



BDS/GPS/GLONASS 组合在峡谷河段的定位性能和精度*

姚明经

(长江三峡通航管理局, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 针对峡谷河段的不同卫星组合下网络实时动态(RTK)测试较少的情况, 对三峡大坝至葛洲坝两坝间峡谷河段 BDS/GPS/GLONASS 组合下的流动站定位性能和精度进行测试。采取 6 种观测模式, 测试内容为定位服务时效性、空间可用性和定位精度。结果表明, 国产 GNSS 设备 BDS 网络 RTK 达到规范要求, 固定解比例为 98.1%, 可以达到水平 0.02 m、高程 0.05 m 的定位精度, 一定程度上优于 GPS。BDS 和 BDS/GLONASS 双系统 2 种网络 RTK 在缺失或不使用 GPS 信号时, 依然可提供高精度定位服务。组合定位能够弥补单一系统的不足, 融合系统较各单系统均有不同程度的提高, BDS/GPS/GLONASS 和 BDS/GPS 在定位服务时效性、空间可用性测试和定位精度方面均最优。

关键词: BDS/GPS/GLONASS; 可见性; 几何精度因子; 内符合精度; 外符合精度; 初始化时间; 空间可用性

中图分类号: U612

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)11-0164-09

Positioning performance and accuracy of BDS/GPS/GLONASS combination in canyon reach

YAO Mingjing

(Three Gorges Navigation Authority, Yichang 443002, China)

Abstract: In view of the fact that there are few network RTK tests under different satellite combinations in the canyon reach, this paper tests the positioning performance and accuracy of the mobile station under the BDS/GPS/GLONASS combination between the Three Gorges Dam and the Gezhouba Dam. Six observation modes are adopted to test positioning service timeliness, spatial availability and positioning accuracy. The results show that the BDS network RTK of domestic GNSS equipment meets the specification requirements, the fixed solution ratio is 98.1%, and the positioning accuracy of 0.02 m level and 0.05 m elevation can be achieved, which are better than GPS to a certain extent. BDS and BDS/GLONASS dual-system network RTK can still provide high-precision positioning services when GPS signals are missing or not used. Combined positioning can make up for the shortcomings of a single system, and the fusion system has different degrees of improvement compared with each single system. BDS/GPS/GLONASS and BDS/GPS are optimal in terms of positioning service timeliness, spatial availability test and positioning accuracy.

Keywords: BDS/GPS/GLONASS; visibility; GDOP; internal coincidence accuracy; external coincidence accuracy; initialization time; space availability

三峡大坝至葛洲坝两坝间的长江河段高山林立, 河道宽度相对较窄, 形成了峡谷河段。关于 BDS (Beidou Navigation Satellite System)、GPS(Global Positioning System)与 GLONASS(Global

Navigation Satellite System)组合的多系统实时动态(real-time kinematic, RTK)定位, 国内外众多学者开展了相关的研究。Teunissen 等^[1]限制卫星高度截止角, 以模拟城市峡谷等高遮挡环境下 BDS+

收稿日期: 2023-02-24

*基金项目: 交通运输行业重点科技清单项目(2020-MS5-133); 长航局科技项目(CKJ2020-02B)

作者简介: 姚明经(1984—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为航道测量和大坝安全监测。

GPS 的单、双 RTK 定位性能；姚宜斌等^[2]研究了高度角变化对网络 RTK 定位性能的影响；申丽丽等^[3]从定位的可用性和可靠性两方面分析多系统组合定位在城市峡谷环境下的性能；郭现伟等^[4]分析了密林地区 GPS、BDS、GLONASS 单系统和组合模式下单点定位及伪距差分定位性能；苏忠^[5]研究并分析了城市峡谷中下单、组合导航系统的单点定位性能；王涛等^[6]对流动站在遮挡环境下的定位结果进行研究；徐爱功等^[7]对不同卫星截止高度角下的多系统定位结果与单系统定位进行对比分析；覃继前等^[8]研究不同卫星高度角对 GPS/GLONASS/BDS/Galileo 融合定位的影响。

针对峡谷河段的不同卫星组合下网络 RTK 测试较少的情况，本文对三峡大坝至葛洲坝两

坝间峡谷河段 BDS/GPS/GLONASS 组合下的流动站定位性能和精度进行测试，并对测试结果进行分析。

1 测试概况

1.1 测试范围

本次测试范围为三峡大坝至葛洲坝两坝间峡谷河段，所选取的测试点具有代表性，均被山体、建筑物或树林遮盖，采用网络 RTK 流动站测量，测试点采用 1954 年北京坐标，并将其与已知控制点成果做对比。测试点位共计 40 个，其中 D 级点 17 个，图根点 23 个，测试点位分布均匀，测试时间为 2022 年 7 月 6 日—2022 年 7 月 11 日，测试点位置见图 1。

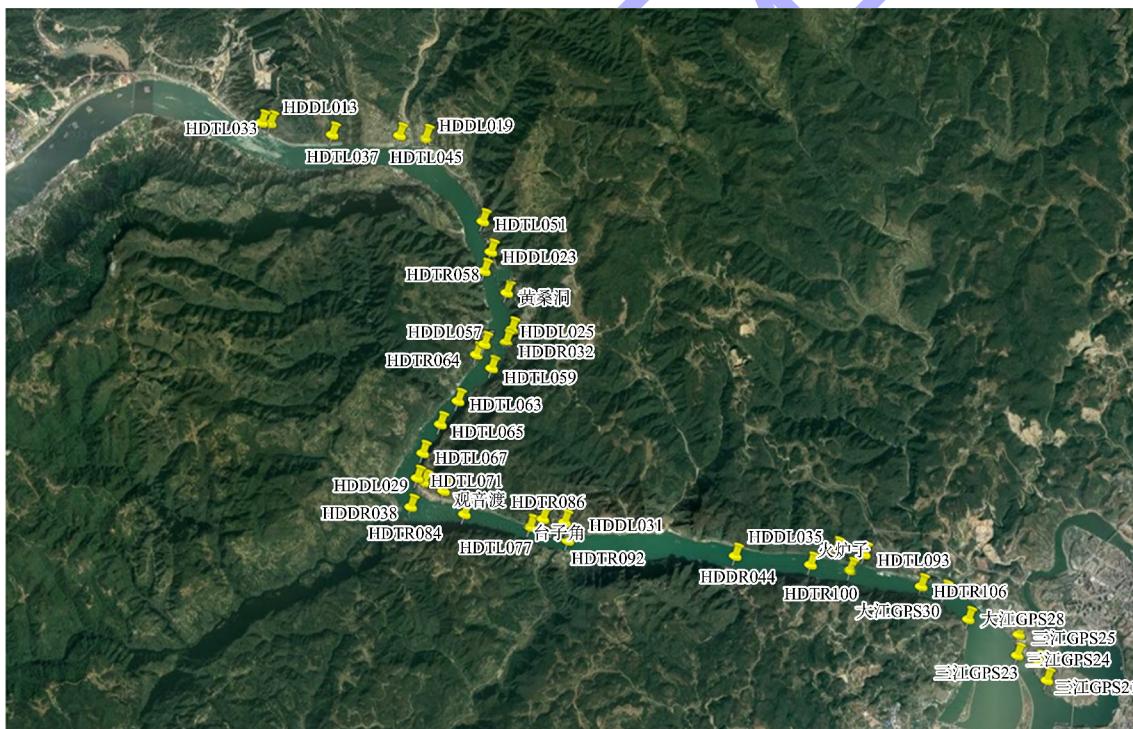


图 1 测试点位置

1.2 测试内容

测试内容为定位服务时效性、空间可用性和定位精度^[9]。系统的定位服务时效性的本质是流动用户端在进行网络测量时的初始化时间^[10]；空间可用性指在达到精度指标要求的前提下，用户能够得到 RTK 固定解的区域范围；系统的可用性则是确保系统正常服务的保障。实时定位精度测

试包括内符合可见性与几何精度因子、精度测试和外符合精度测试。

由于 GLONASS 存在频间偏差且卫星观测数据质量较差等问题，导致 GLONASS 单系统网络 RTK 定位可用性不高，故不对 GLONASS 单系统网络 RTK 进行讨论^[11]。本次测试采用的仪器为华测 T10 接收机，每个点采取 6 种观测模式，分别为 BDS、

BDS/GPS、BDS/GPS/GLONASS、BDS/GLONASS、GPS、GPS/GLONASS(以下分别用 B、BG、BGR、BR、G、GR 表示)每种观测模式下每个源节点进行 2 次测量。每次初始化，每次测量 10 个数据。

本次测试 40 个点中 37 个点为坐标已知的控制点，3 个为坐标未知的控制点。

BGR 和 BG 模式下，固定解比例为 100%；BR 模式下，固定解比例为 98.0%；B 模式下，固定解比例为 95.0%；GR 模式下，固定解比例为 90.0%；G 模式下，固定解比例为 88.0%。

B、G 信号盲区点位置见图 2，无法固定的原因为山体遮挡、卫星搜星数少，导致流动站无法固定。此外，由于河流表面卫星反射信号较强且山体信号折射影响，可能导致观测质量较差，影响 RTK 固定。

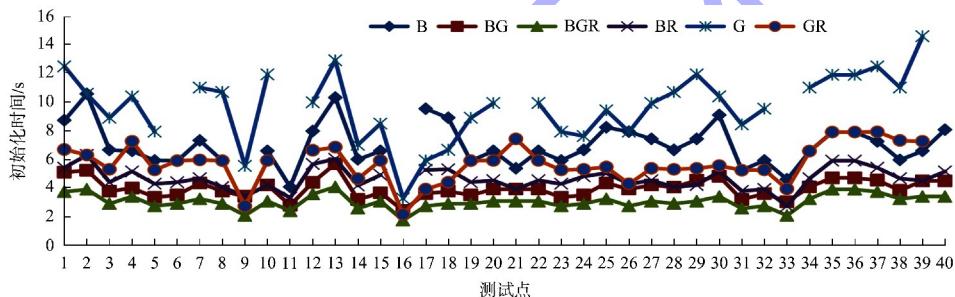


图 3 各模式初始化时间

如图 4 所示，BGR 模式定位最快，平均初始化时间为 3 s，说明三星系统在得到固定解的初始化速度方面具有明显的优势；其次是 BG，平均初始化时间为 4 s；BR 平均初始化时间为 5 s；GR 平均初始化时间为 6 s；B 平均初始化时间为 7 s；G 平均初始化时间为 10 s，耗时最长。

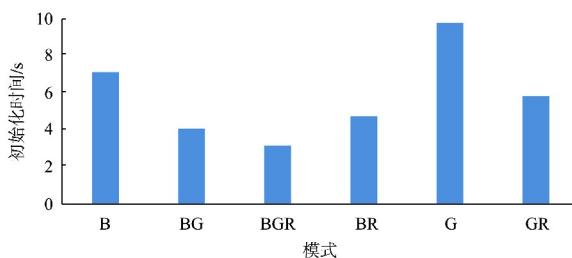


图 4 各模式平均初始化时间

2.2 空间可用性

测量船以连续地形测量模式定位，按 1 s 采样



图 2 BG 信号盲区点位置

2 测试结果

2.1 系统定位服务时效性

RTK 用户初始化时间的测试是检验系统定位服务时效性的重要体现。在系统测试的同时，对不同模式下测试的初始化时间进行统计，见图 3。

率连续采集。以船速 10~20 km/h 记录数据，对解状态进行统计分析。单点解、浮点解和固定解统计结果见表 1。由表可知，BGR 模式定位空间可用性最好，固定解比例为 99.4%；其次是 BG 模式，固定解比例为 98.9%；BR 模式固定解比例为 98.2%；B 模式固定解比例为 98.1%；BGR 模式固定解比例为 96.0%；单 GPS 模式固定解比例为 95.0%。

表 1 各模式解状态百分比统计

模式	单点解	浮点解	固定解
B	0.5	1.4	98.1
BG	0.3	0.8	98.9
BGR	0.1	0.5	99.4
BR	0.5	1.3	98.2
G	2.0	3.0	95.0
GR	1.0	3.0	96.0

2.3 可见性与几何精度因子

可见性与几何精度因子(GDOP)是评估卫星导航系统性能的 2 个重要参数。可见性表示在接收机位置可以观测到的卫星数目, 只有在可见性 ≥ 4 时才可以利用卫星导航系统进行定位。GDOP 表示观测时刻参与位置解算的卫星所处的空间位置分布所构成的几何图形强度, 由参与定位解算的卫星与接收机的相对位置决定, 在相同的观测条件下, GDOP 值越小, 则由相同伪距观测误差导致的最终定位误差越小, 精度越高。GDOP 一方

面与可观测卫星的几何构型有关, 另一方面也与可见性有关; 几何构型越好, 可见性越高, 则接收机位置处可能获得的 GDOP 值越小; 此外, GDOP 还与观测高度有关^[12]。

如图 5 所示, 从观测的 40 个控制点来看, B 模式的平均可视卫星数为 9 颗, 最少 2 颗, 最多 12 颗; G 模式的平均可视卫星数为 6 颗, 最少 3 颗, 最多 9 颗; R 模式的平均可视卫星数为 4 颗, 最少 2 颗, 最多 7 颗。辖区内 B 的可视卫星数最多, 大于 G 和 R。

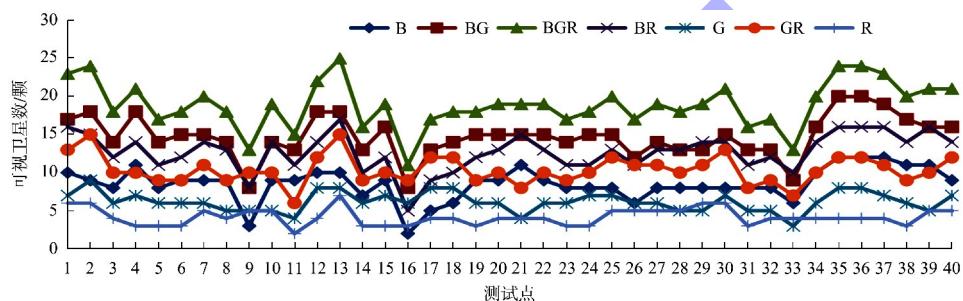


图 5 不同模式可视卫星数

如图 6 和表 2 所示, BGR 模式的 GDOP 值最小, 其次为 BG, BR、G、GR 三者相当, 相对来说 B 模式的 GDOP 值最大^[13]。这是因为其空间卫星为 GEO、IGSO、MEO 3 种卫星构成的

混合星座。因为 GEO 卫星是相对地球静止且全部可见, 虽然有相对较高的卫星高度角, 但加上其余的卫星整体构成的卫星空间几何结构还是较差^[14]。

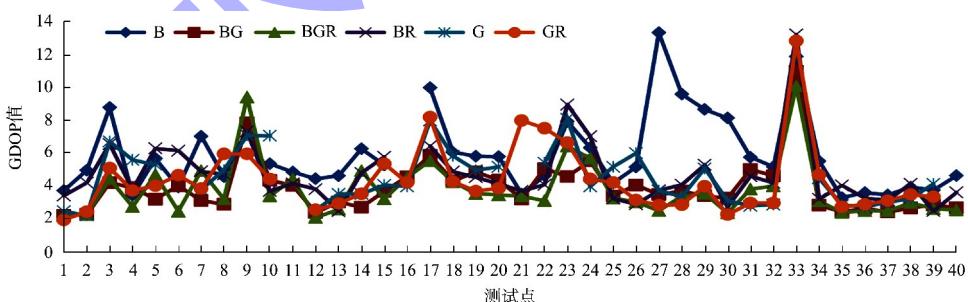


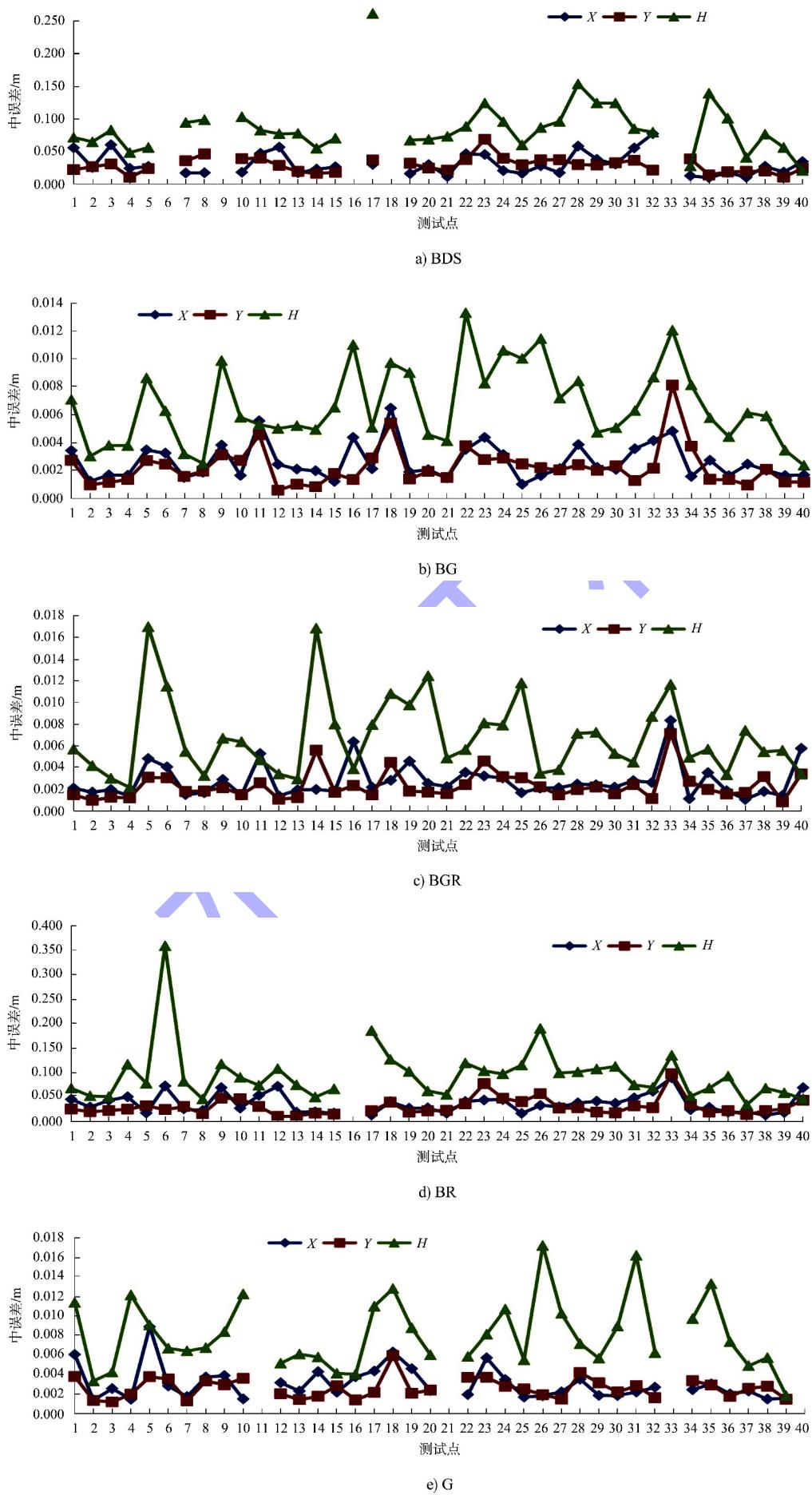
图 6 不同组合 GDOP 值

表 2 各模式 GDOP 值

模式	最小值	最大值	平均值
B	3.311	13.329	5.881
BG	2.233	10.980	3.933
BGR	2.105	10.075	3.806
BR	2.498	13.215	4.723
G	2.240	8.090	4.494
GR	1.968	12.825	4.373

2.4 内符合精度

如图 7 和表 3 所示, X、Y 方向内符合精度均满足《卫星定位城市测量技术规范》^[15] 不应超过 0.02 m 的要求; H 方向除 HDTL093、台子角、HDDL029、HDTL071 在极个别组合下内符合中误差 M_s 超过 0.02 m, 其余点均不超过 0.02 m。



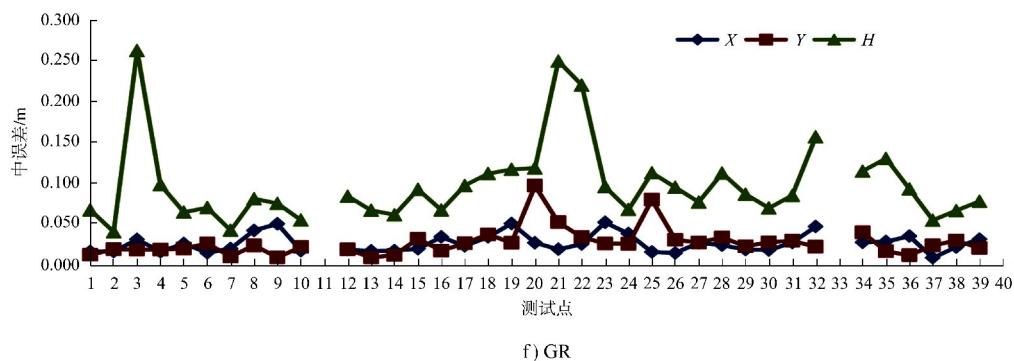


图 7 各模式内符合中误差

表 3 各模式内符合精度

模式	X			Y			H		
	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值
B	0.001	0.008	0.003	0.001	0.007	0.003	0.002	0.026	0.009
BG	0.001	0.006	0.003	0.001	0.008	0.002	0.002	0.013	0.007
BGR	0.001	0.008	0.003	0.001	0.007	0.002	0.002	0.017	0.007
BR	0.001	0.009	0.004	0.001	0.010	0.003	0.003	0.036	0.010
G	0.001	0.009	0.003	0.001	0.006	0.003	0.002	0.017	0.008
GR	0.001	0.005	0.003	0.001	0.010	0.003	0.003	0.025	0.008

各观测模式下点位内符合中误差区间分布见图 8, 从观测的 40 个控制点来看, 点位内符合中误差均小于 0.02 m, BGR 和 BG 最优, 达到 100%, BR、GR、G、B 均为 90%。

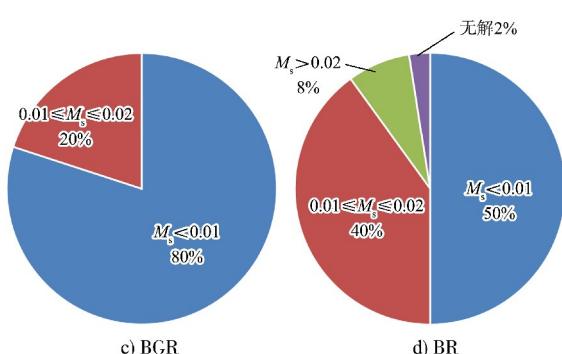
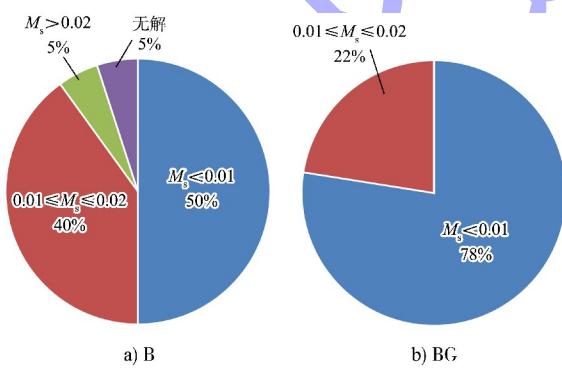
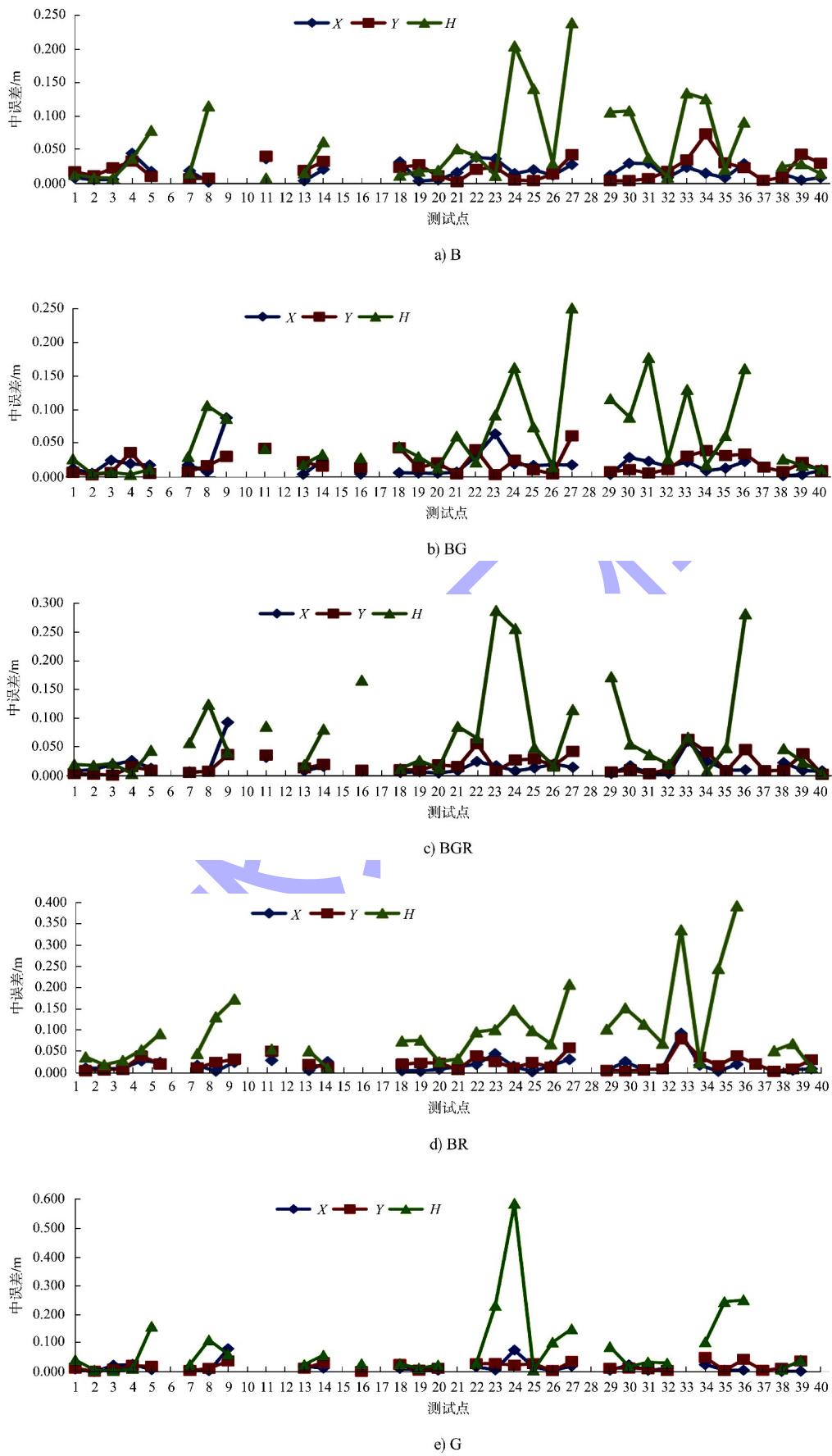


图 8 各模式内符合中误差区间分布 (单位: m)

总体上看, 平面内符合精度优于高程内符合精度, BGR 和 BG 内符合精度最优; B 和 G 内符合精度相当; BR 相对精度最低, 但满足规范要求。

2.5 外符合精度

如图 9 和表 4 所示, 并逐点统计, 除个别点存在明显的沉降及星况影响导致外符合精度超大外, 平面外符合精度中误差在 0.05 m 范围内, BGR 比例为 91%、BG 比例为 85%、BR 比例为 85%、B 比例为 82%、G 比例为 79%、GR 比例为 61%。BGR 相对最高, 其次为 BG 和 BR 相当, GR 相对精度最低。



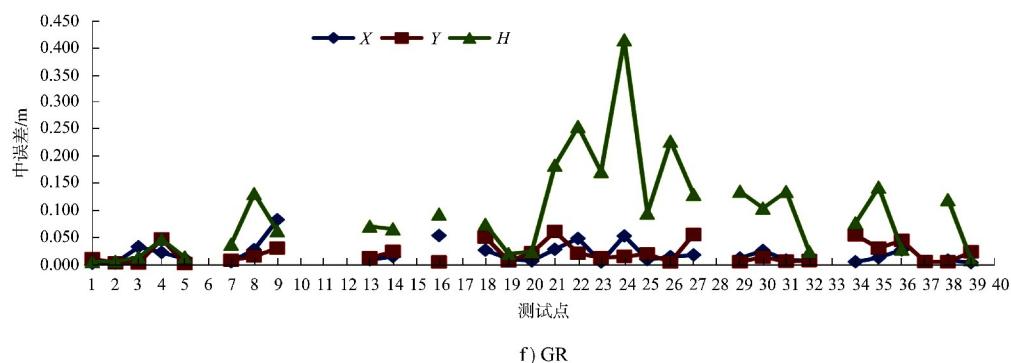


图 9 各模式外符合中误差

表 4 各模式外符合精度

模式	X			Y			H		
	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值
B	0.002	0.045	0.018	0.003	0.074	0.021	0.008	0.240	0.059
BG	0.002	0.088	0.019	0.003	0.061	0.019	0.004	0.251	0.060
BGR	0.003	0.093	0.017	0.001	0.064	0.019	0.004	0.288	0.072
BR	0.002	0.092	0.016	0.002	0.079	0.021	0.010	0.392	0.099
G	0.002	0.081	0.016	0.002	0.050	0.019	0.004	0.589	0.088
GR	0.003	0.084	0.021	0.002	0.062	0.021	0.006	0.417	0.098

高程外符合精度中误差 0.05 m 范围内, BG 比例为 60%、BGR 比例为 58%、B 比例为 58%、G 比例为 51%、GR 比例为 33%、BR 比例为 27%。BG 相对最高, 其次为 BGR, BR 相对精度最低。

总体上看, 平面外符合精度均优于高程向外符合精度, BGR 和 BG 相对最高, B 优于 G。

2.6 测试结果分析

通过对测试数据的统计分析, 得出以下结论。

- 从初始化时间来看, BGR 模式定位最快; 其次是 BG; B 平均初始化时间优于 G。
- 从空间可用性来看, BGR 定位空间可用性最好, 之后依次为 BG、BR、B、G。
- 从卫星可用性来看, B 的可视卫星数最多, 大于 G 和 R, B 卫星可用性在测试区比 G 要好。
- 从 GDOP 值来看, BGR 的 GDOP 值最小, 依次为 BG、BR、G、GR, B 相对来说

GDOP 值最大。

5) 从内符合精度来看, 平面内符合精度优于高程内符合精度, BGR 和 BG 最优, 达到 100%, B 与 G 相当, BR 相对精度最低。

6) 从外符合精度来看, 平面外符合精度均高于高程方向外符合精度, BGR 和 BG 相对最高, B 优于 G。

3 结论

1) 对葛洲坝至三峡大坝两坝间峡谷河段 BGR 组合下的流动站定位性能和精度进行测试, 结果表明国产化 GNSS 设备 B 达到规范精度要求, 固定解比例为 98.1%, 可以达到水平 0.02m、高程 0.05m 的定位精度, 一定程度上优于 G。B 和 BR 双系统 RTK 网络在缺失或不使用 GPS 信号时依然可提供高精度定位服务。

2) 考虑到峡谷河段, B 在某些区域存在着卫星数不足 4 颗的情况, G 在某些时间段由于观测数据质量较差而无法定位, 这种情况下单一系统均不能满足用户的定位需求。将 3 个系

统进行组合定位，能够弥补单一系统的不足，同时还能满足用户的定位需求，保证定位的可靠性。融合系统较各单系统均有不同程度的提高，BG 双系统和 BGR 三系统网络 RTK 定位精度和稳定性最高。

参考文献：

- [1] 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.
- [2] 姚宜斌, 胡明贤, 许超铃. 基于 DREAMNET 的 GPS/BDS/GLONASS 多系统网络 RTK 定位性能分析 [J]. 测绘学报, 2016, 45(9): 1009-1018.
- [3] 申丽丽, 郭际明, 王磊. 多 GNSS 系统组合在城市峡谷中的定位性能分析 [J]. 地理空间信息, 2017, 15(1): 50-52, 62.
- [4] 郭现伟, 姬生月, 王振杰, 等. BDS/GPS/GLONASS 在密林地区组合定位性能分析 [J]. 海洋测绘, 2018, 38(5): 55-58, 66.
- [5] 苏忠. 城市峡谷中 GPS/BeiDou 伪距单点定位性能分析 [J]. 测绘通报, 2019(S1): 30-35.
- [6] 王涛, 蔡东健, 周旺辉, 等. 北斗地基增强系统框架下流动站定位精度分析 [J]. 全球定位系统, 2019, 44(1): 89-93.
- [7] 徐爱功, 匡野, 高猛, 等. GPS/BDS/GLONASS/Galileo 组合 RTK 在不同截止高度角下定位性能分析 [J]. 测绘工程, 2020, 29(5): 8-14.
- [8] 覃继前, 徐宁辉, 梁月吉. 不同卫星高度角对 GPS/GLONASS/BDS/Galileo 融合定位的影响 [J]. 全球定位系统, 2021, 46(2): 62-68.
- [9] 黄北新, 付先国. 合肥市 GPS/GLONASS 双星连续运行参考站系统性能测试与分析 [J]. 测绘通报, 2008(7): 7-9, 35.
- [10] 郭彩立. 重庆北斗卫星地基增强系统建设与测试 [J]. 测绘通报, 2016(S2): 56-59.
- [11] 胡明贤. GPS/BDS/GLONASS 多系统网络 RTK 算法实现及定位性能分析 [D]. 武汉: 武汉大学, 2017.
- [12] 向才炳, 边少锋, 吴泽民. GPS/BDS 空间可见性与 GDOP 分析 [J]. 海洋测绘, 2013, 33(6): 33-35.
- [13] 徐炜, 严超, 杜文选, 等. GPS 系统与 BDS 系统导航定位性能对比分析 [J]. 全球定位系统, 2017, 42(4): 77-82.
- [14] 李鹤峰, 党亚民, 秘金钟, 等. BDS/GPS/GLONASS 融合定位模型及性能分析 [J]. 测绘通报, 2014(9): 1-5.
- [15] 北京市测绘设计研究院. 卫星定位城市测量技术规范: CJJ/T 73—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.

(本文编辑 王传瑜)

(上接第 119 页)

- [8] 江涛, 罗业辉, 董霞, 等. 淮河入海水道二期配套通航工程淮安东船闸布置方案 [J]. 水运工程, 2021(11): 142-147.
- [9] 江涛, 潘畅, 王立锋. 淮河入海水道二期滨海枢纽永久与临时结合的通航布置方案 [J]. 水运工程, 2022(3): 122-128.
- [10] 中设设计集团股份有限公司. 通海港区—通州湾港区疏港航道整治工程工程可行性研究报告 [R]. 南京: 中设设计集团股份有限公司, 2020.
- [11] 华设设计集团股份有限公司. 新江海河船闸口门水流

条件数值模拟及入江口门泥沙淤积计算研究报告 [R]. 南京: 华设设计集团股份有限公司, 2022.

- [12] 中交水运规划设计院. 船闸总体设计规范: JTJ 305—2001[S]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
- [13] 张跃东, 曲红玲, 华华. 新江海河船闸口门区水流条件计算分析 [J]. 中国水运(下半月), 2021, 21(10): 68-70.
- [14] 南通市水利勘测设计院. 通州市新江海河闸改建工程初步设计报告 [R]. 南通: 南通市水利勘测设计院, 2002.

(本文编辑 赵娟)