个 CORS 以及中国大陆及周边 11 个 IGS 站近 5 年的观测数据进行解算,并解算了对应测站的环境负载位移,分析了环境负载对区域 GPS 坐标时间序列的影响,得出如下结论:

- (1)环境负载对测站位移的影响主要表现在高程方向且呈现周期性,其中大气负载对环渤海区域 CORS 垂向位移影响一般在±10 mm,非潮汐海洋负载的影响一般在±5 mm,积雪和土壤湿度负载影响一般在±4 mm。
- (2)环渤海区域 CORS 环境负载时间序列 RMS 值呈现显著的区域特征。东北区域信号较强,最大可达 6.81 mm,这是由于该区域纬度相对较高,濒临海域,降雪较多,所以受到环境负载影响较大;临海区域 RMS 表现一致且相比于内陆地区要大,主要受非潮汐海洋负载的影响。
- (3)通过环境负载改正以后,有 73.2%的环渤海区域 GPS 坐标时间序列得以优化,最大修正值达到 1.82 mm。
- (4)经过环境负载改正测站 3 个方向噪声模型发生变化,主要表现为噪声模型由 WN+FN 变化为 WN+FN+RWN,这表明通过环境负载改正能够将闪烁噪声掩盖的随机漫步噪声显现出来。
- (5)仅考虑白噪声得到的速度估值与基于最优噪声模型获取的速度估值也存在偏差,在根据 CORS 坐标时间序列估计基准站速度时,应当顾及有色噪声的影响。

参考文献:(略)

第一作者简介:刘宗强,男,1990 年生,硕士研究生,主要研究方向为 GNSS 数据处理与分析。
E-mail:bestlzq@126.com