

田晓静,王盼龙,马新莹,等. 基于不同参考框架的卫星/地面天线相位中心改正对精密单点定位的影响[J]. 地球科学与环境学报, 2023,45(6):1389-1397.

TIAN Xiao-jing, WANG Pan-long, MA Xin-ying, et al. Influence of Satellite/Ground Antenna Phase Center Correction on Precise Point Positioning Based on Different Reference Frames[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2023,45(6):1389-1397.

DOI:10.19814/j.jese.2022.12003

基于不同参考框架的卫星/地面天线相位中心 改正对精密单点定位的影响

田晓静,王盼龙,马新莹,刘璐

(自然资源部大地测量数据处理中心,陕西 西安 710054)

摘要:天线相位中心改正是 GNSS 精密定位中的重要误差源,分析不同参考框架下的天线相位中心模型差异及其对事后静态定位位置参数估计的影响,有助于获得参考框架一致性的定位结果,提高定位可靠性。首先分析不同参考框架下卫星/地面天线相位中心改正差异,其次选取全球均匀分布的国际 GNSS 服务(IGS)核心站,计算基于不同参考框架的卫星/地面天线相位中心改正引起的站点估计位置差异。结果表明:不同参考框架下天线相位中心改正引起的站点坐标差异水平方向为毫米级,高程方向的影响可达厘米级,引起的站点位置差异平均值为 7.1 mm;不同参考框架下的卫星天线相位中心改正对站点估计位置的影响大于地面天线相位中心改正;地面天线相位中心改正对站点的影响与天线类型相关,同一种天线类型在不同站点上的影响基本一致。

关键词:GNSS 精密定位;天线相位中心改正;精密单点定位;国际参考框架;站点位置差异;IGS 站
中图分类号:P228 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-6561(2023)06-1389-09

Influence of Satellite/Ground Antenna Phase Center Correction on Precise Point Positioning Based on Different Reference Frames

TIAN Xiao-jing, WANG Pan-long, MA Xin-ying, LIU Lu

(Geodetic Data Processing Centre of Ministry of Natural Resources, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: The antenna phase center correction is an important error source in GNSS precise positioning. The discussion on the difference of antenna phase center model based on different reference frames and its influence on post-static positioning position parameter estimation is helpful to obtain the consistent positioning results of the reference frame and improve the positioning reliability. Firstly, the difference of satellite/ground antenna phase center correction was analyzed under different reference frames, and then the IGS core station with uniform global distribution was selected; the estimated position difference caused by satellite/ground antenna phase center correction based on different reference frames was calculated and analyzed. The results show that the site difference caused by phase center correction under different reference frames is millimetre in plane direction and centimetre in elevation direction, and the average value

收稿日期:2022-12-02;修回日期:2023-01-08 投稿网址: <http://jese.chd.edu.cn/>

基金项目:国家自然科学基金项目(41904040);

2019 年度自然资源部高层次科技创新人才培养工程杰出青年人才资助项目(12110600000018000000)

作者简介:田晓静(1987-),女,山东潍坊人,高级工程师,E-mail:908006926@qq.com。

of site difference is 7.1 mm; the influence of satellite antenna phase center correction on the estimated position of stations under different reference frames is greater than that of ground antenna phase center correction, the influence of the same type of antenna on different stations is basically the same.

Key words: GNSS precise positioning; antenna phase center correction; precise point positioning; international reference frame; site position difference; IGS station

0 引 言

高精度 GNSS 定位和测量中,使用载波相位获得厘米级甚至亚厘米级的定位精度成为现实^[1],并在形变监测、地壳运动监测及精密工程测量中得到广泛应用。精密单点定位(Precise Point Positioning, PPP)技术采用单 GNSS 接收机的载波相位和伪距观测值实现高精度定位。随着卫星轨道和钟差产品精度提高,以及多系统多频精密定位融合定位技术和精密单点定位模糊度固定技术的相关研究深入开展,以模型改正或参数估计的方法精细化地考虑卫星端、信号传播路径及接收机端有关误差的影响以及数据处理作为提升精密定位精度的主要途径,促使事后精密单点定位精度从分米级提高到亚厘米级^[2-6]。

在众多影响因素中,与卫星端和接收机端有关的天线相位中心改正误差是不可忽略的。有学者研究了该项误差对精密单点定位性能和定轨的影响。张小红等采用绝对相位中心改正(Phase Center Correction, PCC)模型提高了精密单点定位对天顶对流层延迟参数、测站高程方向、接收机钟差参数的估值精度^[7];苏牡丹等研究认为,考虑接收机天线北斗频点相位中心改正能够有效改善北斗 IGSO 和 MEO 卫星重叠轨道差异^[8];张勤等采用改进的相位中心变化(Phase Center Variation, PCV)和 z 向偏差参数估计方法,精化了 BDS-2IGSO 和 MEO 卫星 B1I/B3I 组合的天线相位中心改正模型,并利用精化后的相位中心改正模型改善了精密轨道的定轨精度,提高了精密定位浮点解在高程方向上的精度^[9]。

在多系统 GNSS 数据处理中,除了使用相同的国际地球自转和参考系统服务(International Earth Rotation Service, IERS)协议^[10]外,参考框架的统一主要反映在天线相位中心改正和框架中核心测站与解算无关的文件交换格式(Solution Independent Exchange Format, SINEX)文件中坐标的一致性。国际 GNSS 相关组织采用 IGS14. ATX 相位中心模

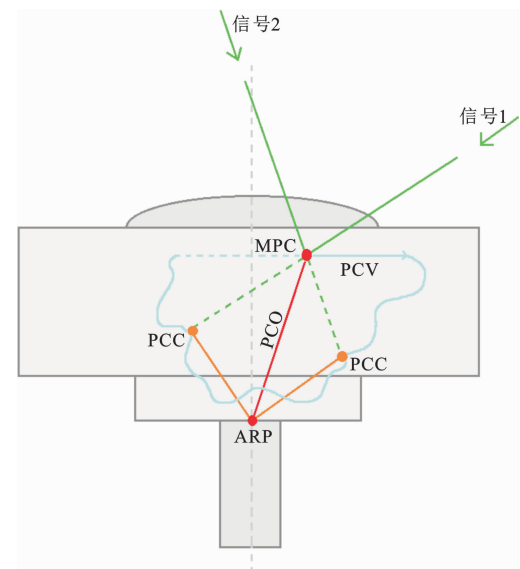
型获得了不同参考框架下的地面接收机相位中心模型引起的站点估计位置差异。陈俊平等重新估计了基于不同参考框架下的 GPS 卫星天线相位中心改正,并与国际 GNSS 服务(International GNSS Service, IGS)发布值比较,提出了一种框架一致性更高的天线相位中心参数解算方法^[11],但基于不同参考框架下的卫星/地面天线相位中心改正对精密单点定位性能的影响鲜有相关研究。

目前,天线相位中心模型主要由美国大地测量局(National Geodetic Survey, NGS)获取。自 1996 年 6 月 30 日起,IGS 分析中心开始利用相对相位中心模型来改正这一误差项。在该模型中接收机天线相位中心改正相对于 AOAD/M_T 天线测定,卫星天线相位中心改正仅采用与卫星类型相关的相位中心偏差(Phase Center Offset, PCO),而忽略卫星端相位中心变化。由于相对相位中心模型的限制,自 2006 年 11 月起,IGS 分析中心所采用的天线均进行绝对相位中心改正;2011 年 4 月 17 日,基于 ITRF2008 参考框架的 IGS08. ATX 绝对相位中心改正模型开始使用^[12];ITRF2014 框架启用后,IGS 分析中心随后发布 IGS14. ATX,并定期进行更新,天线相位中心改正与国际地球参考框架的更新是一个不断迭代的过程。本文在已有研究基础上分析基于不同参考框架下的卫星/地面天线相位中心模型差异及对事后静态精密单点定位位置参数估计的影响,有助于获得参考框架一致性的定位结果,并提升 GNSS 定位精度。

1 天线相位中心改正

高精度 GNSS 定位需要精确地确定卫星信号发射的瞬间相位中心以及接收机捕获对应信号的一瞬间相位中心。天线相位中心改正由天线相位中心偏差和天线相位中心变化构成,获得精确接收机端和卫星端天线相位中心改正模型有助于提升 GNSS 定位精度^[13-14]。由于天线本身的特性,天线相位中心在水平方向、高程方向上都与天线参考点(Antenna Reference Point, ARP)存在偏差。

接收机天线相位中心改正模型如图 1 所示,其中天线相位中心偏差为天线参考点到平均相位中心的改正,天线相位中心变化为瞬时相位到平均相位中心的改正^[15]。天线相位中心改正指瞬时相位中心到天线参考点的改正。目前,德国有 3 家机构使用不同的自动机器人在不同地点进行天线校正工作,分别是 Geo++、Institut für Erdmessung 和 State Survey Authorities of Berlin,这 3 家机构的校正结果具有很高的 consistency (误差低于 1 mm)^[16]。



MPC 表示虚拟的接收机平均相位中心 (Mean Phase Center);
图件引自文献[17]

图 1 接收机天线相位中心改正示意图
Fig. 1 View of Receiver Antenna Phase Center Correction

对于卫星天线相位中心改正模型,天线相位中心偏差为卫星质心到平均相位中心的改正,由定义在星固坐标系中的 x 向偏差 (x -offset)、 y 向偏差 (y -offset)、 z 向偏差 (z -offset) 3 个分量组成^[18]。同样,卫星也存在类似于接收机的相位中心变化。GPS 卫星相位中心变化改正模型为天底角的线性分段函数,GALILEO 卫星相位中心变化改正模型为天底角与方位角的线性分段函数,其改正值为直接作用于伪距和相位观测值的距离改正量。卫星天线相位中心偏差和相位中心变化共同组成了卫星天线相位中心改正。

2 天线相位中心改正模型比较

基于国际地球参考框架 ITRF2014,IGS 分析中心发布了新的坐标参考框架 IGS14,其相关产品也以 IGS14 参考框架作为基准,并定期进行更新。在

高精度 GNSS 定位中,国际上通常采用 IGS14. ATX 文件进行接收机天线相位中心改正。尽管 ITRF2014 参考框架与 ITRF2008 参考框架的尺度差异是可忽略的,IGS14. ATX 文件中的所有 GPS/GLONASS 卫星天线相位中心径向分量 (z -PCOs) 仍进行了更新。更新后的卫星和地面接收机天线改正 (IGS14. ATX) 同时开始生效,从 2011 年 4 月 17 日开始,IGS14 参考框架和 IGS14. ATX 文件替代了先前的 IGS08 参考框架和 IGS08. ATX 文件。相比于 IGS08 参考框架下的天线相位中心改正文件,IGS14_1632. ATX 文件增加了 17 种地基天线类型采用机器人标定的绝对相位中心改正值,因而在 IGS 观测网络站点中有超过 90% 的测站采用绝对相位中心改正,但仍有约 40 个测站未进行绝对相位中心改正^[19]。

2.1 卫星天线相位中心改正差异

IGS14. ATX 相位中心模型文件给出了 GPS/GLONASS/GALILEO/BDS 等卫星的天线相位中心改正值,其中公布的 GPS 卫星天线相位中心改正模型中,Block IIR 卫星的 x -offset 和 y -offset 参数在卫星发射前进行标定,其余卫星类型的 x -offset 和 y -offset 参数由卫星厂商提供,且和 IGS08. ATX 相位中心模型文件保持一致^[20]。IGS14. ATX 相位中心模型文件中增加了 BLOCK III A 类型 GPS 卫星在 L1/L2/L5 频点的相位中心改正值 (表 1)。该类型卫星不同频点的 z -offset 参数有所差异,其他类型的 GPS 卫星在 L1/L2 频点各方向的参数相同。

表 1 BLOCK III A 类型卫星的相位中心偏差
Table 1 PCO Value for a Block III A Type Satellite

GPS 频点	相位中心偏差/mm		
	x -offset	y -offset	z -offset
L1	3.8	-18.1	1 232.4
L2	3.1	-16.2	740.5
L5	3.2	-16.3	778.7

以美国大地测量局公布的 IGS08_1930. ATX 及 IGS14_2196. ATX 文件中的天线相位中心值为例,比较基于 IGS14 参考框架和 IGS08 参考框架的 GPS 卫星相位中心改正,GPS 卫星 L1 频点的 z -offset 参数差异如图 2 所示。不同参考框架下同类型卫星 z -offset 参数差异平均值为 68.1 mm,IGS14 参考框架下的 z -offset 参数均有所减小。由于 G04、G11、G14、G18、G23 卫星均为 2019~2021 年发射的 BLOCK III A 类型卫星,而 G22 卫星类型不

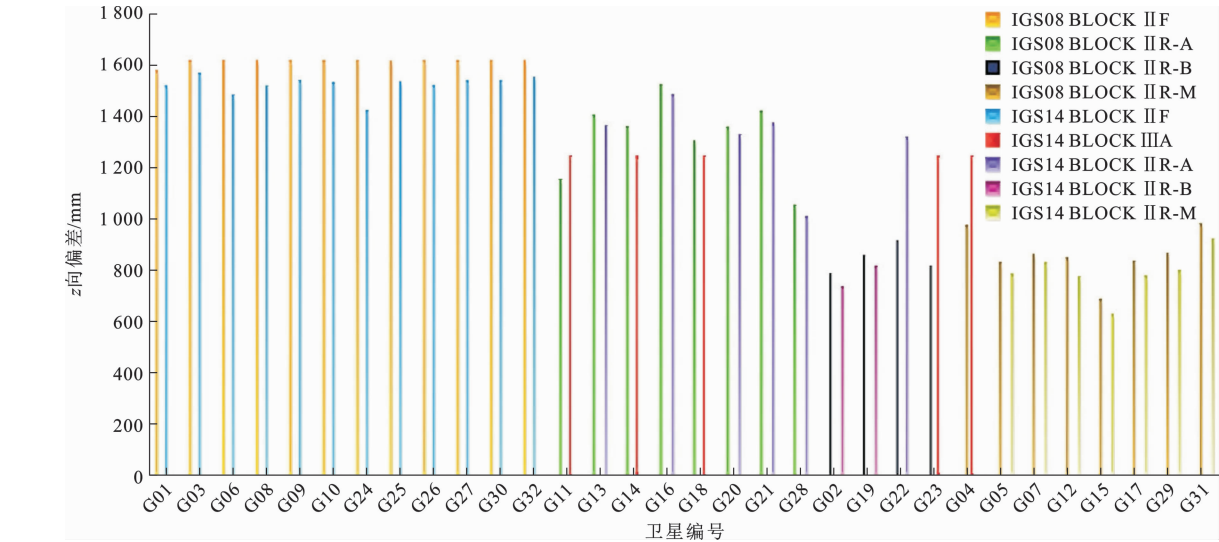


图 2 GPS 卫星 z-offset 参数分布

Fig. 2 Distribution of GPS Satellite z-offset Parameters

一致,两种参考框架下的差异值不具有可比性,所以未参与以上 z -offset 参数差异平均值统计。

2.2 地面天线相位中心改正差异

IGS14. ATX 相位中心模型文件给出了大部分测地型天线的改正值,其中超过一半的接收机天线是由德国 Geo++ 机构的测量机器人校准得到的;部分接收机天线仅有随高度角变化的改正值,没有同时含有随高度角和方位角变化的信息;GPS 和 GLONASS 相同接收机和整流罩对应两个频率的天线相位中心偏差改正相同,相位中心变化改正略有差异^[21]。由于天线改正的相位中心变化与方位角、天底角有关,在实际使用时可以利用线性内插的方法求得实际方位对应的改正值^[22]。

本文选取 6 种天线,分析基于 IGS14 和 IGS08 参考框架的天线相位中心差异。表 2 为相位中心偏差的差异值统计结果。各方向上相位中心偏差差异值为毫米级,水平方向差异值均小于 1 mm,高程方向最大差异值为 4.15 mm。因天线相位中心变化

与入射信号的方位角、天底角有关,为了更直观地展示相位中心变化差异,本文绘制了基于不同参考框架的天线相位中心变化差异(图 3)。限于篇幅限制,本文仅以 TRM59800.80 天线为例进行展示。统计分析各天线相位中心变化差异值发现:不同参考框架下的天线相位中心变化 95% 以上的差异小于 1 mm,约 3.8% 的差异介于 1~2 mm,约 1.2% 的差异大于 2 mm。同时,由图 3 可看出相位中心变化差异值随着高度角的增加而变大。

3 相位中心模型引起的站点估计位置差异

3.1 实验数据及处理策略

本文选取全球均匀分布的 IGS 核心站 2022 年第 60 个年积日至第 90 个年积日共 30 d 的 GPS 观测数据(图 4),利用 RTKLIB 软件进行精密单点定位实验。具体的数据处理策略和误差模型设置如表 3 所示。

3.2 不同参考框架下相位中心改正模型引起的站点估计位置差异

为分别比较不同参考框架下卫星/地面天线相位中心改正引起的站点估计位置差异,需要在实验数据处理中分离卫星/地面天线相位中心改正。首先,设计方案一、方案二,采用一致的地面天线相位中心改正,在卫星端分别采用 IGS08 及 IGS14 参考框架下的相位中心改正,分析不同参考框架下卫星改正对站点估计位置的影响;其次,继续设计方案三,卫星相位中心改正与方案一保持一致,地面天线相位中心改正采用 IGS08 参考框架下的改正值,与

表 2 不同参考框架下的地面天线相位中心偏差差异

Table 2 Difference of PCO of Ground Antennas Under Different Reference Frames

GPS 频点	统计项目	不同方向的地面天线相位中心偏差/mm		
		北方向	东方向	高程方向
L1	最小值	-0.52	-0.52	-2.34
	最大值	0.34	0.57	0.83
	平均值	-0.05	-0.06	-0.32
L2	最小值	-0.60	-0.21	-4.15
	最大值	0.23	0.53	0.99
	平均值	-0.05	0.02	-1.56

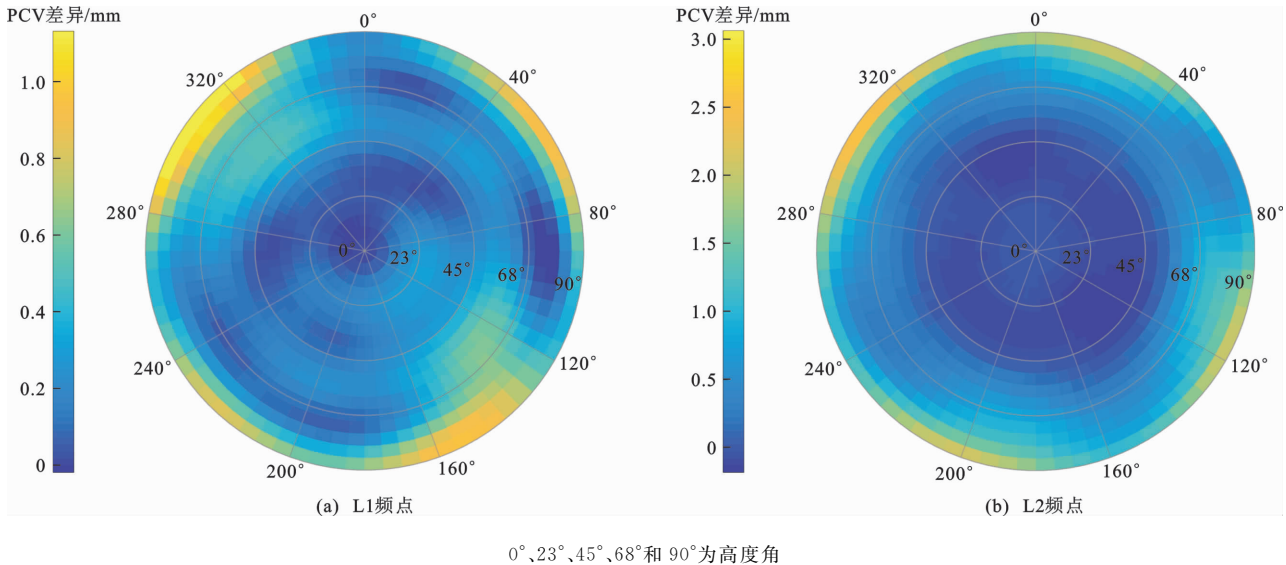


图 3 TRM59800 SCIS 天线在 IGS08_1930/IGS14_2196 中的天线相位中心变化差异

Fig. 3 Distributions of PCV Difference Between IGS08_1930 and IGS14_2196 on Antenna TRM59800 SCIS

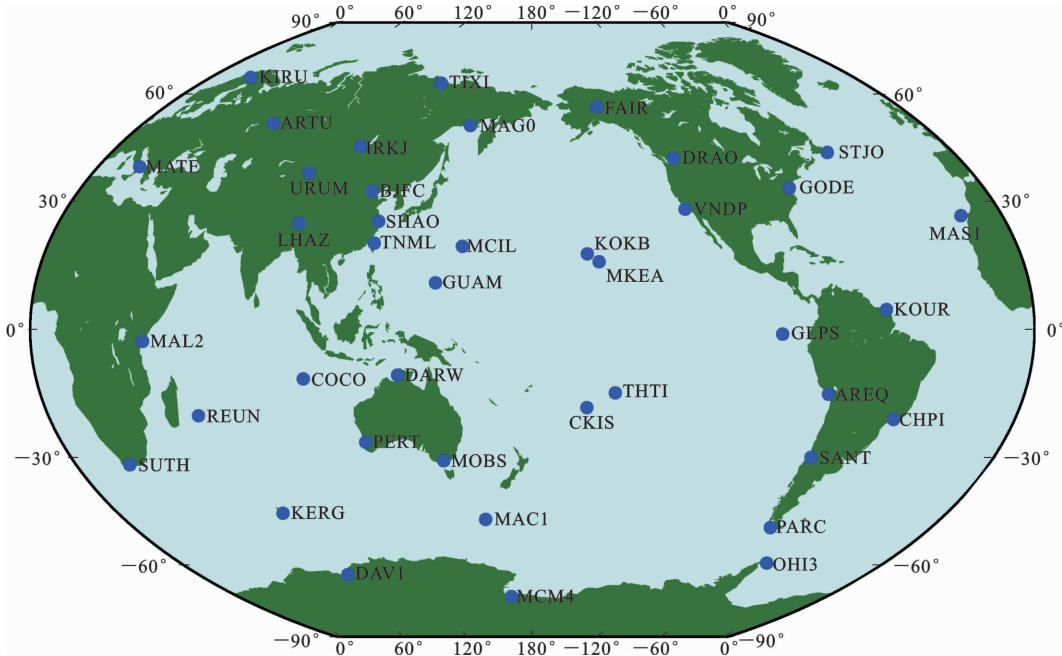


图 4 实验选取的测站分布

Fig. 4 Distribution of Selected Sites

方案一结果进行对比分析,探讨不同参考框架下地面端改正对站点的影响;最后,为综合分析不同参考框架下卫星/地面天线相位中心改正对站点的整体影响,设计方案四,卫星/地面天线相位中心改正均采用 IGS08 参考框架下的改正值。具体数据处理方案设计如下:方案一,卫星相位中心改正模型采用 IGS14_2196. ATX,地面端采用 IGS14_2196. ATX;方案二,卫星相位中心改正模型采用 IGS08_1930. ATX,地面端采用 IGS14_2196. ATX;方案三,卫星相位中心改正模型采用 IGS14_2196. ATX,地面端

采用 IGS08_1930. ATX;方案四,卫星相位中心改正模型采用 IGS08_1930. ATX,地面端采用 IGS08_2196. ATX。

分别比较方案一与方案二、方案一与方案三,剔除粗差后对每日坐标序列差异取平均值,获得不同参考框架下卫星/地面天线相位中心改正引起的站点估计位置差异。图 5 为不同参考框架下卫星天线相位中心改正模型引起的站点估计位置差异分布;图 6 为不同参考框架下地面天线相位中心改正模型引起的站点估计位置差异分布。由于 IGS14_2196.

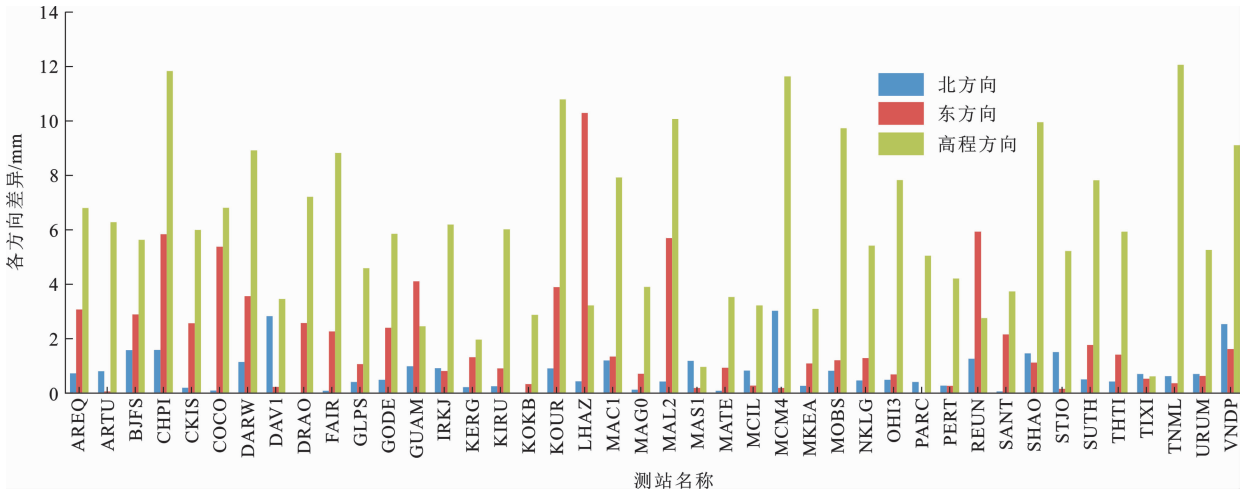


图 5 不同参考框架下的卫星天线相位中心改正模型引起的站点估计位置差异分布

Fig. 5 Distribution of Site Estimated Position Difference Caused by Satellite Antenna PCC Model Under Different Reference Frames

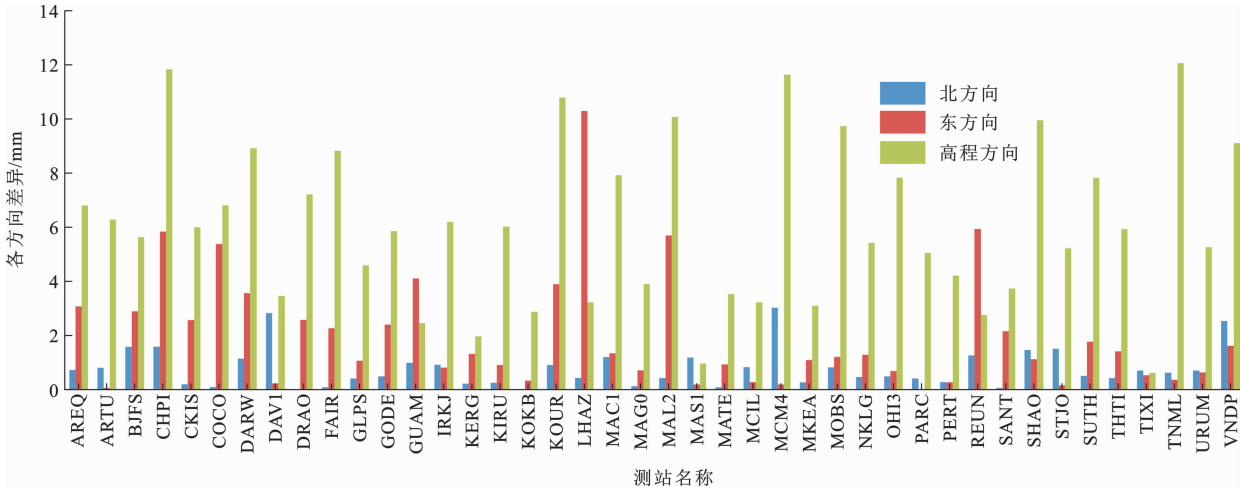


图 6 不同参考框架下的地面天线相位中心改正模型引起的站点估计位置差异分布

Fig. 6 Distribution of Site Estimated Position Difference Caused by Ground Antenna PCC Model Under Different Reference Frames

ATX 文件中部分地面天线相位中心改正仍沿用 IGS08_1930. ATX 文件中的值,所以实验中采用的观测数据有 24 个 IGS 站可用于分析不同参考框架下地面天线相位中心改正对站点的影响。

由以上比较可以发现,分别采用 IGS08 及 IGS14 参考框架下的相位中心改正进行精密单点定位实验,其引起的站点估计位置差异各不相同。比较不同参考框架下的卫星相位中心模型引起的站点位置差异,南北方向的差异为毫米级,最大约为 3 mm,东西方向的差异最大值达到 10 mm,高程方向差异相对水平方向差异较大,最大值达到 12 mm。相对于卫星相位中心改正引起的站点位置差异,地面天线相位中心改正引起的差异较小,均为毫米级,水平方向最大差异为 1.8 mm,高程方向最大差异

为 7.7 mm,其差异值跟地面站采用的天线类型有关。为分析不同天线类型对地面站的影响是否具有 一致性,将方案一与方案三的实验结果按天线类型进行分类统计分析,比较采用同一种天线的测站估计位置差异(图 7),发现同一种天线类型在不同站点的影响基本一致。

将方案一与方案四的结果进行比较,剔除粗差后对每日坐标序列差异绝对值进行统计(表 4)。站点估计位置差异在东西方向平均值为 1.0 mm,南北方向平均值为 2.0 mm,高程方向平均值为 6.3 mm;参考框架转换引起的站点位置差异平均值为 7.1 mm。因此,在 IGS08 及 IGS14 参考框架下,天线相位中心改正模型对点位的影响可达到厘米级,不同测站的差异不同,这与测站所接收到的卫星

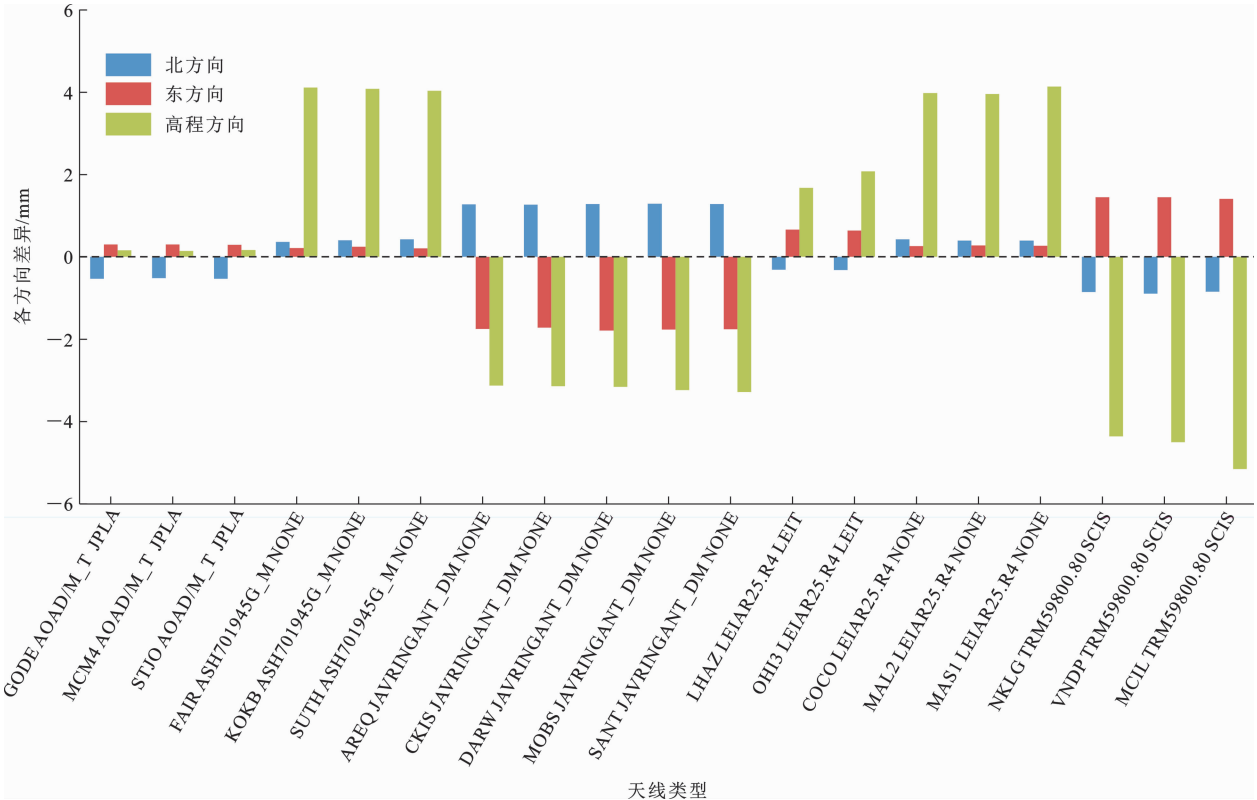


图 7 与天线类型相关的不同参考框架下相位中心改正模型引起的站点估计位置差异分布

Fig. 7 Distribution of Site Estimated Position Difference Caused by PCC Model Under Different Reference Frames Related to Antenna Types

表 3 精密单点定位处理策略
Table 3 Data Processing Strategy of Precise Point Positioning

类型	模型描述
测站	51 个全球均匀分布的 IGS 核心站
时段	2022 年第 60 个年积日至第 90 个年积日
卫星轨道	IGS 精密星历
采用间隔/s	30
截止高度角/(°)	7
解算模式	精密单点定位静态解
观测值类型	伪距+载波
电离层延迟	消电离层组合
对流层延迟	对流层延迟+对流层延迟梯度参数估计
模糊度参数	固定解
固体潮、海潮模型	IERS Convention 2010

个数及采用的地面天线类型有关。

3.3 地面天线相位中心改正模型引起的坐标参数估计差异

不同参考框架下的天线相位中心改正模型对坐标参数的影响与测站的天线类型相关,相同类型的天线对站点的影响表现为一致性。本文利用国际相关研究机构采用 IGS14. ATX 文件分析的 113 个 IGS 站由框架转换引起的地面天线相位中心变化对

表 4 不同参考框架下的卫星/地面相位中心改正模型引起的站点估计位置差异

Table 4 Site Estimated Position Difference Caused by Satellite/Ground PCC Models Under Different Reference Frames

统计项	卫星/地面相位中心改正模型引起的站点估计位置差异/mm			
	东方向	北方向	高程方向	点位
最小值	0.0	0.1	0.6	1.1
最大值	3.6	9.7	15.9	15.9
平均值	1.0	2.0	6.3	7.1

测站的影响,分析不同参考框架下地面相位中心改正模型引起的站点位置参数估计值在各方向的绝对值差异(表 5)。由表 5 可知:不同参考框架下相位中心改正模型引起的站点坐标差异绝对值在南北方向上平均为 1.2 mm,在东西方向上平均为 1.3 mm,在高程方向上平均为 4.5 mm;绝大多数天线的高程方向影响值不超过 1 cm。

将本文实验中分析的不同参考框架下 5 种地面天线相位中心改正模型引起的站点估计位置差异结果与国际上的相关研究结果^[23]进行比较(表 6)。由表 6 可知:本文计算获得的不同参考框架下地面天

表 5 不同参考框架下的地面天线相位中心改正模型引起的站点估计位置差异

Table 5 Site Estimated Position Difference Caused by Ground Antenna PCC Model Under Different Reference Frames

统计项	相位中心改正模型引起的站点估计位置差异/mm		
	北方向	东方向	高程方向
最小值	0.1	0.0	0.1
最大值	5.7	5.3	18.6
平均值	1.2	1.3	4.5

表 6 实验中不同地面天线相位中心改正模型引起的站点估计位置差异与国际上相关研究结果的比较

Table 6 Site Estimated Position Difference Caused by PCC Model of Different Ground Antennas Compared with International Research Results

天线类型	相位中心改正模型引起的站点估计位置差异/mm		
	北方向	东方向	高程方向
ASH701945G_M NONE	0.2	0.5	1.1
JAVRINGANT_DM NONE	3.2	2.8	0.5
LEIAR25. R4 LEIT	1.2	1.0	0.8
LEIAR25. R4 NONE	0.2	0.1	0.6
TRM59800. 80 SCIS	2.2	2.2	1.0

线相位中心改正模型引起的站点估计位置差异在水平方向上个别天线的差异值表现为符号相反,因而导致水平方向上最大差异值为 3.2 mm;高程方向上的差异值相近且符号一致,两者最大差异为 1.1 mm。综合来看,本文计算获得的不同参考框架下地面天线相位中心改正模型引起的站点估计位置差异与国际上的相关研究结果^[23]的影响量级是一致的。

4 结 语

- (1)不同参考框架下同类型卫星 z -offset 参数差异平均值为68.1 mm,IGS14 参考框架下的 z -offset 参数均有所减小;地面天线相位中心偏差差异值为毫米级,相位中心变化 95% 以上的差异小于 1 mm,相位中心变化差异值随着高度角的增加而变大。
- (2)基于不同参考框架的卫星/地面天线相位中心改正模型引起的站点位置差异平均值为7.1 mm。
- (3)相对于地面天线相位中心模型,不同参考框架下的卫星天线相位中心模型对测站估计位置影响更大,高程方向最大值达到 12 mm;相同类型的地面天线型号对站点的影响具有一致性。
- (4)利用精密单点定位技术进行多系统高精度

GNSS 定位应用中,为获得亚厘米级甚至毫米级的定位精度,提高定位结果的可靠性,应尽量采用参考框架一致的天线相位中心模型。

参 考 文 献 :
References :

[1] BÖDER V,MENGE F,SEEBER G,et al. How to Deal with Station Dependent Errors;New Developments of the Absolute Field Calibration of PCV and Phase-multipath with a Precise Robot[C]// ION. Proceedings of the 14th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation. Salt Lake City:ION,2001:2166-2176.

[2] 张小红,胡家欢,任晓东. PPP/PPP-RTK 新进展与北斗/GNSS PPP 定位性能比较[J]. 测绘学报,2020,49(9):1084-1100.
ZHANG Xiao-hong, HU Jia-huan, REN Xiao-dong. New Progress of PPP/PPP-RTK and Positioning Performance Comparison of BDS/GNSS PPP[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica,2020,49(9):1084-1100.

[3] 曹新运. 多系统实时精密单点定位及非差模糊度固定[J]. 测绘学报,2020,49(8):1068.
CAO Xin-yun. Multi-GNSS Real-time Precise Point Positioning and Undifferenced Ambiguity Resolution[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica,2020,49(8):1068.

[4] 周 锋,徐天河. GPS/BDS/Galileo 三频精密单点定位模型及性能分析[J]. 测绘学报,2021,50(1):61-70.
ZHOU Feng,XU Tian-he. Modeling and Assessment of GPS/BDS/Galileo Triple-frequency Precise Point Positioning[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica,2021,50(1):61-70.

[5] 周要宗,楼益栋,张卫星,等. 新一代实时对流层映射函数精度及 PPP 性能评估[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2021,46(12):1881-1888.
ZHOU Yao-zong, LOU Yi-dong, ZHANG Wei-xing, et al. On the Accuracy and PPP Performance Evaluation of the Latest Generation of Real Time Tropospheric Mapping Function[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, 46(12): 1881-1888.

[6] 张小红,任晓东,郭 斐. 顾及电离层延迟高阶项改正的精密单点定位[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2013,38(8):883-887.
ZHANG Xiao-hong, REN Xiao-dong, GUO Fei. Influence of Higher-order Ionospheric Delay Correction on Static Precise Point Positioning[J]. Geomatics and In-

- formation Science of Wuhan University, 2013, 38(8): 883-887.
- [7] 张小红,李盼,李星星,等. 天线相位中心改正模型对PPP参数估计的影响[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2011, 36(12): 1470-1473.
- ZHANG Xiao-hong, LI Pan, LI Xing-xing, et al. Influence of Antenna Phase Center Correction Model on Precise Point Positioning[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2011, 36(12): 1470-1473.
- [8] 苏牡丹,赵齐乐,郭靖,等. 接收机端天线相位中心标定及其对北斗导航卫星精密定轨的影响[J]. 测绘学报, 2018, 47(增): 78-85.
- SU Mu-dan, ZHAO Qi-le, GUO Jing, et al. Phase Center Calibration for Receiver Antenna and Its Impact on Precise Orbit Determination of BDS Satellites[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2018, 47(S): 78-85.
- [9] 张勤,燕兴元,黄观文,等. 北斗卫星天线相位中心改正模型精化及对精密定轨和定位影响分析[J]. 测绘学报, 2020, 49(9): 1101-1111.
- ZHANG Qin, YAN Xing-yuan, HUANG Guan-wen, et al. Refinement of BeiDou Satellite Antenna Phase Center Correction Model and Its Impact on Precision Orbit Determination and Positioning[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2020, 49(9): 1101-1111.
- [10] PETIT G, LUZUM B. IERS Conventions(2010)[R]. Frankfurt: IERS, 2010.
- [11] 陈俊平,胡一帆,张帅,等. 基于不同参考框架的GPS卫星天线校验[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2018, 46(10): 1448-1454.
- CHEN Jun-ping, HU Yi-fan, ZHANG Shuai, et al. Calibration of GPS Satellite Antenna Based on Different Reference Frames[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2018, 46(10): 1448-1454.
- [12] SCHMID R, DACH R, COLLILIEUX X, et al. Absolute IGS Antenna Phase Center Model IGS08. ATX[J]. Journal of Geodesy, 2016, 90(4): 343-364.
- [13] 涂锐,黄观文,邹顺. 天线相位中心偏差变化及改正模型对精密单点定位精度的影响[J]. 大地测量与地球动力学, 2010, 30(3): 113-117.
- TU Rui, HUANG Guan-wen, ZOU Shun. Study on Impact of Antenna Phase Center Offsets, Variation and Their Correction Models on GPS Precise Point Positioning Accuracy[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2010, 30(3): 113-117.
- [14] 李征航,张小红. 卫星导航定位新技术及高精度数据处理方法[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2009.
- LI Zheng-hang, ZHANG Xiao-hong. New Techniques and Precise Data Processing Methods of Satellite Navigation and Positioning[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2009.
- [15] 李晓波. GNSS天线相位中心改正模型的建立[D]. 北京: 中国地震局地震预测研究所, 2013.
- LI Xiao-bo. The Establishment of GNSS Antenna Phase Center Correction Model[D]. Beijing: Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration, 2013.
- [16] 马德强. GNSS接收机天线相位中心误差改正方法研究[D]. 西安: 长安大学, 2014.
- MA De-qiang. Study on the Correction Method of GNSS Receiver Antenna Phase Center Error[D]. Xi'an: Chang'an University, 2014.
- [17] ZHOU F, DONG D N, LI W W, et al. GAMP: An Open-source Software of Multi-GNSS Precise Point Positioning Using Undifferenced and Uncombined Observations[J]. GPS Solutions, 2018, 22(2): 33.
- [18] MONTENBRUCK O, SCHMID R, MERCIER F, et al. GNSS Satellite Geometry and Attitude Models[J]. Advances in Space Research, 2015, 56(6): 1015-1029.
- [19] FEBISCHUNG P, SCHMID R. IGS14/IGS14. ATX: A New Framework for the IGS Products[C]// AGU. AGU Fall Meeting. San Francisco: AGU, 2016: G41-A0998.
- [20] 燕兴元. 北斗卫星天线相位中心改正模型在轨标定及精密定轨研究[D]. 西安: 长安大学, 2020.
- YAN Xing-yuan. Study on the On-orbit Estimation of Antenna Phase Center Correction Model and Precision Orbit Determination of the Beidou Satellites[D]. Xi'an: Chang'an University, 2020.
- [21] 谷世铭,党亚民,王虎,等. 北斗天线相位中心偏差改正对精密单点定位的影响[J]. 测绘通报, 2020(1): 66-70.
- GU Shi-ming, DANG Ya-min, WANG Hu, et al. The Effect of Beidou Antenna Phase Center Offsets and Variations Correction on Precise Single Point Positioning[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2020(1): 66-70.
- [22] 张磊,兰孝奇,房成贺,等. 天线相位中心改正对GPS精密单点定位的影响[J]. 测绘工程, 2018, 27(3): 35-38, 45.
- ZHANG Lei, LAN Xiao-qi, FANG Cheng-he, et al. Impacts of the Antenna Phase Center and Variant on GPS Positioning[J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2018, 27(3): 35-38, 45.
- [23] International GNSS Service. Igs08_to_igs14_offsets[CP/OL]. (2016-12-05)[2023-05-15]. ftp://igs-rf.ign.fr/pub/IGS14/igs08_to_igs14_offsets.txt.