

北斗在极区导航定位性能分析

杨元喜^{1,2,3} 徐君毅³

1 地理信息工程国家重点实验室,陕西 西安,710054

2 西安测绘研究所,陕西 西安,710054

3 北京卫星导航中心,北京,100094

摘要: 北极蕴藏着丰富的资源,冰川融化使得夏季北极地区的航行成为可能,北极地区战略地位凸显。为了保障北极地区活动的安全性,精确导航定位是重要基础保障,本文分析了我国北斗卫星导航系统当前星座及未来全球星座在极区的可用性。详细分析了利用北斗卫星导航系统在极区进行导航、定位服务的基本性能,分析其优缺点,并提出了可能的应对方法。

关键词: 北极;GNSS;北斗;极区导航

中图法分类号: P228.42

文献标志码: A

随着全球变暖加剧,南极及北极地区的海冰融化进一步加速,甚至连冬季海冰的面积和厚度也都在急剧减少^[1-2]。对于北极地区来说,2007年夏季海冰面积比2005年缩小幅度高达23%^[3]。据估计,在2060~2080年期间,北冰洋夏季的海冰将完全融化^[4]。“东北航道”、“西北航道”在夏季的可用期大大增加。亚、欧和美洲之间的航线将缩短6 000~8 000 km,北极航道将成为大西洋和太平洋之间最短的航道,蕴含着极大的商业利益^[5]。

同时,冰雪的融化也将使大面积的陆地露出地面,这将有利于人类定居和矿产开采。根据美国地质勘探局的最新估计,北极地区拥有原油储量900亿桶,天然气储量超过47万亿立方米。北极拥有全球13%的未探明石油储量、30%未开发的天然气和9%的世界煤炭资源^[6]。

丰厚的资源储备及巨大的航线价值,使得北极地区战略地位凸显。北极地区也因此引起了国际社会的广泛关注。可以预见,在不远的未来,北极地区的航海航空、资源开发及科学研究的将显著增加。

为了保障北极区域活动的安全性,首先需要可靠的导航定位保障。现有的导航手段如惯性导航、磁力和重力匹配导航在南北极地区均存在

严重问题。首先,惯性导航在极区寻北能力很差,尽管有学者提出了基于横坐标系和格网导航参考系的极区惯性导航解决方案^[7-9],但是极端情况下惯性导航完全不能进行导航。磁力和重力也因为极区近于常值,很难通过磁力传感器及重力传感器进行导航。

中国北斗卫星导航系统二代一期工程虽然取得了重要进展^[10],在设计区域北斗导航定位性能几乎与GPS相当^[11-12],但由于设计时重点考虑中国及其周边地区的导航定位及授时能力,南北极覆盖较差,甚至暂时不具备导航定位能力。有学者探讨了北斗向北扩展以保障我国国防利益的技术方案,该方案并未考虑北斗全球化的因素^[13]。

为了较客观地分析北极地区卫星导航定位需求,本文通过仿真计算详细分析了北斗(BDS)当前星座及未来全球星座在极区进行导航、定位服务的可用性,同时分析了GPS/BDS融合导航在极区的基本覆盖情况,分析了极区导航定位面临的挑战,提出了可能的应对方法。本文旨在为未来构建合理优化的极区导航定位方案提供基础分析。

1 北斗极区导航定位可用性

为了分析北斗在极区的导航定位性能,本文

利用自编软件进行了仿真分析。在本文计算和分析中,北斗区域星座采用了2013-01-22的北斗区域导航系统广播星历,对GPS星座仿真采用了YUMA星历。对北斗全球系统按35颗卫星(5颗GEO,3颗IGSO,27颗MEO)进行仿真(具体星座参数见表1)。对北斗全球星座的仿真采用圆形轨道,即不考虑偏心率。仿真时间为1d,采样率为300s。其中,北斗5颗GEO卫星的轨道位置分别为 58.75°E 、 80°E 、 110.5°E 、 140°E 、 160°E ;3颗IGSO的倾角为 55° ,交叉点经度为 118°E 。按 $5^{\circ}\times 5^{\circ}$ 的分辨率进行计算,计算中高度截止角设为 10° 。为方便比较分析,采用了5个方案:方案一:北斗区域导航系统(BD2);方案二:北斗全球系统(BDS);方案三:GPS;方案四:GPS+BD2;方案五:GPS+BDS。

1.1 可见性及DOP值分析

本文统计了BD2、BDS、GPS、GPS/BD2、

GPS/BDS在北纬 $55^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 范围内的卫星可见卫星数及精度因子(dilution of precision, DOP)值。具体结果见表2、表3及图1~图7。其中,GDOP为几何精度因子,PDOP为三维位置精度因子,HDOP为水平分量精度因子,VDOP为垂直分量精度因子。

由表2、3及图1~图7可以得出以下结论。

1) 由图1可以看出,北斗二代区域卫星导航系统(BD2)在北纬 $60^{\circ}\sim 75^{\circ}$ 间,仅有一小部分可见,且PDOP值偏大,这意味着仅有某些时段能够提供导航服务;尤其在北纬 $75^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 间,BD2基本不可见。这意味着北纬 $75^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 间无法利用现有的BD2提供连续可靠的导航定位服务。

2) 由图4可以看出,在北斗区域卫星导航系统的基础上增加GPS系统,PDOP值约为1~3.1。因此,在当前区域导航的条件下,可以更多地依赖其他GNSS来实现极区的导航。

表1 北斗全球星座参数

Tab.1 Parameters of BeiDou Global Constellation

轨道参数	GEO	IGSO	MEO
长半轴/km	42 164	42 164	27 878
偏心率	0	0	0
轨道倾角/ $^{\circ}$	0	55	55
升交点赤经	158.75 $^{\circ}\text{E}$ 、180 $^{\circ}\text{E}$ 、210.5 $^{\circ}\text{E}$ 、 240 $^{\circ}\text{E}$ 、260 $^{\circ}\text{E}$		218 $^{\circ}\text{E}$ 、98 $^{\circ}\text{E}$ 、338 $^{\circ}\text{E}$
近地点角距/ $^{\circ}$	0	0	0
平近点角	0	0(218 $^{\circ}\text{E}$)、120 $^{\circ}$ (98 $^{\circ}\text{E}$)、 240 $^{\circ}$ (338 $^{\circ}\text{E}$)	每个轨道上的首颗卫星平近点角分别为0 $^{\circ}$ 、13 $^{\circ}20'$ 、 26 $^{\circ}40'$,其余卫星平近点角依次增加40 $^{\circ}$
卫星数	5	3	27
轨道面	1	3	3

表2 不同高度截止角下卫星可见性

Tab.2 Satellite Visibility for Different Mask Angles

	10 $^{\circ}$		20 $^{\circ}$		30 $^{\circ}$		40 $^{\circ}$	
	最少~最多	平均	最少~最多	平均	最少~最多	平均	最少~最多	平均
BD2	—	—	—	—	—	—	—	—
BDS	7~12	9.5	5~8	6.3	3~5	4.2	1~3	2.1
GPS	7~9	8.3	4~7	5.9	3~5	3.7	1~3	1.8
GPS+BD2	8~16	11.5	5~11	8.0	3~6	5.1	1~4	2.5
GPS+BDS	14~21	18.2	10~15	13.2	7~10	8.6	3~6	4.6

表3 高度截止角为10 $^{\circ}$ 时各方案DOP值

Tab.3 DOP Values of Different Schemes (Mask Angle 10 $^{\circ}$)

	GDOP		PDOP		HDOP		VDOP	
	最少~最多	平均	最少~最多	平均	最少~最多	平均	最少~最多	平均
BD2	—	—	—	—	—	—	—	—
BDS	1.71~3.37	2.67	1.54~2.79	2.34	0.81~1.35	0.97	1.36~2.52	2.14
GPS	2.70~3.91	3.43	2.34~3.38	2.98	0.93~1.59	1.16	2.05~3.20	2.74
GPS+BD2	1.47~3.45	2.57	1.29~3.00	2.25	0.70~1.44	0.90	1.09~2.84	2.06
GPS+BD	1.23~2.05	1.76	1.10~1.81	1.55	0.56~0.83	0.64	0.95~1.70	1.41

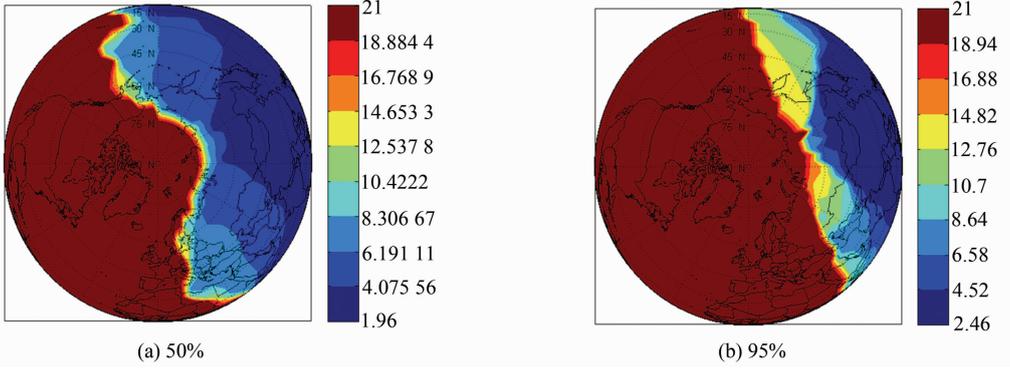


图 1 北斗区域星座 PDOP(高度角 10°)
Fig. 1 PDOP Value of BD2 (10°)

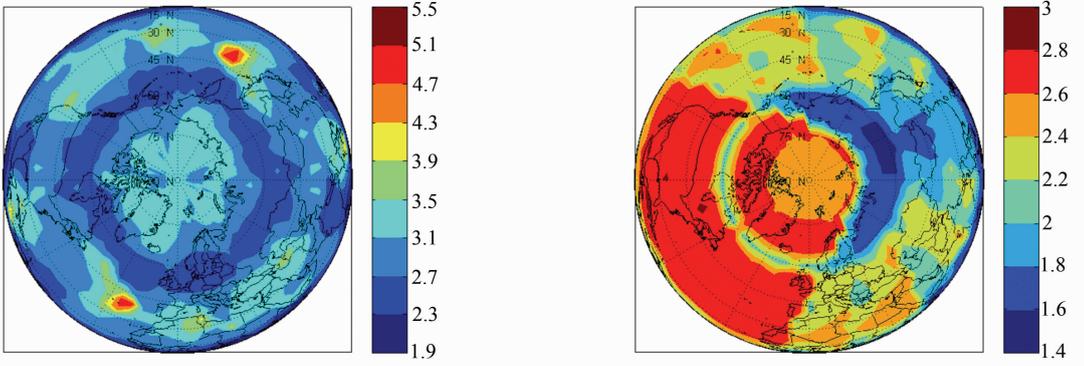


图 2 北斗全球星座 PDOP(高度角 10°)
Fig. 2 PDOP Value of BDS (10°)

图 3 GPS PDOP(高度角 10°)
Fig. 3 PDOP Value of GPS (10°)

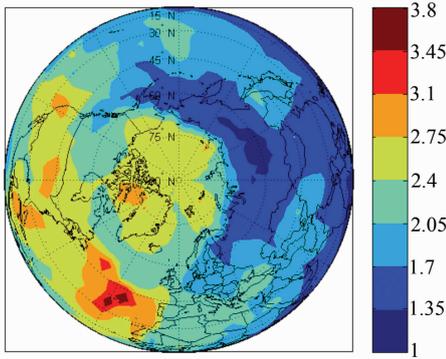


图 4 BD2+GPS PDOP(高度角 10°)
Fig. 4 PDOP Value of BD2+GPS (10°)

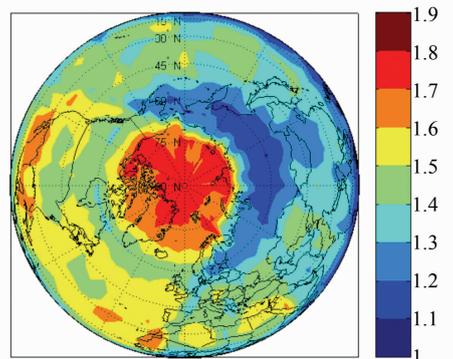


图 5 BDS+GPS PDOP(高度角 10°)
Fig. 5 PDOP Value of BDS+GPS (10°)

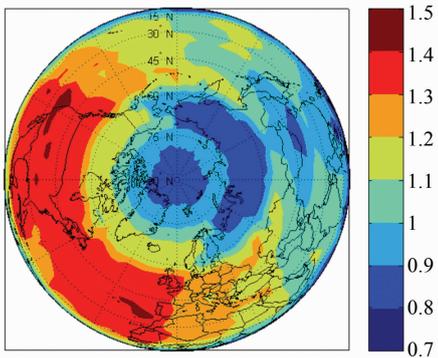


图 6 BDS HDOP(高度角 10°)
Fig. 6 HDOP Value of BDS (10°)

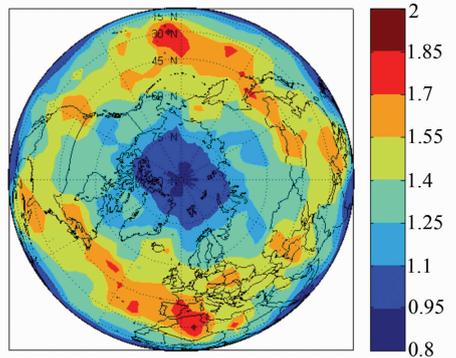


图 7 GPS HDOP(高度角 10°)
Fig. 7 HDOP Value of GPS (10°)

3) 当北斗全球星座布设完成后, BDS 在极区的导航服务能力将明显增强。由表 3 及图 2、图 3 表示的 BDS 和 GPS 的可见卫星数及 PDOP 值可以看出, 北斗全球系统在极区的覆盖略优于 GPS。北纬 $60^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 间, BDS 的 PDOP 值约为 1.4~2.8; GPS 的 PDOP 值约为 2.3~3.5。未来北斗的全球星座能够实现对极区的完全覆盖, 完全能够独立地为极区各类应用提供导航定位和授时服务。由图 5 及表 2、表 3 可以看出, 高度角为 10° 时, 北斗/GPS 双系统在极区的可见卫星数在 14~21 之间, PDOP 值在 1.1~1.8 之间。相对单系统而言, 改善明显。

4) 由图 6、图 7 可以看出, 无论是 GPS 还是 BDS, 其在极区的 HDOP 值相对于中低纬度地区要小。这对于航海等应用来说是有利条件。

1.2 卫星高度角随纬度的变化

在不同纬度上选取一个点(经度为 110° , 高程为 25 m)来分析描述北斗混合星座和 GPS 在不同纬度的高度角变化情况。计算时截止高度角取 10° , 结果见图 8 和图 9。图 8 中, C01~C05 为 GEO 卫星, C06~C10 为 IGSO 卫星, C11~C14 为 MEO 卫星。

由图 8 可以得出以下结论。

1) 在北纬 35° 时, GEO 卫星的高度角约为 $20^{\circ}\sim 50^{\circ}$; 在北纬 55° 时, 其高度角约为 $10^{\circ}\sim 30^{\circ}$; 从北纬 65° 起, GEO 卫星逐渐不可见。

2) 在北纬 35° 时, IGSO 卫星可见时间较长, 且大部分时间高度角大于 20° 。随着纬度的增加, 其可见时间逐渐变短, 且最大高度角不断下降。与 MEO 卫星相比, IGSO 卫星在高纬度地区的可见时间要长一些, 最大高度角比 MEO 卫星大。

3) 随着纬度的增加, MEO 卫星的最大高度角从 90° 下降到不到 60° 。与其他地区相比, 卫星的高度角在高纬度地区明显低。

图 9 给出了 GPS 在北纬 75° 和 85° 的高度角变化。北斗的高度角变化与之类似。即, 在北纬 75° , 卫星的最大高度角约低于 70° ; 在北纬 85° , 卫星的最大高度角约为 50° , 与中低纬度相比高度角要低得多。

2 GNSS 用于极区导航存在的问题及解决方案

2.1 GNSS 用于极区导航存在的主要问题

1) 虽然与中低纬度地区相比, 极区具有更多

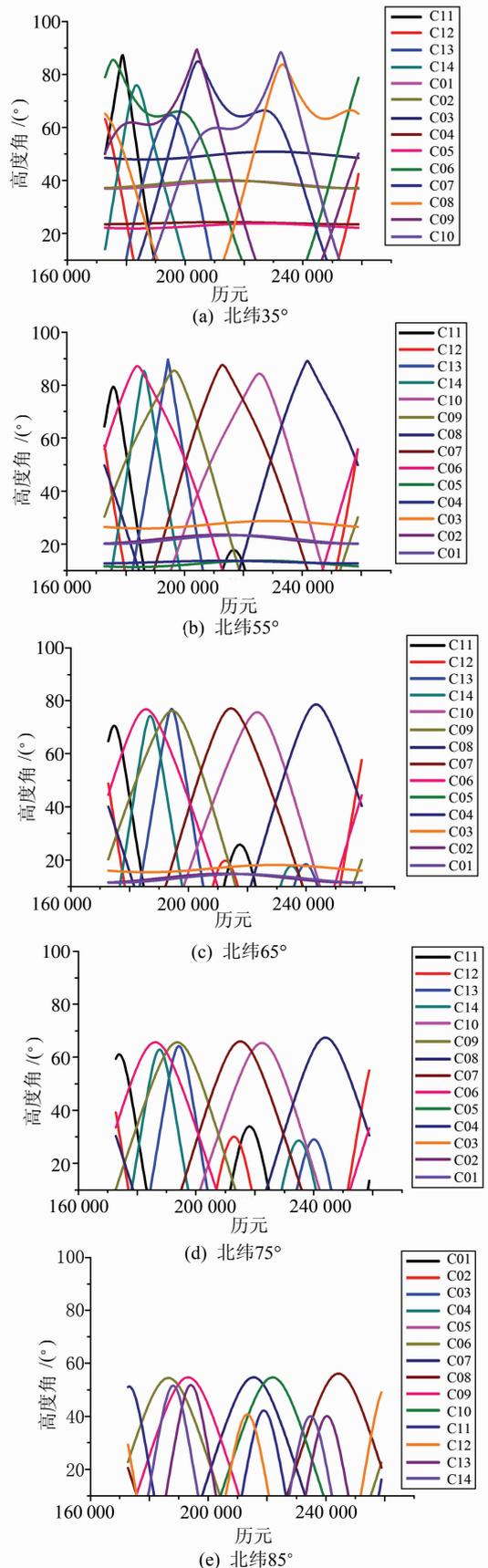


图 8 北斗混合星座不同位置高度角变化
Fig. 8 Elevation Variation of BeiDou Hybrid Constellation at Different Locations

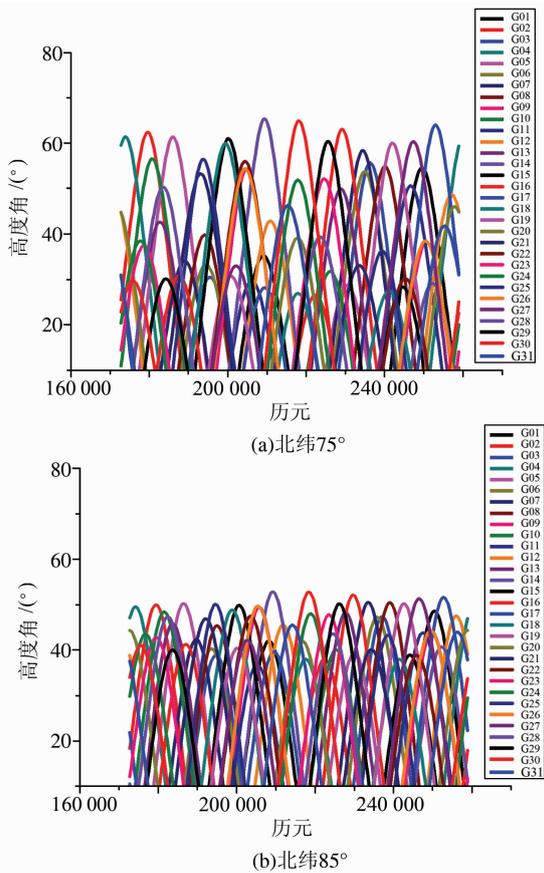


图 9 GPS 星座不同位置高度角变化

Fig. 9 Elevation Variation of GPS Constellation at Different Locations

的可视卫星,但多数卫星高度角较低。

2) 对流层延迟是影响 GPS 定位精度的关键因素。相关研究表明,对流层延迟对低高度角卫星观测的影响较大。

3) 极区电离层闪烁频繁发生,TEC 日间波动较中纬度地区剧烈得多。

4) 由于极区的特殊性,星基或者地基增强系统在极区改善定位精度存在困难。对于 EGNOS 和 WAAS 等星基增强系统来说,GEO 卫星难以覆盖极区,仅在部分地区、部分时段可见,且高度角很低。对于地基增强系统来说,目前在极区的观测站还很少。同时,极区恶劣的环境也使得建立长期的监测站存在诸多的困难,如难以提供持续的能源、缺乏实时的通信链路等。

2.2 可能的解决方案

1) 在极地 GNSS 导航定位中需要寻求更有效的改正对流层延迟的方法。精化对流层改正模型,改善低高度角卫星的对流层模型精度,在保持同样定位精度的基础上,降低对观测数据的截止高度角的要求。如此,可以利用更多的低高度角的卫星观测信息,提高观测冗余,同时也提高导航

定位的异常误差诊断能力和容错能力。

2) 针对极区电离层影响可采取的措施有:

① 采用双频消电离层组合。② 在极区建立更多监测站,从而建立更为精确的区域电离层模型。同时对电离层异常进行监测,以便向用户告警,提高导航的可靠性。③ 在高精度定位中,考虑电离层二阶项延迟的影响。

3) 针对极区很多活动具有季节性的特点,建立一些灵活的临时性监测站,从而满足导航需求。

4) 在必要的时候,利用其他 GNSS 进行辅助导航。

5) 在惯导和天文导航可用时,可联合惯导和天文导航进行组合导航。

3 结 语

1) 由于北斗区域卫星导航系统在设计时重点考虑中国及其周边地区的导航定位及授时能力,其在南北极覆盖较差,甚至暂时不具备导航定位能力。因此,在现有的星座下,要实现极区的导航需要依赖其他 GNSS。

2) 未来北斗的全球星座能够实现对两极地区的完全覆盖,完全能够独立地为两极地区各类应用提供导航定位和授时服务,从而为实现我国在两极地区的利益提供有力的导航保障。

3) 不可否认的是,利用北斗提供两极地区的导航定位服务也存在一定的问题和困难。这些困难和问题有待更多深入的研究来解决。

参 考 文 献

- [1] Yang Yuande, E Dongchen, Chao Dingbo. Antarctic Ice Mass Loss from Gravity Satellite [J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2009, 21(2): 109-113 (杨元德,鄂栋臣,晁定波. 卫星重力用于南极冰盖物质消融评估[J]. 极地研究,2009,21(2):109-113)
- [2] Wang Pinxian. Ice Breaking Expeditions: The Present and Past of the Arctic Ocean [J]. *Chinese Journal of Nature*, 2009, 30(5):247-251(汪品先. 破冰之旅:北冰洋今夕谈[J]. 自然杂志,2009,30(5): 247-251)
- [3] Stroeve J, Serreze M, Drobot S, et al. Arctic Sea Ice Extent Plummets in 2007 [J]. *EOS*, 2008, 89(2):13-14
- [4] Wang M, Overland J E. A Sea Ice Free Summer Arctic Within 30 Years [J]. *Geophys Res Lett*, 2009, 36(7):251-254
- [5] Khon V, Mokhov I, Latif M, et al. Perspectives of

- Northern Sea Route and Northwest Passage in the Twenty-First Century[J]. *Climatic Change*, 2010, 100(3):757-768
- [6] Gao G X, Heng L, Walter T, et al. Breaking the Ice: Navigation in the Arctic [C]. The 24th International Technical Meeting of the Satellite Division, Portland, QR, 2011
- [7] McEwen R, Thomas H, Weber D, et al. Performance of an Navigation System at Arctic Latitudes [J]. *GPS Solutions*, 2013, DOI: 10.1007/s10291-013-0339-3
- [8] Zhou Qi, Qin Yongyuan, Fu Qiangwen, et al. Grid Mechanization in Inertial Navigation System Transpolar Aircraft [J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2013, 31(2):210-217(周琪, 秦永元, 付强文, 等. 极区飞行格网惯性导航算法原理[J]. 西北工业大学学报, 2013, 31(2):210-217)
- [9] Li Qian, Sun Feng, Ben Yueyang. Polar Navigation of Strapdown Inertial Navigation System Based on Transversal Frame in Polar Region [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2014, 22(3): 228-292 (李倩, 孙枫, 奔粤阳, 等. 基于横坐标系的捷联惯导系统极区导航方法[J]. 中国惯性技术学报, 2014, 22(3):288-292)
- [10] 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)
- [11] He H, Li J, Yang Y, et al. Performance Assessment of Single- and Dual-Frequency BeiDou/GPS Single-Epoch Kinematic Positioning [J]. *GPS Solutions*, 2013, DOI: 10.1007/s10291-013-0339-3
- [12] 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(1): 1-9
- [13] Liu Genyou, Hao Xiaoguang, Chen Xiaofeng, et al. On Constellation Scheme of 2nd Generation of China Satellite Navigation System for Northward Extending Coverage Range[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2007, 27(5): 115-119 (刘根友, 郝晓光, 陈晓峰, 等. 对我国二代卫星导航系统覆盖范围向北扩展星座方案的探讨[J]. 大地测量与地球动力学, 2007, 27(5): 115-119)

Navigation Performance of BeiDou in Polar Area

YANG Yuanxi^{1,2,3} XU Junyi³

¹ State Key Laboratory of Geo-information Engineering, Xi'an 710054, China

² Xi'an Research Institute of Surveying and Mapping, Xi'an 710054, China

³ Beijing Satellite Navigation Center, Beijing 100094, China

Abstract: The strategic position of Arctic area and its rich natural resources are becoming increasingly important, while the northeast and northwest passages through the Arctic are receiving much attention as glaciers continue to melt. Hence, GNSS will play a significant role due to its unique advantages as Arctic navigation and positioning are particularly significant to guarantee the security of activities in that environment. The Beidou regional satellite navigation system was established successfully, and is developing into a global system enveloping the Polar Regions. In order to evaluate Beidou performance in the polar area, Beidou availability with present and future constellations, and the combination of Beidou with GPS are analyzed. The latent challenges to the navigation services provided by GNSS in polar area are discussed and possible solutions provided. We argue that the current BD2 can not satisfy the navigation requirements, but with a global BDS, it is possible to provide navigation services independently in Arctic area.

Key words: Arctic; GNSS; BeiDou; navigation in polar area

First author: YANG Yuanxi, PhD, professor, Academician of Chinese Academy of Sciences, specializes in GNSS data fusion. E-mail: yuanxi_yang@163.com

Corresponding author: XU Junyi, PhD. E-mail: xujunyi-025@163.com

Foundation support: The National 863 Program of China, No. 2013AA122501-1; the National Natural Science Foundation of China, Nos. 41020144004, 41474015, 41374019, 41374003, 41274040.