

基于不同参考框架的 GPS 卫星天线校验

陈俊平^{1,2}, 胡一帆^{1,3}, 张 帅⁴, 刘 姣^{1,2}

(1. 中国科学院 上海天文台, 上海 200030; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 武汉合众思壮空间信息有限公司, 湖北 武汉 430223;

4. 上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海 200092)

摘要:重新估计了基于不同参考框架的 GPS 卫星天线 PCO (相位中心偏差)和 PCV(相位中心变化)参数. 计算过程中, 通过固定测站天线的 PCO 和 PCV, 并将测站坐标强约束至不同的参考框架之下, 降低了 GPS 卫星天线参数和接收机天线参数以及参考框架参数之间的相关性. 结果显示, 基于不同参考框架的同类型卫星天线 PCV 差异的平均值为 0.726 mm; 与 IGS 发布值差异的平均值为 0.844 mm; 基于新公布的 IGS14 参考框架的 GPS 卫星天线 PCO 估计结果与 IGS (国际 GNSS 服务)发布值差异的平均值为 -14.4 mm. 基于 IGS08 参考框架的卫星天线 PCO 估计结果与 IGS 发布值差异的平均值为 -16.8 mm. 以上结果表明, 本措施提高了 GPS 卫星相位中心 PCO/PCV 的一致性, 从而也能提高 GNSS(global navigation satellite system) 技术用于框架传递的连续性.

关键词: 卫星天线; 天线相位中心偏差; 天线相位中心变化; 校验; 参考框架; 基准转换

中图分类号: 170.3550

文献标志码: A

by fixing receiver antenna PCO/PCV and constraining station coordinate to given reference frame tightly. Results show that the mean difference of block-specific satellite antenna PCV based on different reference frames is 0.726 mm. Comparing with the satellite antenna PCV released by IGS based on IGS00, the mean block-specific PCV difference between IGS value and the re-estimated is 0.844 mm. Comparing to the IGS values, GPS re-estimated satellite antenna PCO has an average bias of -14.4 mm and -16.8 mm for the re-estimated satellite antenna PCO based on IGS14 and IGS08, respectively. The re-estimated PCO/PCV values could improve their inter-consistency and contribute to the GNSS based reference frames densification.

Key words: satellite antenna; phase center offset; phase center variation; calibration; reference frame; datum transformation

Calibration of GPS Satellite Antenna Based on Different Reference Frames

CHEN Junping^{1,2}, HU Yifan^{1,3}, ZHANG Shuai⁴, LIU Jiao^{1,2}

(1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Wuhan Unistrong Space Information Co. LTD, Wuhan 430223, China; 4. Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co. LTD., Shanghai 200092, China)

Abstract: GPS satellites antenna PCO (phase center offset) and PCV(phase center variation) were re-estimated based on station coordinates under different reference frames. The correlations among GPS satellite antenna parameters, receiver antenna parameters and reference frame scales were reduced

GPS(global positioning system)在高精度数据处理中,接收机和卫星天线的相位中心偏差(PCO, phase center offset)、相位中心变化(PCV, phase center variation)对精密单点定位的影响能达到几厘米,在高程方向甚至能达到十几厘米;对高精度基线解算,在基线各分量上的影响也能达到厘米水平,当基线越长时这种影响越明显^[1-3].自1996年6月30日起,IGS(international GNSS service)的各数据分析中心开始利用相对相位中心改正模型来改正这一误差项.2006年11月后,IGS测站所采用的天线均进行了绝对相位中心模型的改正.地面接收机天线相位中心的绝对与相对校验都是利用露天检定场上的超短基线.相对校验只给出天线相位中心3个坐标轴方向的偏差分量及其随卫星高度角的变化量,绝对天线相位中心检验还给出了天线相位中心改正

收稿日期: 2017-08-05

基金项目: 国家自然科学基金(11673050); 国家重点研发计划(2018YFB0504300)

第一作者: 陈俊平(1980—),男,研究员,博士生导师,工学博士,主要研究方向为卫星大地测量和动力学. E-mail: junping@shao.ac.cn

随卫星方位角的变化^[2-4]. 在对地面接收机天线进行绝对相位中心改正时,如不对卫星天线相位中心予以改正,则 GNSS (global navigation satellite system)系统测定的参考框架与使用其他观测技术(如 VLBI, very long baseline interference 和 SLR, satellite laser range)得到的结果间存在 1.5×10^{-8} 的尺度误差^[4-6].

天线相位中心改正与参考框架的更新是一个互相迭代的过程. 自从 ITRF2008 以来,每次国际参考框架的更新,国际 GNSS 服务组织(IGS)都会要求所有分析中心进行数据的重处理,并向 ITRF (international terrestrial reference frame)提供重处理结果的时间序列. GNSS 数据重处理时,会对包括天线相位中心在内的所有模型进行更新. 从 GPS 时间 1709 周(2012-10-07)至 1933 周(2017-01-28), IGS 数据处理采用的 GPS 卫星天线相位参数 PCO 是基于 IGS08 框架重新处理的结果. 在此期间,需要与卫星 PCO 联合使用的 PCV 参数并没有进行更新,因而造成了 IGS08 无法直接向 ITRF2008 归算^[7],造成 GNSS 进行框架传递存在问题.

测站坐标、卫星天线相位中心参数 PCO、PCV 的自洽一致对于参考框架维持的连续性具有重要意义. 利用 2005—2016 年 IGS 全球均匀分布的 IGS 跟踪站观测数据重新计算 IGS00、IGS05 和 IGS08 参考框架下的 GPS 卫星天线 PCV 参数,重新估计基于 IGS08 和 IGS14 参考框架的 GPS 卫星天线 PCO 参数,并将估计结果与 IGS 发布值进行比较.

1 卫星天线相位中心估计原理

GNSS 卫星天线相位中心的改正包含平均相位中心与卫星质心的偏差 PCO 以及随高度角、方位角变化的 PCV. 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^[8]. 图 1 给出了卫星天线 PCO 的 Z 轴分量改正示意图.

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为 $\Delta\epsilon_p(z')$, 可表示为^[9]

$$\Delta\epsilon_p(z') = \Delta\phi'_{PCV}(z') + \Delta r \cdot \cos z' \quad (1)$$

式中: $\Delta\phi'_{PCV}(z')$ 表示天底角为 z' 时的卫星天线 PCV, z' 为天底角,即星固系 z 轴与卫星观测测站方向所形成的夹角,其计算公式如下:

$$\sin z' = \frac{R}{r} \sin z \quad (2)$$

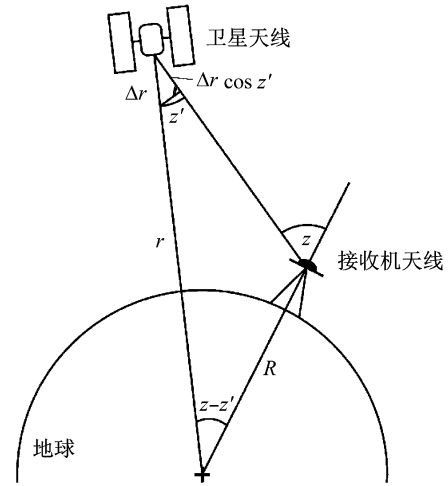


图 1 卫星天线 PCO 的 Z 轴分量改正的示意

Fig. 1 Satellite antenna PCO Z -component

式中: R 为接收机到地心的距离; r 为卫星到地心距离; z 为测站天顶距.

式(1)中 z' 的变化范围在 $[0^\circ, 14.28^\circ]$, 从而有 $\cos z' \in [0.97, 1.00]$. 因此, 卫星天线参数 PCO 在 z 轴分量的大部分都反映在观测视向上, 将会被卫星钟差参数吸收, 从而 PCO/PCV 参数带来的观测残差 $\varphi_{\text{raw}}(z')$ 为

$$\varphi_{\text{raw}}(z') = \Delta\phi'_{PCV}(z') + \Delta r(\cos z' - 1) \quad (3)$$

将 φ_{raw} 表示为天底角的线性分段函数, 如式(4):

$$\varphi_{\text{raw}}(z') = \frac{z' - z'_i}{z'_{i+1} - z'_i} (\varphi_{\text{raw}}(z'_{i+1}) - \varphi_{\text{raw}}(z'_i)) + \varphi_{\text{raw}}(z'_i) \quad (4)$$

式中: z'_i 为天底角 z' 的整数部分.

$$z'_{i+1} = z'_i + 1 \quad (5)$$

$\varphi_{\text{raw}}(z'_i)$ 为天底角为 z'_i 时的观测残差; $\varphi_{\text{raw}}(z'_{i+1})$ 为天底角为 z'_{i+1} 时的观测残差. 由于卫星天线 PCV 也与卫星钟差强相关性, 可引入约束方程来避免法方程秩亏, 如式(6):

$$\sum_{i=0, m-1}^i \varphi_{\text{raw}}(z'_i) = 0 \quad (6)$$

式中: m 为 PCV 的分段节点数.

由 $\varphi_{\text{raw}}(z')$ 中包含有卫星天线 PCO 和 PCV, 在对二者进行分离时, 引入约束条件如式(7):

$$\sum_{i=0, m-1}^i [\varphi_{\text{raw}}(z'_i) - a - \Delta r(1 - \cos z'_i)]^2 = \min \quad (7)$$

式中: a 为观测残差中的常量部分. 在以上过程中, 拟合的残差即为卫星天线 PCV 的值^[10].

基于以上模型, 通常 PCV 的估计方法为利用非差观测值固定双差模糊度, 同时解算卫星轨道、钟差、测站坐标和接收机钟差, 最后分析残差提取卫

星 PCV. 在估计 PCV 时, 由于利用分步的方法先解算出精密轨道, 再固定精密轨道解算卫星钟差、测站坐标和接收机钟差, 从而显著减小了法方程的维数, 降低了参数相关性, 从而提高参数求解的精度.

2 基于不同参考框架的 PCV 参数解算

2.1 PCV 解算策略

IGS 发布的天线绝对相位中心改正模型中 GPS 卫星天线 PCV, 无论是 IGS_05.atx 还是 IGS_08.atx 均是基于 IGB00 框架, 从而卫星的 PCV 与框架存在不自洽的问题. 为提高两者的一致性, 进而提高 GNSS 框架传递的精度, 重新解算不同参考框架 (IGS00, IGS05 和 IGS08) 下 GPS 卫星天线 PCV

参数.

基于文献[11]中的讨论, 约 50 个左右测站能够实现参考框架的高精度确定. 选取 IGS08 框架中全球均匀分布的 49 个测站(如图 2). 利用这些站的观测数据解算卫星 PCV 参数. 解算中参数初始值以及对应参考框架见表 1, 在坐标水平和高程方向上加 1 mm 强约束, 卫星天线 PCO 的协议值如表 2, 卫星天线 PCV 设为零. 计算过程中测站坐标、卫星轨道、测站对流层延迟、地球自转参数同时估计, 其他参数设置如表 3, 不同框架下观测数据时间跨度如表 1.

2.2 PCV 解算结果

以下 BLOCK II R-A 类型卫星中选 PRN20、BLOCK II R-B/II R-M 中选 PRN05 和 BLOCK II F 中选 PRN25 对 PCV 的结果进行分析. 其中 PRN20 号卫星 2015 年年积日 168 至 177 d 这 10 d 中卫星

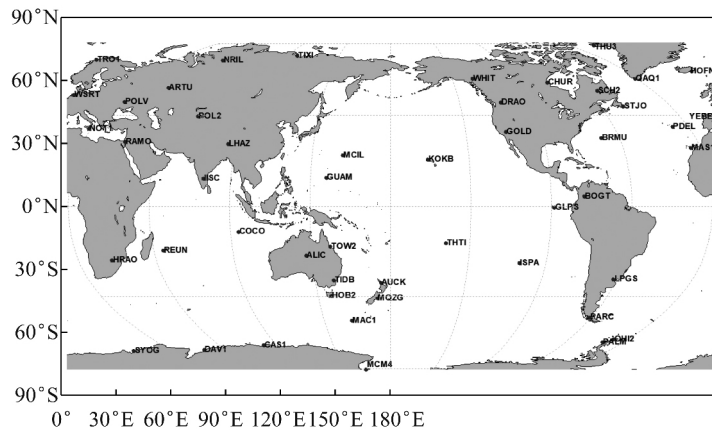


图 2 测站分布

Fig. 2 Station distribution

表 1 不同参考框架下测站坐标、测站 PCO/PCV 参数、观测数据时间跨度说明

Tab. 1 Reference PCO/PCV and coordinates files and time span of observations

参考框架	测站坐标	测站天线 PCO/PCV	观测数据时间跨度
IGS00	IGb00.sn	igs05_1602.atx	2000 年全年, 2003 年全年
IGS05	IGS05.sn	igs05_1602.atx	2005 年全年, 2008 年全年
IGb08	IGb08.sn	igs08_1884.atx	2013 年到 2015 年 3 年

表 2 不同类型卫星天线 PCO 协议值

Tab. 2 Conventional block-specific satellite antenna PCO

卫星类型	$\Delta x/mm$	$\Delta y/mm$	$\Delta z/mm$
Block I	210	0	854
Block II / II A	279	0	1 023
Block II R	0	0	0
Block II F	394	0	1 600

有效观测值数目随天底角大小变化的直方图如图 3, 直方图组距为 0.5° .

由图 3 可知, 由于卫星星座设计的关系, 天底角

表 3 估计卫星天线 PCV 的参数设置

Tab. 3 Parameter setting of satellite antenna

PCV estimation	
参数	处理方式
观测数据	伪距和相位
采样率	300 s
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	模型改正
相对论、地球自转	模型改正
模糊度	整数解
迭代次数	1 次

在 $[0^\circ, 2^\circ]$ 范围内有效观测值数目很少. 鉴于一颗卫星 10 d 的有效观测值数目便能达到 39 000, 将每周的卫星有效观测值非差残差按照 0.2° 步长进行分

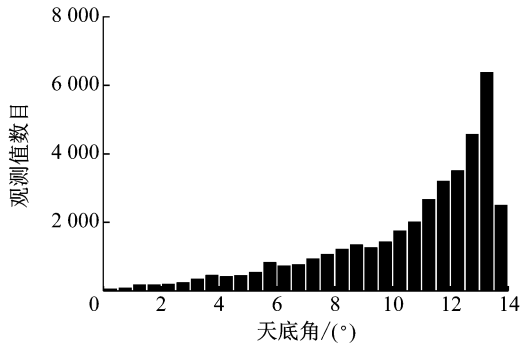


图 3 PRN20 有效观测值数目随天底角变化的直方图
Fig. 3 Distribution of valid observations with respect to nadir angle for PRN20

段,可得到 PRN20、PRN05 和 PRN25 三颗卫星 3 年的观测残差随天底角的变化如图 4.

由图 4 知,PRN20、PRN05、PRN25 三颗卫星的非差残差随天底角的增大,其离散度不断减小,这与图 3 中随着天底角增大而有效观测值数目不断增加吻合.限于天底角 $[0^{\circ}, 1^{\circ}]$ 间有效观测值数目过少,该范围的卫星天线 PCV 不采用残差拟合值.

进一步对以上残差序列按照式(4)~(7)进行计算,PCV 的分段线性拟合的步长取为 1° ,可得到如图 5 的基于 IGS08 框架的卫星天线 PCV 结果,图例中 IGS 图标代表 IGS 的发布值.

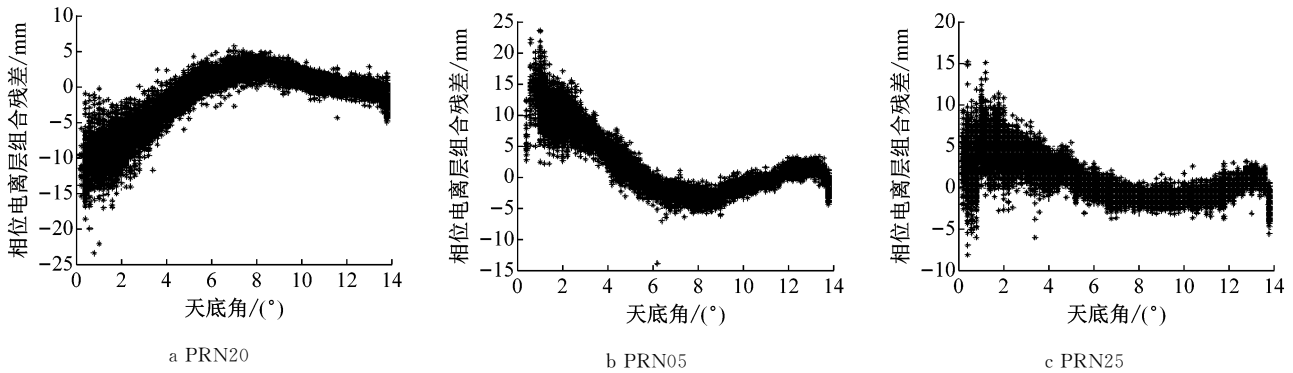


图 4 PRN20、PRN05、PRN25 的观测残差

Fig. 4 Zero-difference residuals of PRN20、PRN05、PRN25

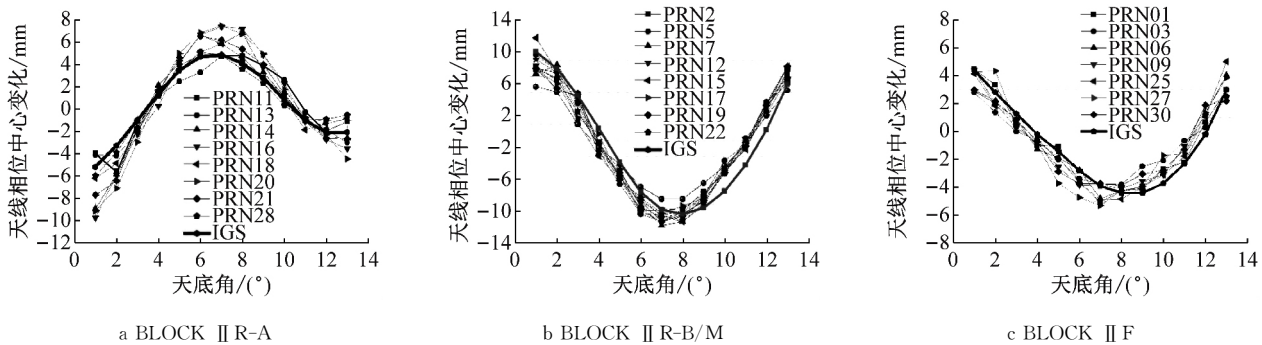


图 5 基于 IGS08 框架的卫星天线 PCV

Fig. 5 Satellite antenna PCV based on IGS08

按照同样的方法,计算基于 IGS00 和 IGS05 框架的卫星天线 PCV 结果.篇幅原因,不加以讨论.

图 6 将基于不同参考框架同一类型卫星天线的 PCV 计算值与 IGS 发布值进行对比,并给出计算 PCV 参数的重复率(标准偏差).由图 6 知,基于不同参考框架计算所得的同类卫星天线 PCV 结果相近,基于同一参考框架的同类卫星天线 PCV 重复率最大值均集中在天底角 1° 和 13° 附近,其值在 1 mm 左右;重复率平均值为 0.70 mm,最大可达 2.12 mm.卫星类型 BLOCK II R-A、BLOCK II R-B/ II R-M 和 BLOCK II F 的 PCV 在数值和变化趋势都与 IGS

发布的卫星天线 PCV 吻合较好.同时可见重新计算的结果与 IGS 公布值存在差异,这也反映 IGS 采用的参考框架和 PCV 不自洽的程度.

统计基于不同参考框架的同类卫星天线 PCV 在 $[1^{\circ}, 13^{\circ}]$ 整数度处差异的绝对值以及不同参考框架下 PCV 估计值与 IGS 发布结果的差异,可见其最大不超过 1.645 mm;平均值分别为 0.726 mm 和 0.844 mm.

综上所述,基于不同参考框架所得的卫星天线 PCV 的差异较小;与 IGS 发布值的差异也较小,基本在 1 mm 以下,天底角 1° 和 13° 处差异较大.

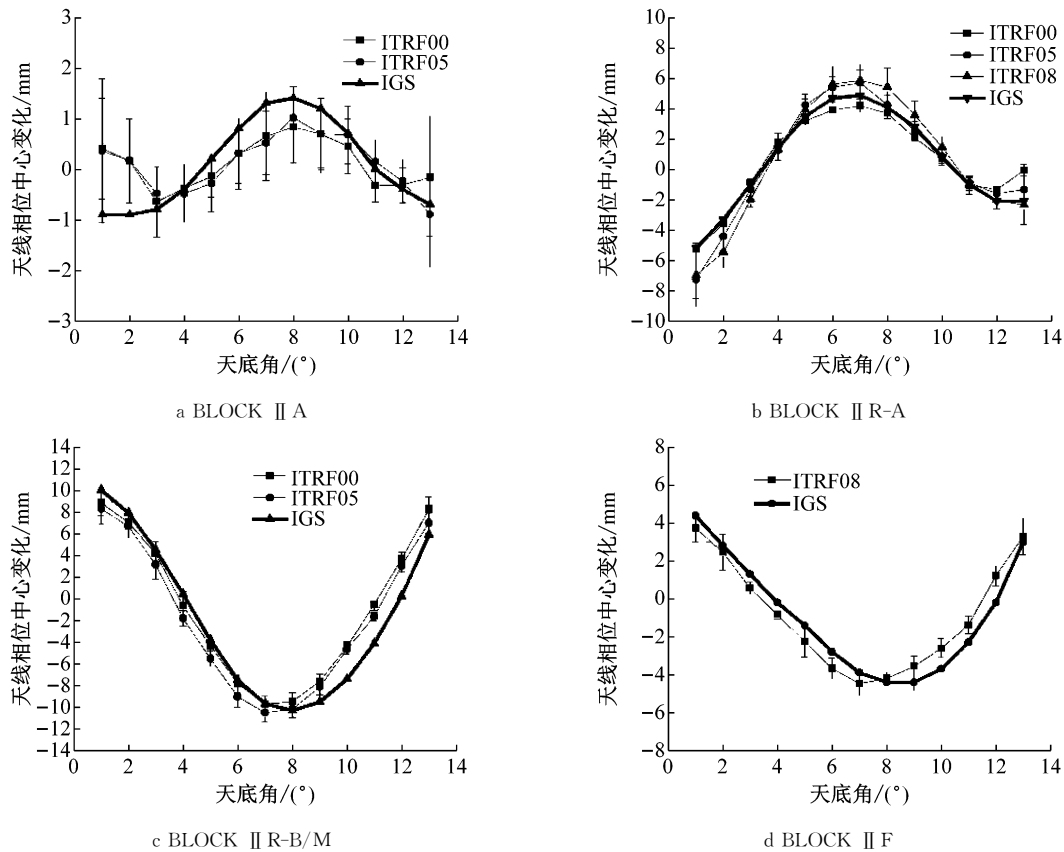


图 6 基于不同参考框架的 PCV 对比和以及计算的卫星天线 PCV 重复率

Fig. 6 Satellite antenna PCV based on different reference frame and PCV repeatability of block-specific satellites

3 基于不同参考框架的 PCO 参数解算

3.1 PCO 解算策略

采用以上 IGS 跟踪站 2005 年到 2016 年 12 年的数据解算卫星天线 PCO 参数. 解算过程中测站坐标框架取自 IGS14, 仅估计 PCO 的 z 轴分量, 其初值选为协议值; 解算过程中测站坐标在水平和高程方向上分别加 5 cm 和 10 cm 约束; 卫星天线 PCO 通过最后统一处理法方程得到.

值得注意的是, 本节仅解算基于 IGS14 框架的各参数值来形成法方程系统, 得到法方程系统后, 可通过基准转换的方法来得到基于 IGS08 等其他框架的卫星天线 PCO 结果. 参考框架转换方法如下: 以 Q 表示测站和其他参数的协因数阵, p 表示各未知数的近似值, x 表示其改正值, 则其法方程可表示为

$$Nx = C \quad (9)$$

其中法方程系数 N 为 Q 的逆阵, C 表示法方程的常数项, 在进行基准转换之前先将法方程系数矩阵中已加入的先验约束 (主要是坐标上的约束) 扣除, 假设扣除约束后的系数矩阵为 N' . 将基于 IGS14 框架

的法方程转换到基于 IGS08 框架, 即: 将列方程时所采用的测站坐标初值转换到 IGS08 框架下. 假设 IGS14 框架下各未知数近似值为 p , IGS08 框架下各未知数近似值为 p_1 , 其中 p 和 p_1 的主要差别体现在测站坐标参数上. 因为 p 和 p_1 差值较小, 故法方程系数矩阵基本没有变化, 仍为 N' , 从而法方程常数项由 C 变为 $C - N'(p_1 - p)$.

3.2 PCO 解算结果

对卫星按 SVN(space vehicle number) 号进行分类, 鉴于卫星天线 PCO 中存在年周期项和半年周期项, 故计算时剔除服役时间小于 2 年的卫星, 并通过取平均值来抵消掉周期项.

基于 IGS14 参考框架的部分卫星天线 PCO 结果相对于 IGS 发布值的偏差如图 7, 图中 a_B 为天线相差中心偏差差异, a_S 为 a_B 的标准差. 基于 IGS14 和 IGS08 参考框架的所有卫星天线 PCO 偏差统计结果如图 8.

由图 7 可知, 部分卫星解算所得 PCO 的 z 轴方向偏差较小, 最小甚至仅 1 mm; 卫星天线 PCO 偏差的变化都具有周期特性, 其中最显著是年周期项, 该周期项是由于太阳与地球连线和卫星轨道平面形成的 β 角相关; 卫星进入了地影时期, 解算结果的标准

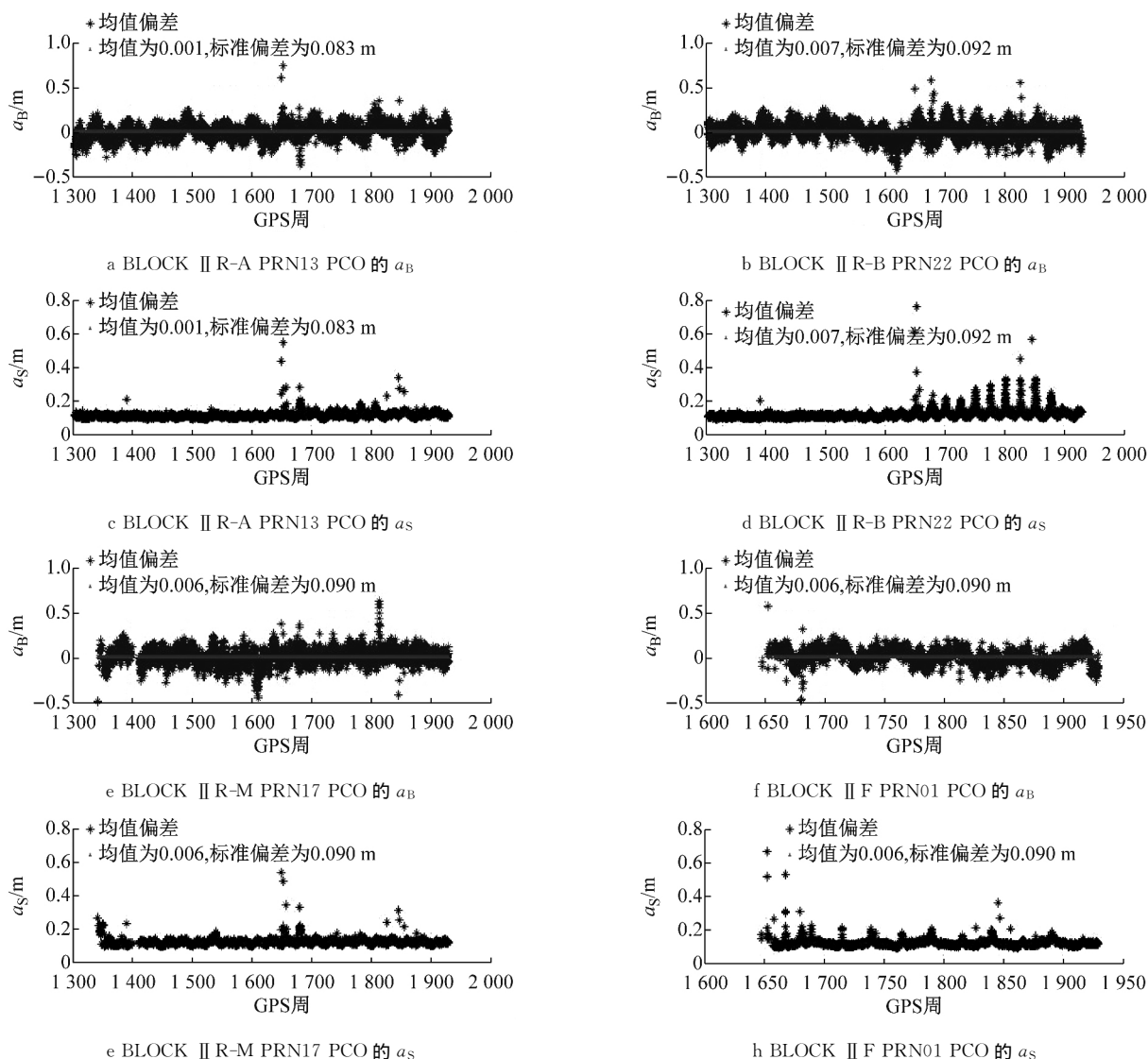


图 7 PRN13、PRN22、PRN17、PRN01 天线 PCO 相对于初值的改正量

Fig. 7 Satellite antenna PCO adjustment of PRN13, PRN22, PRN17, PRN01 relative to initial value

偏差也明显变大. 由图 8 可知, 不论是基于 IGS14 还是基于 IGS08 参考框架, 卫星天线 PCO 的改正数均小于 10 cm, 其中基于 IGS14 参考框架的最大偏差为 85 mm, 所有卫星平均值为 -14.4 mm, 基于 IGS08 参考框架的最大偏差为 86.0 mm, 平均值为 -16.8 mm. 基于 IGS14 参考框架的所有卫星天线 PCO 改正数的标准偏差在 [72 mm, 113 mm] 之间, 基于 IGS08 参考框架的所有卫星天线 PCO 改正数的标准偏差在 [61 mm, 103 mm] 之间. 由图 8 将同类卫星天线 PCO 偏差取均值, 基于 IGS14 和 IGS08 参考框架的同类卫星天线 PCO 偏差均值相近, 存在系统性的偏差.

4 结论

介绍了卫星天线 PCO、PCV 的校验算法, 利用

IGS 全球均匀分布的 49 个站 2005—2016 年 12 年的观测数据, 重新估计了基于不同参考框架的 GPS 卫星天线 PCO 和 PCV 参数, 并与 IGS 发布值做了比较. 结果显示: 基于 IGS00、IGS05 和 IGS08 参考框架的卫星天线 PCV 差异较小, 与 IGS 发布的 PCV 差异基本在 1 mm 左右. 基于新公布的 IGS14 参考框架的卫星天线 PCO 估计结果与 IGS 发布值差异的平均值为 -14.4 mm, 基于 IGS08 参考框架的卫星天线 PCO 估计结果与 IGS 发布值差异的平均值为 -16.8 mm. 而 IGS 发布的基于 IGS14 参考框架的各 GPS 卫星 (不包含 BLOCK I 和 BLOCK II 卫星) 天线 PCO 与基于 IGS08 参考框架 PCO 差异的平均值达到了 52.1 mm, 远大于本文解算的结果. 这也表明了本文解算的 PCO 参数与框架的一致性更高.

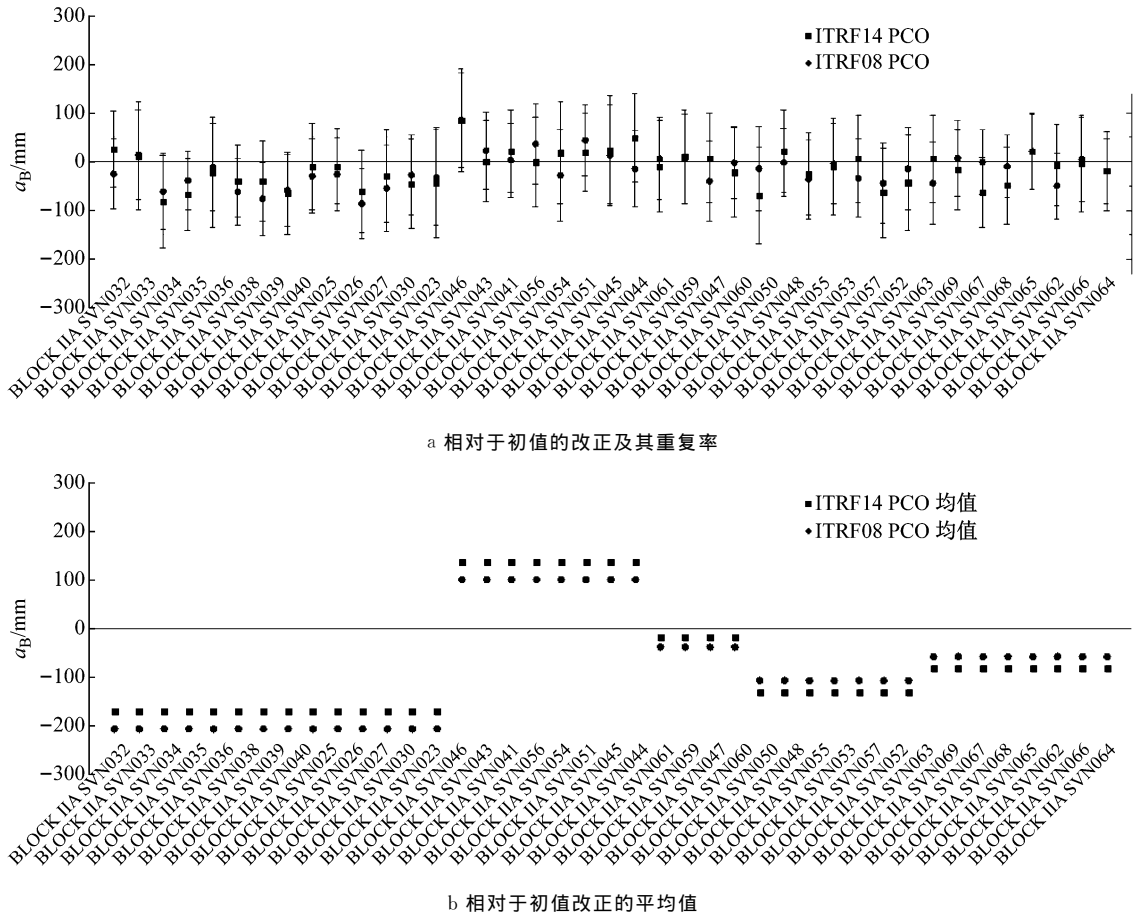


图 8 基于 IGS14 和 IGS08 的卫星天线 PCO 统计图

Fig. 8 Statistic result of Satellite antenna PCO corrections based on IGS14 and IGS08

参考文献:

[1] 朱智勤, 李征航, 刘万科. 相位中心改正模式的转变对 GPS 数据处理的影响[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2009, 34(11):1301.
 ZHU Zhiqin, LI Zhenghang, LIU Wanke. The effect of the shift of phase center correction mode on GPS data processing [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2009, 34(11):1301.

[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[J]. 测绘通报, 2017(5):11.
 HU Yifan, HU Xian, CHEN Junping, *et al.* Analysis of GPS satellite and receiver antenna absolute PCO/PCV influence on high precise baseline resolution [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2017(5): 11.

[3] 胡一帆. 卫星导航天线 PCO 和 PCV 在轨标定[D]. 上海: 同济大学, 2017.
 HU Yifan. The calibration of antenna PCO/PCV based on navigation satellite orbit [D]. Shanghai: Tongji University, 2017.

[4] SCHMID R, ROTHACHER M. Estimation of elevation-dependent satellite antenna phase center variations of GPS

satellites[J]. Journal of Geodesy, 2003, 77(7):440.

[5] BILICH A L, MADER G L. GNSS absolute antenna calibration at the national geodetic survey [J]. American Geophysical Union, 2009, 21(11):3080.

[6] WVBENA G, SCHMITZ M, BOETCHER 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]. Journal of Geodesy, 2008, 47(5): 730.

[7] REBISCHUNG P, GARAYT B, SCHMID R, *et al.* IGS08: Elaboration, consequences & maintenance of the IGS realization of ITRF2008 [J]. GPS Solutions, 2012, 16(4):483.

[8] SPRINGER T A. Modeling and validating orbits and clocks using the global positioning system [J]. GPS Solutions, 2005, 13(4):453.

[9] SCHMID R, ROTHACHER M, THALLER D, *et al.* Absolute phase center corrections of satellite and receiver antennas[J]. GPS Solutions, 2005, 9(4):283.

[10] 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.

[11] RAY J, RAY J, RAY J, *et al.* IGS08: the IGS realization of ITRF2008[J]. GPS Solutions, 2012, 16(4):483.