

BDS 卫星天线相位中心改正模型比较

黄观文^{1,2} 张 睿¹ 张 勤¹ 郭海荣³ 王 乐¹

1 长安大学地质工程与测绘学院,西安市雁塔路 126 号,710054
2 地理信息工程国家重点实验室,西安市雁塔路中段 1 号,710054
3 北京卫星导航中心,北京市,100094

摘 要: 介绍北斗二代卫星系统(BDS)3 种卫星天线相位中心改正模型,分析对比不同模型对精密定轨、卫星钟差以及精密定位的影响。结果表明,ESA/ESOC 的 BDS 卫星天线相位中心改正模型在精密定轨、卫星钟差和精密定位方面均优于其他模型结果,建议在北斗高精度数据处理中采用。
关键词: BDS;天线相位中心模型;精密定轨;卫星钟差;精密单点定位
中图分类号: P228 **文献标识码:** A

北斗系统的卫星天线相位中心改正主要有 3 种策略:第一种是国际多模 GNSS 实验工程(MGEX)采用的方法,即只改正天线相位中心偏差($x = 0.6\text{ m}$, $y = 0.0\text{ m}$, $z = 1.1\text{ m}$),忽略 PCV 改正。第二种是硬件制造商公布的策略^[1],也即改正天线相位中心偏差($x = 0.634\text{ m}$, $y = -0.003\text{ m}$, $z = 1.075\text{ m}$),同样忽略 PCV 改正值。第三种是欧空局 ESA/ESOC 通过联合 MGEX 网络北斗三频观测值解算得到的改正模型^[2],其针对北斗 MEO 和 IGSO 卫星均公布了新的 PCV 和 PCO 改正模型。国内外学者针对 PCO 和 PCV 模型开展研究^[3-6],但大多针对 GPS 系统,较少涉及 BDS 卫星天线相位中心模型的影响分析。本文针对这 3 种北斗卫星天线相位中心改正策略,从精密定轨、卫星钟差、精密定位 3 个方面分析不同改正策略的差异。

1 BDS 卫星天线相位中心改正策略

IGS 的北斗卫星天线相位中心改正策略简称 MGEX 模型,即所有的 GEO 卫星、IGSO 卫星以及 MEO 卫星都只进行天线相位中心偏差(PCO)改正,而不进行相位中心变化(PCV)改正,如表 1。天线制造厂商建议的北斗卫星天线相位中心改正策略^[1]简称厂商模型。该策略与 MGEX 模型类似,区别在于 PCO 改正的数值略有差异,

如表 2 所示。

表 1 MGEX 模型的改正参数			
Tab. 1 Corrections of MGEX model			
	x -PCO/mm	y -PCO/mm	z -PCO/mm
GEO, IGSO, MEO	600.0	0.0	1 100.0

表 2 厂商模型的改正参数			
Tab. 2 Corrections of Manufacturer model			
	x -PCO/mm	y -PCO/mm	z -PCO/mm
GEO, IGSO, MEO	634.0	-3.0	1 075.0

欧空局 ESA/ESOC 通过收集 MGEX 监测网络 39 个北斗地面跟踪站三频(B_1, B_2, B_3)数据,利用 B_1 - B_2 和 B_1 - B_3 无电离层组合观测值进行解算,得到北斗 IGSO 和 MEO 卫星的 PCO 和 PCV 改正信息^[2]。本文仅列出具体的 PCO 和 PCV 改正数值,如表 3、4 所示,简称 ESA 模型。对于 GEO 卫星,ESA/ESOC 还是采用了第一类 MGEX 改正策略,即只改正天线相位中心偏差($x = 0.6\text{ m}$, $y = 0.0\text{ m}$, $z = 1.1\text{ m}$),忽略 PCV 改正。

比较 3 种改正策略可以看出,MGEX 模型和厂商模型基本相同,仅在数值上存在 3 cm 左右的差异。而 ESA 模型不仅区分出了不同卫星的 PCO 改正值,其数值与前两种模型也存在较大不同。另外,ESA 模型还计算了 IGSO 和 MEO 卫星的 PCV 改正数值。

表 3 ESA/ESOC 解算得到的 BDS 卫星天线相位中心偏差(PCO)改正
Tab.3 PCO corrections of ESA/ESOC model of BDS

	x -PCO /mm	z -PCO/mm								
		IGSO-1 (C06)	IGSO-2 (C07)	IGSO-3 (C08)	IGSO-4 (C09)	IGSO-5 (C10)	MEO-3 (C12)	MEO-4 (C13)	MEO-5 (C14)	MEO-6 (C15)
B_1-B_2	549.0	3 049.0	3 236.7	3 842.6	3 973.6	3 882.1	2 069.5	2 313.5	2 201.8	2 311.7
B_1-B_3	545.0	3 509.5	4 121.2	4 710.2	5 029.8	4 935.1	2 214.2	2 401.9	2 336.4	2 450.2

表 4 ESA/ESOC 解算得到的 BDS 卫星天线相位中心变化(PCV)改正
Tab.4 PCV corrections of ESA/ESOC model of BDS

	0°	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°	11°	12°	13°
IGSO/mm	-3.73	-0.21	2.16	0.95	0.59	0.63	0.23	-0.45	0.84	-1.02	—	—	—	—
MEO/mm	-4.21	-3.33	-1.93	-0.43	0.96	2.41	3.21	2.94	2.57	1.60	0.64	-1.10	-0.64	-2.69

2 不同卫星天线相位中心改正策略的影响分析

2.1 不同改正策略对 BDS 精密定轨和精密钟差的影响

选取我国 iGMAS 网络和国际 MGEX 网络共 65 个 BDS 连续跟踪站观测数据,采集 2014 年第 273~288 d 共 15 d 的数据。对 BDS 卫星轨道和钟差进行解算,解算时使用的策略为 3 d 解,共得到连续 14 个轨道和钟差的 3 d 解。为对比不同卫星天线相位中心改正模型的精度差异,在评价轨道和钟差精度时采用重叠弧段方法进行^[4]。设计 4 种天线改正方案进行求解:不进行任何改正(方案 1);MGEX 模型(方案 2);厂商模型(方案 3);ESA 模型(方案 4)。

图 1~4 给出了 4 种方案得到的轨道重叠弧段在切向、法向、径向以及平均(1D)方向上的统计精度,图 5~6 给出了 4 种方案得到的卫星钟差重叠弧段的标准差精度(STD)和中误差精度(RMS)统计结果(C06 号卫星为基准钟)。

对比图 1~4 及表 5 可以得出:

1)从 4 种方案的平均定轨结果(图 4 和表 5)来看,方案 4 定轨精度最优,方案 2、3 相差不大,这与二者改正值较为接近有关。方案 1 不加任何改正的策略最差,平均精度显著差于其他方案。

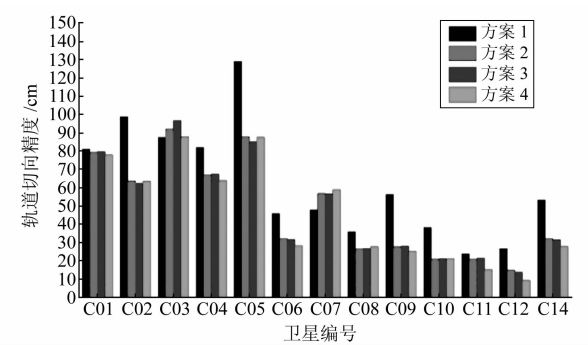


图 1 轨道重叠弧段切向精度
Fig. 1 Along precisions of orbit overlap error

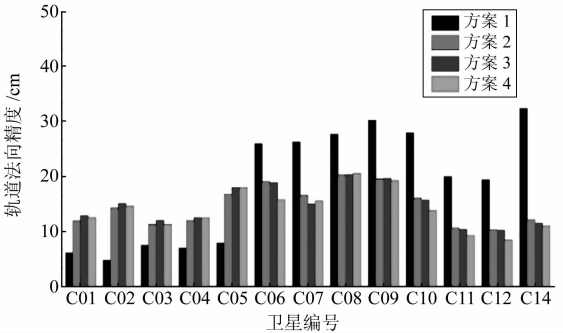


图 2 轨道重叠弧段法向精度
Fig. 2 Cross precisions of orbit overlap error

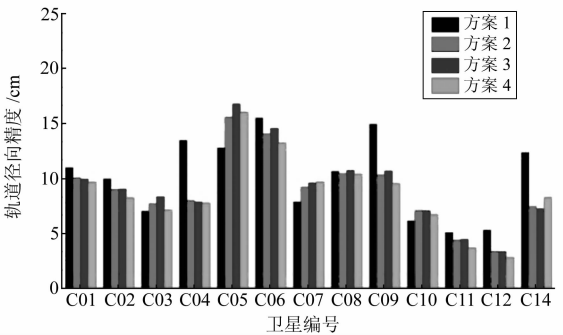


图 3 轨道重叠弧段径向精度
Fig. 3 Radial precisions of orbit overlap error

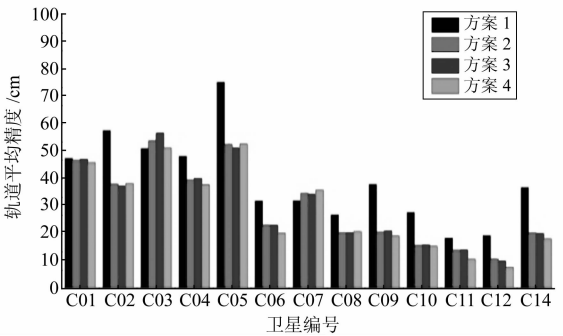


图 4 轨道重叠弧段平均精度
Fig. 4 Average precisions of orbit overlap error

2)从 4 种方案 3 个方向的定轨精度对比(图 2~4)来看,方案 4 最为稳定,方案 2 和方案 3 接近,方案 1 中 GEO 卫星的法向精度要显著优于其他 3 种方案,但由于其切向和径向精度较差,GEO 平均精度仍相对较差。

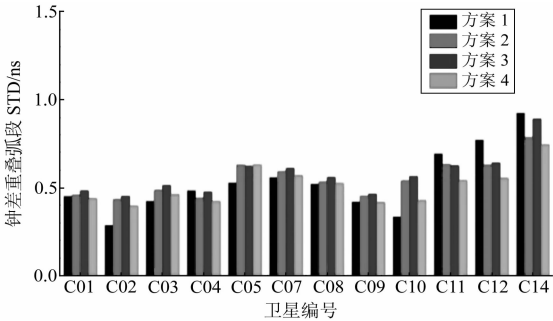


图5 卫星钟差重叠弧段 STD
Fig. 5 STD values of clock overlap error

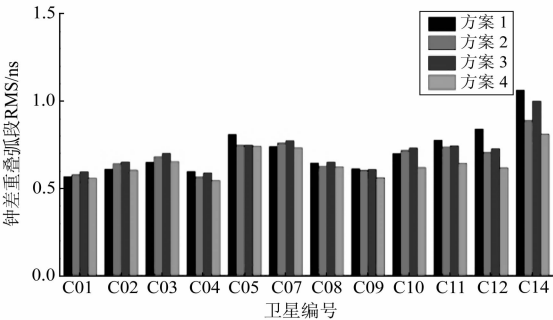


图6 卫星钟差重叠弧段 RMS
Fig. 6 RMS values of clock overlap error

3)方案4的MEO卫星定轨精度相对GEO和IGSO卫星精度提升得更为显著,这与ESA模型在MEO方面的精细模型修正有关。

对比图5、6及表6中卫星钟差结果可以得出:

1)从4种方案的平均钟差结果(表6)来看,方案4的STD和RMS均显著优于方案2和方案3,尤其是MEO卫星钟差精度提升最为明显。

2)方案1钟差STD指标除MEO卫星稍差外,GEO和IGSO结果都与其他3种方案近似(表6)。方案1钟差结果RMS除MEO卫星稍差外,GEO和IGSO结果都与方案2和方案3近似,略差于方案4(表6)。这表明,天线相位中心改正对卫星钟差产品精度的影响要显著小于轨道产品精度影响。

3)从图5、6看出,方案4相对其他方案最为稳定,卫星钟差精度也最高。这也说明,通过精确

的卫星天线相位中心改正,可以在一定程度上提升卫星钟差产品的精度。

2.2 BDS精密单点定位精度分析

为进一步分析不同天线改正策略对用户定位精度的影响,选取§2.1相同时段内武汉大学北斗跟踪站网络(BETS)5个连续跟踪站15d的观测数据进行处理,基于4种策略得到的卫星轨道和钟差,采用上述4种天线改正模型各自进行静态精密单点定位解算。计算时使用单天解策略,统计每个跟踪站的点位重复精度即STD指标。同时,为了对比测站结果的外符合精度,利用测站上GPS观测数据进行15d的精密单点定位计算,获得平均测站坐标值作为真值(精度优于1cm),计算不同方案所获测站坐标的外符合精度值(RMS)。

1)从表7中4种方案的点位重复精度(STD)可以看出,方案4的点位重复精度最高,方案2和方案3相当,方案1最差。但从数值上看,4种方案的STD指标差异均在mm量级,这说明采用不同方案自洽的轨道钟差产品进行单独定位,所获定位结果内符合精度均近似等价。

2)从表8中4种方案的外符合精度(RMS)可以看出,方案4的定位精度最高,方案2和方案3相当,方案1最差。且从数值上看,方案4的定位精度显著优于其他3种方案。对比表7的方案4结果可以得出,虽然不同方案自洽的轨道钟差产品进行单独定位,所获内符合精度差异较小,但更准确的天线改正模型可以显著提高用户定位的外符合精度。

3 结 语

1)ESA模型的精密定轨精度和稳定性要优于MGEX模型和厂商模型,尤以MEO卫星定轨精度改善最为显著。MGEX模型和厂商模型的定轨精度相差不大,这与二者改正值较为接近有关,而不加任何天线改正的定轨结果要显著差于

表5 4种方案得到的不同星座轨道重叠精度统计结果
Tab. 5 Precisions of orbit overlap error from different schemes

轨道重叠精度	GEO/cm				IGSO/cm				MEO/cm			
	方案1	方案2	方案3	方案4	方案1	方案2	方案3	方案4	方案1	方案2	方案3	方案4
切向(A)	95.3	77.9	78.3	76.0	47.8	37.3	37.3	37.4	36.9	23.6	23.3	19.0
法向(C)	6.8	13.2	14.1	13.8	27.9	18.7	18.4	17.7	24.6	11.0	10.7	9.6
径向(R)	11.3	10.3	10.6	10.1	12.5	10.8	11.2	10.5	8.3	5.3	5.2	5.4
平均(1D)	55.5	45.9	46.3	44.9	32.7	24.9	24.8	24.6	26.0	15.3	15.0	12.7

表6 4种方案得到的不同星座钟差重叠精度统计结果
Tab. 6 Precisions of clock offset overlap error from different schemes

钟差重叠精度/cm	GEO/ns				IGSO/ns				MEO/ns			
	方案1	方案2	方案3	方案4	方案1	方案2	方案3	方案4	方案1	方案2	方案3	方案4
标准差(STD)	0.43	0.49	0.51	0.47	0.46	0.53	0.55	0.48	0.79	0.68	0.72	0.61
中误差(RMS)	0.65	0.64	0.66	0.62	0.67	0.68	0.69	0.63	0.89	0.78	0.82	0.69

表 7 4 种方案得到的点位重复精度 STD 统计结果

Tab. 7 Repeated accuracy of point coordinates from different schemes

PPP	E/cm				N/cm				U/cm			
	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4
CHDU	1.68	1.30	1.38	1.31	1.77	0.99	1.06	1.02	5.51	5.61	6.06	4.38
LASA	2.56	2.13	1.48	1.63	1.74	0.80	0.97	0.89	5.52	5.24	4.07	4.05
LGD1	1.71	1.58	1.59	1.50	1.80	0.83	0.83	1.03	3.47	3.06	3.00	3.67
MRO1	1.32	1.10	1.19	0.89	1.72	1.55	1.54	1.67	2.27	1.80	2.01	1.62
SHA2	0.84	0.60	0.63	0.58	1.43	0.33	0.30	0.37	3.05	3.21	3.20	3.55
平均	1.62	1.34	1.25	1.18	1.69	0.90	0.94	1.00	3.96	3.78	3.67	3.45

表 8 4 种方案得到的坐标 RMS 统计结果

Tab. 8 RMS results of stations coordinates from different schemes

PPP	E/cm				N/cm				U/cm			
	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4
CHDU	4.86	5.95	6.12	5.26	2.50	1.96	2.20	1.55	5.65	5.83	6.26	5.26
LASA	4.01	5.35	4.93	4.33	2.80	1.15	1.44	1.06	6.00	5.78	4.43	5.56
LGD1	4.15	4.51	4.56	4.24	2.35	2.81	3.04	2.36	6.79	4.41	4.37	4.14
MRO1	2.92	2.05	2.04	2.12	7.05	3.32	3.10	3.66	5.71	4.49	4.62	2.78
SHA2	2.07	2.77	2.86	2.63	2.50	1.89	2.09	1.37	3.05	3.54	3.52	4.59
平均	3.60	4.13	4.10	3.72	3.44	2.23	2.37	2.00	5.44	4.81	4.64	4.47

其他模型。

2)不同的天线相位中心改正模型对于卫星钟差产品的精度影响要显著小于轨道产品,更为精确的卫星天线相位中心模型(ESA 模型)可以在一定程度上提升卫星钟差产品的精度。

3)利用不同天线模型自洽的轨道钟差产品进行单独精密定位,所获结果的内符合精度差异较小,但更准确的天线改正模型可以显著提高用户定位的外符合精度。

致谢:感谢 iGMAS 和 IGS 以及武汉大学提供的数据支持。

参考文献

[1] Lou Y, Liu Y, Shi C, et al. Precise Orbit Determination of Beidou Constellation Based on BETS and MGEX Network [J]. Sci Rep, 2014, 4(8):1 255-1 264

[2] Dilssner F, Springer T, Schönemann E, et al. Estimation of Satellite Antenna Phase Center Corrections for Beidou [C]. IGS Network, Data and Analysis Center Workshop, Pasadena, California, 2014

[3] 胡志刚. 北斗卫星导航系统性能评估理论与试验验证[D].

武汉:武汉大学,2013(Hu Zhigang. Beidou Navigation Satellite System Performance Assessment Theory and Experimental Verification [D]. Wuhan:Wuhan University, 2013)

[4] 张小红,李盼,李星星,等. 天线相位中心改正模型对 PPP 参数估计的影响[J]. 武汉大学学报:信息科学版,2011,12 (36):1 470-1 473 (Zhang Xiaohong, Li Pan, Li Xingxing, et al. Influcence of Antenna Phase Center Correction Model on Precise Point Positioning [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2011,12 (36):1 470-1 473)

[5] 涂锐,黄观文,邹顺. 天线相位中心偏差变化及改正模型对精密单点定位精度的影响[J]. 大地测量与地球动力学, 2010, 30(3):113-117 (Tu Rui, Huang Guanwen, Zhou Shun. Study on Impact of Antenna Phase Center Offsets Variation and Their Correction Models on GPS Precise Point Positioning Accuracy [J]. Journal of Geodesy and Geodynamice, 2010, 30(3):113-117)

[6] 丁晓光,张勤,黄观文,等. GPS 天线相位模型变化对高精度 GPS 测量解算的影响研究[J]. 测绘科学, 2010,35(3): 18-20(Ding Xiaoguang, Zhang Qin, Huang Guanwen, et al. Influence of GPS Antenna Phase Center Model Change on GPS Data Processing [J]. Science of Surveying and Mapping, 2010,35(3):18-20)

Comparison and Analysis of Different Models of Antenna Phase Center Correction of BDS Satellites

HUANG Guanwen^{1,2} ZHANG Rui¹ ZHANG Qin¹ GUO Hairong³ WANG Le¹

1 College of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, 126 Yanta Road, Xi'an 710054, China

2 National Key Laboratory of Geographic Information Engineering, 1 Mid-Yanta Road, Xi'an 710054, China

3 Beijing Satellite Navigation Center, Beijing 100094, China

Abstract: Three antenna phase center models of Beidou system (BDS) satellites are introduced. Differences and influences of these three models are analyzed with respect to precise orbit, satellite clock offset and precise positioning. Numerical results indicate that the precision of ESA model is superior to other models results. We suggest using the ESA model in BDS high precision data processing.

Key words: BDS;antenna phase center model;precise orbit determination;satellite clock offset; PPP