

doi:10.3969/j.issn.0253-4967.2013.02.016

GPS 天线相位中心变化精确检测试验研究

陈 涛^{1,2)} 胡志刚³⁾ 李 陶³⁾

1) 地壳运动监测工程研究中心, 北京 100036

2) 中国地震局地质研究所, 北京 100029

3) 武汉大学卫星导航定位技术研究中心, 武汉 430072

摘要 天线相位中心误差是高精度地壳形变监测中制约定位精度的重要误差源, 天线相位中心改正已成为提高观测精度的有效手段。文中对基于精密测量机器人的 GPS 天线相位中心变化精确检测方法进行了试验研究, 并对试验数据进行初步分析, 得到的天线平面校正精度约为 2mm, 高程方向校正精度约为 3mm。研究结果表明, 天线相位中心的精确校正除了可以提高 GPS 测量定位精度之外, 还可为中国自主北斗导航系统提供精确的天线相位中心校正参数, 推动北斗导航系统在高精度地壳形变监测领域的应用。

关键词 GPS 天线检测 天线相位中心 天线相位中心变化 机器人测量法

中图分类号: P228.4

文献标识码: A

文章编号: 0253-4967(2013)02-0380-08

0 引言

全球定位系统(Global Positioning System, 简写为 GPS)的基本工作原理是测量已知位置的卫星到地面点之间的距离, 然后通过解算多颗卫星的数据得到地面点的精确坐标。目前, GPS 观测数据已被广泛应用于地球动力学研究和高精度地壳形变监测(刘经南等, 1999)。在进行高精度 GPS 观测时, 地面观测点的天线相位中心(天线接收卫星信号的电气中心)与天线机械几何中心并不完全一致, 因此需要进行天线相位中心校正。目前, 绝大多数天线相位中心的校正参数都是由国际导航定位服务(International GNSS Service, 简写为 IGS)或者第三方提供。在公布的天线改正模型中, 相同型号同批次出厂的 GPS 接收机天线相位的中心偏差水平分量基本一致。不同型号的接收机天线差别较大, 水平方向的误差达 mm 级, 垂直分量的误差甚至为 cm 级(李晓波等, 2012)。因此, 天线相位中心稳定性检测已被列为中国大陆构造环境监测网络(简称陆态网络)流动观测前必须检验的项目之一。

天线相位中心对测量结果的影响可分为天线相位中心偏差(Phase Center Offset, 简写为 PCO)和天线相位中心变化(Phase Center Variations, 简写为 PCV)两部分。其中, PCO 是指天线相位中心与几何中心之间的偏差。虽然理论上天线电气中心应与天线的几何中心一致, 但由于制造水平、信号入射方向、高度角等原因, 天线相位中心与几何中心之间会存在一定偏差。PCV

[收稿日期] 2013-03-04 收稿, 2013-04-30 改回。

[基金项目] 中国地震局监测预报项目“北斗导航与 GPS 联合应用分析”和国家自然科学基金(41104016)共同资助。

是指天线平均相位中心与瞬时相位中心之间的变化,其主要受信号仰角影响,而非信号的方位角。几乎所有的高精度 GPS 测量天线,其相位中心方向图都是关于方位角对称。除此之外,接收机天线整流罩以及不同载波工作频率也会对天线相位中心变化产生一定影响(国家测绘局,1995)。

任何特定天线的 PCO 都具有一定的稳定性,即呈现系统误差的特性。相比之下,PCV 的精确校正较为复杂,目前使用的主要方法包括微波暗室测量法(Rothacher, 2001; 高伟, 2004), 相对现场定位法(Schmid *et al.*, 2005)和测量机器人标定法(张成军, 2010; Dach *et al.*, 2011)。1994 年提出的微波暗室测量法能够精确测定天线的相位中心,但需建设专门的微波暗室,且设备昂贵复杂,不易维护,测量费用较高,难于推广。相对现场定位法是通过多台接收机联合同步观测,得到相对 PCV 参数。由于参考天线相对于被测天线的 PCV 较小,可以对其拟合求得卫星在各高度角时的 PCV 值。实验证明,经 PCV 改正后的双差载波相位数据的标准偏差<1cm(李晓波等, 2012)。从 1996 年 6 月 30 日起, IGS 各个分析中心开始使用相对相位中心改正模型(Alois *et al.*, 2005)。但事实上参考天线的绝对 PCV 并不是 0, 并且还存在现场操作条件制约等缺陷,因此该方法计算得到的 PCV 往往会产生系统误差。Schmitz 等(2002)讨论了相对定位技术的弊端,提出利用自动测量机器人的绝对现场校准来进行天线相位中心标定。

基于精密机器人的现场标定法的优点非常明显,首先该方法可以给出绝对标定值,消除了参考天线的相位中心影响,同时,有效减弱了多路径效应,观测值覆盖整个天线半球,可获得从 0°~90°高度角范围的 PCV,且考虑了 PCV 随方位角的变化。而且,精密机器人方法可以重复观测数千次,最大限度地消除了多路径效应,可以更精确地定义相位中心的位置,这对于确定高分辨率和高精确度的 PCV 模型非常必要。同时,利用精密机器人完成 1 次标定仅需几个小时,且其测量的相位中心变化值与微波暗室测量结果相吻合,能够达到 1mm 的精度(Montenbruck *et al.*, 2009)。自 2011 年 11 月 6 日之后, IGS 开始使用由波茨坦地学中心(Helmholtz-Centre Potsdam-German Research Centre for Geosciences, 简写为 GFZ)和慕尼黑工业大学(Technische Universität München, 简写为 TUM)提供的绝对天线相位中心改正模型来代替相对相位中心改正模型。截止目前, IGS 所提供的最新的天线相位中心改正模型中,有大约 70% 的接收机天线都是由测量机器人校准后得到(李晓波等, 2012)。

1 方法模型

1.1 相位中心改正模型

天线相位中心的改正模型包括 PCO 改正和 PCV 改正两部分(李晓波等, 2012),本文主要参照胡志刚等(2011)提出的天线相位中心改正模型,设天线相位偏差 PCO 的矢量为 a , 卫星与接收机之间的矢量为 r_0 , 那么天线相位中心的改正模型可表述为

$$\begin{aligned}\Delta\Phi(\alpha, z) &= \Delta_{\text{PCO}} + \Delta_{\text{PCV}} \\ &= a \cdot r_0 + \Delta_{\text{PCV}}(\alpha, z, f_i), (i = 1, 2)\end{aligned}\quad (1)$$

式(1)中, α, z, f_i 分别为方位角、天顶距或高度角以及所接收的载波信号频率, $\Delta_{\text{PCV}}(\alpha, z, f_i)$ 为与方位角、高度角和频率有关的改正函数。

利用公式(1),自由选取 PCO 矢量,并保证与其对应的 PCV 满足自洽关系,即可实现瞬时相位中心到天线参考点的相位伪距近似改正。

1.2 PCV 计算方法

PCV 计算方法一般都采用一个相对于天线参考系在水平方向和垂直方向都连续的周期函数来模拟与卫星方位角和高度角相关的 PCV。例如, Rothacher 等(1995, 2001) 使用球谐函数来模拟 PCV, 该方法虽然具备较好的物理意义, 但是缺点是所需要估计的系数较多, 计算量较大。另一种方法是利用分段线性函数来描述与方位角和高度角有关的 PCV(Schmid *et al.*, 2005; 胡志刚等, 2011), 即假设 PCV 模型由不同的网格点构成, 每个格网均由 4 个待求 PCV 点组成。如图 1 所示, PCV 在格网待求点 A, B 具有相同的高度角(z_1) 和不同的方位角(α_1 和 α_2), 同样 C, D 也具有相同的高度角(z_2) 和不同的方位角(α_1 和 α_2); 而 A, D 两点具有不同的高度角(z_1 和 z_2) 和相同的方位角(α_1), 同样 B, C 两点也具有不同的高度角(z_1 和 z_2) 和相同的方位角(α_2)。假设观测时刻的高度角(z) 和方位角(α) 均位于 ABCD 所限定的网格内, 则 P 点的 PCV 值可由线性内插的方法得到:

$$\text{PCV}_P = (1 - \alpha)(1 - \beta)\text{PCV}_A + \alpha(1 - \beta)\text{PCV}_B + \alpha\beta\text{PCV}_C + (1 - \alpha)\beta\text{PCV}_D \quad (2)$$

其中, $\alpha = (a - a_1)/(a_2 - a_1)$, $\beta = (z - z_1)/(z_2 - z_1)$ 。

前人研究表明, 采用球谐函数法和分段线性函数这 2 种方法计算得到的 PCV 值差别并不大, 但分段线性函数法相对更易于实现(Schmid *et al.*, 2005; 胡志刚等, 2011)。因此, 本研究采用 $5^\circ \times 5^\circ$ 网格点进行线性分段计算, 当建立天线参考系后, 假设公式(1)中的 PCO 相对于天线参考系是固定不变的, 则 PCO 的值可以通过参数估算得出, 随后将其作为强约束条件, 计算得到 PCV。

2 试验研究实例

2011 年, 在陆态网络的建设实施中, 地壳运动监测工程研究中心引进日本发那科(FANUC)公司生产的 FANUC LR Mate 200iC 型自动测量机器人, 与中国科学院沈阳自动化研究所和武汉大学卫星导航定位技术研究中心合作, 开展了基于自动测量机器人的 GPS 天线相位中心变化精确检测试验研究。

2.1 场地设置及测量机器人安装

FANUC LR Mate 200iC 型自动测量机器人由伺服电机驱动轴和机械手腕共同组成机构部件。如图 2a 所示, 机械手腕部分作为机器臂, 手腕的接合部称为轴杆或关节。从基座底部向上的最初的 3 轴(J1, J2, J3) 称为基本轴, 分别由几个直动轴和旋转轴构成, 主要用于实现较大幅度的水平、俯仰和翻滚动作。机器臂上端的 3 轴(J4, J5, J6) 称为机械腕轴, 用于实现小幅度的姿态调整。测量机器人工作时, 由基本轴驱动机械腕轴对安装在机器臂顶端的执行器进行姿态调整, 如进行扭转、上下摆动、左右摆动等。

为满足试验研究的高精度要求, 选取武汉大学卫星导航定位技术研究中心作为试验基地, 按照陆态网络连续基准站观测墩的建设要求, 修建了 2 个短基线观测墩, 用于安装 GPS 观测天线和待测天线。其中一个观测墩内浇筑专用的测量机器人预埋件, 另一个观测墩内则浇筑天

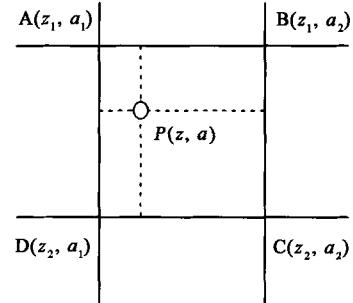


图 1 PCV 网格点线性插值示意图
(据胡志刚等, 2011)

Fig. 1 Schematic diagram of PCV grids linear interpolation (after HU Zhi-gang *et al.*, 2011).

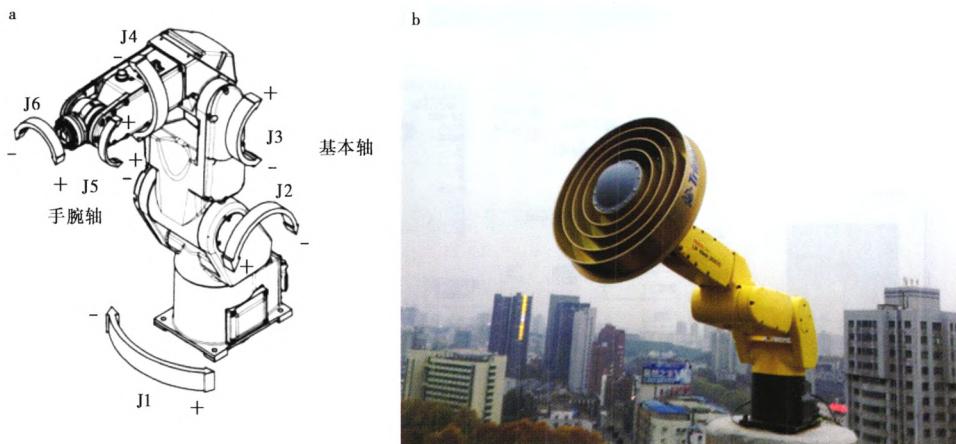


图 2 测量机器人组成构件示意图及现场照片

Fig. 2 Component of the survey robot and the site photo.

线预埋件。完成建设后的测量机器人如图 2b 所示。

2.2 控制软件

中国科学院沈阳自动化所为测量机器人专门编制了控制程序, 图 3 即为控制软件的控制端操作界面。软件实现了对机器人交互式操作, 包括数据通讯、状态初始化、静止姿态设计、运动轨迹设计、实时状态显示和结果输出等功能。按照程序设计的步骤, 实际测量时天线从仰角 90°开始, 以 5°为间隔逐渐降低, 其中在每个仰角高度, 方位角以 5°为间隔旋转一周。同时, 设定机器人从一个状态运动到另一个状态用时 1s, 在每个停留位置上观测 4s。根据上述流程, 可计算出实现一个完整的测试流程所需的总时间为 $(90/5+1) \times (360/5+1) \times (1+4) = 6935\text{s}$, 约合 2h。

2.3 数据质量

多路径误差是高精度标定天线相位中心变化的重要影响因素之一, 严重的多路径误差会导致相位观测数据产生数 mm 甚至 cm 级的误差, 这直接影响到天线相位中心标定的精度。为了检验多路径效应带来的误差, 分别采用 Trimble Zephyr Model II 大地测量型天线和 Trimble TRM59800 型 Choking 扼流圈天线进行测试。图 4a 是 Trimble Zephyr Model II 型天线采集时段内所有卫星观测数据处理后的多路径误差统计结果。该图表明所有卫星的多路径误差统计值都 > 0.3m, 最大值达 0.78m, L1 和 L2 上的伪距多路径误差平均值约为 0.47m 和 0.40m。与此形成鲜明对比, 图 4b 是 Trimble TRM59800 型 Choking 扼流圈天线的计算结果。从图中可以看到, 大部分卫星的多路径误差值 < 0.3m, 且 L1 和 L2 上的伪距多路径误差平均值为 0.32m 和 0.29m, 显著地减小了多路径效应带来的误差。因此, 本试验研究在进行天线相位中心精确标定时, 应尽量使用扼流圈天线, 以减小多路径效应的影响。

在测试中, 选用 2 套 Trimble NetR8 型 GNSS 接收机及配套的 Trimble TRM59800 型 Choking 天线, 其中一台置于基站观测墩上, 另一台待测天线放置于精密机器臂末端。设置的数据采样率为 1Hz, 1 个观测流程时长约合 2h, 最终可以得到的待测天线数据覆盖情况。如图 5 所示, 除边缘部分数据覆盖较少外, GPS 观测数据覆盖了天线绝大部分区域。需要注意的是, 由于测量

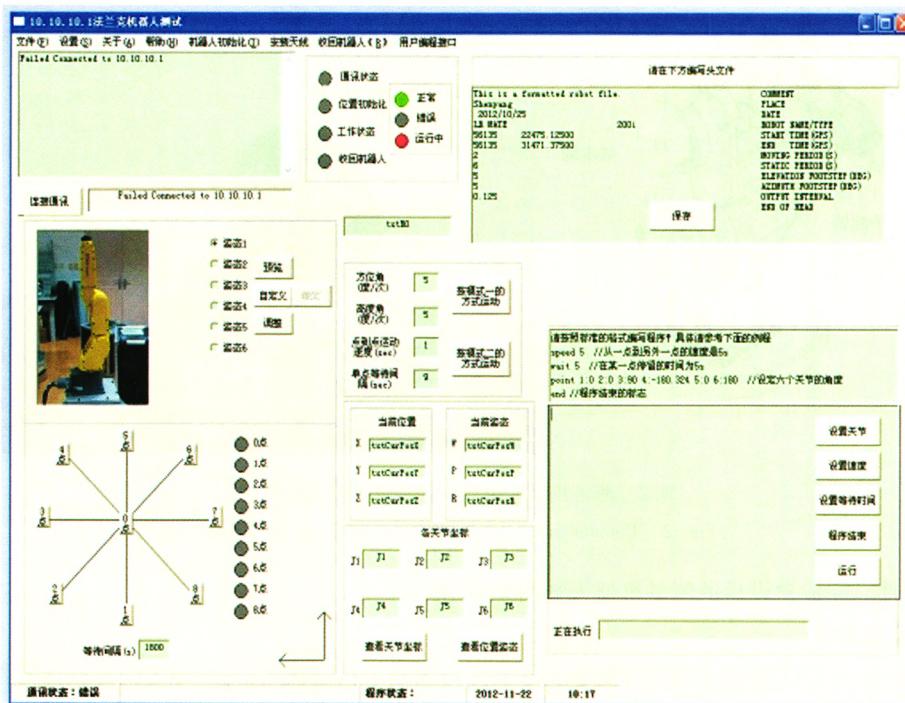


图 3 控制软件操作界面

Fig. 3 The screen capture of the control console.

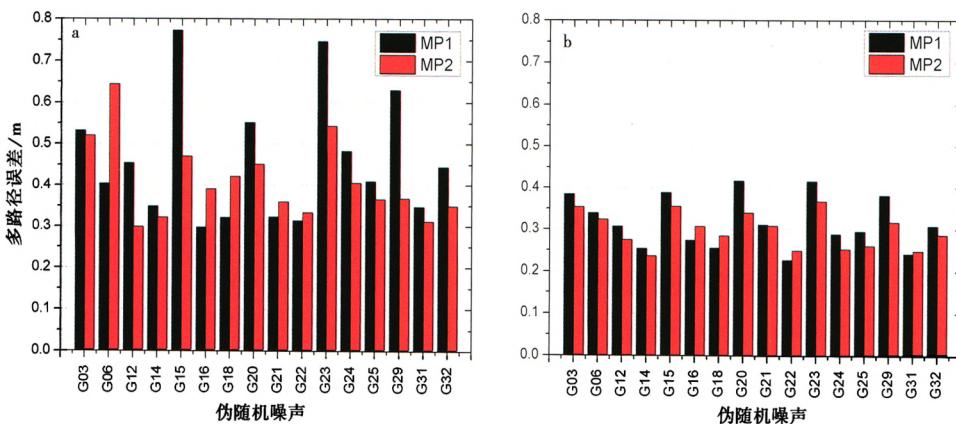


图 4 多路径误差

Fig. 4 Multipath effect comparison of the different antenna.

a 为 Trimble Zephyr Model II 天线; b 为 Trimble TRM59800 型 Choking 天线

MP1 为 L1 载波多路径效应指标; MP2 为 L2 载波多路径效应指标

机器人运动速度较快,而 GPS 星座相对于接收机变化较慢,因此会导致部分观测数据呈独立的非同心圆形展布。

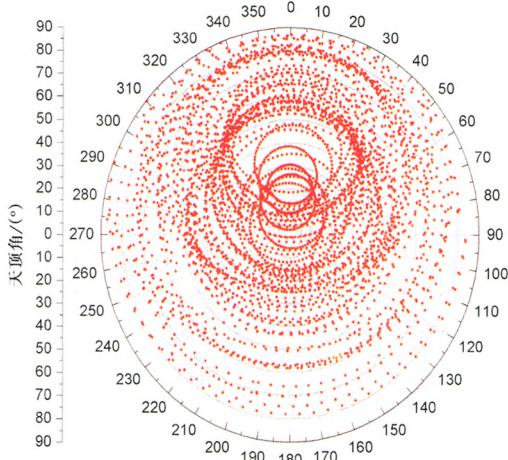


图 5 待测天线观测数据覆盖情况

Fig. 5 Observation data coverage of the tested antenna.

2.4 解算结果

为了尽可能地减小多路径效应影响和后续比较的方便,选用天线校正参数已知的 Trimble TRM59800 型 Choking 天线作为待测试天线。校正参数由德国 GEO++ 公司提供,并由 IGS 分析中心推荐,其标称精度为 1mm,与微波暗示检定精度相当。将本次试验研究中基于自动测量机器人采集的一个完整检测流程(约合 2h)的观测数据,按公式(1)建立函数模型,计算得到的天线相位中心改正数,如表 1 所示。计算结果表明,测量机器人法得到的天线相位中心与 Geo++ 给出的校正参数偏差在平面方向约为 2mm,高程方向约为 3mm,平面精度略好于高程。其中, $L1_{Geo++}$ 、 $L2_{Geo++}$ 分别代表 Geo++ 提供的 L1 和 L2 载波频率上的改正参数, $L1_{Robot}$ 、 $L2_{Robot}$ 分别代表本研究中计算得到的 L1 和 L2 载波频率上的改正参数, Δ_{L1} 、 Δ_{L2} 则分别代表 2 种方法得到的改正参数之差。

3 结论与展望

随着 GPS 技术越来越广泛的应用于地球动力学研究和高精度地壳形变监测,对 GPS 数据处理的精度要求也相应越来越高,而天线相位中心校正参数对提高 GPS 观测数据精度的重要性不言而喻。本研究对基于精密机器人的 GPS 绝对天线相位检定标定方法进行了试验研究,获得了平面约 2mm、高程约 3mm 的天线相位偏差修正值。结果表明,基于自动测量机器人的天线相位中心精密检校系统已经建立,当前中国 GPS 观测所使用的天线校正模型大都由国外机构提供的现状将逐步得以改善。同时,该系统也可用于中国自主研发的北斗卫星导航系统的天线相位中心精密标定。

表 1 绝对天线相位解算结果

Table 1 Comparison of the estimated value and provided value by Geo++

方向	N/mm	E/mm	U/mm
$L1_{Geo++}$	0.37	0.86	90.02
$L1_{Robot}$	0.93	2.03	86.50
Δ_{L1}	-0.56	-1.17	3.52
$L2_{Geo++}$	0.09	0.01	119.89
$L2_{Robot}$	0.78	-1.73	122.75
Δ_{L2}	-0.69	1.74	-2.86

注 天线类型: TRM59800。

本文解算的绝对天线相位中心校正参数与 IGS 推荐的校正参数之间尚存在一定的差异, 分析其原因可能是由于观测数据分布并不均匀, 也可能是在研究中仅进行了单个观测周期的试验, 在 2 h 内所观测的卫星数量及空间分布范围有限, 从而影响了最终结果的准确度。在后续工作中, 将进行多次重复观测试验, 继续进行分析研究。

参 考 文 献

- 高伟. 2004. GPS 高程测量的理论与方法研究 [D]:[学位论文]. 武汉: 武汉大学.
- GAO Wei. 2004. Research of the principle and method of the GPS elevation survey [D]. Dissertation paper. Wuhan University, Wuhan(in Chinese).
- 国家测绘局. 1995. GPS 测量型接收机检定规程 (CH8016-95) [M]. 北京: 测绘出版社.
- State Bureau of Surveying and Mapping. 1995. Specification for Check off and Test of GPS Receiver of Surveying model (CH8016-95) [M]. Publishing House of Surveying and Mapping, Beijing(in Chinese).
- 胡志刚, 赵齐乐, 郭靖, 等. 2011. GPS 天线相位中心校正对星载低轨卫星精密定轨的影响研究 [J]. 测绘学报, 40(增刊): 34—38.
- HU Zhi-gang, ZHAO Qi-le, GUO Jing, et al. 2011. Research on impact of GPS phase center variation on precise orbit determination of low orbit satellite [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 40(suppl): 34—38 (in Chinese).
- 李晓波, 王小亚, 任金卫. 2012. GNSS 天线相位中心偏差与变化精确标定方法研究 [J]. 天文学进展, 30(4): 501—517.
- LI Xiao-bo, WANG Xiao-ya, REN Jin-wei, et al. 2012. Research on calibration methods of GNSS antenna phase center offsets and variations [J]. Progress in Astronomy, 30(4): 501—517 (in Chinese).
- 刘经南, 陈俊勇, 张燕平, 等. 1999. GPS 广域差分定位原理与方法 [M]. 北京: 测绘出版社.
- LIU Jing-nan, CHEN Jun-yong, ZHANG Yan-ping, et al. 1999. Wider Area Differential Theory and Method [M]. Publishing House of Surveying and Mapping, Beijing (in Chinese).
- 张成军. 2010. 基于测量机器人的 GPS 天线相位中心影响检测法 [J]. 测绘通报, (3): 7—9.
- ZHANG Cheng-jun. 2010. Calibration of influence of GPS antenna phase center based on robot [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, (3): 7—9 (in Chinese).
- Alois D N, Rusek A, Oakley B A. 2005. A relative technique for characterization of PCV error of large aperture antennas using GPS data [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurements, 54(5): 1820—1832.
- Dach R, Schmid R, Schmitz M, et al. 2011. Improved antenna phase center models for GLONASS [J]. GPS Solutions, 15(1): 49—65.
- Montenbruck O, Garcia-Fernandez M, Yoon Y, et al. 2009. Antenna phase center calibration for precise positioning of LEO satellites [J]. GPS Solutions, 13(1): 23—34.
- Rothacher M, Schaer S, Mervart L, et al. 1995. Determination of antenna phase center variations using GPS data [C]. Proceedings of the IGS Workshop, Potsdam.
- Rothacher M. 2001. Comparison of absolute and relative antenna phase center variations [J]. GPS Solutions, 4(4): 55—60.
- Schmitz M, Wübbena G, Boettcher G. 2002. Tests of phase center variations of various GPS antennas, and some results [J]. GPS Solutions, 6(1-2): 18—27.
- Schmid R, Mader G, Herring T. 2005. From relative to absolute antenna phase center corrections [C]. In: Celebrating a Decade of the International GPS Service: Workshop and Symposium 2004, Proceedings: 209—221.

EXPERIMENTAL STUDIES OF PRECISE CALIBRATION OF GPS ANTENNA PHASE CENTER VARIATION

CHEN Tao^{1,2)} HU Zhi-gang³⁾ LI Tao³⁾

1) National Earthquake Infrastructure Service, Beijing 100036, China

2) Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China

3) Wuhan University, Satellite Navigation and Positioning Technology Research Center, Wuhan 430072, China

Abstract

In the high-precision GPS positioning applications, the antenna phase center calibration significantly impacts the survey accuracy. This article introduces the experiment study of precise calibration of GPS antenna phase center variations based on automatic survey robot GPS which is funded by Crust Movement Observation Network of China project. In this paper, the main derivations of the principle and implementation procedure are described step by step. Comparing with the known calibration parameters, the horizontal accuracy is estimated about 2mm and the vertical accuracy is estimated about 3mm. This study is of practical significance to improve the accuracy of GPS positioning and to popularize the application of calibration of antenna phase center variation based on survey robot.

Key words GPS, phase calibration, phase center, phase center variations, survey robot

〔作者简介〕 陈涛,男,1979年生,2004年在武汉大学获地图学与地理信息系统专业硕士学位,助理研究员,现为中国地震局地质研究所在读博士生,主要研究方向为GPS、InSAR以及LiDAR等空间对地观测技术在地震地质学中的应用,电话:010-88015740,E-mail:tchen@neis.gov.cn。

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com)，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>