

北斗区域卫星导航系统定位性能的纬度效应

景一帆¹ 杨元喜^{2, 3} 曾安敏^{1, 2, 4} 明 锋¹

1 信息工程大学导航与空天目标工程学院,河南 郑州, 450000
2 地理信息工程国家重点实验室,陕西 西安, 710054
3 北京卫星导航中心,北京, 100049
4 西安测绘研究所,陕西 西安, 710054

摘 要:与全球定位系统(global positioning system, GPS)不同,北斗区域卫星导航系统(BeiDou navigation satellite system, BDS)采用了 5 颗地球静止轨道卫星、5 颗倾斜地球同步轨道卫星和 4 颗中圆轨道卫星的混合星座,星座分布不均匀。特殊星座决定了不同纬度地区用户的可见卫星数量和观测几何结构存在明显差异,用户的导航定位性能存在明显的纬度效应。分别从理论模型和实际观测两个方面对不同纬度地区用户的可见卫星数目、观测几何结构和导航定位性能进行较全面分析,使用了多家厂商的接收机,在不同纬度地区进行了 GPS、BDS 以及两系统融合定位试验。结果表明,BDS 定位性能存在明显的纬度效应,即定位精度随纬度升高而降低;GPS 导航定位性能没有明显的纬度效应;BDS/GPS 数据融合可以减弱纬度效应,提高导航定位服务的精度和可靠性。

关键词:BDS;纬度效应;定位性能;融合定位

中图法分类号:P228 **文献标志码:**A

我国自主研发的北斗卫星导航系统(BeiDou navigation satellite system, BDS)已完成三步走策略的第二步^[1-2],即区域卫星导航系统。北斗区域卫星导航系统(北斗二号一期)已于 2012 年 12 月 27 日正式投入运行,在轨工作卫星包括 4 颗中圆轨道(medium earth orbit, MEO)卫星、5 颗地球静止轨道(geostationary earth orbit, GEO)卫星和 5 颗倾斜地球同步轨道(inclined geosynchronous orbit, IG-SO)卫星,可在亚太大部分地区提供水平和垂直定位精度优于 10 m(置信度 95%)的服务^[3]。

与全球定位系统(global positioning system, GPS)不同,BDS 星座采用了多类型卫星组成的混合星座,不同类卫星运行的轨道不同,周期不同,一个周期内卫星分布并不均匀。目前星座以静止轨道卫星为主,大部分处于赤道附近,用户位置越靠近赤道,观测到的 BDS 卫星越多,星座空间结构越好,定位性能越高。

联合 BDS 系统与 GPS 系统,将显著增加用户可观测卫星数,改善几何精度衰减因子(dilution of precision, DOP),弱化 BDS 定位性能随纬度的变化影响,提升较差观测条件下 BDS 和 GPS 的可用性^[4],提高导航定位服务的精度和可靠性。

多星座的数据融合有很多优势^[5]。BDS/GPS 融合定位已有很多研究成果^[6-10],但大多针对单点定位或短基线相对定位,且实验区域较小,BDS 星座对定位结果随纬度变化的影响并未作系统分析。

为了系统地分析 BDS 导航定位的纬度效应,更深入地研究 BDS 区域系统性能规律,为北斗用户的实验规划提供辅助,2014 年 8 月本文设计了近似同一经度、不同纬度的 BDS 和 GPS 观测,从理论上分析了纬度效应对 BDS 定位结果的影响,并利用国内外多个厂商的 BDS/GPS 兼容型接收机在不同纬度地区多点同步进行 BDS/GPS 融合相对定位实验,对实测数据进行了计算比较和分析。结果表明 BDS 系统定位性能随纬度的变化存在明显的规律性,且 BDS/GPS 融合定位可以弱化北斗 GEO 和 IGSO 星座的特定影响。

1 纬度效应对 BDS 定位性能的影响

目前 BDS 系统的星座结构是 5IGSO +

5GEO+4MEO,这三类卫星运行的轨道和周期均不相同,使得地面观测站可见性有显著差别。经实验计算^[11],当卫星高度角为 5°时,在我国境内大部分地区 GEO 卫星的可见性均为 100%,星座对定位结果贡献最大。虽然 GEO 卫星的可见性不随位置的改变而发现变化,但因为其空间位置相对固定,不同纬度测站传播距离、卫星高度角等不同,定位性能也会有差异。文献[12]中讨论了纯 GEO 星座的定位性能,证明在纯 GEO 星座下平面精度衰减因子(HDOP)的大小与用户所处的纬度有关,纬度越高,数值越大,精度越低。

IGSO 卫星的可见性随用户纬度变化有明显变化,纬度越低,可见性越好,变化范围为 60%至 80%^[11]。越靠近赤道,IGSO 卫星可观测的时间越长,理论上定位效果越好。

对于 BDS 星座的 MEO,性质与 GPS 星座类似,星座结构以 7 天为周期重复变化^[13]。由于 MEO 卫星数量较少,对星座整体性质的影响小于其他两个星座。当 BDS 完成全球星座组网,即 MEO 卫星数量增多且卫星分布较均匀时,对不同纬度用户的影响将减小。

BDS 星座的定位性能主要由 GEO 和 IGSO

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} -\frac{\rho}{M_c + H_0} & 0 \\ 0 & -\frac{\rho}{(N_c + H_0)\cos B_0} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

式中,($B_0\ L_0\ H_0$)为大地坐标系下的用户初始位置; M_c 和 N_c 分别为用户位置对应的子午圈曲率半径和卯西圈曲率半径。进而可写出经度(B)、纬度(L)以及高程(H)分量的 DOP (几何精度衰减因子,本文记为 DOP)值表达式为:

$$\mathbf{Q}_{BLH} = \mathbf{R}\mathbf{Q}_{XYZ}\mathbf{R}^T = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & g_{13} \\ g_{21} & g_{22} & g_{23} \\ g_{31} & g_{32} & g_{33} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{cases} DOP_B = \sqrt{g_{11}} \\ DOP_L = \sqrt{g_{22}} \\ DOP_H = \sqrt{g_{33}} \end{cases} \quad (5)$$

式中, \mathbf{Q}_{BLH} 和 \mathbf{Q}_{XYZ} 分别为大地坐标系下和空间直角坐标系下的误差协方差矩阵; DOP_B 、 DOP_L 、 DOP_H 分别为纬度、经度以及高程方向 DOP 值。

根据 BDS 陕西实际星座,在同一经度下,陕西 BDS 陕西星座 DOP_B 值和 DOP_H 值均随测站纬度增加而增大,其变化趋势如图 1 所示。由于一天星历数据的计算结果类似,图 1 中仅以 2014 年 8 月 14 日的结果为例。

决定,存在明显的纬度效应,即定位性能随着测站纬度的不同而变化,高纬度地区的 BDS 定位精度会低于低纬度地区。

2 北斗 DOP 值随纬度变化规律分析

载波相位观测方程可表示为:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\mathbf{X} \\ \mathbf{N} \end{bmatrix} = \mathbf{L} \quad (1)$$

式中, $d\mathbf{X}$ 表示空间直角坐标系下的测站坐标改正向量; \mathbf{N} 为整周模糊度; \mathbf{A} 是与 $d\mathbf{X}$ 相对应的系数矩阵; \mathbf{B} 是与 \mathbf{N} 相对应的系数矩阵; \mathbf{L} 为观测向量。

基于式(1)求得法方程,再经坐标转换可得出星座对用户定位在经度、纬度和高程三个方向上的影响模型为:

$$\begin{bmatrix} dB \\ dL \\ dH \end{bmatrix} =$$

$$\mathbf{R} \cdot d\mathbf{X} = \mathbf{R}[\mathbf{A}^T\mathbf{P}\mathbf{A}]^{-1}[\mathbf{A}^T\mathbf{P}\mathbf{L} - \mathbf{A}^T\mathbf{P}\mathbf{B}\mathbf{N}] \quad (2)$$

式中,($dB\ dL\ dH$)为三个方向上的影响量; \mathbf{P} 为权矩阵。 \mathbf{R} 为坐标转换矩阵,可以表示为^[14]:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\sin B_0 \cos L_0 & -\sin B_0 \sin L_0 & \cos B_0 \\ -\sin L_0 & \cos L_0 & 0 \\ \cos B_0 \cos L_0 & \cos B_0 \sin L_0 & \sin B_0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

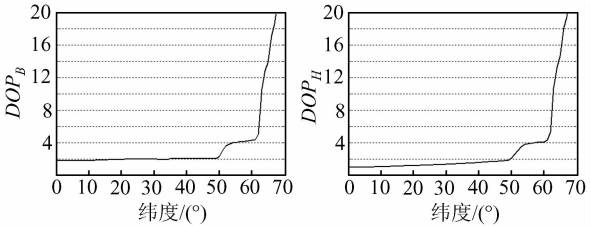


图 1 BDS 星座 DOP_B 值和 DOP_H 值随纬度的变化
Fig. 1 Variation of BDS DOP_B and DOP_H Caused by the Change of Latitude

3 BDS/GPS 融合定位

要减弱 BDS 星座对定位性能的影响,较为实用的方法是将 BDS 和 GPS 系统组合,增加用户的可观测卫星数,提高用户的导航定位性能。通过对单一系统的伪距或载波相位观测方程进行扩展组成方程组进行整体求解,实现 BDS/GPS 融合定位解算,理论上可以最大限度地发挥多系统组合的优势^[15]。

基于式(1),BDS/GPS 双差载波相位观测方程可以简单描述为^[16]:

$$\begin{bmatrix} \Delta \mathbf{A}^B & \mathbf{B}^B & 0 \\ \Delta \mathbf{A}^G & 0 & \mathbf{B}^G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\mathbf{X} \\ \Delta \nabla \mathbf{N}^B \\ \Delta \nabla \mathbf{N}^G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta \nabla \mathbf{L}^B \\ \Delta \nabla \mathbf{L}^G \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中,上标 *B* 和 *G* 分别表示 BDS 和 GPS;Δ 和 Δ∇ 分别为单差因子和双差因子。

若观测到 *n* 颗 GPS 卫星和 *m* 颗 BDS 卫星,则共有 *n*+*m*−2 个双差观测方程。对于方程组的求解,可以使用 Kalman 滤波算法^[17],本文不再描述。

BDS 系统和 GPS 系统使用的时间系统和坐标系统存在差异,数据融合之前需要考虑它们的差异。BDS 时间系统(BDT)与 GPS 时间系统(GPST)都属于原子时,秒长相同,但是两个时间系统的起算点不同,所以它们之间存在一个固定差值,可以通过简单的转换使之统一,BDT 与 GPST 秒的转换关系为:

$$\text{BDT} = \text{GPST} - 14\text{s} \quad (7)$$

BDS 系统采用的是 2000 中国大地坐标系(China Geodetic Coordinate System 2000, CGCS2000),GPS 系统采用的是 1984 世界大地坐标系(World Geodetic System 1984, WGS84),它们的原点、尺度、定向等定义都相同,但相应参考椭球常数中的扁率 *f*、地球引力常数 *GM* 和地球自转角速度 *ω* 存在差异。这会导致星历计算时不同系统卫星出现几米至十几米的位置误差^[18],需要分别计算 BDS 和 GPS 的卫星位置。而同一地面点位在 CGCS2000 坐标系和 WGS84 坐标系中的最大纬度差为 3.6×10^{−6}″,相当于 0.11 mm,经度上则是相同的^[19-20]。可以认为,在坐标系的实现精度范围内,地面点在 CGCS2000 和 WGS84 下的坐标是一致的。

4 实验与分析

实验使用了中外多个厂商生产的 BDS/GPS 兼容型接收机,型号有 M300C、UR370 和 NetR9 等,分别于内蒙古托克托、湖北宜昌、广西桂林、海南三亚进行同步采集数据,每个地区设置两个测站进行短基线相对定位测试,数据采集时间为 2014 年 8 月 14 日~17 日连续 4 d,数据采样率为 30 s,卫星高度截止角为 15°,限制最大空间精度衰减因子(GDOP)为 6。测站周边环境对定位的影响小,观测条件较好。测站分布见图 2(<http://www.sbsm.gov.cn/>),测站概略位置见表 1。

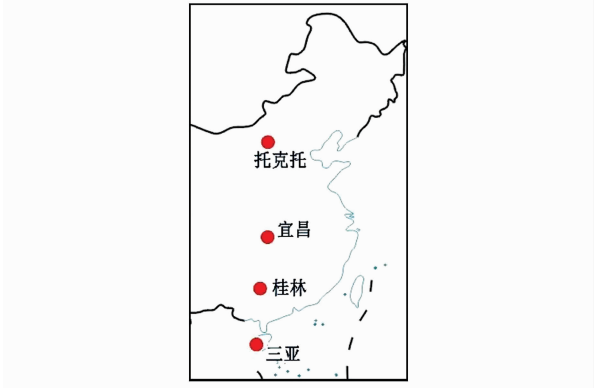


图 2 测站分布图
Fig. 2 Distribution of Stations

表 1 测站概况

Tab. 1 Conditions of Each Stations

测站地区	纬度/(°)	经度/(°)	高程/m	接收机型号	天气情况
托克托	40	111	1 020	M300C	晴天
宜昌	30	111	108	UR370	晴天
桂林	25	110	176	NetR9	小雨、中雨
三亚	18	109	16	NetR9	阵雨、大雨

在实验第 1 天,即 14 日,由于设备启动、仪器位置微调、人员操作等问题,各站的起始观测时间略有不同。三亚测站 15 日受到了大雨的影响,相对定位结果较差,有明显偏差,故在相对定位实验统计时没有包含三亚测站 15 日的解算结果。

4.1 可见星数与 DOP 值分析

根据实测数据计算四个测站的位置精度衰减因子(PDOP),4 个测站连续四天的 PDOP 值变化如图 3 所示,可见星与 PDOP 值统计如表 2 所示。

表 2 可见星及 PDOP 值情况统计表

Tab. 2 Statistics of Numbers of Visible Satellites and PDOP Values

测站地区		平均可见星数	最大 PDOP 值	最小 PDOP 值	平均 PDOP 值
托克托	GPS	7	5.2	1.6	2.54
	BDS	9	4.6	1.6	2.59
	BDS+GPS	16	2.2	1.1	1.50
宜昌	GPS	7	4.8	1.5	2.45
	BDS	9	3.6	1.7	2.49
	BDS+GPS	17	2.0	1.1	1.51
桂林	GPS	7	5.1	1.5	2.45
	BDS	10	3.6	1.7	2.31
	BDS+GPS	17	2.1	1.1	1.50
三亚	GPS	7	4.9	1.4	2.48
	BDS	10	3.5	1.6	2.20
	BDS+GPS	17	2.0	1.0	1.48

(1) 图 3 中 GPS 星座的 PDOP 值存在明显

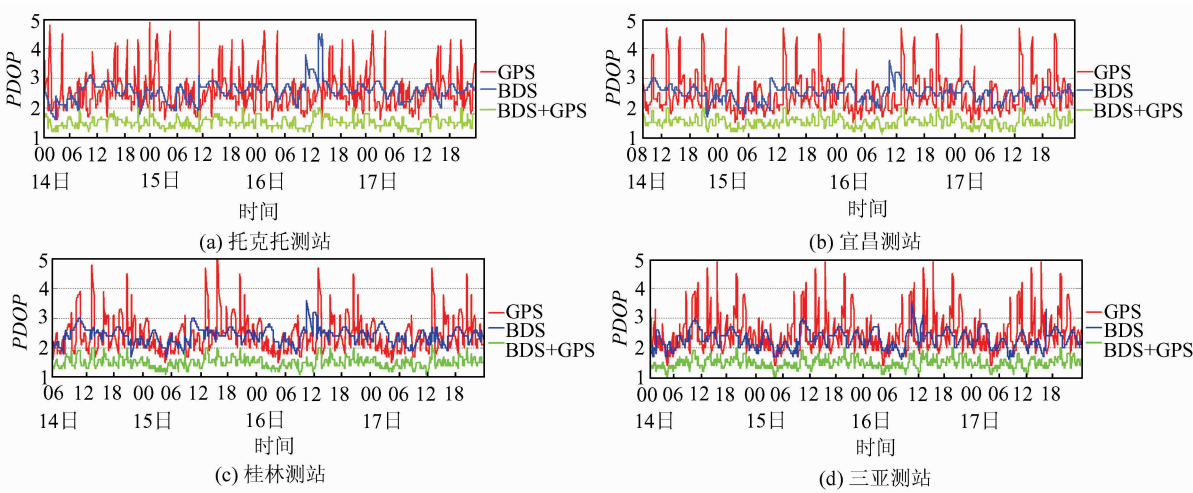


图 3 PDOP 值
Fig. 3 PDOP Values

波动,且变化趋势以天为单位重复。由表 2 可知,虽然 GPS 星座的 $PDOP$ 值整体变化明显,但各测站的平均 $PDOP$ 值都保持在 2.5 左右,情况较好。这主要是由于 GPS 星座均为 MEO 卫星,星座本身存在周期性变化,且可视时间较短,会出现某个历元或某段历元星座图形结构较差而影响定位性能的情况,但周期内整体定位性能较高。GPS 星座的这一特点主要影响导航用户,而对观测时间较长的大地测量用户影响不大。

(2) BDS 星座 $PDOP$ 值的变化较为平稳,波动明显小于 GPS。BDS 星座中大部分卫星是静止轨道卫星,空间位置相对固定,星座几何结构较稳定,同一点位不同时间定位性能的变化不大。综合图 2~图 3 可见,四个测站的 BDS 的 $PDOP$ 值在 16 日 12 时前后有明显的增大,因各站均在同一时刻出现异常,分析认为可能是 BDS 卫星出现了异常,与测站无关。

(3) 结合表 1、表 2 中可知,各站的 GPS 系统平均可见卫星数相等, $PDOP$ 值差异较小,不随测站纬度改变而明显变化。BDS 系统平均可见卫星数随测站纬度降低而增多, $PDOP$ 值则随测站纬度降低而逐渐减小,表明 BDS 定位性能随纬度降低而提高,即存在较明显的纬度效应。

(4) BDS 与 GPS 数据融合后定位性能显著改善,可见星数以及 $PDOP$ 值都优于任一单系统,而且各站 $PDOP$ 值稳定,同时前文提到的 BDS 系统出现的异常影响被大大减弱,说明 BDS/GPS 数据融合可以有效提高定位服务的质量,与文献[5]结论相似。

4.2 相对定位效果分析

采用 Kalman 滤波进行定位解算,并对电离层和对流层延迟进行相应改正^[21],由 4 天 GPS 数据计算得到位置的平均值作为参考值。BDS 及 BDS/GPS 定位结果见表 3。

表 3 BDS、BDS/GPS 相对定位结果统计表/m
Tab. 3 Results of Relative Positioning by BDS and BDS/GPS /m

	测站地区	空间直角坐标系下平均点位误差			大地坐标系下平均点位误差		
		X	Y	Z	B	L	H
BDS	托克托	0.016	0.022	0.012	0.010	0.009	0.042
	宜昌	0.015	0.020	0.012	0.005	0.012	0.034
	桂林	0.009	0.020	0.005	0.004	0.006	0.022
	三亚	0.006	0.011	0.005	0.003	0.004	0.013
BDS/GPS	托克托	0.001	0.003	0.002	0.002	0.001	0.004
	宜昌	0.009	0.003	0.001	0.001	0.010	0.002
	桂林	0.004	0.001	0.001	0.001	0.003	0.003
	三亚	0.005	0.007	0.004	0.001	0.003	0.009

(1) BDS 系统解算的点位坐标误差在厘米级,除 H 方向(高程)外基本都在 2 cm 以内。高程方向解算误差较大,最大差值为 4 cm。由于 BDS 对

地面点高程分量不敏感,所以导致 BDS 系统的高程方向的定位精度较低。并且随纬度的升高,观测 GEO 卫星时的高度角降低,定位精度降低。总体

而言,BDS 系统定位精度存在纬度效应,即随着纬度增加而定位精度降低,这与前文分析的纬度效应对 BDS 定位性能的影响结果基本一致。

(2) BDS/GPS 融合定位结果与参考值的差异均小于或等于 1 cm,点位误差明显小于单 BDS 系统,对 BDS 定位精度有明显提升,纬度效应不再明显。

5 结 语

BDS 定位性能存在着明显的纬度效应影响。较长时间观测下,BDS 双差相对定位的水平精度可达 2 cm,高程方向则随纬度增加而精度衰减。极端地说,当纬度大于 80°时,BDS 系统的可见卫星数降至 2,PDOP 值大于 12,可用性极低^[2]。通过 BDS/GPS 数据融合,可以减小 BDS 定位性能因纬度变化的影响,弱化纬度效应,提高全服务区内的定位精度和可靠性。这对于实时观测的导航用户尤为重要。

参 考 文 献

[1] Yang Yuanxi. Progress, Contribution and Challenges of Compass/Beidou Satellite Navigation System [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2010, 39(1): 1-6(杨元喜. 北斗卫星导航系统的进展、贡献与挑战[J]. 测绘学报, 2010, 39(1): 1-6)

[2] Yang Yuanxi, Li Jinlong, Wang Aibing, et al. Preliminary Assessment of the Navigation and Positioning Performance of BeiDou Regional Navigation Satellite System [J]. *Science China: Earth Sciences*, 2014, 57: 144-152(杨元喜, 李金龙, 王爱兵, 等. 北斗区域卫星导航系统基本导航定位性能初步评估[J]. 中国科学(地球科学), 2014, 44: 72-81)

[3] Beidou Satellite Navigation System of Public Service Performance Specification (version 1.0) [EB/OL]. <http://www.beidou.gov.cn/attach/2013/12/26/20131226fe8b20aad5f34091a6f8a84b08b1c4b1.pdf> (北斗卫星导航系统公开服务性能规范(1.0 版) [EB/OL]. <http://www.beidou.gov.cn/attach/2013/12/26/20131226fe8b20aad5f34091a6f8a84b08b1c4b1.pdf>)

[4] Teunissen P J G, Odolinski R, Odijk D. Instantaneous BeiDou + GPS RTK Positioning with High Cut-off Elevation Angles [J]. *Journal of Geodesy*, 2014, 88(4): 335-350

[5] Yang Yuanxi, Li Jinlong, Xu Junyi, et al. Contribution of the Compass Satellite Navigation System to Global PNT Users [J]. *Chinese Science Bulletin*,

2011, 56(26): 2 813-2 819(杨元喜, 李金龙, 徐君毅, 等. 中国北斗卫星导航系统对全球 PNT 用户的贡献[J]. 科学通报, 2011, 56(21): 1 734-1 740)

[6] Wang Xiaying, Bei Jinzhong. GPS/BDS Static Baseline Processing Method and Result [J]. *Journal of Navigation and Positioning*, 2013, 1(2): 71-73(王霞迎, 秘金钟. GPS/BDS 静态基线处理方法及其结果分析[J]. 导航定位学报, 2013, 1(2): 71-73)

[7] Jing Yifan, Zeng Anmin, Xu Tianhe. Fusion Positioning of BDS/GPS Based on Variance Component Estimation and Its Application for Geodetic Control Network [C]. China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2014 Proceedings, Nanjing, China, 2014

[8] He Haibo, Li Jinlong, Yang Yuanxi, et al. Performance Assessment of Single- and Dual-Frequency Beidou/GPS Single-epoch Kinematic Positioning [J]. *GPS Solutions*, 2014, 18(3): 393-403

[9] Wang Shijin, Bei Jinzhong, Gu Shouzhou, et al. Relative Positioning of Combined BDS/GPS and Its Accuracy Analysis [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2014(5): 1-4(王世进, 秘金钟, 谷守周等. BDS/GPS 组合相对定位方法及精度分析[J]. 测绘通报, 2014(5): 1-4)

[10] Wang Shijin, Bei Jinzhong, Li Dehai, et al. Real-Time Kinematic Positioning Algorithm of GPS/BDS [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(5): 621-624(王世进, 秘金钟, 李得海, 等. GPS/BDS 的 RTK 定位算法研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2014, 39(5): 621-624)

[11] Wen Yuanlan, Liu Qixu, Zhu Jun, et al. The Effect of TT&C Deployment on the Regional Satellite Navigation System [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2007, 29(1): 1-6(文援兰, 柳其许, 朱俊等. 测控站布局对区域卫星导航系统的影响[J]. 国防科技大学学报, 2007, 29(1): 1-6)

[12] Cai Chenglin, Li Xiaohui, Wu Haitao. Analysis of the DOP and Positioning Performance of Composite Satellite Constellation [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2009, 34(2): 67-69(蔡成林, 李孝辉, 吴海涛. 混合星座的精度因子与定位性能分析[J]. 测绘科学, 2009, 34(2): 67-69)

[13] Li Min, Qu Lizhong, Zhao Qile, et al. Precise Point Positioning with the BeiDou Navigation Satellite System [J]. *Sensors*, 2014, 14(1): 927-943

[14] Liu Dajie, Shi Yimin, Guo Jingjun. Theory of Global Positioning System (GPS) and Data Processing [M]. Shanghai: Tongji University Press, 1996.(刘大杰, 施一民, 过静珺. 全球定位系统(GPS)的原理与数据处

理[M]. 上海: 同济大学出版社, 1996)

[15] Yao Yibin, Xie Mingyu, Niu Wenzhou. Research on the Combination of Multi-frequency and Multi-Mode GNSS [J]. *GNSS World of China*, 2006, 5: 16-20 (姚宜斌, 谢鸣宇, 牛文周. 多频多模导航卫星系统的组合研究[J]. *全球定位系统*, 2006, 5: 16-20)

[16] Gao Xingwei, Guo Jingjun, Cheng Pengfei, et al. Fusion Positioning of Compass/GPS Based on Spatio Temporal System Unification [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2012, 41(5): 743-748 (高星伟, 过静珺, 程鹏飞等. 基于时空系统统一的北斗与 GPS 融合定位[J]. *测绘学报*, 2012, 41(5): 743-748)

[17] Yang Yuanxi. Adaptive Navigation and Kinematic Positioning [M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2006(杨元喜. 自适应动态导航定位[M]. 北京: 测绘出版社, 2006)

[18] Qin Xianping, Yang Yuanxi, Cui Xianqiang. The Influence of the Constants of Ellipsoid on the Interoperability of Broadcast Ephemeris Computation between BeiDou and GPS [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(9): 1237-1241(秦显平, 杨元喜, 崔先强. 椭圆参数对北斗与 GPS 广播星历计算的互操作性影响[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2015, 40(9): 1 237-1 241)

[19] Cheng Pengfei, Wen Hanjiang, Cheng Yingyan. Parameters of the CGCS 2000 Ellipsoid and Comparisons with GRS80 and WGS84 [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2009, 38(3): 189-194(程鹏飞, 文汉江, 成英燕, 等. 2000 国家大地坐标系椭圆参数与 GRS80 和 WGS84 的比较[J]. *测绘学报*, 2009, 38(3): 189-194)

[20] Wei Ziqing. China Geodetic Coordinate System 2000 and Its Comparison with WGS84 [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2008, 28(8): 1-5(魏子卿. 2000 中国大地坐标系及其与 WGS84 的比较[J]. *大地测量与地球动力学*, 2008, 28(8): 1-5)

[21] Li Zhenghang, Huang Jinsong. GPS Surveying and Data Processing [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2010(李征航, 黄劲松. GPS 测量与数据处理[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2010)

Latitude Effect in Positioning Performance by Using BeiDou Regional Satellite Navigation System

JING Yifan¹ YANG Yuanxi^{2, 3} ZENG Anmin^{1, 2, 4} MING Feng¹

1 Institute of Navigation and Space Target Engineering, Information Engineering University, Zhengzhou 450050, China
2 State Key Laboratory of Geo-information Engineering, Xi'an 710054, China
3 Beijing Institute of Satellite Navigation, Beijing 100049, China
4 Xi'an Research Institute of Surveying and Mapping, Xi'an 710054, China

Abstract: The Beidou Regional Satellite Navigation System (BDS) has an uneven distributed constellation, containing five satellites in geostationary earth orbit, five in inclined geosynchronous orbits and four in medium earth orbits. With this hybrid constellation, the quantity and the geometrical structure of observed BDS satellites are different at different latitudes. The latitude effect in BDS application performance of positioning and navigation; In this paper, theoretical models and actual observations are described to analyze the difference in quantity and geometrical structure of observed BDS satellites and the performance of positioning and navigation at different latitudes. An experiment was conducted at different latitudes with receivers from separate companies. The result shows the latitude effect and impact in BDS applications, which means BDS positioning accuracy decreases with increased latitude . In contrast, there is no obvious latitude effect in Global Positioning System (GPS) applications. The implementation of BDS/GPS data fusion weakens latitudinal impacts on the results and improves the accuracy and reliability of navigation and positioning services.

Key words: BDS; latitude effect; positioning performance; fusion positioning