

引文格式: 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): 11-16. DOI: 10.13474/j.cnki.11-2246.2017.0144.

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

胡一帆^{1,2}, 胡弦³, 陈俊平¹, 胡丛玮²

(1. 中国科学院上海天文台, 上海 200030; 2. 同济大学测绘与地理信息学院, 上海 200092;
3. 武汉大学GNSS中心, 湖北 武汉 430079)

摘要: 在高精度GPS卫星导航数据处理中, 卫星和接收机天线的PCO和PCV作为重要的误差来源之一, 必须予以改正。本文从高精度基线解算入手, 分析了卫星和接收机天线PCO和PCV中各项对高精度基线解算结果的影响。试验结果表明, 接收机天线PCO、PCV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101 mm。卫星天线PCO、PCV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4 mm; 对超长基线在各分量方向或长度上的影响最大可达到40 mm。

关键词: 卫星天线; 接收机天线; 绝对PCO、PCV; 高精度基线解算

中图分类号: P228

文献标识码: A

文章编号: 0494-0911(2017)05-0011-06

Analysis of GPS Satellite and Receiver Antenna Absolute PCO/PCV Influence on High Precise Baseline Resolution

HU Yifan^{1,2}, HU Xian³, CHEN Junping¹, HU Congwei²

(1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China; 2. College of Surveying and GEO-Informatics, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. GNSS Center of Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: As one significant error source, the receiver antenna and GPS satellite antenna PCO/PCV must be corrected in high accuracy data processing. In this paper, the influence of receiver antenna and GPS satellite antenna PCO/PCV is analyzed for baseline processing. The result shows that the effects of receiver antenna PCO/PCV for long and very long baseline in components and length can reach 101 mm. The effects of satellite antenna PCO/PCV for long baseline in components and length are in millimeter level, the maximum is less than 4 mm, for very long baseline, the effects in components and length can reach 40 mm.

Key words: satellite antenna; receiver antenna; absolute PCO/PCV; baseline resolution

高精度GPS测量中, 天线相位中心的偏差和天线相位中心变化是一项重要的误差源, 其对高程分量的影响最为显著^[1]。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来改正这一误差项。相对相位中心改正的前提是假定参考天线(AOAD/M_T型天线)的PCV为0。但实际上AOAD/M_T型天线的PCV并不为0, 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等一系列缺点^[2]。2006年11月后, IGS提供的天线产品均基于绝对相位中心改正模型的结果。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^[3-8]。

1 接收机天线相位中心改正

对接收机而言, 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。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。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)。如图1所示, 天线相位中心偏差为 X_{off} 。

收稿日期: 2016-10-27

基金项目: 国家863计划(2014AA123102); 国家自然科学基金(11273046)

作者简介: 胡一帆(1991—), 男, 硕士生, 主要研究方向为GNSS卫星导航定位。E-mail: 1553055148@qq.com

第2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(PCV),该偏差为卫星高度角 e 和方位角 α 的函数^[4],表示为 $\Delta\varphi_{PCV}(\alpha, e)$ 。

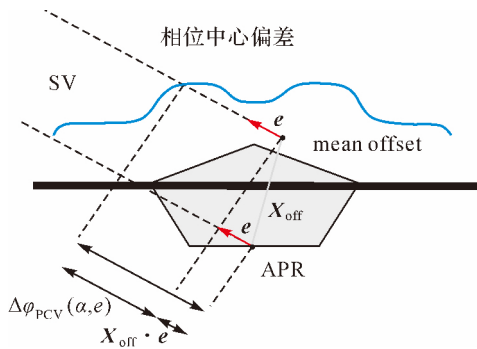


图1 接收机天线改正模型

由图1可知,接收机对于高度角为 e 、方位角为 α 的卫星的相位观测值的接收机天线改正项为 $\Delta\varepsilon_\varphi(\alpha, e)$,其计算公式如下

$$\Delta\varepsilon_\varphi(\alpha, e) = \Delta\varphi_{PCV}(\alpha, e) + X_{off} \times e_{(\alpha, e)} \quad (1)$$

式中 $e_{(\alpha, e)}$ 为观测方向单位向量。

2 卫星天线相位中心改正

卫星天线相位中心偏差(PCO)和天线相位中心变化(PCV)通常是在星固系下定义的。

如图2所示,在假设PCV仅与低点角(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 $\Delta\varepsilon'_\varphi(z')$,可表示为

$$\Delta\varepsilon'_\varphi(z') = \Delta\varphi'_{PCV}(z') + X'_{off} \times (-e) \quad (2)$$

式中 z' 为低点角,其计算公式如下

$$\sin z' = \frac{R}{r} \sin z \quad (3)$$

式中 R 为地球半径; r 为卫星到地心距离; z 为测站卫星高度角的余角。 $\Delta\varphi'_{PCV}(z')$ 表示低点角为 z' 时卫星天线PCV, X'_{off} 表示卫星天线PCO, $-e$ 表示星固系下卫星至接收机方向的单位向量^[3]。

3 算例分析

在基线长度较短(小于50 km)时,基线两端点GPS接收机对同一共视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(100~1000 km)和超长基线(大于1000 km)来进行相关分析。

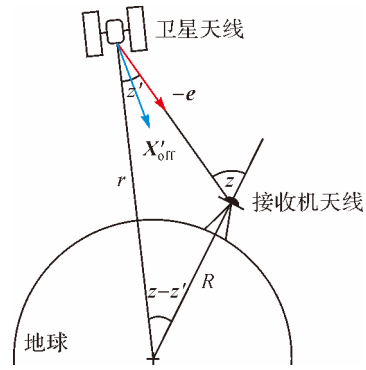


图2 卫星天线改正模型

选取美国南加州的7个IGS观测站来组成长基线(测站分布如图3所示),选取亚太地区的6个IGS观测站来组成超长基线,剔除部分长度超过5000 km的基线,最后形成的观测基线如图4所示。取2016年年积日159—165的一周观测数据进行高精度基线解算^[9-11]。

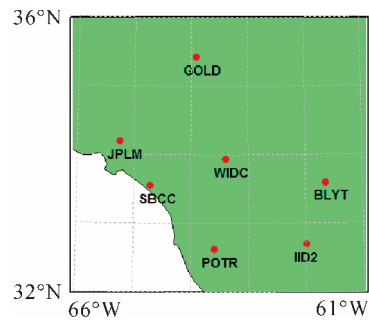


图3 测站南加州分布

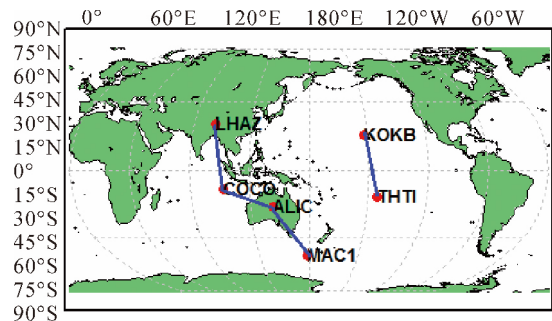


图4 亚太地区测站分布

3.1 改正卫星天线PCO、PCV和接收机天线PCV的基线解算结果

测站天线PCO改正的计算公式如下

$$rec_corr = \frac{f_1^2 \cdot PCO_{L1} - f_2^2 \cdot PCO_{L2}}{(f_1 + f_2) \cdot (f_1 - f_2)} \quad (4)$$

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; f_1 表示L1频

率; f_2 表示 L2 频率; PCO_{L1} 、 PCO_{L2} 分别表示接收机天线 L1、L2 频率上的 PCO。由测站天线 PCO 可得

到测站天线 PCO 对测站坐标的改正量^[12-16], 见表 1。

表 1 测站天线 PCO 对测站坐标的改正量

mm

测站	BLYT	GOLD	IID2	JPLM	POTR	SBCC	WIDC	ALIC	COCO	KOKB	LHAZ	MAC1	THTI
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
E	0	0	-0.1	0	0.7	-0.1	-1.8	1.1	0	0	2.2	0	-1.2
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

由表 1 可知,在忽略 N、E 方向的测站坐标改正量的情况下,长基线 BLYT、GOLD、IID2、JPLM、POTR、SBCC 测站 U 方向坐标改正量均在 35~50 mm 之间,而 WIDC 测站 U 方向坐标改正量为 80.7 mm; 超长基线 ALIC、LHAZ 测站 U 方向坐标改正量在 165~

170 mm 之间, COCO、KOKB、MAC1、THTI 测站 U 方向坐标改正量在 47 mm 左右。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与对卫星天线 PCO、PCV 和接收机天线 PCV 进行改正的基线解算结果作差,其结果见表 2。

表 2 无接收机天线 PCO 改正的部分基线结果偏差

m

测站 1	测站 2	ΔX		ΔY		ΔZ		ΔL	
		平均	标准差	平均	标准差	平均	标准差	平均	标准差
BLYT	SBCC	0.001 1	0.000 36	-0.003 2	0.000 28	0.001 2	0.000 17	-0.002 5	-0.002 4
BLYT	WIDC	0.014 7	0.000 15	0.022 4	0.000 37	-0.019 5	0.000 12	-0.003 7	-0.003 9
GOLD	SBCC	-0.000 1	0.000 29	-0.001 6	0.000 05	0.002 8	0.000 07	-0.001 6	-0.001 6
GOLD	WIDC	0.013 5	0.000 05	0.024 0	0.000 16	-0.018 0	0.000 06	-0.000 8	-0.000 4
BLYT	IID2	-0.000 5	0.000 11	-0.001 9	0.000 27	0.001 8	0.000 21	-0.000 6	0.000 05
POTR	WIDC	0.017 4	0.000 05	0.029 8	0.000 19	-0.026 1	0.000 08	-0.002 3	-0.002 6
SBCC	WIDC	0.013 5	0.000 25	0.025 6	0.000 17	-0.020 8	0.000 09	-0.000 2	-0.000 1
ALIC	COCO	-0.101 1	0.001 59	0.054 0	0.004 45	-0.055 6	0.000 88	-0.073 0	0.001 94
ALIC	MAC1	-0.078 9	0.000 64	0.101 0	0.001 36	-0.025 0	0.001 14	-0.068 9	0.001 63
COCO	LHAZ	0.003 2	0.007 80	-0.043 7	0.010 90	-0.077 9	0.004 10	-0.069 7	0.003 24
KOKB	THTI	0.007 5	0.011 96	0.009 9	0.004 73	0.033 6	0.003 10	-0.034 4	0.003 28

由表 2 可知, ΔX 、 ΔY 、 ΔZ 、 ΔL 的标准差对于长基线均小于 0.4 mm, 对于超长基线均在毫米级, 少数几个达到厘米级但小于 2 cm, 说明连续单天解基线各分量差值非常稳定, 可由 ΔX 、 ΔY 、 ΔZ 、 ΔL 多天的均值来分析差值的性质。测站天线 PCO 对长基线各分量的影响能达到厘米级, 对超长基线各分量的影响能达到十几厘米。如果构成基线的两测站 U 方向坐标改正量相近, 则基线各分量的偏差较小, 长基线中的 BLYT—SBCC、GOLD—SBCC、BLYT—IID2 基线各分量偏差均小于 3.2 mm。两测站 U 方向坐标改正量相差较大时, 如 POTR—WIDC 各分量偏差可达 3 cm; 超长基线中的 KOKB—THTI 基线各分量偏差均小于 3.3 cm, 两测站 U 方向坐标改正量相差较大时, 如 COCO—LHAZ 各分量偏差可达 11 cm。

此外, 表 2 中 ΔL 均为负, 说明未改正测站 PCO 基线长度会系统性地增加。在基线的两测站 U 方

向坐标改正量相近的情况下, 测站 PCO 影响如图 5 所示。

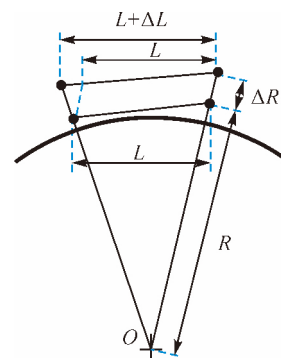


图 5 测站 PCO 影响示意图

由图 5 可得

$$\frac{L}{L+\Delta L} \approx \frac{R}{R+\Delta R} \quad (6)$$

式中 $L+\Delta L$ 为测站的天线相位中心移动后所形成的基线长度; L 为原来的基线长度; $R+\Delta R$ 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; ΔR 测站的天线相位中心移动的距离。当 ΔR 取值 40 mm、 R 取值 6378 km、基线长度在 300 km 左右时, ΔL 为 -2 mm; 当基线长度在 4000 km 时, ΔL 为 -32 mm。 $\Delta L=-2$ mm 与表 1 中不包含 WIDC 的长基线的 ΔL 值基本相符; $\Delta L=-32$ mm 与表 1 中超长基线 KOKB—THTI 的 ΔL 值基本相符。

3.2 改正卫星天线 PCO、PCV 和接收机天线 PCO 的基线解算结果

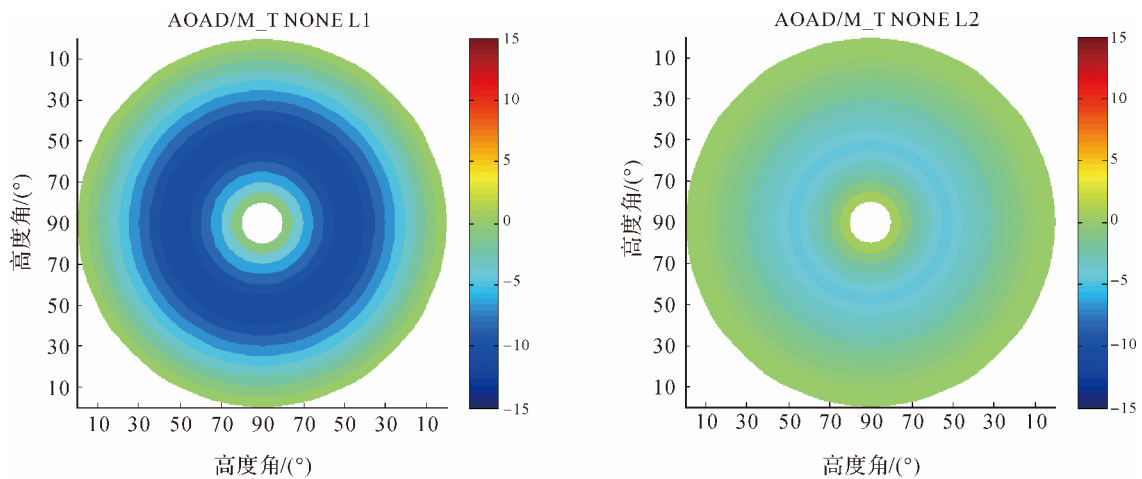
将对卫星天线 PCO、PCV 和接收机天线 PCO、PCV 进行改正的基线解算结果与对卫星天线 PCO、PCV 和接收机天线 PCO 进行改正的基线解算结果作差, 结果见表 3。

由表 3 可知, 对于长基线 ΔL 最大不超过 2.5 mm, 但是包含测站 WIDC 的基线, 基线分量偏差 ΔX 、 ΔY 、 ΔZ 能达到厘米级, 最大可达到 3.2 cm, 其他长基线的基线分量偏差 ΔX 、 ΔY 、 ΔZ 均在毫米级。这

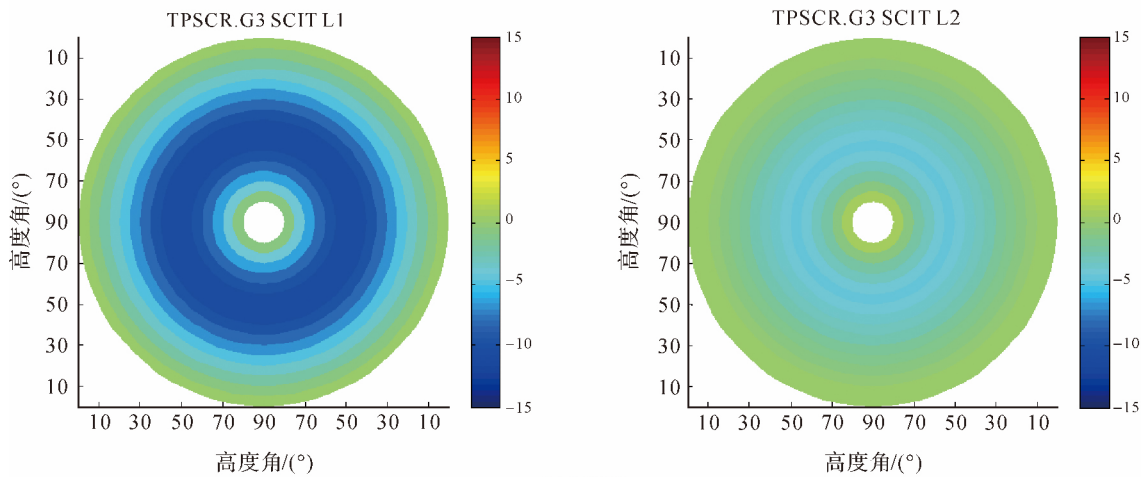
是因为 BLYT、GOLD、IID2、JPLM、POTR、SBCC 测站天线 PCV 参数相近, 而 WIDC 测站天线 PCV 参数与其他测站天线 PCV 参数差异较大。图 6 展示了 GOLD、POTR 和 WIDC 3 个测站天线 PCV, 可明显看出 WIDC 测站天线 PCV 在 L1 上与 GOLD 和 POTR 天线的差异。

表 3 无接收机天线 PCV 改正的部分基线结果偏差 mm

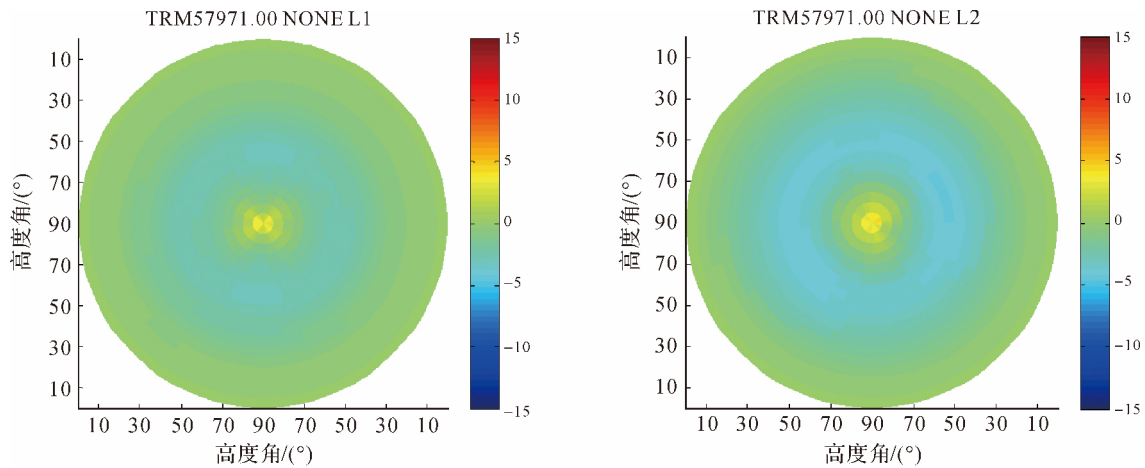
测站 1	测站 2	平均			
		ΔX	ΔY	ΔZ	ΔL
BLYT	SBCC	-0.000 1	0.001 4	-0.000 2	0.000 7
BLYT	WIDC	0.012 5	0.025 1	-0.016 1	0.000 0
GOLD	SBCC	0.000 2	0.000 6	-0.001 1	0.000 5
GOLD	WIDC	0.012 8	0.024 2	-0.017 0	-0.001 3
POTR	SBCC	0.003 7	0.008 1	-0.004 7	0.001 0
POTR	WIDC	0.016 3	0.031 7	-0.020 6	0.002 4
SBCC	WIDC	0.012 6	0.023 6	-0.015 9	0.000 9
ALIC	COCO	0.005 4	0.009 6	0.003 2	0.010 0
ALIC	MAC1	-0.002 7	-0.002 9	-0.012 5	0.010 0
COCO	LHAZ	0.000 4	-0.011 2	0.008 9	0.010 3
KOKB	THTI	-0.008 0	-0.009 0	-0.019 2	0.020 1



(a) GOLD



(b) POTR



(c) WIDC

图6 GOLD、POTR、WIDC测站PCV

由表3可知,对于超长基线的影响不管是基线分量偏差 ΔX 、 ΔY 、 ΔZ 还是基线长度偏差 ΔL ,均能达到厘米级,最大可达到1.9 cm。虽然ALIC和LHAZ两测站天线PCV参数相近,COCO、KOKB、MAC1、THTI 4测站天线PCV参数相近,但是基线KOKB-MAC1在 ΔZ 和 ΔL 上均存在2 cm左右的偏差。这是因为基线长度在300 km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2000 km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。

3.3 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与对卫星天线PCV和接收机天线PCO、PCV进行改正的基线解算结果作差,结果见表4。

表4 无卫星PCO改正的部分基线结果偏差 m

测站 1	测站 2	平均			
		ΔX	ΔY	ΔZ	ΔL
BLYT	GOLD	0.001 5	-0.002 9	-0.000 4	-0.002 9
BLYT	POTR	0.001 5	-0.000 6	0.001 4	-0.002 1
BLYT	SBCC	0.002 2	-0.002 1	0.001 3	-0.002 9
BLYT	WIDC	0.001 2	-0.001 4	0.000 4	-0.001 7
ALIC	COCO	-0.040 0	-0.004 1	-0.014 8	-0.039 1
ALIC	MAC1	-0.006 5	0.029 9	0.016 8	-0.034 0
COCO	LHAZ	0.013 2	-0.034 1	-0.021 4	-0.014 3
KOKB	THTI	-0.025 6	-0.008 4	0.035 6	-0.034 3

由表4可知,卫星天线PCV对长基线的影响不管是基线分量偏差 ΔX 、 ΔY 、 ΔZ 还是基线长度偏差 ΔL 均在毫米级,最大不超过4 mm;对超长基线的影响不管是基线分量偏差 ΔX 、 ΔY 、 ΔZ 还是基线长度偏差 ΔL 均在厘米,最大能达到4 cm。造成这种差异的原因是基线长度在300 km左右时,由同一个卫星观察基线两端测站的低点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2000 km左右时,由同一个卫星观察基线两端测站的低点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。

3.4 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与对卫星天线PCO和接收机天线PCO、PCV进行改正的基线解算结果作差,结果见表5。

表5 无卫星PCV改正的部分基线结果偏差 m

测站 1	测站 2	平均			
		ΔX	ΔY	ΔZ	ΔL
BLYT	GOLD	0.000 2	0.000 5	0.000 0	0.000 2
BLYT	POTR	0.000 0	0.000 4	-0.000 3	0.000 2
BLYT	SBCC	0.000 2	0.000 7	-0.000 4	0.000 2
BLYT	WIDC	0.000 1	0.000 4	-0.000 2	0.000 1
ALIC	COCO	-0.004 7	-0.000 6	-0.001 4	0.007 4
ALIC	MAC1	-0.001 4	0.000 6	-0.002 7	0.007 0
COCO	LHAZ	0.002 4	-0.001 1	0.005 8	0.007 9
KOKB	THTI	-0.019 1	-0.008 1	0.001 4	0.009 3

由表5可知,卫星天线PCV对长基线的影响不管是基线分量偏差 ΔX 、 ΔY 、 ΔZ 还是基线长度偏差 ΔL 基本在毫米以下,最大值为1 mm;对超长基线的

影响不管是基线分量偏差 ΔX 、 ΔY 、 ΔZ 还是基线长度偏差 ΔL 大部分在毫米级,仅基线 KOKB—THTI 在 X 方向达到 2 cm。这是因为基线长度在 300 km 左右时,由同一个卫星观察基线两端测站的低点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 2000 km 左右时,由同一个卫星观察基线两端测站的低点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。

综上所述,卫星天线 PCO、PCV 和接收机天线 PCO、PCV 对高精度基线解算的影响见表 6。

表 6 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	0~58 mm	<4 mm	3~101 mm	34~73 mm
接收机 天线 PCV	0~32 mm	<3 mm	0~20 mm	10~21 mm
卫星天线 PCO	<4 mm	<4 mm	4~36 mm	14~40 mm
卫星天线 PCV	<1 mm	<1 mm	0~20 mm	7~10 mm

4 结 语

综上所述,接收机天线 PCO、PCV 对长基线解算在基线各分量上的影响可达到厘米,对基线长度的影响小于 4 mm,对超长基线解算,在基线各分量上的影响在厘米水平,最大可达到 10 cm,对基线长度的影响在厘米水平;卫星天线 PCO、PCV 对于长基线解算,在各分量和长度上的影响均在毫米水平,其中卫星天线 PCV 的影响基本可以忽略不计,但是对于超长基线解算,在各分量和长度上的影响均可达到厘米。此外,对于长基线,当基线两端测站接收机天线 PCO 对测站坐标 U 方向的改正量相近时,测站天线 PCO 的影响不会很好地反映出来,当基线两端测站接收机天线 PCV 相近时,测站天线 PCV 的影响也不会很好地反映出来,此时可以通过仅改正基线两端测站中的一个测站将该影响体现出来。

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):1301-1304.

[2] BILICH A L, MADER G L. GNSS Absolute Antenna Calibration at the National Geodetic Survey[J]. American Geophysical Union, 2009(3):308-312.

[3] 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.

[4] 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[C] // Processing of the IGS Workshop. Darmstadt: ESOC, 2006.

[5] 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.

[6] ZHU S Y, MASSMANN F H, YU Y, et al. Satellite Antenna Phase Center Offsets and Scale Errors in GPS Solutions[J]. Journal of Geodesy, 2003, 76(11):668-672.

[7] 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.

[8] GE M R, GERD G. Estimation and Validation of the IGS Absolute Antenna Phase Center Variations[R]. [S.l.]: IGS, 1999.

[9] HERRING T A, KING R W, MCCLUSKY S C. GAMIT Reference Manual: release 10.4[M]. [S.l.]: MIT, 2010.

[10] 王坚,高井祥,王金岭. 基于经验模态分解的 GPS 基线解算模型[J]. 测绘学报, 2008, 37(1):10-14.

[11] 郑作亚,韩晓冬,黄斌,等. GPS 基线向量的非线性解算及精度分析[J]. 测绘学报, 2004, 33(1):27-32.

[12] 姚宜斌. GPS 精密定位定轨后处理算法与实现[D]. 武汉: 武汉大学, 2004.

[13] HU C W, CHEN W, GAO S H, et al. Data Processing for GPS Precise Point Positioning[J]. 南京航空航天大学学报(英文版), 2005, 22(2):124-131.

[14] 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.

[15] 叶世榕. GPS 非差相位精密单点定位理论与实现[D]. 武汉: 武汉大学, 2002.

[16] 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.