DOI: 10.12265/j.gnss.2020120301

BDS-3/GPS 在遮挡环境下定位性能分析

杨毅1,胡洪1,解雪峰2,田香勇1

(1. 安徽大学 资源与环境工程学院,合肥 230601;2. 中国矿业大学 环境与测绘学院,江苏 徐州 221116)

摘 要:针对在全球卫星导航系统 (GNSS) 信号易遮挡地区,单一系统可见卫星数较少,定 位性能不理想甚至难以满足定位需求的问题,分析北斗三号 (BDS-3) 在不同区域遮挡环境下对 定位性能的改善.通过全球不同区域 MGEX(Multi-GNSS Experiment) 监测站的观测数据,采用 GPS、BDS-3、BDS-3/GPS 组合定位三种模式,在不同模拟遮挡环境下进行伪距单点定位,分析了 各模式下可见卫星颗数、历元利用率、几何精度衰减因子 (GDOP) 值和定位精度.结果表明:在 北半球区域,相较于其他方向遮挡, GPS 模式在低纬度地区南面遮挡的定位稳定性和精度最高, 在中高纬度地区北面遮挡的定位稳定性和精度最高, BDS-3 和 BDS-3/GPS 组合模式在低纬度地 区各方向遮挡定位精度相当,在中纬度和中高纬度地区,北面遮挡的精度明显优于其他方向遮 挡的定位精度.BDS-3/GPS 组合定位模式,大大增加了可见卫星颗数,历元利用率提高,卫星空 间几何结构改善, GDOP 值降低,稳定性和定位精度明显优于单系统.

关键词:北斗三号 (BDS-3);全球定位系统 (GPS);组合定位;遮挡环境;几何精度衰减因子 (GDOP); 定位精度

中图分类号:P228.4 文献标志码:A

文章编号:1008-9268(2021)03-0104-07

0 引 言

全球卫星导航系统 (GNSS)已成为人们获取位 置和时间信息的重要手段,具备全球性、全天候、高 精度的导航定位能力.但是在城市、峡谷、建筑物密 集区、边坡、山区等信号易遮挡地区,单系统可见卫 星颗数较少^[1],定位精度及连续性等性能都会有所下 降^[2].北斗卫星导航系统 (BDS)是我国自主建设、独 立运行的全球卫星导航系统.2020年6月23日9时 43分,北斗三号 (BDS-3)最后一颗全球组网卫星在 西昌卫星发射中心成功发射,至此 BDS-3星座部署 全面完成.BDS-3系统包括24颗中圆地球轨道 (MEO)卫星,3颗倾斜地球同步轨道(IGSO)卫星和 3颗地球静止轨道(GEO)卫星,创新性地采用 GEO/IGSO/MEO三种轨道混合星座.BDS与GPS具 有良好的兼容性与互操作性,组合定位可以增加可见 卫星数,改善卫星空间几何结构,提高定位的稳定性

收稿日期:2020-12-03 资助项目:国家自然科学基金青年基金项目(41704036) 通信作者:胡洪 E-mail: huhong@ahu.edu.cn 和精度. BDS 与 GPS 的组合定位也将是未来 GNSS 的重要发展方向^[3].

国内外学者对 BDS 和 GPS 伪距单点定位进行 了大量研究,基于国际 GNSS 监测评估系统 (iGMAS) 观测值数据和多星座实验 MGEX(Multi-GNSS Experiment) 监测 网 的数据^[4-5],分析了 GPS、BDS-3 及 BDS-3/GPS 组合伪距单点定位性能^[6-8],不同区域的 定位精度变化^[9],以及不同遮挡环境下定位精度的对 比^[10],论证了遮挡环境下组合定位可有效提高定位 的稳定性和精度.然而,以上研究仅限于 BDS-3 部分 卫星,并且在遮挡环境下的测站较少,分布区域过于 单一. 2020 年 BDS-3 组网成功, BDS-3 全部星座参与 定位的性能有待研究.本文基于全球 9 个 MGEX 跟 踪站数据,分析了 BDS-3/GPS 组合定位在不同遮挡 情况下,对卫星可见性、历元利用率、几何精度衰减 因子 (GDOP) 和定位精度的改善.

1 伪距单点定位原理

由于具有解算速度快、无需考虑整周模糊度等 优点,伪距单点定位在实际中得到了广泛的应用^[11]. 伪距组合定位的基本思想是将两种导航定位系统的 伪距观测值及相关误差放在一起进行联合平差解算^[12]. BDS 和 GPS 伪距单点定位的观测方程为如下:

$$\rho_{i} = \sqrt{\left(X_{i}^{\mathrm{S}} - X\right)^{2} + \left(Y_{i}^{\mathrm{S}} - Y\right)^{2} + \left(Z_{i}^{\mathrm{S}} - Z\right)^{2}} + I_{i} + T_{i} + cV_{t^{\mathrm{R}}}^{\mathrm{C}} - cV_{t^{\mathrm{S}}}^{i}, i = 1, 2, \cdots, m.$$
(1)

$$\rho_{j} = \sqrt{(X_{j}^{S} - X)^{2} + (Y_{j}^{S} - Y)^{2} + (Z_{j}^{S} - Z)^{2}} + I_{j} + T_{j} + cV_{t^{R}}^{G} - cV_{t^{S}}^{j}, j = 1, 2, \cdots, n.$$
(2)

式中:下标*i、j*分别为 BDS、GPS 卫星序号,(*X^s*,*Y^s*,*Z^s*) 为卫星坐标;*I*为电离层延迟改正;*T*为对流层延迟改 正;*c*为真空中光速;*V^c*和*V^G*为 BDS 和 GPS 接收机 钟差,*V_s*为卫星钟差.BDS 和 GPS 采用北斗时(BDST) 和 GPS 时 (GPST),二者均采用原子时时间基准,但 由于协调世界时(UTC) 闰秒,BDST 与 GPST 之间需 考虑 14 s 的偏差.BDS 系统采用 2000 中国大地坐标 系 (CSCD2000)^[13], GPS 采用 WGS-84 坐标系,二者 的差异在 cm 级别^[14], 伪距单点定位精度在 m 级,所 以可以忽略该差异.

假设接收机的近似坐标为 (*X*₀,*Y*₀,*Z*₀), 将式 (1)、 式 (2) 在 (*X*₀,*Y*₀,*Z*₀) 处泰勒级数展开得到公式如下:



根据最小二乘原理可得

$\hat{\boldsymbol{x}} = (\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{P} \boldsymbol{B})^{-1} \boldsymbol{B}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{P} \boldsymbol{L}.$ (4)

式中:*l、m、n*为测站至卫星的方向余弦;*B*为系数矩 阵;*s*为待估未知数参数;*L*为常数矩阵;*P*为观测权矩 阵.通过给定的阈值进行迭代算法计算出改正数,再把 参数初始值加上改正数,即可得到接收机的坐标.单系 统含有三个坐标差参数和一个接收机钟差参数,至少 需要4颗卫星可以解算,双系统有3个坐标差参数和 2个接收机钟差参数,至少需要5颗卫星可以解算.

2 数据处理与精度分析

2.1 数据采集

本文采用 9 个 MGEX 站 2020 年年积日为 223 的数据,采样间隔为 30 s,所选测站能够接收 BDS 和 GPS 的信号,并且南北半球、东西半球各有分布,以确 保结论具有普适性.在北半球区域,测站呈现低纬度、 中纬度和中高纬度分布,以此来分析在不同纬度地区 遮挡环境下的定位性能,具体测站分布情况如图 1 所示:



图 1 所选 MGEX 站全球分布图

对数据进行伪距单点定位处理,截止高度角设为 15°, 电离层延迟改正采用 Klobuchar 模型^[13, 15-16],

对流层延迟改正采用 Saastamoinen 模型,观测值定权 采用高度角定权模型.

2.2 处理方案

本文设计不同方位的遮挡和不同高度的遮挡,剔除遮挡部分的卫星后进行定位解算,模拟多种遮挡环境.根据方位角遮挡分为:北面遮挡(270°N~360°N和0°N~90°N),东面遮挡(0°E~180°E),南面遮挡(90°S~270°S),西面遮挡(180°W~360°W);根据高度角遮挡分为:高度角遮挡 80°为严重遮挡,高度角遮挡 60°为中等遮挡,高度角遮挡 40°为轻度遮挡.因此,每个测站共有12种遮挡情况.在不同遮挡情况下,使用 GPS、BDS-3和 BDS-3/GPS 组合定位三种模式,对WUH2、CUSV、PIMO、GUAM、ULAB、FFMJ、WARN、STHL、KRGG测站 2020年年积日为 223的观测数据进行定位处理,对定位结果从可用历元数、可见卫星颗数、GDOP 值和位置精度均方根(RMS)值进行比较分析.

2.3 结果分析

卫星导航系统在准确性和可用性方面的性能与 卫星数量以及卫星空间几何结构有很强的相关性, GDOP 值能够反映卫星几何结构, GDOP 值越低, 卫 星空间几何结构越优^[17]. 以 WUH2 站北面轻度遮挡为 例, 图 2、图 3 分别分析了在 GPS、BDS-3、BDS-3/GPS 三种模式下的可见卫星颗数和 GDOP 值.



由图 2 可知, GPS 可见卫星数为 4~7 颗, BDS-3 的可见卫星数为 7~11 颗, BDS-3 可见卫星颗数多

于 GPS, 是因为亚太地区 BDS-3 有 GEO 与 IGSO 卫 星, 增加了 BDS-3 系统的可见卫星颗数, BDS-3/ GPS 可见卫星数为 11~18 颗, 确保了有充足的可见 卫星颗数参与定位. 由图 3 可知, BDS-3 的 GDOP 值 略低于 GPS, 但有些历元波动较大, BDS-3/GPS 的 GDOP 值较稳定, 维持在 5 颗以内, 卫星空间几何结 构明显优于单系统.

图 4~图 7 为 GPS、BDS-3、BDS-3/GPS 三种模 式下在东 (E)、北 (N)、天 (U) 方向上偏差和位置偏差 序列图, GPS模式下 E、N、U方向上偏差达到 5.6 m、 3.5 m 和 12.2 m; BDS-3 模式下 E、N、U方向上偏差 达到 2.3 m、2.3 m和 8.2 m; BDS-3/GPS 组合模式下 E、 N、U方向上值偏差达到 2.0 m、1.5 m 和 5.7 m, BDS-3/ GPS 组合定位精度优于 BDS-3, BDS-3优于 GPS, 在 位置偏差上 BDS-3/GPS 的组合定位稳定性和精度同 样最高, 达到 6 m.





为了进一步分析不同遮挡情况下三种模式的定位性能,模拟 WUH2 测站分别在 N、E、S、W 四个方向遮挡下严重遮挡、中等遮挡和轻度遮挡等 12 种情况,分析了可用历元数、可见卫星颗数、GDOP 值和位置精度的 RMS 值如表 1 所示.

遮挡情况/(°)		GPS				BDS-3			BDS-3/GPS			
	历元数	平均卫星颗数	GDOP	RMS/m	历元数	平均卫星颗数	GDOP	RMS/m	历元数	平均卫星颗数	GDOP	RMS/m
N40	2 643	5.3	6.02	3.79	2 880	8.7	4.26	2.47	2 880	13.8	2.80	2.07
N60	1 663	4.5	8.08	5.87	2 880	7.3	5.78	2.72	2 880	11.2	3.77	2.19
N80	746	4.2	9.86	6.31	2 873	6.0	9.52	5.25	2 880	9.0	4.87	2.98
E40	2 665	5.0	7.25	4.96	2 880	8.3	4.26	2.60	2 880	13.2	2.97	2.40
E60	1 685	4.4	10.20	7.95	2 871	6.3	7.49	3.88	2 880	10.2	4.75	3.13
E80	797	4.3	11.27	10.15	2 581	5.4	9.41	5.78	2 880	8.5	6.24	4.68
S40	2 696	5.3	6.10	4.10	2 880	7.5	4.28	2.84	2 880	12.6	2.78	2.22
S60	2 187	4.6	7.65	5.61	2 4 3 8	5.3	9.57	4.34	2 880	9.4	4.36	2.86
S80	1 667	4.5	8.43	6.26	1971	4.5	11.02	5.49	2 864	8.1	5.68	5.26
W40	2 744	5.4	6.43	3.83	2 880	7.8	4.13	2.54	2 880	13.1	2.82	2.03
W60	2 008	4.5	10.93	7.34	2 880	6.1	6.65	3.75	2 880	10.3	4.06	2.69
W80	1 330	4.4	12.12	8.58	2 368	5.1	9.18	5.03	2 880	8.6	5.51	5.03

表1 WUH2 站不同遮挡情况定位分析

由表1可知,40°N表示北面轻度遮挡,即剔除方 位角在 270°N~360°N 和 0°N~90°N 范围内, 高度角 低于 40°的卫星后参与解算. 任一方向遮挡情况下, 随着遮挡高度的增加,可见卫星颗数减少,GDOP 值 增加,可用历元数减少,定位精度显著降低. GPS模 式在北面和南面遮挡精度较高,位置精度 RMS 值优 于7m; BDS-3模式的历元利用率和可见卫星颗数较 GPS 有明显提高, GDOP 值下降, 位置精度 RMS 值 优于 6 m; BDS-3/GPS 组合定位模式, 大大增加了可 见卫星颗数,即使在严重遮挡时,基本能保证8颗以 上的可见卫星颗数,可解算历元在遮挡严重时也能达 到 98% 的利用率, 在中等遮挡和轻度遮挡趋于 100%. 可见卫星颗数严重影响卫星空间几何结构和 GDOP 值, 组合系统随着可见卫星颗数的增加, GDOP 值降低, 位置精度 RMS 值优于 5.5 m, 稳定性 和精度都明显优于单系统.

由于篇幅原因,表1~表4列出了在纬度上具有 代表性的WUH2、STHL、CUSV和ULAB4个测站 处理结果.亚太地区的测站能够较完整的接收BDS-3 的卫星,而非亚太地区测站由于接收机未及时更新以 及测站位置所限制,无法完整接收到BDS-3的GEO 与IGSO卫星信号,因此该4个测站的BDS-3模式 只有MEO卫星参与解算.

由于 GEO 与 IGSO 卫星不可见, 非亚太地区的 测站 BDS-3 模式相对于亚太地区测站, 可见卫星颗 数降低, 历元利用率下降, GDOP 值上升, 定位精度明 显下降, 但总体上略优于 GPS; BDS-3/GPS 组合模式 相对于 BDS-3 单系统定位精度显著提高, 相对于亚 太地区测站 BDS-3/GPS 组合模式精度略微降低. 因 此, 遮挡情况下 BDS-3 的 GEO 和 IGSO 卫星促进了 定位性能的提高, 尤其是 BDS-3 单系统定位性能显 著提高.

遮挡情况/(°)		GPS		BDS-	3		BDS-3/GPS					
	历元数	平均卫星颗数	GDOP	RMS/m	历元数	卫星平均数	GDOP	RMS/m	历元数	平均卫星颗数	GDOP	RMS/m
N40	2 759	5.8	5.27	3.73	2 633	4.8	8.11	3.44	2 880	10.5	3.01	2.30
N60	2 468	5.1	6.66	5.30	1814	4.2	12.00	4.47	2 880	8.9	3.93	3.20
N80	2 268	4.7	7.56	6.29	1 174	4.0	13.46	5.98	2 877	8.1	4.78	3.58
E40	2 740	5.6	6.06	4.57	2 498	4.7	8.25	3.61	2 880	10.1	3.14	2.50
E60	2 2 5 3	4.7	8.25	7.11	1 571	4.2	10.42	3.99	2 880	8.1	4.46	4.43
E80	1 720	4.4	9.12	8.20	891	4.1	10.48	4.48	2 880	7.2	5.16	5.84
S40	2 654	5.5	6.67	5.25	2 300	4.7	8.09	3.63	2 880	9.8	3.07	2.24
S60	1 680	4.7	9.56	8.03	831	4.0	11.04	5.90	2 839	7.2	4.99	3.45
S80	1 165	4.4	9.98	8.59	318	4.0	11.93	8.09	2 755	6.4	5.66	4.55
W40	2 824	5.6	5.94	3.79	2 4 3 0	4.7	8.13	3.92	2 880	10.1	3.26	2.56
W60	2 248	4.7	7.08	5.88	1 455	4.2	10.01	4.76	2 880	8.0	4.37	3.78
W80	1 971	4.4	7.19	6.32	688	4.0	10.46	5.23	2 863	7.2	5.26	5.34

表 2 STHL 站不同遮挡情况定位分析

表 3 CUSV 站不同遮挡情况定位分析

) 由北北北1/100		GPS		BDS-	3		BDS-3/GPS					
题扫痕优/(*)	历元数	平均卫星颗数	GDOP	RMS/m	历元数	卫星平均数	GDOP	RMS/m	历元数	平均卫星颗数	GDOP	RMS/m
N40	2 690	5.3	7.15	5.61	2 880	8.9	3.63	1.96	2 880	14.1	2.48	1.66
N60	1858	4.6	9.40	6.73	2 880	7.1	5.88	2.31	2 880	11.2	3.76	2.09
N80	1 287	4.3	9.02	6.05	2 849	6.4	7.03	2.65	2 880	9.9	4.14	2.34
E40	2 689	5.5	6.50	4.82	2 880	8.8	3.07	1.82	2 880	14.2	2.27	1.79
E60	2 087	4.8	8.21	7.44	2 779	6.3	5.58	2.72	2 880	10.6	3.39	2.52
E80	1 615	4.6	8.33	7.18	2 655	5.3	7.38	3.32	2 880	9.1	3.90	3.20
S40	2 801	5.7	5.93	3.36	2 880	8.8	3.76	2.01	2 880	14.4	2.50	1.86
S60	2 517	4.9	7.71	4.78	2 866	6.5	6.78	2.59	2 880	11.2	3.47	2.10
S80	2 199	4.7	8.40	6.33	2 438	5.2	10.34	4.00	2 880	9.3	4.39	2.62
W40	2 610	5.6	5.99	3.78	2 880	8.9	3.91	2.01	2 880	14.3	2.54	1.70
W60	1 999	4.9	7.29	5.96	2 880	7.4	4.68	2.20	2 880	11.8	3.03	1.91
W80	1 764	4.5	7.96	8.03	2 823	6.2	6.05	2.79	2 880	10.0	3.57	2.10

由表 3 可知, CUSV 测站 GPS 模式南面遮挡的 稳定性和精度最高, 优于 6.5 m, 而 BDS-3 和 BDS-3/ GPS 组合模式各方向遮挡精度相当, 并无明显差异; WUH2 测站 GPS 模式北面与南面遮挡精度较高, 优 于 6.5 m, BDS-3 模式北面遮挡的精度略优于其他方 向遮挡的精度, 优于 5.5 m, BDS-3/GPS 组合模式北 面遮挡的精度略优于其他方向遮挡的精度, 优于 3 m; ULAB 测站 GPS、BDS-3、BDS-3/GPS 三种模式下, 北面遮挡的定位精度都明显优于其他方向遮挡的精 度,GPS 优于 6 m, BDS-3 优于 4 m, BDS-3/GPS 组合 优于 3 m. PIMO、GUAM 站的结论与 CUSV 类似, WARN、FFMJ 的数据与 ULAB 站的结论类似,因此 在北半球区域,相较于其他方向遮挡,GPS 模式下在 低纬度地区 GPS 模式下南面遮挡的精度较高,随着 纬度的升高,北面遮挡的精度逐渐提高,在中高纬度 地区,北面遮挡精度最高;BDS-3模式和BDS-3/ GPS模式,在低纬度地区各方向遮挡精度相当,在中 纬度和中高纬度地区,北面遮挡的精度明显优于其他 方向遮挡精度.

遮挡情况/(°)	GPS				BDS	-3		BDS-3/GPS				
	历元数	平均卫星颗数	GDOP	RMS/m	历元数	卫星颗数	GDOP	RMS/m	历元数	平均卫星颗数	GDOP	RMS/m
N40	2 710	5.4	6.20	3.82	2 880	8.3	4.18	2.75	2 879	13.6	2.77	2.31
N60	2 103	4.7	7.86	5.51	2 880	7.5	5.39	3.39	2 879	11.7	3.62	2.54
N80	1 497	4.4	7.64	5.88	2 867	6.6	6.77	3.88	2 879	10.2	4.11	2.67
E40	2 652	5.5	5.73	4.00	2 880	7.1	5.23	2.86	2 879	12.4	2.80	2.04
E60	2 2 5 5	4.8	8.63	7.94	2 852	6.0	7.11	3.78	2 878	10.5	4.11	2.77
E80	1 556	4.2	11.60	9.65	2 315	5.3	9.69	6.22	2 827	8.8	5.71	4.20
S40	2 654	5.7	5.53	4.12	2 829	6.0	5.52	2.70	2 880	11.6	2.67	1.93
S60	2 248	5.0	8.12	6.70	2 446	5.0	8.57	3.89	2 880	9.4	4.36	3.66
S80	1 585	4.8	8.65	7.39	1 380	4.4	11.58	5.22	2 803	7.8	6.88	5.48
W40	2 860	5.5	5.39	3.22	2 880	7.2	5.27	3.98	2 880	12.7	2.64	2.30
W60	2 242	4.8	9.18	5.96	2 804	6.3	6.86	4.76	2 880	10.7	3.94	3.06
W80	1 445	4.4	12.70	8.91	2 517	5.6	8.95	6.45	2 880	9.2	5.54	4.31

表 4 ULAB 站不同遮挡情况定位分析

3 结束语

本 文 通 过 MGEX 跟 踪 站 的 数 据, 针 对 GPS、 BDS-3、BDS-3/GPS 三种定位模式, 在不同遮挡情况 下进行伪距单点定位, 分析了在不同区域遮挡环境下 对定位性能的改善, 得到如下结论:

1) 在亚太地区,由于 BDS-3 的 GEO 和 IGSO 卫 星可见,增加了 BDS-3 系统的可见卫星颗数,改善了 卫星空间几何结构,显著提高 BDS-3 定位精度,对 BDS-3/GPS 组合定位精度略微提高;

2) BDS-3/GPS 组合定位模式,大大增加了可见 卫星颗数,即使在严重遮挡时,基本能保证 8 颗以上 的可见卫星,可解算历元在遮挡严重时也能达到 98% 的利用率,在中等遮挡和轻度遮挡趋于 100%, 卫星空间几何结构改善,GDOP 值降低,在任一遮挡 情况下,组合定位的稳定性和精度,都明显优于单系统;

3) GPS 模式下, 在低纬度地区, 南面遮挡的精度 较高, 随着纬度的升高, 北面遮挡的精度逐渐提高, 在中高纬度地区, 北面遮挡精度最高. GPS 模式在精 度最高的遮挡面时, 位置精度优于 6.5 m; BDS-3 模 式和 BDS-3/GPS 组合模式, 在低纬度地区各方向遮 挡精度相当, 在中纬度和中高纬度地区, 北面遮挡的 精度明显优于其他方向遮挡精度,在精度最高的遮挡 面时,BDS-3模式位置精度优于 5.5 m,BDS-3/GPS 模式位置精度优于 3 m.

参考文献

- [1] 布金伟, 左小清, 金立新, 等. BDS/QZSS及其组合系统在中国和日本及周边地区的定位性能评估[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(4): 574-585, 611.
- [2] CAI C S, GAO Y, PAN L, et al. An analysis on combined GPS/COMPASS data quality and its effect on single point positioning accuracy under different observing conditions[J]. Advances in space research, 2014, 54(5): 818-829. DOI: 10.1016/j.asr.2013.02.019
- [3] 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.
- [4] 方欣颀, 范磊. BDS-2/BDS-3伪距单点定位精度分析[J]. 全 球定位系统, 2020, 45(1): 19-25.
- [5] 杨武召, 阮仁桂, 孙中苗, 等. BDS-3伪距定位精度分析 [C]//第十届中国卫星导航年会, 2019.
- [6] 杨元喜,许扬胤,李金龙,等.北斗三号系统进展及性能预测—试验验证数据分析[J].中国科学(地球科学),2018,48(5):584-594.
- [7] 余晓娜, 王超, 左小清, 等. 不同截止高度角下BDS/GPS/

GALILEO多模组合SPP解算性能分析[J]. 全球定位系统, 2018, 43(5): 91-97, 111.

- [8] 徐宁辉,陆杰,梁月吉.单系统伪距单点定位在不同地区的 精度分析[J].全球定位系统,2019,44(5):77-84.
- [9] 景一帆,杨元喜,曾安敏,等.北斗区域卫星导航系统定位
 性能的纬度效应[J].武汉大学学报(信息科学版),2017,
 42(9):1243-1248.
- [10] 唐卫明, 徐坤, 金蕾, 等. 北斗/GPS组合伪距单点定位性能 测试和分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2015, 40(4): 529-533.
- [11] 张乾坤, 刘小生, 何琦敏. BDS-3多频点伪距单点定位性能 研究[J]. 测绘通报, 2020(1): 71-75.
- [12] 崔立鲁, 杜石, 余寒, 等. BDS/GPS组合伪距单点定位性能 分析与评价[J]. 测绘工程, 2019, 28(2): 13-16, 21.
- [13] 北斗卫星导航系统空间信号接口控制文件-公开服务信号 B1I(3.0版)[R].北京:中国卫星导航系统管理办公室,2019.
- [14] 王涛. GPS/GLONASS/BDS多模融合伪距单点定位模型精 度分析[J]. 全球定位系统, 2017, 42(3): 32-37.

- [15] 张强,赵齐乐,章红平,等.北斗卫星导航系统Klobuchar模型精度评估[J].武汉大学学报(信息科学版), 2014, 39(2): 142-146.
- [16] 周仁宇, 胡志刚, 苏牡丹, 等. 北斗全球系统广播电离层模型性能初步评估[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(10): 1457-1464.
- [17] TEUNISSEN P J G, MONTENBRUCK O. Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems[M]. Earth Science and Geography, 2017.

作者简介

杨毅 (1996—),男,硕士研究生,主要研究方 向为 GNSS 在资源环境中的应用.

胡洪 (1985—),男,博士,硕士生导师,主要研 究方向为北斗定位随机模型和三维激光点云数据 处理.

解雪峰 (1996—),男,硕士研究生,主要研究 方向为多频多系统 GNSS 随机模型研究.

Analysis of positioning performance of BDS-3/GPS in shadow environment

YANG Yi¹, HU Hong¹, XIE Xuefeng², TIAN Xiangyong¹

 School of Resources and Environmental Engineering, Anhui University, Hefei 230601, China;
 School of Environment and Surveying and Mapping, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: In areas where GNSS signals are easily sheltered, the number of visible satellites in a single navigation system is small, and the positioning performance is not ideal or even difficult to meet the requrements of positioning needs. In this paper, the improvement of BDS-3's positioning performance in shadow environments is analyzed in different area. Based on the observation data of MGEX monitoring stations in different regions of the world, three modes of GPS, BDS-3, and BDS-3/GPS combined positioning are used to perform pseudo-range single-point positioning under different simulated shadow environments, and the number of visible satellites in each mode is analyzed, together with epoch utilization, GDOP value and positioning accuracy. The results show that in the northern hemisphere, compared to shadow in other direction, the GPS mode has the highest positioning stability and accuracy in the south of low latitudes, and the highest positioning stability and accuracy in the north of the middle and high latitudes. BDS-3 and BDS-3/ GPS mode has the same positioning accuracy in all directions in low latitude areas. In mid-latitude and midhigh latitude areas, the accuracy of north shadowed is significantly better when shadow is in the north direction than that of other directions. The BDS-3/GPS combined positioning mode greatly increases the number of available satellites, improves the epoch utilization rate, improves the satellite spatial geometry, and reduces the GDOP value, which is significantly better than a single system in stability and positioning accuracy.

Keywords: BDS-3; GPS; combination positioning; shadow environment; GDOP; positioning accuracy