

文章编号 1004-924X(2019)01-0008-09

基于激光测距的机载光电成像系统目标定位

张 赫^{1*}, 乔 川^{1,2}, 匡海鹏¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 航空光学成像与测量重点实验室, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:针对小型机载光电平台无法准确获取视轴指向问题,设计了一种基于激光测距的目标定位算法。利用机载光电侦察平台锁定跟踪目标的特性,对同一目标多次测量,采用激光测距装置获取目标与载机间的距离信息。根据 WGS-84 定义的地球椭球模型建立系统的测量方程。考虑到测量方程的非线性,利用扩展卡尔曼滤波对目标位置进行估计。该定位方法精度只受到 GPS 接收机定位精度和激光测距机测量精度的影响,目标定位误差与机载光电侦察设备视轴指向测量无关。采用蒙特卡洛法仿真分析载机位置测量误差及激光测距系统位置误差对目标定位的影响,结果显示该算法定位精度较高。采用飞行试验数据验证了该目标定位算法的有效性,在飞行高度 8 000 m 时,目标定位精度优于 8 m。相比于传统定位算法,该方法可将定位精度明显提高。同时此定位方法易于部署,可操作性强,具有较大的应用价值。

关键词:机载光电成像系统;激光测距;目标定位;扩展卡尔曼滤波;误差分析

中图分类号:TN249 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20192701.0008

Target geo-location based on laser range finder for airborne electro-optical imaging systems

ZHANG He^{1*}, QIAO Chuan^{1,2}, KUANG Hai-peng¹

(1. *Key Laboratory of Airborne Optical Image and Measurement, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

** Corresponding author, E-mail: zhanghe@ciomp.ac.cn*

Abstract: As the line of sight (LOS) measurement cannot be obtained accurately for a small-scale, airborne, electro-optical imaging system, a laser range finder (LRF) is proposed based on a target geolocation algorithm. According to target locking and tracking characteristics of an airborne photoelectric detection platform, the same target is measured repeatedly. The distance between the airborne electro-optical imaging system and target is measured by the LRF. Considering the ellipsoidal earth model and global digital elevation model, which is defined by the World Geodetic System 1984, a system measurement equation has been established. Owing to the nonlinearity of the measurement equation, an extended Kalman filter is applied to the target geographical position estimation. The geolocation calculation accuracy is primarily affected by the measurement errors of the GPS and LRF and is inde-

收稿日期:2018-03-30;修订日期:2018-06-01.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61675202);吉林省重大科技攻关专项(No. 11ZDGG001)

pendent of the LOS measurement error. The influence of the aircraft position measurement and distance measurement errors on the target geolocation calculation accuracy is analyzed using Monte Carlo method. The simulation result demonstrates that the proposed algorithm has high target geolocation accuracy. The validity of the geolocation algorithm is verified by the flight test in which the plane flies at altitude of 8 000 m for photographing the target and the root mean square error of the target geolocation is less than 8 m. When compared with the traditional algorithm, the target geolocation accuracy is improved by four times using our proposed algorithm. Further, this algorithm is easy to deploy and has strong operability and great practical value.

Key words: airborne electro-optical imaging system; laser range finder; target geo-location; extended Kalman filter; error analysis

1 引言

为满足军事侦察及科学测绘提出的要求,目前航空相机除了要进行高分辨率成像外,还要对目标进行高精度定位^[1-5]。为提高机载光电成像系统的目标定位精度,国内外学者对目标定位算法进行了大量研究。目前,大部分目标定位算法都是基于目标指向矢量测量,需要准确测量机载光电平台姿态和成像系统的框架角^[4-8]。檀立刚等^[7]搭建了机载光电成像测量平台,通过机载光电设备对目标指向矢量在光电设备坐标系、载机坐标系、地理坐标系及地球坐标系下的齐次坐标变换实现对目标的定位,并给出了目标定位方程及定位误差方程。王晶等^[8]提出了一种基于多因素分析的机载光电设备目标定位误差模型与分析方法。E. J. Stich 等^[9]和杜言鲁等^[10]提出 WGS-84 坐标系定义的椭球模型对地面目标进行定位,并分析了目标大地高程误差对定位精度的影响。乔川等^[11-12]基于数字高程模型对地面目标进行定位,以降低目标大地高程误差对定位精度的影响。

上述定位方法都需要准确地获取成像系统的视轴指向。对于小型机载光电平台,常见的机载组合导航系统^[12]受限于体积无法安装。为了减小载机振动对光电成像系统的影响,一般光电系统与载机之间通过减震器连接。因此,光电平台的安装角误差和减震器都会造成光电平台与载机姿态不一致。若利用载机姿态代替光电平台姿态,就会在计算视轴指向时产生巨大误差。根据

文献[7]和[8]中的分析,成像距离为 10 km 时,若视轴指向误差为 1° ,则会造成超过 170 m 的定位误差;若目标区域有明显的地形起伏,定位误差将超过 300 m。而对于激光测距系统,在成像距离为 10 km 时,其测量误差小于 $10\text{ m}^{[13-15]}$ 。

本文提出了一种基于激光测距设备的直接对地目标定位算法。利用机载光电侦察平台锁定跟踪目标的特性,多次测量同一目标,利用激光测距装置获取目标与载机间的距离信息。根据 WGS-84 定义的地球椭球模型建立系统的测量方程。考虑到测量方程的非线性,利用扩展卡尔曼滤波对目标位置进行估计。该定位方法精度只受 GPS 接收机定位精度和激光测距机测量精度的影响,目标定位误差与机载光电侦察设备的视轴指向测量无关。采用蒙特卡洛法仿真分析载机位置及激光测距系统的测量误差对定位精度的影响。并采用飞行试验数据验证了该目标定位算法的有效性。该方法不需要准确的光电平台姿态信息即可实现高精度的目标定位,同时对待测区域地形没有特殊要求,适用于小型机载光电平台。

2 目标定位算法

目标定位即为获取拍摄图像中目标区域的地理位置信息,以便对目标区域进行有效的评估与分析。

2.1 WGS-84 地球椭球模型

WGS-84^[16-17]是为 GPS 全球定位系统使用而建立的地球椭球坐标系统,如图 1 所示。

原点处于地球质心, $E_O X_E$ 轴指向本初子午

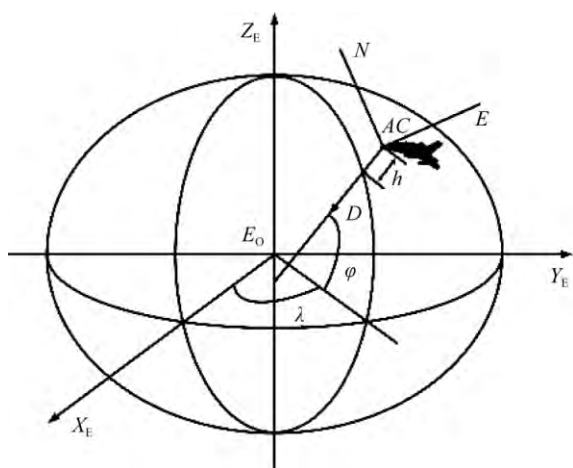


图 1 地球椭球坐标系

Fig. 1 Schematic of ECEF coordinate

线与赤道的交点, $E_O Z_E$ 轴指向地理北极, $E_O Y_E$ 与其他两轴组成右手坐标系。其中 WGS-84 定义地球椭球模型可表述为:

$$\frac{x_E^2}{R_E^2} + \frac{y_E^2}{R_E^2} + \frac{z_E^2}{R_P^2} = 1. \quad (1)$$

地球椭球第一偏心率:

$$e = \frac{\sqrt{R_E^2 - R_P^2}}{R_E}, \quad (2)$$

其中半长轴 $R_E = 6\,378\,137\text{ m}$, 半短轴 $R_P = 6\,356\,752\text{ m}$ 。

任意点的地理位置包括经度信息 λ , 纬度信息 φ 和大地高信息 h 。则根据几何关系不难算出载机在地球坐标系下的坐标为:

$$\begin{bmatrix} x^E \\ y^E \\ z^E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (R_N + h) \cos \varphi \cos \lambda \\ (R_N + h) \cos \varphi \sin \lambda \\ (R_N (1 - e^2) + h) \sin \varphi \end{bmatrix}, \quad (3)$$

其中 $R_N = \frac{R_E}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi}}$, 为该点对应的卯酉圈的曲率半径。

2.2 系统状态方程与测量方程

设机载光电成像系统对目标进行多次测量, 选取目标的地理位置信息 $\mathbf{X}_k = [\varphi_T \quad \lambda_T \quad h_T]^T$ 作为系统的状态变量。则系统的状态方程和测量方程可表示为:

$$\begin{cases} \mathbf{X}_{k+1} = \Phi_{k+1,k} \mathbf{X}_k + \mathbf{W}_k \\ \mathbf{Z}_k = h(\mathbf{X}_k) + \mathbf{V}_k \end{cases} \quad (4)$$

其中: $\mathbf{W}_k$ 和 $\mathbf{V}_k$ 分别为系统噪声和随机噪声, 它们均为互不相关的零均值高斯白噪声, 其协方差矩阵可用 $\mathbf{Q}_k$ 和 $\mathbf{R}_k$ 表示; $\Phi_{k+1,k}$ 为状态转移矩阵, $\mathbf{Z}_k$ 为测量值, 由机载激光测距系统给出。

对于静止目标, 有:

$$\Phi_{k+1,k} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{Q}_k = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

假设在第 k 次测量时, 机载光电平台的地理位置信息为 $(\varphi_P \quad \lambda_P \quad h_P)_k$, 目标地理位置的估计值为 $(\varphi_T \quad \lambda_T \quad h_T)_k$ 则根据地球椭球模型有:

$$\begin{bmatrix} x_P^E \\ y_P^E \\ z_P^E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (R_{NP} + h_P) \cos \varphi_P \cos \lambda_P \\ (R_{NP} + h_P) \cos \varphi_P \sin \lambda_P \\ (R_{NP} (1 - e^2) + h_P) \sin \varphi_P \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} x_T^E \\ y_T^E \\ z_T^E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (R_{NT} + h_T) \cos \varphi_T \cos \lambda_T \\ (R_{NT} + h_T) \cos \varphi_T \sin \lambda_T \\ (R_{NT} (1 - e^2) + h_T) \sin \varphi_T \end{bmatrix}, \quad (6)$$

其中 R_{NP} 和 R_{NT} 分别代表机载光电成像系统和目标所对应的卯酉圈的曲率半径。则有:

$$h(\mathbf{X}_k) = \left| \begin{bmatrix} x_P^E - x_T^E & y_P^E - y_T^E & z_P^E - z_T^E \end{bmatrix}^T \right|, \quad (7)$$

其中 $h(\mathbf{X}_k)$ 为目标与载机之间的距离。

2.3 扩展卡尔曼滤波算法

根据式(4)建立的系统状态方程和测量方程, 目标定位问题演变为多次观察求最优估计值的问题。由于目标是静止的, 所以系统状态方程是线性的, 但系统的测量方程是非线性的, 为此这里采用扩展卡尔曼滤波估计目标的地理位置, 估计流程如图 2 所示^[18-19]。其中 $H_{k+1} = \frac{\partial h(\mathbf{X}_k)}{\partial \mathbf{X}_k}$ 。

扩展卡尔曼滤波主要分为两步:

第一步: 预测

一步状态预测:

$$\mathbf{X}_{k+1|k} = \Phi_{k+1,k} \mathbf{X}_k. \quad (8)$$

一步均方误差预测:

$$\mathbf{P}_{k+1|k} = \Phi_{k+1,k} \mathbf{P}_k + \mathbf{Q}_k. \quad (9)$$

第二步: 更新状态

滤波增益:

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{k+1|k} \mathbf{H}_{k+1}^T [\mathbf{H}_{k+1} \mathbf{P}_{k+1|k} \mathbf{H}_{k+1}^T + \mathbf{R}_{k+1}]^{-1}. \quad (10)$$

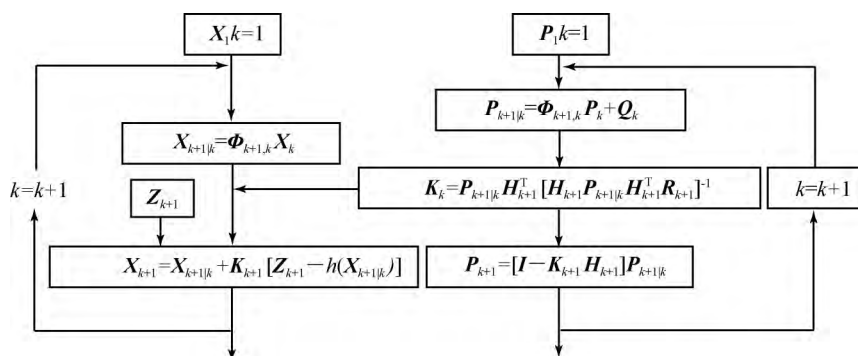


图 2 扩展卡尔曼滤波流程

Fig. 2 Flow chart of extended Kalman filtering

更新状态量:

$$\mathbf{X}_{k+1} = \mathbf{X}_{k+1|k} + \mathbf{K}_{k+1} [\mathbf{Z}_{k+1} - h(\mathbf{X}_{k+1|k})]. \quad (11)$$

更新均方误差:

$$\mathbf{P}_{k+1} = [\mathbf{I} - \mathbf{K}_{k+1} \mathbf{H}_{k+1}] \mathbf{P}_{k+1|k}. \quad (12)$$

3 目标定位误差分析

3.1 目标定位算法模拟仿真

目标位于 (45.000000° N, 125.000000° E, 1 850.00 m), 载机在 8 000 m 高度围绕目标飞行, 载机飞行轨迹如图 3 所示。在飞行过程中均匀地选取 180 个点作为测量点, 每个测量点利用机载光电成像系统对目标进行成像, 并利用激光测距设备测量目标与光电成像系统之间的距离, 成像距离约为 9 200 m。

设定 GPS 提供的机载光电平台位置误差服从均值为 0, 标准差为 $\sigma_p = 25$ m 的正态分布。激光测距系统的测量误差服从均值为 0, 标准差 $\sigma_d = 10$ m 的正态分布。

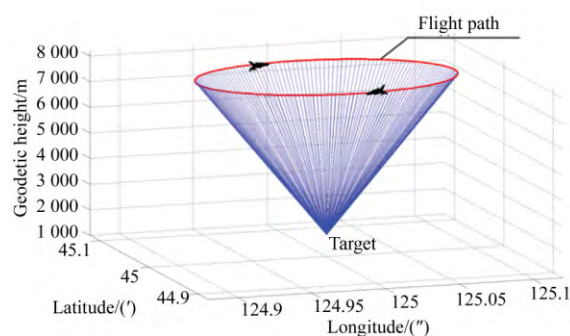


图 3 仿真飞行轨迹与测量点

Fig. 3 Flight path and measurement points in simulation test

根据 WGS-84 定义的地球椭球模型, 当目标纬度为 φ_T , 子午圈的曲率半径为:

$$R_{MT} = \frac{R_E(1 - e^2)}{(1 - e^2 \sin^2 \varphi_T)^{3/2}}. \quad (13)$$

卯酉圈的曲率半径为:

$$R_{NT} = \frac{R_E}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi_T}}. \quad (14)$$

目标的定位误差为:

$$\epsilon_r = \sqrt{[\epsilon_\lambda (R_N + h_T) \cos \varphi_T]^2 + [\epsilon_\varphi (R_M + h_T)]^2 + (\epsilon_h)^2}, \quad (15)$$

其中 $\epsilon_\lambda, \epsilon_\varphi, \epsilon_h$ 分别为目标定位的经度误差、纬度误差和大地高误差。

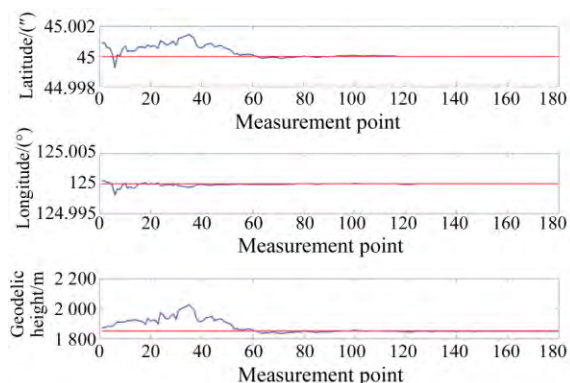
利用基于地球椭球模型的目标定位算法^[10]计算目标的地理位置, 由于无法准确获得小型机载光电平台的姿态信息和目标区域的高程信息, 一般定位误差在 300 m 左右。即可设定初始协

方差矩阵为:

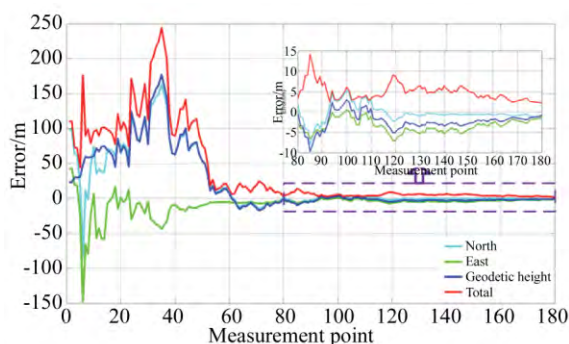
$$\mathbf{P}_1 = [\text{diag}(0.002, 0.002, 100)]^2. \quad (16)$$

模拟仿真结果如图 4 所示。可以看出初始估计值采用文献[8]中的方法, 由于没有准确的机载侦察平台姿态信息, 目标定位在 (45.000 888° N, 124.000 539° E, 1 873.65 m), 与实际目标的位置

误差为 110.08 m。多次测量并对目标地理位置进行扩展卡尔曼估计,可以看出在经过 100 次测量后,目标定位精度优于 10 m,经过 180 次测量后目标定位精度可达到 2.19 m。



(a) 目标定位结果
(a) Target geo-location results



(b) 目标定位误差
(b) Target geo-location errors

图 4 目标定位仿真结果

Fig. 4 Simulation results of target geo-location

3.2 目标初始位置对定位精度的影响

本文采用蒙特卡罗法对目标定位精度进行分析。对目标定位进行 N 次模拟仿真,若第 i 次的定位误差为 ϵ_i ,则认为最终的定位误差为:

$$\epsilon = \sum_{i=1}^N \epsilon_i. \quad (17)$$

设定机载光电系统的位置测量误差和激光测距系统的测量误差同上,取 $N=1\ 000$ 分析不同初始位置估计对目标精度的影响,结果如图 5 所示。仿真结果显示,120~360 m 的初始估计位置误差对最终的目标定位精度基本没有影响。

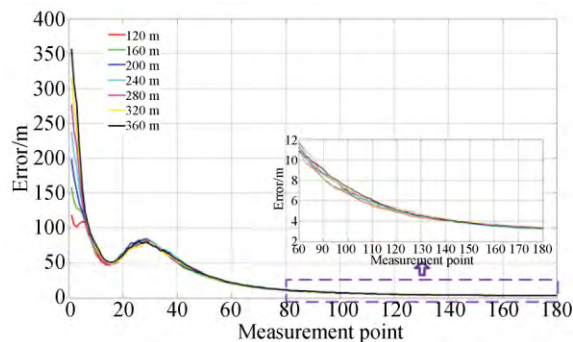


图 5 目标初始位置估计对目标定位的影响

Fig. 5 Influence of initial guess of target geographical position on target geo-location accuracy

3.3 机载光电侦察系统测量精度分析

该目标方法精度只受 GPS 接收机定位精度和激光测距机测量精度的影响,目标定位误差与机载光电侦察设备的视轴指向测量无关。

GPS 接收机的定位精度只与选用的 GPS 定位系统有关;而机载侦察系统与目标间的距离测量精度除了与激光测距机本身有关外,还与其他因素有关。跟踪过程中目标偏离市场中心,以及装调过程中成像系统光轴与激光测距系统光轴不平行都会影响距离测量精度。

若机载侦察系统的成像距离为 10 km,此时成像系统的地面像元分辨率为 0.2 m。在不同成像角度下,目标偏离视场中心不同像素对距离测量精度的影响如图 6 所示。

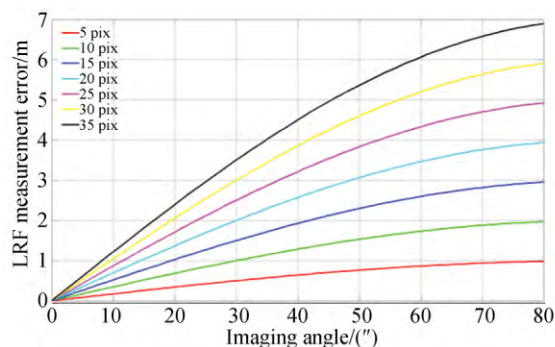


图 6 目标偏离视场中心对目标距离测量的影响

Fig. 6 Influence of deviation from LOS of imaging system on measurement error of distance

在机载侦察系统的成像距离为 10 km 时,不同成像角度下,由成像系统光轴与激光测距系统光轴不平行导致的距离测量误差如图 7 所示。

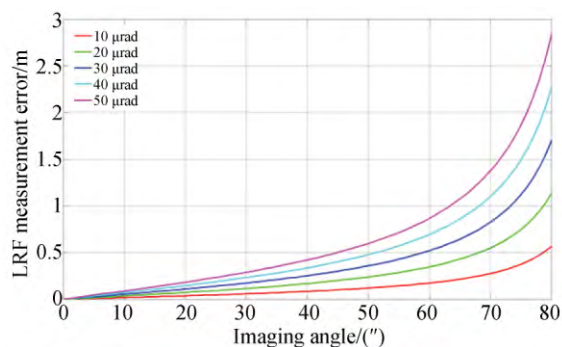
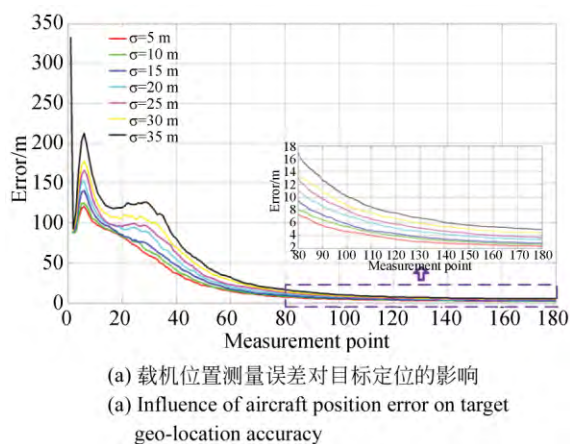


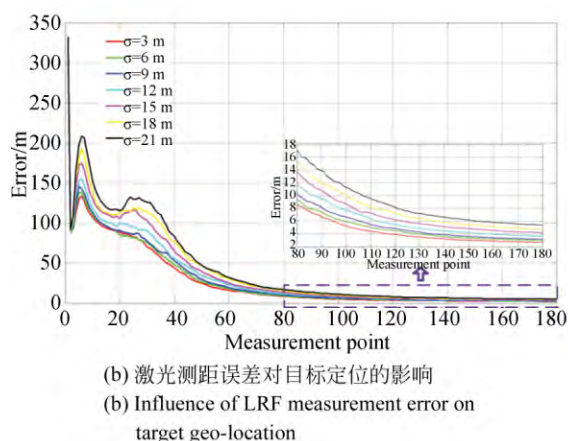
图 7 激光测距系统光轴与成像系统视轴不平行对目标距离测量的影响

Fig. 7 Influence of parallelism between LOS of system and optical axis of LRF on measurement error of distance



(a) 载机位置测量误差对目标定位的影响

(a) Influence of aircraft position error on target geo-location accuracy



(b) 激光测距误差对目标定位的影响

(b) Influence of LRF measurement error on target geo-location

图 8 测量误差对目标定位的影响

Fig. 8 Influence of measurement errors on target geo-location accuracy

通过分析可以看出,机载光电系统的位置测量误差和激光测距测量误差都会影响定位精度,使得目标位置估计的收敛速度降低,但目标的定位精度始终优于 6 m。

仿真实验表明,该目标定位算法对目标初值估计不敏感,在存在测量误差时依旧具有很好的目标定位精度。

4 飞行试验验证

机载光电成像系统如图 9 所示。该系统具有良好的目标跟踪能力,可将目标锁定在拍摄靶面中心。载机的飞行高度约为 8 000 m,飞行轨迹如图 10 所示,图中 W_1 和 W_2 分别为载机飞行的起点和终点。在飞行过程中利用机载光电成像系

由此可见,跟踪过程中目标偏离视场中心及装调过程中成像系统光轴与激光测距系统光轴不平行都会降低目标距离的测量精度,从而降低目标的定位精度。所以在实际飞行定位过程中不仅要提高跟踪器的跟踪精度,还要在装调过程中提高成像系统视轴与激光测距设备光轴的平行度。

3.4 目标定位误差分析

取 $N=1\ 000$,分析不同载机位置测量误差和激光测距系统测量误差对定位精度的影响,结果如图 8 所示。图 8(a)分析了目标距离的测量误差为 10 m 时,机载光电系统的位置测量误差对目标定位的影响;图 8(b)分析了在机载光电系统的位置测量误差为 25 m 时,激光测距测量误差对目标定位的影响。

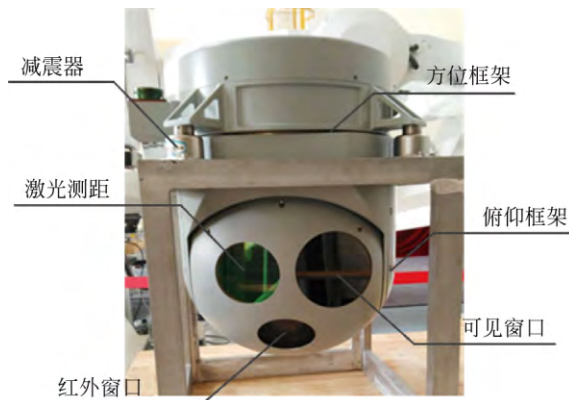


图 9 机载光电成像系统

Fig. 9 Photo of airborne electro-optical imaging system

统对目标进行实时跟踪,并利用激光测距系统测量该系统与目标之间的距离信息。



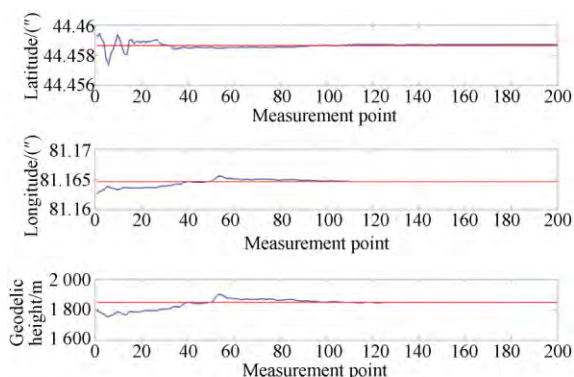
图 10 载机飞行轨迹示意图

Fig. 10 Flight trajectory in flight test

经 DGPS 精确测量确定目标的地理位置为 $(44.458\ 671^{\circ}\text{N}, 81.164\ 713^{\circ}\text{E}, 1\ 849.26\ \text{m})$, 误差小于 $0.2\ \text{m}$, 此为目标的真值。

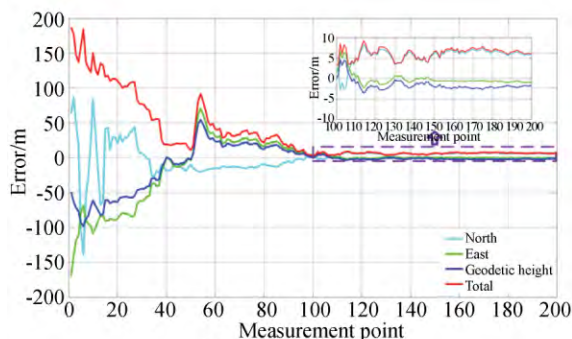
在实际飞行试验中选用的 GPS 系统的测量误差为 $25\ \text{m}$, 激光测距设备的测量误差为 $12\ \text{m}$ 。跟踪系统可保证目标偏离视场中心小于 30 像元, 装调导致的激光测距系统光轴与成像系统视轴之间的偏差小于 $40\ \mu\text{rad}$ 。

目标初始位置采用文献[8]中的基于地球椭圆模型的目标定位算法进行计算, 目标区域大地高为 $1\ 800\ \text{m}$, 目标定位结果为 $(44.459\ 238^{\circ}\text{N}, 81.162\ 584^{\circ}\text{E}, 1\ 797.63\ \text{m})$, 与目标的实际地理位置相差 $187.39\ \text{m}$ 。利用本文定位算法进行滤波后目标定位结果位于 $(44.458\ 722^{\circ}\text{N}, 81.164\ 701^{\circ}\text{E}, 1\ 847.54\ \text{m})$, 与目标实际地理位置相差 $6.12\ \text{m}$ 。



(a) 飞行试验定位结果

(a) Target geo-location results of flight test



(b) 飞行试验定位误差

(b) Target geo-location errors of flight test

图 11 飞行试验目标定位结果

Fig. 11 Flight test results of target geo-location

5 结 论

本文提出了一种基于激光测距的目标定位方法。利用机载光电侦察平台锁定跟踪目标的特性, 多次测量同一目标, 采用激光测距装置获取目标与载机间的距离信息。根据 WGS-84 定义的地球椭圆模型建立系统的测量方程。该定位方法精度只受到 GPS 接收机定位精度和激光测距机测量精度的影响, 目标定位误差与机载光电侦察设备的视轴指向测量无关, 能够消除载机姿态测

量误差对目标定位的影响, 提高小型机载光电成像系统的定位精度。

在模拟仿真试验中, 载机飞行高度为 $8\ 000\ \text{m}$, 机载光电成像系统的位置测量误差为 $25\ \text{m}$, 激光测距系统的测量误差为 $10\ \text{m}$, 目标的定位精度可达到 $2.19\ \text{m}$ 。在实际飞行试验中, 载机飞行高度也是 $8\ 000\ \text{m}$, 目标的定位精度达到 $6.12\ \text{m}$ 。

相比于传统的目标定位算法, 该方法的目标定位精度更高, 而且不需要精确地测量机载光电成像系统的姿态和视轴指向, 适用范围更广, 具有较大的实际应用价值。

参考文献:

- [1] 檀立刚. 机载光电侦察设备目标自主定位技术研究[D]. 长春:长春光学精密机械与物理研究所, 2012.
TAN L G. *Research of Target Automatic Positioning Technology in Airborne Photo-electricity Survey Equipment* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics Fine Mechanics and Physics, 2012.
- [2] 展凤江, 沈宏海, 汪沛, 等. 导航信息滞后补偿实现高速无人机对地精确定位[J]. 光学 精密工程, 2015, 23(9): 2506-2512.
ZHAN F J, SHEN H H, WANG P, *et al.*. Precise ground target location of subsonic UAV by compensation delay of navigation information [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(9): 2506-2512. (in Chinese)
- [3] 王家骥, 金光, 颜昌翔. 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)
- [4] 郝睿鑫. 基于激光测距的目标定位技术的研究[D]. 西安:西安工业大学, 2014.
HAO R X. *Research on the Method of Localization of Target Based on Laser Ranging Technology* [D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2014. (in Chinese)
- [5] 赵滨. 基于机载光电测量系统的目标定位精度研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2012.
ZHAO B. *Research on Positioning Technology of Target in Airborne Photo-electricity Measuring System* [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012. (in Chinese)
- [6] GUO L, ANG H, ZHENG X. Ground moving target geo-location from monocular camera mounted on a micro air vehicle [J]. *SPIE*, 2011, 8194: 819419.
- [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] 王晶, 高利民, 姚俊峰. 机载测量平台中的坐标转换误差分析[J]. 光学 精密工程, 2009, 17(2): 388-394.
WANG J, GAO L M, YAO J F. Analysis on coordinate conversion error of airborne measuring device [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(2): 388-394. (in Chinese)
- [9] STICH E J. Geo-pointing and threat location techniques for airborne border surveillance [C]. *IEEE International Conference on Technologies for Homeland Security*, 2013: 136-140.
- [10] 杜言鲁, 丁亚林, 许永森, 等. TDI-CCD 全景式航空相机对地目标定位的算法[J]. 光学学报, 2017(3): 0328003.
DU Y L, DING Y L, XU Y S, *et al.*. Geo-location algorithm for TDI-CCD aerial panoramic camera [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017(3): 0328003. (in Chinese)
- [11] 乔川, 丁亚林, 许永森, 等. 大角度倾斜成像航空相机对地目标定位[J]. 光学 精密工程, 2017, 25(7): 1714-1726.
QIAO CH, DING Y L, XU Y S, *et al.*. Ground target geo-location using imaging aerial camera with large inclined angles [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(7): 1714-1726. (in Chinese)
- [12] QIAO C, DING Y L, XU Y X, *et al.*. Ground target geolocation based on digital elevation model for airborne wide-area reconnaissance system [J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2018, 12(1): 016004.
- [13] LIU C L, LIU J H, SONG Y M, *et al.*. A novel system for correction of relative angular displacement between airborne platform and UAV in target localization [J]. *Sensors*, 2017, 17(3): 510.
- [14] 王晶, 杨立保, 高利民. 机载光电平台目标定位测量技术[J]. 长春理工大学学报: 自然科学版, 2009, 32(4): 531-534.
WANG J, YANG L B, GAO L M. Target orientation measuring of airborne EO platform [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology: Natural Science Edition*, 2009, 32(4): 531-534. (in Chinese)
- [15] 徐诚, 黄大庆. 无人机光电侦测平台目标定位误差分析[J]. 仪器仪表学报, 2013(10): 2265-2270.
XU CH, HUANG D Q. Error analysis for target localization with unmanned aerial vehicle electro-optical detection platform [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2013(10): 2265-2270. (in Chinese)
- [16] 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):912-918.
- SU H. Target localization and error analysis of airborne electro-optical platform[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(6):912-918.
- [17] 孙辉, 李志强, 张建华, 等. 机载光电平台目标交会定位[J]. 中国光学, 2015, 8(6):988-996.
- SU H, LI ZH Q, ZHANG J H, *et al.*. Target localization with intersection measurement for airborne electro-optical platform[J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(6):988-996. (in Chinese)
- [18] 崔锦泰, 陈关荣. 卡尔曼滤波及其实时应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2013.
- CUI J T, CHEN G R. *Kalman Filtering with Real-Time Applications* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013. (in Chinese)
- [19] 张玉莲, 储海荣, 张宏巍, 等. MEMS 陀螺随机误差特性研究及补偿[J]. 中国光学, 2016, 9(4):501-510.
- ZHANG Y M, CHU H R, ZHANG H W, *et al.*. Characterists and compensation method of MEMS gyroscope random error [J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(4):501-510. (in Chinese)

作者简介:



张 赫(1985-),男,吉林长春人,助理研究员,2008 年于南京航空航天大学获得学士学位,2012 年于吉林大学获得硕士学位,主要研究方向为航空遥感成像。E-mail:zhanghe@ciomp. ac. cn



乔 川(1991-),男,北京人,博士研究生,主要从事航空相机定位方面的研究。E-mail: qc_chuan@163. com