



同濟大學  
TONGJI UNIVERSITY

**硕士学位论文**

# **卫星导航天线 PCO 和 PCV 在轨标定**

姓 名：胡一帆

学 号：1434886

所在院系：测绘与地理信息学院

学科门类：工学

学科专业：测绘科学与技术

指导教师：胡丛玮副教授

副指导教师：陈俊平研究员

二〇一七年三月



同濟大學  
TONGJI UNIVERSITY

A dissertation submitted to  
Tongji University in conformity with the requirements for  
the degree of Master of Engineering

**The calibration of antenna PCO\PCV based  
on navigation satellite orbit**

Candidate: Yifan Hu

Student Number: 1434886

School/Department: College of Surveying and  
Geo-Informatics

Discipline: Engineering

Major: Science and Technology of Surveying  
and Mapping

Supervisor: A/Prof. Congwei Hu  
Prof. Junping Chen

March, 2017

卫星导航天线  
PCO 和 PCV 在轨标定

胡一帆

同济大学

## 学位论文版权使用授权书

本人完全了解同济大学关于收集、保存、使用学位论文的规定，同意如下各项内容：按照学校要求提交学位论文的印刷本和电子版本；学校有权保存学位论文的印刷本和电子版，并采用影印、缩印、扫描、数字化或其它手段保存论文；学校有权提供目录检索以及提供本学位论文全文或者部分的阅览服务；学校有权按有关规定向国家有关部门或者机构送交论文的复印件和电子版；在不以赢利为目的的前提下，学校可以适当复制论文的部分或全部内容用于学术活动。

学位论文作者签名：

年 月 日

# 同济大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人创作的、已公开发表或者没有公开发表的作品的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本学位论文原创性声明的法律责任由本人承担。

学位论文作者签名：

年 月 日



## 摘要

在全球导航卫星系统（GNSS）高精度数据处理中，接收机天线和卫星天线相位中心偏差（PCO）和相位中心变化（PCV）作为重要的误差源之一必须予以改正。近年来，全球各卫星导航系统不断发展，我国的北斗导航系统（BDS）不断完善，国内的天线类型越来越多样化，再者由于目前北斗导航系统主要服务于亚太地区，其他区域可视卫星较少，使得建立国内的服务于北斗系统的接收机天线和卫星天线校验系统很有必要。

本文针对 GNSS 接收机和卫星天线 PCO、PCV 改正及校验模型，主要做了如下研究：

1.简单介绍了 GNSS 接收机和卫星天线 PCO、PCV 的研究和发展情况以及目前国际 GNSS 服务（IGS）发布的天线 PCO、PCV 的改正模型，对天线文件中的各参数做出了详细的解释。对接收机天线和卫星天线 PCO、PCV 在高精度数据处理中改正的方法及原理做了详细的阐述。

2.从精密单点定位和高精度基线解算两个角度，利用全球的 GPS 观测数据量化了接收机和卫星天线 PCO、PCV 在高精度定位中的影响，证明了天线 PCO 对精密单点定位的影响在水平方向在可达厘米级，在高程方向可达到十几厘米；天线 PCV 对精密单点定位的影响可达厘米级；天线 PCO、PCV 对长基线的影响可达厘米级，对超长基线可达到十几厘米。

3.阐述了接收机和卫星天线 PCO、PCV 的校验方法，并利用全球的 GPS 观测数据对 GPS 卫星天线的 PCO、PCV 进行了校验，并将校验结果与 IGS 发布的天线参数进行比较，卫星天线 PCO 差异均值在-18cm 左右，PCV 差异小于 6mm，进而验证了校验方法的可行性。

4.论述了卫星天线 PCO、PCV 内部自洽性，在解算得到卫星天线 PCV 并将其固定的基础上获取卫星天线 PCO，得到一组自洽的卫星天线 PCO、PCV。利用该天线参数进行精密定轨和精密单点定位的精度验证，所得轨道与 IGS 发布轨道产品的精度相当。精密单点定位结果与使用 IGS 轨道和钟差的定位结果精度相近，差异基本在毫米级。

5.对利用区域参考站定轨的北斗残差进行编辑，得到北斗卫星天线的 PCV。对于 GEO 卫星由于其相对地球“静止”，故不对其天线的 PCV 进行校验；IGSO 和 MEO 卫星 PCV 在忽略测站低高度角噪声和天顶观测值较少的影响，其中误差均在 1mm 左右。

**关键词：**GNSS；天线 PC0、PCV；天线校验；精密单点定位；卫星定轨

## ABSTRACT

As one of the significant error sources, the receiver antenna and GNSS satellite antenna PCO\PCV must be corrected in high accuracy GNSS data processing. In recent year, the global navigation systems have been developed rapidly and BeiDou Satellites Navigation System (BDS) is going to be completed in the near future. This has prompted the emergence of diversified GNSS receiver antennas. Currently, the BDS are main applicable in the Asian and Pacific region. It's necessary to establish a receiver and satellite antennas calibration system for BDS.

Aiming at GNSS receiver and satellite antennas PCO\PCV correction and calibration model, the main points of this paper are as follows:

1. The research history and current status of GNSS receiver and satellite antennas PCO\PCV are introduced briefly and the meaning of each parameter in IGS antenna files is explained. The method and principle of correcting the antenna PCO\PCV in high accuracy GNSS data processing are elaborated comprehensively.

2. The effects of GPS receiver and satellite antenna PCO\PCV on PPP and baseline processing are analyzed with global observation from IGS stations. The result shows that: the effects can reach centimeter-level in horizontal components and more than a decade centimeters in vertical component for PPP; the effects for long baseline both in coordinate components and length can reach centimeter-level, but the effects may reach a decade centimeters for very long baseline.

3. The method of calibrating receiver and satellite antenna PCO\PCV is elaborated. The GPS satellite antenna PCO\PCV has been calibrated with global IGS station observations. The result shows a well agreement with the results from IGS. The average differences are about -18 cm in PCO and less than 6 mm in PCV.

4. The self-consistency of satellite antenna PCO\PCV is demonstrated. Two group of precise GPS satellite orbits are determined respectively based on satellite antenna PCO\PCV calculated in this paper and issued by IGS and the results shows that the internal accuracy and external accuracy are close to each other. The results of PPP based on the satellite antenna PCO\PCV, precise orbit and clock calculated in this paper are consistent with that based on IGS products, and the differences are on millimeter-level.

5. The BDS satellites antenna PCV are derived from the regional orbit

determination residual. As GEO satellites appear motionless relative to earth, only IGSO and MEO satellites antenna PCV are calculated. Ignoring the multi-path noise in low elevating angle and the sparsity of observations near zenith, the accuracy of IGSO and MEO PCV can reach 1 mm precision.

**Keywords:** GNSS; antenna PCO\PCV; antenna calibration; Precise Point Positioning; satellite orbit determination

# 目录

第 1 章 引言 .....	1
1.1 概述 .....	1
1.2 国内外研究现状 .....	1
1.3 研究的目的与意义 .....	3
1.4 本文研究内容 .....	3
第 2 章 接收机和卫星天线 PCO、PCV 改正及其对高精度定位的影响 .....	5
2.1 接收机和卫星天线 PCO、PCV 改正模型 .....	5
2.2 IGS 发布的接收机和卫星天线 PCO、PCV 改正信息 .....	7
2.3 接收机和卫星天线 PCO、PCV 对高精度数据处理的影响 .....	10
2.3.1 卫星和接收机天线 PCO、PCV 中各项对 GPS PPP 的影响 .....	10
2.3.2 卫星和接收机天线 PCO、PCV 中各项对 GPS 高精度基线解算的影响 .....	13
2.4 本章小结 .....	20
第 3 章 接收机和卫星天线 PCO、PCV 校验 .....	22
3.1 接收机天线校验原理 .....	22
3.2 GPS 卫星天线校验原理 .....	25
3.3 GPS 卫星天线校验算例分析 .....	27
3.3.1 数据说明 .....	28
3.3.2 GPS 卫星天线 PCO、PCV 校验结果 .....	29
3.3.3 轨道精度验证 .....	32
3.3.4 精密单点定位验证 .....	34
3.4 本章小结 .....	36
第 4 章 BDS 卫星天线 PCV 校验 .....	38
4.1 BDS 天线 PCV 校验数据说明 .....	38
4.2 BDS 卫星天线 PCV 校验 .....	39
4.2.1 定轨残差分析 .....	39
4.2.2 BDS 卫星天线 PCVraw 分析 .....	40
4.2.3 BDS 卫星天线 PCVraw 重复性分析 .....	45
4.2.4 BDS 卫星天线 PCV .....	48
4.3 BDS GEO 卫星定轨残差分析 .....	49

4.4 本章小结 .....	50
第 5 章 总结与展望 .....	51
5.1 论文研究工作总结 .....	51
5.2 后续研究工作展望 .....	52
致谢 .....	53
参考文献 .....	54
个人简历、在读期间发表的学术论文与研究成果 .....	59

## 第1章 引言

### 1.1 概述

全球导航卫星系统（Global Navigation Satellite System, GNSS）是能够为地球表面及其近地空间用户提供全天候的高精度三维坐标、三维速度、三维姿态以及时间信息的空基无线电导航定位系统,在国防和国民经济领域都具有举足轻重的地位,代表了一个国家的现代化程度。GNSS 包括美国的 GPS、俄罗斯的 GLONASS、欧盟的 Galileo 还有中国的 BDS,它们是国家的战略性资源,在国家的军队建设、海洋主权、导航信息服务、高精度测量等方面起到了十分显著的作用,在国家的核心竞争力提升方面发挥着重要的作用。随着 GNSS 的不断发展与成熟,GNSS 高精度测量技术的要求越来越精确。在实际的应用测量过程中,误差不可避免地存在着,只有尽可能地减小误差,才能满足高精度定位的条件。但是,即使设备制造得再精良,都无法彻底将误差的影响消除,那么找到误差源才是提高定位定轨精度和测量精度的关键所在。

高精度 GNSS 测量中,天线相位中心偏差（phase center offset, PCO）和天线相位中心变化（phase center variation, PCV）是一项重要的误差源,其对高程分量的影响最为显著。天线相位中心是指微波天线的信号传输或接收中心,理论上其设计应与天线的几何中心应（geometric center）保持一致。但由于各种原因,如天线制造工艺、GNSS 信号入射方向、卫星高度角等,天线相位中心与几何中心之间存在偏差。对任何一个接收机而言,天线信号的相位中心不是固定的而是随着卫星信号的入射方向变化的。接收机天线瞬时相位中心偏差主要依赖于卫星的高度角和方位角,导航卫星天线瞬时相位中心偏差主要依赖于测站与卫星连线的天底角。为解决相位天线中心与几何中心的不一致,需对天线的相位中心进行校验。

### 1.2 国内外研究现状

自 1996 年 6 月 30 日起,IGS 的各数据分析中心开始利用相对相位中心的改正模型（relative phase center correction）来改正这一误差项（Bilich, 2009）。GNSS 接收机天线 PCO 相对校验的方法主要有 2 种,即旋转天线法和交换天线法（Davis, 2004）。旋转天线法可以在野外进行,但是其局限性在于只能测定天线相位中心

的水平方向的偏差分量,不能测定高程方向偏差分量。高程方向偏差分量只能通过交换天线法来进行测定,但其不适用于接收机主机和天线一体的 GNSS 接收机 (Liu, 2012)。因此,可利用旋转天线法和交换天线法在野外测定接收机主机和天线分体的 GNSS 接收机相位中心偏差,但是要分步进行,且耗时较多 (Menge, 1998)。上述旋转天线法和交换天线法只能测定天线 PCO,但是天线 PCV 只能通过在超短基线上建立三差观测值的方式求得相对 PCV。相对相位中心改正的前提是假定参考天线(如: AOAD/M\_T 型天线)的 PCV 为 0 (Seeber, 1998)。但实际上 AOAD/M\_T 型天线的 PCV 并不为零,再加上低高度角时通过相对校验方式得到的天线的 PCV 值所受到的多径影响将显著增加。2006 年 11 月后, IGS 提供天线产品均基于绝对相位中心改正模型。绝对接收机天线校验方法有微波暗室和野外机器人检验法 (Ray, 2000)。微波暗室法必须在室内进行,用微波天线测量设备测定相位中心位置,所有工作必须在微波暗室内完成,微波暗室法所需的设备复杂、昂贵,检定费用高、耗时多,并且一般测绘部门没有这种设备,不适合野外检测 (Stolk, 2003)。野外机器人检验法,可在野外校检场,通过机器人手臂运动模拟不同的卫星信号入射方向,且校检结果和微波暗室校检差异在毫米以下 (Montenbruck, 2009)。此外,绝对天线相位中心改正模型除了考虑接收机天线相位中心的改正外,还给出了 GPS 卫星的天线相位中心的改正,以减小基于长基线测定的 GPS 全球参考框架与使用其他观测技术 (VLBI 和 SLR) 得到的结果间的尺度误差 (Collilieux, 2013; Dawidowicz, 2010)。

近年来,接收机天线绝对相位中心改正可通过微波暗室和野外机器人两种独立的方法来校验,且校验的结果基本一致,与 IGS 发布的相对相位中心改正差异也很小 (International GPS Service; see e.g. Rothacher 2001)。虽然接收机天线相对相位中心改正中存在系统性偏差,但是它一直被使用直到 2006 年 11 月 (e.g. Schmid et al. 2005; Ge, 2005)。采用绝对 PCVs 会导致全球框架尺度因子与 ITRF2000 存在 15ppb 的差异,因而这种模型改正一直不被采用直到这个问题通过引入卫星天线绝对相位中心改正来解决 (Schmid and Rothacher, 2003)。卫星天线绝对相位中心改正也称之为“绝对”,主要是考虑到与接收机天线绝对相位中心改正的兼容性,并非基于一种绝对的校验技术 (Wübbena, 2010)。与此同时,IGS 的相关数据中心也致力于卫星绝对相位中心改正以适应相位中心由相对改正往绝对改正的过度 (Wanninger, 2009)。

Ge (2005) 论述了基于卫星类型分类的卫星天线改正的局限性,因为卫星天线亚组元素的相位中心即使在同类卫星之间也存在显著的差异,这种情况会导致同类卫星天线 PCO 之间的差异 (Schmid, 2005)。最初的由 Technical Universities of Munich 和 University of Dresden 利用全球 GPS 观测网计算结果指出,卫星天

线相位中心的改正计算必须基于长年观测数据,因为短期观测数据的卫星轨道平面和太阳轨道平面指向并不会有显著的变化(Steigenberger et al. 2004)。IGS 目前发布的卫星天线 PCV 改正模型为基于卫星天底角, Schmid 也建立过基于卫星天底角和方位角的改正模型。目前绝对天线改正模型,卫星天线相位改正主要由德国地学研究中心(Geo Forschungs Zentrum, GFZ)和慕尼黑工业大学(Technical University of Munich, TUM)利用超过 10 年的全球观测数据共同计算所得,接收机天线相位改正主要由 Geo++ GmbH 公司, NGS (National Geodetic Survey) 完成测定。

### 1.3 研究的目的与意义

近年来,我国自主研发的 BDS 卫星导航系统飞速发展,经历了北斗一号和北斗二号的技术迭代。目前可观测的在轨卫星有 14 颗,当中 C01、C02、C03、C04、C05 为 GEO 卫星, C06、C07、C08、C09、C10、C13 为 IGSO 卫星, C11、C12、C14 为 MEO 卫星,因此目前 BDS 主要服务于亚太地区,亚太以外的地区可见卫星很少,因此对接收机天线 PCO、PCV 校验的野外校验场必须在亚太地区,以保证可视卫星的数量。然而目前提供接收机天线相位改正的 Geo++ GmbH 公司和 NGS 均在欧美国家。之前我国南方、华测等比较大的接收机生产厂商都是将其生产的天线产品送到 Geo++ GmbH 等公司让其代为校验天线的 PCO、PCV 参数。此外,近年我国能自主生产接收机和接收机天线的厂商不断增加,不同厂家的接收机天线设计完成、下线投入市场之前,不管是 GPS 信号还是 BDS 信号的 PCO、PCV 的校验都很有必要。本文的研究将为接收机天线和卫星天线 PCO、PCV 的校验提供完善的算法支持,若能形成相应的校验软件,也能使我国接收机生产厂商摆脱对国外校验公司的技术依赖。

### 1.4 本文研究内容

本文将主要研究接收机和卫星天线绝对 PCO、PCV 的改正模型和校验方法。共 5 章,第 1 章为引言,主要研究内容为第 2、3、4 章,第 5 章为总结

第 2 章将介绍目前国际 GNSS 服务(IGS)发布的天线 PCO、PCV 的改正模型。从精密单点定位和高精度基线解算两个角度,利用全球的 GPS 观测数据分析接收机和卫星天线 PCO、PCV 在高精度定位中的影响。

第 3 章主要阐述接收机和卫星天线 PCO、PCV 的校验方法,并利用全球的 GPS 观测数据对 GPS 卫星天线的 PCO、PCV 进行校验,并将校验结果与 IGS 发布的天

线文件进行比较, 并分析卫星天线 PCO、PCV 内部自洽性, 并利用校验所得天线参数进行精密定轨和精密单点定位的精度验证。

第 4 章对利用区域参考站定轨的北斗残差进行编辑, 计算北斗卫星天线的 PCV, 并对其进行精度分析。

## 第 2 章 接收机和卫星天线 PCO、PCV 改正及其对高精度定位的影响

### 2.1 接收机和卫星天线 PCO、PCV 改正模型

接收机天线上的参考点 (antenna reference point, ARP) 是由用户自行定义。通常天线上的参考点按天线类型定义, 一般定义天线旋转轴与前置放大器底部或者天线旋转轴与天线顶端的交点为天线参考点。接收机天线类型决定了天线接收到的不同方向卫星信号相位中心的坐标。平均相位中心是不同方向卫星信号相位中心的加权平均值。平均相位中心和天线参考点所形成的向量即为天线相位中心偏差 (PCO), 对于不同的天线其长度在几个毫米到十几个厘米。在图 2.1 中天线相位中心偏差为  $\vec{X}_{off}$ 。第二个接收机天线误差项为该接收机对卫星信号的瞬时相位中心和平均相位中心的偏差, 该偏差为卫星高度角  $e$  和方位角  $\alpha$  的函数。这一项影响即为天线相位中心变化 (PCV), 在图 2.1 中表示为  $\Delta\varphi_{PCV}(\alpha, e)$ 。

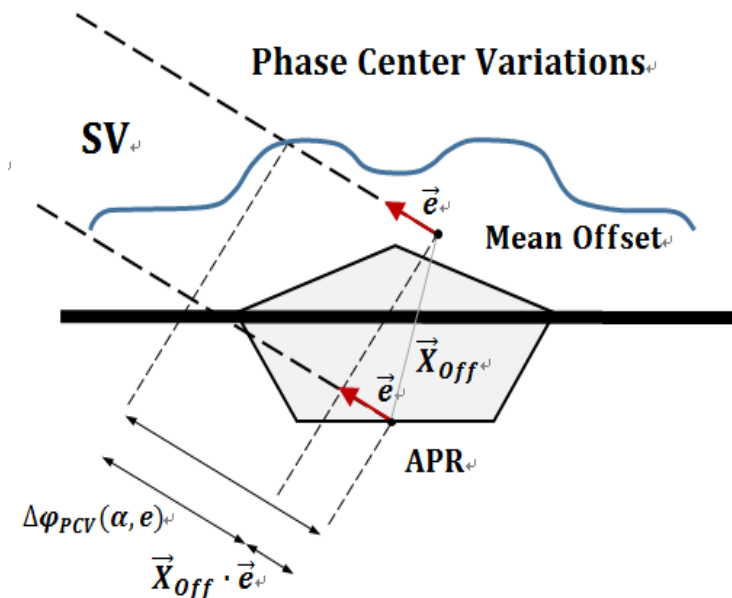


图2.1 接收机天线PCO、PCV示意图

由图 2.1, 对于高度角为  $e$  方位角为  $\alpha$  的卫星的相位观测值的接收机天线改正项  $\Delta\varepsilon_\varphi(\alpha, e)$ , 其计算公式如下

$$\Delta\varepsilon_\varphi(\alpha, e) = \Delta\varphi_{PCV}(\alpha, e) + \vec{X}_{off} \cdot \vec{e}_{(\alpha, e)} \quad (2.1)$$

其中  $\vec{e}_{(\alpha, \epsilon)}$  为观测方向单位向量。

理论上，卫星天线发射信号的相位中心应分布于一个标准的半球面上。但实际上发射天线的相位中心与标准的半球面存在一定的偏离，这是由卫星天线的物理结构决定的，如图 2.2 展示的是 GPS BLOCK I 卫星的天线结构，天线由分别均匀分布在两个同心圆上 12 个螺旋元件构成，其中有 4 个在小圆上，另外 8 个在大圆上，小圆半径是 16.24cm，大圆半径是 43.82cm，小圆上 4 个元件的信号发射功率约占到总功率的 90%。对于不同 BLOCK 的 GPS 卫星，其天线物理结构的主要差别体现在两个同心圆的半径。

卫星天线 PCO 和天线 PCV 通常是在星固系下定义的。与接收机天线类似，PCO 表示卫星质心与卫星天线平均信号中心所形成的向量，PCV 表示瞬时相位中心与平均相位中心的偏差。如图 2.3 所示，在假设 PCV 仅与天底角（卫星星固系 Z 轴与星地连线方向间的夹角）相关的条件下，由卫星天线 PCO 和 PCV 所引起的测站至卫星间距离观测值改正  $\Delta\epsilon'_\phi(z')$ ，可表示为：

$$\Delta\epsilon'_\phi(z') = \Delta\phi'_{PCV}(z') + \vec{X}'_{off} \cdot (-\vec{e}) \quad (2.2)$$

式中  $z'$  为天底角，其计算公式如下：

$$\sin(z') = \frac{R}{r} \sin(z) \quad (2.3)$$

式中  $R$  为地球半径， $r$  为卫星到地心距离， $z$  为测站卫星天顶距。 $\Delta\phi'_{PCV}(z')$  表示天底角为  $z'$  时卫星天线 PCV， $\vec{X}'_{off}$  表示卫星天线 PCO， $-\vec{e}$  表示星固系下卫星至接收机方向的单位向量。

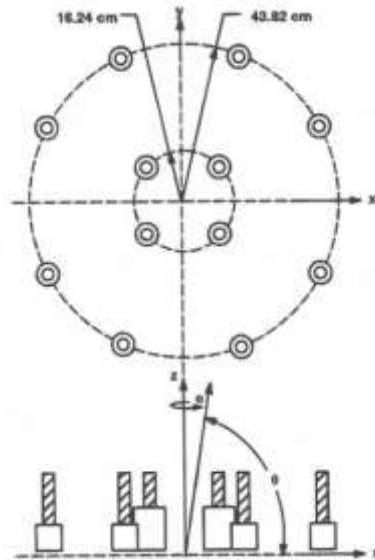


图2.2 卫星天线元件示意图

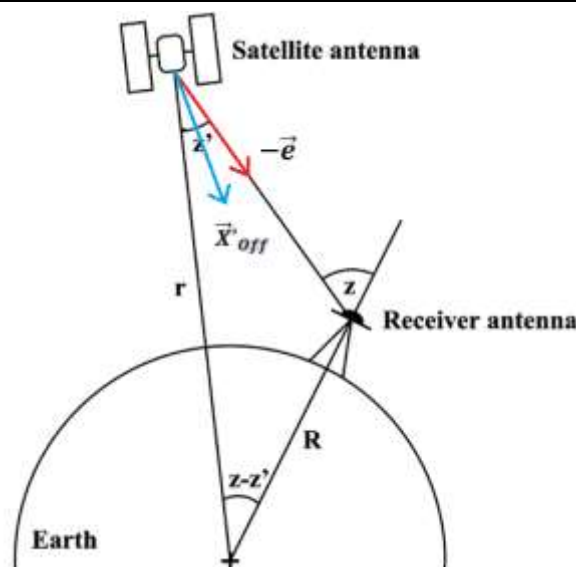


图2.3 卫星天线PCO改正示意图

## 2.2 IGS 发布的接收机和卫星天线 PCO、PCV 改正信息

在高精度数据处理中,接收机天线和卫星天线PCO和PCV改正一般采用IGS发布的改正模型。ANTEX (ANTenna Exchange format) 由 M. Rothacher 和 R. Schmid 在 2002 年加拿大渥太华 IGS 大会上提出,该文件中包含大地测量型接收机天线和 GNSS 卫星天线 PCO、PCV 改正信息。截止 2010 年,已经更新到 1.4 的版本。文件格式的说明参考 <ftp://ftp.igs.org/pub/station/general/antex14.txt>。

现对 igs08\_1930.atx 的部分内容做如下说明:

文件头说明:

```

1.4      M      ANTEX VERSION / SYST
A      PCV TYPE / REFANT
##### COMMENT
Compiled by Ralf Schmid (DGFI-TUM), e-mail: schmid@tum.de  COMMENT
##### COMMENT
##### END OF HEADER

```

图2.4 igs08\_1887.atx文件头

图 2.4 中:

ANTEX VERSION / SYST :

1.4 版本号

M 卫星系统为混合型 ('G': GPS 、'R': GLONASS、'E': Galileo、'C':  
Compass、'J': QZSS、'S': SBAS)

PCV TYPE / REFANT

A 绝对天线改正模型

COMMENT 注释

END OF HEADER 文件头结束

卫星天线改正说明:

BLOCK IIA	G01	G032	1992-079A	START OF ANTENNA		
	COD/EMR/ESA/GFZ/MIT	0	25-MAR-11	TYPE / SERIAL NO		
0.0				METH / BY / # / DATE		
0.0 17.0 1.0				DAZI		
2				ZEN1 / ZEN2 / DZEN		
1992 11 22 0 0 0.0000000				# OF FREQUENCIES		
2008 10 16 23 59 59.9999999				VALID FROM		
IGS08_1930				VALID UNTIL		
G01				SINEX CODE		
279.00 0.00 2380.80				START OF FREQUENCY		
NOAZI -0.80 -0.90 -0.90 -0.80 -0.40 0.20				NORTH / EAST / UP		
G01				0.80 1.30 1.40		
G02				END OF FREQUENCY		
279.00 0.00 2380.80				START OF FREQUENCY		
NOAZI -0.80 -0.90 -0.90 -0.80 -0.40 0.20				NORTH / EAST / UP		
G02				0.80 1.30 1.40		
				END OF FREQUENCY		
				END OF ANTENNA		

图2.5 GPS卫星G01天线信息

图 2.5 中:

START OF ANTENNA 天线参数起始行

TYPE / SERIAL NO

BLOCK IIA 卫星类型

G01 卫星 PRN 号 ('G', 'R', 'E', 'C', 'J', 'S' 分别代表 GPS、GLONASS、Galileo、Compass、QZSS、SBAS)

G032 卫星 SVN 号

1992-079A 卫星发射的年份及相关信息

METH / BY / # / DATE

(空缺) 校验方式

COD/EMR/ESA/GFZ/MIT

参与校验的组织

0 被校验的天线个数

25-MAR-11 天线校验日期

DAZI

0.0 方位角变化步长

ZEN1 / ZEN2 / DZEN

0.0 17.0 1.0 天底角起点、终点和变化步长

# OF FREQUENCIES

```

2                校验的频率数
VALID FROM
1992    11    22    0    0    0.0000000
                参数有效起点时间
2008    10    16    23    59    59.9999999
                参数有效终点时间
SINEX CODE
IGS08_1887      参考的测站坐标信息
START OF FREQUENCY
G01            第一个频率的开始
NORTH / EAST / UP
279.00        0.00    2380.80
                第一个频率相位的 PCO
NOAZI    -0.80    -0.90    -0.90    -0.80    -0.40    0.20    0.80    1.30
1.40    1.20    0.70    0.00    -0.40    -0.70    -0.90    -0.90    -0.90
                第一个频率相位的 PCV
END OF FREQUENCY
G01            该频率结束
(第二个频率同第一个频率，不做解释)
END OF ANTENNA      该天线参数结束

接收机天线改正信息与卫星天线的改正信息格式差别不大，只是部分接收机
天线 PCV 随高度角变化，部分随高度角和方位角变化，如下（AERAT2775_43
NONE 和 AOAD/M_B    NONE，如图 2.6、2.7）：
AERAT2775_43    NONE
FIELD          NGS                3    25-MAR-11
0.0
0.0  80.0    5.0
2
IGS08_1930
CONVERTED FROM RELATIVE NGS ANTENNA CALIBRATIONS
G01
2.88    -0.97    70.15
NOAZI    0.00    -0.13    -0.30    -0.63    -1.22    -1.92
G01
G02
-0.28    -0.39    86.45
NOAZI    0.00    -0.83    -1.51    -2.28    -3.09    -3.88
G02

START OF ANTENNA
TYPE / SERIAL NO
METH / BY / # / DATE
DAZI
ZEN1 / ZEN2 / DZEN
# OF FREQUENCIES
SINEX CODE
COMMENT
START OF FREQUENCY
NORTH / EAST / UP
-2.56    -3.29    -3.77
END OF FREQUENCY
START OF FREQUENCY
NORTH / EAST / UP
-4.69    -5.57    -6.21
END OF FREQUENCY
END OF ANTENNA

```

图2.6 AERAT2775\_43接收机天线信息（无天线罩）

AOAD/M_B				NONE						START OF ANTENNA		
CONVERTED				TUM						TYPE / SERIAL NO		
5.0				0						25-MAR-11		
0.0 90.0 5.0										METH / BY / # / DATE		
2										DAZI		
IGS08_1930										ZEN1 / ZEN2 / DZEN		
CONVERTED FROM igs_01.pcv										# OF FREQUENCIES		
G01										SINEX CODE		
0.58 -0.37 59.85										COMMENT		
NOAZI										START OF FREQUENCY		
0.0										NORTH / EAST / UP		
5.0												
10.0												
15.0												
20.0												
25.0												
30.0												
35.0												
40.0												
45.0												

图2.7 AOAD/M\_B接收机天线信息（无天线罩）

## 2.3 接收机和卫星天线 PCO、PCV 对高精度数据处理的影响

本文将从 GPS 精密单点定位和 GPS 高精度基线解算两个方面，来分析卫星和接收机天线 PCO、PCV 中各项对 GPS PPP 定位结果和 GPS 高精度基线解算结果的影响。在基线长度较短（小于 50km）时，基线两 endpoint GPS 接收机对同一卫星的高度角和方位角一致，在形成站间差分，卫星天线的 PCO 和 PCV 改正将会被抵消掉。因此，下文主要选取长基线（100km~1000km）和超长基线（大于 1000km）来进行相关分析。

### 2.3.1 卫星和接收机天线 PCO、PCV 中各项对 GPS PPP 的影响

选取 ADIS, ASPA, BJFS, CABL, DARW, GUAT, KARR, SASK, SUTH, VAAS, VALD, VILL, YKRO, ZAMB, 15 个 IGS 观测站（测站分布如图 2.8）。取 2015 年年积日 292 到 297 六天的观测数据，分别进行静态精密单点定位和动态精密单点定位，定位所用的精密产品为 IGS 发布的 GPS 15min 精密星历和 30s 钟差产品。由于所用精密星历是基于 IGS08 坐标框架，故测站初始坐标取自 igs15P1867.sn timer，并将其视为真值。定位结果中静态定位统计单天最后坐标结果偏差，动态定位统计单天定位两小时之后坐标的 RMS。

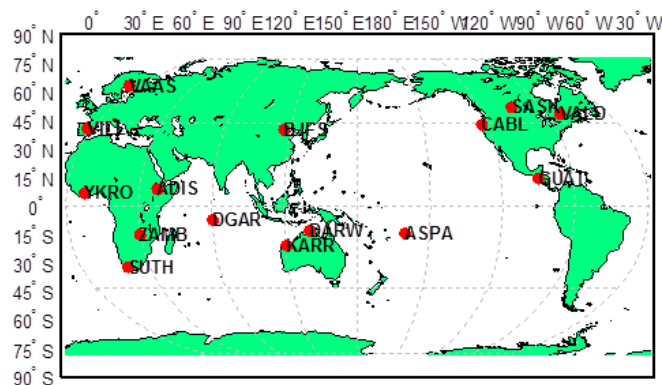


图2.8 测站分布图

### 2.3.1.1 卫星和接收机天线 PCO 和 PCV 均改正的 PPP 定位结果

卫星和接收机天线 PCO 和 PCV 均改正的静态 PPP 最终坐标偏差和动态 PPP 两小时后坐标 RMS 六天平均结果如表 2.1。

表 2.1 卫星和接收机天线 PCO 和 PCV 均改正的 PPP 定位结果

测站	静态 PPP_BIAS (mm)			动态 PPP_RMS (mm)		
	N	E	U	N	E	U
ADIS	-0.8	2.3	-2.7	21.7	32.4	61.1
ASPA	-0.8	-1.2	-8.4	23.1	23.8	60.0
BJFS	-0.2	1.0	0.8	21.9	24.6	63.1
CABL	3.5	-6.0	-1.0	19.3	23.6	53.8
DARW	2.5	0.8	-6.5	30.6	33.2	104.3
DGAR	-0.5	6.3	11.0	24.6	39.3	83.3
GUAT	-0.5	0.2	-12.0	26.5	30.1	54.5
KARR	-0.7	-1.0	-5.5	16.6	16.6	58.5
SASK	3.2	0.7	-6.3	10.9	21.6	30.1
SUTH	0.7	1.0	1.7	20.3	25.4	66.9
VAAS	1.0	1.7	2.5	12.8	11.5	29.0
VALD	3.0	0.2	6.8	16.5	24.2	46.8
VILL	-1.6	4.2	-1.4	22.9	22.7	59.5
YKRO	0.2	-3.5	-6.7	28.5	40.0	99.6
ZAMB	-1.3	0.0	5.5	18.6	23.7	75.3
平均	0.5	0.4	-1.5	21.0	26.2	63.1

在卫星和接收机天线 PCO 和 PCV 均改正的情况下，静态精密单点定位 NE 方向坐标偏差平均在 0.5mm 左右，最大达到 6.3mm，U 方向坐标偏差平均在 -1.5mm 左右，最大达到 12mm。动态精密单点定位 NE 方向 RMS 平均在 26mm 左右，最大达到 40mm，U 方向 RMS 平均在 63mm 左右，最大达到 104.3mm。

### 2.3.1.2 改正卫星天线 PCO、PCV 和接收机天线 PCV 的 PPP 定位结果

定位时测站天线 PCO 改正的计算公式如下：

$$rec\_corr = (f1 \cdot f1 \cdot PCO_{L1} - f2 \cdot f2 \cdot PCO_{L2}) / (f1 + f2) / (f1 - f2) \quad (2.4)$$

式中  $rec\_corr$  为测站地平坐标系中由测站接收机天线 PCO 引起的测站坐标改正量向量,  $f1$  表示 L1 频率,  $f2$  表示 L2 频率,  $PCO_{L1}$  表示接收机天线 L1 频率上的 PCO,  $PCO_{L2}$  表示接收机天线 L2 频率上的 PCO。由式 (2.4) 各测站天线 PCO, 可得各测站坐标改正量, 该坐标改正量在水平面上基本在毫米水平可忽略不计, 在高程上在厘米水平最大可达到十几厘米。因接收机天线对定位结果的影响是一固定值, 在此不做详细讨论。

### 2.3.1.3 改正卫星天线 PCO、PCV 和接收机天线 PCO 的 PPP 定位结果

在改正卫星天线 PCO、PCV 和接收机天线 PCO 的情况下, 15 个测站的六天定位平均结果与卫星和接收机天线 PCO、PCV 均改正的 PPP 定位结果做差, 得到表 2.2 (仅列出 U 方向上差异最大的 3 个站)。

表 2.2 无接收机天线 PCV 改正的部分测站结果偏差

测站	静态 PPP_BIAS (mm)			动态 PPP_RMS (mm)		
	$\Delta N$	$\Delta E$	$\Delta U$	$\Delta N$	$\Delta E$	$\Delta U$
VAAS	-1	-0.7	-33.3	-0.8	0.2	23.5
VALD	-0.7	-1.5	-42.5	1.7	5	10.7
YKRO	0	0.5	-38	-0.3	-1.3	13.4

由做差结果可知测站天线 PCV 对静态精密单点定位的影响, 在 NE 方向不到 3mm, 在 U 方向最大会达到 5cm。测站天线 PCV 对动态精密单点定位的影响, 在对测站天线 PCV 进行改正时, NE 方向上的 RMS 达到 1-4cm 水平, 在不对测站天线 PCV 进行改正时, 大部分测站 NE 方向上的 RMS 变化并不显著, U 方向上 RMS 的增加最高达到 2.4cm。

### 2.3.1.4 改正卫星天线 PCV 和接收机天线 PCO、PCV 的 PPP 定位结果

在改正卫星天线 PCV 和接收机天线 PCO、PCV 的情况下, 15 个测站的六天定位平均结果与卫星和接收机天线 PCO、PCV 均改正的 PPP 定位结果做差得表 2.3 (仅列出 U 方向上差异最大的 3 个站)。

表 2.3 无卫星天线 PCO 改正的部分测站结果偏差

测站	静态 PPP_BIAS (mm)			动态 PPP_RMS (mm)		
	$\Delta N$	$\Delta E$	$\Delta U$	$\Delta N$	$\Delta E$	$\Delta U$
BJFS	-5.5	-17.8	83.9	18.7	19.8	121.3
CABL	6.5	31.2	78	23.6	33.3	97.5
VAAS	19.3	8.5	75.7	45.8	48.6	112.7

由做差结果可知卫星天线 PCO 对静态精密单点定位的影响, 在 NE 方向坐标偏差最大能达到 3.4cm, 在 U 方向坐标偏差最大能达到 8.4cm, U 方向上的偏

差 15 个测站求平均，均值为 6.3cm，与由经验公式：

$$\Delta h(m) \approx -0.05 \cdot \overline{\Delta z(m)} \quad (2.5)$$

估计所得值大致相符，式中  $\Delta h(m)$  为在某历元定位结果中以米为单位的高程方向偏差值， $\overline{\Delta z(m)}$  表示该历元所有可视卫星天线 PCO 在星固系 Z 轴方向以米为单位的投影取平均。动态精密单点定位的影响，NE 方向上的 RMS 增值最大能达到 4.8cm，U 方向上 RMS 增值最高达到 12.1cm。

### 2.3.1.5 改正卫星天线 PCO 和接收机天线 PCO、PCV 的 PPP 定位结果

在改正卫星天线 PCO 和接收机天线 PCO、PCV 的情况下，15 个测站的六天定位平均结果与卫星和接收机天线 PCO、PCV 均改正的 PPP 定位结果做差得表 2.4（仅列出 U 方向上差异最大的 3 个站）。

表 2.4 无卫星天线 PCV 改正的部分测站结果偏差

测站	静态 PPP_BIAS (mm)			动态 PPP_RMS (mm)		
	$\Delta N$	$\Delta E$	$\Delta U$	$\Delta N$	$\Delta E$	$\Delta U$
KARR	-1	-0.2	-4	-0.3	2.6	13.9
VALD	0	1	-9.8	2.9	1.6	4.7
VILL	0	0	-9.4	7.1	0.7	14.5

由做差后结果可知卫星天线 PCV 对静态精密单点定位的影响，在 NE 方向坐标偏差上不显著，均小于 5mm，在 U 方向坐标偏差上页均在 1cm 以下。卫星天线 PCV 对动态精密单点定位的影响，NE 方向上的 RMS 增加均小于 1cm，U 方向上 RMS 的增加最高不超过 1.5cm。

综上分析，卫星天线 PCO、PCV 和接收机天线 PCV 对静态和动态精密单点定位的影响如表 2.5：

表 2.5 接收机和卫星天线 PCO、PCV 各项对定位结果的影响

改正项	静态 PPP 坐标偏差		动态 PPP 坐标 RMS	
	$ \Delta NE $	$ \Delta U $	$\Delta NE$	$\Delta U$
接收机天线 PCV	小于 3mm	6~43mm	小于 11mm（绝对值）	1~24mm
卫星天线 PCO	0~35mm	32~84mm	-4~49mm	20~122mm
卫星天线 PCV	小于 5mm	2~10mm	小于 10mm（绝对值）	-4~14.5mm

## 2.3.2 卫星和接收机天线 PCO、PCV 中各项对 GPS 高精度基线解算的影响

在基线长度较短（小于 50km）时，基线两端点接收机观测同一卫星的高度

角和方位角基本一致，在形成站间单差观测值时，卫星天线的 PCO 和 PCV 改正将会被抵消掉。因此，本文主要选取长基线（100km~1000km）和超长基线（大于 1000km）来进行相关分析。

选取美国南加州的七个 IGS 观测站 BLYT, GOLD, IID2, JPLM, POTR, SBCC, WIDC, 来组成长基线（测站分布如图 2.9），选取亚太地区的六个 IGS 观测站 ALIC, COCO, KOKB, LHAZ, MAC1, THTI, 来组成超长基线，部分站相互之间距离很远，无共视卫星，无法组成差分观测值，剔除部分长度超过 5000km 基线，最后形成的观测基线如图 2.10。取 2016 年年积日 159 到 165 一周观测数据进行高精度基线解算。

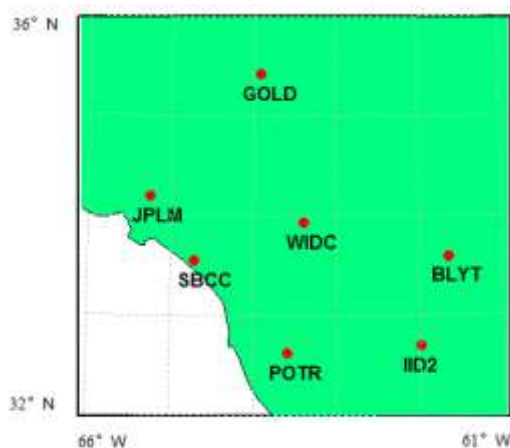


图2.9 测站南加州分布图

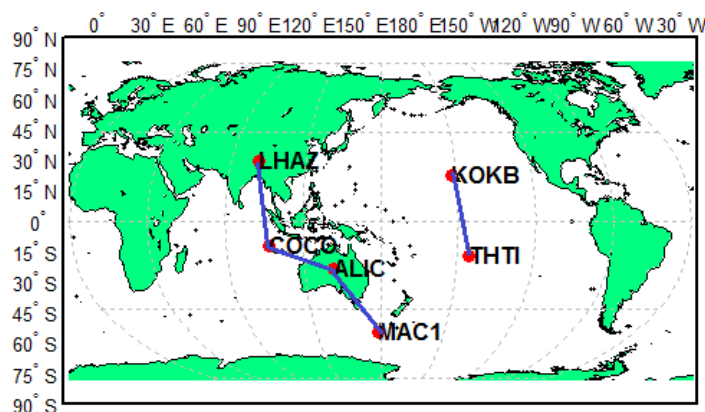


图2.10 亚太地区测站分布

在卫星和接收机天线 PCO、PCV 均改正的情况下，将长基线和超长基线一周解算结果和 IGS 发布的 SNX 单天解相比较（仅比较基线长度）。解算所得基线长度和 IGS 单天解差值大部分小于 3mm，最大不超过 7mm，说明结果的可靠性。

### 2.3.2.1 改正卫星天线 PCO、PCV 和接收机天线 PCV 的基线解算结果

由测站天线 PCO 和式 (2.4) 可得到测站天线 PCO 对测站坐标的改正量, 如下表 2.6:

表 2.6 测站天线 PCO 对测站坐标的改正量

测站		BLYT	GOLD	IID2	JPLM	POTR	SBCC	WIDC	ALIC	COCO	KOKB	LHAZ	MAC1	THTI
坐标改	N	1.6	1.6	2	1.6	1.4	2	2.7	0.8	1.6	1.6	2.1	1.6	2.6
正量	E	0	0	-0.1	0	0.7	-0.1	-1.8	1.1	0	0	2.2	0	-1.2
(mm)	U	47.8	47.8	45	47.8	37.5	45	80.7	166.4	47.8	47.8	168.3	47.8	46.5

将对卫星天线 PCO、PCV 和接收机天线 PCO、PCV 进行改正的基线解算结果和对卫星天线 PCO、PCV 和接收机天线 PCV 进行改正的基线解算结果做差, 结果如表 2.7 (列出基线各个方向分量差值平均值和标准差, 列出部分差异较大的基线和部分差异较小的基线)。

表 2.7 无接收机天线 PCO 改正的部分基线结果偏差

测站	测站	$\Delta X$ (m)		$\Delta Y$ (m)		$\Delta Z$ (m)		$\Delta L$ (m)	
1	2	平均	标准差	平均	标准差	平均	标准差	平均	标准差
BLYT	SBCC	0.0011	0.00036	-0.0032	0.00028	0.0012	0.00017	-0.0025	-0.0024
BLYT	WIDC	0.0147	0.00015	0.0224	0.00037	-0.0195	0.00012	-0.0037	-0.0039
GOLD	SBCC	-0.0001	0.00029	-0.0016	0.00005	0.0028	0.00007	-0.0016	-0.0016
GOLD	WIDC	0.0135	0.00005	0.0240	0.00016	-0.0180	0.00006	-0.0008	-0.0004
JPLM	POTR	-0.0053	0.00008	-0.0059	0.00018	0.0071	0.00010	-0.0025	-0.0026
POTR	WIDC	0.0174	0.00005	0.0298	0.00019	-0.0261	0.00008	-0.0023	-0.0026
SBCC	WIDC	0.0135	0.00025	0.0256	0.00017	-0.0208	0.00009	-0.0002	-0.0001
ALIC	COCO	-0.1011	0.00159	0.0540	0.00445	-0.0556	0.00088	-0.0730	0.00194
ALIC	MAC1	-0.0789	0.00064	0.1010	0.00136	-0.0250	0.00114	-0.0689	0.00163
COCO	LHAZ	0.0032	0.00780	-0.0437	0.01090	-0.0779	0.00410	-0.0697	0.00324
KOKB	THTI	0.0075	0.01196	0.0099	0.00473	0.0336	0.00310	-0.0344	0.00328

由表 2.7 可知,  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$ ,  $\Delta Z$ ,  $\Delta L$  的标准差对于长基线均小于 0.4mm, 对于超长基线均在毫米级, 少数几个达到厘米但小于 2cm, 说明连续单天解基线各分量差值非常稳定, 可由  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$ ,  $\Delta Z$ ,  $\Delta L$  多天的均值来分析差值的性质, 在后面不同的天线参数解算结果中情况与之类似。测站天线 PCO 对超长基线各分量的影响能达到十几厘米。但是对于长基线, 仅包含 WIDC 测站的基线, 基线分量偏差能达到厘米级, 其他基线分量偏差均在毫米级。其原因是: 由表 2.6, 在忽略 NE 方向的测站坐标改正量, BLYT, GOLD, IID2, JPLM, POTR, SBCC 测站 U 方向坐标改正量均在 35~50mm, 而 WIDC 测站 U 方向坐标改正量在 80.7mm, 在基线长度在 100~500km 的范围内, 基线两端测站的天线相位中心均沿测站高程方向向下移动相同的距离 (小于 10cm), 对基线分量的影响很微小,

但是当基线长度很长时，这种影响将会显著增加，其示意图如图 2.11，图中 O 为地心。

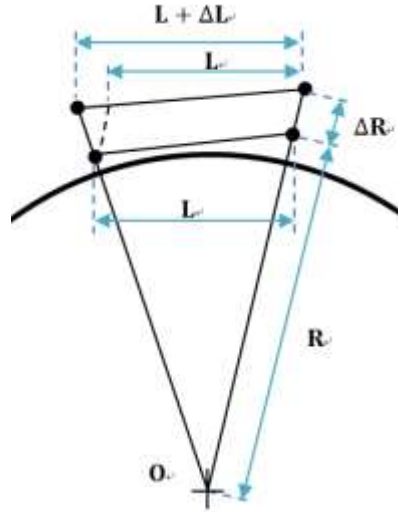


图2.11 测站PCO影响示意图

由图 2.11 可得公式 (2.6)

$$\frac{L}{L + \Delta L} \approx \frac{R}{R + \Delta R} \quad (2.6)$$

式中  $L$  为测站的天线相位中心移动后所形成的基线长度， $L + \Delta L$  为原来的基线长度， $R$  为测站的天线相位中心移动后，天线相位中心到地心的距离， $\Delta R$  测站的天线相位中心移动的距离。当  $\Delta R$  取值 40mm， $R$  取值 6378km，对于基线长度在 300km 左右时， $\Delta L$  为 2mm；对于基线长度在 4000km 时， $\Delta L$  为 32mm。 $\Delta L = 2mm$  与表 2.7 中不包含 WIDC 的长基线的  $\Delta L$  值基本相符； $\Delta L = 32mm$  与表 2.7 中超长基线 KOKB-THTI 的  $\Delta L$  值基本相符。这种基线两端点测站的天线相位中心均沿测站高程方向向下移动相同的距离对基线各分量的影响，理论上即为  $\Delta L$  在各个不同的方向上的投影，表 2.7 中的超长基线 KOKB-THTI，能很好地印证这一点，对于长基线因  $\Delta L = 2mm$  相对来说其值太小，接近噪声水平，不便于验证。

如仅对 BLYT, GOLD, IID2, JPLM, POTR, SBCC, WIDC 中 GOLD 和 JPLM 的测站天线 PCO 进行改正(GOLD 和 JPLM 测站天线均为 AOAD/M\_T NONE)，其他解算参数不变。解算结果与和对卫星天线 PCO、PCV 和接收机天线 PCO、PCV 进行改正的基线解算结果做差，结果如表 2.8(仅列出部分基线比较结果)。

表 2.8 部分测站无接收机天线 PCO 改正的部分基线结果偏差

测站 1	测站 2	$\Delta X$ (m)		$\Delta Y$ (m)		$\Delta Z$ (m)		$\Delta L$ (m)	
		平均	标准差	平均	标准差	平均	标准差	平均	标准差
BLYT	GOLD	-0.0161	0.00012	-0.0356	0.00017	0.0275	0.00017	-0.0003	0.00003
BLYT	IID2	-0.0005	0.00011	-0.0019	0.00027	0.0018	0.00021	-0.0006	0.00005
BLYT	JPLM	-0.0158	0.00019	-0.0357	0.00031	0.0277	0.00017	-0.0014	0.00003
BLYT	POTR	-0.0028	0.00010	-0.0075	0.00022	0.0066	0.00015	-0.0012	0.00010
BLYT	SBCC	0.0010	0.00032	-0.0033	0.00022	0.0012	0.00016	-0.0024	0.00028
BLYT	WIDC	0.0147	0.00012	0.0223	0.00036	-0.0195	0.00010	-0.0039	0.00010
GOLD	JPLM	0.0002	0.00007	0.0000	0.00014	0.0002	0.00006	-0.0003	0.00005

由表 2.8 可知, 凡包含测站 GOLD, JPLM 和 WIDC 的长基线 (基线 GOLD-JPLM 除外), 基线分量的偏差均达到了厘米水平 (不超过 6cm), 说明基线两端测站天线 PCO 仅改正其中一个测站对基线解算结果的影响明显, 在两端测站天线 PCO 均不改正的情况下, 当两测站天线 PCO 相近时 (如基线 GOLD-JPLM), 其对基线的影响也不显著。

### 2.3.2.2 改正卫星天线 PCO、PCV 和接收机天线 PCO 的基线解算结果

将对卫星天线 PCO、PCV 和接收机天线 PCO、PCV 进行改正的基线解算结果和对卫星天线 PCO、PCV 和接收机天线 PCO 进行改正的基线解算结果做差, 结果如表 2.9 (仅列出部分基线比较结果)

表 2.9 无接收机天线 PCV 改正的部分基线结果偏差

测站 1	测站 2	$\Delta X$ (m)		$\Delta Y$ (m)		$\Delta Z$ (m)		$\Delta L$ (m)	
		平均	标准差	平均	标准差	平均	标准差	平均	标准差
BLYT	SBCC	-0.0001	0.00012	0.0014	0.00014	-0.0002	0.00008	0.0007	0.00005
BLYT	WIDC	0.0125	0.00034	0.0251	0.00062	-0.0161	0.00036	0.0000	0.00005
GOLD	SBCC	0.0002	0.00008	0.0006	0.00015	-0.0011	0.00015	0.0005	0.00003
GOLD	WIDC	0.0128	0.00035	0.0242	0.00055	-0.0170	0.00036	-0.0013	0.00015
POTR	SBCC	0.0037	0.00014	0.0081	0.00027	-0.0047	0.00013	0.0010	0.00010
POTR	WIDC	0.0163	0.00032	0.0317	0.00058	-0.0206	0.00037	0.0024	0.00011
SBCC	WIDC	0.0126	0.00031	0.0236	0.00058	-0.0159	0.00036	0.0009	0.00005
ALIC	COCO	0.0054	0.00177	0.0096	0.00073	0.0032	0.00093	0.0100	0.00158
ALIC	MAC1	-0.0027	0.00116	-0.0029	0.00130	-0.0125	0.00127	0.0100	0.00104
COCO	LHAZ	0.0004	0.00071	-0.0112	0.00337	0.0089	0.00142	0.0103	0.00111
KOKB	THTI	-0.0080	0.00607	-0.0090	0.00212	-0.0192	0.00131	0.0201	0.00136

由表 2.9 可知, 对于长基线  $\Delta L$  最大不超过 2.5mm; 但是包含测站 WIDC 的基线, 基线分量偏差  $\Delta X$ 、 $\Delta Y$ 、 $\Delta Z$  能达到厘米级, 最大可达到 3.2cm, 其他长基线的基线分量偏差  $\Delta X$ 、 $\Delta Y$ 、 $\Delta Z$  均在毫米级。这是因为 BLYT, GOLD, IID2, JPLM, POTR, SBCC 测站天线 PCV 参数相近, 而 WIDC 测站天线 PCV 参数与其

他测站天线 PCV 参数差异较大，如图 2.12。

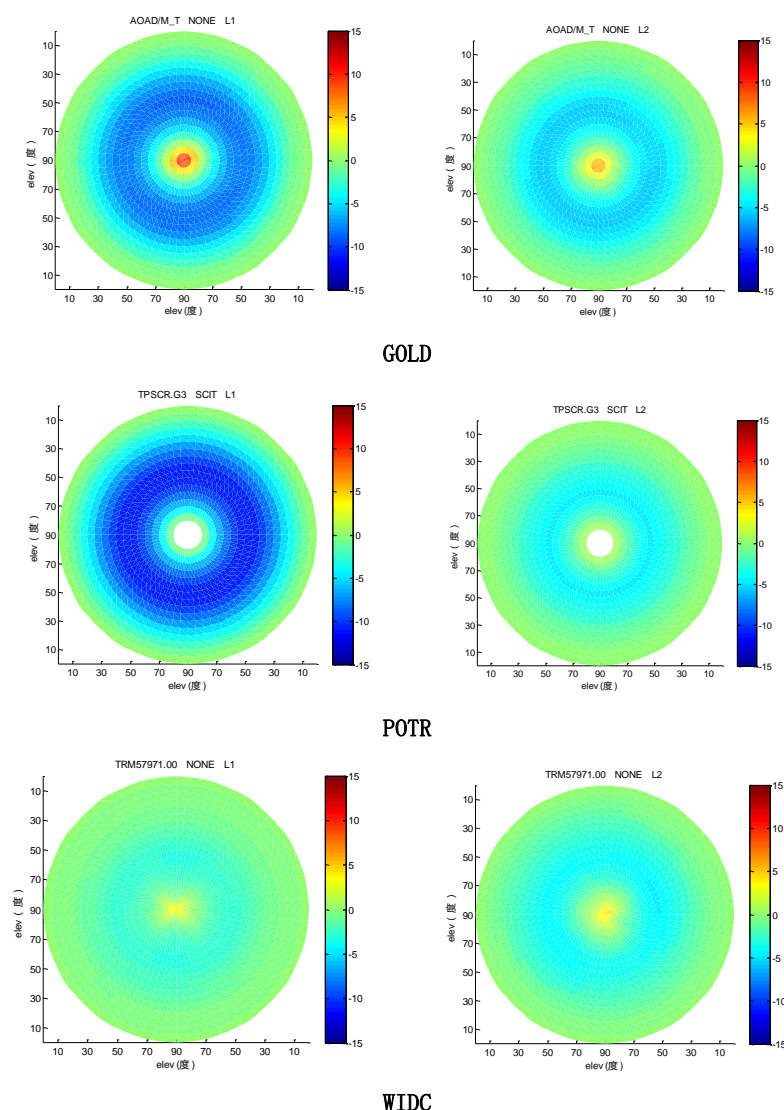


图2.12 GOLD POTR WIDC测站PCV

图 2.12 中展示了 GOLD, POTR 和 WIDC 三个测站天线 PCV，可明显看出 WIDC 测站天线 PCV 在 L1 上与 GOLD 和 POTR 天线的差异。

由表 2.9，对于超长基线的影响不管是基线分量偏差  $\Delta X$ 、 $\Delta Y$ 、 $\Delta Z$  还是基线长度偏差  $\Delta L$ ，都能达到厘米级，最大可达到 1.9cm。虽然 ALIC 和 LHAZ 两测站天线 PCV 参数相近，COCO, KOKB, MAC1, THTI 四测站天线 PCV 参数相近，但是基线 KOKB-MAC1 在  $\Delta Z$  和  $\Delta L$  上均存在 2cm 左右的偏差。这是因为在基线长度在 300km 左右时，基线两端测站观测到的同一个卫星的高度角和方位角大小相近，在测站天线 PCV 又相近的情况下，在组成差分观测值时能正好将测站天线 PCV 改正项抵消掉，而测站天线 PCV 差异较大时则不能抵消掉；然而在基线长度大于 2000km 左右时，基线两端测站观测到的同一个卫星的高度角和方位角大小差异已经很大，不管基线两端点测站天线 PCV 相同与否，在组成

差分观测值时测站天线 PCV 改正项都无法抵消掉。

### 2.3.2.3 改正卫星天线 PCV 和接收机天线 PCO、PCV 的基线解算结果

将对卫星天线 PCO、PCV 和接收机天线 PCO、PCV 进行改正的基线解算结果和对卫星天线 PCV 和接收机天线 PCO、PCV 进行改正的基线解算结果做差，结果如表 2.10（仅列出部分基线比较结果）

表 2.10 无卫星 PCO 改正的部分基线结果偏差

测站 1	测站 2	$\Delta X$ (m)		$\Delta Y$ (m)		$\Delta Z$ (m)		$\Delta L$ (m)	
		平均	标准差	平均	标准差	平均	标准差	平均	标准差
BLYT	GOLD	0.0015	0.00010	-0.0029	0.00015	-0.0004	0.00010	-0.0029	0.00005
BLYT	POTR	0.0015	0.00015	-0.0006	0.00028	0.0014	0.00011	-0.0021	0.00010
BLYT	SBCC	0.0022	0.00021	-0.0021	0.00006	0.0013	0.00005	-0.0029	0.00021
BLYT	WIDC	0.0012	0.00012	-0.0014	0.00010	0.0004	0.00007	-0.0017	0.00008
ALIC	COCO	-0.0400	0.00346	-0.0041	0.00571	-0.0148	0.00141	-0.0391	0.00448
ALIC	MAC1	-0.0065	0.00341	0.0299	0.00383	0.0168	0.00487	-0.0340	0.00230
COCO	LHAZ	0.0132	0.01184	-0.0341	0.01259	-0.0214	0.00217	-0.0143	0.00173
KOKB	THTI	-0.0256	0.00877	-0.0084	0.01499	0.0356	0.00338	-0.0343	0.00502

由表 2.10 可知，卫星天线 PCO 对长基线的影响不管是基线分量偏差  $\Delta X$ 、 $\Delta Y$ 、 $\Delta Z$  还是基线长度偏差  $\Delta L$  均在毫米级，最大不超过 4mm；对超长基线的影响不管是基线分量偏差  $\Delta X$ 、 $\Delta Y$ 、 $\Delta Z$  还是基线长度偏差  $\Delta L$  均在厘米，最大能达到 4cm。造成这种差异的原因与 2.3.2.2 中的原因类似，在基线长度在 300km 左右时，由同一个卫星观察基线两端测站的天底角和方位角大小相近，在组成差分观测值时能正好将卫星天线 PCO 改正项抵消掉；然而在基线长度大于 2000km 左右时，由同一个卫星观察基线两端测站的天底角和方位角相差较大，在组成差分观测值时卫星天线 PCO 改正项无法抵消掉。

### 2.3.2.4 改正卫星天线 PCO 和接收机天线 PCO、PCV 的基线解算结果

将对卫星天线 PCO、PCV 和接收机天线 PCO、PCV 进行改正的基线解算结果和对卫星天线 PCO 和接收机天线 PCO、PCV 进行改正的基线解算结果做差，结果如表 2.11（仅列出部分基线比较结果）。

表 2.11 无卫星 PCV 改正的部分基线结果偏差

测站 1	测站 2	$\Delta X$ (m)		$\Delta Y$ (m)		$\Delta Z$ (m)		$\Delta L$ (m)	
		平均	标准差	平均	标准差	平均	标准差	平均	标准差
BLYT	GOLD	0.0002	0.00017	0.0005	0.00026	0.0000	0.00017	0.0002	0.00006
BLYT	POTR	0.0000	0.00011	0.0004	0.00015	-0.0003	0.00009	0.0002	0.00003
BLYT	SBCC	0.0002	0.00010	0.0007	0.00018	-0.0004	0.00012	0.0002	0.00005
BLYT	WIDC	0.0001	0.00012	0.0004	0.00024	-0.0002	0.00014	0.0001	0.00005
ALIC	COCO	-0.0047	0.00151	-0.0006	0.00156	-0.0014	0.00097	0.0074	0.00048
ALIC	MAC1	-0.0014	0.00192	0.0006	0.00195	-0.0027	0.00249	0.0070	0.00046
COCO	LHAZ	0.0024	0.00188	-0.0011	0.00568	0.0058	0.00259	0.0079	0.00056
KOKB	THTI	-0.0191	0.00643	-0.0081	0.00269	0.0014	0.00111	0.0093	0.00113

由表 2.11 可知，卫星天线 PCV 对长基线的影响不管是基线分量偏差  $\Delta X$ 、 $\Delta Y$ 、 $\Delta Z$  还是基线长度偏差  $\Delta L$  基本在毫米以下，最大值为 1mm；对超长基线的影响不管是基线分量偏差  $\Delta X$ 、 $\Delta Y$ 、 $\Delta Z$  还是基线长度偏差  $\Delta L$  大部分在毫米，仅基线 KOKB-THTI 在 X 方向达到 2cm。这是因为在基线长度在 300km 左右时，由同一个卫星观测到基线两端测站的天底角和方位角大小相近，在组成差分观测值时能正好将卫星天线 PCV 改正项抵消掉；然而在基线长度大于 2000km 左右时，由同一个卫星观察基线两端测站的天底角和方位角相差较大，在组成差分观测值时卫星天线 PCV 改正项无法抵消掉。

综上分析，卫星天线 PCO、PCV 和接收机天线 PCO、PCV 对高精度基线解算定位的影响如表 2.12：

表 2.12 接收机和卫星天线 PCO、PCV 各项对基线解算结果的影响

改正项	长基线		超长基线	
	$ \Delta XYZ $	$ \Delta L $	$ \Delta XYZ $	$ \Delta L $
接收机天线 PCO	0~58mm	小于 4mm	3~101mm	34~73mm
接收机天线 PCV	0~32mm	小于 3mm	0~20mm	10~21mm
卫星天线 PCO	小于 4mm	小于 4mm	4~36mm	14~40mm
卫星天线 PCV	小于 1mm	小于 1mm	0~20mm	7~10mm

## 2.4 本章小结

本章介绍了接收机和卫星天线 PCO、PCV 改正模型，解释了目前 IGS 发布的天线改正文件 ANTEX 的相关内容。本章第 3 节重点论述了接收机和卫星天线 PCO、PCV 各项对高精度数据处理的影响，其中接收机天线 PCO、PCV 对精密单点定位水平方向上的影响小于 11mm，高程方向上影响最大可达 189mm；对长基线或超长基线在各分量方向或长度上的影响最大可达到 101mm。卫星天线

PCO、PCV 对精密单点定位水平方向上的影响最大可达到 49mm，高程方向上的影响最大可达到 122mm；对长基线在各分量方向或长度上的影响在毫米水平，最大不超过 4mm，对超长基线在各分量方向或长度上的影响最大可达到 40mm。

## 第 3 章 接收机和卫星天线 PCO、PCV 校验

### 3.1 接收机天线校验原理

本章以 NGS 野外校验场为例，介绍接收机天线机器人校验方法。

NGS 的校验设备由处于 5m 长的超短基线两端观测墩上的接收机天线构成，基线 XYZ 各分量的值由单频相对定位测得。校验设备在宽阔、平坦，没有障碍物和反射物的野外场地，多径测试显示主要的多径来之地面反射。



图3.1 接收机天线野外校检场

测试中的参考天线和待校验天线接入同一接收机，在解算超短基线时接收机钟差能轻松地抵消掉。如下文将要讨论的，校验时待校验天线的信号接收的角度必须快速的改变且运动的角度要足够大。待校验的天线的运动是通过程序控制的机器人手臂来完成的。



图3.2 接收机天线校验机器人手臂

通过机器人手臂的运动，待校验天线接收信号的方向可以为任意方向，如下图 3.3。

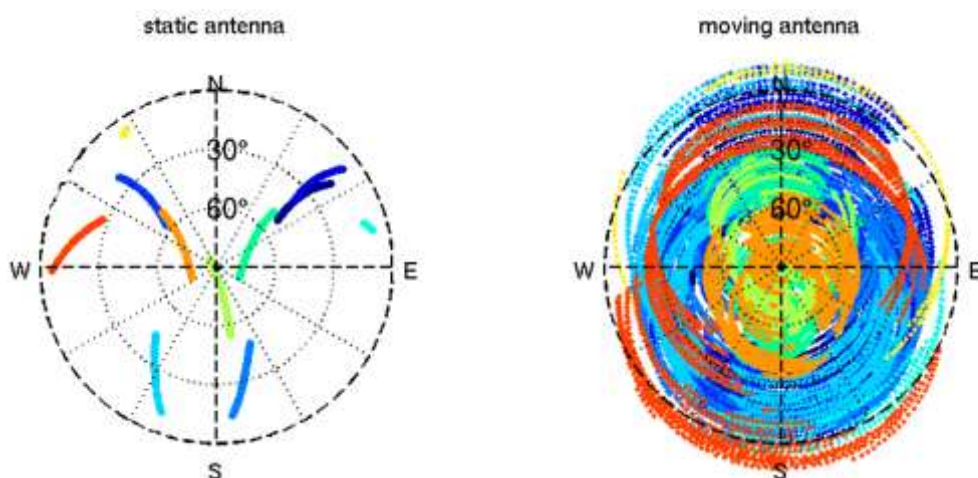


图3.3 卫星轨迹图，左图为将待校验天线固定的卫星轨迹图，右图为将带校验天线在 $[-180^\circ, 180^\circ]$ 的范围内旋转，在 $[-25^\circ, 30^\circ]$ 的范围内倾斜的卫星轨迹图（Andria Bilich 2010）

如果接收机天线被固定，只有固定方向的信号被观测到，进而观测数据的密度远远达不到解算所有方位角和高度角下的 PCV 的要求。此外，卫星在较高的高度角时，通过倾斜天线模拟出低高度角入射到天线的情况，有效地避免了多径的影响，低于  $15^\circ$  的高度角也可进行检验，且可将校验的高度角方位扩展到 $[-5^\circ, 90^\circ]$ 。

在考虑了部分已知量（精确测站坐标）和可忽略的量之后，参考天线和待校验天线对同一颗卫星的观测方程如下：

$$\phi_{ref}^{sv} = \delta_{rx} - \delta^{sv} + A + MP_{ref} + APC_{ref} + N_{ref} + \varepsilon_{ref} \quad (3.1)$$

$$\phi_{test}^{sv} = \delta_{rx} + DHB - \delta^{sv} + A + MP_{test} + APC_{test} + N_{test} + \varepsilon_{test} \quad (3.2)$$

式中站星几何距离等已知信息均已考虑。方程中包含的项有各天线的天线误差改正 APC、整周模糊度、观测噪声  $\varepsilon$  和多路径影响 MP，其中参考天线和待校验天线的卫星钟差  $\delta^{sv}$ 、接收机钟差  $\delta_{rx}$  和中性大气延迟 A（包含对流层和电离层）相同。相同的接收机钟差得益于双天线接收机，或参考天线和待校验天线接入不同接收机，接收机再接入同一外接的钟也可保持接收机钟差一致。即使拥有相同的接收机钟差，但是系统中还是存在不同的硬件延迟 DHB。这种硬件延迟来自于参考天线信道和待校验天线信道的信号传输差异，但是此处将这种偏差归入到待校验天线的观测方程内。由于基线为超短基线（5m），一颗卫星的信号将会经过几乎一致的路径而到达两天线，因而两天线上的大气延迟中的电离层和对流层可认为一致。进行站间差分，消除相等误差项：

$$\Delta\phi = \phi_{test}^{sv} - \phi_{ref}^{sv} = APC_{test} - APC_{ref} + DHB + MP_{test} - MP_{ref} + \Delta N + \Delta\epsilon \quad (3.3)$$

对于天线的误差改正 APC 可以表示为

$$APC = \overrightarrow{PCO} \cdot \overrightarrow{LOS}(\theta, \alpha) + PCV(\theta, \alpha) \quad (3.4)$$

式中  $\overrightarrow{LOS}(\theta, \alpha)$  为测站地平坐标系中卫星观测方向的单位向量,  $\theta$  为高度角,  $\alpha$  为方位角。为得到 PCO 和 PCV, 所有与之无关的参数都必须消除。我们选取时间间隔在 10s 内的然而测试天线指向不同的 A 和 B 两个时段, 由(3.3)(3.4)式可以得:

$$\begin{aligned} \Delta\phi_A = & \overrightarrow{PCO}_{test} \cdot \overrightarrow{LOS}(\theta_A, \alpha_A) + PCV_{test}(\theta_A, \alpha_A) - (\overrightarrow{PCO}_{ref} \cdot \overrightarrow{LOS}(\theta, \alpha) + \\ & PCV_{ref}(\theta, \alpha)) + DHB_A + MP_{test}(\theta_A) - MP_{ref}(\theta) + \Delta\epsilon_A \end{aligned} \quad (3.5)$$

$$\begin{aligned} \Delta\phi_B = & \overrightarrow{PCO}_{test} \cdot \overrightarrow{LOS}(\theta_B, \alpha_B) + PCV_{test}(\theta_B, \alpha_B) - (\overrightarrow{PCO}_{ref} \cdot \overrightarrow{LOS}(\theta, \alpha) + \\ & PCV_{ref}(\theta, \alpha)) + DHB_B + MP_{test}(\theta_B) - MP_{ref}(\theta) + \Delta\epsilon_B \end{aligned} \quad (3.6)$$

A 和 B 两个时间段间卫星在地平坐标系中的运动可以忽略。校验时参考天线固定, 在 A 到 B 的时段内可认为高度角  $\theta$  和方位角  $\alpha$  固定不变, 而待校验天线是运动的, 因此  $\theta_A \neq \theta_B$  且  $\alpha_A \neq \alpha_B$ 。在站间单差的基础上形成历元间差分 ( $TDSD_{AB}$ ) 消除参考天线误差和多径:

$$\begin{aligned} TDSD_{AB} = & \Delta\phi_A - \Delta\phi_B \\ = & \overrightarrow{PCO}_{test} \cdot \overrightarrow{LOS}(\theta_A, \alpha_A) + PCV_{test}(\theta_A, \alpha_A) - (\overrightarrow{PCO}_{test} \cdot \overrightarrow{LOS}(\theta_B, \alpha_B) + \\ & PCV_{test}(\theta_B, \alpha_B)) + MP_{test}(\theta_A) - MP_{test}(\theta_B) + \Delta DHB_{AB} + \Delta\Delta\epsilon_{AB} \end{aligned} \quad (3.7)$$

由于 A 和 B 时间段的时间间隔较短, 且 A 和 B 时间段并不长, 在 A 和 B 时间段内硬件延迟的变化可以忽略不计。同样在 A 和 B 时间段内待校验天线的位置变化也不会很显著, 特别是 A 和 B 时间段内待校验天线离地高度基本不变, 这种情况下 A 和 B 时间段内待检验天线接收到的地表的反射多径信号基本相同。此时 (7) 式可简化为

$$\begin{aligned} TDSD_{AB} = & \overrightarrow{PCO}_{test} \cdot \overrightarrow{LOS}(\theta_A, \alpha_A) + PCV_{test}(\theta_A, \alpha_A) - (\overrightarrow{PCO}_{test} \cdot \overrightarrow{LOS}(\theta_B, \alpha_B) + \\ & PCV_{test}(\theta_B, \alpha_B)) + \Delta\Delta\epsilon_{AB} \end{aligned} \quad (3.8)$$

由式 (3.8) 可知, 等式中并不包含与参考天线相关的项。联合多个类似 A、B 的观测时段, 忽略 PCVs 的影响, 可得到:

$$\begin{aligned} TDSD_{AB} = & \overrightarrow{PCO}_{test} \cdot \overrightarrow{LOS}(\theta_A, \alpha_A) - \overrightarrow{PCO}_{test} \cdot \overrightarrow{LOS}(\theta_B, \alpha_B) \\ = & \overrightarrow{PCO}_{test} (\overrightarrow{LOS}(\theta_A, \alpha_A) - \overrightarrow{LOS}(\theta_B, \alpha_B)) \end{aligned} \quad (3.9)$$

由式 (3.9) 可得 PCO 的解  $\overrightarrow{pcO}$ , 代入式 (3.8) 除去 PCO 的影响, 可得:

$$TDSD_{AB} - \vec{pco} \cdot (\vec{LOS}(\theta_A, \alpha_A) - \vec{LOS}(\theta_B, \alpha_B)) = PCV_{test}(\theta_A, \alpha_A) - PCV_{test}(\theta_B, \alpha_B) \quad (3.10)$$

PCV 可看作两个球谐曲面的差。

### 3.2 GPS 卫星天线校验原理

与接收机天线 PCO、PCV 改正模型相似，卫星天线的改正同样包含 PCO、PCV，但是目前 IGS 发布的卫星天线 PCV 是随天底角变化的分段线性函数模型，而非随天底角和方位角变化的二维函数模型。有国外学者做过相关的研究，但相对于随天底角变化的分段线性函数模型，其改善的效果并不显著。本文后面讨论的卫星 PCV 也选用随天底角变化的分段线性函数模型。此外，在卫星出厂的时，厂商会给出卫星 PCO 的协议值，表 3.1 列出了部分 GPS 卫星天线 PCO 的协议值。图 3.4 中给出了 GPS Block IIA 卫星天线 PCO 协议值的示意图，视线为逆着星固系 Z 轴的方向。图中 SPACECRAFT CG 表示卫星的质量中心（星固系的原点），GPS ARRAY PHASE CENTER 为卫星天线平均相位中心，CENTER OF RETROREFLECTOR ARRAY 为激光反射棱镜中心。理论上，卫星天线发射信号的相位中心应分布于一个标准的半球面上，图中卫星天线两个同心圆上天线元件的功率差异使得实际上发射天线的相位中心与标准的半球面存在一定的偏离。

表 3.1 不同类型卫星天线 PCO 协议值

卫星类型	$\Delta X$ (mm)	$\Delta Y$ (mm)	$\Delta Z$ (mm)
Block II/IIA	279	0	1023
Block IIR	0	0	0

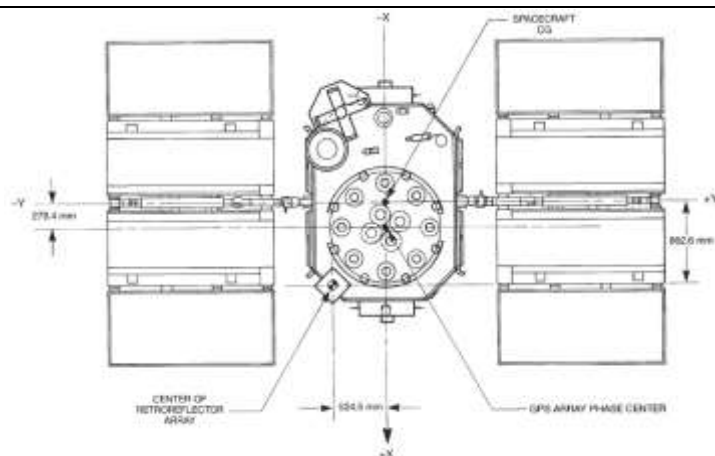


图 3.4 GPS Block IIA 卫星天线 PCO 协议值的示意图

IGS 发布的卫星天线 PCO 中的 X 轴分量和 Y 轴分量的值与协议值保持一致，

这是因为卫星天线 PCO 中的 X 轴和 Y 轴分量与卫星轨道参数存在相关性。将卫星天线 PCO 各分量和卫星轨道同时估计时, 卫星轨道部分特性将会被卫星天线 PCO 中的 X 轴和 Y 轴分量吸收, 使得 X 轴和 Y 轴分量在协议值附近存在一个以半年为周期的变化项。当仅估计 Z 轴分量时(将 X 轴和 Y 轴分量固定为协议值), 卫星的轨道特性绝大部分包含于卫星的轨道参数中, 未被轨道参数包含的, 一部分被 Z 轴吸收, 一部分直接反映为轨道误差。本文对在卫星天线 PCO 进行估计时, 也将 X 轴和 Y 轴分量固定为协议值, 仅对 Z 轴分量进行估计。图 3.5 给出了, 卫星天线 PCO 的 Z 轴分量  $\Delta r$  改正方法的示意图。

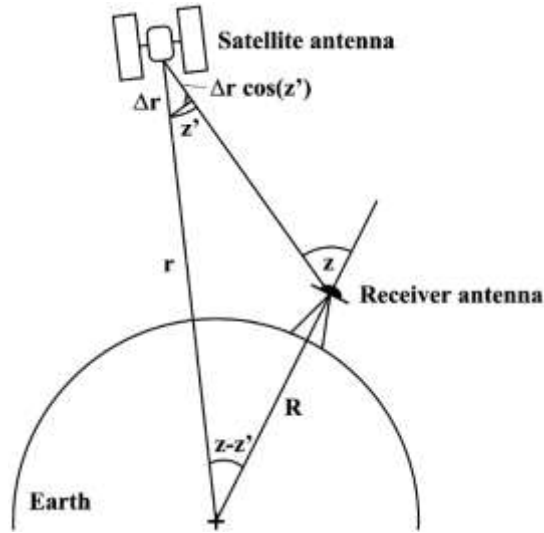


图3.5 卫星天线PCO的Z轴分量  $\Delta r$  改正方法的示意图

由卫星天线 PCO 和 PCV 所引起的测站至卫星间距离观测值改正  $\Delta \varepsilon'_\phi(z')$ , 可表示为:

$$\Delta \varepsilon'_\phi(z') = \Delta \phi'_{PCV}(z') + \Delta r \cdot \cos(z') \quad (3.11)$$

式中  $z'$  为天底角, 其计算公式如下:

$$\sin(z') = \frac{R}{r} \sin(z) \quad (3.12)$$

式中  $R$  为地球半径,  $r$  为卫星到地心距离,  $z$  为测站卫星天顶距。  $\Delta \phi'_{PCV}(z')$  表示天底角为  $z'$  时卫星天线 PCV,  $\Delta r$  表示卫星天线 PCO 的 Z 轴分量。

在对测站天线和卫星天线 PCO、PCV 进行参数估计时, 可知四者具有强相关性。在对卫星天线 PCO 或 PCV 进行估计时, 需固定其他三者。但由式(3.11), 可得:

$$\Delta \varepsilon'_\phi(z') = \Delta \phi'_{PCV}(z') + \Delta r (\cos(z') - 1) + \Delta r \quad (3.13)$$

由于  $z'$  的变化范围在  $[0^\circ, 14.28^\circ]$ , 使得  $(\cos(z')-1) \in [-0.03, 0]$ , 参数估计时卫星天线参数 PCO 的 Z 轴分量的大部分将会被卫星钟吸收。即在固定测站天线 PCO、PCV 的情况下, 式 (3.13) 中的  $\Delta r$  将会被卫星钟差吸收, 非差验后残差为  $\varphi_{raw}(z')$ , 其计算公式为:

$$\varphi_{raw}(z') = \Delta\varphi_{PCV}(z') + \Delta r (\cos(z') - 1) \quad (3.14)$$

将  $\varphi_{raw}$  表示为以天底角为自变量的线性分段函数:

$$\varphi_{raw}(z') = \frac{z' - z'_i}{z'_{i+1} - z'_i} (\varphi_{raw}(z'_{i+1}) - \varphi_{raw}(z'_i)) + \varphi_{raw}(z'_i) \quad (3.15)$$

式中  $z'_i$  为天底角  $z'$  的整数部分,

$$z'_{i+1} = z'_i + 1 \quad (3.16)$$

$\varphi_{raw}(z'_i)$  为天底角为  $z'_i$  时的  $\varphi_{raw}$ ,  $\varphi_{raw}(z'_{i+1})$  为天底角为  $z'_{i+1}$  时的  $\varphi_{raw}$ 。由于卫星天线 PCV 与卫星钟差的强相关性, 引入约束方程来避免法方程秩亏:

$$\sum_{i=1, m}^i \varphi_{raw}(z'_i) = 0 \quad (3.17)$$

式中  $m$  为 PCV 的分段节点数。

由  $\varphi_{raw}(z')$  中包含有卫星天线 PCO 和 PCV, 在对二者进行分离时, 引入约束条件:

$$\sum_{i=1, m}^i [\varphi_{raw}(z'_i) - a - \Delta r (1 - \cos(z'_i))]^2 = \min \quad (3.18)$$

式中  $a$  为  $\varphi_{raw}$  中的常量部分。在此约束条件下, 最小二乘拟合残差即为卫星天线 PCV 的值。

考虑到在使用接收机天线绝对相位中心改正模型时, 基于长基线测定的 GPS 全球参考框架与使用其他观测技术 (VLBI 和 SLR) 得到的结果间存的尺度误差, 在进行卫星天线 PCO 估计时, 将测站坐标固定于 IGS 发布的 IGB08.sn timer。

### 3.3 GPS 卫星天线校验算例分析

本文利用全球 IGS 站的观测数据, 求得卫星天线 PCO、PCV。利用求得的卫星天线 PCO、PCV 进行三天弧段精密定轨, 通过重叠弧段比对来验证轨道内符精度; 将单天弧段精密定轨所得轨道与 IGS 发布的轨道比对来验证轨道外符精度; 最后利用求得的卫星天线 PCO、PCV 进行精密轨道和卫星钟差估计, 将结

果用于精密单点定位，将定位结果与利用 IGS 发布的卫星天线信息、卫星轨道和钟差进行单点定位的结果相比较。

### 3.3.1 数据说明

选取 IGB08\_core 中全球均匀分布的 49 个 IGS 站（如图 3.5）2015 年的观测数据，利用 IGS 发布的天线信息文件 igs08\_1884.atx，将测站天线 PCO、PCV 固定。取 IGB08.sn timer 中的测站坐标作为坐标初值。解算过程分为两步：首先，选取 2015 年全年观测数据，利用上述卫星天线校验原理，求得卫星天线 PCV 参数；然后，再次利用 2015 年全年的观测数据，将求得的卫星天线 PCV 固定，估计卫星天线 PCO。第二步时，在测站坐标水平方向上加 0.001mm、高程方向上加 0.002mm 的约束，以实现参考框架无尺度变化。计算卫星天线 PCO 过程中，卫星轨道、地球自转参数、测站坐标和测站对流层延迟等参数同时估计，解算参数如表 3.2。

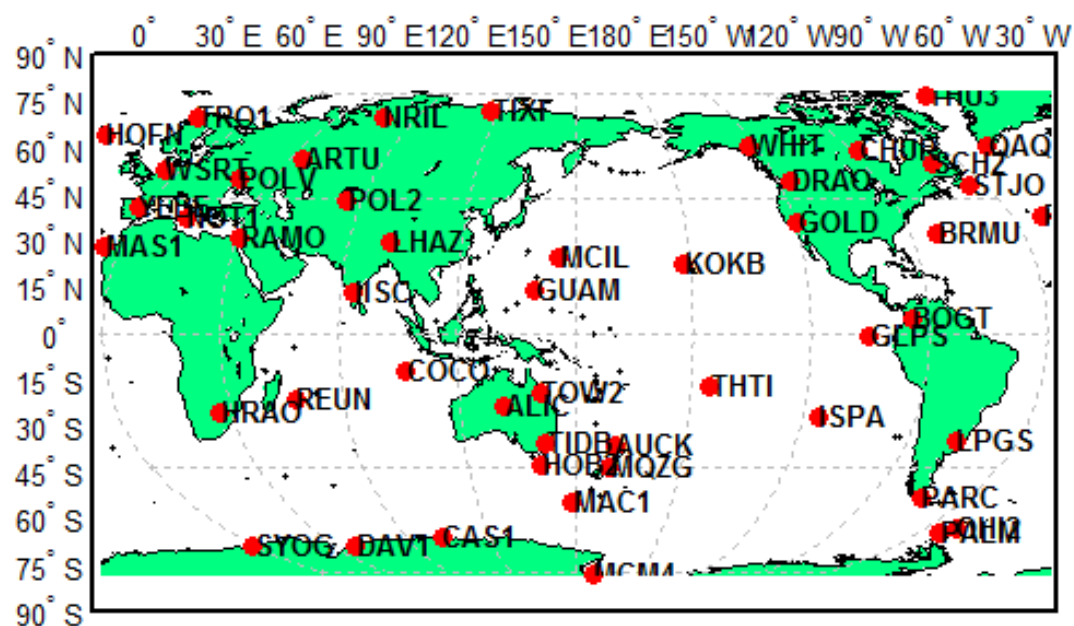


图3.5 全球均匀分布的49个IGB08\_core测站

表 3.2 估计卫星天线 PCO、PCV 参数设置

参数	处理方式
观测数据	伪距 和相位
截止高度角	10°
卫星初轨	广播星历
电离层延迟	无电离层组合
对流层延迟	模型改正 +参数估计
对流层延迟估计频率	每 2 小时一次
固体潮汐、极潮、 海潮、相对论、地 球自转	模型改正
模糊度	整数解
迭代次数	1 次

### 3.3.2 GPS 卫星天线 PCO、PCV 校验结果

利用 49 个 IGB08\_core 站 2015 年全年观测数据，计算各个卫星的非差验后残差。在 2015 年全年中除 PRN08、PRN10 和 PRN26，其余卫星天线 PCO、PCV 没有发生变更，PRN08、PRN10 和 PRN26 卫星天线参数发生变更是由旧卫星退役，新卫星替代等原因引起。IGS 发布的卫星天线 PCO、PCV 中，PCO 是按卫星编号来区分（各个卫星不相同），PCV 是按卫星类型来区分（相同类型卫星相同，不同类型卫星不相同）。有相关学者试验过 PCO 按卫星类型来区分，PCV 按卫星编号来区分的校验模式，其校验结果差于 PCO 是按卫星编号来区分，PCV 是按卫星类型来区分的校验模式。本文卫星天线校验方式同样选择 PCO 按卫星编号来区分，PCV 按卫星类型来区分。IGS 发布的 2015 全年卫星类型如表 3.3（除 PRN08、PRN10 和 PRN26）：

表 3.3 各卫星所属的卫星类型

卫星类型	PRN 编号
BLOCK IIF	1、3、6、9、24、25、27、30
BLOCK IIR-B	2、19、22、23
BLOCK IIR-M	5、7、12、15、29、31
BLOCK IIA	4、32
BLOCK IIR-A	11、13、14、16、20、21、28

IGS 发布的不同类型卫星的天线 PCV 值如表 3.4（仅列出天底角 0~14° 的值）：

表 3.4 IGS 发布的不同类型卫星的天线 PCV

Block	PCV (mm)														
	0°	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°	11°	12°	13°	14°
BLOCK IIF	6.1	4.4	2.8	1.3	-0.2	-1.4	-2.8	-3.9	-4.4	-4.4	-3.7	-2.3	-0.2	3	5.7
BLOCK IIR-B	10.7	10.1	8	4.6	0.5	-3.8	-7.5	-9.7	-10.3	-9.5	-7.4	-4.1	0.3	6	12.1
BLOCK IIR-M															
BLOCK IIA	-0.8	-0.9	-0.9	-0.8	-0.4	0.2	0.8	1.3	1.4	1.2	0.7	0	-0.4	-0.7	-0.9
BLOCK IIR-A	-6.1	-5.2	-3.3	-1	1.4	3.5	4.7	4.9	4.1	2.8	0.8	-1	-2.1	-2.1	-1.4

由表 3.4 可知，有四种类型卫星天线 PCV，分别选取四种类型中的一颗卫星的非差验后残差，如图 3.7。

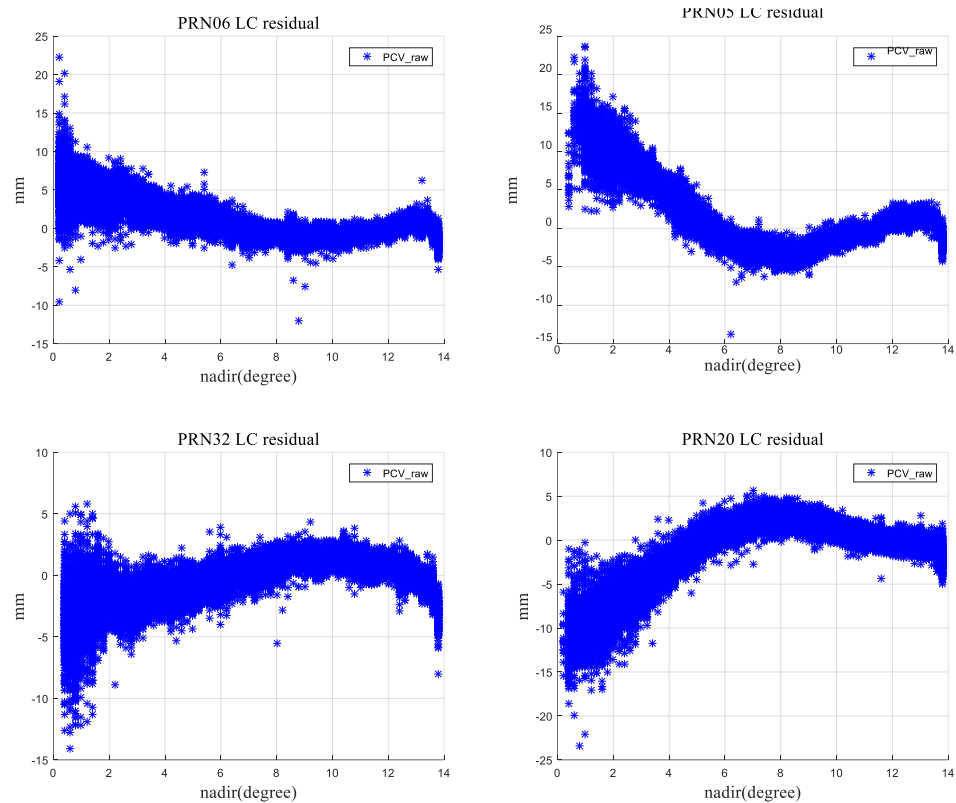


图3.7 PRN06，PRN05，PRN32，PRN20的非差验后残差

利用式（3.16~3.19）将非差验后残差中的 PCO 和 PCV 分离，得到不同类型卫星的天线 PCV 值如表 3.5：

表 3.5 PCV 解算结果

Block	PCV (mm)														
	0°	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°	11°	12°	13°	14°
BLOCK IIF	3.6	2.4	1.2	0.4	-0.7	-1.2	-2.1	-2.5	-2.3	-2.1	-1.5	-0.8	0.7	1.9	3.1
BLOCK IIR-B	6.0	5.0	3.9	2.0	-1.1	-3.1	-5.2	-6.0	-5.9	-4.7	-2.6	-0.9	1.8	4.2	6.6
BLOCK IIR-M															
BLOCK IIA	-1.3	-0.8	-0.3	-0.7	-0.2	-0.1	0.7	0.8	1.3	1.3	1.1	0.1	-0.3	-0.7	-1.1
BLOCK IIR-A	-5.0	-4.1	-3.1	-1.0	1.0	2.6	3.6	3.8	3.6	2.5	1.1	-0.4	-1.3	-1.5	-1.8

将 IGS 发布的不同类型卫星的天线 PCV 和估算所得的不同类型卫星的天线 PCV 相比, 较可得图 3.8。

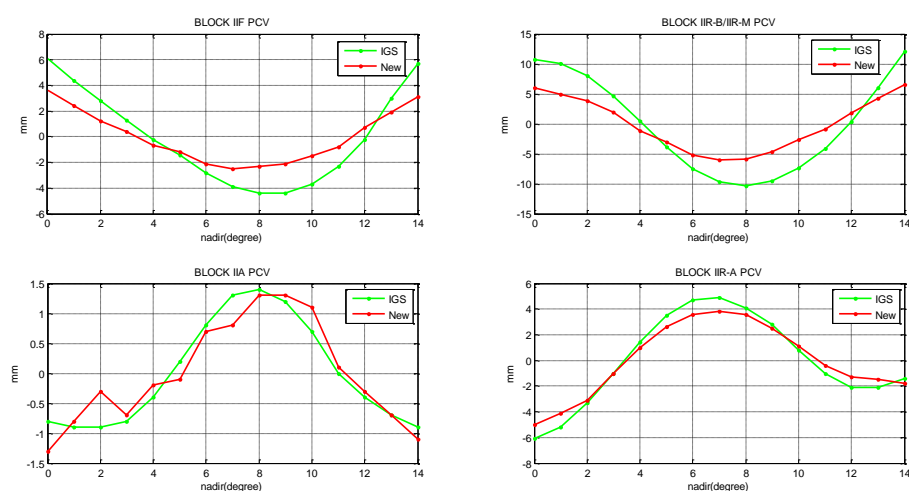


图3.8 计算所得卫星PCV(New)和IGS发布的PCV(IGS)

由图 3.8 可知, IGS 发布的 PCV 和本文求得的 PCV 差值的绝对值中, BLOCK IIF 卫星最大不超过 2.6mm, BLOCK IIR/ IIR-M 卫星最大不超过 5.5mm, BLOCK IIA 卫星最大不超过 0.6mm, BLOCK IIR-A 卫星最大不超过 1.1mm。

利用表 3.5 中的卫星天线 PCV, 并将其固定, 利用 2015 年全年的观测数据, 取 IGB08.sn timer 中的测站坐标作为坐标初值, 在水平方向上加 0.001mm、高程方向上加 0.002mm 的约束。IGS 发布的按卫星编号来区分的卫星天线 PCO 和本文求得的卫星天线 PCO 如图 3.9:

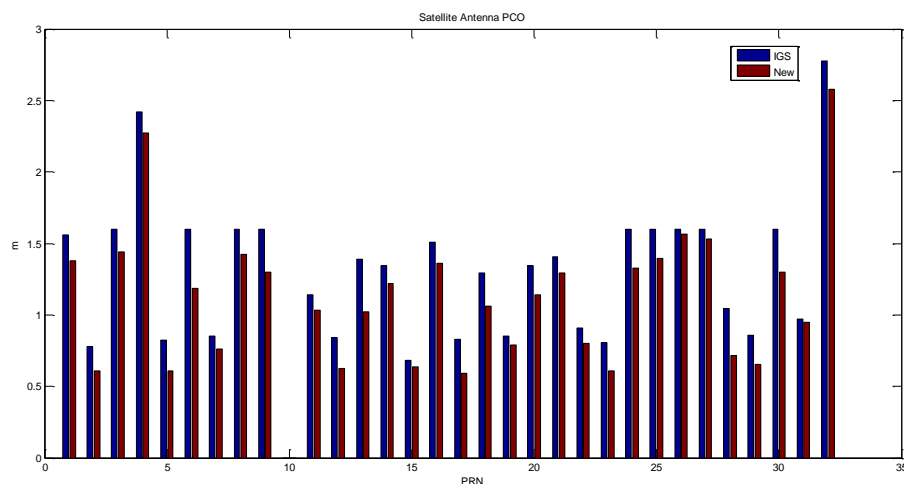
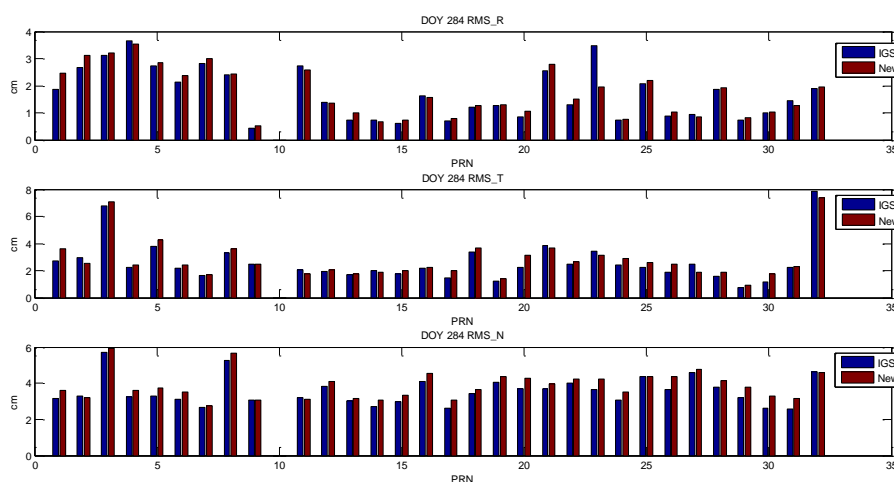


图3.9 计算所得卫星PCO和IGS发布的PCO

本文所求卫星天线 PCO 与 IGS 的发布的 PCO 平均偏差在-18cm 左右，最小在-2.0cm，最大在-41.4cm。由图 3.9 可知，本文所求 PCO 值均小于 IGS 发布值，造成这种系统性偏差的可能原因是：图 3.8 中本文所得卫星天线 PCV 均没有 IGS 发布的 PCV ‘陡峭’，而 PCV 由非差验后残差分离 PCO 得到，其根本原因是非差验后残差中的部分误差改正模型的模型误差不能完全消除。

### 3.3.3 轨道精度验证

利用 3.3.2 中求得的卫星天线 PCO、PCV 结果和 IGS 发布的 PCO、PCV，进行年积日 283~285 和 284~286 三天弧段定轨，并进行重叠弧段比对。利用 3.3.2 中求得的卫星天线 PCO、PCV 结果定轨所得轨道为 orb\_New;利用 IGS 发布的 PCO、PCV 结果定轨所得轨道为 orb\_IGS。比对结果如图 3.10:



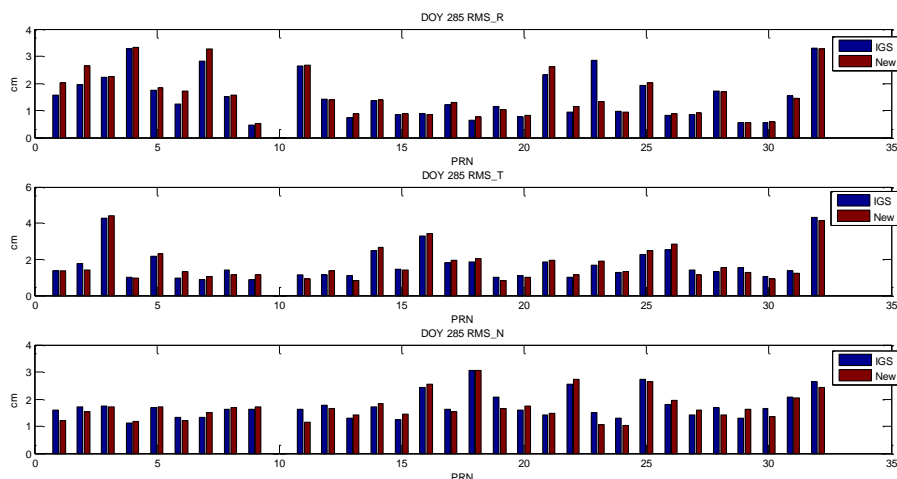
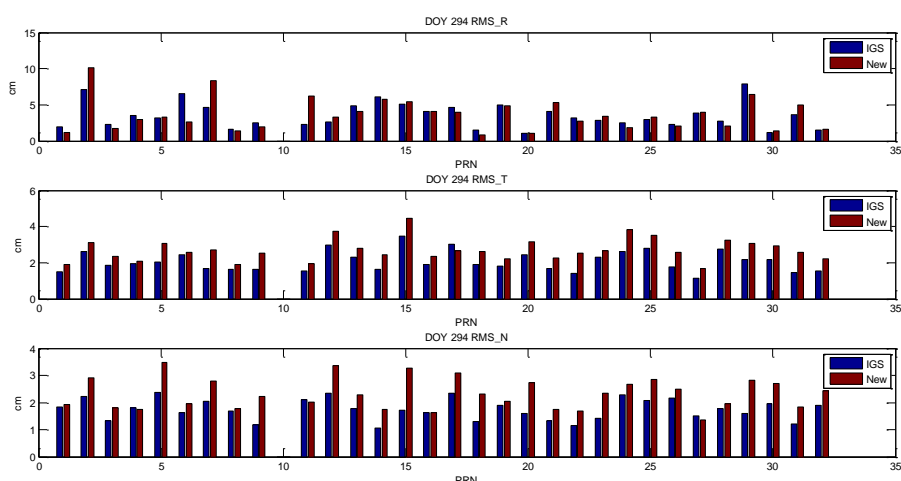


图3.10 orb\_IGS和orb\_New内符精度

由图 3.10 可知，利用 3.3.2 中求得的卫星天线 PCO、PCV 进行精密定轨，所有卫星轨道 RTN 平均内符精度年积日 284 为 1.7cm、2.8cm 和 3.9cm，年积日 285 为 1.6cm、1.7cm 和 1.7cm；利用 IGS 发布的 PCO、PCV 进行精密定轨，所有卫星轨道 RTN 平均内符精度年积日 284 为 1.7cm、2.6cm 和 3.6cm，年积日 285 为 1.5cm、1.7cm 和 1.8cm。可知 orb\_IGS 和 orb\_New 内符精度差异在毫米级。

利用 3.3.2 中求得的卫星天线 PCO、PCV 结果和 IGS 发布的 PCO、PCV，进行年积日 294~296 单天弧段定轨，并与 IGS 发布的精密轨道进行比对，来验证外符精度。结果如图 3.11：



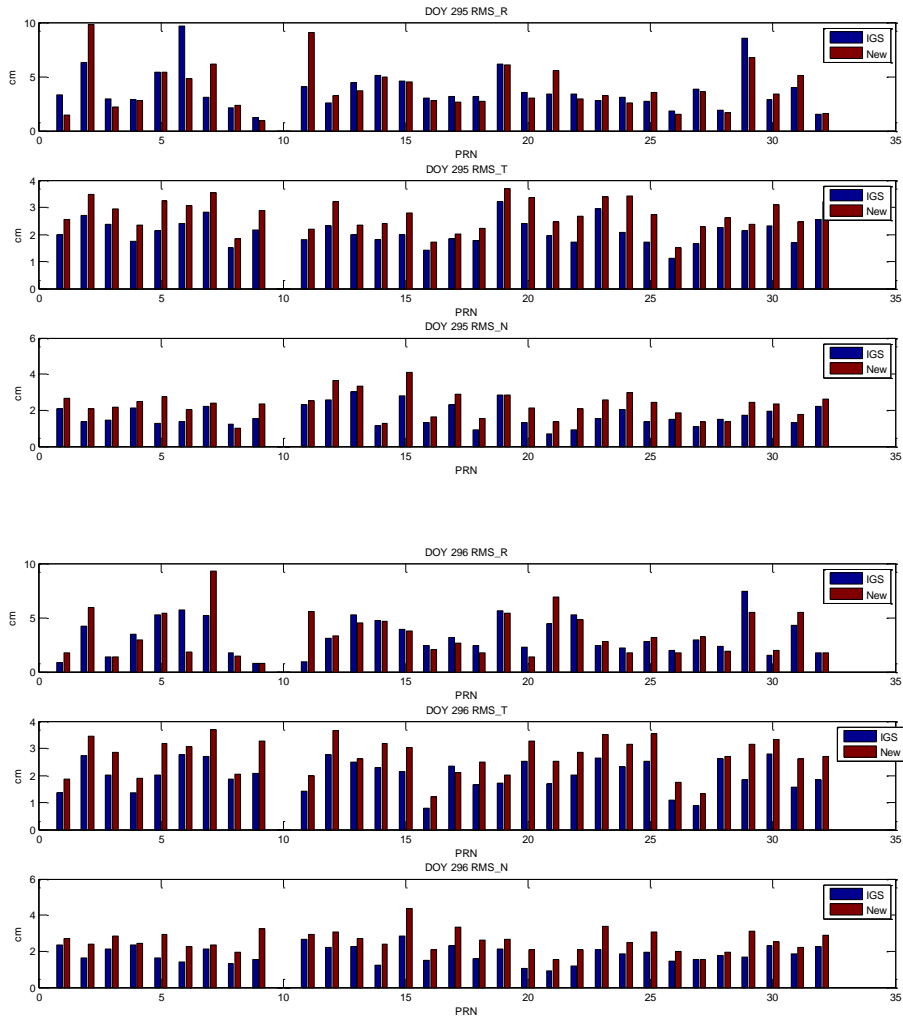


图3.11 orb\_IGS和orb\_New外符精度

由图 3.11 可知，利用 3.3.2 中求得的卫星天线 PCO、PCV 进行精密定轨，所有卫星轨道 RTN 平均外符精度年积日 294 为 3.6cm、2.7cm 和 2.3cm，年积日 295 为 3.9cm、2.7cm 和 2.3cm，年积日 296 为 3.4cm、2.7cm 和 2.6cm；利用 IGS 发布的 PCO、PCV 进行精密定轨，所有卫星轨道 RTN 平均外符精度年积日 294 为 3.5cm、2.1cm 和 1.7cm，年积日 295 为 3.8cm、2.1cm 和 1.7cm，年积日 296 为 3.3cm、2.0cm 和 1.8cm。可知两组轨道外符精度差异在毫米级，但是使用 IGS 发布的 PCO、PCV 所得轨道其外符精度基本都优于使用 3.3.2 中求得的卫星天线 PCO、PCV 所得的轨道。

### 3.3.4 精密单点定位验证

利用求得的卫星天线 PCO、PCV 进行年积日 292~297 天精密轨道和卫星钟差估计，将结果用于精密单点定位，将定位结果与利用 IGS 发布的卫星天线 PCO、

PCV、卫星轨道和钟差进行精密单点定位的结果相比较，定位所用测站（选用 IGB08\_core 中定轨所用 49 个 IGS 站以外的 IGS 站）如图 3.12，精密单点定位参数设置如表 3.6。

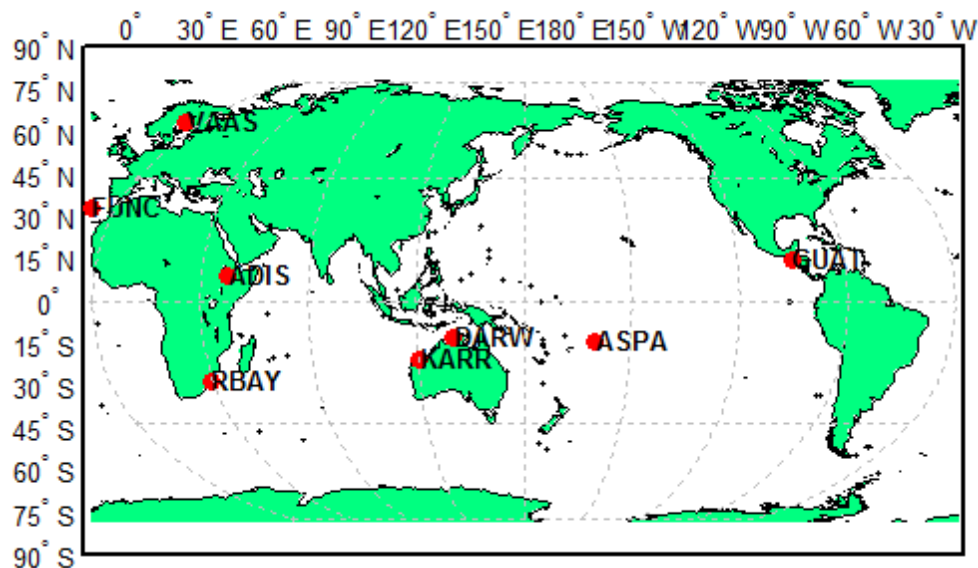


图3.12 PPP验证测站分布

表 3.6 PPP 参数设置

参数	PPP
观测数据	相位平滑伪距 和相位
截止高度角	10°
卫星星历钟差	IGS 精密轨道和钟 差
对流层延迟	Saastamoinen 模型 +参数估计
固体潮汐	模型改正
相对论、地球自转	
接收机钟差	白噪声
模糊度	浮点解

利用求得的卫星天线 PCO、PCV 和其相应的精密轨道和卫星钟差进行精密单点定位（local PPP），结果如表 3.7，表中列出了全天静态精密单点定位的最后坐标偏差的多天平均值（测站坐标初值取自 igs15P1867.snx）和全天动态精密单点定位两小时后结果的 RMS 的多天平均值。

表 3.7 local PPP 结果

Site	静态 PPP Bias (m)			动态 PPP RMS (m)		
	N	E	U	N	E	U
ADIS	-0.0001	0.0260	0.0017	0.0229	0.0329	0.0669
ASPA	-0.0033	-0.0244	-0.0046	0.0239	0.0280	0.0670
DARW	-0.0040	-0.0157	0.0164	0.0283	0.0349	0.1052
FUNC	0.0023	-0.0004	-0.0108	0.0324	0.0429	0.0925
GUAT	0.0028	0.0336	0.0024	0.0303	0.0317	0.0582
KARR	-0.0034	-0.0165	0.0070	0.0162	0.0313	0.0666

将表 3.7 的结果和利用 IGS 发布的天线参数、精密轨道和卫星钟差求得的精密单点定位（IGS PPP）结果做差，可得表 3.8：

表 3.8 local PPP 与 IGS PPP 差值

Site	静态 PPP Bias (m)			动态 PPP RMS (m)		
	$\Delta N$	$\Delta E$	$\Delta U$	$\Delta N$	$\Delta E$	$\Delta U$
ADIS	-0.0074	0.0047	0.0029	-0.0049	0.0037	0.0058
ASPA	-0.0086	-0.0029	0.0033	-0.0023	0.0009	0.0070
DARW	-0.0104	0.0018	0.0120	-0.0043	0.0018	0.0044
FUNC	-0.0035	-0.0029	-0.0083	-0.0022	-0.0005	0.0012
GUAT	-0.0065	-0.0008	0.0020	-0.0031	0.0039	0.0060
KARR	-0.0093	0.0038	0.0110	-0.0034	0.0055	0.0084

由表 3.8 可知，两者差异对于静态定位差异基本在毫米水平，最大不会超过 1.2cm；静态定位差异在毫米水平。可见 3.2 节求得的卫星天线 PCO、PCV 和其相应的精密轨道和卫星钟差，作为一整套参数完全能够满足精密单点定位的精度需求，说明其具有良好的自洽性。

### 3.4 本章小结

本章详细介绍了接收机天线和卫星天线校验的原理及其算法，本章第 3 节采用第 2 节提到的算法，利用全球 49 个均匀分布的 IGS 监测站的观测数据对 GPS 卫星 PCO、PCV 进行了校验，并分析了校验结果。分析结果显示：卫星天线 PCO 与 IGS 发布的 PCO 平均偏差在 -18cm 左右，PCV 偏差在 6mm 以内。利用校验所得天线参数进行三天弧段定轨，所有卫星轨道 RTN 三方向内符合精度分别为 13mm, 24mm 和 24mm，与 IGS 事后轨道比较的外符合精度分别为 36mm, 27mm 和 26mm。利用校验所得卫星天线参数求取的精密定轨、卫星钟差，以及该卫星天线参数进行精密单点定位结果和利用 IGS 发布的天线参数、事后轨道和钟差精密单点定位结果相比较。结果显示：静态定位各方向最终结果的差异基本在毫米级，水平方向最大不超过 1.4cm，高程方向最大不超过 2cm；动态定位各方向 RMS

差异基本在毫米级，水平方向最大不超过 1.3cm，高程方向最大不超过 1.7cm。

## 第 4 章 BDS 卫星天线 PCV 校验

BDS 卫星星座由 GEO、IGSO 和 MEO 卫星构成。目前，C01、C02、C03、C04 和 C05 为 GEO 卫星；C06、C07、C08、C09、C10 和 C13 为 IGSO 卫星；C11、C12 和 C14 为 MEO 卫星。BDS 卫星天线 PCO、PCV 的校验原理与 GPS 卫星天线相同，只是 IGSO 和 MEO 的卫星高度存在差异，PCV 天底角的变化范围不同，而 GEO 卫星相对测站基本静止不动，故其校验结果在本章 4.3 节另做讨论。本例分析的 BDS 卫星天线 PCV 随高度变化，暂不考虑方位角。

### 4.1 BDS 天线 PCV 校验数据说明

通过仅在中国大陆分布的 8 个参考站 2016 年年积日 211~300 天共 90 天的观测数据进行精密定轨，测站分布如图 4.1，定轨时参数设置如表 4.1。数据处理时防止法方程设计矩阵过大，将所有数据分成 6 段，每段包含 15 天。

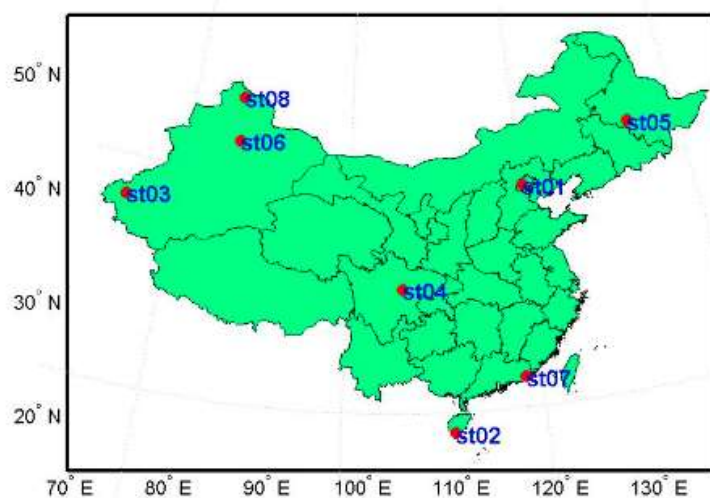


图4.1 定轨测站分布

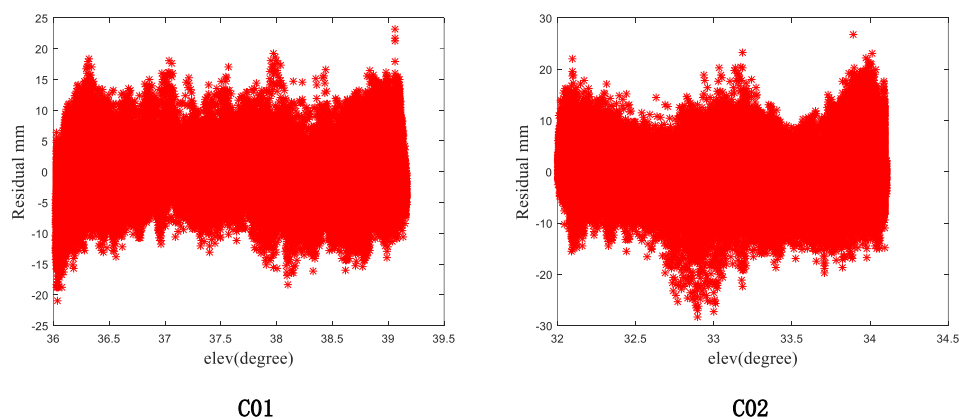
表 4.1 BDS 定轨参数设置

参数	处理方式
观测数据	伪距 和相位
截止高度角	50°
采样率	30s
电离层延迟	无电离层组合
对流层延迟	模型改正 +参数估计
对流层延迟估计频率	每 2 小时一次
弧段长度	3 天
固体潮汐、极潮、海潮、相对论、地球自转	模型改正
模糊度	整数解
迭代次数	直到结果 稳定可靠

## 4.2 BDS 卫星天线 PCV 校验

### 4.2.1 定轨残差分析

选择 st01 站 90 天观测到的各卫星残差随高度角的变化如图 4.2（GEO 包含 C01, C02; IGSO 包含 C06, C07; MEO 包含 C11, C12）。



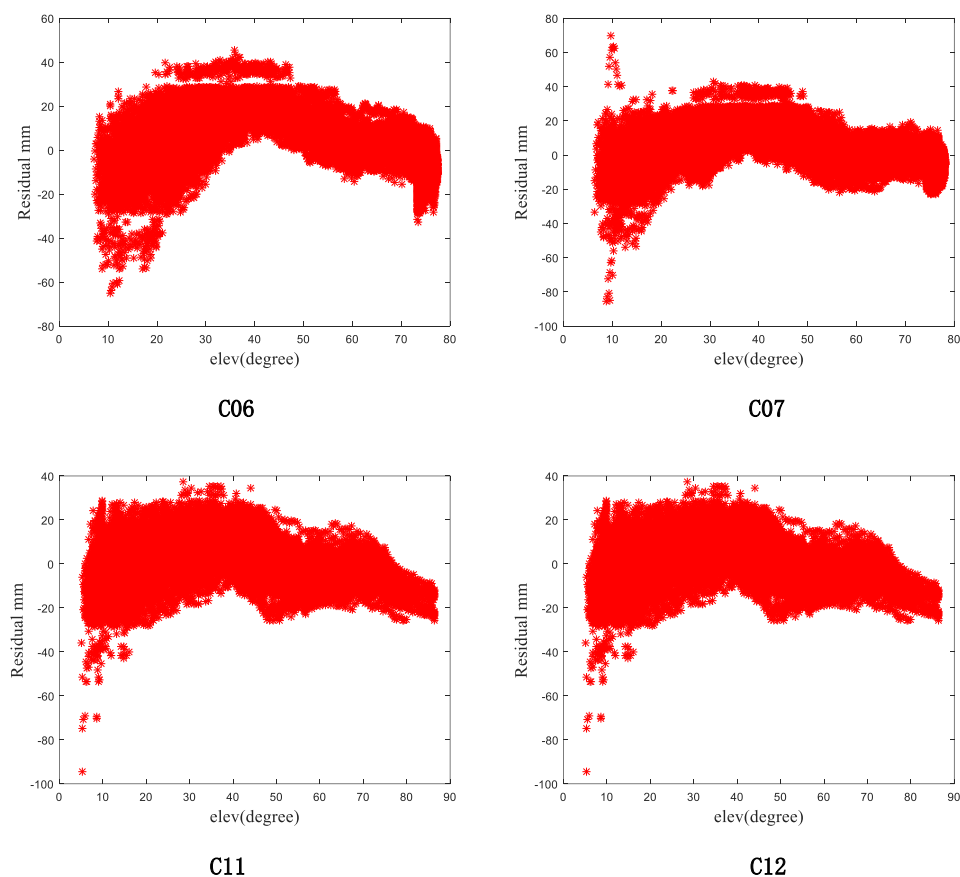
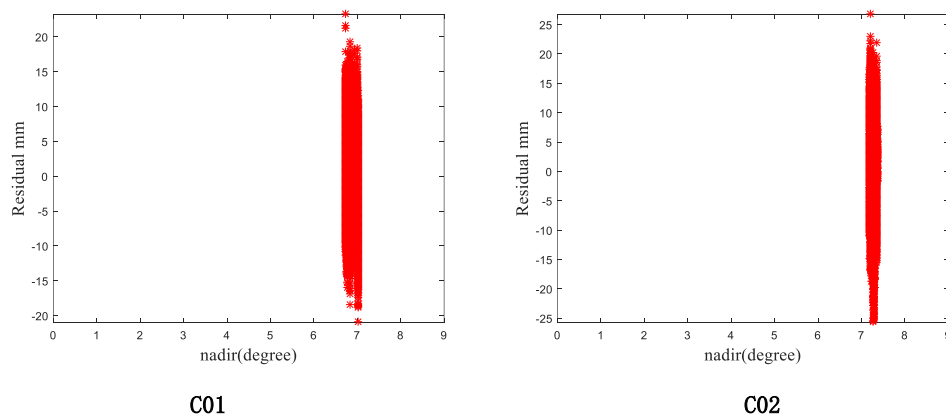


图4.2 测站st01观测到的各卫星随高度角变化残差

由图 4.2 可知 GEO 卫星高度角变化区间小于  $5^\circ$ ，而 IGSO 由于星下点轨迹相对固定的缘故，对于测站 st01 其高度角很难达到  $80^\circ \sim 90^\circ$ ；MEO 由于星下点轨迹落在地球表面的范围更广，对于测站 st01 其高度角可以达到  $80^\circ \sim 90^\circ$ 。

#### 4.2.2 BDS 卫星天线 PCVraw 分析

利用式 (3.12)，将图 4.2 中随高度角变化的残差转换到随卫星天底角变化的残差（转化过程中剔除部分异常的残差），可得到图 4.3。



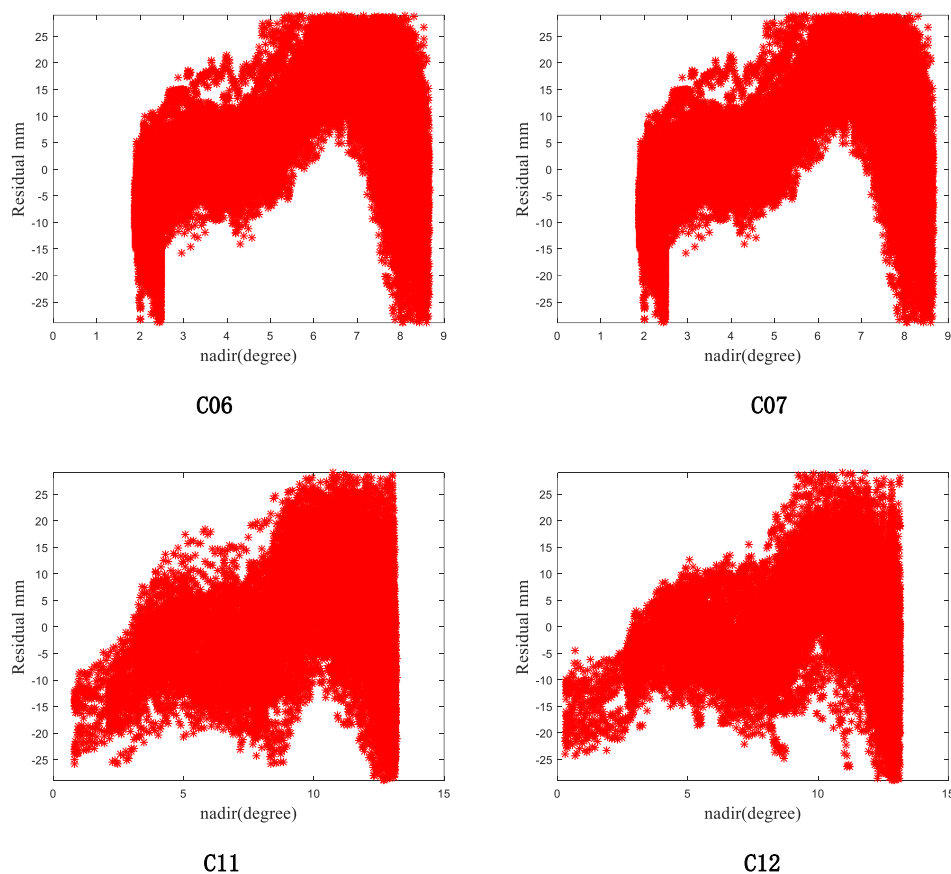
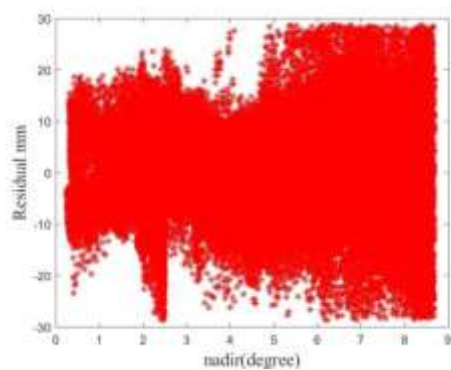


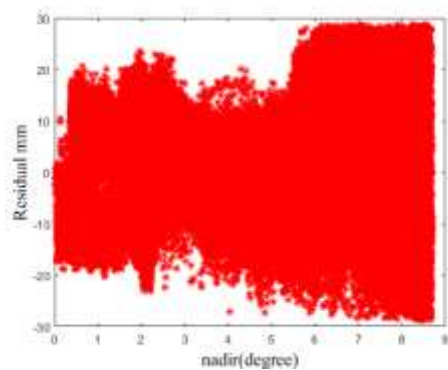
图4.3 测站st01观测到的各卫星随天底角变化残差

由测站到地心平均距离约为 6372678.237m, IGSO 卫星到地心平均距离约为 42160km, MEO 卫星到地心平均距离约为 27850km, 卫星高度角变化范围 $[0^\circ, 90^\circ]$ 。通过式 (3.12) 可知, IGSO 天底角的变化范围约为 $[0^\circ, 8.72^\circ]$ , MEO 天底角的变化范围约为 $[0^\circ, 13.24^\circ]$ 。由图 4.3 可知, 对于 GEO 卫星单一测站对单颗卫星的残差在随天底角变化的残差图上的变化区间小于  $0.5^\circ$ , 对 GEO 卫星不建议进行 PCV 的校验工作。

同理, 第一个时间段 (年积日 211 天到 225 天) 和第二时间段 (年积日 226 天到 240 天) 所有测站按卫星号 (仅列出 IGSO 卫星和 MEO 卫星) 分类随天底角变化的残差图如图 4.4。

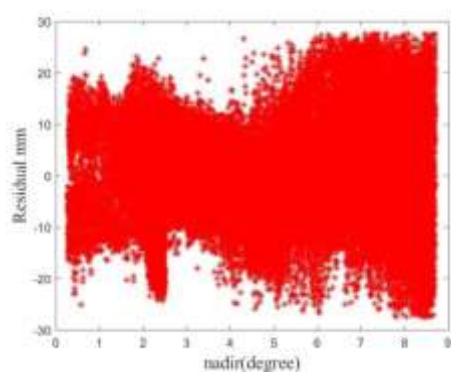


C06

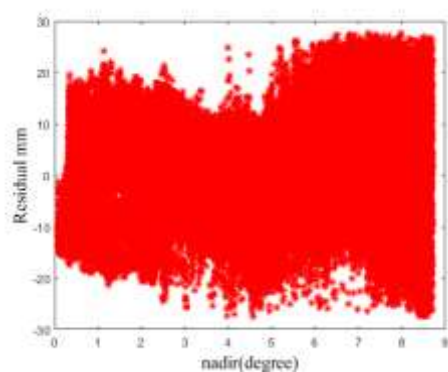


C07

第一时间段年积日211到225天

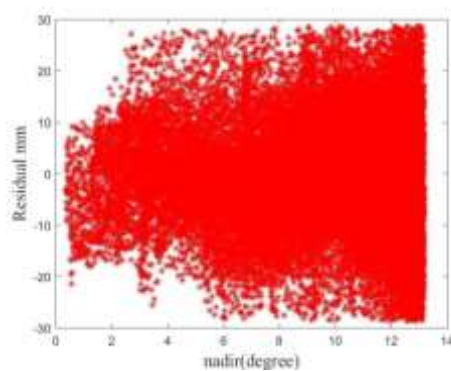


C06

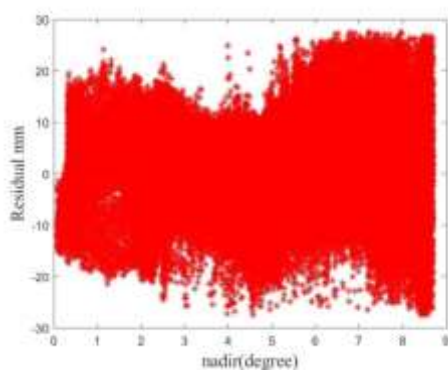


C07

第二时间段年积日226到240天

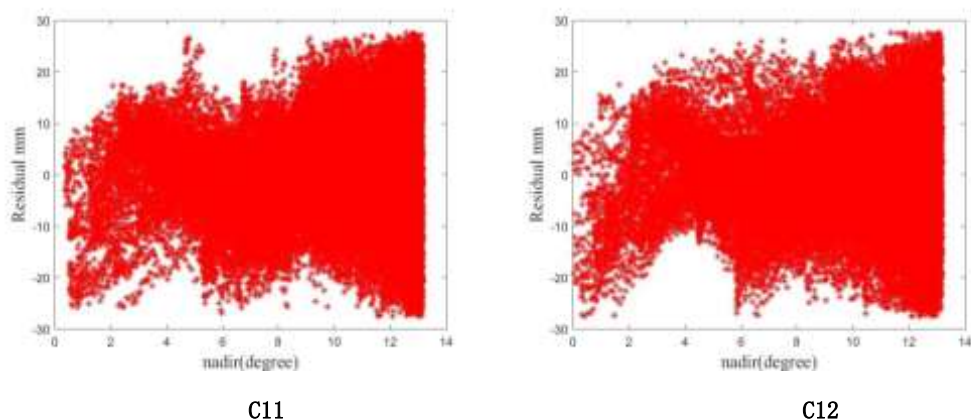


C11



C12

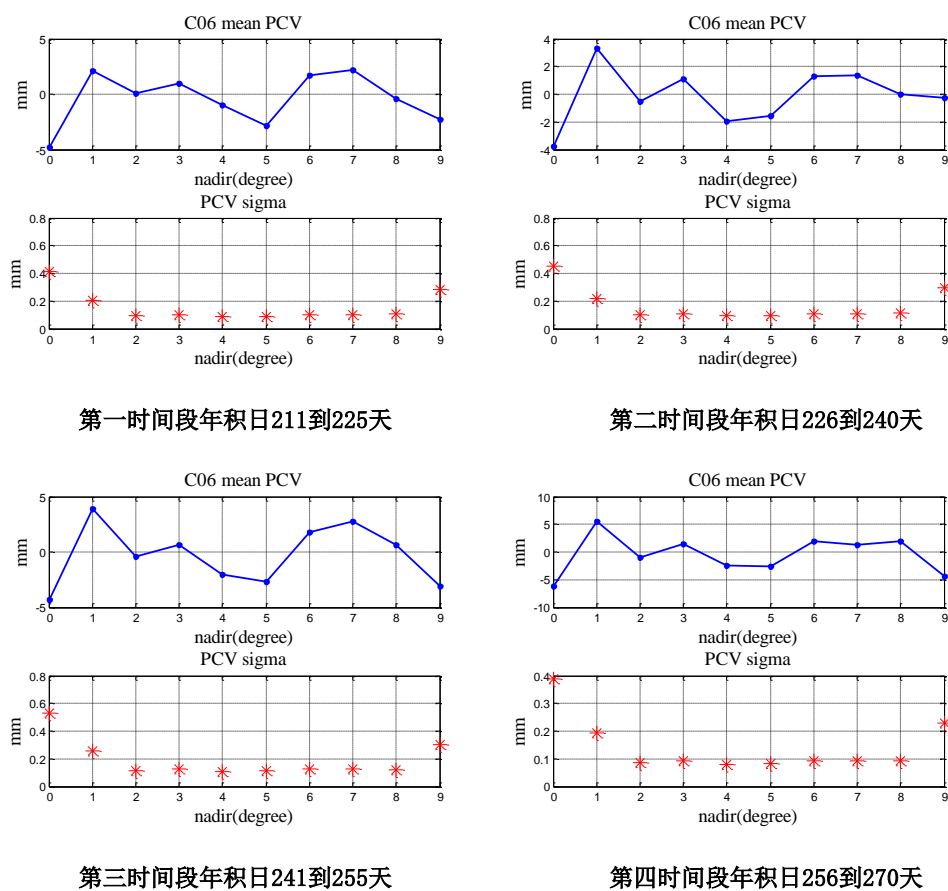
第一时间段年积日211到225天

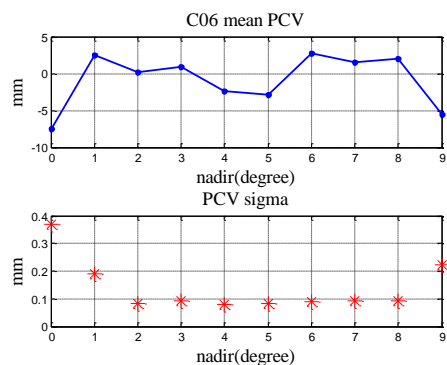


第二时间段年积日226到240天

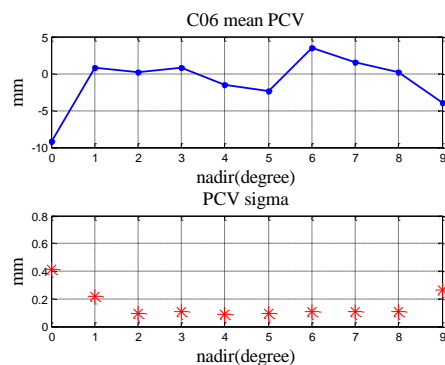
图4.4 所有测站观测到的各卫星随天底角变化残差

由图 4.4 中 C06、C07、C11、C12 第一时段和第二时段的卫星残差对比可知，第一时段和第二时段之间存在一定的重复性。通过式（3.16~3.19），将 6 个时间段上随天底角变化的残差分段线性化到整度的天底角上，转化后的结果如图 4.5。



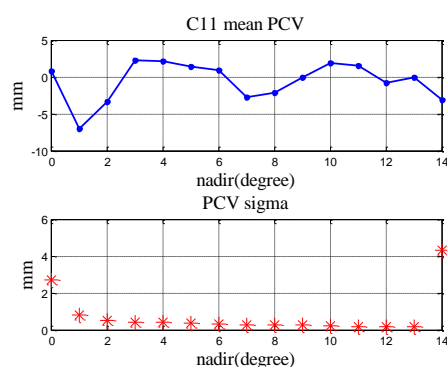


第五时间段年积日271到285天

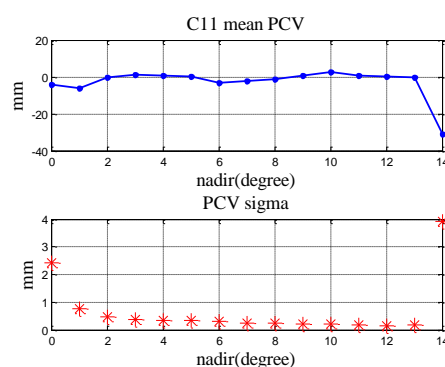


第六时间段年积日286到300天

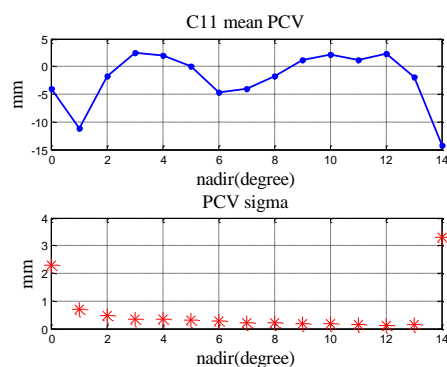
IGSO C06



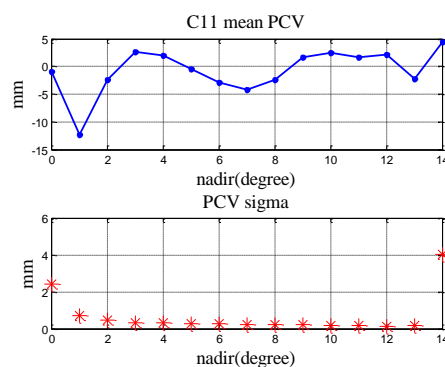
第一时间段年积日211到225天



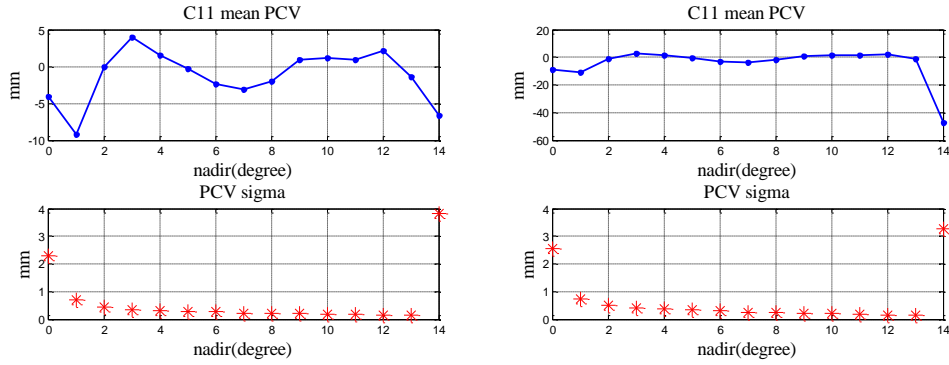
第二时间段年积日226到240天



第三时间段年积日241到255天



第四时间段年积日256到270天



第五时间段年积日271到285天

第六时间段年积日286到300天

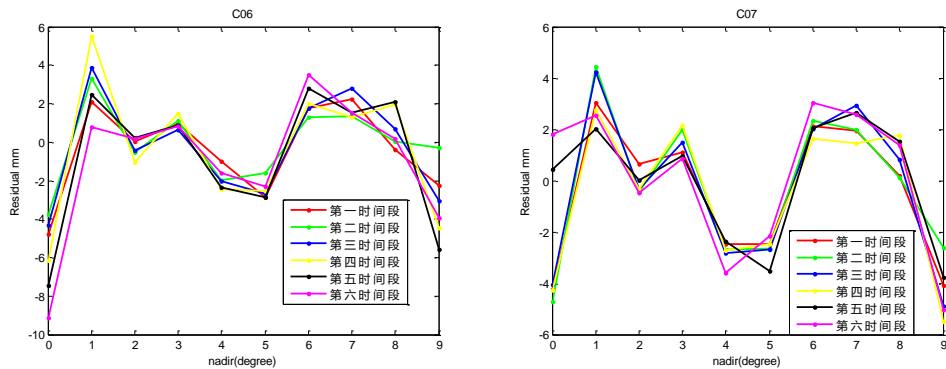
MEO C11

图4.5 分段线性化后C06、C11随天底角变化残差

由图4.5可知对于C06卫星其分段线性化之后的残差在多个时间段之间的重复性很高,对于C11卫星除了在端点 $0^\circ$ 和 $14^\circ$ 处外,分段线性化后的残差在多个时间段之间的重复性也很高。对于C06卫星在分段线性化后各整数度处的中误差均在 $0.5\text{mm}$ 以下,在非端点处均稳定在 $0.1\text{mm}$ 左右,这是因为在天底角变化的 $[0^\circ, 8.72^\circ]$ 范围内,即使在端点的 $[0^\circ, 1^\circ]$ 和 $[8^\circ, 8.72^\circ]$ 处也有足够的观测值,通过图19中的C06和C07便可知。但是对于C11卫星在分段线性化后各整数度处的中误差相对较大,特别是在端点处,在非端点处较稳定小于 $1\text{mm}$ ,这是因为在天底角变化的 $[0^\circ, 13.24^\circ]$ 范围内,在端点 $[0^\circ, 1^\circ]$ 内的观测值较少,在 $[13^\circ, 13.24^\circ]$ 内的观测值虽然较多,但是均集中在 $[13^\circ, 14^\circ]$ 内靠左侧的范围内,用这些观测值分段线性化到 $14^\circ$ 上的值很容易偏离真值。

### 4.2.3 BDS 卫星天线 PCVraw 重复性分析

将所有时段所有卫星的分段线性化的值进行汇总可得图4.6。



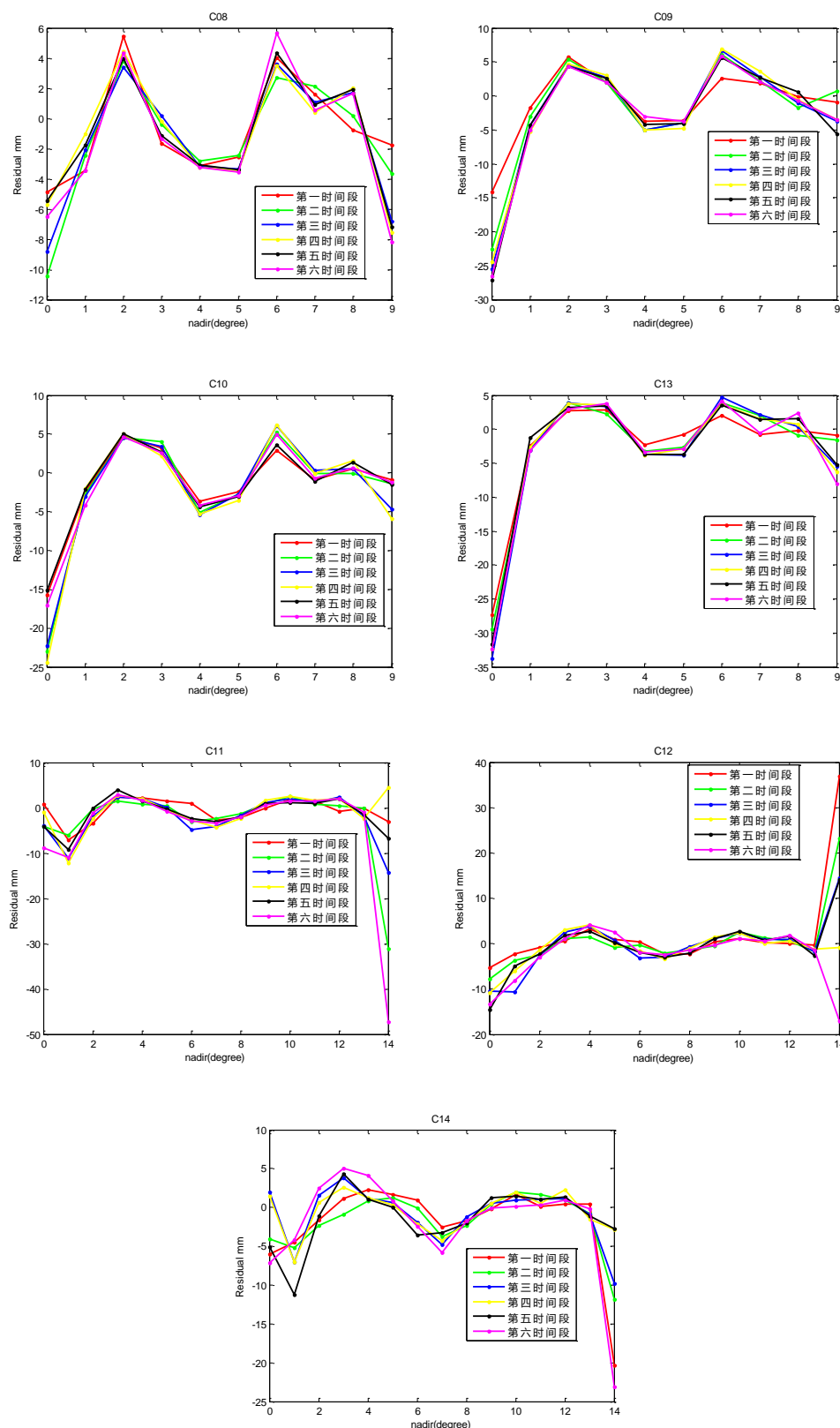


图4.6 所有时段所有卫星的分段线性化残差图

由图 4.6 可知，除了 MEO 卫星（C11、C12、C14）在右端点  $14^\circ$  处的重复性较差外，所有卫星在各整数度处的重复率均较高。对于 MEO 卫星在右端点  $14^\circ$ ，

由于明显背离了前面的变化趋势，故将其舍掉，采用  $12^\circ$  和  $13^\circ$  处的值线性拟合出  $14^\circ$  处的值。综合多时间段残差后得到各卫星最终残差值如图 4.7，残差值及精度统计如表 4.2。

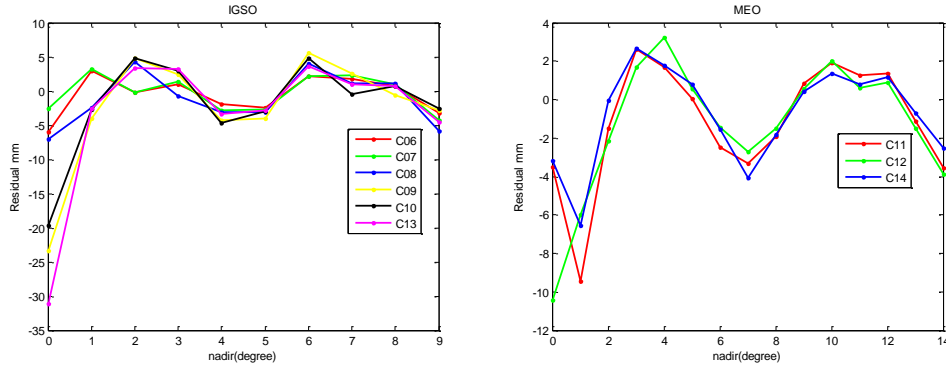


图4.7 所有卫星的分段线性化残差图

由图 4.7 可知 IGSO 和 MEO 各卫星之间的分段线性残差相似度很高，这是因为 IGSO 和 MEO 卫星的天线类型相同，这与 GPS 卫星中天线类型相同的卫星 PCV 值默认一致的情况相同。

表 4.2 各卫星残差值及精度统计表

卫星号	天底角	IGSO PCV_raw and sigma (mm)									
		0°	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°
C06	PCV_raw	-5.94	3.01	-0.26	0.99	-1.90	-2.48	2.18	1.79	0.75	-3.26
	sigma	1.89	1.47	0.45	0.27	0.49	0.44	0.74	0.54	0.94	1.69
C07	PCV_raw	-2.51	3.17	-0.15	1.42	-2.78	-2.66	2.20	2.26	0.97	-4.32
	sigma	2.60	0.87	0.39	0.49	0.40	0.42	0.43	0.50	0.63	0.95
C08	PCV_raw	-6.98	-2.38	4.23	-0.75	-3.12	-3.13	3.98	1.12	1.12	-5.86
	sigma	2.00	0.87	0.65	0.67	0.14	0.44	0.91	0.60	1.03	2.32
C09	PCV_raw	-23.38	-3.97	4.85	2.38	-4.34	-4.05	5.59	2.53	-0.62	-2.78
	sigma	4.38	1.23	0.53	0.39	0.77	0.36	1.42	0.59	0.73	2.06
C10	PCV_raw	-19.61	-2.74	4.75	2.99	-4.69	-2.92	4.82	-0.41	0.75	-2.59
	sigma	3.73	0.73	0.22	0.59	0.67	0.34	1.18	0.53	0.55	1.96
C13	PCV_raw	-31.15	-2.60	3.39	3.16	-3.38	-2.80	3.65	0.95	0.68	-4.57
	sigma	2.17	0.63	0.47	0.51	0.52	1.00	0.83	1.19	1.08	2.55

卫 星 号	天底角	MEO PCV_raw and sigma (mm)							
		0°	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°
C11	PCV_raw	-3.52	-9.44	-1.52	2.62	1.70	0.05	-2.48	-3.32
	sigma	3.02	2.23	1.16	0.77	0.45	0.73	1.71	0.67
C12	PCV_raw	-10.42	-5.98	-2.13	1.70	3.23	0.54	-1.45	-2.71
	sigma	3.16	2.79	0.76	0.85	0.98	1.03	1.15	0.43
C14	PCV_raw	-3.16	-6.53	-0.05	2.65	1.78	0.80	-1.55	-4.06
	sigma	3.57	2.39	1.74	2.02	1.15	0.53	1.50	1.04

卫星号	天底角	MEO PCV_raw and sigma (mm)						
		8°	9°	10°	11°	12°	13°	14°
C11	PCV_raw	-1.92	0.84	1.94	1.25	1.34	-1.10	-3.54
	sigma	0.31	0.51	0.54	0.30	1.14	0.86	——
C12	PCV_raw	-1.49	0.55	2.02	0.60	0.88	-1.50	-3.87
	sigma	0.54	0.75	0.68	0.38	0.61	0.70	——
C14	PCV_raw	-1.83	0.42	1.36	0.78	1.16	-0.68	-2.52
	sigma	0.32	0.47	0.65	0.53	0.55	0.63	——

注：——表示该端点处PCV为拟合所得，故中误差不存在

#### 4.2.4 BDS 卫星天线 PCV

将表 4.2 中结果通过式 (3.13, 3.14)，可得最终的 PCV 和 PCV\_raw 中包含的 PCO 偏差。由式 (3.13) 可知 PCV\_raw 中所包含的负余弦趋势项即为 PCO 的偏差。但是由图 4.7 可知卫星残差中所包含的余弦趋势项并不明显。表 4.3 展示的是分离 PCO 偏差后的 PCV。

表 4.3 各卫星 PCV 及其精度统计表

卫 星 号	天底角	IGSO PCV and sigma (mm)									
		0°	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°
C06	PCV	-5.37	3.58	0.30	1.54	-1.36	-1.96	2.68	2.26	1.19	-2.85
	sigma	1.89	1.47	0.45	0.27	0.49	0.44	0.74	0.54	0.94	1.69
C07	PCV	-2.76	2.93	-0.33	1.32	-2.76	-2.48	2.57	2.86	1.83	-3.17
	sigma	2.60	0.87	0.39	0.49	0.40	0.42	0.43	0.50	0.63	0.95
C08	PCV	-5.76	-1.16	5.44	0.46	-1.92	-1.95	5.15	2.27	2.25	-4.76
	sigma	2.00	0.87	0.65	0.67	0.14	0.44	0.91	0.60	1.03	2.32
C09	PCV	-18.61	0.72	9.29	6.40	-0.91	-1.38	7.34	3.19	-1.22	-4.80
	sigma	4.38	1.23	0.53	0.39	0.77	0.36	1.42	0.59	0.73	2.06
C10	PCV	-15.88	0.93	8.23	6.16	-1.95	-0.74	6.32	0.28	0.51	-3.88
	sigma	3.73	0.73	0.22	0.59	0.67	0.34	1.18	0.53	0.55	1.96
C13	PCV	-25.12	3.33	9.03	8.32	1.10	0.80	6.19	2.23	0.51	-6.39
	sigma	2.17	0.63	0.47	0.51	0.52	1.00	0.83	1.19	1.08	2.55

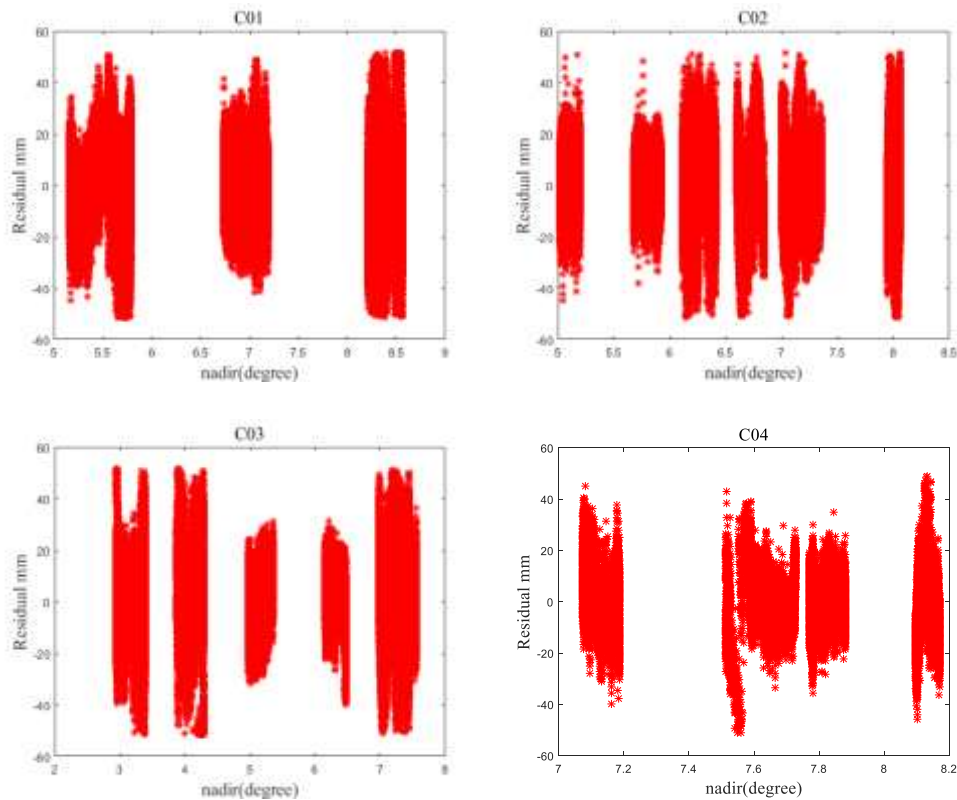
卫星号	天底角	MEO PCV and sigma (mm)							
		0°	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°
C11	PCV	-1.75	-7.68	0.21	4.30	3.32	1.59	-1.05	-2.01
	sigma	3.02	2.23	1.16	0.77	0.45	0.73	1.71	0.67
C12	PCV	-8.42	-3.99	-0.17	3.61	5.07	2.29	0.19	-1.19
	sigma	3.16	2.79	0.76	0.85	0.98	1.03	1.15	0.43
C14	PCV	-2.06	-5.44	1.03	3.70	2.80	1.77	-0.63	-3.21
	sigma	3.57	2.39	1.74	2.02	1.15	0.53	1.50	1.04

卫星号	天底角	MEO PCV and sigma (mm)						
		8°	9°	10°	11°	12°	13°	14°
C11	PCV	-0.75	1.86	2.78	1.89	1.77	-0.90	-3.59
	sigma	0.31	0.51	0.54	0.30	1.14	0.86	——
C12	PCV	-0.12	1.75	3.04	1.41	1.47	-1.16	-3.79
	sigma	0.54	0.75	0.68	0.38	0.61	0.70	——
C14	PCV	-1.05	1.12	1.96	1.28	1.55	-0.42	-2.39
	sigma	0.32	0.47	0.65	0.53	0.55	0.63	——

注：——表示该端点处PCV为拟合所得，故中误差不存在

### 4.3 BDS GEO 卫星定轨残差分析

对于 GEO 卫星，第一时段的所有测站随天底角变化的残差如图 4.8。



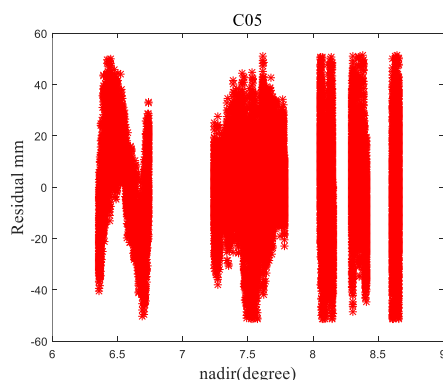


图4.8 所有测站随GEO卫星随天底角变化的残差

由图 4.8, 可知 GEO 卫星残差不连续 (当中每一段连续的残差由一个测站所得), 使得 GEO 卫星 PCO、PCV 无法校验, 在此不做处理。

#### 4.4 本章小结

本章利用第 3 章中阐述的算法, 对 BDS 卫星天线 PCV 进行了分析。分析结果显示对于 IGSO 或 MEO 卫星等同类型卫星其天线 PCV 除在最高或最低天底角处, 其他位置 PCV 值基本一致, 差异小于 1mm。然而对于 GEO 卫星, 由于其相对地球静止, 某一测站与其形成的天底角的变化范围较小, 故不能进行 PCV 校验。此外, 由于目前 BDS 卫星定轨软件, 并不具备估计卫星天线 PCO 的功能, 且通过分离  $PCV_{raw}$  中 PCO 改正值而得到的 PCO 精度并不高, 在此不对 BDS 卫星天线 PCO 做相关论述。

## 第5章 总结与展望

### 5.1 论文研究工作总结

本文阐述了接收机天线和卫星天线 PCO、PCV 作为重要的误差源，在高精度数据处理中对其进行改正的必要性。本文给出了接收机天线和卫星天线 PCO、PCV 的改正模型和改正方法，并对目前 IGS 发布的改正模型做出了解释。本文给出了接收机天线和卫星天线 PCO、PCV 校验的方法和原理，并推导了相关的计算公式。

本文的主要研究成果有：

(1) 重点论述了接收机和卫星天线 PCO、PCV 各项对高精度数据处理的影响，其中接收机天线 PCO、PCV 对精密单点定位水平方向上的影响小于 11mm，高程方向上影响最大可达 189mm；对长基线或超长基线在各分量方向或长度上的影响最大可达到 101mm。卫星天线 PCO、PCV 对精密单点定位水平方向上的影响最大可达到 49mm，高程方向上的影响最大可达到 122mm；对长基线在各分量方向或长度上的影响在毫米水平，最大不超过 4mm，对超长基线在各分量方向或长度上的影响最大可达到 40mm。

(2) 利用全球 49 个均匀分布的 IGS 监测站的观测数据对 GPS 卫星 PCO、PCV 进行了校验，并分析了校验结果。分析结果显示：卫星天线 PCO 与 IGS 发布的 PCO 平均偏差在 -18cm 左右，PCV 偏差在 6mm 以内。利用校验所得天线参数进行三天弧段定轨，所有卫星轨道 RTN 三方向内符合精度分别为 13mm, 24mm 和 24mm，与 IGS 事后轨道比较的外符合精度分别为 36mm, 27mm 和 26mm。

(3) 利用校验所得卫星天线参数求取的精密定轨、卫星钟差，以及该卫星天线参数进行精密单点定位结果和利用 IGS 发布的天线参数、事后轨道和钟差精密单点定位结果相比较。结果显示：静态定位各方向最终结果的差异基本在毫米级，水平方向最大不超过 1.4cm，高程方向最大不超过 2cm；动态定位各方向 RMS 差异基本在毫米级，水平方向最大不超过 1.3cm，高程方向最大不超过 1.7cm。

(4) 对 BDS 卫星天线 PCV 进行了分析。分析结果显示对于 IGSO 或 MEO 卫星等同类型卫星其天线 PCV 除在最高或最低天底角处，其他位置 PCV 值基本一致，差异小于 1mm。

## 5.2 后续研究工作展望

本文对接收机天线和卫星天线 PCO、PCV 校验算法进行了研究, 利用全球 GPS 观测数据校验了 GPS 卫星天线 PCO、PCV, 并对校验结果进行了精度验证。本文仍然需要进一步研究的内容包括: BDS 接收机天线野外机器人校验数据处理软件的实现; BDS 定轨软件对卫星天线 PCO 参数估计功能模块的实现。

## 致谢

两年半的硕士生涯即将结束，所有的收获最终凝聚在这薄薄的一本毕业论文里，甚是感慨。回想在同济两年半的求学经历，在老师的教导与个人的努力下，自己的知识结构与科研能力得到了提升，社会阅历也更为丰富。在此，感谢同济大学这所百年学府的熏陶和在我科研道路上帮助我成长，生活中关心我的每一个人。

本论文是在导师胡丛玮副教授和陈俊平研究员的指导下完成的。胡老师治学严谨求实，让我受益终生。上海天文台的陈俊平研究员在本论文的撰写中还给予了宝贵的指导意见。在上海天文台的两年多时光，是我人生中重要的一笔财富，对我的学习与生活影响深远。同时也感谢上海天文台为本文提供的实验数据。

非常感谢王解先老师与伍吉仓老师，在学习与生活中给予我莫大的帮助。同时也感谢同济大学测绘与地理信息学院的各位老师对我的帮助。

感谢同门李茂、陈猛等师兄对我的帮助。特别感谢张益泽师兄对我的帮助与指导，以及在学术上无私的分享。感谢课题组的王君刚、王恒、房成贺、杨赛男、章洁君、陈倩，在学习生活中给予我诸多支持。感谢同班同学张帅、王子轩对我的帮助。

感谢我的家人对我一如既往的支持，多年来为我倾注所有。感谢胡弦，对我学习的支持与理解，生活中的陪伴与关怀，你是我前进的最大动力。

2017 年 3 月

## 参考文献

- [1] Askne, J. and H. Nordius. Estimation of tropospheric delay for microwaves from surface weather data. *Radio Science*, 1987, 22(3): 379-386
- [2] Balsamo, G., et al.. ERA-Interim/Land: A global land-surface reanalysis based on ERA-Interim meteorological forcing. ERA Report Series, ECMWF, 2012
- [3] Berrada Baby, H., et al.. A model for the tropospheric excess path length of radio waves from surface meteorological measurements. *Radio Science*, 1988, 23(6): 1023-1038
- [4] Bilich A L, Mader G L. GNSS Absolute Antenna Calibration at the National Geodetic Survey[J]. American Geophysical Union, 2009:3080.
- [5] Boehm, J. Vienna mapping functions in VLBI analyses. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(1)
- [6] Cardellach E, Davis J L. Global distortion of GPS networks associated with satellite antenna model errors[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2007, 112(112):3672-3672.
- [7] Chatzinikos M, Pikridas C, Fotiou A. The effects of the receiver and satellite antenna phase center models on local and regional GPS networks[C]// International Symposium on Modern Technologies, Education and Professional Practice in Geodesy and Related Fields. 2009.
- [8] Chen, J., et al. .SHA: The GNSS Analysis Center at SHAO. 160: 213-221, 2012
- [9] Chen, J., et al. . GNSS clock corrections densification at SHAO: from 5 min to 30 s. *Science China Physics, Mechanics and Astronomy*, 2013, 57(1): 166-175
- [10] Chen, Q., et al. . Assessment of ZTD derived from ECMWF/NCEP data with GPS ZTD over China. *GPS Solutions*, 2011, 15(4): 415-425
- [11] Collilieux X, Schmid R. Evaluation of the ITRF2008 GPS vertical velocities using satellite antenna z-offsets[J]. *GPS Solutions*, 2013, 17(2):237-246.
- [12] Davis, J. L., et al. . Geodesy by radio interferometry: Effects of atmospheric modeling errors on estimates of baseline length. *Radio Science*, 1985, 20(6): 1593-1607
- [13] Dawidowicz K. Antenna Phase Center Variations Corrections in Processing of Gps Observations with Use of Commercial Software[J]. *Technical Sciences*, 2010, 13(-1):120-132.
- [14] Dawidowicz K. Comparison of Using Relative and Absolute PCV Corrections in Short Baseline GNSS Observation Processing[J]. *Artificial Satellites*, 2012, 46(1):19-31.
- [15] Dawidowicz K. Phase center variations problem in GPS/GLONASS observations processing[C]// The, International Conference "environmental Engineering. 2014.
- [16] Dilssner F, Springer T, Flohrer C, et al. Estimation of phase center corrections for GLONASS-M satellite antennas[J]. *Journal of Geodesy*, 2010, 84(8):467-480.
- [17] Elgered, G. and P. O. J. Jarlemark. Ground-based microwave radiometry and long-term observations of atmospheric water vapor. *Radio Science*, 1998, 33(3): 707-717
- [18] Fan J J, Wang F X. Effects of GPS receiver antenna phase center variation on GPS baseline solutions[J]. *Journal of Astronautics*, 2007.
- [19] Florian D, Tim S, Erik S, et al. Estimation of Satellite Antenna Phase Center Corrections for BeiDou. IGS Workshop 2014, Pasadena California, USA

- [20] Galisteo J P O D, Toledano C, Cachorro V, et al. Improvement in PWV estimation from GPS due to the absolute calibration of antenna phase center variations[J]. *GPS Solutions*, 2010, 14(4):389-395.
- [21] Ge M, Gendt G, Dick G, et al. Impact of GPS satellite antenna offsets on scale changes in global network solutions. *Geophys Res Lett* 32:L06310[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(6):83-100.
- [22] Geiger A. Modeling of phase center variation and its influence on GPS-positioning[J]. *Lecture Notes in Earth Sciences* Berlin Springer Verlag, 1988, 19:210-222.
- [23] Guo J. Impact of Antenna Phase Center Offset and Variation for High Precision GPS Data Processing[J]. *Geomatics & Information Science of Wuhan University*, 2007, 32(12):1143-1146.
- [24] Heise, S., et al. . Integrated water vapor from IGS ground-based GPS observations: initial results from a global 5-min data set. *Annales Geophysicae*, 2009, 27(7): 2851-2859
- [25] Hill, E. M., et al. . Characterization of site-specific GPS errors using a short-baseline network of braced monuments at Yucca Mountain, southern Nevada. *Journal of Geophysical Research*, 2009, 114(B11)
- [26] Ifadis, I. . Contribution to the Study of the Atmospheric Refraction, on Radiowaves Used in Modern Geodetic Techniques in Long Distance Measurements, Thesis Report, vol. IA'. 6, School of Engineering, Faculty of Civil Engineering, Thessaloniki, 1987
- [27] Jäggi A, Dach R, Montenbruck O, et al. Phase center modeling for LEO GPS receiver antennas and its impact on precise orbit determination[J]. *Journal of Geodesy*, 2009, 83(12):1145-1162.
- [28] Jarlemark P, Emdarson R, Johansson J, et al. Ground-based GPS for validation of climate models: the impact of satellite antenna phase center variations.[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2010, 48(10):3847-3854.
- [29] Jin, S., et al. . Integrated Water Vapor Field and Multiscale Variations over China from GPS Measurements. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2008a, 47(11): 3008-3015
- [30] King M A, Bevis M, Wilson T, et al. Monument-antenna effects on GPS coordinate time series with application to vertical rates in Antarctica[J]. *Journal of Geodesy*, 2012, 86(1):53-63.
- [31] Kouba, J. . Implementation and testing of the gridded Vienna Mapping Function 1 (VMF1). *Journal of Geodesy*, 2007, 82(4-5): 193-205
- [32] Kumar A, Sarma A D, Ansari E, et al. Improved Phase Center Estimation for GNSS Patch Antenna[J]. *IEEE Transactions on Antennas & Propagation*, 2013, 61(4):1909-1915.
- [33] Kunysz W. Antenna phase center effects and measurements in GNSS ranging applications[C]// *International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics & the American Electromagnetics Conference*. 2010:1-4.
- [34] K.-D. Park, P. Elósegui, Davis J L, et al. Development of an antenna and multipath calibration system for Global Positioning System sites[J]. *Radio Science*, 2004, 39(5):1933-1943.
- [35] Lagler, K., et al. . GPT2: Empirical slant delay model for radio space geodetic techniques. *Geophys Res Lett*, 2013, 40(6): 1069-1073
- [36] Leandro, R. F., et al. . UNB3m\_pack: a neutral atmosphere delay package for radiometric

- space techniques. GPS Solutions, 2007, 12(1): 65-70
- [37] Li, W., et al. . New versions of the BDS/GNSS zenith tropospheric delay model IGGtrop. Journal of Geodesy, 2014, 89(1): 73-80
- [38] Li, X., et al. . Multi-GNSS Meteorology: Real-Time Retrieving of Atmospheric Water Vapor From BeiDou, Galileo, GLONASS, and GPS Observations. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2015a, 53(12): 6385-6393
- [39] Li, X., et al. Accuracy and reliability of multi-GNSS real-time precise positioning: GPS, GLONASS, BeiDou, and Galileo. Journal of Geodesy, 2015b, 89(6): 607-635
- [40] Li X, Ge M, Zhang H, et al. A method for improving uncalibrated phase delay estimation and ambiguity-fixing in real-time precise point positioning[J]. Journal of Geodesy, 2013, 87(5):405-416.
- [41] Liu Y, Lou L. Absolute Calibration of GPS Antennas[J]. Gnss World of China, 2012.
- [42] Marini, J. W. and C. Murray Jr. Correction of laser range tracking data for atmospheric refraction at elevations above 10 degrees, 1973
- [43] Mendes, V. B. and R. B. Langley. Tropospheric Zenith Delay Prediction Accuracy for Airborne GPS High-Precision Positioning. Proceedings of the 54th Annual Meeting of The Institute of Navigation, 1998, The Adams Mark Hotel, Denver, CO
- [44] Menge F, Seeber G, Vöksen C. Results of Absolute Field Calibration of GPS Antenna PCV[J]. Proceedings of International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, 1998.
- [45] Miller P, Alexander M, Tian H L. Antenna phase centre determination in the presence of phase errors[C]// European Conference on Antennas and Propagation. IEEE Xplore, 2009:1978-1982.
- [46] Montenbruck O, Garcia-Fernandez M, Yoon Y, et al. Antenna phase center calibration for precise positioning of LEO satellites[J]. GPS Solutions, 2009, 13(1):23-34.
- [47] Montenbruck O, Schmid R, Mercier F, et al. GNSS satellite geometry and attitude models[J]. Advances in Space Research, 2015, 56(6):1015-1029.
- [48] Niell, A. E. Preliminary evaluation of atmospheric mapping functions based on numerical weather models. Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy, 2001, 26(6-8): 475-480
- [49] Ray J K. Mitigation of GPS code and carrier phase multipath effects using a multi-antenna system[J]. 2000.
- [50] Rothacher M. Comparison of Absolute and Relative Antenna Phase Center Variations[J]. GPS Solutions, 2001, 4(4):55-60.
- [51] Schmid R, Rothacher M, Thaller D, et al. Absolute phase center corrections of satellite and receiver antennas[J]. GPS Solutions, 2005, 9(4):283-293.
- [52] 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.
- [53] 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.
- [54] Schüler, T. On ground-based GPS tropospheric delay estimation, Univ. der Bundeswehr München. 2001

- [55] Seeber G, Menge F, Völksen C, et al. Precise GPS Positioning Improvements by Reducing Antenna and Site Dependent Effects[M]// Advances in Positioning and Reference Frames. Springer Berlin Heidelberg, 1998:237-244.
- [56] Steigenberger, P., et al. Comparison of GMF/GPT with VMF1/ECMWF and implications for atmospheric loading. Journal of Geodesy, 2009, 83(10): 943-951.
- [57] Steigenberger P, Rothacher M, Schmid R, et al. Effects of Different Antenna Phase Center Models on GPS-Derived Reference Frames[J]. International Association of Geodesy Symposia, 2008, 134:83-88.
- [58] Stolk K, Brown A. Phase Center Calibration and Multipath Test Results of a Digital Beam-Steered Antenna Array[J]. Proceedings of Int.tech.meeting of the Satellite Division of the U.s.institute of Navigation, 2003.
- [59] Tregoning, P. and T. A. Herring. Impact of a priori zenith hydrostatic delay errors on GPS estimates of station heights and zenith total delays. Geophysical Research Letters, 2006, 33(23).
- [60] Vey, S., et al. Influence of mapping function parameters on global GPS network analyses: Comparisons between NMF and IMF." Geophysical Research Letters, 2006, 33(1): n/a-n/a.
- [61] Wang, J., et al. Global estimates of water-vapor-weighted mean temperature of the atmosphere for GPS applications. Journal of Geophysical Research, 2005, 110(D21).
- [62] Willis P, Haines B J, Kuang D. DORIS satellite phase center determination and consequences on the derived scale of the Terrestrial Reference Frame[J]. Advances in Space Research, 2007, 39(10):1589-1596.
- [63] Wu X L, Zhou J H, Gang W. Multipath error detection and correction for GEO/IGSO satellites[J]. Science China Physics, Mechanics & Astronomy, 2012, 55(7):1297-1306.
- [64] Wübbena G, Schmitz M, Mader G, et al. GPS Block II/IIA Satellite Antenna Testing using the Automated Absolute Field Calibration with Robot[J]. Proceedings of International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, 2007:1236-1243.
- [65] Wübbena G, Schmitz M, Boettcher G, et al. Absolute GNSS Antenna Calibration with a Robot: Repeatability of Phase Variations, Calibration of GLONASS and Determination of Carrier-to-Noise Pattern[J]. 2010.
- [66] Wübbena G, Schmitz M, Menge F, et al. A New Approach for Field Calibration of Absolute GPS Antenna Phase Center Variations[J]. Navigation, 1997, 44(44):247-255.
- [67] Wübbena G, Schmitz M, Menge F, et al. Automated absolute field calibration of GPS antennas in real-time[J]. 2000.
- [68] Xu, A., et al. Estimating Zenith Tropospheric Delays from BeiDou Navigation Satellite System Observations. Sensors, 2013, 13(4): 4514-4526.
- [69] Yao, Y., et al. A globally applicable, season-specific model for estimating the weighted mean temperature of the atmosphere. Journal of Geodesy, 2012a, 86(12): 1125-1135
- [70] Zus, F., et al. The rapid and precise computation of GPS slant total delays and mapping factors utilizing a numerical weather model. Radio Science, 2014a, 49(3): 207-216
- [71] 陈俊平, 低轨卫星精密定轨研究[D]. 上海: 同济大学, 2007
- [72] 陈刘成, 胡小工, 封欣, 等. 区域导航系统实时广域差分修正模型与方法[J]. 中国科学院上海天文台年刊, 2010(1): 45-53.
- [73] 陈钦明, 等. 亚洲地区 ECMWF/NCEP 资料计算 ZTD 的精度分析. 地球物理学报,

- 2012, 55(5): 1541-1548
- [74] 曹月玲,胡小工,周善石,刘利,吴晓莉,苏冉冉,常志巧,何峰,吴斌.基于星间链路的 BDS 导航系统实时星历和钟差分离修正.天文学进展. 2015 33(1):122-133
- [75] 邓兴升, 等. 似大地水准面格网双二次多项式插值方法. 测绘学报, 2009, 38(1): 35-40
- [76] 李征航, 黄劲松. GPS 测量与数据处理. 武汉, 武汉大学出版社, 2005
- [77] 马志泉, 等. 用中国地区 ERA-Interim 资料计算 ZTD 和 ZWD 的精度分析. 大地测量与地球动力学, 2012, 32(2): 100-104
- [78] 毛健, 等. 一种新的全球对流层天顶延迟模型. 武汉大学学报: 信息科学版, 2013, 38(6): 684-688
- [79] 许长辉, 高井祥, 周锋,等. 精密单点定位的可靠性研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2012, 37(6):709-713.
- [80] 姚宜斌, 等. 一种新的全球对流层天顶延迟模型 GZTD." 地球物理学报, 2013, 56(7): 2218-2227
- [81] 叶世榕. GPS 非差相位精密单点定位理论与实现[D]. 武汉大学, 2002.
- [82] 袁运斌, 欧吉坤. 建立 GPS 格网电离层模型的站际分区法. 科学通报, 2002, 47(8): 636-639
- [83] 张小红, 左翔, 李盼,等. BDS/GPS 精密单点定位收敛时间与定位精度的比较[J]. 测绘学报, 2015, 44(3):250-256.
- [84] 赵静旻, 等. ERA-Interim 应用于中国地区地基 GPS/PWV 计算的精度评估. 武汉大学学报(信息科学版), 2014, 39(8): 935-939

## 个人简历、在读期间发表的学术论文与研究成果

### 个人简历:

胡一帆, 男, 1991 年 2 月生。

2014 年 7 月毕业于武汉大学测绘工程专业获学士学位。

2014 年 9 月入同济大学读硕士研究生。

### 已发表论文:

Yifan Hu, Junping Chen, Congwei Hu, et al. A Primary Assessment of Zone-Divided Corrections of BDS Decimeter Level SBAS, 第七届导航学术年会. 2016

### 待发表论文:

- [1] 陈俊平, 胡一帆, 张益泽, 等. BDS 星基增强系统性能提升初步评估. 同济大学学报 (自然科学版) (已接收)
- [2] 胡一帆, 胡弦, 陈俊平, 等. GPS 卫星和接收机天线绝对 PCO、PCV 对高精度基线解算的影响分析. 测绘通报 (已接收)