

极区 BDS 多频信号分析与 PPP 定位性能评估

高 猛, 韩佑珍

(辽宁工程技术大学 测绘与地理科学学院, 辽宁 阜新 123000)

摘 要: 为评估北斗卫星导航系统(BDS)在极区环境下的数据质量与定位性能,基于IGS MGEX网络在南北极测站连续14 d的观测数据开展系统性分析。研究结果表明:在极区,BDS的可见卫星数为7~13颗,位置精度因子(PDOP)优于其他全球导航卫星系统。BDS在南极、北极地区的数据完整率分别约为87.79%与91.29%,两极信噪比相差不大,均值约为45 dB,多路径误差为24.58~25.38 cm。在定位性能方面,BDS的B1C+B2a与B1I+B3I无电离层组合表现突出。与全球定位系统(GPS)的L1+L2、格洛纳斯全球卫星导航系统(GLONASS)的G1+G2和伽利略卫星导航系统(Galileo)的E1+E5a相比,BDS的B1C+B2a在南极地区的三维定位精度分别提升6.7%、19.6%和18.5%,在北极地区分别提升1.2%、18%和12%;B1I+B3I在南极地区的三维定位精度分别提升6.7%、19.6%和18.5%,在北极地区分别提升14.8%、29.3%和24.2%。B1C+B2a在南极地区的收敛速度较L1+L2、G1+G2和E1+E5a分别缩短21.5%、25.1%和14.5%,在北极地区分别缩短14.9%、32.5%和28.6%;B1I+B3I在南极地区的收敛速度较L1+L2、G1+G2和E1+E5a分别缩短26.7%、30.1%和20.3%,在北极地区分别缩短50.9%、61.1%和58.9%。研究结论为提升极区复杂环境的定位精度提供参考。

关键词: 北斗卫星导航系统; 极地地区; 信号质量; 精密单点定位; 收敛速度

中图分类号: P228

文献标志码: A

文章编号: 1008-0562(2026)02-0177-08

Assessment of multi-frequency BDS signal quality and PPP positioning performance in polar regions

GAO Meng, HAN Youzhen

(School of Geomatics, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: To evaluate the data quality and positioning performance of the BeiDou Navigation Satellite System (BDS) in polar environments, a systematic analysis was conducted based on 14 consecutive days of observation data from polar stations of the International GNSS Service Multi-GNSS Experiment (IGS MGEX) network. The results show that in polar regions, the number of visible BDS satellites ranges from 7 to 13, and the Position Dilution of Precision (PDOP) of BDS outperforms that of other Global Navigation Satellite Systems (GNSS). The data completeness rates of BDS in the Antarctic and Arctic are approximately 87.79% and 91.29%, respectively. The signal-to-noise ratios (SNR) in the two polar regions show little difference with a mean value of about 45 dB, and the multipath errors range from 24.58 cm to 25.38 cm. In terms of positioning performance, the BDS ionosphere-free combinations of B1C+B2a and B1I+B3I exhibit outstanding performance. Compared with the L1+L2 of the Global Positioning System (GPS), G1+G2 of the Global Navigation Satellite System (GLONASS) and E1+E5a of the Galileo Satellite Navigation System, the 3D positioning accuracy of BDS B1C+B2a is improved by 6.7%, 19.6% and 18.5% in the Antarctic, and by 1.2%, 18% and 12% in the Arctic, respectively. The 3D positioning accuracy of BDS B1I+B3I is improved by 6.7%, 19.6% and 18.5% in the Antarctic, and by 14.8%, 29.3% and 24.2% in the Arctic, respectively. The convergence speed of BDS B1C+B2a

收稿日期: 2025-10-15 修回日期: 2025-11-06 接受日期: 2025-11-16 责任编辑: 黄琦

基金项目: 国家自然科学基金项目(41904037); 辽宁省自然基金联合计划资助项目(20240336); 辽宁省教育厅基本科研项目(LJ212410147011)

作者简介: 高 猛(1988-), 男, 辽宁沈阳人, 博士, 副教授, 主要从事BDS/GNSS高精度定位算法方面的研究。E-mail: gaomeng512@163.com

is reduced by 21.5%, 25.1% and 14.5% in the Antarctic, and by 14.9%, 32.5% and 28.6% in the Arctic, compared with that of L1+L2, G1+G2 and E1+E5a, respectively. The convergence speed of BDS B1I+B3I is reduced by 26.7%, 30.1% and 20.3% in the Antarctic, and by 50.9%, 61.1% and 58.9% in the Arctic, compared with that of the above three combinations, respectively. The research conclusions provide a reference for improving the positioning accuracy in the complex polar environments.

Keywords: BeiDou Navigation Satellite System (BDS); polar regions; signal quality; Precise Point Positioning (PPP); convergence speed

0 引言

极地常年冰雪覆盖,高精度导航定位技术对于保障极区活动安全、航道疏通、资源探测及变形监测至关重要^[1-4]。与稳固的陆地环境相比,高纬度海洋区域和极区的环境条件更复杂多变,在此类区域中卫星高度角处于较低水平,且几何分布状况欠佳,这会引起卫星信号的信噪比降低、多路径误差增大,最终导致定位精度降低^[5-7]。BDS为极区提供了自主导航定位支持,不仅包括中圆地球轨道(medium earth orbit, MEO)卫星,还包括地球静止轨道(geostationary earth orbit, GEO)卫星及倾斜地球同步轨道(inclined geosynchronous orbit, IGSO)卫星,能提供覆盖全球的导航、定位和授时服务^[8]。

文献[9]研究发现,在极区单独使用BDS进行精密单点定位(PPP)仍存在局限,选择全球定位系统(global positioning system, GPS)与GEO卫星组合,能显著提升定位精度和收敛速度。文献[10]基于2011—2012年南极航线实测数据发现,BDS在中低纬度地区的动态定位精度与GPS相当,但由于卫星量少且分布较差,在高纬度及南极地区的定位精度不佳或失效。文献[11]通过仿真分析发现,BDS-2在极地定位能力有限,其覆盖范围仅限部分区域。BDS-3新增的B1C、B2a和B2b频段,可显著提升极区多频定位潜力^[12-13]。文献[14]研究发现,BDS-3 MEO卫星的B1C和B1I频段在低高度角时存在显著伪距多路径误差。经伪距噪声和多路径校正算法校正后,其误差可降低60%以上,校正效果远优于多路径半球算法。文献[15]对北极地区伪距单点定位的评估发现,BDS-3可见卫星数和位置精度因子与GPS相当,但定位精度略低。文献[16]通过分析北极地区BDS观测量特性及动态定位性能,发现BDS在极区的可见卫星数与位置精度衰减因子(position dilution of precision, PDOP)均优于GPS,多路径误差约为0.2 m。尽管B1C+B2a伪距观测噪声较大,但其定位精度最优,整体性能与GPS相当。文献[17]基于无电离层组合

的BDS-3多频单点定位数学模型开展研究,研究表明,在欧洲、非洲及南极洲BDS-3的三维定位精度均优于1.64 m,在美洲、亚洲、大洋洲的定位精度分别为1.80 m、1.92 m、2.08 m。文献[18]基于东南极区域连续多年的实测数据开展研究,结果表明,BDS-3在东南极卫星可用性较好,平均可用卫星数为9颗,PDOP低于3,静态PPP性能较好,水平定位精度优于1.0 cm,高程定位精度优于1.5 cm。

北斗卫星导航系统完成全球组网后,相关研究多集中于陆地观测环境,对于环境条件较为恶劣的极区,主要通过仿真技术开展研究。目前,对极区不同信号观测量的特性及定位性能的研究较少^[19-20]。鉴于此,本文基于多模GNSS实验(multi-GNSS experiment, MGEX)观测站数据,从可见卫星数、PDOP、定位偏差、多路径误差及信噪比(signal to noise ratio, SNR)等方面进行分析,评估BDS在极区的精密单点定位效果,以期提升极区复杂环境的定位精度提供参考。

1 数据质量检核与定位模型

1.1 数据质量检核

处理GNSS数据时,信噪比 C/N_0 可直接从RINEX观测文件^[21-22]中提取,表示接收载波信号功率与噪声平均功率的比值,表达式为

$$C/N_0 = P_R/N_0 = P_R/kT, \quad (1)$$

式中: C 为载波信号功率, W; N_0 为噪声功率谱密度, W/Hz; P_R 为接收信号功率, W; k 为玻尔兹曼常数,取 1.38×10^{-23} J/K; T 为噪声温度, K。

多路径误差 $M_{P_{\tau,i}}$ 一般可通过对伪距和载波相位观测值进行组合运算的方式来获取,即

$$M_{P_{\tau,i}} = P_{\tau,i}^s - \frac{f_i^2 + f_j^2}{f_i^2 - f_j^2} L_i + \frac{2f_j^2}{f_i^2 - f_j^2} L_j = P_{\tau,i}^s - \left(\frac{f_i^2}{f_i^2 - f_j^2} L_i - \frac{f_j^2}{f_i^2 - f_j^2} L_j \right) - \frac{2f_j^2}{f_i^2 - f_j^2} (L_i - L_j), \quad (2)$$

式中:上标s代表卫星;下标r代表接收机; i 、 j 为频率编号; $P_{r,i}^s$ 为接收机r对卫星s的第*i*个频率的伪距观测值,m; f_i 、 f_j 分别为第*i*个、第*j*个载波频率,Hz; L_i 与 L_j 分别为第*i*个与第*j*个频率对应的载波相位观测值,m。

数据完整性能客观反映观测数据的连续性特征及整体质量状况,可通过计算实际获取的有效观测历元数*H*与理论预设的历元总数*T*之比来获取,即

$$I = H/T. \quad (3)$$

周跳是载波相位观测值出现的非连续性跳变,当相位变化量超过预设阈值时,即可判定发生了周跳。周跳比为

$$J = 1000S/O, \quad (4)$$

式中,*S*和*O*分别为周跳数和总数据数。

1.2 GNSS精密单点定位模型

双频无电离层组合的观测方程为

$$\begin{cases} P_{r,IF}^s = \rho_r^s + t_r - t^s + m_{r,w}^s Z_{r,w} + b_{r,IF} - b_{IF}^s + e_{r,IF}^s \\ \quad = \alpha_{ij} P_{r,i}^s - \beta_{ij} P_{r,j}^s \\ L_{r,IF}^s = \rho_r^s + t_r - t^s + m_{r,w}^s Z_{r,w} + \lambda_{IF} \\ \quad (N_{r,IF}^s + B_{r,IF} - B_{IF}^s) + \varepsilon_{r,IF}^s = \alpha_{ij} L_{r,i}^s - \beta_{ij} L_{r,j}^s \end{cases}, \quad (5)$$

其中,

$$b_{r,IF} = \alpha_{ij} b_{r,i} + \beta_{ij} b_{r,j}, \quad (6)$$

$$b_{IF}^s = \alpha_{ij} b_i^s + \beta_{ij} b_j^s, \quad (7)$$

$$B_{r,IF} = (\alpha_{ij} \lambda_i B_{r,i} + \beta_{ij} \lambda_j B_{r,j}) / \lambda_{IF}, \quad (8)$$

$$B_{IF}^s = (\alpha_{ij} \lambda_i B_i^s + \beta_{ij} \lambda_j B_j^s) / \lambda_{IF}, \quad (9)$$

$$N_{r,IF}^s = (\alpha_{ij} \lambda_i N_{r,i}^s + \beta_{ij} \lambda_j N_{r,j}^s) / \lambda_{IF}, \quad (10)$$

$$\alpha_{ij} = f_j^2 / (f_i^2 - f_j^2), \quad (11)$$

$$\beta_{ij} = f_i^2 / (f_i^2 - f_j^2), \quad (12)$$

式(5)~式(12)中: $P_{r,IF}^s$ 为双频无电离层组合的伪距观测值,m; $L_{r,IF}^s$ 为双频无电离层组合的载波相位观测值,m; ρ_r^s 为卫星到接收机的几何距离,m; t_r 与 t^s 分别为接收机钟差与卫星钟差,m; $m_{r,w}^s$ 为对流层湿延迟投影函数,采用全球投影函数模型计算; $Z_{r,w}$ 为测站天顶对流层湿延迟,作为随机游走参数在滤波中估计,m; $b_{r,IF}$ 与 b_{IF}^s 分别为接收机端与卫星端无电离层组合的伪距硬件延迟,m; λ_{IF} 为无电离层组合的等效波长,m; $N_{r,IF}^s$ 为整周模糊度,作为浮点常数估计; $B_{r,IF}$ 与 B_{IF}^s 分别为接收

机端与卫星端无电离层组合的载波相位硬件延迟,m; $e_{r,IF}^s$ 与 $\varepsilon_{r,IF}^s$ 分别为无电离层组合伪距和载波相位的观测噪声,m;下标带有IF的参数均为组合项; α_{ij} 与 β_{ij} 为无电离层组合系数; $L_{r,i}^s$ 与 $L_{r,j}^s$ 分别为卫星s第*i*个与第*j*个频率对应的载波相位观测值,m; $b_{r,i}$ 与 b_i^s 分别为频率*i*对应的接收机端与卫星端的伪距硬件延迟,m; $b_{r,j}$ 与 b_j^s 分别为频率*j*对应的接收机端与卫星端的伪距硬件延迟,m; λ_i 与 λ_j 分别为频率*i*与频率*j*对应的载波波长,m; $B_{r,i}$ 与 B_i^s 分别为频率*i*对应的接收机端与卫星端的载波相位硬件延迟,m; $B_{r,j}$ 与 B_j^s 分别为频率*j*对应的接收机端与卫星端的载波相位硬件延迟,m; $N_{r,i}^s$ 与 $N_{r,j}^s$ 分别为频率*i*与频率*j*对应的载波相位模糊度,m。

2 实验验证与结果分析

为形成完整的纬度梯度,有效反映不同纬度下各系统差异,选取全球7个IGS的MGEX测站,其中,北极的3个测站处于典型北极环境,南极的3个测站处于南极洲不同位置,确保对极区环境进行充分采样。测站位置分布见图1。

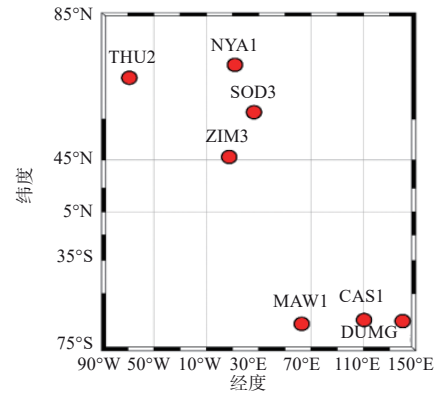


图1 测站位置分布

Fig.1 distribution of survey station positions

选取2025年DOY005—DOY018共14d的观测数据,采样间隔为30s,卫星截止高度角设为10°。不同定位系统下各测站数据质量检核结果见表1,其中,对于BDS系统,MP1、MP2、MP5、MP6、MP7、MP8分别对应B1C、B1I、B2a、B3I、B2b、B2a+b频段的多路径误差;对于GPS系统,MP1、MP2、MP5分别对应L1、L2、L5频段的多路径误差;对于GLONASS系统,MP1、MP2分别对应G1、G2频段的多路径误差;对于Galileo系统,MP1、MP5、MP6、MP7、MP8分别对应E1、E5a、E6、E5b、5Ea+b频段的多路径误差。

表 1 各测站数据质量检核结果
Tab.1 quality verification results from all stations

测站位置	测站	系统	数据完整率/%	各频段多路径误差/cm						周跳比
				MP1	MP2	MP5	MP6	MP7	MP8	
南极	CAS1	BDS	82.00	19.3	32.4	14.7	14.7	18.6		662
		GPS	97.98	29.1	21.2	18.4				253
		GLONASS	95.29	32.0	25.8					343
		Galileo	97.67	22.7		18.3	19.6	18.1	7.5	501
南极	DUMG	BDS	88.37		22.1			28.3		152
		GPS	96.96	4.7	6.7	6.1				148
		GLONASS	94.80	11.5	12.5					115
		Galileo	82.94	4.3		5.1	5.0	4.6		336
南极	MAW1	BDS	89.99	33.7	34.2	31.0	25.5	30.0		300
		GPS	94.10	42.0	41.5	37.8				91
		GLONASS	90.75	42.1	35.7					139
		Galileo	92.85	34.0		33.4	37.8	35.4	13.8	247
内陆	ZIM3	BDS	84.85		37.3		38.0	33.3		492
		GPS	94.27	31.2	32.2	39.9				110
		GLONASS	94.22	45.1	38.6					330
		Galileo	83.71	25.7		40.3		43.7	12.8	44
北极	THU2	BDS	94.07	19.5	31.4	28.3	22.4	24.5		175
		GPS	96.36	23.5	29.4	28.6				93
		GLONASS	96.97	30.8	25.6					177
		Galileo	87.82	15.8		25.1	20.8	20.6	10.5	299
北极	SOD3	BDS	91.84	27.9	39.3	22.0	22.6	27.4	11.5	175
		GPS	94.36	31.8	33.7	25.0				314
		GLONASS	96.33	49.8	44.7					203
		Galileo	87.91	29.5		20.6	28.3	19.4	9.0	259
北极	NYA1	BDS	87.96		33.0		32.6	29.6		196
		GPS	94.02	31.4	27.8	25.3				115
		GLONASS	93.13	33.8	30.8					287
		Galileo	77.57	21.3		24.2	31.8	28.6	11.0	478

由表 1 可知, BDS 在极区多项指标表现突出, 大部分测站数据完整率超过 85%, SOD3 与 THU2 测站的数据完整率甚至高于 90%。B2a+b 与 B1C 在抗多路径误差与抗干扰方面显著优于 B1I 与 B3I, 北极周跳比显著低于南极。高频段所呈现的低多路径误差特性, 验证了它在抗信号反射方面的优势。Galileo 数据完整率普遍较低, GLONASS 与 GPS 虽然在数据接收方面表现稳定, 但多路径误差较大, BDS 高频段在抗多路径误差方面的优势更为显著。这是由于 BDS 的 IGSO 卫星对北极具备高仰角覆盖优势, 而南极依赖 MEO 卫星, 高度角偏低, 且北极以海冰为主, 反射面相对均匀, 而南极地形复杂, 信号反射与干扰加剧。低仰角遮挡与电离层闪烁是诱发周跳的主要因素, BDS 在周跳控制方面表现更优。整体来看, BDS 因其星座构型与高频信号优势, 在极区复杂环境下展现出卓越的稳定性与可靠性。各站点情况见表 2。

表 2 各测站可见卫星数和位置精度因子
Tab.2 number of visible satellites and PDOP for each station

测站位置	系统	可见卫星颗数	PDOP
南极	BDS	7~11	2.75~3.82
	GPS	9~10	2.83~2.94
	GLONASS	6~8	3.21~3.42
	Galileo	8	2.45~3.37
内陆	BDS	6	3.38
	GPS	7	2.58
	GLONASS	6	3.47
	Galileo	8	2.39
北极	BDS	11~13	1.89~2.15
	GPS	9	2.54~2.68
	GLONASS	7~8	2.91~3.25
	Galileo	7~8	2.58~2.69

由表 2 可知, BDS 在北极地区定位性能最佳, 在南极地区定位性能相对较弱, 可见卫星数和 PDOP 出现明显波动, 存在明显的纬度依赖性和覆盖不均问题。GPS 全球定位稳定性最优, 整体性能最佳。

GLONASS 在极地的定位性能优于内陆, 这与 GLONASS 具有较高的卫星轨道倾角有关。Galileo 可见卫星数稳定, PDOP 持续维持良好的水平。

不同定位系统和频段下各测站连续 14 d 的信噪比平均值见图 2。BDS 的 B2a+b 与 B2b 频段表现最佳, 大部分测站的信噪比平均值均大于 40 dB, 但存在地域覆盖限制。GPS 的 L5 频段优于 L1 与

L2, 展现出高频段优势。GLONASS 各频段的信噪比平均值均大于 40 dB, 且在北极的信号稳定性优于南极。Galileo 各频段均衡可靠, 其中, E5a+b 频段与 BDS 的 B2a+b 频段性能相当。整体来看, BDS 的 B2a+b 频段表现优异但覆盖有限, GPS 的 L5 频段信号强度最高, GLONASS 信号稳定性呈现纬度差异, Galileo 覆盖均衡。

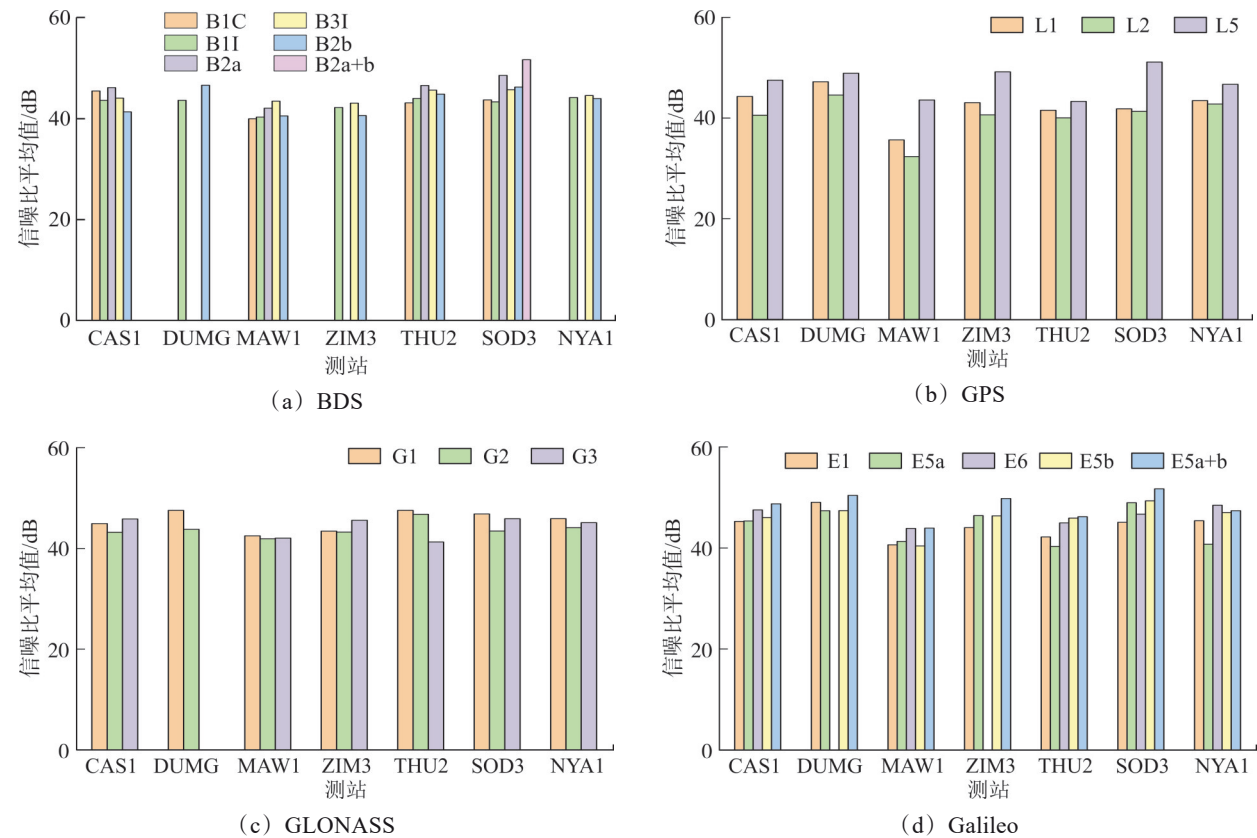


图 2 不同定位系统和频段下各测站连续 14 d 的信噪比平均值

Fig.2 average value of SNR of each station over 14 consecutive days under different positioning systems and frequency bands

为分析极地 PPP 定位性能, 选取极区 SOD3 与 CAS1 测站开展对比实验。取 2025 年 DOY005—DOY018 的观测数据进行 PPP 解算, 评估 BDS、

GPS、GLONASS 和 Galileo 的精密单点定位精度, 并进行均方根误差 (RMS) 统计。PPP 处理策略见表 3。

表 3 PPP 处理策略
Tab.3 PPP processing strategy

类别		处理策略	类别		处理策略
系统采样率	BDS、GPS、GLONASS、Galileo取 30 s		参数估计方法	卡尔曼滤波	
截止高度角	取 10°		定位模式	动态	
卫星轨道和时钟产品	WHU精密卫星轨道和钟差产品		模糊度固定	浮点解算估计	
对流层延迟	Saastamoinen		卫星天线相位中心校正	igs20.atx	
电离层延迟	IF				

考虑到南极测站中 DUMG 仅支持 B1I 与 B2I 频段, MAW1 的多路径误差较大; 北极测站中, 与 NYA1、THU2 相比, SOD3 具备更多频段, 且多路径误差与周跳比相当, 故南极、北极测站分别选取 CAS1、SOD3 进行 IF 双频 PPP 解算。不同定位系统下 CAS1 和 SOD3 测站的定位偏差分别见图 3、

图 4。各定位系统动态 PPP 收敛后, 滤波结果稳定性较好, 在 E、N、U 方向均能实现厘米级的定位精度。不同定位系统下, 两测站的定位结果变化趋势基本一致。在极区环境下, 受限于是星座规模, GLONASS 与 Galileo 可见卫星数较少, 且空间几何构型强度较弱, 导致定位结果在达到收敛

状态后仍有可能发散。GLONASS与Galileo在两个测站E、N、U方向的平均定位偏差分别为0.047 m、0.033 m、0.069 m和0.056 m、0.072 m、0.068 m。BDS由于卫星数量充足且分布合理,在极区仍能

保持较高的定位精度,在E、N、U方向的平均定位偏差可达到0.022 m、0.032 m、0.057 m。GPS在极区的定位性能与BDS相近,在E、N、U方向的平均定位偏差为0.051 m、0.009 m、0.049 m。

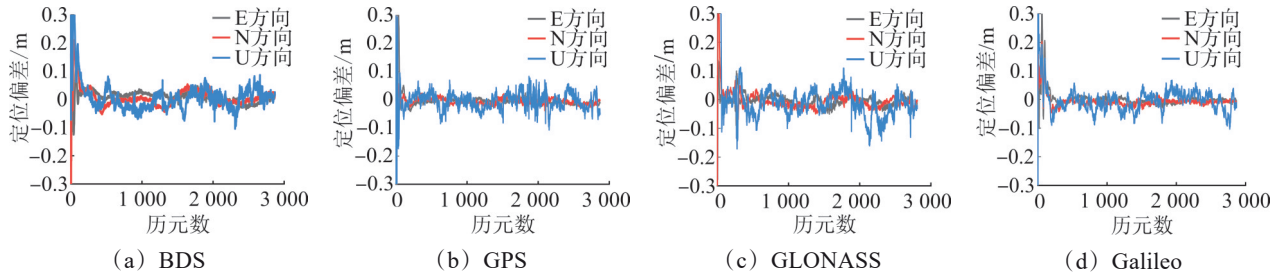


图3 CAS1测站的定位偏差

Fig.3 positioning deviation at CAS1 station

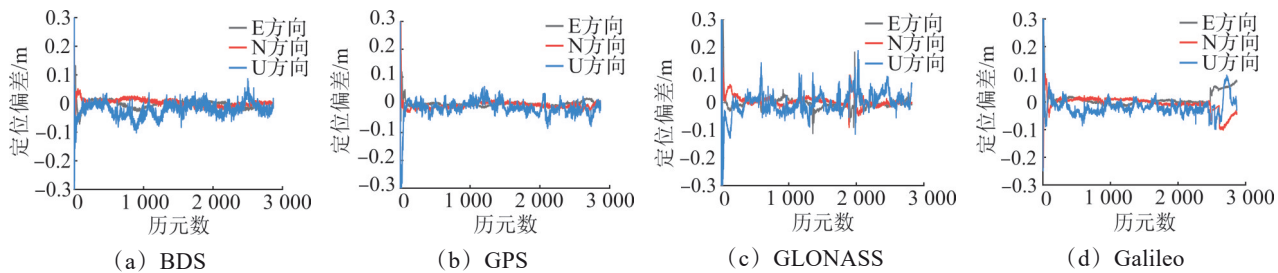


图4 SOD3测站的定位偏差

Fig.4 positioning deviation at SOD3 station

依据表3的PPP处理策略实施解算后,将解算结果与SINEX文件中的真值坐标作差,当E、N、U方向连续10个观测历元的定位偏差均未超过0.1 m时,认为定位结果达到收敛状态,达到收敛状态

所需的时间即为收敛时间。对各系统不同频段收敛后连续14 d的定位结果进行分析,统计RMS的平均值,结果见图5。

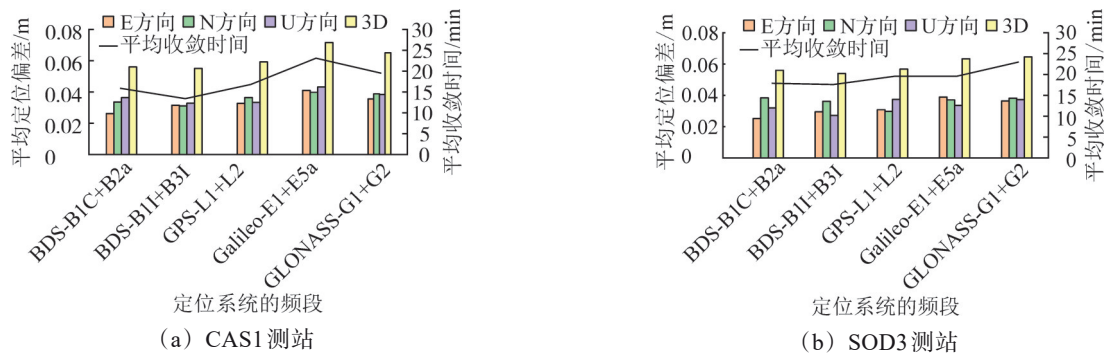


图5 CAS1与SOD3测站收敛后的平均定位偏差及平均收敛时间

Fig.5 average positioning deviation after convergence and average convergence time at CAS1 and SOD3 stations

由图5可知,在E方向,B1C+B2a定位性能最优,E1+E5a定位性能最差。在N、U方向,B1I+B3I在大部分区域表现最佳,E1+E5a、L1+L2分别在南极、北极表现较差。在收敛速度方面,B1I+B3I在两极收敛速度最快,其三维RMS也最低。在极区测站中,BDS与GPS的平均收敛时间与三维平均RMS相当,BDS略优于GPS。

不同频段组合下极地与内陆测站平均定位偏差与平均收敛时间见图6。由于内陆测站仅支持

B1I、B2I和B3I频段,因此图6(a)未显示B1C+B2a的定位结果。由图6可知,在极区,B1C+B2a在E方向表现最优,验证了高频信号在抗多路径误差方面的有效性。在内陆,B1I+B3I表现更优。在N方向,B1I+B3I在所有区域表现最优,E1+E5a的定位偏差较大,反映了Galileo在极区几何构型上的不足。在U方向,B1I+B3I在北极因高仰角卫星覆盖和稳定的电离层条件表现最优,L1+L2在内陆表现最优,B1C+B2a在南极表现最优,G1+G2受

冰面反射影响,定位偏差较大。在三维RMS方面,BDS在所有区域均表现最佳,在南极,B1C+B2a表现最优,在北极和内陆,B1I+B3I表现最优。BDS在极区的收敛速度显著快于内陆地区。在动态

精密单点定位模式下,BDS在南极与北极的定位精度相当,且均稳定维持在厘米范围内,但在北极测站的收敛速度显著快于内陆及南极测站。

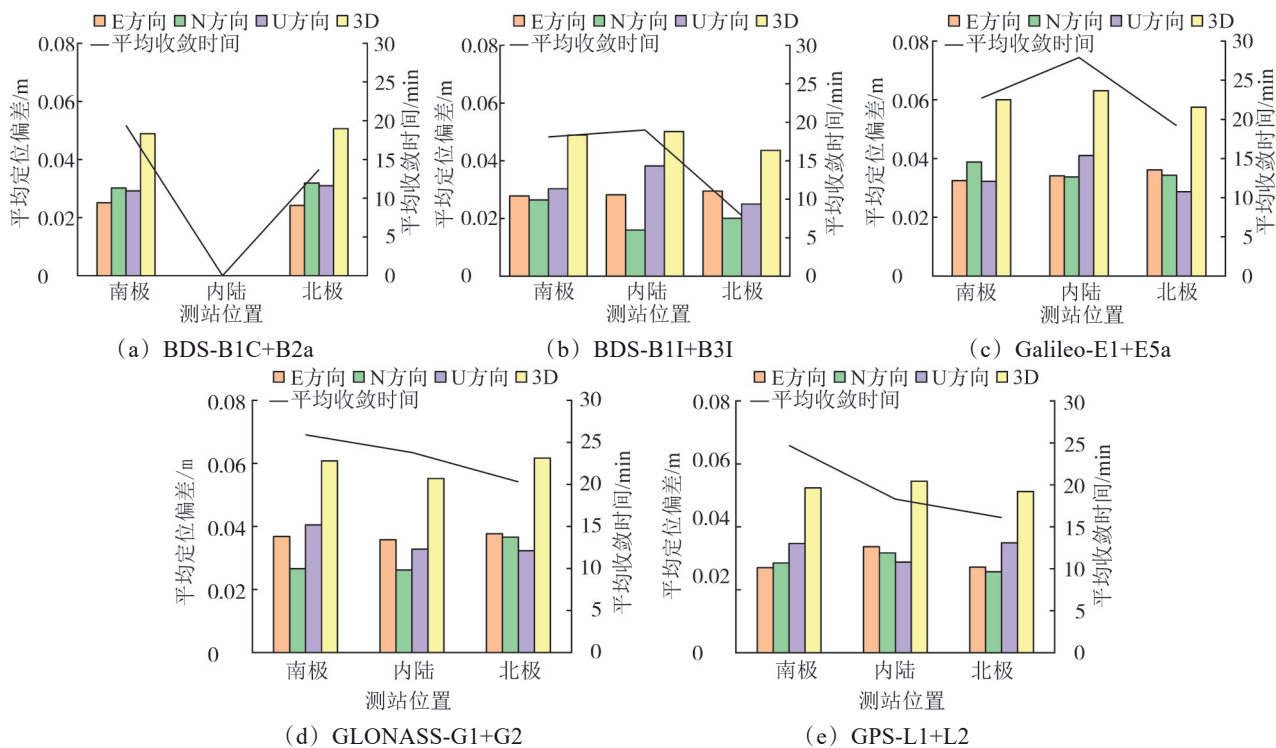


图6 不同频段组合下极地与内陆测站平均定位偏差与平均收敛时间

Fig.6 average positioning deviation and average convergence time of polar and inland stations under different frequency band combinations

3 结论

选取7个MGEX测站连续14 d的观测数据,从数据完整率、多路径误差、定位精度等方面评估BDS的数据质量与定位性能,得出如下结论。

(1) BDS整体稳定性较好,高频段抗反射性能优异;Galileo数据完整率普遍偏低,极区环境易引发周跳;GLONASS数据完整率较高且周跳较少,但多路径误差较大;GPS在极区的数据质量较好。

(2) BDS在北极优势显著,在南极表现较弱且纬度依赖性明显;GPS全球稳定性最优;GLONASS极地性能优于内陆;Galileo稳定性良好,PDOP较为稳定。

(3) 各定位系统高频段表现突出。BDS的B2a+b和B2b信噪比最高,但地域覆盖有限;GLONASS信号稳定性呈纬度差异;Galileo频段均衡可靠;GPS的L5频段最优。

(4) 动态定位模式下,南极与北极的定位精度相当,在北极的收敛速度显著快于南极和内陆。在E方向上,极地BDS高频组合表现最优,验证

了其在抗多路径误差方面的优势;在N、U方向上,区域最优频段各异,在南极Galileo组合误差最大。在北极B1I+B3I收敛最快。

本研究仅基于连续14 d观测数据,测站数量有限,且未考虑季节、极端天气对定位性能的影响,可能对结果的普适性带来一定影响。未来可从以下方面深入研究:一是延长观测时长,分析定位性能的年际与季节变化;二是分析极端天气对信号质量与定位性能的影响;三是增加极地测站数量;四是研发多频多系统深度融合新模型,进一步提升极区复杂环境下的定位精度。

参考文献(References):

- [1] 杨元喜,徐君毅.北斗在极区导航定位性能分析[J].武汉大学学报·信息科学版,2016,41(1):15-20.
YANG Yuanxi, XU Junyi. Navigation performance of BeiDou in polar area[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2016, 41(1): 15-20.
- [2] 杜彦君,贾小林,姚顽强,等.极地地区北斗三号单点定位精度分析[J].大地测量与地球动力学,2022,42(9):914-918.
DU Yanjun, JIA Xiaolin, YAO Wanqiang, et al. Analysis of single point positioning accuracy of BDS-3 in polar regions[J]. Journal of

- Geodesy and Geodynamics,2022,42(9):914-918.
- [3] 胡伟建,卢立果,艾志.极地区域BDS及其组合系统服务性能仿真分析[J].东华理工大学学报(自然科学版),2025,48(1):63-72.
HU Weijian, LU Liguang, AI Zhi. Services performance simulation analysis of BDS and its combination system in polar regions[J]. Journal of East China University of Technology (Natural Science), 2025,48(1):63-72.
- [4] 祝会忠,白云鹏.北斗三号高精度载波相位差分定位算法[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2024,43(5):593-599.
ZHU Huizhong, BAI Yunpeng. Beidou-3 high-precision carrier phase difference positioning algorithm[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science),2024,43(5):593-599.
- [5] GUAN X G, CHAI H Z, XIAO G R, et al. Signal quality analysis and quality check of BDS3 Precise Point Positioning in the Arctic Ocean [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2022,41(2):166-179.
- [6] 赵建,安家春,艾松涛,等.北斗三号系统在环南极地区的信号质量与基本定位服务性能分析[J].极地研究,2021,33(3):337-350.
ZHAO Jian, AN Jiachun, AI Songtao, et al. Analysis of BDS-3 signal quality and basic positioning service around Antarctica[J]. Chinese Journal of Polar Research, 2021,33(3):337-350.
- [7] LOU Y D, LI X J, ZHENG F, et al. Assessment and impact on BDS positioning performance analysis of recent BDS IGS0-6 satellite[J]. Journal of Navigation, 2018,71(3):729-748.
- [8] 王格,王宁波,李子申,等.地磁暴期间北半球高纬度地区电离层变化特征及对精密定位的影响[J].空间科学学报, 2021,41(2):261-272.
WANG Ge, WANG Ningbo, LI Zishen, et al. Impact of geomagnetic storms on ionosphere variability and precise point positioning application in high latitudes of the Northern Hemisphere[J]. Chinese Journal of Space Science, 2021,41(2):261-272.
- [9] 姚翔,陈明剑,李滢,等.极地BDS精密单点定位性能分析[J].导航定位学报,2018,6(4):57-63.
YAO Xiang, CHEN Mingjian, LI Ying, et al. Performance analysis on polar BDS PPP[J]. Journal of Navigation and Positioning, 2018,6(4):57-63.
- [10] 杜玉军,王泽民,安家春,等.北斗系统在远洋及南极地区的定位性能分析[J].极地研究,2015,27(1):91-97.
DU Yujun, WANG Zemin, AN Jiachun, et al. Positioning analysis of BeiDou navigation satellite system over ocean and Antarctic regions[J]. Chinese Journal of Polar Research, 2015,27(1):91-97.
- [11] 徐伟,贾雪,乔方,等.北斗在南/北极地区的基本定位性能评估[J].大地测量与地球动力学,2018,38(12):1268-1273.
XU Wei, JIA Xue, QIAO Fang, et al. Preliminary assessment of positioning performance of BDS navigation system in north and south polar regions[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2018,38(12):1268-1273,1284.
- [12] CHEN H, LIU X X, JIANG W P, et al. Preliminary analysis and evaluation of BDS-2/BDS-3 precise point positioning[J]. Advances in Space Research, 2021,68:4113-4128.
- [13] LI J L, YANG Y X, HE H B, et al. Benefits of BDS-3 B1C/B1I/B2a triple-frequency signals on precise positioning and ambiguity resolution[J]. GPS Solutions, 2020,24:100.
- [14] 刘九龙,曹月玲,胡小工.北斗三号系统中轨道地球卫星伪距多路径误差分析和改正[J].国防科技大学学报,2021,43(4):1-8.
LIU Jiulong, CAO Yueling, HU Xiaogong. Analysis and correction of BDS-3 MEO satellites pseudorange multipath error[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2021,43(4):1-8.
- [15] 陈永贵,朱玉香.北极地区BDS-3伪距单点定位精度分析[J].全球定位系统,2020,45(4):114-118.
CHEN Yonggui, ZHU Yuxiang. Accuracy analysis of BDS-3 pseudo-range single-point positioning in the Arctic[J]. GNSS World of China, 2020,45(4):114-118.
- [16] 刘洋,柴洪洲,王敏,等.北极地区BDS观测量特性分析与动态定位性能评估[J].大地测量与地球动力学,2025,45(6):555-561.
LIU Yang, CHAI Hongzhou, WANG Min, et al. BDS observations characteristics and assessment of dynamic positioning performance in the Arctic region[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2025,45(6):555-561.
- [17] 董彪,陈健,赵兴旺,等.BDS-3多频无电离层组合单点定位模型及评估[J].导航定位学报,2025,13(5):144-154.
DONG Biao, CHEN Jian, ZHAO Xingwang, et al. Modeling and evaluation of BDS-3 multi-frequency single point positioning based on ionosphere-free combinations[J]. Journal of Navigation and Positioning, 2025,13(5):144-154.
- [18] 毛文斌,晏昊,许军明,等.东南极BDS-3新频率PPP连续性分析与应用[J].测绘通报,2025(8):13-18.
MAO Wenbin, YAN Hao, XU Junming, et al. Analysis and application of BDS-3 new frequency PPP continuity in East Antarctica[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2025(8):13-18.
- [19] WANG M H, WANG J X, DONG D N, et al. Performance of BDS-3: satellite visibility and dilution of precision[J]. GPS Solutions, 2019,23(2):56.
- [20] ZHAO J, AN J C, WANG Z M, et al. Signal quality and positioning performance of GPS/BDS-3/GLONASS/Galileo in polar regions [J]. Advances in Space Research, 2022,69:2541-2554.
- [21] 何义磊.多GNSS间系统偏差建模与预报方法研究[D].徐州:中国矿业大学,2019:23.
- [22] 李军,王继业,熊熊,等.东北亚地区GPS观测数据质量检测和分分析[J].武汉大学学报·信息科学版,2006,31(3):209-212.
LI Jun, WANG Jiye, XIONG Xiong, et al. Quality checking and analysis on GPS data in Northeast Asia[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2006,31(3):209-212.