

文章编号 1004-924X(2015)09-2506-07

导航信息滞后补偿实现高速无人机对地精确定位

展凤江^{1*}, 沈宏海², 汪 沛³, 张才文¹

- (1. 南京航空航天大学, 江苏 南京 210016;
2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
3. 中国电子科技集团 第 54 研究所, 河北 石家庄 050081)

摘要:针对高速无人机光电侦察平台的实时对地目标定位误差,研究了基于惯导信息的光电平台目标定位算法。利用目标定位数学模型和误差模型,分析了影响目标定位精度的因素,建立了参数误差对于定位精度影响的数学仿真模型。通过仿真分析确定了卫星导航信息的实时性是造成定位误差的主要因素,提出了通过修正卫星导航信息延时时间来解决光电侦察平台实时目标定位误差问题。进行了飞行试验以验证提出论点的正确性,结果表明:通过修正卫星导航信息延时时间,有效补偿了载机坐标信息滞后,提高了光电侦察平台目标定位精度,定位误差由补偿前的 100 m 减少到小于 40 m。研究结果对高速飞行器的相关应用具有重要的参考价值。

关键词:无人机;光电平台;目标定位;卫星导航;滞后补偿

中图分类号:V271.4;V249.3 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152309.2506

Precise ground target location of subsonic UAV by compensating delay of navigation information

ZHAN Feng-jiang^{1*}, SHEN Hong-hai², WANG Pei³, ZHANG Cai-wen¹

- (1. *Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;*
2. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*
3. *The 54th Research Institute, China Electronic
Technology Group Corporation, Shijiazhuang 050081, China*)
* *Corresponding author, E-mail: zhanfengjiang@nuaa.edu.cn*

Abstract: For the real time ground target location precision of an Optic Electric(O-E) reconnaissance platform of the subsonic Unmanned Aerial Vehicle (UAV), an algorithm for O-E platform location was proposed based on inertial navigation information. The influence factors on the precision of target location were studied by using the mathematics model and error model of target location. The mathematical simulation model with influences of parameter errors on the precision of target location was established. Simulation results show that the real-time performance of the satellite navigation information is the decisive factor affecting the target location error. Then, it points out that modifying the delay time of the satellite navigation information can solve the real-time target location error

收稿日期:2014-12-17;修订日期:2015-02-08.

基金项目:国防预研基金资助项目(No. 402070301)

中无人机围绕靶标盘旋飞行,在多种定位条件下进行测距、定位,靶标定位结果如图 3 所示。

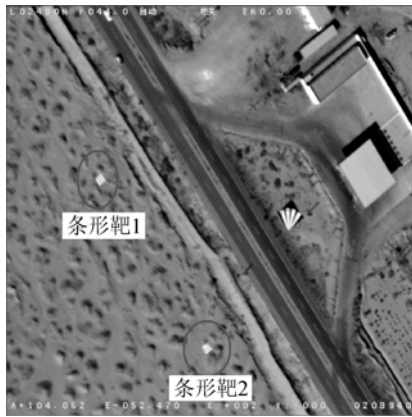


图 2 条形靶标布置图

Fig. 2 Image of two bar targets

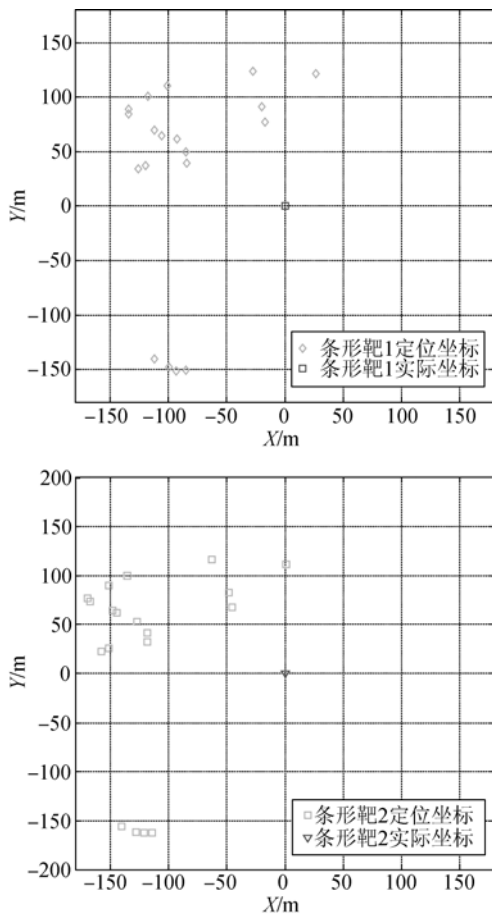


图 3 靶标定位结果

Fig. 3 Results of target location

由定位结果可知,条形靶 1 的定位误差散布在 78.7~161.1 m,平均为 132 m;条形靶 2 的定

位误差散布在 95.4~209.5 m,平均为 156 m,定位误差大于指标要求。

4 误差分析

4.1 激光测距值误差

设激光测距值误差为 Δd ,光轴相对水平面的夹角为 θ ,定位误差为 Δl ,在其他误差项为 0 时推算得:

$$\Delta l = \Delta d \cos \theta.$$

利用上述误差模型结合典型的载机姿态角、经纬度、飞行高度和光电平台的姿态角、激光测距值等数据进行仿真验证,仿真数据尽量包括不同测距值、成像角度等定位条件。表 1 为测距值误差的仿真分析结果。通过上述分析可以看出,激光测距值在其他误差为 0 的情况下,其误差不受其他定位条件影响而直接线性叠加到定位误差中,激光测距值误差小于 5 m,因此激光测距引起的定位误差也小于 5 m。

表 1 测距值误差仿真分析结果

Tab. 1 Simulation results of errors on laser ranging

仿真输入参数	参数 I	参数 II	参数 III	参数 IV
激光测距值/m	1000	1000	3000	4000
平台方位角/(°)	20	20	40	50
平台俯仰角/(°)	-30	-30	-50	-60
无人机经度/(°)	105.6	105.6	105.8	105.9
无人机纬度/(°)	39.2	39.2	39.6	39.8
无人机飞行高度/m	500	500	2 000	3 500
无人机航向角/(°)	50	50	70	80
无人机俯仰角/(°)	5	5	15	20
无人机滚转角/(°)	5	5	-5	-10
激光测距值误差/m	5	10	10	10
造成的定位误差/m	5	10	10	10

4.2 光电平台姿态角误差

光电平台姿态角误差的影响程度计算模型为:

$$\Delta L = \sqrt{\cos^2 \omega \Delta \varphi^2 + \Delta \omega^2} d, \quad (1)$$

式中: φ 为光电平台方位角, $\Delta \varphi$ 为光电平台方位误差, $\Delta \omega$ 为光电平台俯仰误差, d 为激光测距值。

当方位角误差 $\Delta\varphi=0$ 时, $\Delta L=d\Delta\omega$; 当俯仰角误差 $\Delta\omega=0$ 时, $\Delta L=d\cos\omega\Delta\varphi$ 。

通过公式可以看出:姿态角误差越大,引起的定位误差越大;姿态角引起的误差与测距值成正比,测距值越大,定位误差越大;方位角引起的误差与俯仰角余弦值有关,在俯仰角为 90° 时,误差为 0;俯仰角引起的误差只与当前测距值有关。

表 2 平台姿态角误差仿真分析结果

Tab.2 Simulation results of errors on platform attitude angle

仿真输入参数	参数 I	参数 II	参数 III	参数 IV	参数 V
激光测距值/m	1 000	1 000	2 000	4 000	4 000
光电平台方位角/ $^\circ$	20	20	20	50	50
光电平台俯仰角/ $^\circ$	-30	-30	-30	-30	-80
无人机经度/ $^\circ$	105.6	105.6	105.6	105.9	105.9
无人机纬度/ $^\circ$	39.2	39.2	39.2	39.8	39.8
无人机高度/m	500	500	500	3500	3500
无人机航向角/ $^\circ$	50	50	50	80	80
无人机俯仰角/ $^\circ$	5	5	5	20	20
无人机滚转角/ $^\circ$	5	5	5	-10	-10
光电平台方位角误差/ $^\circ$	0.25	0.05	0.05	0.05	0.05
光电平台俯仰角误差/ $^\circ$	0.25	0.05	0.05	0.05	0.05
定位误差/m	5.8	1.15	2.3	4.6	3.5

仿真误差同公式推算误差一致。对比仿真参数 I、II 试验可得角度误差越大,定位误差越大,且符合等比关系;对比仿真参数 II、III 试验可得测距值越大,引起误差越大,且等倍放大;对比仿真参数 IV、V 试验可得误差受当前俯仰角影响,倾角越大误差越小。

由以上分析可以得出:光电平台姿态角误差对定位精度有一定影响, 0.05° 误差在 4 km 测距时将造成 3~5 m 误差。

4.3 无人机姿态角误差

无人机姿态角是定位算法中的重要参数之一,它包括无人机航向角、俯仰角和滚转角。

表 3 为在第一组仿真参数基础上修改激光测距值、平台姿态角和飞机姿态角后的误差仿真结果,发现这些参数均对定位误差有一定影响,同时可以看出 0.2° 的姿态角误差对定位精度的影响小于 16 m。

表 3 无人机姿态角误差仿真分析结果

Tab.3 Simulation results of errors on UAV attitude angle

仿真输入参数	参数 I	参数 II	参数 III	参数 IV
测距值/m	2000	4000	2000	2000
平台方位角/ $^\circ$	20	20	100	100
平台俯仰角/ $^\circ$	-30	-30	-60	-60
无人机经度/ $^\circ$	105.6	105.6	105.6	105.6
无人机纬度/ $^\circ$	39.2	39.2	39.2	39.2
无人机高度/m	1000	1000	1000	1000
无人机航向角/ $^\circ$	50	50	50	50
无人机俯仰角/ $^\circ$	5	5	5	5
无人机滚转角/ $^\circ$	5	5	5	5
无人机航向角误差/ $^\circ$	0.2	0.2	0.2	0.5
无人机俯仰角误差/ $^\circ$	0.2	0.2	0.2	0.2
无人机滚转角误差/ $^\circ$	0.2	0.2	0.2	0.2
定位仿真误差/m	5.1	10	15.8	8

4.4 无人机卫星导航坐标误差

由大地坐标和大地直角坐标的转换公式可得:

$$\begin{cases} X = \left[\frac{a}{\sqrt{1-e^2 \sin^2 B}} + H \right] \cos B \cos L \\ Y = \left[\frac{a}{\sqrt{1-e^2 \sin^2 B}} + H \right] \cos B \sin L \\ Z = \left[\frac{a}{\sqrt{1-e^2 \sin^2 B}} (1-e^2) + H \right] \sin B \end{cases} \quad (2)$$

其他误差为 0 时:

$$\Delta l = \left[\frac{a}{\sqrt{1-e^2 \sin^2 B}} + H \right] \cos B \Delta L \quad (3)$$

其他误差不为 0 时:

$$\Delta l = \left[\frac{a(1-e^2)}{\sqrt{(1-e^2 \sin^2 B)^3}} + H \right] \Delta B \quad (4)$$

由上式可知,经度、纬度引起的误差均与当前纬度、高度值有关,高度误差即为最终误差。

在实际测量中,坐标误差以距离的形式出现,因此误差推算公式以 Δs 为输入误差,在其他误差为 0 时表示为:

$$\Delta l = \Delta s$$

综上所述,载机位置的测量精度是影响目标定位精度的关键因素。

5 实验验证

根据以上仿真分析结果可以看出,由于无人机安装了惯性导航系统(INS),故可精确测量无人机姿态角误差、激光测距误差以及光电平台俯仰/方位角误差,这些误差都属于系统的安装误差。在空中飞行试验时采用光电平台动态数引修正的方法(将地面已知控制点的经纬度输入至光电平台,数引指令使光电平台波门指向目标点,通过调整光电平台俯仰角和方位角使波门十字与控制点重合)进行补偿。

飞行试验无人机采用定高飞行,相对高度为 4 000 m,对位置坐标已精确标定的目标点条形靶 1 和条形靶 2 进行多次测距和定位。将条形靶实际测量得到的经纬度坐标 (L_0, B_0, H_0) 转换为大地直角坐标 (X_0, Y_0, Z_0) ,根据光电平台激光测距值 L ,平台方位角 α 和俯仰角 β 求出条形靶坐标在光电平台坐标系中的三维坐标。根据无人机的航向角 φ 、俯仰角 θ 、滚转角 γ 进行坐标转换,推算出无人机在导航坐标系中的三维坐标。将根据靶标位置推算出的无人机轨迹与无人机导航设备记录的轨迹点投影至 XOY 平面,如图 4 所示。

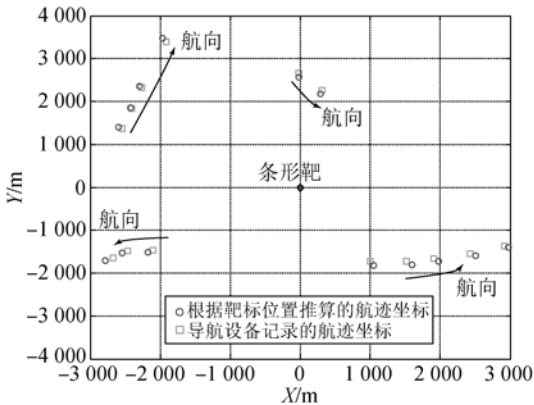


图 4 无人机抵近/远离靶标的位置关系

Fig. 4 Location relationship of unmanned aerial vehicle near and far to target points

根据图 4 可知,无人机的飞行轨迹与推算轨迹具有很强的相关性,无人机无论抵近或远离靶标飞行,导航设备位置信息 $A(X_d, Y_d)$ 始终滞后于根据已知靶标坐标推算出的无人机的实际位置信息 $B(X_t, Y_t)$ 。根据无人机的飞行地速 v_g 可以

推算出导航位置信息的延迟时间 τ 为:

$$\tau = \sqrt{(X_t - X_d)^2 + (Y_t - Y_d)^2} / v_g \quad (5)$$

惯性导航系统进行无人机导航坐标信息差值的过程中,通过延时时间 τ 、无人机的东向速度 v_a 和北向速度 v_b 来补偿无人机在 XOY 平面的 X, Y 位置坐标,然后以补偿后的无人机位置坐标进行目标定位,如图 5 所示。

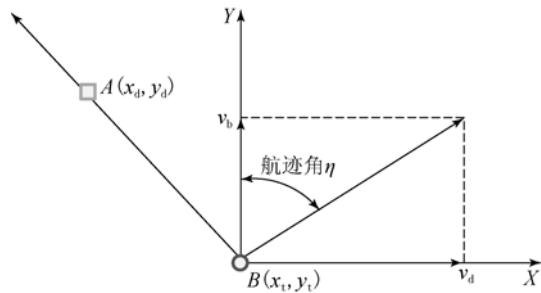


图 5 延时补偿原理图

Fig. 5 Schematic diagram of time delay compensation

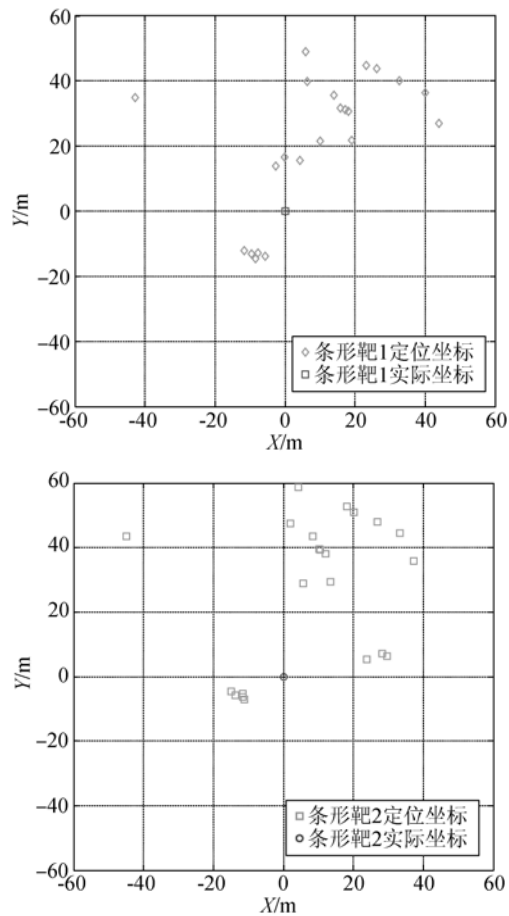


图 6 延时修正后的实时目标定位结果

Fig. 6 Results of target location coordinate after time delay compensation

卫星导航位置信息的滞后成为影响定位精度的主要因素,由于亚音速无人机巡航速度大于500 km/h,根据飞行试验数据结果,卫星导航坐标延时会造成较大的定位误差;而对于低速无人机(通常巡航速度约为150 km/h),卫星导航坐标延时对定位精度的影响要小得多。经过对卫星导航信息的延时修正后,目标实时定位精度得到了较大提高,如图6所示。

由图6可知,条形靶1的定位误差散布在14.1~55.2 m,平均为33.1 m。条形靶2的定位误差散布在12.8~62.5 m,平均为37.4 m。条形靶1的定位精度提高了98.9 m,条形靶2的定位精度提高了118.6 m。补偿后的定位精度与文献[3]提到的补偿精度相比略高,而目前未见同类高速无人机定位精度的相关报道。

6 结 论

为了提高高速无人机对地目标的定位精度,本

文系统地研究了基于惯导信息的光电侦察平台目标定位算法,对各误差分量进行了仿真验证,数据分析结果表明载机坐标信息的时间滞后是影响定位精度的主要因素。随着载机飞行速度的提升,载机坐标信息滞后带来的影响更加不可忽视,特别在高速飞机定点盘旋侦察时的影响尤为复杂。论文采用延时修正法较好地实现了精确定位,定位精度由补偿前的百米提高到低于40 m。本文的研究结果对高速飞行器的发展具有重要的参考价值。

载机坐标信息的误差主要来源于三个方面^[12]:首先是空间卫星误差,包括卫星星历误差、卫星钟差误差和卫星设备延迟误差等;其次是接收机误差,包括测量误差、计算误差和设备延迟误差等;再次是外界条件误差,主要包括卫星信号传播所产生的误差等。本文在试验中发现了GPS导航信息和北斗导航信息在误差分布上的差异,这将是后续研究工作的重点。

参考文献:

- [1] 孙辉. 机载光电平台目标定位与误差分析[J]. 中国光学, 2013, 6(6): 912-917.
SUN H. Target localization and error analysis of airborne electro-optical platform [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(6): 912-917. (in Chinese)
- [2] 王家骥, 金光, 颜昌祥. 机载光电跟踪测量设备的目标定位误差分析[J]. 光学精密工程, 2005, 13(2): 105-116.
WANG J Q, JIN G, YAN CH X. Orientation error analysis of airborne opto-electric tracking and measuring device [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(2): 105-116. (in Chinese)
- [3] 杨松普, 王养柱, 胡永浩. 光电侦察平台目标定位方法研究[J]. 电光与控制, 2014, 21(2): 9-12.
YANG S P, WANG Y ZH, HU Y H. Research on positioning method of photoelectric reconnaissance platform [J]. *Electronics Optics & Control*, 2014, 21(2): 9-12. (in Chinese)
- [4] 姚新. 无人机提高目标定位精度方法研究[J]. 舰船电子工程, 2011, 10: 56-59.
YAO X. Research on the improved orientation accuracy method of UAV [J]. *Ship Electronic Engineering*, 2011, 10: 56-59. (in Chinese)
- [5] 毛昭军, 汪德虎. 姿态测量/激光测距的目标定位模型[J]. 火力与指挥控制, 2003, 5: 14-17.
MAO ZH J, WANG D H. A model of target position for UAV based attitude measuring/laser range-finder [J]. *Fire Control & Command Control*, 2003, 5: 14-17. (in Chinese)
- [6] JAMES H K, ROBINSON B H. TIER II Plus EO sensor LOS control and image geolocation [J]. *IEEE*, 1997(2): 377-405.
- [7] 檀立刚, 戴明, 刘晶红, 等. 机载光电测量设备目标自主定位误差分析[J]. 光学精密工程, 2013, 21(12): 3133-3140.
TAN L G, DAI M, LIU J H, et al.. Error analysis of target automatic positioning for airborne photo-electric measuring device [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(12): 3133-3140. (in Chinese)
- [8] 刘晶红, 孙辉, 张葆, 等. 航空光电成像平台的目标自主定位[J]. 光学精密工程, 2007, 15(8): 1305-1310.
LIU J H, SUN H, ZHANG B, et al.. Target self-determination orientation based on aerial photoelectric imaging platform [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(8): 1305-1310. (in Chinese)
- [9] 李晓光, 王兆楠, 王智, 等. 一种目标位置解算方法[J]. 光学精密工程, 2006, 13(6): 1076-1081.
LI X G, WANG ZH N, WANG ZH, et al.. Research

- on location compute method of object [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,13(6):1076-1081. (in Chinese)
- [10] 吴艳梅,李刚,张霞. 无人机载光学侦察系统实时目标定位器设计[J]. *电光与控制*,2008,11:47-49.
WU Y M, LI G, ZHANG X. Design of a real-time object locator for optical reconnaissance system on-board UAV [J]. *Electronics Optics & Control*, 2008,11:47-49. (in Chinese)
- [11] 费业泰. 误差理论与数据处理[M]. 北京:机械工业出版社,2000.
FEI Y T. *Error Theory and Data Processing* [M]. Beijing:China Machine Press, 2000. (in Chinese)
- [12] 胡小平. 自主导航理论与应用[M]. 湖南:国防科技大学出版社,2002.
HU X P. *Autonomous Navigation Theory and Application* [M]. Hunan: National University of Defense Technology Press, 2002. (in Chinese)

作者简介:



展凤江(1973—),男,黑龙江双鸭山人,副研究员,1997年于南京航空航天大学获得学士学位,2003年于南京航空航天大学获得硕士学位,主要从事无人机总体设计方面的研究。E-mail: zhanfengjiang@nuaa.edu.cn

(本栏目编辑:曹 金)
(版权所有 未经许可 不得转载)