

YE Shaochun, XU Wenbing, YIN Xiao. Comparison on Real-time Single Point Positioning Performance of Single Beidou/Multi-mode GNSS in Remote Forested Areas (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2025, 45(1): 235–242. CSTR:32142.14.cjss.2023–0120. DOI:10.11728/cjss2025.01.2023–0120

偏远林区单北斗/多模 GNSS 实时 单点定位性能比较*

叶少春 徐文兵 尹 潇

(浙江农林大学环境与资源学院 杭州 311300)

摘 要 在偏远林区, 参考站比较稀疏且较难进行网络通信, 多路径效应大, 观测时卫星周跳数大, 难以利用双差方式进行高精度实时 (Real-Time Kinematic, RTK) 定位. 为此, 在考虑广播星历钟差引入码硬件延迟的基础上, 推导了单北斗 (BDS)/多模全球导航卫星系统 (Global Navigation Satellite System, GNSS) 单频和消电离层组合的伪距单点定位 (Single Point Positioning, SPP) 模型, 根据系统钟差基准不同引起的伪距硬件延迟的改正方法, 并采用林区实测的车载动态观测数据进行精度评估, 得出目前卫星导航基于单频 SPP 和 IF SPP 在偏远林区可以达到的定位精度. 结果表明, 在林区无参考站改正数的情况下, 单北斗以及 GPS/Galileo/BDS 组合的 SPP 定位平面精度可以达到 2 m. 相比单频 SPP, 单北斗、GPS/Galileo/BDS 消电离层组合 SPP 的平面精度分别提高约 0.5 m 和 0.4 m, 基于消电离层组合的 SPP 具有更优的定位性能.

关键词 北斗卫星导航系统, 伪距单点定位, 消电离层组合, 偏远林区, 动态定位

中图分类号 V448

Comparison on Real-time Single Point Positioning Performance of Single Beidou/Multi-mode GNSS in Remote Forested Areas

YE Shaochun XU Wenbing YIN Xiao

(College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang Agriculture and Forestry University, Hangzhou 311300)

Abstract In remote forested areas, reference stations are sparse, making network communication difficult. There are significant multipath effects, causing large cycle slips during observations, making it challenging to achieve high-precision RTK (Real-Time Kinematic) positioning using double-difference methods. Considering the hardware delay introduced by broadcast ephemeris and clock errors, a pseudorange Single-Point Positioning (SPP) model for single Beidou (BDS)/multi-mode Global Navigation Satellite System (GNSS) single-frequency and ionosphere-free combinations is derived. Correction methods for

* 国家自然科学基金项目 (42074014) 和浙江农林大学人才基金项目 (2021LFR057) 共同资助

2023-10-27 收到原稿, 2023-12-29 收到修定稿

pseudorange hardware delays caused by different system clock error references is introduced. Accuracy is evaluated using measured vehicle dynamic observation data in forested areas, and the achievable positioning accuracy of current satellite navigation is determined based on single-frequency SPP and ionosphere-free SPP in remote forested regions. The results show that under the condition of no correction data from reference stations in the forest area, the plane accuracy of BDS and GPS/Galileo/BDS SPP positioning can reach 2 m. Compared with single-frequency SPP, the plane accuracy of Beidou, GPS/Galileo/BDS ionosphere-free SPP is improved by about 0.5 m and 0.4 m respectively, and the SPP based on the ionosphere-free combination has better positioning performance.

Key words Beidou navigation satellite system, Single point positioning, Ionosphere-free, Remote forest area, Kinematic positioning

0 引言

由于全天候、全天时、全范围等优点,全球卫星导航系统(Global Navigation Satellite Systems, GNSS)的应用范围越来越广.在森林资源调查、林业有害生物调查、森林防火、林地管理、林区巡查、林机导航、林区道路勘测等方面发挥了重要作用^[1].在美国GPS(Global Positioning System)和俄罗斯GLONASS(Global Navigation Satellite System)之后,中国于2020年6月完成三代BDS(Beidou Navigation Satellite System)卫星部署,实现全球服务^[2].相比美国GPS、俄罗斯GLONASS以及欧洲的Galileo,BDS具有更多的高轨卫星、较强的抗遮挡能力以及更优的低纬度性能,并可提供多个频点导航信号以提高定位精度^[3].

当前,北斗系统在轨卫星49颗,其中可用44颗,包括15颗BDS二代和29颗BDS三代,终端改正数据和应用系统的发展使得北斗系统定位技术已广泛应用于林业,为复杂的林业工作提供支持.其中,针对森林管护工作的需求,文献[4]提出并研发了北斗林业移动生态巡护平台,成功应用于林草领域,为森林巡护提供了强大的信息技术支持.文献[5]通过比较北斗系统与GPS系统在卫星数量、信号强度、位置精度等因素上的表现,得出北斗系统具有更好的数据稳定性,并且其定位精度在不断提高.文献[6]基于北斗短报文的特点,开发了信息编码解码、短报文传输、通信模式自适应和多媒体信息补发等功能,实现了北斗短报文在巡护终端与调度管理中心之间信息的及时传递.目前北斗系统在林业领域的应用正在持续发展,以其强大的导航与通信能力为林业资源管理

提供优质服务^[7].

文献[8]分析了不同导航系统的时空基准差异,并在城市峡谷场景进行多系统精密定位分析,发现多系统组合定位较单一系统定位具有更优的定位效果.文献[9]发现各GNSS系统的空间基准差异目前在厘米级,多数场景的定位可以忽略这一差异.总体而言,上述多系统组合定位研究主要关注精密定位,例如RTK(Real-time Kinematic)或PPP(Precise Point Positioning).文献[10]发现在林区郁闭度较高时,难以使用RTK在林区定位,并且要求参考站密度在5 km以内.在无密集参考站的偏远林区环境下,文献[11]使用伪距单点定位技术,通过3个时长对定位精度、卫星数量、位置精度衰减因子(Position Dilution of Precision, PDOP)值、信噪比等参数进行分析,发现北斗的定位性能与GPS相当,对一定时长的观测值求平均后,定位精度可达5 m水平,但其主要基于静态模式.

因此,针对偏远林区参考站稀疏难以进行RTK定位的问题,本文评估单北斗/GNSS多系统伪距单点定位的精度,重点关注林区环境的动态定位性能.在给出单北斗/多模GNSS原始伪距观测方程基础上,推导钟差引入硬件延迟的模型,基于车载方式在林区进行车载动态实验,分析林区环境的GNSS观测质量以及定位性能.

1 实验概况

1.1 研究区域

实验区位于杭州市临安境内朗山公园(30°14'58"N, 119°41'13"E),属于亚热带季风气候,雨量充沛,四季分明,公园占地面积约3.200000 km²,

森林覆盖率高达 94%, 植被以落叶阔叶林为主, 树种多为落叶松、香樟、毛竹等. 研究区选在公园林区主干道, 海拔 140 m, 坡度为 6%~20%, 林分郁闭度约 0.5, 如图 1 所示.

1.2 实验仪器与数据采集

所使用的设备为 HHBD3000 接收机, 内置 4G LTE 模块, 可以方便地采集 GNSS 原始数据并回传到服务器, 可接收 GPS 的 P1 和 P2, Galileo 的 E1, E5a 和 BDS 的 B1I, B3I 信号. 图 2 为接收设备, 包括接收机、GNSS 天线、一个 4G 天线和一个移动电源. 数据采集时间为 2023 年 6 月 1 日, 采集频率为 1 Hz. 实验中汽车搭载接收机高速行驶, 时速约 20~50 km·h⁻¹.

2 定位模型

综合考虑天顶对流层延迟、电离层延迟和硬件延迟的 GNSS 伪距观测方程如下^[12]:

$$\begin{aligned} P_{r,1}^s &= \rho_r^s + dt_r - dt^s + M_{Trop} T_{Trop} + I_{r,1}^s + \\ &\quad b_{r,1} - b_1^s + \varepsilon(P_{r,1}^s), \\ P_{r,2}^s &= \rho_r^s + dt_r - dt^s + M_{Trop} T_{Trop} + \gamma_2 I_{r,1}^s + \\ &\quad b_{r,2} - b_2^s + \varepsilon(P_{r,2}^s). \end{aligned} \quad (1)$$

式中, $P_{r,j}^s$ 为伪距, 单位 m, 下标 $j=1,2$ 为观测频率; 上标 s 和下标 r 代表卫星和接收机; ρ_r^s 为卫星到接收机之间的几何距离; dt_r 为接收机钟差, dt^s 为卫星钟差, 以 m 为单位; T_{Trop} 为对流层天顶延迟 (Zenith Tropospheric Delay, ZTD), M_{Trop} 为其对应的映射函数; $I_{r,1}^s$ 为频率 1 的电离层延迟, 通过系数 $\gamma_2 = f_1^2/f_2^2$ 映射到频率 2, 这里 f 为频率; $b_{r,j}$ 和 b_j^s 分别为接收机端与卫星端伪距硬件延迟; $\varepsilon(P_{r,j}^s)$ 为伪距观测噪声及其他未改正的模型误差.

联立两个频点的观测值, 组成双频消电离层组合 (Ionosphere-Free, IF), 其表达为

$$P_{r,IF}^s = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} P_{r,1}^s - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} P_{r,2}^s = \rho_r^s + dt_r - dt^s + M_{Trop} T_{Trop} + b_{r,IF} - b_{IF}^s + \varepsilon(P_{r,IF}^s). \quad (2)$$

式中, 站星几何距离、钟差、对流层延迟等与频率无关; $b_{r,IF}$ 和 b_{IF}^s 为接收机端和卫星端 IF 组合的伪距硬件延迟.

为实现实时定位, 通常采用广播星历来计算卫星轨道和钟差. 不同系统的卫星钟差基准存在差异, 其



图 1 GNSS 试验数据获取的林路路网环境

Fig. 1 Forest road network environment obtained from experimental data

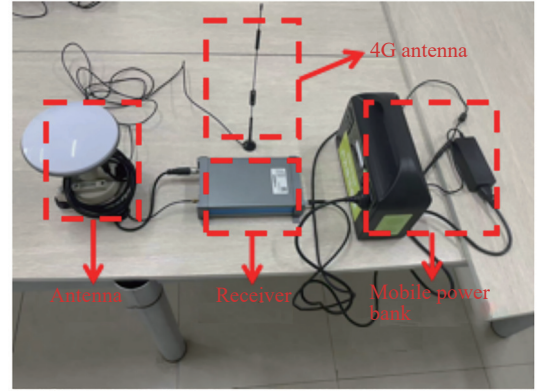


图 2 HHBD3000 接收设备

Fig. 2 HHBD3000 receiving device

中包括与不同伪距或其 IF 组合相关的硬件延迟^[13], 其中, BDS 基于 B3I, GPS 基于 P1 和 P2, Galileo 基于 E1 和 E5a, 可表达为

$$\begin{aligned} dt^{C,s} &= dt^{C,s} + b_3^{C,s}, \\ dt^{G,s} &= dt^{G,s} + b_{IF12}^{G,s}, \\ dt^{E,s} &= dt^{E,s} + b_{IF15}^{E,s}. \end{aligned} \quad (3)$$

式中, dt^{s} 为基于广播星历计算的卫星钟差; C, G, E, 分别代表 BDS, GPS 和 Galileo 系统. GPS 与 Galileo 卫星钟差基准类似, 以 GPS 为例, 卫星钟差改正后的单频 P1 以及 IF 观测可表达为

$$\begin{aligned} P_{r,IF}^{G,s} &= \rho_r^{G,s} + d\tilde{t}_r + M_{Trop} T_{Trop}^G + \varepsilon(P_{r,IF}^{G,s}), \\ P_{r,1}^{G,s} &= \rho_r^{G,s} + d\hat{t}_r + M_{Trop} T_{Trop}^G + b_{IF}^{G,s} - b_1^{G,s} + \varepsilon(P_{r,1}^{G,s}). \end{aligned} \quad (4)$$

式中, $d\tilde{t}_r = dt_r + b_{r,IF}$ 和 $d\hat{t}_r = dt_r + b_{r,1}$ 为接收机钟差. 进一步展开卫星端的硬件延迟, 有

$$b_{\text{IF}}^{\text{G},s} - b_1^{\text{G},s} = \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} (b_1^{\text{G},s} - b_2^{\text{G},s}) = \frac{1}{\gamma_2 - 1} \tau_{12}^{\text{G},s}. \quad (5)$$

式中, $\tau_{12}^{\text{G},s} = b_1^{\text{G},s} - b_2^{\text{G},s}$ 为差分码偏差 (Differential Code Bias, DCB), 可采用已有的 DCB 改正数据或广播星历计算的 DCB 数据进行改正. BDS 卫星钟差改正后的单频 P1 以及 IF 观测可表达为

$$\begin{aligned} P_{\text{r,IF}}^{\text{C},s} &= \rho_{\text{r}}^{\text{C},s} + d\tilde{t}_{\text{r}} + M_{\text{Ttrop}} T_{\text{Ttrop}}^{\text{C}} + b_3^{\text{C},s} - b_{\text{IF}}^{\text{C},s} + \varepsilon(P_{\text{r,IF}}^{\text{C},s}), \\ P_{\text{r,1}}^{\text{C},s} &= \rho_{\text{r}}^{\text{C},s} + d\hat{t}_{\text{r}} + M_{\text{Ttrop}} T_{\text{Ttrop}}^{\text{C}} + b_3^{\text{C},s} - b_1^{\text{C},s} + \varepsilon(P_{\text{r,1}}^{\text{C},s}). \end{aligned} \quad (6)$$

进一步展开卫星端的硬件延迟, 有

$$b_3^{\text{C},s} - b_{\text{IF}}^{\text{C},s} = \frac{-f_1^2}{f_1^2 - f_3^2} (b_1^{\text{C},s} - b_3^{\text{C},s}) = -\frac{\gamma_3}{\gamma_3 - 1} \tau_{13}^{\text{C},s}. \quad (7)$$

其中, $\tau_{13}^{\text{C},s} = b_1^{\text{C},s} - b_3^{\text{C},s}$ 由 BDS 的广播星历播发^[14]. 另外, 当采用多卫星系统进行 SPP 时, 由于各系统信号体制和结构不同, 同一接收机对于不同卫星导航系统的接收机钟差不同, 将包含多个接收机钟差参数. 通常将其他系统的接收机钟差 ($dt_{\text{r}}^{\text{E}}, dt_{\text{r}}^{\text{C}}$) 表示为 GPS 接收机钟差 (dt_{r}^{G}) 加上一个系统间偏差 (Inter-System Bias, ISB)^[15], 即

$$dt_{\text{r}}^{\text{E}} = dt_{\text{r}}^{\text{G}} + \Theta_{\text{r}}^{\text{E}}, dt_{\text{r}}^{\text{C}} = dt_{\text{r}}^{\text{G}} + \Theta_{\text{r}}^{\text{C}}. \quad (8)$$

式中, $\Theta_{\text{r}}^{\text{E}}, \Theta_{\text{r}}^{\text{C}}$ 为 Galileo 和 BDS 的系统间偏差参数.

3 试验分析

根据单北斗/多模 GNSS 的 SPP 单频以及双频消电离层模型, 利用一组林区车载的实测动态数据进行模型定位性能分析.

3.1 卫星可见数

图 3 给出林区动态实验中接收机全程观测到的卫星数时间序列. 从图 3 可以看出, 接收机观测到的北斗卫星数最多, 平均约为 12 颗. GPS 和 Galileo 平均卫星数目约为 6 颗和 5 颗. 三系统卫星总数平均约 23 颗. 可见在林区 BDS 卫星数满足坐标解算必要观测量的要求, 但是组合之后可以获得更充足的观测量, 使定位结果更优.

3.2 位置精度衰减因子值

位置精度衰减因子是反映定位性能的一个指标. 图 4 给出仰角阈值 $\geq 10^\circ$ 时的单一 BDS 和 GPS/Galileo/BDS 组合的位置精度衰减因子. 可以看出, 单一 BDS 的位置精度衰减因子基本介于 2~10 内, 三系统组合的位置精度衰减因子介于 1~4 内, 表明三系统组合后的卫星空间构型更优.

3.3 周跳比

动态测试中, GNSS 接收机观测的所有跟踪卫星平均周跳如图 5 所示. 可以发现几乎整个观测时段都存在周跳, 平均周跳数大于 3, 这表明至少 3 颗卫星难以基于载波相位观测量进行定位, SPP 定位技术较适合应用于此环境.

3.4 定位性能

为了对比单北斗/多模 GNSS 的 SPP 定位性能, 设计以下两类方案. 一类方案是单频 SPP, 电离层采用广播星历的 Klobuchar 模型改正. 另一类方案是双频消电离层组合 SPP. 两类方案都采用单北斗、GPS/Galileo/BDS 三系统组合. 另外, 对流层采用

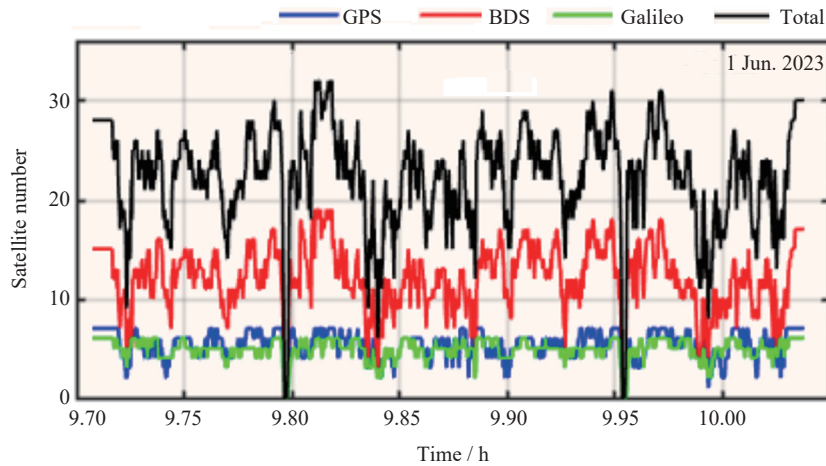


图 3 卫星数时间序列

Fig. 3 Satellite number time series

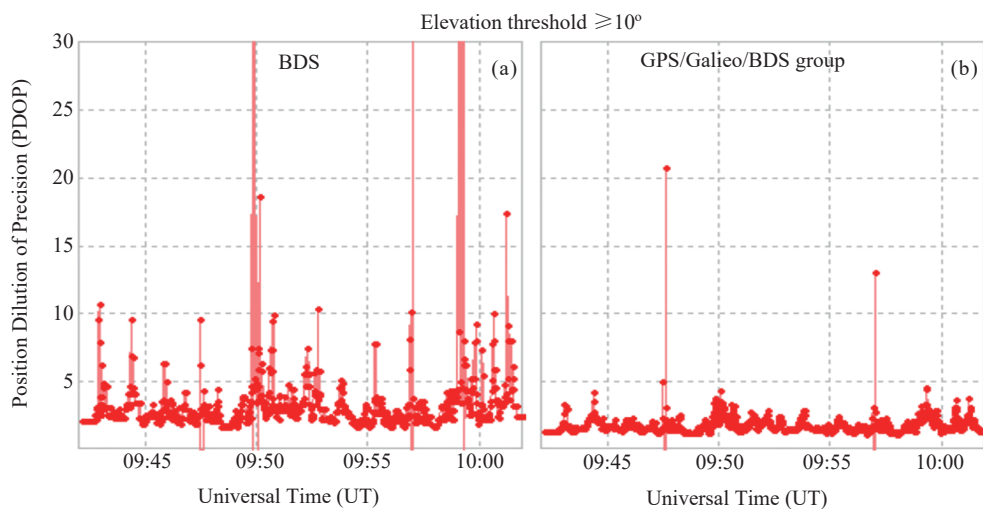


图 4 位置精度衰减因子值

Fig. 4 PDOP value

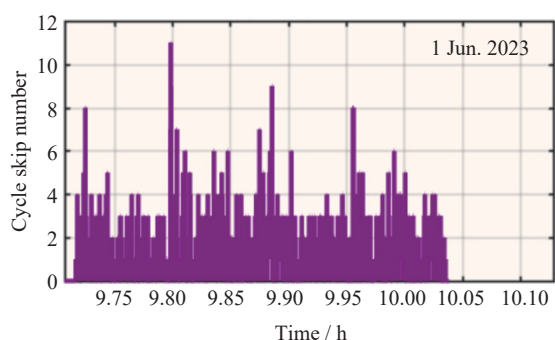


图 5 周跳分析

Fig. 5 Cycle skip analysis

Saastamoinen 模型改正, 利用高度角进行观测值定权, 截止高度角设置为 15° . 以 IE 软件后处理的 RTK 固

定解作为参考, 其精度在厘米级, 可用于评估 SPP 定位性能.

图 6 给出单频 SPP 在向东、北向和天向 (U_p) 的定位误差. 可以看出, 单 BDS 系统定位在向东误差基本约为 $-1 \sim 2$ m, 北向误差约为 $-3 \sim -1$ m, 天向误差约为 $-4 \sim 6$ m, 出现明显的定位偏差. 图 7 给出 GPS/Galileo/BDS 单频 SPP 在三个方向的定位误差. 可以看出, 相比单一系统, 向东误差改善至 $-1 \sim 1$ m, 北向误差改善至 $-2 \sim -1$ m, 天向误差改善至 $-2 \sim 4$ m, 三系统组合后的定位性能得到提高.

图 8~9 给出单北斗、GPS/Galileo/BDS 组合的双频消电离层组合 SPP 定位误差. 可以看出单一 BDS 时, 平面方向误差基本约为 $-2 \sim 2$ m, 天向误差

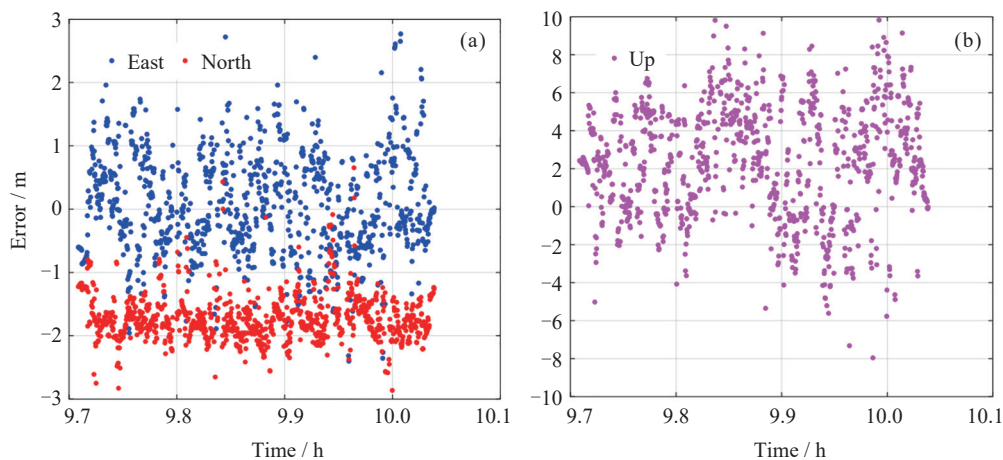


图 6 BDS 单频 SPP 定位误差

Fig. 6 BDS single frequency SPP positioning error

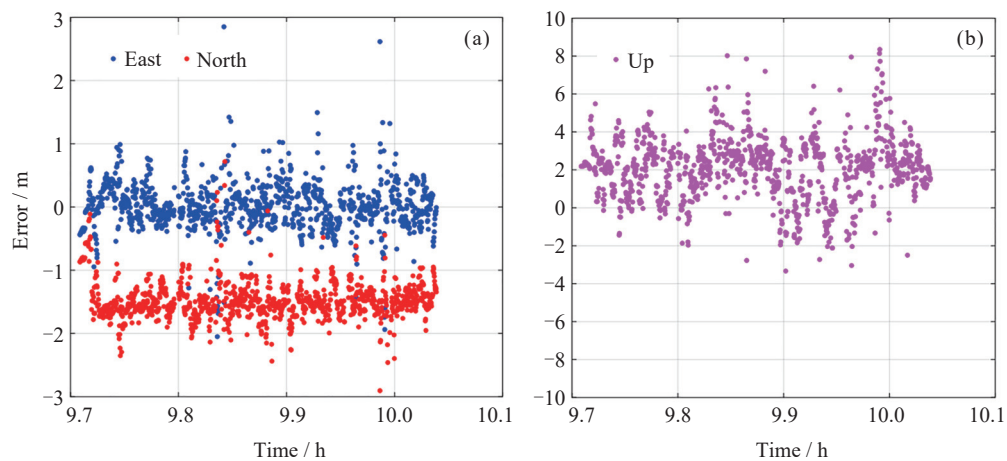


图 7 GPS/Galileo/BDS 单频单点定位误差

Fig. 7 GPS/Galileo/BDS single frequency SPP positioning error

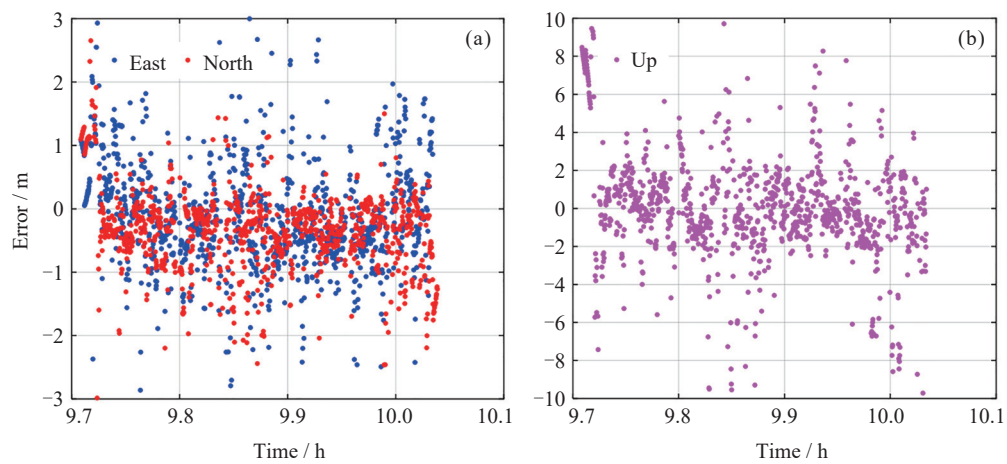


图 8 BDS 消电离层组合 SPP 定位误差

Fig. 8 BDS ionospheric combination SPP positioning error

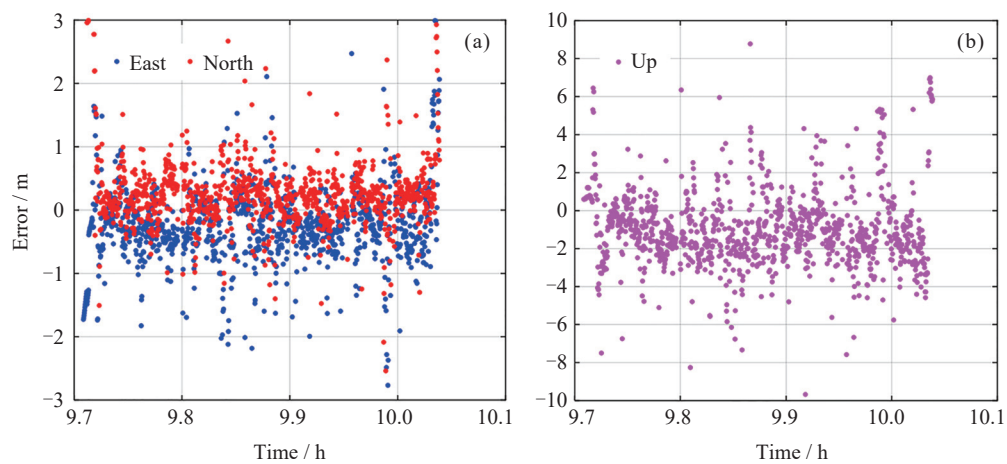


图 9 GPS/Galileo/BDS 消电离层组合 SPP 定位误差

Fig. 9 GPS/Galileo/BDS ionospheric combination SPP positioning error

约为 $-4\sim 4$ m, 且误差均值接近真值, 这主要考虑双频消电离层组合基本消去了电离层误差影响, 进而使得定位无偏. 相比单北斗, GPS/Galileo/BDS 三系统组合后, 平面方向误差改善至约 $-1\sim 1$ m, 天向误差改善至约 $-3\sim 3$ m, 系统组合后高程方向比单北斗性能更优.

为了对比单频和双频消电离层组合的 SPP 定位性能差异, 图 10 给出单北斗以及 GPS/Galileo/BDS 组合的平面定位误差散点结果. 可以看出, 不论是单北斗系统, 还是 GPS/Galileo/BDS 组合系统, IF 模型的定位误差都是无偏的, 而单频模型存在明显的系统偏差, 这主要是由于 Klobuchar 模型难以完全改正单频的电离层误差, 进而使得伪距测量存在粗差.

表 1 统计给出了单北斗、GPS/Galileo/BDS 的单频和双频消电离层组合 SPP 在三个方向的均方根误差 RMSE (Root Mean Square Error). 由最后一列可以看出, 四种模型的平面定位精度基本可以达到

2 m 水平, 并且单北斗 IF 组合平面精度相比单频提高约 0.5 m, GPS/Galileo/BDS IF 组合平面精度相比单频提高约 0.4 m; 四个模型的天向精度比平面精度稍差, GPS/Galileo/BDS 的 IF SPP 天向精度最优, 可达 2.4 m.

4 结论

随着高精度定位技术与林业应用的结合越来越紧密, 林业资源管理离不开单北斗/多模 GNSS 的定位服务. 早期的林区调查多是静态或是低速情况, 较少关注高速情况, 因此在林间路网参考站密度稀疏难以采用 RTK 定位的条件下, 动态 SPP 定位性能值得重点评估. 为此, 考虑广播星历计算钟差引入的硬件延迟, 推导了 BDS 及其组合的单频和双频消电离层组合 SPP 模型, 并基于一组实测车载动态数据进行定位精度评估. 结果表明, 在林间路网参考站密度稀疏且林区郁闭度为 0.5 时, 基于单北斗以及 GPS/

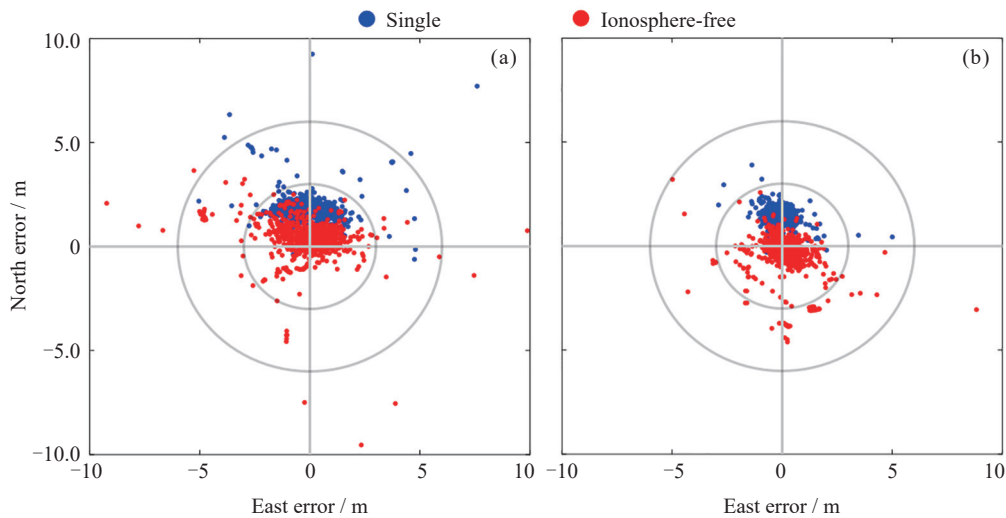


图 10 单双频 SPP 平面方向对比分析

Fig. 10 Comparative analysis of single and dual frequency SPP plane direction

表 1 四个模型在三个方向上的定位误差

Table 1 Positioning errors of four models in three directions

模型	Root mean square error / m			
	East	North	Up	Horizontal
BDS单频SPP	1.0	1.9	3.9	2.1
BDS IF SPP	1.4	0.9	4.5	1.6
三系统单频SPP三系统IF SPP	0.50.9	1.50.9	2.62.4	1.61.2

Galileo/BDS组合的单频和双频消电离层组合SPP的平面精度基本可达2 m;相比单频SPP,单北斗系统IF SPP在平面的定位精度提高约0.5 m, GPS/Galileo/BDS组合系统IF SPP在平面的定位精度提高约0.4 m,这表明采用消电离层组合的SPP模型具有更优的定位性能。

参考文献

- [1] PANG Lifeng, HUANG Shuisheng, LI Wanli, *et al.* Application of GNSS in forestry sector in China[J]. *World Forestry Research*, 2019, **32**(5): 41-46 (庞丽峰, 黄水生, 李万里, 等. 全球导航卫星系统在我国林业中的应用[J]. 世界林业研究, 2019, **32**(5): 41-46)
- [2] KATSIGIANI G, LOYER S, PEROSANZ F. PPP and PPP-AR kinematic post-processed performance of GPS-only, Galileo-only and multi-GNSS[J]. *Remote Sensing*, 2019, **11**(21): 2477
- [3] KONG Yulong, CHAI Hongzhou, PAN Zongpeng, *et al.* Analysis of SPP result in polar regions based on iono-weak combination[J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2017, **34**(5): 470-474 (孔豫龙, 柴洪洲, 潘宗鹏, 等. 弱电离层组合SPP在极区定位效果分析[J]. 测绘科学技术学报, 2017, **34**(5): 470-474)
- [4] LI Yuanhong, SUN Yanli, ZHANG Ying, *et al.* Research and application of Beidou forestry ecological mobile patrol platform in forest management and protection[J]. *Forest Resources Management*, 2020(4): 153-160 (李元鸿, 孙艳丽, 张英, 等. 北斗林业生态移动巡护平台在森林管护中的研发及应用[J]. 林业资源管理, 2020(4): 153-160)
- [5] HU Hong, YANG Xueqing, HUANG Jinghua, *et al.* Research on application model of Beidou satellite navigation in forestry[J]. *Forest Resources Management*, 2017(3): 120-127 (胡鸿, 杨雪清, 黄静华, 等. 北斗卫星导航在林业中的应用模式研究[J]. 林业资源管理, 2017(3): 120-127)
- [6] HUANG Ying, TANG Xiaoming, HUANG Shuisheng, *et al.* BeiDou short message encoding design and application for collected information in forestry patrol[J]. *Journal of Central South University of Forestry and Technology*, 2014, **34**(8): 106-110 (黄颖, 唐小明, 黄水生, 等. 林业野外巡护采集信息北斗短报文编码设计及应用[J]. 中南林业科技大学学报, 2014, **34**(8): 106-110)
- [7] YAN Fei, WANG Chunbo, WU Yongrui, *et al.* Algorithm implementation and precision analysis of forest BDS/GPS combined positioning[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, **50**(4): 221-227, 373 (闫飞, 王春博, 吴永睿, 等. 森林BDS/GPS组合定位算法与精度分析[J]. 农业机械学报, 2019, **50**(4): 221-227, 373)
- [8] SHEN Lili, GUO Jiming, WANG Lei. Performance analysis of multi-GNSS positioning in urban canyon environment[J]. *Geospatial Information*, 2017, **15**(1): 50-52, 62 (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)
- [9] ZHANG Yize. Research on real-time high precision BeiDou positioning service system[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2018, **47**(9): 1293 (张益泽. 北斗实时高精度定位服务系统研究[J]. 测绘学报, 2018, **47**(9): 1293)
- [10] SHI Junjie, CHEN Zhongzhen, MENG Lingyu, *et al.* Applications of GNSS RTK technology to positioning forest location and measuring microtopography[J]. *Forest Resources Management*, 2019(4): 117-123, 131 (石君杰, 陈忠震, 孟令宇, 等. GNSS RTK技术在林木定位及微地形测量中的应用[J]. 林业资源管理, 2019(4): 117-123, 131)
- [11] WU Honggan, LUO Peng, YANG Yunfeng, *et al.* Performance of BeiDou navigation satellite system in forested conditions[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2021, **46**(5): 1-7 (武红敢, 罗鹏, 杨云凤, 等. 森林环境下的北斗卫星导航系统性能分析[J]. 测绘科学, 2021, **46**(5): 1-7)
- [12] YIN X, CHAI H Z, XU W B, *et al.* Realization and evaluation of real-time uncombined GPS/Galileo/BDS PPP-RTK in the offshore area of China's Bohai sea[J]. *Marine Geodesy*, 2022, **45**(6): 577-594
- [13] TEUNISSEN P G, MONTENBRUCK O. Handbook of Global Navigation Satellite Systems[M]. Cham: Springer, 2017
- [14] BeiDou Navigation Satellite System Signal in Space Interface Control Document-Open Service Signal (Version 2.1) [Z]. China Satellite Navigation Office, 2016
- [15] CHEN J P, ZHANG Y Z, WANG J G, *et al.* A simplified and unified model of multi-GNSS precise point positioning[J]. *Advances in Space Research*, 2015, **55**(1): 125-134

作者简介



叶少春 男, 1998年1月出生于浙江省绍兴市, 现为浙江农林大学环境与资源学院硕士研究生, 主要研究方向为组合导航和林业测绘。

E-mail: yeshaochun2025@163.com



徐文兵 (通信作者) 男, 1978年2月出生于安徽省桐城市, 现为浙江农林大学环境与资源学院教授, 硕士生导师, 主要研究方向为测绘科学与技术。

E-mail: xuwb@zafu.edu.cn



尹潇 男, 1987年8月出生于山东省济宁市, 现为浙江农林大学环境与资源学院讲师、硕士生导师, 主要研究方向为多源传感器导航与智能感知。

E-mail: yinxiaotongji@zafu.edu.cn