

张 怀, 聂兆生, 刘 刚, 等. 基于 BDS/GPS 融合的精密单点定位解算策略与实测精度[J]. 地球科学与环境学报, 2022, 44(5): 802-813.

ZHANG Huai, NIE Zhao-sheng, LIU Gang, et al. Actual Measurement Accuracy of BDS/GPS Fusion PPP Used in Crustal Deformation Monitoring[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2022, 44(5): 802-813.

DOI: 10. 19814/j. jese. 2022. 02018

# 基于 BDS/GPS 融合的精密单点定位解算策略与实测精度

张 怀<sup>1</sup>, 聂兆生<sup>1\*</sup>, 刘 刚<sup>1</sup>, 熊 维<sup>1</sup>, 刘格格<sup>2</sup>, 黄健德<sup>2</sup>, 王东振<sup>1</sup>, 倪乙鹏<sup>1</sup>

(1. 中国地震局地震研究所, 湖北 武汉 430071; 2. 武汉大学 测绘学院, 湖北 武汉 430079)

**摘 要:**针对实际 GNSS 地壳形变流动监测中信号遮挡比较严重, GPS 可视卫星数较少等问题, 采用 BDS/GPS 双系统观测, 分析了 BDS/GPS 双系统在实际流动测站观测中对精密单点定位(PPP)性能的改善。基于四川石棉地区 GNSS 地壳形变监测网实际流动测站观测数据, 分析了在实际观测环境以及模拟更恶劣观测环境下 BDS 单系统、GPS 单系统和 BDS/GPS 双系统等 3 种定位模式的可视卫星数、几何精度衰减因子(GDOP)、定位精度和历元利用率。结果表明:在观测环境较差的山区, BDS/GPS 双系统可大大提高可视卫星数, 几何精度衰减因子降低, 显著改善卫星空间几何结构, 提高收敛速度和定位精度;与 BDS 单系统、GPS 单系统相比, BDS/GPS 双系统收敛速度可提高 50%~80%, 定位精度可提高 20%~50%;单系统定位精度受高度角影响较大, BDS/GPS 双系统在较高高度角时仍可保持较高精度, 稳定性更强;在遮挡严重地区, 为保证有充足双频观测值, 可视卫星数需有 6 颗或 6 颗以上。BDS/GPS 双系统因其高稳定性和高精度, 更有利于在地形起伏剧烈区域捕捉地壳形变及地震产生的微弱位移信号, 在复杂观测环境(山区、树林、建筑物密集区)具有更好的应用价值。

**关键词:**北斗卫星导航系统;全球定位系统;精密单点定位;BDS/GPS 融合;地壳形变监测;恶劣观测环境;实测精度;数据质量

中图分类号:P228

文献标志码:A

文章编号:1672-6561(2022)05-0802-12

## Actual Measurement Accuracy of BDS/GPS Fusion PPP Used in Crustal Deformation Monitoring

ZHANG Huai<sup>1</sup>, NIE Zhao-sheng<sup>1\*</sup>, LIU Gang<sup>1</sup>, XIONG Wei<sup>1</sup>, LIU Ge-ge<sup>2</sup>,  
HUANG Jian-de<sup>2</sup>, WANG Dong-zhen<sup>1</sup>, NI Yi-peng<sup>1</sup>

(1. Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Wuhan 430071, Hubei, China;

2. School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, Hubei, China)

**Abstract:** In view of the serious signal occlusion and the small number of GPS visible satellites in the actual GNSS crustal deformation rover monitoring, the BDS/GPS dual system observation was adopted, and the improvement of the precise single point positioning performance of BDS/

收稿日期:2022-02-14;修回日期:2022-04-25 投稿网址: <http://jese.chd.edu.cn/>

基金项目:国家自然科学基金项目(42074015, 41874018);中国地震局星火计划攻关项目(XH20038);

国家重点研发计划项目(2018YFE0206100)

作者简介:张 怀(1997-),男,河北河间人,工学硕士研究生, E-mail: huaizhang\_\_97@163.com。

\* 通讯作者:聂兆生(1982-),男,山东泰安人,正高级工程师, E-mail: niezhaosheng@126.com。

GPS in the actual rover observation was analyzed. Based on the observation data of the GNSS crustal deformation monitoring network in Shimian area of Sichuan, the number of visible satellites, GDOP value, and the positioning accuracy and epoch utilization of the three positioning modes of BDS, GPS and BDS/GPS in the actual observation environment and the simulated worse observation environment were analyzed. The results show that BDS/GPS can greatly increase the number of visible satellites, reduce the GDOP value, significantly improve the satellite spatial geometry, and improve the convergence speed and positioning accuracy in mountainous areas with poor observation environment; compared with BDS and GPS, the convergence speed can be increased by 50%—80%, and the positioning accuracy can be increased by 20%—50%; the positioning accuracy of a single system is greatly affected by the altitude angle, and the BDS/GPS can still maintain high accuracy and stability at higher altitude angles; in heavily shaded areas, in order to ensure sufficient dual-frequency observations, the number of observation satellites must reach 6 or more. With its high stability and high precision, BDS/GPS is more conducive to capturing the weak displacement signals of crustal deformation and earthquakes in areas with severe terrain fluctuations, and has good application in complex observation environments (mountains, forests, and densely built areas).

**Key words:** BDS; GPS; precise point position; BDS/GPS combination; crustal deformation monitoring; harsh observation environment; measured accuracy; data quality

## 0 引言

GNSS 精密单点定位 (Precise Point Position, PPP) 技术采用单台全球卫星导航系统 (Global Navigation Satellite System, GNSS) 接收机, 利用国际 GNSS 服务组织 (International GNSS Service, IGS) 提供的精密星历和卫星钟差可实现毫米级到分米级定位精度, 具有无需设置地面基准站、机动灵活、可单机作业、定位不受距离限制等特点, 在高精度定位导航、地震大地测量学和地球板块运动与动力学研究等方面具有突出优势<sup>[1-8]</sup>。全球定位系统 (Global Positioning System, GPS) 用于导航定位的技术已非常成熟, 但是观测条件较差时其定位精度和卫星可用性均有所下降<sup>[9-12]</sup>, 无法满足需求。2020 年, 北斗卫星导航系统 (BeiDou Navigation Satellite System, BDS) 全面组网完成, 该系统是中国自主建设运行的全球卫星导航系统<sup>[13-14]</sup>。目前, 北斗卫星导航系统在轨卫星 45 颗, 包括北斗二号卫星 15 颗, 北斗三号卫星 30 颗<sup>[15]</sup>, 可为全球用户提供高精度定位、导航和授时服务。国内外学者利用多系统实验 (Multi-GNSS Experiment, MGEX) 跟踪站数据, 分析了 BDS、GPS 等系统精密单点定位性能, 得出 BDS/GPS 双系统可提高可视卫星数, 从而改善卫星的空间几何分布、提高定位精度、增强结

果稳定性的结论<sup>[16-23]</sup>。

中国地震地质灾害频发, 西南地区更是地震地质灾害的重灾区, 近几年破坏性较大的地震地质灾害中超过 2/3 发生在该地区。四川石棉地区位于川滇菱形块体东部边界中段, 是鲜水河断裂、安宁河断裂、小金河断裂、大凉山断裂等多条断裂汇聚的“三岔口”, 贡嘎山在此隆起至 7 500 m, 大渡河流经该处最低不足 1 000 m, 地形起伏剧烈, 高差巨大。中国地震局地震研究所在石棉地区布设了 GNSS 地壳形变监测网, 用于研究鲜水河断裂的震间构造变形。受限于交通和地形, 观测网主要布设在近 EW 向峡谷中, SN 向遮挡比较严重, 大部分流动测站的 BDS 可视卫星数远多于 GPS。

此前研究大多基于 MGEX 跟踪站数据, 模拟较差的观测条件, 且 GPS 可视卫星数与 BDS 相当<sup>[24-27]</sup>, 与四川石棉地区实际观测情况相差较大, 针对实际观测环境下的单系统与多系统精密单点定位精度及可靠性有待进一步研究。基于此, 本文基于四川石棉地区 GNSS 地壳形变监测网实测数据, 利用 GREAT 程序进行精密单点定位的静态、动态解算, 评估 BDS、GPS 单系统和 BDS/GPS 双系统在实际恶劣观测环境下的定位精度、收敛速度、稳定性、历元利用率和几何精度衰减因子 (GDOP) 等。

# 1 BDS/GPS 解算方法及实验方案

## 1.1 时空基准统一

GPS 与 BDS 的时间系统和坐标系统存在一定的差异。其中, GPS 时间是 GPS 进行定位导航的时间基准, 秒长与原子时相同, 不闰秒, 起始历元是协调世界时(UTC)1980 年 1 月 6 日 0 时<sup>[28]</sup>, GPS 时间与 UTC 的时刻相一致, 之后随着时间的积累, GPS 时间与 UTC 的差异为秒的整倍数。UTC 最近一次闰秒是在 2016 年 12 月 31 日 23 点 59 分 59 秒, 闰秒后 GPS 时间与 UTC 之间累积的差异已达到 18 s。其表达式为

$$T_{\text{GPS}} = T_{\text{UTC}} + 18 \text{ s} \quad (1)$$

式中:  $T_{\text{GPS}}$  为 GPS 时间;  $T_{\text{UTC}}$  为协调世界时。

BDS 的时间基准为北斗时。北斗时采用国际单位制(SI)秒为基本单位连续累计, 不闰秒。起始历元为 UTC 2006 年 1 月 1 日 00 时 00 分 00 秒。北斗时通过 UTC(NTSC)与国际 UTC 建立联系, 北斗时与国际 UTC 的偏差保持在 50 ns 以内。因此, 北斗时与 GPS 时间的秒级偏差约为 18 s。其表达式为

$$T_{\text{BDS}} = T_{\text{GPS}} - 18 \text{ s} \quad (2)$$

式中:  $T_{\text{BDS}}$  为北斗时。

GPS 坐标系统采用 WGS-84, BDS 采用中国 2000 大地坐标系(CGCS2000)。两坐标系统所定义的原点、尺度、定向及定向演变的尺度均相同, 均对准于国际地球参考框架(ITRF2014)。WGS-84<sup>[29]</sup>优化后的精度可以达到 2 cm, 与 ITRF2014 精度相差无几, 而 CGCS2000 与 ITRF2014 的一致性约为 5 cm<sup>[30]</sup>, 因此, WGS-84 和 CGCS2000 的差异在厘米级。对于导航定位来说, WGS-84 和 CGCS2000 坐标系统被认为是相容一致的, 无需进行转换<sup>[14]</sup>。

## 1.2 BDS/GPS 融合算法

在 GNSS 精密单点定位中, GNSS 载波相位  $L_r^s$  和伪距  $P_r^s$  的基本观测方程可表示为

$$L_r^s = \rho_r^s + c \cdot (t_r - t^s) + \lambda \cdot N_r^s + m_r^s \cdot Z_r + \epsilon_r^s \quad (3)$$

$$P_r^s = \rho_r^s + c \cdot (t_r - t^s) + m_r^s \cdot Z_r + e_r^s \quad (4)$$

式中: 下标 r 表示接收机, 上标 s 表示卫星;  $\rho_r^s$  为卫星到接收机的几何距离;  $c$  为光速;  $t_r$ 、 $t^s$  分别为卫星与接收机的钟差;  $\lambda$  为波长;  $N_r^s$  为整周模糊度;  $m_r^s$  为湿延迟的映射函数;  $Z_r$  为测站的对流层天顶湿延迟;  $\epsilon_r^s$  为相位观测值的测量误差和多路径误差之和;  $e_r^s$  为伪距观测值的测量误差和多路径误差之和。

为了削弱电离层对定位精度的影响, 本文使用

双频无电离层线性组合观测值来消除电离层延迟一阶项影响<sup>[7]</sup>。考虑到 BDS、GPS 两系统之间的时间偏差和频间偏差, 可得到 BDS/GPS 双系统无电离层相位  $L$  和伪距  $P$  组合模型。其表达式为

$$L_{(\text{r,IF})}^G = \rho_r^G + c \cdot (t_r - t^G) + \lambda_{\text{IF}}^G \cdot (N_{(\text{r,IF})}^G + B_{(\text{r,IF})}^G - B_{\text{IF}}^{(\text{s,G})}) + m_{(\text{r,IF})}^G \cdot Z_{(\text{r,IF})} + \epsilon_{(\text{r,IF})}^G \quad (5)$$

$$L_{(\text{r,IF})}^C = \rho_r^C + c \cdot (t_r - t^C) + \lambda_{\text{IF}}^C \cdot (N_{(\text{r,IF})}^C + B_{(\text{r,IF})}^C - B_{\text{IF}}^{(\text{s,C})}) + m_{(\text{r,IF})}^C \cdot Z_{(\text{r,IF})} + \epsilon_{(\text{r,IF})}^C \quad (6)$$

$$P_{(\text{r,IF})}^G = \rho_r^G + c \cdot (t_r - t^G) + c \cdot (b_{(\text{r,IF})}^G - b_{\text{IF}}^{(\text{s,G})}) + m_{(\text{r,IF})}^G \cdot Z_{(\text{r,IF})} + e_{(\text{r,IF})}^G \quad (7)$$

$$P_{(\text{r,IF})}^C = \rho_r^C + c \cdot (t_r - t^C) + c \cdot (b_{(\text{r,IF})}^C - b_{\text{IF}}^{(\text{s,C})}) + m_{(\text{r,IF})}^C \cdot Z_{(\text{r,IF})} + e_{(\text{r,IF})}^C \quad (8)$$

式中: IF 表示无电离层组合, 上标 G 和 C 分别表示 GPS 和 BDS;  $L_{(\text{r,IF})}^G$  和  $L_{(\text{r,IF})}^C$  分别为 GPS 和 BDS 载波相位观测值;  $P_{(\text{r,IF})}^G$  和  $P_{(\text{r,IF})}^C$  分别为 GPS 和 BDS 伪距观测值;  $\rho_r^G$  为 GPS 卫星至接收机的几何距离;  $\rho_r^C$  为 BDS 卫星至接收机的几何距离;  $t_r$  为接收机钟差,  $t^G$  和  $t^C$  分别为 GPS 和 BDS 钟差;  $\lambda_{\text{IF}}^G$  和  $\lambda_{\text{IF}}^C$  分别为 GPS 和 BDS 无电离层组合的波长;  $N_{(\text{r,IF})}^G$  和  $N_{(\text{r,IF})}^C$  分别为 GPS 和 BDS 无电离层组合模糊度;  $B_{(\text{r,IF})}^G$  和  $B_{(\text{r,IF})}^C$  分别为 GPS 和 BDS 的接收机相位延迟;  $B_{\text{IF}}^{(\text{s,G})}$  和  $B_{\text{IF}}^{(\text{s,C})}$  分别为 GPS 和 BDS 的卫星相位延迟;  $b_{(\text{r,IF})}^G$  和  $b_{(\text{r,IF})}^C$  分别为 GPS 和 BDS 的接收机测距码延迟;  $b_{\text{IF}}^{(\text{s,G})}$  和  $b_{\text{IF}}^{(\text{s,C})}$  分别为 GPS 和 BDS 的卫星测距码延迟;  $Z_{(\text{r,IF})}$  为对流层湿延迟;  $m_{(\text{r,IF})}^G$  和  $m_{(\text{r,IF})}^C$  分别为 GPS 和 BDS 的湿延迟映射函数;  $\epsilon_{(\text{r,IF})}^G$  和  $\epsilon_{(\text{r,IF})}^C$  分别为 GPS 和 BDS 的相位测量噪声;  $e_{(\text{r,IF})}^G$  和  $e_{(\text{r,IF})}^C$  分别为 GPS 和 BDS 的伪距测量噪声。

对流层延迟包括干分量和湿分量。对流层延迟干分量通常通过先验模型来改正, 对流层延迟湿分量则利用随机游走在过程进行估计。测量噪声包括相位缠绕、相对论影响和天线相位中心偏差与变化等, 其可通过现有模型进行改正。系统间偏差( $b_{(\text{r,IF})}^G - b_{(\text{r,IF})}^C$ )可作为常数估计, 相位延迟  $B_{(\text{r,IF})}^G$  和  $B_{(\text{r,IF})}^C$  可被模糊度参数吸收。

为了充分阐述 BDS 在 BDS/GPS 双系统精密单点定位中的作用, 本文将 BDS、GPS 两系统观测值的权重设为等权。对于不同卫星观测值定权, 本文采用较为常用的高度角定权模型, 将观测值精度( $\sigma$ )表达为以高度角为变量的函数。具体随机模型为

$$\sigma^2 = \sigma_0^2 \cdot a_0 \quad (9)$$

$$a_0 = \begin{cases} 1 & e \geq 30^\circ \\ \frac{1}{2 \sin e} & e < 30^\circ \end{cases} \quad (10)$$

式中: $\sigma_0$  为观测值的先验精度; $a_0$  与高度角  $e$  相关,即高度角  $e$  小于  $30^\circ$  时观测值权重降低,大于等于  $30^\circ$  时则等权。

1.3 实验数据及方案

针对四川石棉地区观测环境较为复杂的实际情况,探究在复杂实际观测环境中不同定位模式的定位精度,本文选取石棉地区 GNSS 监测网中 10 个流动测站为实验对象(图 1),选取 2021 年 DOY 107、DOY 108 两天的流动测站观测数据为处理资料,采样间隔为 30 s。所有流动测站均配备了 Trimble NetR9 GNSS 接收机,可以同时接收 BDS B1/B2 和 GPS L1/L2 双频数据。

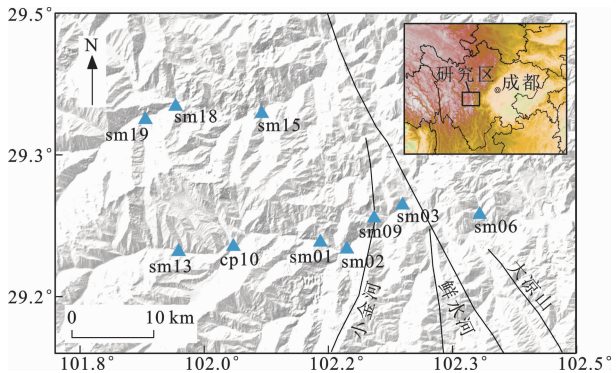


图 1 四川石棉地区流动测站位置分布  
Fig. 1 Location Distribution of Station  
in Shimian Area of Sichuan

利用 GREAT 程序对每个流动测站进行 BDS、GPS 单系统以及 BDS/GPS 双系统精密单点定位的静态解算和动态解算。将 DOY 107、DOY 108 两天的单日解平均值作为参考值,对比分析每个流动测站 0.5、1、2、4、8、12、18、24 h 等 8 个时段的精密单点定位结果。另外,模拟更加恶劣观测环境将高度截止角分别设为  $10^\circ$ 、 $20^\circ$ 、 $30^\circ$  和  $40^\circ$ ,分析不同高度角下 3 种定位模式的定位性能。

2 结果分析

本文基于 GNSS 地震监测网流动测站观测数据,分别进行了精密单点定位的静态解算和动态解算。GNSS 地壳形变监测一般分为地壳长周期形变监测、地震发生前后的地表同震位移观测、地震发生时地壳三维坐标随时间的变化监测以及地震预警中的连续测站位置实时监测。在地壳长周期形变监测和地震发生前后的地表同震位移观测中,由于地壳处于相对稳定状态,所需监测精度较高,一般要达到毫米级;而在地震发生时,地壳随时间发生较剧烈的位移变化,需要对地表位移变化进行动态监测,监

测精度一般需达到厘米级。

静态解算一般用于周期性监测地表位置的长周期运动变化以及当发生地震后利用静态解算获取因地震导致的地表位移。动态解算一般用于分析地震发生时地表位移随时间的变化以及地震预警中地表位置实时监测,以便从中提取地震波到时、水平峰值位移等信息。

2.1 精密单点定位的静态解算

对 10 个流动测站进行精密单点定位的静态解算,所有流动测站定位精度、可视卫星数以及几何精度衰减因子如图 2、3 所示。从图 2 可以看出:BDS 单系统在水平方向上大部分流动测站精度优于 1.5 cm,垂直方向优于 7 cm;GPS 单系统在水平方向精度优于 1 cm,垂直方向优于 5 cm;BDS/GPS 双系统精度最高,水平方向优于 0.5 cm,垂直方向大部分流动测站优于 1 cm。由图 3 可以看出,单系统可视卫星数较少,几何精度衰减因子偏大,表明流动测站实际观测环境较差。BDS/GPS 双系统可有效解决单系统可视卫星数较少的问题,保证有充足的卫星参与解算,并可改善卫星空间几何结构,提高定位精度。BDS 单系统精度相比 GPS 单系统要差的主要原因有两方面:其一,目前 BDS 跟踪站数量分布不

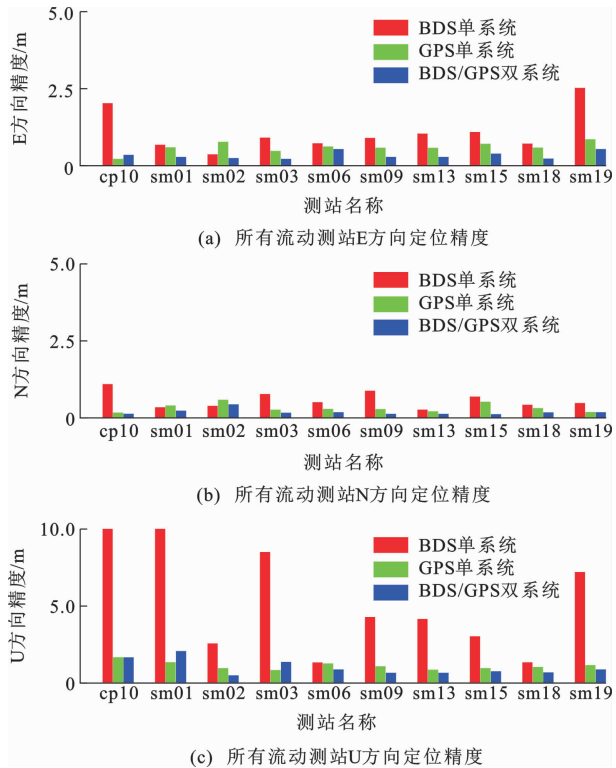


图 2 3 种定位模式下所有流动测站静态精密单点定位精度  
Fig. 2 Static PPP Positioning Accuracies of All Stations  
Under Three Positioning Modes

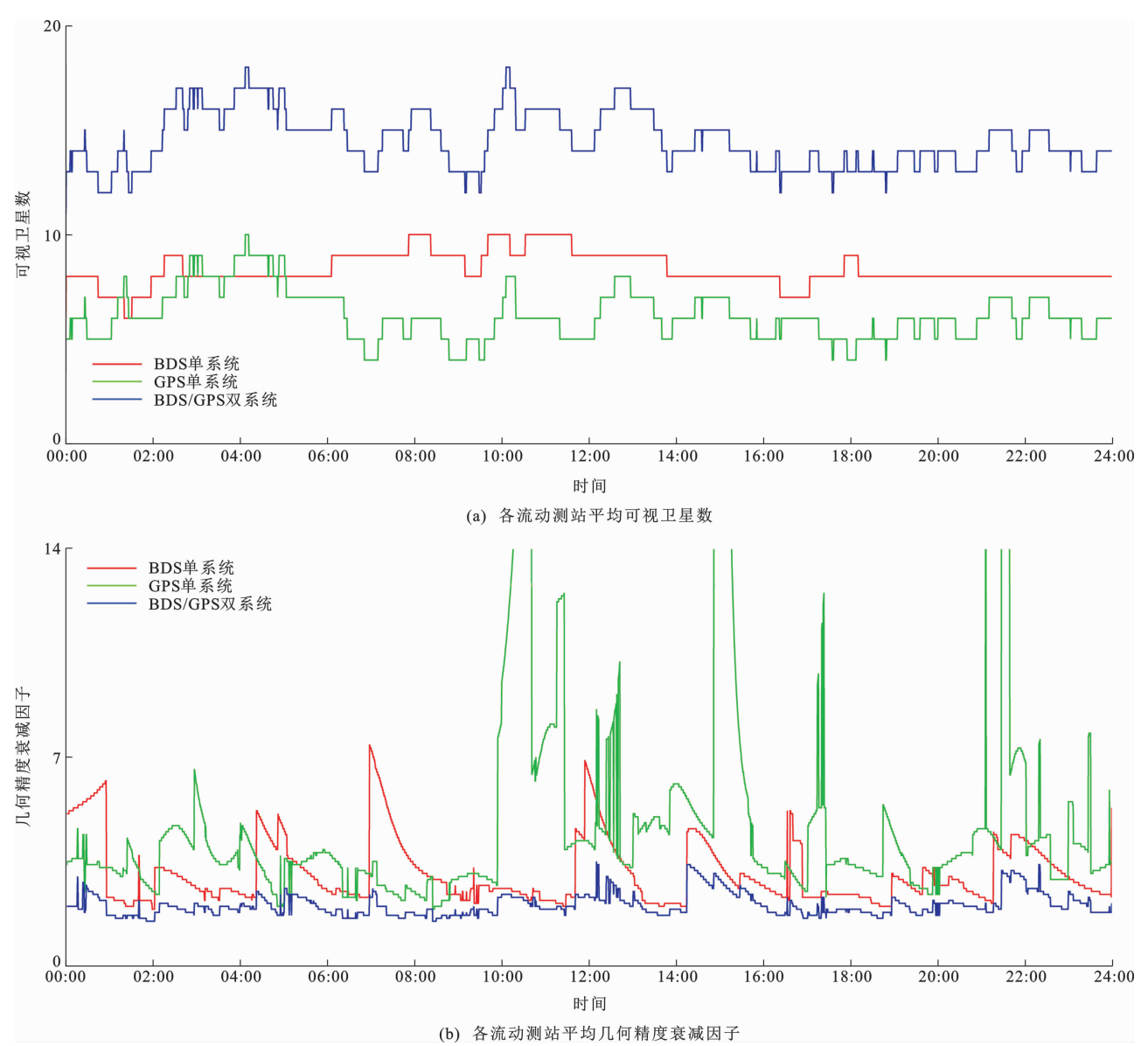


图 3 3 种定位模式下所有流动测站平均可视卫星数和几何精度衰减因子

Fig. 3 Average Number of Visible Satellite and GDOP of All Stations Under Three Positioning Modes

均、数量较少,导致由此计算得到的 BDS 卫星精密星历和精密钟差精度比 GPS 低;其二,目前 BDS 卫星没有提供精确的天线相位中心偏移(PCO)和天线相位中心变化(PCV)改正信息,在解算过程中带入了噪声,导致 BDS 定位精度比 GPS 稍差。

为进一步分析 3 种定位模式的定位收敛速度,本文统计了所有流动测站不同时段长度(0.5、1、2、4、8、12、18、24 h)下 BDS、GPS 单系统和 BDS/GPS 双系统的平均定位精度(图 4)。由图 4 可知,GPS 单系统的收敛速度要比 BDS 单系统快,GPS 单系统经过约 1 h 的水平方向定位精度可收敛至 10 cm 以内,而 BDS 单系统达到相同精度需要 2 h 左右;GPS 单系统经过 2 h 的水平方向定位精度可收敛至 5 cm

以内,而 BDS 单系统达到相同精度需要约 4 h。BDS/GPS 双系统收敛速度最快,经过约 20 min 收敛,E、N、U 等 3 个方向精度即可收敛至 10 cm 以内,经过约 60 min 精度即可达到 5 cm 以内。BDS/GPS 双系统可有效缩短收敛时间,相对于 BDS 和 GPS 单系统,BDS/GPS 双系统收敛到 10 cm 以内的时间分别减少了 83%、80%,收敛到 5 cm 以内的时间分别减少了 75%、50%。

为评估 3 种定位模式在更加恶劣环境中的定位性能,以期满足各种工作环境需求,本文进一步将高度截止角分别设为 10°、20°、30°、40°进行精密单点定位的静态解算。以 sm02 测站为例,图 5 给出了该流动测站 DOY 108 的 BDS、GPS 单系统以及 BDS/

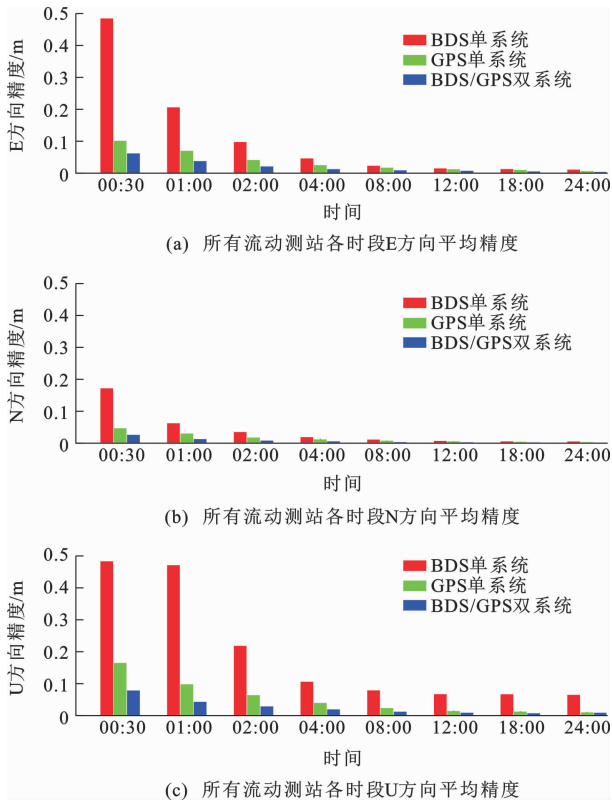


图 4  2021 年 DOY 108 所有流动测站不同时段静态精密单点定位平均精度

Fig. 4  Static PPP Average Positioning Accuracies of All Stations in Different Time on DOY 108, 2021

GPS 双系统的卫星星空图。BDS、GPS 单系统以及 BDS/GPS 双系统 24 h 分时段平均定位精度如图 6 所示。每个流动测站详细解算数据统计结果见表 1。从图 5 可知:卫星星空图在近 EW 向可视卫星数较多,与图 1 所示观测环境相一致;与 BDS、GPS 单系统相比,BDS/GPS 双系统可显著改善卫星空间几何结构。

结合图 5、6 及表 1 可知:随着高度角不断增高,GPS 历元数和可视卫星数减少,几何精度衰减因子

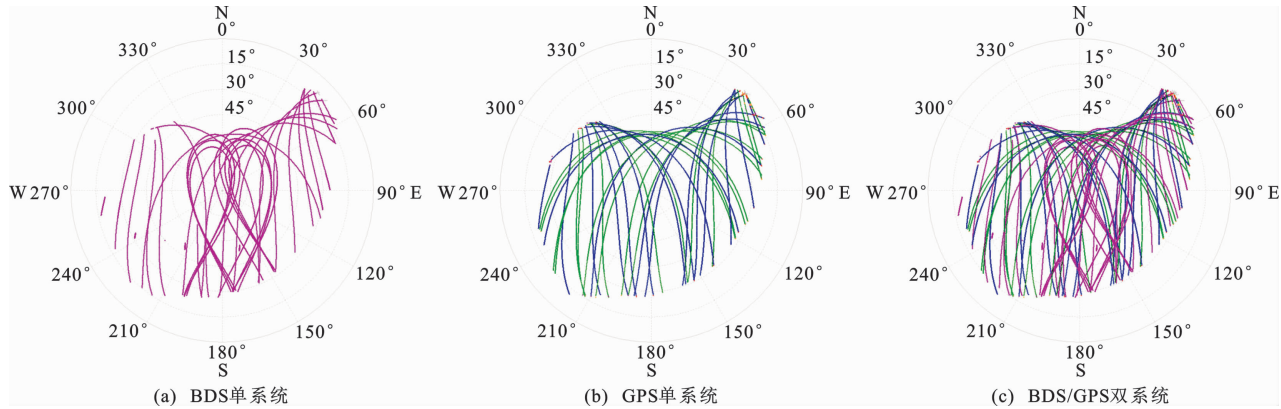


图 5  sm02 测站 3 种定位模式下的卫星星空图

Fig. 5  Skyplots for Station sm02 Under Three Positioning Modes

急剧增加,定位精度显著降低;BDS 历元数基本保持不变,可视卫星数减少,几何精度衰减因子增加,精度降低;BDS/GPS 双系统大大增加了可视卫星数,即使在 40°高度角时历元利用率仍为 100%,可视卫星数保持在 12 颗左右,几何精度衰减因子有所增加,但仍保持较低值,其定位精度和收敛速度都明显优于单系统。

## 2.2 精密单点定位的动态解算

使用与静态解算相同的处理策略和实验数据进行精密单点定位的动态解算,评估在实际较差观测环境下 BDS、GPS 单系统和 BDS/GPS 双系统动态定位性能。所有流动测站动态解算结果如图 7 所示。从图 7 可以看出:GPS 单系统在 E、N、U 等 3 个方向的平均定位精度为 0.119、0.150、0.322 m,多个流动测站水平方向定位精度超过 0.2 m;BDS 单系统在 E、N、U 等 3 个方向的平均定位精度为 0.019、0.014、0.069 m;BDS/GPS 双系统在 E、N、U 等 3 个方向的平均定位精度为 0.022、0.022、0.086 m,平均精度比 BDS 单系统低,这是由于 GPS 单系统精度过低,降低了 BDS/GPS 双系统精度。

以 sm02 测站为例,图 8 给出了 BDS、GPS 单系统以及 BDS/GPS 双系统等 3 种定位模式在不同高度角下精密单点定位的动态解算结果以及高度角为 10°时的 GPS 单系统可视卫星数。从图 8 可以看出:随着高度角的增加,BDS、GPS 单系统定位精度和稳定性逐渐降低,发生定位中断时间和频率也有所增加,且 GPS 单系统定位精度及稳定性随高度角变化更明显;BDS/GPS 双系统精密单点定位的动态解算定位精度和稳定性与 GPS 单系统相比显著提高,且受高度角影响较小。在山区 GNSS 地壳形变监测观测环境较差时,通过 BDS/GPS 双系统融合可弥补单系统存在的缺陷,保证较高的可视卫星数

表 1 所有流动测站不同高度角下解算数据统计结果

Table 1 Statistical Results of Solution Data at Different Height Angles of All Stations

流动测站	高度角	BDS 单系统解算数据统计结果			GPS 单系统解算数据统计结果			BDS/GPS 双系统解算数据统计结果		
		历元数	平均可视 卫星数	几何精度 衰减因子	历元数	平均可视 卫星数	几何精度 衰减因子	历元数	平均可视 卫星数	几何精度 衰减因子
sm01	10°	2 880	8.44	5.77	2 681	5.07	9.78	2 880	13.51	3.29
	20°	2 880	8.44	5.77	2 651	4.98	10.35	2 880	13.41	3.45
	30°	2 880	8.42	5.79	2 458	4.73	11.85	2 880	13.15	3.65
	40°	2 880	7.18	9.76	1 673	3.98	31.28	2 880	11.15	5.91
sm02	10°	2 880	10.62	3.17	2 860	6.23	4.93	2 880	16.84	2.07
	20°	2 880	10.33	3.78	2 860	5.86	6.12	2 880	16.19	2.44
	30°	2 880	9.84	4.48	2 620	5.13	15.38	2 880	14.98	2.99
	40°	2 880	7.83	9.23	1 730	4.01	30.85	2 880	11.84	5.69
sm03	10°	2 880	11.80	2.63	2 866	6.40	4.58	2 880	18.20	1.93
	20°	2 880	11.53	2.95	2 863	6.00	5.84	2 880	17.53	2.21
	30°	2 880	10.83	3.33	2 664	5.18	10.56	2 880	16.02	2.63
	40°	2 880	7.83	9.23	2 727	4.01	30.25	2 880	11.84	5.69
sm06	10°	2 880	13.14	2.46	2 880	6.40	4.87	2 880	19.54	1.92
	20°	2 880	12.06	2.86	2 880	6.00	5.50	2 880	18.07	2.19
	30°	2 880	10.86	3.33	2 686	5.19	10.70	2 880	16.05	2.62
	40°	2 880	7.83	9.21	1 706	4.00	27.44	2 880	11.83	5.68
sm09	10°	2 880	9.34	4.33	2 880	7.86	2.92	2 880	17.19	1.95
	20°	2 880	9.34	4.33	2 880	6.80	3.94	2 880	16.14	2.33
	30°	2 880	9.27	4.40	2 686	5.33	10.08	2 880	14.59	2.96
	40°	2 880	7.20	9.69	1 731	4.01	30.23	2 880	11.21	5.81
sm13	10°	2 880	10.87	3.18	2 531	4.92	13.02	2 880	15.79	2.21
	20°	2 880	9.80	4.18	2 474	4.74	14.35	2 880	14.54	2.87
	30°	2 880	9.56	4.44	2 128	4.39	20.50	2 880	13.95	3.21
	40°	2 880	7.51	10.04	1 263	3.67	36.73	2 880	11.18	6.32
sm15	10°	2 880	10.68	3.73	2 876	6.23	4.80	2 880	16.91	2.25
	20°	2 880	10.60	3.87	2 842	5.97	5.56	2 880	16.57	2.46
	30°	2 880	10.04	4.52	2 671	5.24	15.35	2 880	15.29	3.03
	40°	2 860	8.21	8.75	1 725	4.01	34.96	2 880	12.22	5.57
sm18	10°	2 880	9.71	4.48	2 704	5.37	12.77	2 880	15.08	2.69
	20°	2 880	9.68	4.55	2 704	5.31	13.17	2 880	14.99	2.79
	30°	2 880	9.49	4.79	2 453	4.80	13.89	2 880	14.29	3.27
	40°	2 860	8.03	9.12	1 663	3.93	35.44	2 880	11.96	5.77
sm19	10°	2 880	9.35	4.63	2 880	6.95	3.50	2 880	16.30	2.21
	20°	2 880	9.35	4.63	2 880	6.46	4.58	2 880	15.81	2.52
	30°	2 880	9.33	4.64	2 680	5.33	15.25	2 880	14.66	3.07
	40°	2 833	7.62	9.29	1 730	4.01	33.52	2 880	11.63	5.68

以及定位连续性,显著提高定位性能。BDS/GPS 双系统精密单点定位的动态解算抗差力更强,在地震同震形变监测、地震预警等应用中更具优势。

从图 3 可知,DOY 108 的 GPS 可视卫星数最低为 4 颗,并没有低于 4 颗的情况,但是在精密单点定位的动态解算时出现了定位中断。为此,本文分析

了所有流动测站 BDS、GPS 观测数据质量(表 2),发现 GPS 在某些时段只能接收到单频观测值,MP1 值、MP2 值为测距码的多路径误差。图 8(k)给出了接收到 GPS 单频观测值的时刻以及该时刻的可视卫星数,定位中断的时刻均是接收到单频观测值的时刻,且该时刻可视卫星数较少。此外,全天都有

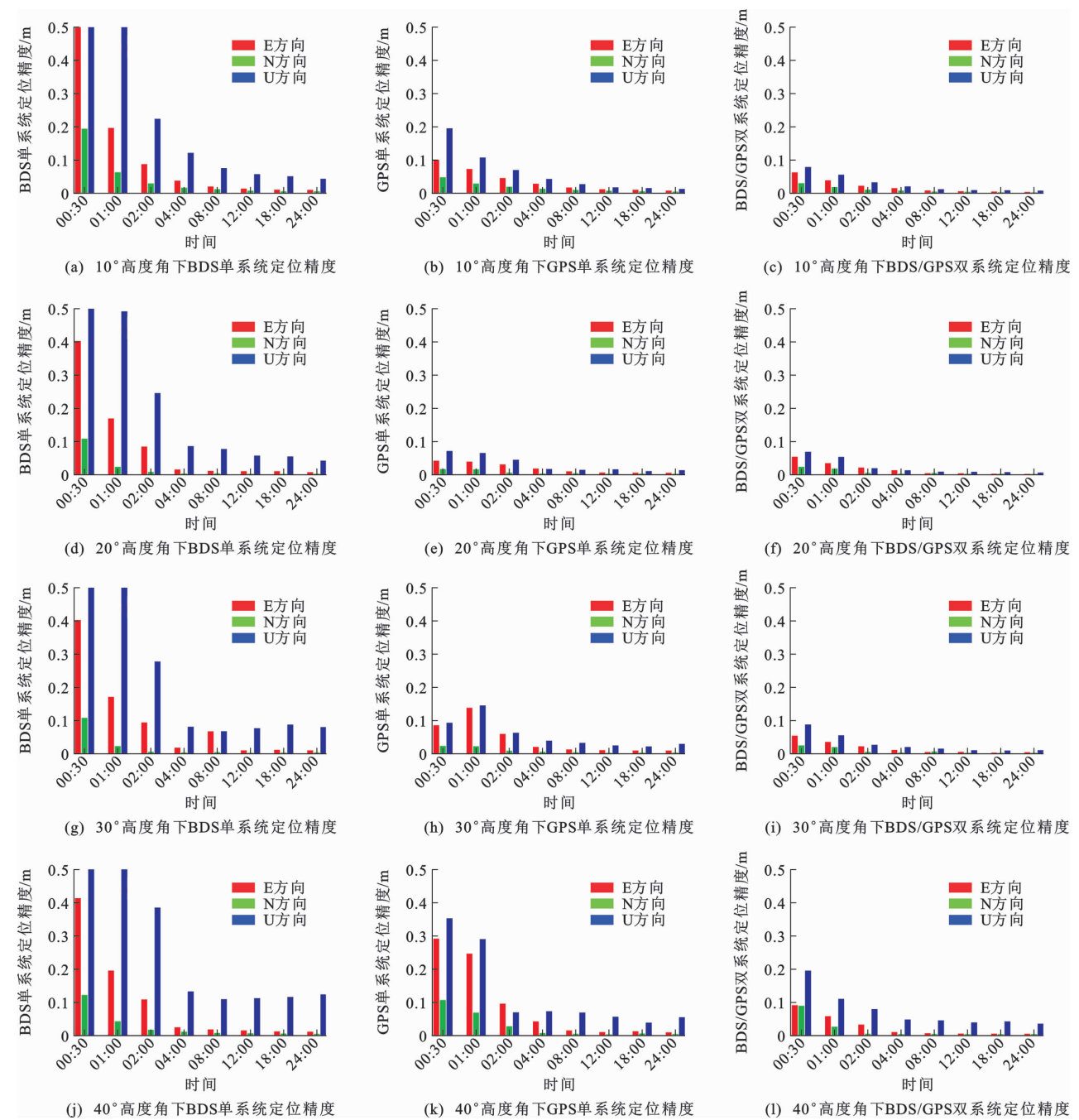


图 6 BDS、GPS 单系统及 BDS/GPS 双系统在不同高度角下的静态精密单点定位精度

Fig. 6 Static PPP Positioning Accuracies of BDS, GPS and BDS/GPS at Different Altitude Angles

可能接收到单频观测值,当观测条件较差时,接收到单频观测值会严重影响定位结果。因此,为保证定位精度及定位连续性,可视卫星数最好有 6 颗或 6 颗以上,BDS/GPS 双系统可显著提高可视卫星数,保持较高的定位精度及稳定性。

根据表 2 可知,在四川石棉地区特殊观测环境下(在近 EW 向的狭长山沟中,SN 向遮挡相对较严重),GPS 较 BDS 存在更多的周跳、卫星失锁和信号丢失,且 GPS 多路径误差更大。频繁的卫星失锁和

信号丢失会导致观测弧段不连续,导致模糊度解算不准确产生系统性粗差,从而影响精密单点定位的动态解算精度。此外,大量周跳和较大的多路径误差也会对定位精度产生负面影响。单频观测值、周跳、卫星失锁以及信号丢失这些因素共同导致了 GPS 精密单点定位的动态解算精度降低。

### 3 结 语

本文针对实际 GNSS 地壳形变流动观测中遇

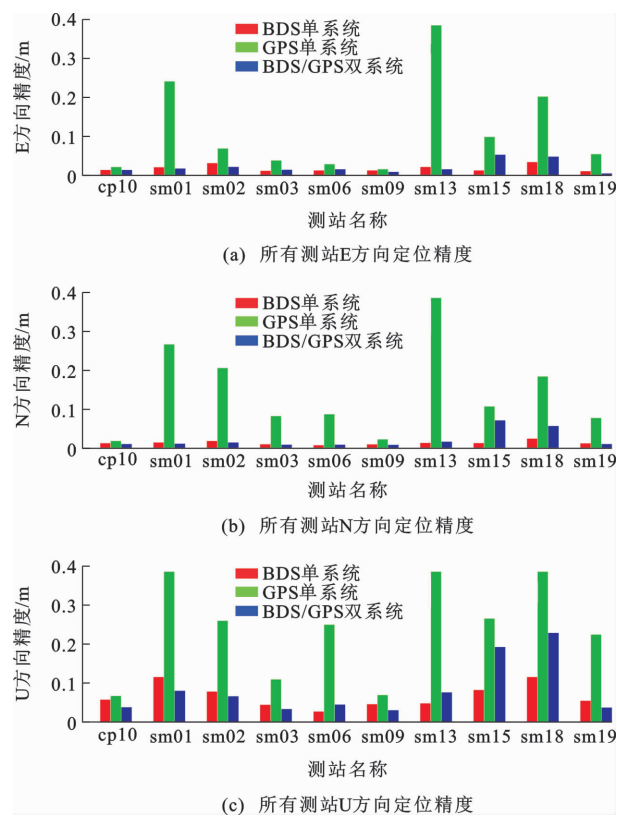


图 7 BDS、GPS 单系统和 BDS/GPS 双系统  
动态精密单点定位精度

Fig. 7 Dynamic PPP Positioning Accuracies of BDS,  
GPS and BDS/GPS

到的观测环境较差、GPS 可视卫星数较少等问题，提出采用 BDS/GPS 双系统进行观测。利用 GREAT 程序进行精密单点定位解算，对比分析其定位精度、收敛速度以及数据质量。

在峡谷特殊环境下，BDS/GPS 双系统精密单点定位的静态解算精度在水平方向优于 0.5 cm，垂直方向大部分流动测站优于 1 cm；精密单点定位的动态解算精度在水平方向优于 2.5 cm，垂直方向优于 9 cm，可满足地壳长周期及震时形变监测精度需求。BDS/GPS 双系统与 BDS、GPS 单系统相比，静态定位性能显著提高，定位精度可提高 20%~50%，收敛速度可提高 50%~80%；BDS/GPS 双系统可大大增加可视卫星数，改善卫星空间几何结构，降低几何精度衰减因子，保持较高的历元利用率。因此，在高差较大、地形起伏剧烈等复杂观测环境中，BDS 单系统可在地壳形变监测中发挥重要作用，BDS/GPS 双系统因其优越的定位性能具有更好的应用价值。

改变高度角模拟更加恶劣的观测环境，发现单系统定位性能急剧降低，多系统则保持较高精度，稳

表 2 GPS 与 BDS 观测数据质量统计结果  
Table 2 Statistical Results of GPS and BDS Observation  
Data Quality

流动测站	系统	卫星失锁	信号丢失	周跳	MP1 值/cm	MP2 值/cm
cp10	GPS	82	27	8	28.1	21.7
	BDS	58	1	2	24.6	15.6
sm01	GPS	124	58	136	41.9	34.4
	BDS	39	1	10	35.5	20.1
sm02	GPS	112	109	180	48.2	41.6
	BDS	43	5	4	33.9	20.7
sm03	GPS	75	63	69	38.5	31.4
	BDS	34	27	16	31.5	18.3
sm06	GPS	71	48	132	31.6	28.1
	BDS	57	52	23	32.3	22.6
sm09	GPS	120	100	41	29.6	27.9
	BDS	60	3	4	25.6	15.7
sm13	GPS	170	102	224	43.5	37.8
	BDS	133	44	145	42.8	32.8
sm15	GPS	78	59	88	36.1	31.3
	BDS	157	35	18	32.3	25.1
sm18	GPS	112	93	181	46.6	35.6
	BDS	42	6	36	36.3	20.5
sm19	GPS	103	49	25	31.6	25.4
	BDS	50	2	2	26.2	13.9

定性较强。随着高度角升高，GPS 单系统定位精度降低，几何精度衰减因子显著增高，历元利用率急剧降低。BDS/GPS 双系统稳定性较强，在 40°高度角时，历元利用率仍为 100%，可视卫星数保持在 12 颗左右。BDS/GPS 双系统可消除单系统在精密单点定位的动态解算中由双频观测值缺失导致的定位中断，显著提高定位精度和稳定性，表明 BDS/GPS 双系统精密单点定位的动态解算在地壳形变监测以及强震预警等方面的应用更具优势。

在精密单点定位的动态解算方面，观测条件受限导致 GPS 观测值中包含更多的卫星失锁、信号丢失和周跳以及较大的多路径误差，可能导致 GPS 动态解算过程中包含了粗差。此外，接收单频观测值会降低可视卫星数，从而严重影响定位性能，因此，可视卫星数需有 6 颗或 6 颗以上才能保证连续动态的精密单点定位。BDS/GPS 双系统融合解算可以大大提高可视卫星数，保持较高历元利用率，有效解决观测条件较差时可视卫星数较少导致的定位中断问题。

BDS/GPS 双系统精密单点定位精度可满足四川石棉地区地壳形变监测精度要求。当观测环境更

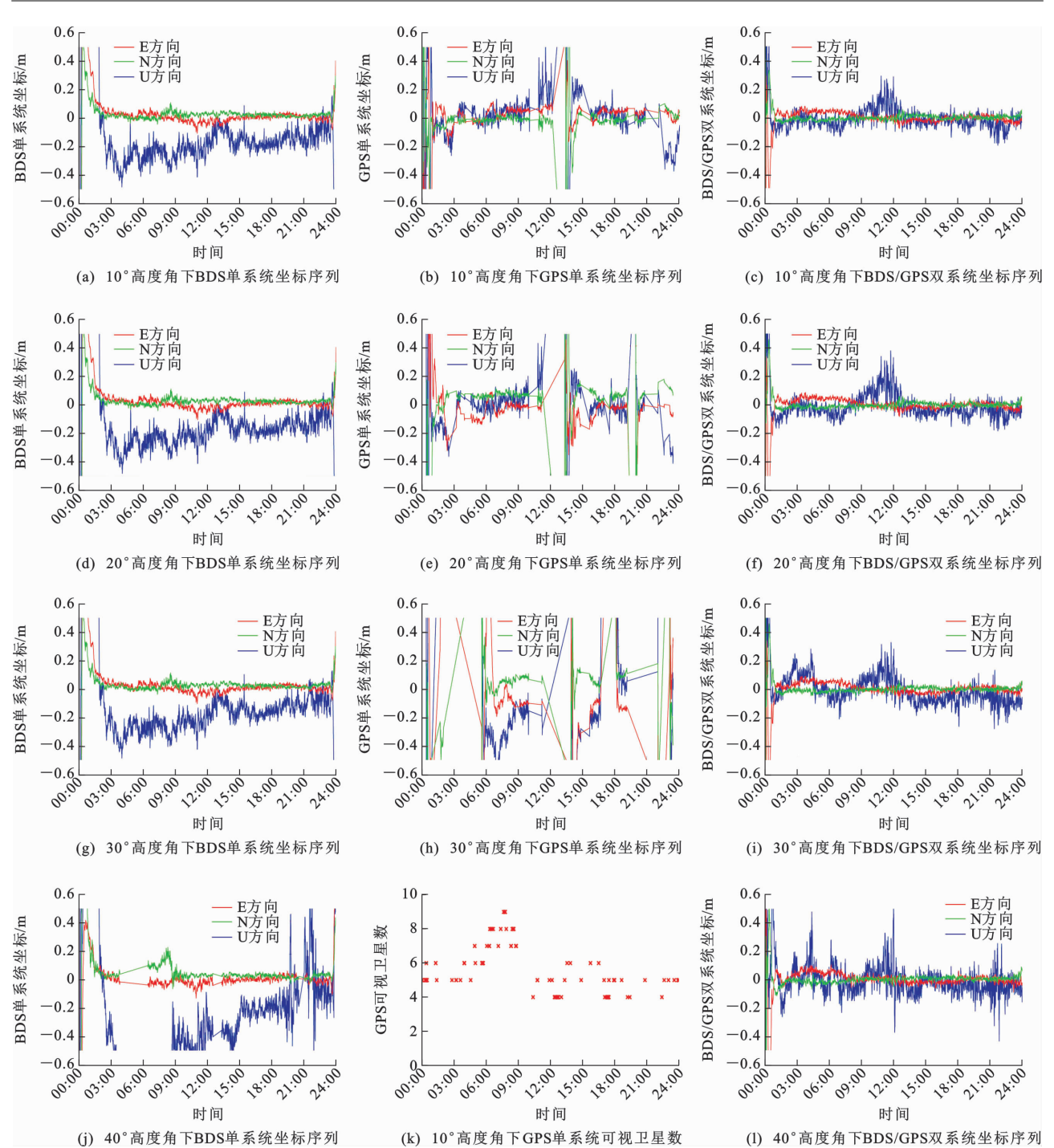


图 8 BDS、GPS 单系统及 BDS/GPS 双系统在不同高度角下动态精密单点定位精度

Fig. 8 Dynamic PPP Positioning Accuracies of BDS, GPS and BDS/GPS at Different Altitude Angles

差导致 BDS/GPS 双系统解算无法满足地壳形变监测精度要求时,可考虑同时接收 BDS/GPS/GLO-NASS/Galileo 四系统观测值,并通过四系统融合精密单点定位解算提高定位精度以满足地壳形变监测需求。

野外数据采集工作者付出了大量辛苦,武汉大学李星星教授提供了 GREAT 程序,武汉大学卫星导航定位技术研究中心提供了多系统精密轨道和钟

差产品,在此一并表示感谢!

参考文献:

References:

[1] 张小红,李星星,李盼. GNSS 精密单点定位技术及应用进展[J]. 测绘学报,2017,46(10):1399-1407.  
ZHANG Xiao-hong, LI Xing-xing, LI Pan. Review of GNSS PPP and Its Application[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica,2017,46(10):1399-1407.

- [2] 王迪晋,王东振,赵 斌,等. 2021 年青海玛多 $M_w$  7.4 地震 GNSS 同震形变场及其断层滑动分布[J]. 地球物理学报, 2022, 65(2): 537-551.  
WANG Di-jin, WANG Dong-zhen, ZHAO Bin, et al. 2021 Qinghai Madoi  $M_w$  7.4 Earthquake Coseismic Deformation Field and Fault-slip Distribution Using GNSS Observation[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2022, 65(2): 537-551.
- [3] 郝 明,王庆良. GNSS 空间大地测量技术在中国大陆活动地块划分中的应用和研究进展[J]. 地震地质, 2020, 42(2): 283-296.  
HAO Ming, WANG Qing-liang. Progress in Application of GNSS to Division of Active Tectonic Blocks in Continental China[J]. Seismology and Geology, 2020, 42(2): 283-296.
- [4] TEGEDOR J, ØVSTEDAL O, VIGEN E. Precise Orbit Determination and Point Positioning Using GPS, Glonass, Galileo and BeiDou[J]. Journal of Geodetic Science, 2014, 4(1): 65-73.
- [5] LI X X, ZHANG X H, REN X D, et al. Precise Positioning with Current Multi-constellation Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo and BeiDou[J]. Scientific Reports, 2015, 5: 8328.
- [6] LI J, LIU G, QIAO X J, et al. Rupture Characteristics of the 25 November 2016 Aketao Earthquake ( $M_w$  6.6) in Eastern Pamir Revealed by GPS and Teleseismic Data[J]. Pure and Applied Geophysics, 2018, 175(2): 525-730.
- [7] KOUBA J, HÉROUX P. Precise Point Positioning Using IGS Orbit and Clock Products[J]. GPS Solutions, 2001, 5(2): 12-28.
- [8] 张小红,左 翔,李 盼,等. BDS/GPS 精密单点定位收敛时间与定位精度的比较[J]. 测绘学报, 2015, 44(3): 250-256.  
ZHANG Xiao-hong, ZUO Xiang, LI Pan, et al. Convergence Time and Positioning Accuracy Comparison Between BDS and GPS Precise Point Positioning[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2015, 44(3): 250-256.
- [9] PIRTI A. Accuracy Analysis of GPS Positioning near the Forest Environment[J]. Croatian Journal of Forest Engineering, 2008, 29(2): 189-199.
- [10] 王泽民,孟 洪,伍 岳,等. GPS/Galileo 及其组合系统导航定位的 DOP 值分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2006, 31(1): 9-11, 38.  
WANG Ze-min, MENG Yang, WU Yue, et al. DOP for GPS, Galileo and Combination Navigation System[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2006, 31(1): 9-11, 38.
- [11] 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.  
TANG Wei-ming, XU Kun, JIN Lei, et al. Test and Analysis of BeiDou/GPS Combined Pseudo-range Point Positioning Performance[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2015, 40(4): 529-533.
- [12] 唐卫明,崔健慧,惠孟堂. 北斗区域星座对相对定位精度的影响分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2016, 41(8): 1107-1112.  
TANG Wei-ming, CUI Jian-hui, HUI Meng-tang. Analysis of the Impact of BeiDou Regional Constellation on Relative Positioning Accuracy[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2016, 41(8): 1107-1112.
- [13] 朱筱虹,李喜来,杨元喜. 从国际卫星导航系统发展谈加速中国北斗卫星导航系统建设[J]. 测绘通报, 2011(8): 1-4.  
ZHU Xiao-hong, LI Xi-lai, YANG Yuan-xi. Considerations for Accelerating Compass Construction from the Viewpoint of International GNSS Development[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2011(8): 1-4.
- [14] 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.  
YANG Yuan-xi. Progress, Contribution and Challenges of Compass/Beidou Satellite Navigation System[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2010, 39(1): 1-6.
- [15] 杨 军. 北斗卫星导航系统建设与发展[J]. 卫星应用, 2021(6): 12-15.  
YANG Jun. Construction and Development of Beidou Satellite Navigation System[J]. Satellite Application, 2021(6): 12-15.
- [16] GUCMA M, BOC R, WAZ M. Reliability Measures in GNSS Multi-constellation Systems[J]. European Research Studies Journal, 2021, 24(3): 410-422.
- [17] 许海林,周恩泽,童梦想,等. GPS/BDS/Galileo 单点定位精度分析[J]. 测绘地理信息, 2022, 47(4): 19-24.  
XU Hai-lin, ZHOU En-ze, TONG Meng-xiang, et al. Accuracy Analysis on BDS/GPS/Galileo Single-point Positioning[J]. Journal of Geomatics, 2022, 47(4): 19-24.
- [18] LOU Y D, ZHENG F, GU S F, et al. Multi-GNSS Precise Point Positioning with Raw Single-frequency

- and Dual-frequency Measurement Models [J]. GPS Solutions, 2016, 20(4): 849-862.
- [19] 尹海博,郭 杭,罗孝文. BDS/GNSS 融合精密单点定位性能分析[J]. 全球定位系统, 2021, 46(3): 66-71.  
YIN Hai-bo, GUO Hang, LUO Xiao-wen. Performance Analysis of BDS/GNSS Precision Point Positioning[J]. GNSS World of China, 2021, 46(3): 66-71.
- [20] 丁 赫,孙付平,李亚萍,等. BDS/GPS/GLONASS 组合精密单点定位模型及性能分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2016, 36(4): 303-307.  
DING He, SUN Fu-ping, LI Ya-ping, et al. Modeling and Performance Analysis of Combined BDS/GPS/GLONASS Precise Point Positioning[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2016, 36(4): 303-307.
- [21] 祝会忠,杨添宇,赵洪涛,等. GNSS 多系统精密单点定位方法与性能分析[J]. 测绘科学, 2020, 45(12): 1-7, 21.  
ZHU Hui-zhong, YANG Tian-yu, ZHAO Hong-tao, et al. GNSS Multi-system Precise Point Positioning Method and Performance Analysis[J]. Science of Surveying and Mapping, 2020, 45(12): 1-7, 21.
- [22] 任晓东,张柯柯,李星星,等. BeiDou, Galileo, GLONASS, GPS 多系统融合精密单点[J]. 测绘学报, 2015, 44(12): 1307-1313, 1339.  
REN Xiao-dong, ZHANG Ke-ke, LI Xing-xing, et al. Precise Point Positioning with Multi-constellation Satellite Systems: BeiDou, Galileo, GLONASS, GPS [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2015, 44(12): 1307-1313, 1339.
- [23] 魏二虎,刘学习,刘经南. 北斗+GPS 组合单点定位精度评价与分析[J]. 测绘通报, 2017(5): 1-5.  
WEI Er-hu, LIU Xue-xi, LIU Jing-nan. Accuracy Evaluation and Analysis of Single Point Positioning with BeiDou and GPS[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2017(5): 1-5.
- [24] 徐龙威,刘 晖,张 明,等. 不同截止高度角多模 GNSS 组合单点定位性能分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2015, 35(6): 987-991.  
XU Long-wei, LIU Hui, ZHANG Ming, et al. Performance Assessment of Multi-GNSS Single Point Positioning with Different Cut-off Elevation Angles [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2015, 35(6): 987-991.
- [25] 李 博,徐爱功,祝会忠,等. 不同截止高度角 BDS/GPS 伪距单点定位性能分析[J]. 测绘科学, 2016, 41(12): 32-38.  
LI Bo, XU Ai-gong, ZHU Hui-zhong, et al. Performance Assessment of BDS/GPS Pseudo-range Single Point Positioning with Different Cut-off Elevation Angles[J]. Science of Surveying and Mapping, 2016, 41(12): 32-38.
- [26] LI W, TEUNISSEN P, ZHANG B C, et al. Precise Point Positioning Using GPS and Compass Observations[C] // SUN J D, JIAO W H, WU H T, et al. China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2013 Proceedings. Heidelberg: Springer-Verlag, 2013: 367-378.
- [27] CHEN H C, HUANG Y S, CHIANG K W, et al. The Performance Comparison Between GPS and BeiDou/Compass: A Perspective from Asia[J]. Journal of the Chinese Institute of Engineers, 2009, 32(5): 679-689.
- [28] QU L Z, ZHAO Q L, LI M, et al. Precise Point Positioning Using Combined Beidou and GPS Observations[C] // SUN J D, JIAO W H, WU H T, et al. China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2013 Proceedings. Heidelberg: Springer-Verlag, 2013: 241-252.
- [29] 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(5): 1-5.  
WEI Zi-qing. China Geodetic Coordinate System 2000 and Its Comparison With WGS84[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2008, 28(5): 1-5.
- [30] 陈俊勇,杨元喜,王 敏,等. 2000 国家大地控制网的构建和它的技术进步[J]. 测绘学报, 2007, 36(1): 1-8.  
CHEN Jun-yong, YANG Yuan-xi, WANG Min, et al. Establishment of 2000 National Geodetic Control Network of China and Its Technological Progress[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2007, 36(1): 1-8.