

文章编号: 1674-9057(2014)03-0495-04

doi:10.3969/j.issn.1674-9057.2014.03.014

# GPS 接收机天线相位中心随不同截止卫星高度角变化对基线的影响

任超, 黄惠<sup>b,c</sup>

(桂林理工大学 a. 广西矿冶与环境科学实验中心; b. 广西空间信息与测绘重点实验室;  
c. 测绘地理信息学院, 广西 桂林 541004)

**摘要:** 分析了不同卫星高度角的观测值对接收机天线相位中心改正和基线解算的影响, 理论分析和实验结果表明: 对于中长距离的基线, 采用天线指向北方向的方法仍不能完全消除天线相位偏心差造成的误差影响, 因此该因素必须在数据处理中加以考虑。

**关键词:** 卫星高度角; 相位中心; 偏心差; 影响; 基线

**中图分类号:** P228.43

**文献标志码:** A

要获取高精度的 GPS 定位结果, 需要消除多种误差的影响。天线相位中心变化, 也称为天线相位偏心差, 便是其中重要误差之一。目前虽有一些研究者对此进行了研究, 如吴正等经研究表明: 地面接收机天线方位角的变化对 U 方向的基线解算结果有较大影响, 在高精度 GPS 测量中, 必须进行天线方位角的变化改正<sup>[1]</sup>。魏锦德等认为在高精度的 GPS 定位测量中, 尤其是 GPS 高程测量, 必须分别对不同波段下的天线相位中心进行检测和改正<sup>[2]</sup>。张小红等通过实例分析得到结果表明, 使用绝对天线相位中心模型估计优于相对天线相位中心改正模型<sup>[3]</sup>。文献 [1-3] 较为系统地分析了天线相位偏心差的校正方法及其对定位的影响, 而实际上, 对于中长基线, 基线两端点对于同一卫星的卫星高度角不同, 天线相位中心偏心差的数值也不同。虽然在实际观测工作中, 通常采用天线指向北方向的方法来消除相对定位中的天线相位偏心差, 但是, 从应用效果来看, 这种方法消除天线相位偏心差的效果不能满足高精度定位的要求, 需要进一步研究。

## 1 天线相位中心改正公式与模型

### 1.1 天线相位中心改正的计算公式

对天线相位中心进行改正, 主要包括两部分内容: 相对于天线物理参考点的平均天线相位中心偏差 (phase center offset, PCO) 和相对于天线平均相位中心而言的天线相位中心变化 (phase center variation, PCV), 如图 1<sup>[4]</sup>。

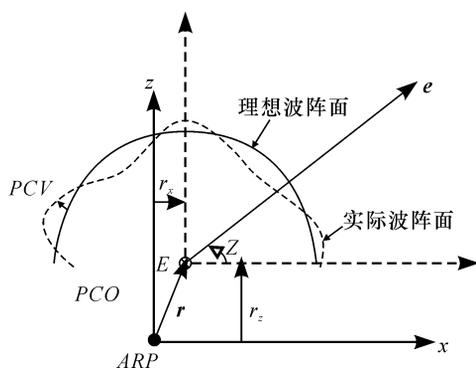


图 1 天线相位中心改正模型

Fig. 1 Antenna phase center correction model

收稿日期: 2013-09-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(41071294); 广西自然科学基金项目(2014GXNSFAA118288); 广西空间信息与测绘重点实验室主任基金项目(1207115-09); 山东省基础地理信息与数字化重点实验室基金项目(SD080708); 广西八桂学者项目

作者简介: 任超(1974—), 男, 博士, 副教授, 研究方向: GNSS 高精度数据处理及其应用, renchao@glut.edu.cn。

引文格式: 任超, 黄惠. GPS 接收机天线相位中心随不同截止卫星高度角变化对基线的影响 [J]. 桂林理工大学学报, 2014, 34(3): 495-498.

在 GPS 定位中, 天线相位中心的改正公式为<sup>[5]</sup>

$$\Delta\varphi(\alpha, z) = \Delta\varphi'(\alpha, z) + \Delta r \cdot \mathbf{e}, \quad (1)$$

式中:  $\Delta\varphi(\alpha, z)$  为总的相位中心改正数;  $\alpha, z$  分别是观测卫星的方位角和天顶角;  $\Delta\varphi'(\alpha, z)$  是相位中心变化的函数模型;  $\mathbf{e}$  为天线到卫星方向的单位向量;  $r$  是相对于参考点的平均相位中心偏移, 这个向量是唯一的, 并通过施加的条件来确定<sup>[5]</sup>:

$$\int_{\alpha=0}^{2\pi} \int_{Z=0}^{Z_{\max}} \Delta\varphi(\alpha, z) \sin z \, dz \, d\alpha = \min, \quad (2)$$

(e. g.  $Z_{\max} = 75^\circ$ ).

该条件即表示为在任意方向上对应于任意天顶距的总相位中心改正数最小。对于不同的天线, 其参考点的位置是不同的, 一般 IGS 都会在相应的天线文件 (RINEX 格式或者 IGS 标准) 里发布。当前, IGS 是以  $5^\circ$  的间隔给出天线相位中心改正值, 对于非格网点上的改正可以采用线性内插算法得到。

## 1.2 相位中心改正模型

1998 年, IGS 开始使用相对天线相位中心的模型 (模型名称: IGS\_01) 来对天线相位中心的偏心影响进行改正。该模型以不带天线罩的天线类型 AOAD/M\_T 为参照<sup>[5-6]</sup>, 假设这是最佳天线, 对于任意观测值都没有天线相位中心变化。其他的天线都通过这个参照进行校正。但这个模型应用效果不够理想。因此, 从 2006-11-05 起 (GPS 周为 1400), IGS 开始转向使用绝对天线相位中心模型。该模型是在一系列经机器人对天线相位中心校准的模型基础上建立起来的, 它考虑到了观测值入射方位方面的改正与天线罩的影响。与相对天线相位中心的模型相比, 该模型的优势在于: 消除了参考天线的相位中心影响; 考虑了低于  $10^\circ$  高度角的相位中心变化; 同时考虑了随入射方位变化的相位中心变化和多路径效应。因此, 在本文中主要研究绝对相位中心的模型改正。

使用式(1) 计算天线相位中心的关键, 是模型函数  $\Delta\varphi'(\alpha, z)$  的确定, 即如何描述天线相位中心相对于平均相位中心的变化情况。解决这一问题的方法通常是采用球谐函数<sup>[5]</sup> 模型。对于最大次数为  $n_{\max}$  与最高阶数  $m_{\max} \leq n_{\max}$  的球谐函数:

$$\Delta\varphi'(\alpha, z) = \sum_{n=1}^{n_{\max}} \sum_{m=0}^n \tilde{p}_{nm}(\cos z) \cdot (\alpha_{nm} \cos m\alpha + b_{nm} \sin m\alpha), \quad (3)$$

其中,  $\Delta\varphi'(\alpha, z)$  表示所给方向上的相位中心偏心差;  $\alpha$  和  $z$  表示对应的入射方位角和天顶角 (与高度角互余);  $\tilde{p}_{nm}$  是次数为  $n$ 、阶数为  $m$  的归一化的伴随勒让德多项式函数;  $\alpha_{nm}, b_{nm}$  是一系列球谐函数展开的系数, 为待求参数;  $n$  和  $m$  分别是球谐函数的阶数和级数。把式(1) 所求的特定天线类型的离散天线相位中心变化参数代入等式左边, 用合适的  $n$  和  $m$  代入右边, 只有  $\alpha_{nm}, b_{nm}$  是待求参数, 求出最合理的  $\alpha_{nm}, b_{nm}$ , 就可得相应天线的相位中心偏心差。球谐函数改正模型是一个在水平方向和垂直方向 (参考于当地水平坐标系) 都连续的周期函数。该函数既考虑了高度角, 又考虑了观测值的入射方位对天线相位中心偏心差的影响, 故在文中实验数据处理时采用了此模型。

综合式(2) 和该球谐函数模型, 可以看出: 对于同一基线, 在其他观测条件不变的情况下, 来自于不同方位、不同高度角的卫星越多, 天线相位中心偏心差也会随之减小, 即卫星截止高度角的取值会直接影响天线相位偏心的大小。对于中长基线, 由于基线长度增大, 基线两端点所观测到相同卫星的天顶角不同, 使得两端点的天线相位偏心差也不同, 导致基线向量发生较大的偏差, 而且基线越长, 偏心差相差越大, 对基线向量的影响也越大。

实际工作中, 在相对定位时, 如果使用同一类型的天线, 在各测站上同步观测同一组卫星, 一般采用将各观测站的天线指标线指向北方向的方法来削弱入射方位对相位中心偏心差的影响。但对于中长基线, 对同一颗卫星, 基线两端的卫星高度角不同, 天线相位偏心值出现变化, 用天线指向北方向的方法, 不能完全消除天顶角方向的影响, 即不同卫星高度角对天线相位中心偏心差的影响。

## 2 计算实例分析

### 2.1 数据来源

为验证天线相位中心随卫星高度角变化对基线的影响, 下面对某品牌的 GPS 天线进行有无天线相位中心变化改正作比较分析。

本文选取 2002-05-23、2002-05-24、2003-05-18、2003-05-19, 欧洲 7 个 IGS 跟踪站 ZIMM、ZIMJ、FFMJ、MATE、BRUS、PTBB、VILL 的

观测数据进行分析。令其他各测站都以 ZIMM 测站作为参照,其中得出的观测数据根据 ZIMM 测站的天线相位中心的偏差和变化而有所改变。该站点的接收机为 TRIMBLE 4000SSI 双频接收机,天线类型为 TRM29659.00。这些测站组成的基线长度最短的在 15 m 以内,最大的基线长度大于 1 000 km。

### 2.2 数据处理方法

研究随不同卫星高度角变化而变化的天线相位中心时,采用了不同卫星截止高度角,通过选定不同的卫星截止高度角,可以对不同高度角的卫星观测值信号进行取舍。在数据处理过程中,本文选取了 3 种不同的卫星截止高度角,即 5°、10°、20°,对多组卫星进行观测。围绕两种设定情况展开,即:ZIMM 测站接收机的天线相位中心产生偏心差前后的情况。在这两种情况中,各测站的天线一直指向北方向,当天线相位中心产生偏心差时,采用绝对天线相位中心模型进行改正,运用非差载波相位最小二乘法计算各测站的数据。为了避免电离层延迟误差的影响,采用双频 L3 观测值进行解算,采样间隔为 180 s。

### 2.3 Bernese 天线相位中心改正模型参数的获取

本次所采用的数据处理软件为瑞士伯尔尼大学天文研究所开发的BERNESE 5.0版本的软件,

Bernese GPS 软件使用绝对天线相位中心模型 IGS\_05 进行天线相位中心改正,接收机的天线相位中心模型只是由相位中心偏心文件定义的。天线根据天线名和天线编号进行选择。相位中心偏心文件 PHAS\_COD.105 文件的第 1 部分为天线相位中心偏心差改正模型 IGS\_05,在该实例中,设置的具体模型参数如表 1 所示。第 2 部分的内容为根据 IGS\_05 模型所得到的天线相位中心基于高度角和卫星入射方位的变化,具体设置的参数内容如表 2 所示。

### 2.4 数据处理及结果分析

针对 5°~20°不同卫星截止高度角变化,在天线相位中心产生偏心差前后,用 Bernese 软件对形成的基线进行了解算,并对天线相位中心产生偏心差后的基线向量与天线相位中心未产生偏心差的基线向量进行较差,得出针对不同卫星截止高度角的基线分量误差。由于 4 天的实例数据得出的结论相同,故这里只以 2002-05-23 实例数据为代表,部分解算后的结果见表 3。

表 1 天线 TRM29659.00 的天线相位中心偏差  
Table 1 Phase center variation of TRM29659.00 m

频率	N	E	U
L1	0.000 0	0.000 0	0.110 0
L2	0.000 0	0.000 0	0.128 0

表 2 方位角为 0°时天线 TRM29659.00 基于高度角的天线相位中心变化

Table 2 Phase center variation (PCV) of TRM29659.00 based on elevation angle when azimuth is 0° mm

频率	A/Z								
	5	10	15	20	25	30	35	40	45
L1	0.00	0.20	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50	2.90	3.30
L2	0.00	0.10	0.30	0.40	0.60	0.90	1.10	1.50	1.80

频率	A/Z								
	50	55	60	65	70	75	80	85	90
L1	3.60	3.90	4.20	4.50	4.90	5.40	6.00	6.00	6.00
L2	2.20	2.50	2.90	3.30	3.60	3.90	4.20	4.30	4.30

表 3 不同截止卫星高度角下天线相位中心对不同长度基线的影响情况

Table 3 Influence of phase antenna variation for different elevation masks and different baseline lengths mm

基线名	基线长/km	卫星高度角								
		5°			10°			20°		
		ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ
ZIMM-ZIMJ	0.014	0.50	1.00	2.10	1.40	1.20	2.50	1.33	0.50	3.40
ZIMM-FFMJ	36	2.10	1.50	3.90	2.80	1.70	4.30	3.35	0.40	4.40
ZIMM-PTBB	60	4.30	3.50	5.40	5.20	3.10	8.80	7.00	3.00	10.50
ZIMM-BRUS	491	6.30	3.60	7.80	7.40	3.60	8.70	8.70	3.90	11.50
ZIMM-MATE	1 013	9.00	2.00	7.50	11.40	3.60	9.80	12.20	4.60	14.40
ZIMM-VILL	1 162	10.70	2.50	12.30	12.50	5.10	13.50	16.80	7.90	21.30

可以看出：对于中长基线，采用相同类型的天线，采用天线指向北方向的方法，并不能很好地消除天线相位偏心差造成的影响；对于同一卫星截止高度角，基线越长，则天线相位偏心影响越大，对于 100 km 以上的中长基线，影响已经达到 cm 级，是一个不可忽视的误差源，而对于短基线，此项影响可以忽略；对于同一基线，采用卫星截止高度角越小，越有利于消除天线相位偏心差的影响，考虑大气折射和多路径效应等误差的综合影响，高精度数据处理时应采用 5° 的卫星截止高度角。

### 3 结论

通过分析和研究天线相位中心的改正模型与卫星高度角之间关系，可以得到如下结论：

(1) 当基线两端的卫星高度角不相同，天线相位中心发生偏心差后，无论是何种长度的基线，都无法采用天线指向北方向的方法来消除该误差的影响，但是短基线受到的影响可以忽略不计。

(2) 对于中长距离的基线，天线相位偏心差造成的影响仍可达 1 cm，因此对于高精度定位，

必须对接收机进行天线相位中心改正。

(3) 取卫星截止角为 5°，能有效削弱天线相位偏心差的影响，因此，在数据采集时，要注意低卫星高度角观值的收集，数据处理时，要取较低的卫星截止高度角。

### 参考文献：

- [1] 吴正, 胡友健, 敖敏思. GPS 天线相位中心改正方法研究 [J]. 地理空间信息, 2012, 10 (6): 56-78.
- [2] 魏锦德, 黄张裕, 海美, 等. GPS 天线相位中心误差的检测与改正 [J]. 测绘科学技术学报, 2012, 29 (6): 410-417.
- [3] 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.
- [4] Ishchenko M V. The impact of antenna/radome combinations on the coordinates of permanent GPS stations [J]. Kinematics and Physics of Celestial Bodies, 2012, 28 (4): 203-207.
- [5] Rolf Dach, Urs Hugentobler, Pierre Fridez, et al. Bernese GPS Software Version 5.0 [M]. Bern: Astronomical Institute, University of Bern, 2007: 76-81.
- [6] Karol Dawidowicz. Antenna calibration models in height determinations in ASG-EUPOS' POZGEO-D service: A case study [J]. Artificial Satellites, 2012, 47 (4): 155-167.

## Influence of GPS receiver antenna center variation with different elevation masks

REN Chao, HUANG Hui<sup>b,c</sup>

(a. Guangxi Scientific Experiment Center of Mining, Metallurgy and Environment; b. Guangxi Key Laboratory for Spatial Information and Geomatics; c. College of Surveying, Mapping and Geoinformation, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

**Abstract:** The influences of antenna phase eccentric error in different satellite elevation mask angles and different baseline lengths are analyzed. The research suggests that for the medium and long baseline, the method using antenna towards north direction can not completely eliminate the antenna phase eccentric error, when satellite elevation angles of baseline at both ends are not the same, so the factor must be considered in data processing.

**Key words:** satellite elevation angle; phase center; eccentricity; effects; baseline