

森林 BDS/GPS 组合定位算法与精度分析

闫 飞¹ 王春博² 吴永睿¹ 林奕成¹ 冯仲科¹

(1. 北京林业大学精准林业北京市重点实验室, 北京 100083; 2. 河北省煤田地质局物测地质队, 邢台 054000)

摘要: 针对在森林资源调查和监测中需要实现高精度定位和导航的问题,在鹞峰国家森林公园选择以栓皮栎为主要树种的实验区,采用三鼎 T-23 型多频三星接收机和 u-blox NEO-M8T 多星座接收模块,对林下观测点进行定位观测,通过系统间时空统一并采用合理的观测值定权方法,利用 BDS 和 GPS 观测数据,建立森林 BDS/GPS 组合定位算法,将算法写入 RTKLIB 软件,实现森林观测点三维坐标解算(WGS-84 坐标系),最后与单一 GPS 定位结果进行对比分析。实验结果表明,森林 BDS/GPS 组合定位卫星可见数为 15~23 颗,远高于单一 GPS 定位卫星可见数 11 颗;BDS/GPS 组合定位 PDOP 值介于 0.5~1.8 之间,小于单一 GPS 定位 PDOP 值,二者变化趋势较为相近;BDS/GPS 组合定位与 GPS 定位卫星信噪比均为 10~50 dB,但由于 BDS/GPS 组合定位卫星可见数较多,其卫星信号更强,信噪比更为稳定。BDS/GPS 组合定位结果在 X、Y、Z 方向的理论精度分别为 2.603、3.302、3.125 m,单一 GPS 定位结果分别为 2.382、4.669、4.344 m;BDS/GPS 组合定位结果在 X、Y、Z 方向的实际精度分别为 3.112、3.542、4.073 m,单一 GPS 定位结果分别为 4.946、5.254、7.274 m。

关键词: 森林定位导航;北斗卫星导航系统;组合定位;精度分析

中图分类号: S771 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)04-0221-07

Algorithm Implementation and Precision Analysis of Forest BDS/GPS Combined Positioning

YAN Fei¹ WANG Chunbo² WU Yongrui¹ LIN Yicheng¹ FENG Zhongke¹
(1. Beijing Key Laboratory of Precision Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China
2. Hebei Province Bureau of Coal Geology Geological Team, Xingtai 054000, China)

Abstract: In view of the need to achieve high-precision positioning and navigation in forest resources investigation and monitoring, taking the experimental area with cork ridge as main tree species in the Jiufeng National Forest Park, and the Sanding T-23 multi-frequency Samsung receiver and u-blox NEO-M8T multi-receiving modules to carry out a four-hour positioning observation on the observation points in the forest, and the forest BDS/GPS combined positioning algorithm was established by using BDS and GPS observation data through unifying time and space between systems as well as reasonable observation weights. Afterwards, the algorithm was put into the RTKLIB software to realize three-dimensional coordinate calculation of forest observation points (WGS-84 coordinate system), and finally the results were compared and analyzed with single GPS positioning results. The experimental results showed that the visible digits of forest BDS/GPS combined positioning satellites was 15~23, which was much higher than the visible digits of single GPS positioning satellites (the number was 11). The BDS/GPS combined positioning PDOP value was between 0.5 and 1.8, which was lower than that of the single GPS positioning PDOP value, but the changing trend was relatively similar. The SNR values of BDS/GPS combined positioning and GPS positioning satellite were both 10~50 dB. However, due to the more visible digits of BDS/GPS combined positioning satellites, the satellite signal was stronger and the SNR value was more stable. The theoretical accuracy of the BDS/GPS combined positioning results in the X, Y and Z directions respectively were 2.603 m, 3.302 m and 3.125 m, and the theoretical accuracy of the single GPS positioning results in the X, Y and Z directions were 2.382 m, 4.669 m and 4.344 m. The

收稿日期: 2018-11-28 修回日期: 2019-01-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(31800468)和北京市自然科学基金项目(8184080)

作者简介: 闫飞(1986—),男,讲师,博士,主要从事林业装备与信息化研究,E-mail: yf-perfect@163.com

通信作者: 冯仲科(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事林业 3S 技术研究,E-mail: fengzhongke@126.com

actual accuracy of BDS/GPS combined positioning results in X , Y and Z directions were 3.112 m, 3.542 m and 4.073 m, and in terms of the single GPS positioning result, it turned out to be 4.946 m, 5.254 m and 7.274 m.

Key words: forest positioning navigation; BDS; combined positioning; precision analysis

0 引言

林业作为生态文明建设的主体,具有重要的生态、经济、社会和文化等多种功能,为了更好地发挥林业功能、维护森林健康发展,实现林业管理信息化、精准化显得尤为重要。全球卫星导航系统能够为林业资源调查、森林防火和应急指挥、病虫害监测和防治等林业核心业务提供实时准确的位置定位信息、发生范围信息和导航服务^[1-4],在林业精细化监测和管理方面发挥着巨大作用,是我国林业资源调查领域研究的热点。

一直以来我国林业卫星导航应用研究多依赖于美国 GPS 系统,该系统技术相对成熟,用户极其广泛,已经在世界范围内树立起行业地位^[5]。1996 年,美国 CHRISTOPHER 等^[6]就林冠、地貌和距离对 GPS 定位精度的影响问题进行了初步研究。MICHAEL 等^[7]在美国西部的俄勒冈林区,研究了不同森林环境下的 GPS 精度和可靠性。ISAO 等^[8]研究了柏树、针叶松、阔叶林等与 GPS 接收卫星信噪比的关系。在我国,赖家明^[9]对 GPS 定位精度影响因素进行了研究,得出 GPS 定位精度与林分郁闭度、林分优势树种、观测时段、观测日期等关系较为密切。聂玉藻等^[10]、谭伟等^[11]针对不同的林冠和山地条件,利用差分 GPS 定位技术,对其定位效果进行了大量研究,总结归纳了不同地类和地形对 GPS 定位精度的影响。张慧春等^[12]研究了不同立地类型和定位模式对 GPS 精度的影响。张雪芹等^[13]进行了高郁闭林分下的星-地结合定位方法实验。由于受限于单一 GPS 系统卫星星座布网的特殊性和林地复杂性,致使我国在林区卫星定位的应用研究中,存在林区环境卫星信号差或信号失锁、多路径效应强等问题,使林区定位精度较低甚至无法卫星定位^[1,13-14],难以满足部分林区对定位精度的需求。

北斗卫星导航系统(Bei Dou navigation satellite system, BDS)是由我国自主研发的卫星导航系统,能够提供全球性、全天时和全天候高精度自主导航定位服务,系统将由 35 颗卫星布满 MEO、GEO 和 IGSO 3 种不同高度的卫星轨道,预计 2020 年完成组网^[15-17]。截止 2018 年 7 月 29 日,我国已发射 34 颗北斗导航卫星,由于其特有的 GEO 和 IGSO

高轨道卫星和对我国区域的局部增强,使我国全境域内可接收到的卫星数量和信号质量得到大幅提升,即使在受高楼、树木、峡谷等遮挡的恶劣环境下,也可以较 GPS 系统接收到更多的高仰角可视卫星信号^[1,18-19],消除因卫星数较少而形成的间隙时段,削弱多路径效应影响,从而提高了林下定位的准确性和精密度,为深入进行林业卫星定位导航研究提供了重要技术手段。因此,在利用成熟稳定的 GPS 系统的同时,充分发挥北斗卫星导航系统在我国林业资源信息化调查和管理中的重要作用、加强林业北斗的应用基础研究迫在眉睫。

鉴于此,本文以森林 BDS/GPS 组合单点定位为主要技术方法,选取北京鹫峰国家森林公园为研究区域,以 T-23 型多频三星接收机及 u-blox NEO-M8T 多星座接收模块为数据采集仪器,研究适合森林资源调查精度需求的 BDS/GPS 组合定位算法,将算法写入 RTKLIB 软件,实现森林观测点 WGS-84 坐标系下的三维坐标解算,与单一 GPS 定位结果进行对比分析,研究高郁闭度森林对卫星可见数、位置精度因子 PDOP 值、信噪比的影响,并进行精度评定,验证在森林复杂环境下使用多系统定位的优越性,以期为我国北斗卫星导航系统在林业中的应用研究提供理论依据和技术支持。

1 实验概况

1.1 研究区概况

实验区位于北京市海淀区鹫峰国家森林公园,境内山峦绵延、地形复杂,最高峰海拔 1 153 m,主峰海拔为 465 m。植被以落叶阔叶林为主,在低山(800 m 以下)有大片侧柏、油松、栓皮栎、刺槐等人工林与山杏灌丛、荆条灌丛错落分布,中山(800 ~ 1 100 m)原生植被为松栎林带,树种多为油松、落叶松,森林覆盖率达 96.4%。本研究区选在公园东侧(40°03'49"N, 116°05'51"E),海拔约为 130 m,坡度约为 22°,坡向为东南。数据采集时间为 2018 年 6 月中下旬,由于实验前林区多次降雨,土质较为松软,方便仪器架设。研究区以栓皮栎(*Quercus variabilis*)为优势树种,树龄多在 30 年以上,平均树高达 15 m 以上,平均胸径为 93 cm,枝叶繁茂,郁闭度高达 0.82,属于密林(图 1)。

1.2 实验仪器及解算软件

所使用的仪器包括三鼎 T-23 型多频三星接收机(图 2a)、u-blox NEO-M8T 多星座接收模块(图 2b)、三脚架、胸径尺、木桩等,使用软件包括 GAMIT 与 RTKLIB 2.4.3 版本,其中 GAMIT 用于森林观测点 WGS-84 坐标系下的三维坐标高精度解算以获得其真值,定位精度可达厘米级,RTKLIB 用于 BDS/GPS 组合算法编写、实时单点定位及精度分析(图 2c),这两款软件均支持多个 GNSS 系统标准和精密定位算法研究,可实现 GNSS 实时定位和后处理解

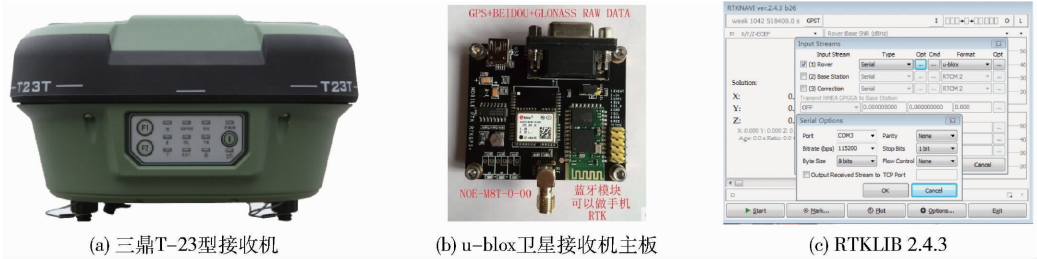


图 2 实验仪器和解算软件

Fig. 2 Experimental instrument and solving software

2 研究方法

2.1 观测点定位数据采集

本实验在林分中心位置处设立观测点,要求该位置能够充分代表林分高郁闭度水平,将木桩钉入林地 10 ~ 15 cm,在其顶部设立并标记观测点,保证其坚固。将 u-blox 卫星接收机天线紧贴于观测点,保证天线相位中心与观测点处于同一铅垂线上,同时,在观测点位架设三鼎 T-23 型接收机,经过严格对中整平后,开始接收信号,观测历元不少于 200 个(图 3)。

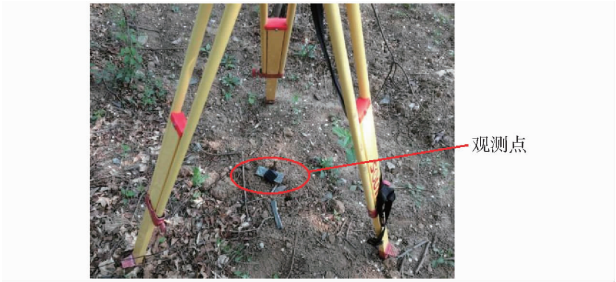


图 3 观测点设置
Fig. 3 Observation point setting

2.2 森林 BDS/GPS 算法

森林 BDS/GPS 组合定位观测模型为

$$\begin{cases} \hat{\rho}^{C(i)} = \rho^{C(i)} - cV_{t_R}^C + cV_{t_S}^C - V_{ion(i)} - V_{trop(i)} \\ \hat{\rho}^{G(i)} = \rho^{G(i)} - cV_{t_R}^G + cV_{t_S}^G - V_{ion(i)} - V_{trop(i)} \end{cases} \quad (1)$$

其中

$$\rho^{(i)} = \sqrt{(X^{(i)} - X)^2 + (Y^{(i)} - Y)^2 + (Z^{(i)} - Z)^2} \quad (2)$$

算,是目前研究 GNSS 组合算法的主流常用软件^[20]。



图 1 研究区实拍图
Fig. 1 Real shot photo of study area

式中 $\hat{\rho}^{(i)}$ ——卫星至接收机伪距观测值
 $\rho^{(i)}$ ——卫星至接收机相位中心几何距离
 i ——卫星编号 c ——光速
 V_{t_R} ——接收机钟差
 V_{t_S} ——卫星钟误差
 $V_{ion(i)}$ ——电离层延迟误差
 $V_{trop(i)}$ ——对流层延迟误差
 $(X^{(i)}, Y^{(i)}, Z^{(i)})$ ——卫星 i 的坐标
 (X, Y, Z) ——观测点坐标

其中,C、G 分别代表 BDS、GPS,式中省略了卫星星历误差、多路径误差及测量噪声^[21]。

在观测点近似坐标 (X_0, Y_0, Z_0) 处用泰勒级数展开后可得线性化观测方程,整理后可得间接平差误差方程

$$V^{(i)} = l^{(i)} V_X + m^{(i)} V_Y + n^{(i)} V_Z - cV_{t_R} + L^{(i)} \quad (3)$$

其中

$$\begin{cases} l^{(i)} = \frac{X_0 - X^{(i)}}{\rho^{(i0)}} \\ m^{(i)} = \frac{Y_0 - Y^{(i)}}{\rho^{(i0)}} \\ n^{(i)} = \frac{Z_0 - Z^{(i)}}{\rho^{(i0)}} \end{cases} \quad (4)$$

$$L^{(i)} = \rho^{(i0)} - \hat{\rho}^{(i)} + cV_{t_S}^i - V_{ion(i)} - V_{trop(i)} \quad (5)$$

式中 $V^{(i)}$ ——观测值残差
 V_X, V_Y, V_Z ——观测点坐标改正值
 $l^{(i)}, m^{(i)}, n^{(i)}$ ——观测点至卫星方向上的方向余弦
 $L^{(i)}$ ——常数项

$\rho^{(i0)}$ ——森林观测点近似位置至第 i 颗卫星的距离^[20-21]

森林 BDS/GPS 组合定位的误差方程中有 4 个未知参数,根据最小二乘法,需要同时观测不少于 4 颗卫星才能进行位置解算。假设某一观测时刻 t ,卫星接收机接收到 GPS 卫星 m 颗、BDS 卫星 n 颗,根据式(3),组合定位的误差方程可表达为

$$\mathbf{V} = \mathbf{B}\mathbf{x} - \mathbf{L} \tag{6}$$

其中

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} l^{G(1)} & m^{G(1)} & n^{G(1)} & 1 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ l^{G(m)} & m^{G(m)} & n^{G(m)} & 1 & 0 \\ l^{C(m+1)} & m^{C(m+1)} & n^{C(m+1)} & 0 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ l^{C(m+n)} & m^{C(m+n)} & n^{C(m+n)} & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} V_X \\ V_Y \\ V_Z \\ V_{t_R}^G \\ V_{t_R}^C \end{bmatrix} \quad \mathbf{L} = \begin{bmatrix} L^{G(1)} \\ \vdots \\ L^{G(m)} \\ L^{C(m+1)} \\ \vdots \\ L^{C(m+n)} \end{bmatrix}$$

式中 $\mathbf{V}$ ——观测值残差
 $\mathbf{B}$ ——系数矩阵
 $\mathbf{x}$ ——坐标改正值及接收机钟差
 $\mathbf{L}$ ——常数阵

利用经典最小二乘法可解得观测点三维坐标改正值

$$\mathbf{x} = (\mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{L} \tag{7}$$

式中 $\mathbf{P}$ ——BDS 和 GPS 卫星观测值权矩阵
最终可得森林观测点在 WGS-84 坐标系下的坐标

$$\begin{cases} X = X_0 + V_X \\ Y = Y_0 + V_Y \\ Z = Z_0 + V_Z \end{cases} \tag{8}$$

2.2.1 时空统一

卫星导航所采用的时空基准分为时间基准和坐标基准,GPS 采用 GPS 时间系统(GPST)和世界大地坐标系(World geodetic coordinate system 1984, WGS-84),而 BDS 采用北斗时(BDT)和 2000 国家大地坐标系(China geodetic coordinate system 2000, CGCS2000)。若采用双系统组合定位,则需要进行二者时空基准的统一。

在空间坐标基准上,WGS-84 坐标系和 CGCS2000 坐标系对于坐标原点、尺度、坐标轴的指向及坐标轴指向随时间变化的定义均相同,只有扁率存在微小差别,影响只有亚毫米级,故两个系统在

扁率上的差别可以忽略不计,若根据森林调查精度要求,二者空间坐标基准可视为一致^[20]。

对于时间基准,BDT 和 GPST 使用原子时,且采用以秒计数及星期数计数,但二者起算时间不同,BDT 和 GPST 的起始时间相差为 1 356 个星期。因此,BDT 和 GPST 的时间转换公式为^[5]

$$t_{\text{BDS}} = t_{\text{GPS}} + 1\,356 \times 604\,800 + 14 \tag{9}$$

式中 t_{BDS} ——北斗时间 t_{GPS} ——GPS 时间

2.2.2 高度角定权

在森林中进行定位时,观测点与卫星形成的高度角对观测值定位精度有较大影响,高度角定权是指根据每颗卫星观测时的高度角来确定相应观测值的权重。高度角不同,则测距码传播路径不同,产生的误差也不同。森林中卫星高度角过小,则信号很容易受到树冠遮挡,信号在森林中传播路径也会相应增加,卫星发出的测距码受到电离层延迟、对流层延迟、多路径效应等影响增强,造成站星间距离测量误差增大。因此,采用合理的高度角定权可以获得更加准确的定位结果^[20]。针对林区等复杂地形,本文所采用的高度角定权模型为

$$P = E/90^\circ \tag{10}$$

式中 E ——观测高度角

2.3 精度评定

2.3.1 定位精度表征因子分析

卫星可见数、三维点位精度衰减因子(Position dilution of precision,PDOP)、信噪比是表征卫星定位精度的重要指标,通常情况下,卫星可见数越多,卫星与测站所构成的几何图形越好,PDOP 值越小,信噪比越高,最终定位结果也越准确。因此,对森林 BDS/GPS 组合定位与单一 GPS 定位进行比较时,首先需要对以上三者进行对比分析。本文由 RTKLIB 软件直接进行实时卫星可见数、PDOP 值和信号信噪比数据的读取和输出。

2.3.2 定位结果精度分析

本次实验结果从理论精度和实际精度两方面进行比较分析。

(1)理论精度

理论精度计算公式为

$$\mathbf{D} = \sigma_0 \mathbf{Q} \tag{11}$$

其中

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{\mathbf{V}^T \mathbf{P} \mathbf{V}}{n-4}}$$
$$\mathbf{Q} = (\mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{B})^{-1}$$

式中 $\mathbf{Q}$ ——法方程未知数系数阵逆阵^[21]

$\mathbf{D}$ ——相对应未知参数(X 、 Y 、 Z 方向接收机钟差)中误差,即理论精度

σ_0 ——单位权中误差

n ——观测值个数

(2) 实际精度

由于现场定位实际情况复杂,定位结果往往受到偶然误差和残余系统误差的综合影响,意味着实际精度和理论精度可能有一定的差异^[22-24],因此,需要对 BDS/GPS 组合定位结果的实际精度进行估计。利用 BDS/GPS 组合定位和单一 GPS 定位所得的三维坐标结果与 GAMIT 软件载波相位高精度解算观测点坐标真值进行比较(观测值-真值),获得每个历元绝对误差变化情况^[25],同时,利用以下公式进行实际定位精度评估。

$$\begin{cases} \mu_x = \sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \tilde{X})^2 / n} \\ \mu_y = \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \tilde{Y})^2 / n} \\ \mu_z = \sqrt{\sum_{i=1}^n (Z_i - \tilde{Z})^2 / n} \end{cases} \quad (12)$$

式中 μ_x, μ_y, μ_z —— X, Y, Z 3 个方向上的定位实际精度

$\tilde{X}, \tilde{Y}, \tilde{Z}$ ——接收机坐标在 X, Y, Z 3 个方向上的真值

X_i, Y_i, Z_i ——BDS/GPS 组合定位或单一 GPS 定位解算坐标值

3 结果与定位精度分析

3.1 卫星可见数

利用 RTKLIB 软件全程记录林下定位期间所能观测到的卫星颗数及相应信号质量,利用软件输出后可得,对于 BDS/GPS 组合定位,本次观测时段内共有 15 ~ 23 颗卫星用于定位观测,其中包括 11 颗 GPS 卫星和 12 颗 BDS 卫星(图 4)。图 5 表示接收信号的连续程度,信号接收连续则表明信号质量较高,如图 5 中 G04、G14、C09 和 C10 卫星所示,G23 和 C03 卫星信号时断时续,表明观测期间可能出现卫星失锁情况。另外,BDS/GPS 组合定位和单一 GPS 定位的卫星可见数均多于 4 颗,满足坐标解算必要观测量的要求,但前者要远高于后者,表明在森林中使用组合定位可以获得更充足的多余观测量进行解算,定位结果也更加准确。

3.2 PDOP 值

PDOP 值指三维点位精度衰减因子,是反映观测时刻观测点与卫星的几何图形强度、衡量卫星导航系统定位能力的一个重要指标^[26-27]。经过软件输出,由图 6 可得,BDS/GPS 组合定位观测 PDOP 值

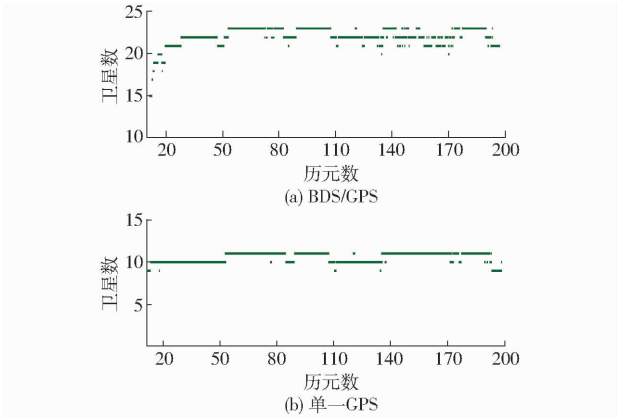


图 4 卫星可见数比较

Fig. 4 Satellite visible number comparison

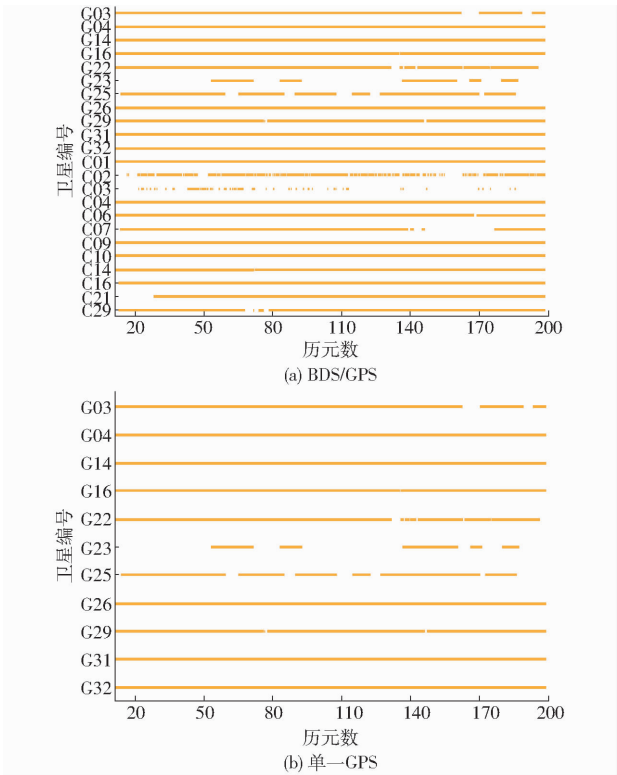


图 5 信号连续性比较

Fig. 5 Signal continuity comparison

介于 0.5 ~ 1.8 之间且变化平稳,而单一 GPS 的 PDOP 值介于 1.0 ~ 2.1 之间,组合定位的 PDOP 值明显低于单一 GPS 定位,表明在林下使用 BDS/GPS 组合定位显著增强了测站与卫星的几何图形强度,从而可使定位结果更为精确。

3.3 信噪比

信噪比(Signal to noise ratio, SNR),指接收机信号强度与噪声强度的比值。信噪比越大,混在信号里的噪声越小,卫星信号质量越好,定位结果也越准确^[28-29]。经过软件输出(图 7)可得,本次观测卫星信噪比处于 10 ~ 50 dB,而绝大多数处于 30 ~ 45 dB,表明卫星信号较强。同时,由于林下采用 BDS/GPS 组合定位可大大增加卫星观测数,使其 SNR 较单

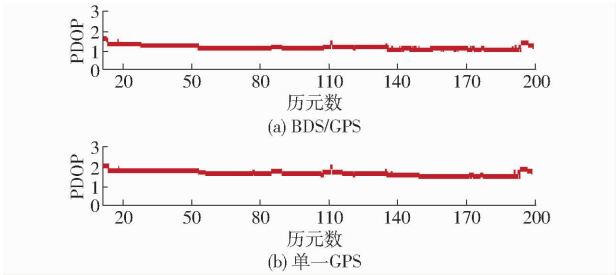


图6 PDOP比较
Fig.6 PDOP comparison

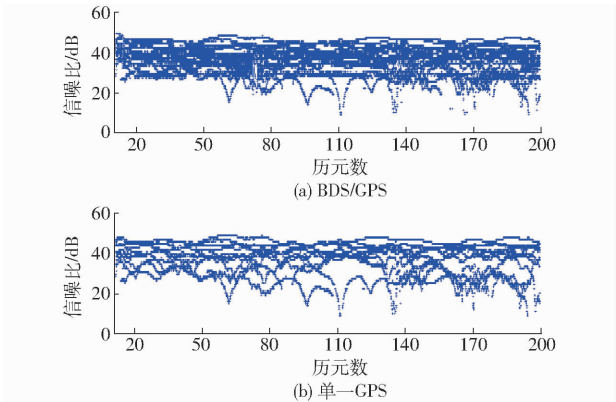


图7 信噪比较
Fig.7 SNR comparison

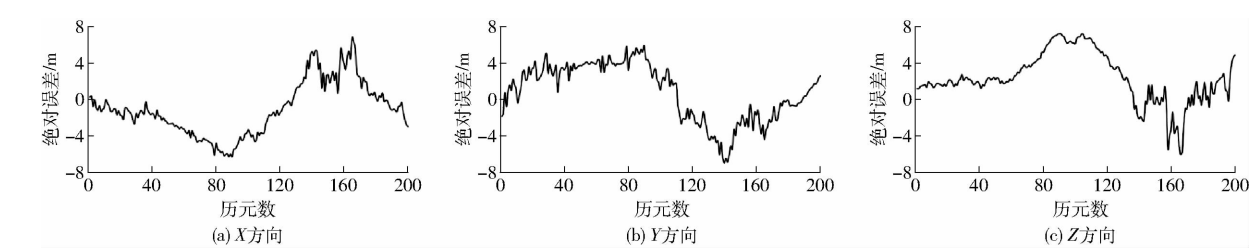


图8 BDS/GPS组合定位在X、Y、Z方向的绝对误差
Fig.8 Absolute error of BDS/GPS combined positioning in X, Y and Z directions

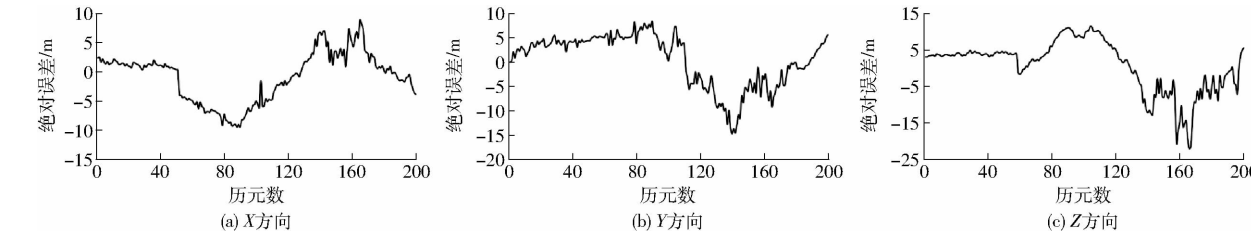


图9 单一GPS定位在X、Y、Z方向的绝对误差
Fig.9 Absolute error of GPS positioning in X, Y and Z directions

可以发现,森林 BDS/GPS 组合定位绝对误差均在 0 m 上下波动,极值不超过 8 m,而单一 GPS 定位绝对误差则远大于组合定位绝对误差,Z 方向绝对误差绝对值甚至超过 20 m。

利用式(12),对两种林下定位方法的实际精度进行分析^[25],得到 X、Y、Z 方向实际精度如表 2 所示。

通过两组数据实际精度比较可得,在高郁闭度林分下采用单一 GPS 进行定位误差较大,Z 方向误

一 GPS 的 SNR 更为稳定,定位精度也更高。

3.4 理论精度

在观测时段中选取信号稳定的连续 200 组历元通过式(11)进行计算,得到森林 BDS/GPS 组合定位与单一 GPS 定位的理论精度(中误差),如表 1 所示。

表 1 定位结果理论精度

定位模式	中误差		
	X 方向	Y 方向	Z 方向
单一 GPS	2.382	4.669	4.344
BDS/GPS	2.603	3.302	3.125

由表 1 可知,在 X 方向上 BDS/GPS 组合定位和单一 GPS 定位中误差相差不大,但在 Y、Z 方向上组合定位中误差小于单一 GPS 定位中误差,其结果符合北斗卫星定位系统的布网网型特征^[30]。

3.5 实际精度

利用 3.4 节中相同的解算数据,与观测点真值进行比较得到每个历元观测结果在 X、Y、Z 3 个方向上的绝对误差变化情况,如图 8、9 所示。

表 2 定位结果实际精度

定位模式	实际精度		
	X 方向	Y 方向	Z 方向
单一 GPS	4.946	5.254	7.274
BDS/GPS	3.112	3.542	4.073

差可达 7.274 m,而 BDS/GPS 组合定位所得结果与真值更为接近,X、Y 方向结果较为一致,Z 方向误差相对较大,但整体表现明显优于单一 GPS 定位。

4 结束语

以北京鹫峰国家森林公园东侧林地为研究区域,通过对北斗卫星导航系统、GPS 卫星定位系统之间互操作性转换、系统定权设定、误差源处理,得到 BDS/GPS 组合定位算法,并将其写入 RTKLIB 软件,使其能够在接收双星系统信号的同时直接解算得到

定位结果。由结果可知,在森林高郁闭度遮挡条件下,BDS/GPS 组合定位卫星可见数远高于仅使用单一 GPS 的卫星可见数;组合定位 PDOP 值优于单一 GPS 定位;在信噪比方面,BDS/GPS 组合定位卫星信号信噪比较高,也更为稳定;通过对林下定位结果理论精度与实际精度的对比分析得出,BDS/GPS 组合单点定位精度要明显优于单一 GPS 定位。

参 考 文 献

[1] 闫飞,冯仲科,王瑞瑞. 面向林业的“卫星导航定位原理与应用”课程教学改革初探[J]. 中国林业教育, 2017, 35(4):44-46.
YAN Fei, FENG Zhongke, WANG Ruirui. Preliminary exploration on the forestry course teaching reform “the principle and application of satellite navigation and positioning”[J]. Forestry Education in China, 2017, 35(4):44-46. (in Chinese)

[2] 陈改英. GPS 技术及其在林业中的应用[J]. 北京农学院学报, 2004, 19(3):46-48.
CHEN Gaiying. Application of global positioning in forestry[J]. Journal of Beijing Agricultural College, 2004, 19(3):46-48. (in Chinese)

[3] 贾会迅,邢怀玉,贾会申. 浅谈 GPS 技术在林业中的应用[J]. 内蒙古林业调查设计, 2009, 32(3):78-80.
JIA Huixun, XING Huaiyu, JIA Huishen. Application of GPS technology in forestry[J]. Inner Mongolia Forestry Investigation and Design, 2009, 32(3):78-80. (in Chinese)

[4] 徐文兵,高飞. 天宝 Trimble 5800 单点定位在林业测量中的应用探析[J]. 浙江林学院学报, 2010, 27(2):310-315.
XU Wenbing, GAO Fei. Application of single point positioning with Trimble 5800 in forest measurement[J]. Journal of Zhejiang Forestry College, 2010, 27(2):310-315. (in Chinese)

[5] 杨元喜,陆明泉,韩春好. GNSS 互操作若干问题[J]. 测绘学报, 2016, 45(3):253-259.
YANG Yuanxi, LU Mingquan, HAN Chunhao. Some notes on interoperability of GNSS[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2016, 45(3):253-259. (in Chinese)

[6] CHRISTOPHER D, PAUL V B. Forest canopy, terrain, and distance effects on global positioning system point accuracy[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 1996, 62(3):317-321.

[7] MICHAEL G W, AARON E. Standard and real-time accuracy and reliability of a mapping-grade GPS in a coniferous western Oregon forest[J]. Western Journal of Applied Forestry, 2006, 21(4):222-227.

[8] ISAO S, YUKO S, SHIRO T. A study of the effects of stems and canopies on the signal to noise ratio of GPS signals[J]. Journal of Forest Research, 2005, 10(5):395-401.

[9] 赖家明. GPS 技术在川西低中山区森林资源调查中定位和面积测量应用研究[D]. 成都:四川农业大学, 2005.
LAI Jiaming. Application research of GPS technology in positioning and area measurement in forest resources survey in low mountain areas of western Sichuan[D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2005. (in Chinese)

[10] 聂玉藻, 冯仲科, 邓向瑞, 等. 林冠与山地对 GPS 定位精度的影响及消减对策[J]. 北京林业大学学报, 2004, 26(2):1-5.
NIE Yuzao, FENG Zhongke, DENG Xiangrui, et al. Effects of crown cover and hill country on RTD GPS positioning precision and corresponding reducing countermeasures[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2004, 26(2):1-5. (in Chinese)

[11] 谭伟,王开琳,罗旭,等. 手持 GPS 在不同林分下的定位精度研究[J]. 北京林业大学学报, 2008, 30(3):163-167.
TAN Wei, WANG Kailin, LUO Xu, et al. Positioning precision with handset GPS receiver in different stands[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2008, 30(3):163-167. (in Chinese)

[12] 张慧春,周宏平,郑加强. 立地类型和定位模式对精准林业 GPS 定位的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2014, 38(6):72-76.
ZHANG Huichun, ZHOU Hongping, ZHENG Jiaqiang. Effects of the site condition and positioning mode on GPS performance for precision forestry[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2014, 38(6):72-76. (in Chinese)

[13] 张雪芹,张旭,于新文,等. 高郁闭林分星-地结合定位方法与试验[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2015, 39(3):25-28.
ZHANG Xueqin, ZHANG Xu, YU Xinwen, et al. Study on satellite-ground combining positioning in high canopy stands[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2015, 39(3):25-28. (in Chinese)

[14] 李永宁,刘利民,崔立艳,等. 林冠开阔度对 GNSS RTK 在森林中定位可用性及初始化时间的影响[J]. 林业科学, 2014, 50(2):78-84.
LI Yongning, LIU Limin, CUI Liyan, et al. Effects of canopy openness on positioning availability and initialization time of GNSS RTK in forests[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2014, 50(2):78-84. (in Chinese)

[15] 刘基余. 增强北斗导航性能的几点建议[J]. 数字通信世界, 2011(2):31-35.
LIU Jiyu. Some suggestion for enhancing compass navigation performance[J]. Digital Communication World, 2011(2):31-35. (in Chinese)

[16] 刘基余. 北斗卫星导航系统的现状与发展[J]. 遥感测控, 2013, 34(3):1-8.
LIU Jiyu. Status and development of the Beidou navigation satellite system[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2013, 34(3):1-8. (in Chinese)

- navigation system[J]. Control Engineering Practice, 2004, 12(2):1531 – 1539.
- [21] 孙宇新, 沈启康, 叶海涵, 等. 基于改进 UKF 的无轴承异步电机无速度传感器控制[J]. 农业工程学报, 2018, 34(19):74 – 81.
SUN Yuxin, SHEN Qikang, YE Haihan, et al. Speed-sensorless control system of bearingless induction motor based on modified adaptive fading unscented Kalman filter[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(19):74 – 81. (in Chinese)
- [22] 胡志坤, 刘斌, 林勇, 等. 电池 SOC 的自适应平方根无极卡尔曼滤波估计算法[J]. 电机与控制学报, 2014, 18(4):111 – 116.
HU Zhikun, LIU Bin, LIN Yong, et al. Adaptive square root unscented Kalman filter for SOC estimation of battery[J]. Electric Machines and Control, 2014, 18(4):111 – 116. (in Chinese)
- [23] 孙宇新, 杨玉伟. 无轴承异步电机非线性滤波器自适应逆解耦控制[J]. 农业工程学报, 2016, 32(14):76 – 83.
SUN Yuxin, YANG Yuwei. Adaptive inverse decoupling control for bearingless induction motors based on nonlinear filter[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(14):76 – 83. (in Chinese)
- [24] DAN S. Optimal state estimation: Kalman, h_{∞} , and nonlinear approaches[M] // SIMON D J. Optimal state estimation: Kalman, Infinity, and nonlinear approaches, 2006.
- [25] 贺姗, 赵旭, 师昕. 改进的强跟踪求积分卡尔曼滤波算法[J]. 计算机技术与发展, 2018, 28(7):43 – 47.
HE Shan, ZHAO Xu, SHI Xin. Improved strong tracing quadrature Kalman filtering algorithm[J]. Computer Technology and Development, 2018, 28(7):43 – 47. (in Chinese)
- [26] ISO. ISO230 – 3 test code for machine tool part 3: determination of thermal effects[S]. 2007.
-

(上接第 227 页)

- [17] 赵燕东, 涂佳炎. 基于北斗卫星导航系统的林区智能巡检测绘系统研究[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(7):177 – 185.
ZHAO Yandong, TU Jiayan. Intelligent surveying and mapping system of forest inspection based on Beidou Satellite[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(7):177 – 185. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180722&flag=1&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.07.022. (in Chinese)
- [18] 刘基余. GPS 卫星导航定位原理与方法[M]. 北京:科学出版社, 2003:399 – 401.
- [19] 刘基余. GNSS 信号接收机的研制思考——GNSS 导航信号的收发问题之十四[J]. 数字通信世界, 2015(10):1 – 9.
LIU Jiyu. Development thinking on GNSS signal receivers—transmitting/receiving issue(14) of GNSS navigation signals[J]. Digital Communication World, 2015(10):1 – 9. (in Chinese)
- [20] PAZIEWSKI J, SIERADZKI R. Integrated GPS + BDS instantaneous medium baseline RTK positioning: signal analysis, methodology and performance assessment[J]. Advances in Space Research, 2017, 60(12):2561 – 2573.
- [21] 李征航, 黄劲松. GPS 测量与数据处理[M]. 武汉:武汉大学出版社, 2016.
- [22] QU L Z, ZHAO Q L, GUO J, et al. BDS/GNSS real-time kinematic precise point positioning with un-differenced ambiguity resolution[C] // China Satellite Navigation Academic Annual Meeting, 2015:13 – 29.
- [23] 张剑清, 潘渤, 王树根. 摄影测量学[M]. 武汉:武汉大学出版社, 2012:90 – 93.
- [24] YAN Fei, GONG Yinxu, FENG Zhongke. Study on the position drift of GPS single point and improving the accuracy of positioning[C] // 2nd International Conference on Measurement, Instrumentation and Automation, 2013:492 – 498.
- [25] 姜作喜, 张虹, 郭志宏. 航空重力测量内符合精度计算方法[J]. 物探与化探, 2010, 34(5):672 – 676.
JIANG Zuoxi, ZHANG Hong, GUO Zhihong. The method for calculation of internal accord accuracy in airborne gravity survey [J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2010, 34(5):672 – 676. (in Chinese)
- [26] 蔡昌盛, 戴吾蛟, 匡翠林. GPS/GLONASS 组合系统的 PDOP 计算和分析[J]. 测绘通报, 2011(11):5 – 7.
CAI Changsheng, DAI Wujiao, KUANG Cuilin. Calculation and analysis of PDOP for combined GPS/GLONASS systems[J]. Bulliten of Surveying and Mapping, 2011(11):5 – 7. (in Chinese)
- [27] LI P, ZHANG X. Modeling and performance analysis of GPS/GLONASS/BDS precise point positioning[C] // China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2014 Proceedings: Volume III. Springer Berlin Heidelberg, 2014:251 – 263.
- [28] KHODABANDEH A, TEUNISSEN P. PPP – RTK and inter-system biases: the ISB look-up table as a means to support multi-system PPP – RTK[J]. Journal of Geodesy, 2016, 90(9):837 – 851.
- [29] 高旺, 高成发, 潘树国, 等. 北斗三频宽巷组合网络 RTK 单历元定位方法[J]. 测绘学报, 2015, 44(6):641 – 648.
GAO Wang, GAO Chengfa, PAN Shuguo, et al. Single-epoch positioning method in network RTK with BDS Triple-frequency [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2015, 44(6):641 – 648. (in Chinese)
- [30] 李斌, 李征航, 刘万科. COMPASS/GPS/GLONASS 系统组合在中国区域的仿真分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2013, 33(6):94 – 97.
LI Bin, LI Zhenghang, LIU Wanke. Simulation analysis of combined system of COMPASS/GPS/GLONASS in China region [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2013, 33(6):94 – 97. (in Chinese)