

GPS 连续站的环境变化对解算结果精度的影响定量研究*

刘辛中¹, 李拴虎², 宋成科¹

(1. 中国地震局第一监测中心, 天津 300180; 2. 内蒙古自治区地震局, 内蒙古 呼和浩特 010010)

摘要: 采用统一的参考框架和数据处理方案, 对中国大陆构造环境监测网络 GPS 连续观测站自 2010 年 6 月正式运行以来所有观测数据进行解算, 得到可靠的连续站坐标时间序列结果。在此基础上, 对 GPS 连续观测时间序列出现的非线性、非周期性异常变化, 开展现场调研核实与分析, 梳理异常 GPS 观测站的环境变化情况并确定可能影响因素, 针对树木等遮挡物对观测结果的影响, 选取部分测站的已有数据通过人为设定环视角、屏蔽部分卫星信号等方式进行数据筛选实验, 结果表明环视角提高对垂向的影响大于水平方向, 当环视角提高到 20° 时可以有效地改善多路径效应引起的影响, 对净化原始数据很有利, 环视角增大到 30° 时坐标的精度下降比较明显; 屏蔽部分卫星信号在一定程度上能够提高坐标的精度, 但比较繁琐, 不适合处理大规模的数据, 对个别流动站不超过 4 天的数据进行检查和改正具有一定可行性。

关键词: 陆态网络; GPS; 时间序列; 异常核实; 多路径效应

中图分类号: P315.725

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2018)03-0472-08

0 引言

GPS 连续观测已成为现今主要的地壳形变观测手段之一, 被广泛应用于区域地壳形变分析(甘卫军等, 2005; 许厚泽, 熊熊, 2004; 江在森等, 2004; 周海涛等, 2017)、强震形变场监测(王敏等, 2011; 杨国华等, 2007; 朱爽, 周伟, 2015)、地震中长期预报(尹继尧等, 2007)、全球板块模型建立(Kogan, Steblov, 2008)等, 对于揭示其它手段难以认知的地球物理现象起到了重要作用。中国大陆构造环境监测网络 GPS 连续观测站自 2010 年 6 月正式运行以来, 已积累了 260 个台站约 8 年的观测资料。其运行大地测量学和地球动力学研究提供了宝贵的基础数据, 同时为我国的地震监测预报工作提供了更为完善的数据支持(张风霜, 占伟, 2015)。

由于陆态网络连续站建站初期选址在视野开阔、地质条件良好的地方, 获得的 GPS 连续资料数据质量良好, 对这些连续资料解算主要从优化误差模型和解算方案上进行研究, 如郭金运等

(2014) 利用球冠谐分析建立单测站历元伪距多路径效应与卫星经纬度之间的函数关系, 提高定位的精度; 王涛(2014) 利用小波分析策略对 GPS 观测数据进行消噪预处理, 有效地消除了 GPS 观测数据中接收机的随机噪声和多路径效应的影响, 提高了解算精度。随着经济建设的快速发展和自然环境的变化, 某些 GPS 连续站周围环境发生了巨大变化, 对 GPS 观测数据质量产生了一定的影响, 目前对这类环境因素或人为因素引起的异常研究还相对较少或不够深入。因此, 本文在对中国大陆构造环境监测网络所有观测站数据解算的基础上, 首先对出现异常的 GPS 观测站时间序列进行初步分析, 并结合实地调研, 有针对性地选取树木、建筑等遮挡物这类影响因素引起的异常开展实验性研究, 优化陆态网络数据处理方案, 为异常识别与判定提供参考依据。

1 GPS 资料概况及解算

本文采用中国大陆构造环境监测网络(以下简称“陆态网络”)共 260 个 GPS 连续观测站自

* 收稿日期: 2018-04-15.

基金项目: 2018 年度地震监测、预测、科研三结合课题(CEA-JC/3JH-173706)和 2016 年度震情跟踪定向工作任务(2016010207)联合资助。

2010 年以来的观测数据, 其中网络一期连续站 33 个, 网络二期连续站 227 个, 参与解算的还有相同时间段内的全球 90 个 IGS 观测数据。

数据解算采用统一的参考框架和数据处理方案。首先利用 GAMIT 获得“陆态网络”连续站和 IGS 站的区域单日松弛解, 计算中适当约束 IGS 站坐标, 而对“网络工程”连续站给予较松弛的约束, 同步观测的测站较多时, 采用分区处理。再使用 QOCA 进行整体平差、解算得到可靠的连续站时间序列结果。

GAMIT 计算部分参数设置如下: RELAX 模式; 电离层延迟: 采用 LC-HELP 对一阶电离层进行修正; 光压模型: BERNE (与 SIO 的全球解一致); 对流层天顶延迟参数个数: 13; 潮汐模型

参数: 31; 天线高计算模型: ELEV; 大气改正模型: GMF; 观测值定权: 随高度角定权; 卫星轨道约束: 20cm; 天顶延迟模型: PWL。

对获得连续站时间序列剔除粗差、原因明确的突变, 并进行震后的同震位移改正, 获得精化的时间序列结果。经分析发现部分 GPS 时间序列呈现非线性的上下波动, 造成这种波动的因素有许多, 如连续站周围环境发生变化, 图 1 为甘肃平凉站 GPS 时间序列结果。甘肃平凉 GNSS 基准站观测环境受到破坏, 西北方向受到遮挡比较严重, 2013 年 6 月开始东西向时间序列有明显的向东偏移的趋势, 2014 年 3 月, 中国地震局地壳运动监测工程研究中心对静宁的大树进行了削高处理, 此后东向偏移出现转折。

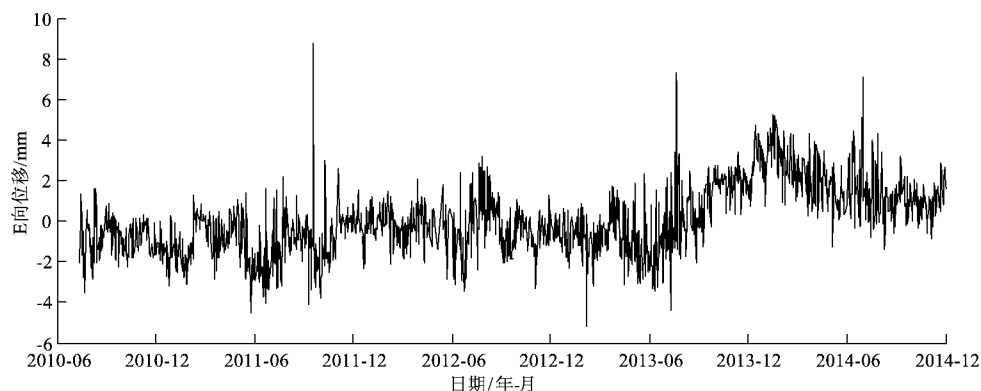


图 1 甘肃平凉站 GPS 基准站时间序列

Fig. 1 Coordinate time series of GPS station in Pingliang, Gansu

2 树木等遮挡物对数据质量影响分析

针对树木等遮挡物对观测结果的影响, 本文选取部分测站的数据, 通过人为设定环视角、屏蔽部分卫星信号等方式进行数据筛选实验, 对比分析遮挡前后数据解算结果的差异, 总结测站环视角变化对观测结果影响的规律。

2.1 人为设定环视角实验

2.1.1 观测站选取与数据计算

通过对出现异常的观测站进行筛选, 并经过实地环境调研, 选取甘肃天水、静宁、平凉、兰州测站作为人为设定高度角研究实验的测站, 因为这 4 个观测站站址四周都有高大树木、建筑物等遮挡, 对观测结果的影响比较典型, 而且无法通过屏蔽某一方向的卫星信号减弱对观测质量的影响, 参考框架和数据处理方案不变, 通过提高高

度角来减弱遮挡物对观测质量的影响, 高度角分别设定为 10° , 20° 和 30° 。

2.1.2 高度角实验结果分析

由于篇幅所限, 文中只给出静宁和平凉站高度角分别为 20° , 30° 时, 与高度角为 10° 的 N, E, U 3 个方向的坐标时间序列对比结果 (图 2、3), 由图 2a, 3a 可以看出, 静宁站和平凉站高度角设定为 20° 时, 其水平方向坐标时间序列和高度角与 10° 时的坐标时间序列总体趋势和量值基本一致, 而垂直方向的坐标时间序列总体趋势与高度角为 10° 时相一致, 但在量值上偏大; 由图 2b, 3b 可见, 静宁站和平凉站高度角设定为 30° 时, 水平方向的坐标时间序列和高度角为 10° 时的坐标时间序列总体趋势和量值也基本一致, 但垂直方向上的坐标值比高度角为 10° 时的坐标值离散, 可见, 高度角的提升对垂直方向的影响明显大于水平方向。

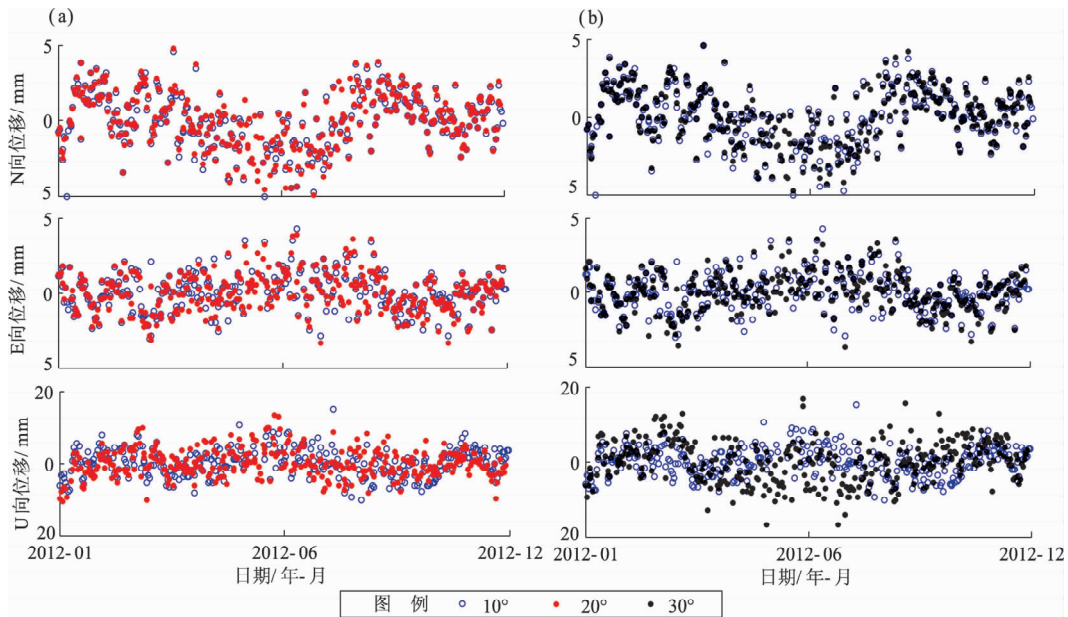


图2 静宁站高度角分别为 20° (a), 30° (b) 时与 10° 时坐标序列对比图

Fig. 2 Coordinate time series comparisons between height angle of 20° (a), 30° (b) and of 10° at the Jingning station

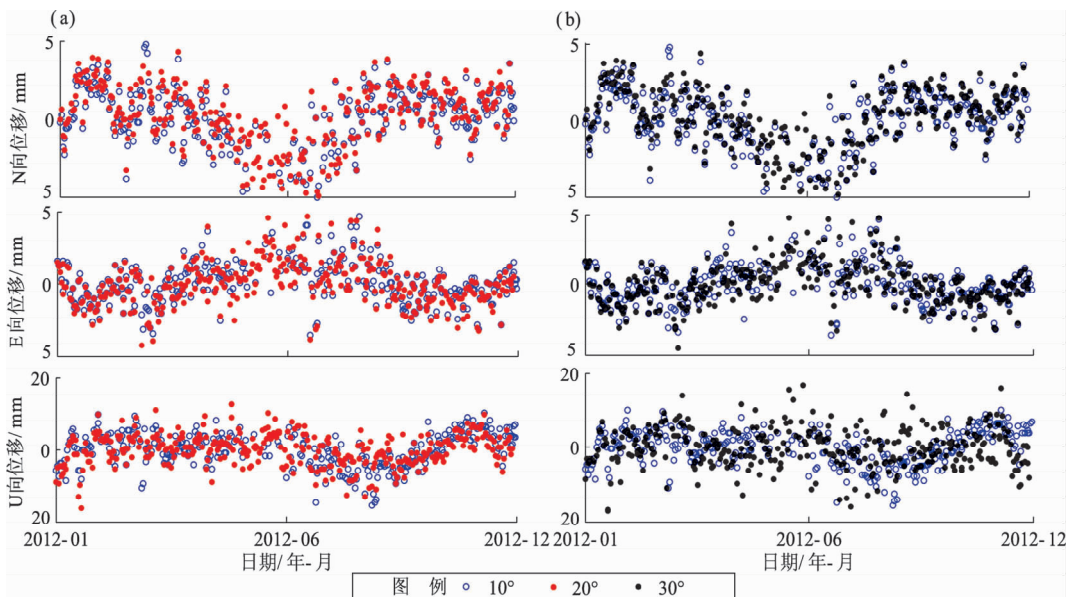


图3 平凉站分别为 20° (a), 30° (b) 时与 10° 时的坐标序列对比图

Fig. 3 Coordinate time series comparisons between between height angle of 20° (a), 30° (b) and of 10° at the Pingliang Station

本文还给出了静宁站、平凉站高度角分别为 20° 和 30° 时与高度角为 10° 时的三维坐标差异及其精度差的统计。由图4, 5 和表1 可知, 静宁、平凉站高度角为 10° 和 20° 的坐标差异值在3 个方向大体符合正态分布, 水平方向坐标差异值在 0.3 mm 以内, 垂直方向在 6 mm 以内; 静宁、平凉站高度角为 10°

和 30° 的坐标差异值在3 个方向也大体符合正态分布, 水平方向坐标差异值在 0.3 mm 以内, 垂直方向在 9 mm 以内; 静宁、平凉站在垂直方向上高度角为 30° 和 10° 的坐标差异值比高度角为 20° 和 10° 的坐标差异值更离散; 随着高度角的增大, 解算得到的三维站坐标差异量值增大, 并且垂直方向上的量值

明显大于水平方向,说明高度角增大对垂向坐标的影响大于水平向,当高度角由 20° 增大到 30° 时,由表1可以看出,兰州站垂向坐标最大平均差异量由 5.98 mm 增大至 8.53 mm 。

由不同高度角的坐标精度值可以看出,坐标精度值明显都有峰值,不符合正态分布,但静宁、平凉站高度角为 10° 和 20° 时水平方向的精度差异值在 0.1 mm 以内,垂直方向在 5 mm 左右,而在

垂直方向精度差异值最大的是甘肃天水站,达到了 5.3 mm ;静宁、平凉站高度角为 10° 和 30° 时的水平方向精度差异值在 0.3 mm 以内,垂直方向精度差异值在 20 mm 左右,甘肃天水站垂直方向精度差异值仍最大,达到了 20.8 mm 。由此可见随着高度角增大,水平向和垂直向的坐标解算精度有所下降,而垂向解算精度随着高度角的增大下降更为明显。当高度角增大到 20° 时,垂向坐标精度

表1 不同高度角下各测站坐标差均值及其精度差异量值统计表

Tab. 1 Coordinate differences' average and corresponding precision differences of different height angles at each station							
类型	测站	N向差均值/mm	N向偏差/mm ²	E向差均值/mm	E向偏差/mm ²	U向差均值/mm	U向偏差/mm ²
坐标差	静宁	0.165	0.175	-0.097	0.414	0.109	2.904
	兰州	-0.184	0.214	-0.292	0.317	-5.984	2.554
	平凉	-0.262	0.305	-0.21	0.453	-1.454	3.227
	天水	-0.009	0.169	0.164	0.372	1.607	3.793
坐标精度差	静宁	-0.053	0.039	-0.052	0.05	-5.116	0.932
	兰州	-0.094	0.047	-0.09	0.052	-4.968	1.126
	平凉	-0.092	0.033	-0.084	0.041	-4.033	1.274
	天水	-0.055	0.039	-0.042	0.069	-5.324	1.124
坐标差	静宁	0.259	0.342	-0.106	0.384	1.639	5.954
	兰州	-0.182	0.238	-0.226	0.378	-8.53	5.381
	平凉	-0.240	0.317	-0.146	0.502	-1.184	5.673
	天水	-0.243	0.303	0.042	0.426	2.241	7.742
坐标精度差	静宁	-0.143	0.72	-0.090	0.581	-19.750	4.097
	兰州	-0.236	0.11	-0.197	0.111	-19.062	4.249
	平凉	-0.237	0.155	-0.199	0.138	-16.781	4.655
	天水	-0.194	0.113	-0.131	0.135	-20.802	3.882

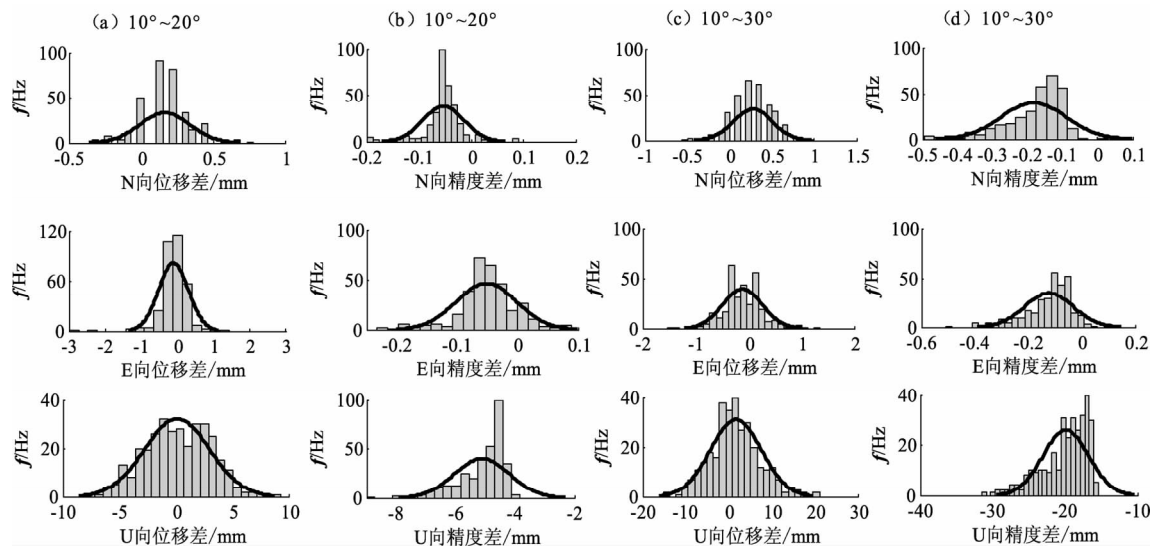


图4 静宁站不同高度角的坐标差及精度差统计

Fig. 4 Coordinate difference and accuracy difference statistics at different height angles of the Jingning Station

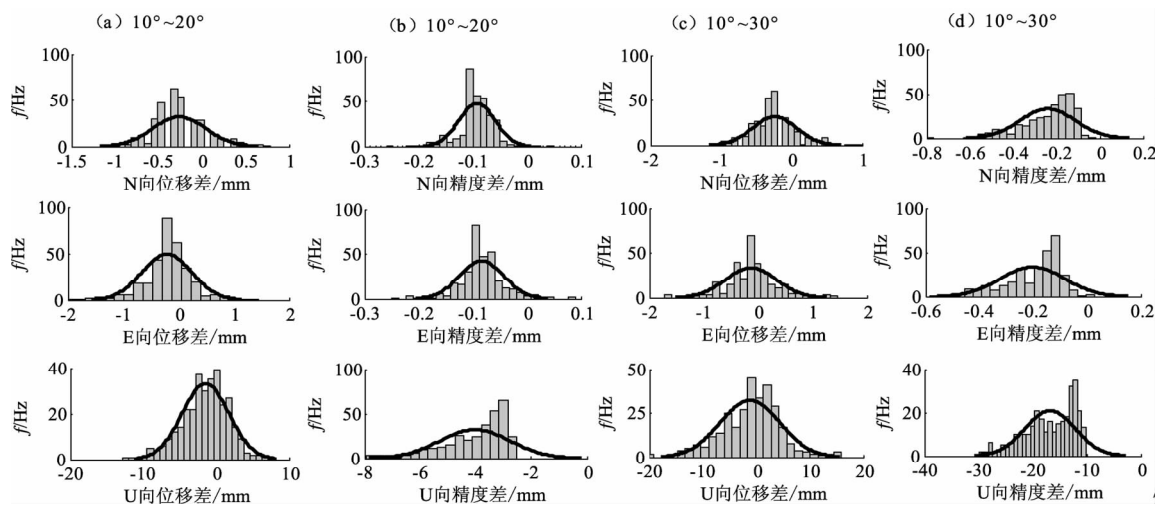


图5 平凉站不同高度角的坐标差及精度差统计

Fig. 5 Coordinate difference and accuracy difference statistics at different height angles of the Pingliang Station

平均下降约 4 ~ 5.5 mm，当高度角增大到 30°时，垂向坐标精度平均下降 16 ~ 21 mm，因此我们认为当环视角提高到 20°时获得的结果精度可以接受，可以有效地改善多路径效应引起的影响，对净化原始数据有利，而高度角为 30°时获得的坐标值是不可信的。

2.2 屏蔽部分卫星信号实验

2.2.1 观测站选取依据及数据处理流程

本文选取了同仁、万州、广州站 3 个 GPS 连续站进行数据筛选实验，这 3 个观测站代表了 3 种

不同的类型，多路径效应的影响比较典型。通过 TEQC 软件对这 3 个观测站数据进行数据质量检查，结果见表 2。

数据筛选实验数据处理流程：先用 TEQC 软件检核数据质量生成绘图文件，再用 QCVIEW 软件显示绘图文件并分析和记录多路径误差较大的卫星时段，最后用 TEQC 的编辑功能对数据进行编辑，对由于树木遮挡产生较大多路径观测误差的时段卫星数据进行剔除，然后采用统一的参考框架和数据处理方案解算得到可靠的连续站时间序列结果。

表 2 各测站数据初步印象统计表

Tab. 2 Preliminary impression statistics of each station

站名	有效数据量	mp1 ~ mp2	数据初步印象
同仁	65%	0.7 ~ 0.8	有效数据量少，但是相对来说 mp1, mp2 值适中，有树木遮挡产生的多路径效应影响，树木遮挡严密导致大部分信号完全丢失，而且还有其它影响，如施工等
万州	85%	0.4 ~ 0.5	有效数据量适中，相对来说 mp1, mp2 值较小，说明多路径效应并不很严重，相对来说，树木遮挡比较严密，缺失的数据可能是因为根本收不到信号
广州	92%	0.9 ~ 1.0	有效数据量良好，但相对 mp1, mp2 偏大，说明数据量够，能收到信号，但信号质量不高，多路径效应显著

2.2.2 数据筛选实验结果

TEQC + QCVIEW 进行预处理，可剔除较大多路径效应时段的卫星数据，由表 3 可知，预处理改正后的观测数据 mp1 和 mp2 相应减小，减小值为 0.05 ~ 0.23，说明能在一定程度上改善数据质量，减弱多路径观测误差，提高定位精度。由表 3 还可以看出，广州站经过数据预处理改正后的 3 方向坐标分量解算精度都有一定提高，万州站精度有微小提高，广州站精度提高最为明显。但这种方法

也有弊端，QCVIEW 绘图是在 DOS 系统下，数据筛选的过程需要对各测站每天逐颗卫星逐一检查并记录，过程繁琐且容易出错，对连续站长时间段的树木遮挡数据进行逐一检查并改正费时费力，不太实际，对个别流动站不超过 4 天的数据进行检查和改正具有一定可行性。

这种方法是通过剔除多路径观测误差大的卫星时段数据进行数据预处理改正，整体来看有效率降低的幅度可以接受，但如果观测数据本身有

表 3 数据预处理改正前后解算结果精度对比

Tab. 3 The accuracy comparison of the calculation results before and after data preprocessing correction

站名	年积日	改正前			改正后			改正前/mm			改正后/mm		
		mp1	mp2	有效率	mp1	mp2	有效率	N 向	E 向	U 向	N 向	E 向	S 向
广州	2015072	0.74	0.9	93%	0.44	0.52	90%	1.44	1.53	6.04	1.23	1.35	5.79
	2015073	0.87	1.1	93%	0.54	0.7	91%	1.41	1.52	6.26	1.20	1.33	5.99
万州	2014241	0.47	0.52	83%	0.46	0.51	82%	3.40	3.83	20.76	3.39	3.81	20.72
	2014242	0.47	0.54	83%	0.47	0.53	83%	3.23	3.55	18.58	3.21	3.52	18.54
同仁	2014236	0.72	0.81	67%	0.68	0.79	68%	4.83	4.31	22.71	4.86	4.38	23.48
	2014237	0.71	0.76	68%	0.65	0.74	67%	4.69	4.21	21.99	4.69	4.25	21.86

效率较低（严密遮挡、其它干扰等影响），如青海同仁站，采用这种方法改正后的数据解算精度并无改善，且会由于数据的剔除使得数据有效率进一步降低而导致解算精度下降。

3 引起 GPS 连续站异常的其他因素

几乎所有 GPS 连续观测站坐标时间序列都呈现非线性的上下波动，造成波动的因素包括 GPS 接收机及天线更换引起的突变、观测墩底部变动（夏峰等，2014；赵国强等，2013），地震引起的突变及长时间衰变，外部未模型化或模型化不完善的长期地球物理效应以及内部与 GPS 技术相关的误差（王敏等，2005a；黄立人，2006；朱文耀等，2003）。地表流体负载的质量再分布（如非潮汐海洋负载、大气负载、冰期后回弹等），以及水文负载等地球物理效应的作用，也可能使得测站发生非线性位移（李昭等，2012；梁洪宝等，2014，2015；姜卫平等，2013）。另外，GNSS 信号传播过程中的对流层、电离层延迟模型改正的不完善，GPS 天线的多路径效应（赵润，赵治华，2009）等技术类误差同样是造成测站非线性变化的重要来源。相关研究表明，GPS 数据处理模型及策略的不完善会导致 GPS 基准站时间序列产生虚假的非线性变化（姜卫平等，2013；王敏等，2005b；王敏，2007），而参考框架站的非线性变化会导致框架转换参数的扭曲，并通过框架传递到未知点，造成坐标的失真。如果不考虑环境变化等影响直接对结果进行形变分析和地球物理解释，可能会得出与实际不符的结果，因此连续站周围环境变化也导致时间序列的偏颇，例如周围树木长高及建筑物的建设。此外，大地震的

同震位移同样会引起连续站时间序列的波动（张风霜，郭良廷，2014）。因此，对 GPS 连续观测站的非线性异常变化进行核实是利用 GPS 连续观测时间序列进行形变分析和震情跟踪的基础。

4 讨论与结论

本文基于统一的参考基准和数据处理方案获取的部分陆态网络 GPS 连续站资料时间序列结果表现出来的显著的非线性、非周期性的异常变化特征，通过实地调研、数据解算实验、调阅最新的环视图等方法对影响 GPS 连续资料质量的因素进行分类，并重点对遮挡较严重的天水、静宁、平凉、兰州站和数据量比较典型的广州、万州、同仁站，分别通过选取人为设定环视角和屏蔽部分卫星信号的方法进行实验。结果表明，选取高度角为 20°时，可以有效地改善多路径效应引起的影 响，对净化原始数据很有利，但是过高的提高卫星高度角会“筛掉”部分卫星，提高卫星高度角到 30°时，会使参与解算的卫星数减少，影响解算精度；而通过 TEQC + QCVIEW 预处理剔除掉多路径效应严重时段的方法虽能在一定程度上改善数据质量、提高结果的精度，但是加大了“陆态网络”大量连续数据处理的工作量。

因此，建议在实际应用中，对于发现异常的连续站尽快落实引起异常的因素，加大对出现异常原因的追究和异常性质的判定，对于环境变化等可以处理的引起异常因素要及时排除，例如本文中甘肃天水连续站出现异常的原因是站址地势较低且周围树木较高，地壳工程中心及时对观测室周围树木进行了清理，有效地降低了多路径效应；对于一些客观因素不能及时排除而引起异常

的连续资料采用提高高度角到 20° 和“筛掉”部分多路径影响严重的卫星相结合的办法,通过时间序列结果的比较分析来得出最终结果。

参考文献:

- 甘卫军,程朋根,周德敏,等. 2005. 青藏高原东北缘主要活动断裂带 GPS 加密观测及结果分析[J]. 地震地质,27(2):177-187.
- 郭金运,李国伟,孔巧丽,等. 2014. 基于球冠谐分析的 GPS 多路径效应建模[J]. 中国有色金属学报(英文版), (6):1874-1879.
- 黄立人. 2006. GPS 基准站坐标分量时间序列的噪声特性分析[J]. 大地测量与地球动力学,26(2):31-33.
- 江在森,马宗晋,张希,等. 2004. GPS 初步结果揭示的中国大陆水平应变场与构造变形[J]. 地球物理学报,46(3):352-358.
- 姜卫平,李昭,刘鸿飞,等. 2013. 中国区域 IGS 基准站坐标时间序列非线性变化的成因分析[J]. 地球物理学报,56(7):2228-2237.
- 李昭,姜卫平,刘鸿飞,等. 2012. 中国区域 IGS 基准站坐标时间序列噪声模型建立与分析[J]. 测绘学报,41(4):496-503.
- 梁洪宝,刘志广,黄立人,等. 2015. 非构造形变对中国大陆 GNSS 基准站垂向周期运动的影响[J]. 大地测量与地球动力学,35(4):589-593.
- 梁洪宝,朱爽,王友,等. 2014. 陆态网络 GNSS 基准站阶跃偏移量的精确估计[J]. 震灾防御技术,9(增刊1):622-631.
- 王敏,李强,王凡,等. 2011. 全球定位系统测定的 2011 年日本宫城 $M_w 9.0$ 级地震远场同震位移[J]. 科学通报,56(20):1593-1596.
- 王敏,沈正康,董大南. 2005a. 非构造形变对 GPS 连续站位置时间序列的影响和修正[J]. 地球物理学报,48(5):1045-1052.
- 王敏,张祖胜,许明元. 2005b. 2000 国家 GPS 大地控制网的数据处理和精度评估[J]. 地球物理学报,48(4):817-823.
- 王敏. 2007. GPS 数据处理方面的最新进展及其对定位结果的影响[J]. 国际地震动态,(7):3-8.
- 王涛. 2014. 基于小波分析的 GPS 变形监测数据去噪方法研究[D]. 昆明:昆明理工大学,17-27.
- 夏峰,张锐,冯胜涛,等. 2014. GNSS 不同类型试验观测墩对不同类型噪声幅值影响分析[J]. 华北地震科学,33(2):39-44.
- 许厚泽,熊熊. 2004. 东北亚大陆地壳运动的 GPS 研究[J]. 大地测量与地球动力学,24(4):1-6.
- 杨国华,江在森,张风霜,等. 2007. 昆仑山 8.1 级地震对川滇地区地壳水平形变的影响[J]. 中国地震,23(1):56-64.
- 尹继尧,徐平,吴培稚,等. 2007. GPS 数据用于地震短临预测的数据处理初步探索[J]. 地震地磁观测与研究,28(5):50-56.
- 张风霜,郭良迁. 2014. 天津地区的水平形变特征[J]. 测绘科学,39(12):86-90.
- 张风霜,占伟. 2015. 利用 GPS 连续观测资料获取高精度动态速度场的研究[J]. 地震研究,38(1):75-83.
- 赵国强,孙汉荣,任雳,等. 2013. 中国地壳运动观测网络 GPS 基准站时间序列分析与研究[J]. 国际地震动态,(4):19-29.
- 赵润,赵治华. 2009. GPS 多路径误差处理技术[J]. 测绘科学,34(5):21-22.
- 周海涛,陈兆辉,朱爽,等. 2017. 川滇地区部分连续 GPS 测点形变异常分析[J]. 地震研究,40(1):94-100.
- 朱爽,周伟. 2015. 甘肃岷县漳县 6.6 级地震前后区域地壳形变分析[J]. 地震工程学报,37(3):731-738.
- 朱文耀,符养,李彦. 2003. GPS 高程导出的全球高程振荡运动及季节变化[J]. 中国科学,33(增刊1):72-83.
- Kogan M G, Steblov G M. 2008. Current global plate kinematics from GPS (1995-2007) with the plate-consistent reference frame[J]. J Geophys Res, 113:B04416. doi:10.1029/2007jb005353.

Quantitative Study of Coordinate Precision of GPS Continuous Station Influenced by Environmental Changes

LIU Xinzhong¹, LI Shuanhu², SONG Chengke¹

(1. *The first Crust Monitoring and Application Center, China Earthquake Administration, Tianjin 300180, China*)

(2. *Earthquake Agency of Inner Mongolia Autonomous Region, Huhhot 010010, Inner Mongolia, China*)

Abstract

In this paper, we calculated reliable coordinate time series of continues GPS stations of Crust Movement Observation Network Of China (CMONOC) by unified reference frame and data processing scheme since June 2010. And then non – linear and non – periodic abnormal changes from those coordinate time series have been carried out in – depth and detailed field verification and analysis to determine environmental changes and their influences. For the effect on the observation results from trees and other obstructions, we set data screening experiments by artificially set ring angle, shielding part of the satellite signal and other means based on part of existing coordinate time series. The results show that the effect on coordinate time series is that when the ring angle increases, the the precision for vertical direction is worse in contrast to horizontal direction. When the ring angle is increased to 20 degrees, the multi – path effect can be effectively improved which is very favorable for the purification of raw data. When the ring angle is increased to 30 degrees, the accuracy degree of coordinate time series significantly decreased. Shielding part of the satellite signal can improve the accuracy of coordinates to a certain extent, but not suitable when processing large – scale data. However, it is feasible, to a certain extent, to check and correct the data of individual mobile stations within 4 days.

Keywords: CMONOC; GPS; time series; anomaly verification; multipath effect