



## Galileo校正卫星天线参数特性及对PPP定位的影响

尹潇, 柴洪洲, 齐文龙, 肖国锐

引用本文:

尹潇, 柴洪洲, 齐文龙, 肖国锐. Galileo校正卫星天线参数特性及对PPP定位的影响[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2022, 47(4): 526–532.

YIN Xiao, CHAI Hongzhou, QI Wenlong, XIAO Guorui. Characteristics of Galileo Calibrated Satellite Antenna Parameter and Their Impacts on Precise Point Positioning[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2022, 47(4): 526–532.

## 相似文章推荐 (请使用火狐或IE浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

### 不同纬度区域电离层增强PPP-RTK性能分析

Performance Analysis of Ionospheric Enhanced PPP-RTK in Different Latitudes

武汉大学学报·信息科学版. 2021, 46(12): 1832–1842 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20210243>

### BDS/QZSS及其组合系统在中国和日本及周边地区的定位性能评估

Positioning Performance Evaluation of BDS/QZSS and Its Combined Systems in China, Japan and Their Peripheral Areas

武汉大学学报·信息科学版. 2020, 45(4): 574–585, 611 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20180228>

### 使用抛物面定向天线分析北斗三号星上伪距和载波测距偏差

Analysis of Pseudorange and Carrier Ranging Deviation of BDS-3 Using Parabolic Directional Antenna

武汉大学学报·信息科学版. 2021, 46(9): 1298–1308 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20200182>

### GNSS观测的2021年青海玛多地震(Mw 7.4)同震形变及其滑动分布

Coseismic Deformation and Slip Distribution of 2021 Mw 7.4 Madoi Earthquake from GNSS Observation

武汉大学学报·信息科学版. 2021, 46(10): 1489–1497 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20210301>

### SBAS星历改正数及UDRE参数生成算法分析

Analysis of SBAS Ephemeris Correction and UDRE Generation Algorithm

武汉大学学报·信息科学版. 2021, 46(1): 111–117 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20190033>



# Galileo校正卫星天线参数特性及对PPP定位的影响

尹 潇<sup>1</sup> 柴洪洲<sup>1</sup> 齐文龙<sup>1</sup> 肖国锐<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 信息工程大学地理空间信息学院,河南 郑州,450001

**摘 要:**与先期采用消电离层组合仅估计相位中心偏差(phase center offset, PCO)参数不同,欧洲的伽利略(Galileo)系统发布的地面校正的卫星天线参数基于原始频点,且包含天线相位中心变化(phase center variation, PCV)参数。为此,分析了校正的卫星天线参数特性,发现其水平向PCO与卫星类型相关,FOC(full operational capability)卫星的PCV参数较IOV(in-orbit validation)卫星稳定,仅依赖天底角。利用20个MGEX(multi-GNSS experiment)测站连续15 d的数据分析校正天线参数对双频组合/非组合精密单点定位(precise point positioning, PPP)的影响,并与消电离层天线参数的定位结果比较,结果表明,其水平方向精度基本一致,双频组合PPP高程方向的精度提高约6.3%,双频非组合高程方向的精度提高约11.9%,基于原始频点的校正天线参数在双频非组合PPP定位中表现出更优的自洽性。

**关键词:**卫星天线参数;原始频点;精密单点定位;Galileo

**中图分类号:**P228

**文献标志码:**A

准确的卫星天线参数是进行高精度大地测量的重要前提。卫星定轨以卫星质心(center of mass, COM)为基准,而距离观测则基于相位中心(antenna phase center, APC),二者的偏差为相位中心偏差(phase center offset, PCO)。另外,卫星信号的瞬时相位中心相对于平均相位中心存在高度角和方位角相关的变化(phase center variations, PCV)<sup>[1-2]</sup>,PCO和PCV即为卫星天线参数。其中,指向地心方向的PCO称为垂向PCO(zenithal PCO, z-PCO),水平向PCO(horizontal PCO, h-PCO)的指向由国际全球导航卫星系统服务组织(International Global Navigation Satellite System Service, IGS)定义<sup>[3]</sup>。

伽利略(Galileo)系统的IOV(in-orbit validation, IOV)卫星最初采用协议PCO,FOC(full operational capability)卫星采用初步估计PCO<sup>[4]</sup>。德国地学研究中心(Deutsches GeoForschungs Zentrum, GFZ)和德国宇航中心(Deutsches Zentrum für Luft-und Raumfahrt, DLR)利用全球跟踪站数据,采用E1和E5a消电离层(ionospheric free, IF)组合重新估计了Galileo各类型卫星的

PCO,并被IGS先期采用,明显提高了卫星定轨精度<sup>[5]</sup>。最近,欧洲卫星导航系统局(European GNSS Agency, GSA)发布了Galileo卫星微波暗室校正的PCO和PCV<sup>[6]</sup>,其不再依赖于地面跟踪站,且基于原始频点,已被IGS分析中心采纳。

目前,针对校正的天线参数特性及其对定位定轨影响的研究较少,文献[7-8]主要评估了其对于卫星定轨的影响,发现重叠轨道差异小于1 mm,对定轨的影响基本可以忽略。基于此,本文主要分析其对精密定位的影响。首先给出地面校正卫星天线参数的原理、特性及精密定位中的改正方法;然后基于MGEX(multi-GNSS experiment)测站数据分析校正天线参数对双频组合/非组合精密单点定位(precise point positioning, PPP)的影响,评估了测站高程及其强相关的接收机钟差、天顶对流层延迟,并对接收机端L2天线参数代替L5天线参数引起的定位误差进行了分析。

## 1 卫星天线校正原理

卫星天线地面校正是在微波暗室进行,待测

收稿日期:2020-05-01

项目资助:国家自然科学基金(41574010,41604013)。

第一作者:尹潇,博士,主要从事GNSS精密定轨和定位研究。yinxiaotongji@163.com

通讯作者:柴洪洲,博士,教授。chaih1969@163.com

天线的参考点 (antenna reference point, ARP) 与转台中心一致, 远场可测不同高度角和方位角的延迟<sup>[9-10]</sup>。为方便表达,  $z$  包含天底角和方位角, 由转台精确控制。PCO 至远处球面的距离为:

$$R(z) = r(z) - d \cdot r(z) \quad (1)$$

式中,  $r(z)$  为 ARP 至远处球面距离;  $d$  为 PCO 三维矢量, 为待求参数;  $r(z)$  为 ARP 至远处球面距离的三维矢量。为求得 PCO 矢量, 给出约束条件如下:

$$\sum_{Z_1}^{Z_2} [R(z) - r(z) + d \cdot r(z)]^2 = \min \quad (2)$$

式中,  $Z_1$  和  $Z_2$  为观测方向的变化范围。由此得到最优拟合球面的球心坐标即为 PCO 参数, 观测距离残差则为 PCV 参数。因此, 卫星天线 PCO 参数和 PCV 参数存在明显的强相关, 表现为  $z$ -PCO 与 PCV 的天底角部分相关,  $h$ -PCO 和 PCV 的方位角部分相关。为便于距离改正, 一般给出天底角及方位角的格网 ( $z_i$ ) PCV 值, 由内插得到天底角及方位角  $z$  的 PCV, 计算如下:

$$\text{PCV}(z) = \frac{z - z_i}{z_{i+1} - z_i} \cdot (\text{PCV}(z_{i+1}) - \text{PCV}(z_i)) + \text{PCV}(z_i) \quad (3)$$

式中,  $\text{PCV}(z_i)$  为格网点  $z_i$  的值。由此得到由卫星天线 PCO 和 PCV 所引起的测站至卫星的距离改正  $\Delta d(z)$  为:

$$\Delta d(z) = \text{PCV}(z) + \text{PCO} \cdot e_r^s \quad (4)$$

式中,  $e_r^s$  为星固系下接收机至卫星方向的单位矢量;  $\text{PCO}$  为星固系卫星天线 PCO 矢量。E1、E5a 消电离层组合时, 卫星天线 PCO 计算如下:

$$\text{PCO}_{\text{IF}} = \frac{\gamma}{\gamma - 1} \text{PCO}_{\text{E1}} - \frac{1}{\gamma - 1} \text{PCO}_{\text{E5a}} \quad (5)$$

式中,  $\gamma = f_1^2 / f_5^2$ ,  $f$  为对应频点的频率。

IGS 天线文件采用估计的天线参数时, 各个频点共用一套参数, 不加以区别。校正的天线参数则基于原始频点, 每个频点参数不一样, 二者的具体区别见表 1。IGS 最新天线文件采用校正的天线参数时, 已转换到协议的以 COM 为参考点的天线参考系。

## 2 校正天线参数特性

为评估校正天线参数的特性, 基于 IGS14\_2062 天线表文件, 根据式 (5) 计算对应消电离层组合 E1/E5a 的各卫星的  $h$ -PCO, 结果见表 2。从表 2 可以看出, 同类型卫星的  $h$ -PCO 差异基本

在  $\pm 1$  cm 以内, 与卫星类型明显相关, 同类型可以取均值, 从而为新发射的同类型卫星提供较为准确的天线参数。

表 1 校正天线与估计天线比较

Tab.1 Comparison of Calibrated Antenna and Estimated Antenna

天线参数	校正天线	估计天线
数据源	地面	在轨
类型	每颗卫星	IOV、FOC
频率	每个频率	消电离层
PCV	天底/方位角	PCV 为 0
参考点	ARP	COM
坐标框架	卫星参考系	天线参考系
姿态	常规+偏航	常规

表 2 不同卫星的  $h$ -PCO/cm

Tab.2 Horizontal PCO of Different Satellites/cm

卫星类型	频率	$x$ 方向	$y$ 方向
IOV 卫星	E1	-17.2~-16.9	2.8~3.0
	E5a	-17.1~-17.0	2.6~2.8
	E1/E5a	-17.4~-16.9	3.0~3.4
FOC 卫星	E1	11.6~12.7	-1.1~-0.8
	E5a	11.7~12.7	-1.1~-0.8
	E1/E5a	11.4~12.6	-1.3~-0.6

与采用 E1/E5a 估计的天线参数<sup>[5]</sup>对比, IOV 卫星  $x$ 、 $y$  方向 PCO 的差异分别为 -0.3 cm、0.2 cm, FOC 卫星对应的差异分别为 -0.03 cm、0.03 cm, FOC 卫星的吻合度优于 IOV 卫星。

图 1 给出了校正天线 (E1/E5a) 的  $z$ -PCO 与 IGS08.atx 文件估计的  $z$ -PCO 的差异。可以看出, 校正天线的  $z$ -PCO 与卫星类型无关, 呈现随机性, 而估计天线的  $z$ -PCO 与类型强相关, 统计二者平均差异约为 -20 cm, 这主要因为估计天线参数时不顾及 PCV, 而 PCV 与  $z$ -PCO 强相关。

以 IOV 卫星 E11 和 FOC 卫星 E09 为例, 统计 IGS14\_2062 天线表文件中各卫星的 PCV, 结果如图 2 所示。从图 2 可以看出, FOC 卫星 PCV 仅与天底角相关, 与方位角基本无关; IOV 卫星在天底角小于  $10^\circ$  时, 也仅与天底角相关, 而在天底角大于  $10^\circ$  时, 在方位角为  $30^\circ$ 、 $150^\circ$  和  $270^\circ$  时呈现明显的方位角正相关特性, 方位角为  $90^\circ$ 、 $210^\circ$  和  $330^\circ$  时呈现明显的方位角负相关特性, 这可能主要与 IOV 卫星天线的物理结构有关<sup>[11]</sup>。

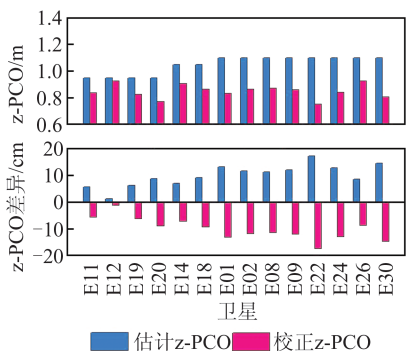


图1 校正天线与估计天线的 z-PCO 对比  
Fig.1 z-PCO Difference Between Calibrated Antenna and Estimated Antenna

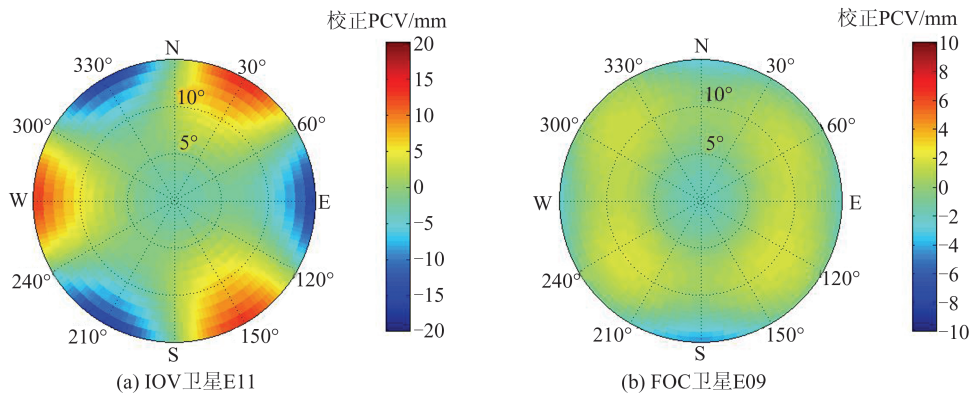


图2 校正天线 PCV 图  
Fig.2 PCV Map of Calibrated Antenna

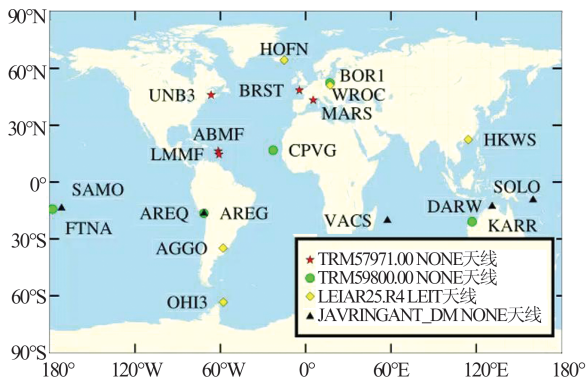


图3 测站分布  
Fig.3 Distribution of Stations

选择 2019 年年积日 (day of year, DOY) 152—166 共计 15 d 的数据,采样间隔为 30 s,静态精密单点定位参数设置<sup>[12]</sup>见表 3。

目前,GFZ 精密轨道及钟差产品采用的是校正的天线参数。但文献[8]发现其与估计天线参数解算的轨道及钟差差异可以忽略。因此,采用校正天线参数或估计天线参数定位时,可采用一致的精密轨道<sup>[13-14]</sup>。统计时,以 IGS 发布的单天解 SNX 文件中的坐标为真值,以单天最后历元坐标为定位结果。

### 3 校正天线参数对 PPP 影响分析

#### 3.1 数据处理策略

为评估校正天线参数对 PPP 定位精度的影响,选取 MGEX 中可跟踪 Galileo 卫星的测站。同时,为分析不同接收机天线类型对定位的影响,选取 MGEX 中常用的 4 类天线类型,包括 TRM57971.00 NONE 天线、TRM59800.00 NONE 天线、LEIAR25.R4 LEIT 天线和 JAVRINGANT\_DM NONE 天线,实验测站分布如图 3 所示,共计 20 个测站。

表3 静态精密单点定位参数设置

Tab.3 Parameters Setting for Static PPP

参数	处理方法
卫星轨道和钟差	GFZ 精密轨道和钟差
截止高度角/(°)	15
电离层误差	E1/E5a 双频;无电离层组合
对流层误差	SAAS+参数估计
固体潮、海潮	IERS 协议
相对论、地球自转	模型改正
测站坐标	估计
接收机钟差	估计,白噪声
模糊度	浮点解
天线参数	校正值(或估计值)

#### 3.2 双频组合 PPP 精度分析

采用 E1 和 E5a 消电离层组合进行 PPP 解算,分别采用估计天线 PCO 参数和校正天线 PCO 参数。每个测站统计 15 d 的均值,得到东(east, E)、北(north, N)、高程(up, U)3 个方向的定位结果,如图 4 所示。从图 4 可以看出, E、N 方向的差异在 ±5 mm 以内,所有测站差值的均值在零附近,不同天线 PCO 参数对平面方向基本无影响; U 方向的差异在 ±10 mm 以内,不同天线 PCO 参数



引起 U 方向系统差;不同卫星天线 PCO 参数定位结果都与接收机天线类型无关。

校正天线 PCO 与估计天线 PCO 的差异所引起的高程方向系统差,主要是因为二者垂向 z-PCO 存在系统性偏差。根据测站高程与 z-PCO 的关系,利用经验公式<sup>[15-17]</sup>计算高程方向的偏差为:

$$\Delta h \approx -k \times \Delta \bar{z} \quad (6)$$

式中,  $k=0.05$ ;  $\Delta h$  为测站高程偏差;  $\Delta \bar{z}$  为所有卫星的平均 z-PCO 差值。代入 z-PCO 平均差值(约  $-20$  cm), 可根据式(6)计算测站高程差值约为  $10$  mm, 这与图 4 中高程方向统计的系统偏差  $8.5$  mm 基本相符, 其可引起约  $1.6 \times 10^{-9}$  的框架尺度差异。进一步分析校正天线 PCO 参数对 PPP 其他解算参数的影响, 每个测站每天统计一次接收机钟差之差和天顶对流层延迟之差, 得到采用校正天线 PCO 与估计天线 PCO 解算接收机钟差、天顶对流层延迟的差异, 结果如图 5 所示。

由图 5 可以看出, 每个测站 15 d 接收机钟差之差的均值基本在  $-20$  cm 左右, 说明 z-PCO 的差值主要被接收机钟差参数吸收; z-PCO 对天顶

对流层延迟的影响远小于对测站高程和接收机钟差的影响, 最大的差异小于  $2$  mm, 15 个测站的平均差异为  $-0.8$  mm, 这与文献[15]计算的不同 GPS 卫星天线 PCO 引起的天顶对流层差异基本一致。

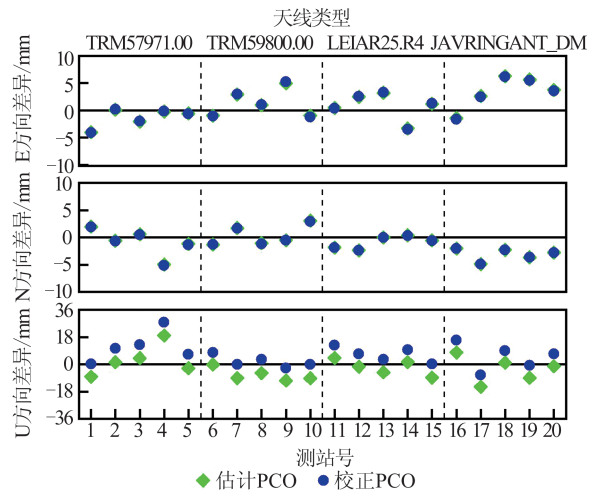


图 4 使用校正 PCO 与估计 PCO 的定位差异  
Fig.4 Positioning Differences Using Calibrated PCO and Estimated PCO

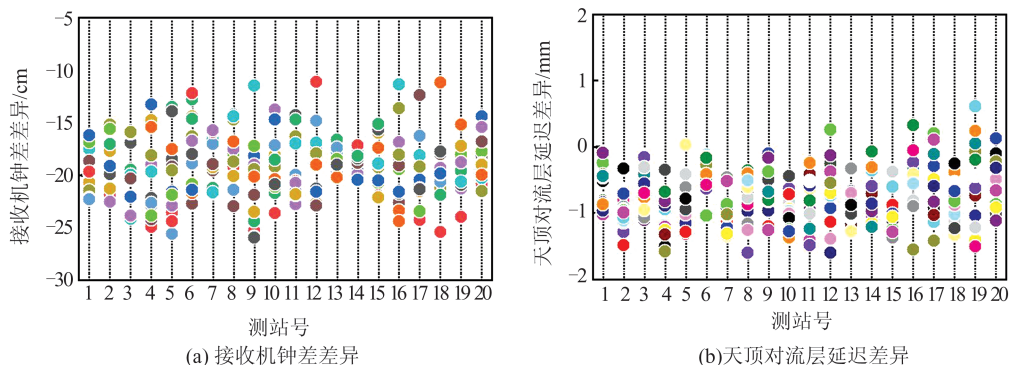


图 5 使用校正 PCO 与估计 PCO 解算接收机钟差、天顶对流层延迟的差异

Fig.5 Differences of Receiver Clock Offset and Zenith Tropospheric Delay Using Calibrated PCO and Estimated PCO

本文采用校正天线的 PCO 与 PCV 重新双频消电离层组合 PPP 解算, 并与仅采用校正 PCO 参数的定位结果对比, 给出测站 AGGO 和 AREG 在 DOY156 的定位时间序列, 如图 6 所示。从图 6 可以看出, 三维位置精度收敛至  $5$  cm 稳定后, 仅采用 PCO 定位结果出现明显的系统偏差。因此, 由于 PCV 与 z-PCO 的强相关性, 使用校正的天线参数时, 应当将 PCO 和 PCV 一起使用。

统计 20 个测站采用校正天线参数进行双频组合 PPP 得到的 3 个方向定位偏差绝对值的平均值, 并与采用估计天线参数的定位结果进行对比, 结果见表 4。

由表 4 可以看出, E、N 方向精度一致, 校正天线参数的 U 方向提高约  $0.4$  mm, 改善  $6.3\%$ , 说明

校正天线参数可以改善高程精度, 确定更优的框架尺度。

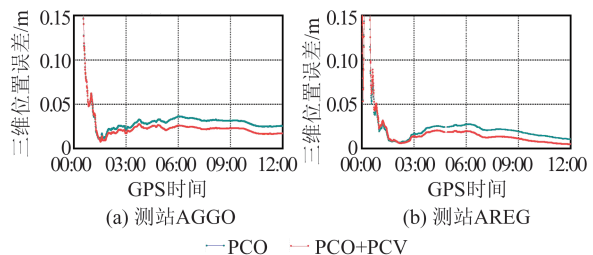


图 6 PCV 参数对双频组合 PPP 的影响

Fig.6 PCV Effect on Ionospheric-Free PPP

### 3.3 双频非组合 PPP 精度分析

在采用 E1 和 E5a 进行非组合 PPP 解算、电离层作为参数进行估计时, 有两种卫星天线参数处

理方式:(1)校正的天线参数,基于各自频点;  
(2)估计的天线参数,各频点一样<sup>[18-19]</sup>。每个测站  
每天统计一组定位结果,取15 d的平均值作为该  
测站的最终结果,高程方向的对比见图7。

表4 不同天线参数双频组合PPP比较

Tab.4 Comparison of Ionospheric-Free PPP Based on  
Different Antenna Parameters

天线参数	平均偏差/mm		
	E方向	N方向	U方向
估计天线	2.4	1.9	6.3
校正天线	2.4	1.9	5.9

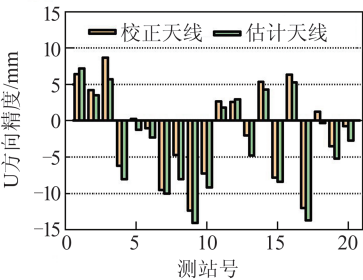


图7 不同天线参数双频非组合PPP高程比较  
Fig.7 Comparison of Original Dual-Frequency PPP  
Elevation Based on Different Antenna Parameter

从图7可以看出,负向偏差时,采用校正天线  
参数的测站高程偏差更小,精度更优;正向偏差  
时,除测站3的其他测站偏差大小相仿,这可能与  
测站3的SNX加权解有关。

统计了所有测站采用校正天线参数进行双频  
非组合PPP得到的3个方向定位偏差绝对值的平  
均值,并与采用估计天线参数的定位结果进行对  
比,结果见表5。由表5可以看出,E和N方向精  
度一致,校正天线参数的U方向提高约0.7 mm,  
改善11.9%,这主要是因为双频非组合PPP定位  
时,校正天线参数基于各自频点,自洽性更优,相  
比估计的天线模型不同频点仅采用一套参数,其  
可以有效改善高程的精度。

表5 不同天线参数双频非组合PPP比较

Tab.5 Comparison of Original Dual-Frequency PPP  
Based on Different Antenna Parameters

天线参数	平均偏差/mm		
	E方向	N方向	U方向
估计天线	2.5	2.0	5.9
校正天线	2.5	2.0	5.2

3.4 接收机端L5天线参数分析

当前IGS天线文件只给出接收机L1和L2的

校正参数,对于Galileo卫星导航系统,有必要分  
析L5(E5a)天线参数的特性,进而与校正的卫星  
端的E5a天线参数自洽。对比欧洲永久GNSS观  
测网(European Permanent Network, EPN)天线  
文件epn\_14.atx中21个LEIAR25.R4 LEIT天线的  
L2和L5的z-PCO,结果如图8所示。从图8可以  
看出,L2与L5的z-PCO呈现约5 mm的系统差  
异(图8(a)),L1/L2与L1/L5消电离层组合  
z-PCO的差异为-2~ -5 mm,平均约为-4 mm,  
个别最大可达-8 mm(图8(b))。

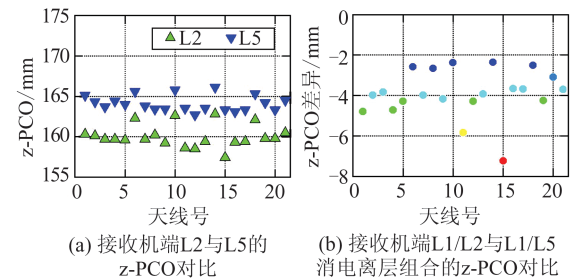


图8 接收机端L2与L5的z-PCO比较  
Fig.8 Comparison of z-PCO of L2 and L5 in Receiver

计算EPN中21个LEIAR25.R4 LEIT天线的  
平均天线参数,使用该天线类型的4个测站重  
新进行双频组合PPP定位,卫星端采用校正的  
天线参数,接收机端天线参数分别采用L1/L2和  
L1/L5。图9给出了测站HOFN和WROC高程  
方向的差值,可以看出,两个测站L1/L5出现约  
5 mm的系统差,这主要因为L5与L2的z-PCO不  
同。因此,只有校正了IGS测站接收机L5的天  
线参数,Galileo定义的框架尺度才更准确。

4 结 语

本文介绍了地面校正Galileo卫星天线PCO  
和PCV的原理,详细分析了校正的天线参数特  
性,并全面评估了其对双频组合/非组合PPP定  
位精度的影响,得出以下结论:(1)校正的卫星  
天线h-PCO呈现明显的类型相关,与估计天线的  
差异在毫米级;FOC卫星的PCV仅与天底角相关,  
IOV卫星天底角较大时,也与方位角相关;校正  
天线与估计天线的z-PCO差异主要被接收机钟  
差吸收,引起的尺度差异约 $1.6 \times 10^{-9}$ ,天顶对流  
层差异约-0.8 mm。(2)双频组合PPP定位时,采  
用校正的PCO和PCV,高程方向可改善约  
6.3%;双频非组合PPP定位时,采用校正天线参  
数,高程方向可改善约11.9%,双频非组合PPP  
采用自洽的原始频点天线参数,高程方向精度

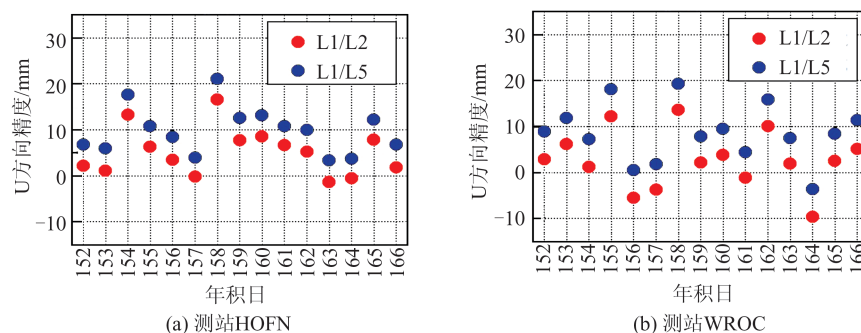


图9 L1/L2与L1/L5高程方向精度比较

Fig.9 Elevation Precision Comparison of L1/L2 and L1/L5

更优。(3)接收机端L2代替L5可引起约5 mm的系统差异,因此校正接收机端L5,并与卫星端E5a自洽,是进一步提高Galileo框架尺度的重要前提。

### 参 考 文 献

- [1] Schmid R, Rothacher M. Estimation of Elevation-Dependent Satellite Antenna Phase Center Variations of GPS Satellites [J]. *Journal of Geodesy*, 2003, 77(7): 440-446
- [2] Hofmann-Wellenhof B, Lichtenegger H, Wasle E. GNSS-Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and More [M]. New York: Springer, 2008
- [3] Montenbruck O, Schmid R, Mercier F, et al. GNSS Satellite Geometry and Attitude Models [J]. *Advances in Space Research*, 2015, 56(6): 1015-1029
- [4] Rizos C, Montenbruck O, Weber R, et al. The IGS MGEX Experiment as a Milestone for a Comprehensive Multi-GNSS Service [C]// The ION Pacific PNT Meeting, Hawaii, USA, 2013
- [5] Steigenberger P, Fritsche M, Dach R, et al. Estimation of Satellite Antenna Phase Center Offsets for Galileo [J]. *Journal of Geodesy*, 2016, 90(8): 773-785
- [6] Rafael L. Galileo Performance Update [C]// United Nations Workshop on the Applications of GNSS, Falda Del Carmen, Argentina, 2018
- [7] Villiger A, Prange L, Dach R, et al. Consistency of Antenna Products in the MGEX Environment [C]// IGS workshop, Wuhan, China, 2018
- [8] Li X, Yuan Y, Huang J, et al. Galileo and QZSS Precise Orbit and Clock Determination Using New Satellite Metadata [J]. *Journal of Geodesy*, 2019, 93(8): 1123-1136
- [9] Gonzalez F, Sollner M, Schonemen E, et al. Phase Centre Calibration of the Galileo Satellite Navigation Antenna [C]// IGS Workshop, Paris, France, 2017
- [10] Dong Danan, Chen Junping, Wang Jiexian. GNSS High Precision Positioning Principle [M]. Beijing: Science Press, 2018 (董大南, 陈俊平, 王解先. GNSS高精度定位原理 [M]. 北京: 科学出版社, 2018)
- [11] Montesano A, Montesano C, Caballero R, et al. Galileo System Navigation Antenna for Global Positioning [C]// The 2nd European Conference on Antennas and Propagation, Edinburgh, UK, 2007
- [12] Gu Shengfeng. Research on the Zero-Difference Un-combined Data Processing Model for Multi-Frequency GNSS and Its Applications [D]. Wuhan: Wuhan University, 2013 (辜声峰. 多频GNSS非差非组合精密数据处理理论及其应用 [D]. 武汉: 武汉大学, 2013)
- [13] Hu Yifan, Zhang Shuai. The Impacts of Different Satellite Antenna Parameters on BDS Precise Orbit Determination and Precise Point Positioning Accuracy [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2019, 48(7): 908-918 (胡一帆, 张帅. 不同卫星天线参数对BDS定轨定位精度的影响 [J]. 测绘学报, 2019, 48(7): 908-918)
- [14] Chen Junping, Hu Yifan, 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 (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)
- [15] Zhu S Y, Massmann F H, Yu Y, et al. Satellite Antenna Phase Center Offsets and Scale Errors in GPS Solutions [J]. *Journal of Geodesy*, 2003, 76(11): 668-672
- [16] Collilieux X, Schmid R. Evaluation of the ITRF2008 GPS Vertical Velocities Using Satellite Antenna Z-Offsets [J]. *GPS Solutions*, 2013, 17(2): 237-246

- [17] Schmid R, Dach R, Collilieux X, et al. Absolute IGS Antenna Phase Center Model Igs08.atx: Status and Potential Improvements[J]. *Journal of Geodesy*, 2016, 90(4): 343-364
- [18] Schmid R, Steigenberger P, Gendt G, et al. Generation of a Consistent Absolute Phase-Center Correction Model for GPS Receiver and Satellite Antennas [J]. *Journal of Geodesy*, 2007, 81(12): 781-798
- [19] Ma Yang, Ou Jikun, Yuan Yunbin, et al. Estimation of GPS Antenna Phase Center Variation and Its Effect on Precise Orbit Determination of LEOs[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(7): 894-900 (马洋, 欧吉坤, 袁运斌, 等. 导航卫星天线相位中心变化估计及对 LEO 精密定轨影响[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2015, 40(7): 894-900)

## Characteristics of Galileo Calibrated Satellite Antenna Parameter and Their Impacts on Precise Point Positioning

YIN Xiao<sup>1</sup> CHAI Hongzhou<sup>1</sup> QI Wenlong<sup>1</sup> XIAO Guorui<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of Surveying and Mapping, Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China

**Abstract: Objectives:** The ground calibrated antenna phase center offset (PCO) and phase center variation (PCV) for European global navigation satellite Galileo have been released. Compared with in-orbit estimated PCO and PCV, the calibrated counterparts are frequency-dependent and satellite-dependent. The characteristics of calibrated satellite antenna parameters are needed to be analyzed. **Methods:** Firstly, we compare the antenna parameter of different type satellites, in-orbit validation (IOV) satellite and full operational capability (FOC) satellite. Secondly, we use data from 20 MGEX (multi-GNSS experiment) stations for 15 consecutive days, the effects of calibrated antenna parameters on dual-frequency combined/uncombined precise point positioning (PPP) are studied. **Results:** Experiment results show that the horizontal PCO (h-PCO) are type-dependent, PCV of FOC satellite are more stable than those of IOV satellite and only dependent on the nadir angle. Compared with the positioning results of estimated antenna parameters, the positioning accuracy in horizontal direction is equivalent. The height accuracy based on ionospheric-free combination observation is improved by about 6.3%, those based on dual-frequency uncombined observation is improved by about 11.9%. **Conclusions:** The calibrated antenna parameters based on the individual frequency show better self-consistency in dual-frequency uncombined PPP.

**Key words:** satellite antenna parameter; individual frequency; PPP; Galileo

**First author:** YIN Xiao, PhD, specializes in the GNSS precise orbit determination and positioning. E-mail: yinxiaotongji@163.com

**Corresponding author:** CHAI Hongzhou, PhD, professor. E-mail: chaih1969@163.com

**Foundation support:** The National Natural Science Foundation of China(41574010, 41604013).

**引文格式:** YIN Xiao, CHAI Hongzhou, QI Wenlong, et al. Characteristics of Galileo Calibrated Satellite Antenna Parameter and Their Impacts on Precise Point Positioning[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(4): 526-532. DOI:10.13203/j.whugis.20190398 (尹潇, 柴洪洲, 齐文龙, 等. Galileo 校正卫星天线参数特性及对 PPP 定位的影响[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2022, 47(4): 526-532. DOI:10.13203/j.whugis.20190398)