

基于 GPS/BDS 组合系统实现航测无人机动态定位

高晓^{1,2}, 庠新勃², 白皓², 唐新庄²

(1. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054;

2. 中国电力工程顾问集团西北电力设计院有限公司, 陕西 西安 710032)

摘要: 由于定位定向系统(POS)可直接获取航摄像片线元素与角元素,减少航测内外业工作量,提高航测作业的效率,无人机摄影测量已成为航空摄影测量的重要方式.常规实时动态(RTK)产品重量较大,难以应用于荷载有限的微小型无人机的 POS 系统.本文基于 Doppler 值修正伪距观测量,并联合平滑伪距与相位观测量实现无人机动态后处理定位(PPK).实测数据结果表明,较之单系统,全球定位系统/北斗卫星导航系统(GPS/BDS)组合系统可充分满足无人机动态定位的精度需求,结合平滑伪距与相位观测量可改善 PPK 定位的精度与可靠性.

关键词: GPS;BDS;航测无人机;Doppler;动态定位

中图分类号: P228.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1008-9268(2019)03-0105-06

0 引言

无人机航测系统具有机动性好、灵敏度高、成图速度快等优势,已成为航空摄影测量的重要方式^[1-4].集差分全球卫星导航系统(GNSS)技术与惯性导航技术于一体的定位定向系统(POS)可直接获取航摄像片的线元素和角元素,根据共线方程即可重建地表立体模型,进而获取目标地物的几何和物理信息^[5-6],因此,POS 系统可显著减少航测内外业的工作量,提高航测工作效率,扩展无人机应用范围.

由于无人机载荷有限,常规实时动态(RTK)设备重量超过 1 kg,无法直接应用无人机 POS 系统.动态后处理定位(PPK)技术是利用相位观测量进行事后动态定位的技术^[7],该模式对无人机定位组件的功能性要求较低且精简了数据传输等模块,在保持 RTK 定位精度的基础上可有效减轻无人机定位组件的重量与体积.随着软件算法的改进,后期作业中校正航片倾角的精准度较高,因此,动态定位的精度成为影响 POS 系统精度的主要原

因^[8].随着北斗卫星导航系统(BDS)的不断完善,尤其是北斗 3 号系统(BDS-3)的快速推进,结合 GPS 与 BDS 的组合定位系统的优势更加明显^[9-11].鉴于 BDS 与 GPS 系统具有良好的兼容性,本文将采用 GPS/BDS 组合系统实现航测无人机事后动态定位,并结合平滑伪距(DSC)与相位观测量加快模糊度收敛速度,保证动态定位的精度与可靠性.

1 动态定位参数估计

GNSS 动态定位方程中,未知参数包括时变参数(如位置参数)和时不变参数(如整周模糊度参数)两类,其载波相位双差观测量误差方程可表示为:

$$\mathbf{V}_{\nabla\Delta\varphi} = \mathbf{H}_1 \mathbf{X}_1 + \mathbf{H}_2 \mathbf{X}_2 - \mathbf{L}_{\nabla\Delta\varphi}, \mathbf{P}, \quad (1)$$

式中: \mathbf{X}_1 为时变参数向量; \mathbf{X}_2 为时不变参数向量; \mathbf{H}_1 与 \mathbf{H}_2 分别为对应的系数矩阵; $\mathbf{L}_{\nabla\Delta\varphi}$ 为观测值与计算值的差值向量; \mathbf{P} 为载波观测值权阵. m 为观测值数量, u 与 t 分别为时变参数与时不变参数个数.采用分块最小二乘平差^[12],则有

收稿日期: 2019-03-05

资助项目: 西北电力设计院科研项目(XB1-ZH06-2017)

通信作者: 高晓 E-mail:834606637@qq.com

$$\begin{bmatrix} N_{11} & N_{12} \\ N_{21} & N_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

求解得

$$\begin{cases} X_1 = N_{11}^{-1} (W_1 - N_{12} X_2), \\ M_2 X_2 = R_2 \end{cases}. \quad (3)$$

式中, $N_{11} = H_1^T P H_1$, $N_{22} = H_2^T P H_2$, $N_{12} = (N_{21})^T = H_1 P H_2$, $M_2 = N_{22} - N_{21} N_{11}^{-1} N_{12}$, $R_2 = W_2 - N_{21} N_{11}^{-1} W_1$, $W_1 = H_1^T P L_1$, $W_2 = H_2^T P L_2$.

由于单一历元观测数据的法方程秩亏,需要多个历元观测数据联合求解^[13],则有

$$\sum_{i=1}^n (M_2)_i X_2 = \sum_{i=1}^n (R_2)_i, \quad (4)$$

式中, i 表示历元. 当时不变参数 X_2 确定之后, 即可根据式(3)求解时变参数 X_1 .

2 联合载波与伪距观测量求解模糊度

伪距与载波为非等精度观测量, 但通过合理确定两类观测量的权值, 联合伪距与载波观测量可有效改善法方程的病态性, 提高模糊度的收敛速度.

为便于编程实现, 仅采用具有伪距与相位两类观测值的卫星观测数据. 参照式(1), 伪距双差误差方差可表示为^[14]:

$$V_{\nabla\Delta p} = \begin{matrix} H_1^T & X_1 & - & L_{\nabla\Delta p} \\ m \times 1 & m \times u & u \times 1 & m \times m \end{matrix} P_{\nabla\Delta p}. \quad (5)$$

式中, 下标 p 表示伪距观测量, 其他符号含义同式(1).

采用伪距与相位观测量联合解算, 实质就是在原相位观测量法方程两端对应位置上添加伪距分量:

$$\begin{bmatrix} N_{11} + N'_{11} & N_{12} \\ N_{21} & N_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_1 + W'_1 \\ W_2 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

式中, $N'_{11} = H_1^T P_{\nabla\Delta p} H_1$, $W'_1 = H_1^T P_{\nabla\Delta p} L_{\nabla\Delta p}$. 设定伪距与相位观测量的权比为 k , 则有 $N'_{11} = k N_{11}$. 联合伪距后相位观测量的模糊度法方程可表示:

$$\begin{cases} M'_2 X_2 = R'_2, \\ M'_2 = M_2 + \frac{k}{1+k} N_{21} N_{11}^{-1} N_{12}, \\ R'_2 = R_2 + \frac{k}{1+k} (N_{21} N_{11}^{-1} W_1 - N_{21} N_{11}^{-1} W'_1). \end{cases} \quad (7)$$

由于权比系数 k 一般不大于 $\frac{1}{(100)^2}$, 则有 $k \approx$

$\frac{k}{1+k}$, 式(7)可表示为

$$\begin{cases} M'_2 = M_2 + M_p, \\ R'_2 = R_2 + R_p, \\ M_p = k \cdot N_{21} N_{11}^{-1} N_{12}, \\ R_p = k \cdot (N_{21} N_{11}^{-1} W_1 - N_{21} N_{11}^{-1} W'_1). \end{cases} \quad (8)$$

参照式(4), n 个历元伪距与相位观测量联合求解模糊度的法方程可表示为

$$\sum_{i=1}^n (M_2)_i X_2 + \sum_{i=1}^n (M_p)_i X_2 = \sum_{i=1}^n (R_2)_i + \sum_{i=1}^n (R_p)_i. \quad (9)$$

3 基于 Doppler DSC 观测量

采用测距码进行伪距测量时, 并非根据某一个码来测定距离, 而是按照积分间隔中所有的码进行测距. 通过测距码推算伪距的精度通常为码元宽度的 1%. 因此, 码元宽度为 300 m 的粗码, 其伪距精度约为 3 m; 码元宽度为 30 m 的精码, 其伪距精度约为 0.3 m^[15]. 由于伪距精度较低, 尽管联合伪距与相位观测量可加快模糊度收敛速度, 但加速效率有限. 同时, 若伪距存在明显偏差, 将导致法方程存在病态性.

为提高伪距观测量的精度, 本文基于 Doppler DSC 观测量, 其公式如下^[16-17]:

$$\bar{P}_k = \omega P_k + (1 - \omega) \left[\bar{P}_{k-1} + \lambda \int_{t_{k-1}}^{t_k} D(t) dt \right]. \quad (10)$$

式中: 下标为历元标识; D 为 Doppler 观测量; λ 为载波波长; ω 为平滑因子 (SWF); P 与 \bar{P} 分别代表原始伪距与 DSC 观测量. 本文中 ω 取历元倒数 ($\omega = \frac{1}{k}$), 则有

$$\begin{aligned} \bar{P}_k &= \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k P_i + \\ &\frac{\lambda T}{2k} \left[(k-1) D_k + \sum_{i=1}^{k-1} (2i-1) D_i \right]. \end{aligned} \quad (11)$$

由于 Doppler 观测量是一种独立观测量, 依据误差传播率, DSC 的方差为

$$\begin{aligned} \sigma_{\bar{P}_k}^2 &= \frac{\sigma_p^2}{k} + \\ &\left(\frac{\lambda T}{2k} \right)^2 \left[(k-1)^2 + \frac{2k(k-1)(2k-1)}{3} \right] \sigma_D^2 \\ &= \frac{\sigma_p^2}{k} + (\lambda T)^2 \left(\frac{k}{3} - \frac{1}{4} - \frac{1}{3k} + \frac{1}{4k^2} \right) \sigma_D^2. \end{aligned} \quad (12)$$

由式(12)可知,DSC 的方差并非随着平滑历元数的增加而单调递增,因此,应设置合理的平滑窗口保证 DSC 的精度.为保证该方法在 PPK 领域的应用,本文设定平滑窗口宽度为 2.由于 Doppler 观测值精度优于原始伪距,DSC 观测量精度理论上优于原始伪距观测量,因此,联合 DSC 与相位观测量更有利于模糊度的快速收敛.

4 实验数据与结果分析

实验采用飞马 F200 智能航测无人机,测控半径 10 km,巡航速度 60 km/h,支持 GPS/BDS/GLONASS 信号跟踪(由于 GLONASS 采用 FDMA 通讯模式,本文仅采用 GPS/BDS 组合进行定位解算).实验时间为 2018 年 9 月 6 日(GPST: 04:40—05:37,年积日:249),采样频率 20 Hz.实验测区航向长度约 4.2 km,旁向宽度约 2.0 km,地形起伏较小,测区范围如图 1 所示,图中省略了无人机起降阶段.图 1(a)为航线平面图,航测方案按直角折线开展.图 1(b)为高程方向变化图,由于实验阶段空中平均风速 5.5 m/s,一定程度上影响无人机的稳定性,航线高程方向发生了较为明显的波动.

图 2 为航飞时段空间可见卫星轨迹图,由图可知,测段内 GPS 与 BDS 卫星数量充裕(平均可用卫星 25.6 颗),可保证实时定位的可靠性.测段卫星 PDOP 均值为 1.1,其中 HDOP 均值为 0.5,VDOP 均值为 0.9,由此可知,测段可用卫星空间几何分布良好,可保证实时定位的精度.

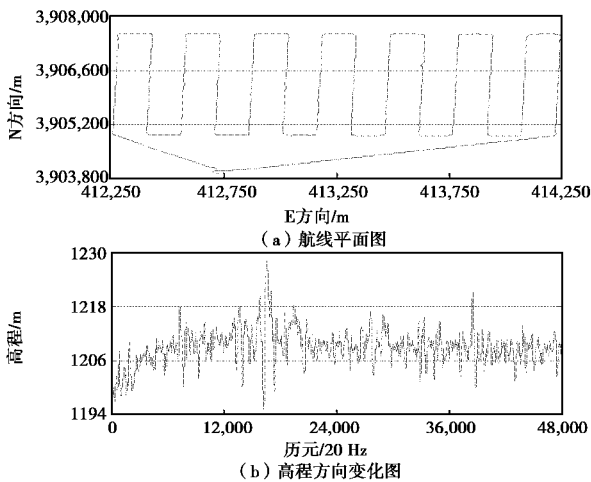


图 1 无人机实验航线图

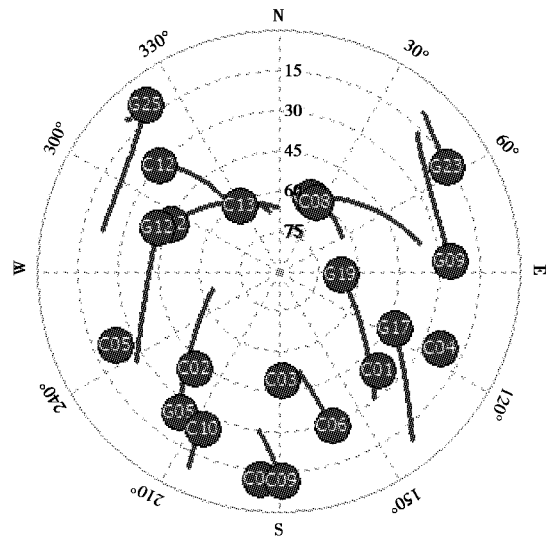


图 2 航飞时段空中可见卫星轨迹图(G:GPS;C:BDS)

分别采用 GPS、BDS 与 GPS/BDS 组合系统观测数据进行 PPK 解算,以 TBC(Trimble Business Center 3.90)基线解算结果为真值,逐历元计算差值,结果如图 3 与图 4 所示.由图 3 可知,GPS 与 BDS 单频动态解均有明显的波动,高程方向波动更加明显,统计高程方向 RMS 值,GPS 与 BDS 高程方向 RMS 值分别为 1.56 cm 与 2.01 cm.组合系统在平面与高程方向的波动明显小于单系统,其高程方向 RMS 值仅为 0.74 cm.图 4 示出了双频动态解算结果差值序列,较之单频解算结果,双频解算结果波动有所降低,有助于改善定位可靠性.由于少数历元(共计 68 个)BDS 部分卫星无双频数据,该部分历元解算结果存在明显偏差.综合图 3 与图 4 可知,GPS 单系统动态定位结果略优于 BDS,GPS/BDS 组合系统优势明显,在水平方向与高程方向的定位精度与可靠性均优于单系统.

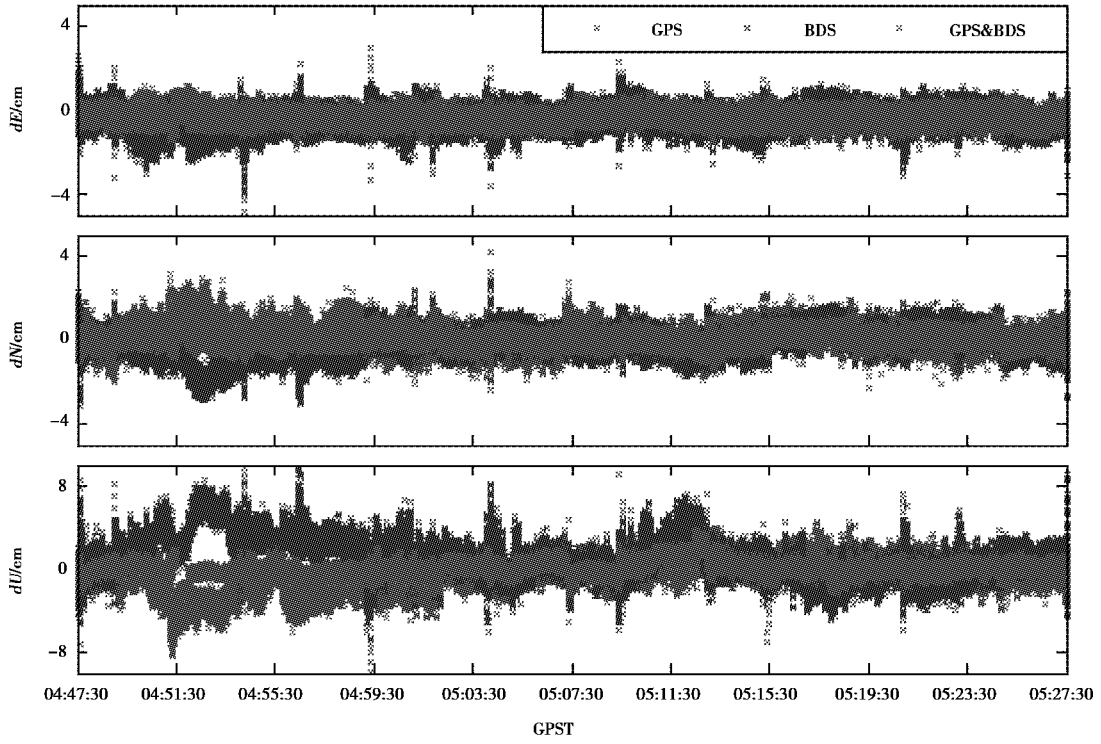


图 3 不同 GNSS 单频数据动态定位结果对比图

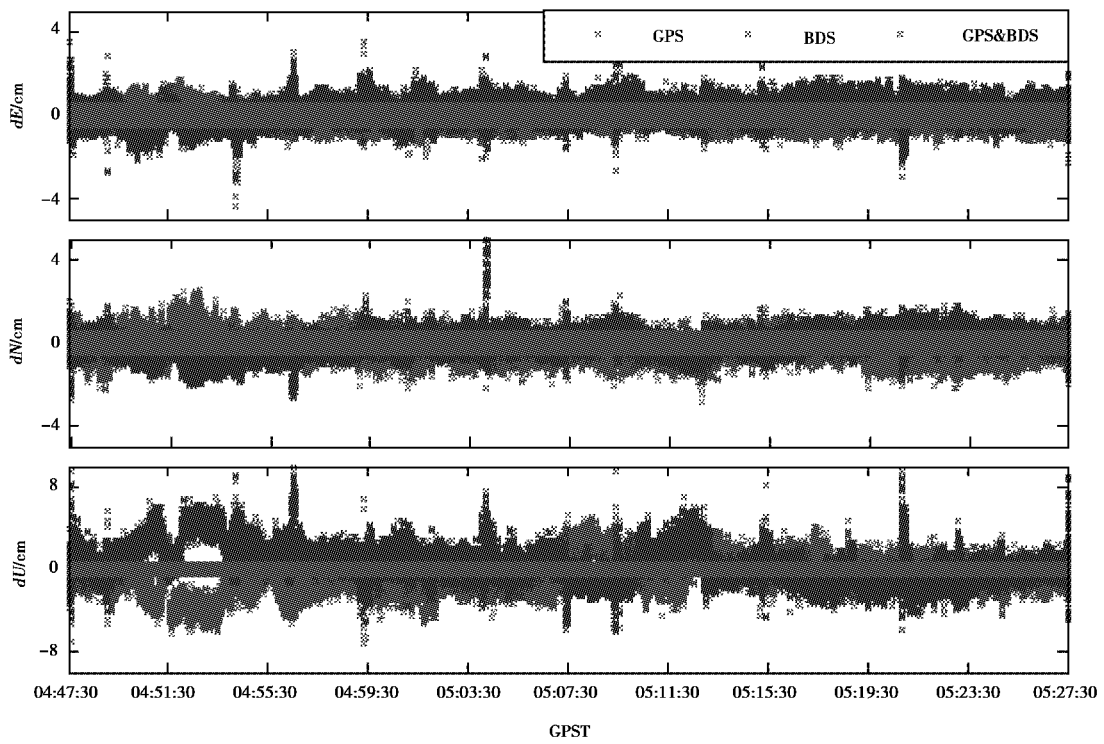


图 4 不同 GNSS 双频数据动态定位结果对比图

5 结束语

本文基于航测无人机的动态观测数据,利用动态后处理方法获取无人机航测作业时的空间三维坐标.实验结果表明,较之常规RTK,PPK模式在保证动态定位精度的同时,可有效减少无人机POS系统质量,降低无人机的载荷负担.GPS与BDS单系统PPK定位结果均满足RTK常规定位的要求,组合系统的定位精度(水平RMS优于0.8cm,高程RMS优于1.2cm)明显优于单系统,更加适用于无人机动态定位领域.

参考文献

- [1] BERNI J, ZARCO-TEJADA P J, SUAREZ L, et al. Thermal and narrowband multispectral remote sensing for vegetation monitoring from an unmanned aerial vehicle [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(3): 722-738. DOI: 10.1109/TGRS.2008.2010457.
- [2] WATTS A C, AMBROSIA V G, HINKLEY E A. Unmanned aircraft systems in remote sensing and scientific research: classification and considerations of use [J]. *Remote Sensing*, 2012, 4(6): 1671-1692. DOI: 10.3390/rs4061671.
- [3] 李德仁, 龚健雅, 邵振峰. 从数字地球到智慧地球 [J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2010, 35(2): 127-132.
- [4] 李德仁, 李明. 无人机遥感系统的研究进展与应用前景 [J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2014, 39(5): 505-513, 540.
- [5] HWANG D H, OH S H, LEE S J, et al. Design of A low-cost attitude determination GPS/INS integrated navigation system [J]. *GPS Solutions*, 2005, 9(4): 294-311. DOI: 10.1007/s10291-005-0135-9.
- [6] 袁修孝. 当代航空摄影测量加密的几种方法 [J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2007, 32(11): 1001-1006.
- [7] 李哲, 高立, 乔辉. GPS PPK 技术在测量外业中的应用探讨 [J]. *测绘与空间地理信息*, 2012, 35(5): 120-121.
- [8] 邱志刚, 黄纪晨. 基于 PPK 算法的微型 GNSS 在航测无人机上的应用 [J]. *测绘与空间地理信息*, 2018, 41(8): 206-209.
- [9] GAO X W, GUO J J, CHENG P F, et al. Fusion positioning of BeiDou/GPS based on spatio temporal system unification [J]. *Acta Geodaetica Et Cartographica Sinica*, 2012, 41(5): 743-742. DOI: 10.1007/s11783-011-0280-z.
- [10] WANG S J, BEI J Z, LI D H., et al. Real-time kinematic positioning algorithm of GPS/BDS [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(5): 621-625. DOI: 10.13203/j.whugis20120139.
- [11] 高晓, 杨志强, 宋志勇, 等. 相位单差残差评估北斗区域导航系统载波相位观测量质量 [J]. *测绘科学技术学报*, 2017, 34(1): 19-23.
- [12] 许国昌. GPS 理论、算法与应用 [M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2011.
- [13] 陈源军. 顾及历元间坐标差信息的 GPS 动态定位算法研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2015.
- [14] 刘万科, 丁文武, 李征航. 单频 GPS 静态定向中整周模糊度的快速解算 [J]. *测绘地理信息*, 2007, 32(6): 3-5.
- [15] HOFMANN-WELLEMHOF B, LICHTENEGGER H, WASLE E. GNSS-global navigation satellite systems (GPS, GLONASS, Galileo and more) [M]. New-York Springer Verlag, 2008: 80-82. DOI: 10.1007/978-3-211-73017-1.
- [16] ZHOU Z B, LI B F. Optimal Doppler-aided smoothing strategy for GNSS navigation [J]. *GPS Solutions*, 2017, 21(1): 197-210. DOI: 10.1007/s10291-015-0512-y.
- [17] ZHOU Z B, LI B F. GNSS windowing navigation with adaptively constructed dynamic model [J]. *GPS Solutions*, 2015, 19(1): 37-48. DOI: 10.1007/s10291-014-0363-y.

作者简介

高晓 (1988—), 男, 博士, 工程师, 研究方向为 GNSS 组合定位算法研究与软件设计.

库新勃 (1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为 GIS 数据处理与软件开发.

白皓 (1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为遥感数据解译.

Aerial UAV kinematic positioning using combined GPS/BDS system

GAO Xiao^{1,2}, KU Xinbo², BAI Hao², TANG Xinzhuang²

(1. College of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China;

2. Northwest Electric Power Design Institute Co., LTD, China Power Engineering Consulting Group, Xi'an 710032, China)

Abstract: Position and orientation system (POS) can acquire the line and angle elements of the aerial photographs directly, which can reduce the workload of unmanned aerial vehicle photogrammetry and improve work efficiency, thus the UAV photogrammetry has become an important way of data acquisition in aerial photogrammetry. For the large quality of conventional RTK products, it is difficult to be applied in the UAV surveying. In this paper, Doppler smoothing algorithm has been adopted to refine code observables, and then the combined Doppler-smoothed code (DSC) and phase data have been used to realize UAV post processed kinematic positioning (PPK). The results of measured data have shown that, compared with single satellite system, the combined GPS/BDS system can meet the requirement of kinematic positioning for UAV photogrammetry, and the efficiency and reliability of PPK positioning can be improved based on the DSC and phase observables.

Keywords: GPS; BDS; UAV; Doppler; kinematic positioning