文章编号 2095-1531(2018) 05-0812-10

无人机侦察多目标实时定位技术研究

蔡明兵¹² 刘晶红^{1*} 徐 芳¹²

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学,北京 100049)

摘要:目标定位是无人机侦察系统中至关重要一步。为增强无人机侦察目标定位的实时性、提高定位精度及侦察效率, 提出一种多目标实时定位的方法,建立主次目标定位几何关系及坐标转换模型,结合已知数据信息求取各目标大地坐标,并用蒙特卡洛法分析目标定位误差。最后,基于即将组网成功"北斗二代"卫星导航系统对无人机空中定位,同时采 用递归最小二乘算法滤波处理,提高了目标定位精度。研究及实验结果表明,北斗导航定位能够有效提高无人机空中定 位精度,且有望达到厘米级精度,同时采用 RLS 滤波处理能使目标定位精度提高 10 m 左右。该方法能够有效增强无人 机定位实时性,提高定位精度及侦察效率。

关 键 词:无人机侦察定位;多目标实时定位;北斗二代;蒙特卡洛法 中图分类号:V279⁺ 文献标识码:A doi:10.3788/CO.20181105.0812

Multi-targets real-time location technology for UAV reconnaissance

CAI Ming-bing^{1 2} , LIU Jing-hong^{1*} , XU Fang^{1 2}

 Changchun Institute of Optics ,Fine Mechanics and Physics , Chinese Academy of Sciences ,Changchun 130033 ,China;
 University of Chinese Academy of Sciences ,Beijing 100049 ,China)

* Corresponding author , E-mail: liu1577@126. com

Abstract: Target location is a crucial step in UAV reconnaissance system. In order to enhance the real – time performance of UAV reconnaissance target location and improve location precision, an effective multi-target real-time location method is proposed, which establishes the primary and secondary target location geometric relationship and coordinate transformation model, and combines known data to obtain each target geodetic coordinates, as well as analyzes target location error through Monte Carlo method. Finally, based on the upcoming successful establishment of the Beidou II satellite navigation system for the aerial positioning of the UAV, and the filter processing using the Recursive Least Squares algorithm, the target location accuracy is improved. The research and experimental results show that Beidou II navigation positioning can effectively improve the

收稿日期:2017-12-26;修订日期:2018-02-15

基金项目:吉林省重大科技攻关项目(No.11ZDGG001)

Supported by Jilin Provincial Major Scientific Research Project of China(No. 11ZDGG001)

aerial positioning accuracy of the UAV , and it is expected to achieve centimeter-level accuracy. At the same time , the RLS filter processing can improve the target positioning accuracy by about 10 m. It is concluded that this method can effectively enhance the real – time positioning of UAVs , improve positioning accuracy and re-connaissance efficiency.

Key words: UAV Reconnaissance target location; Multi-targets real-time location; Beidou II; Monte Carlo method

1 引 言

无人机侦察具有实时性强、分辨率高、成本 低、使用方便、无人员伤亡等优点,受到各军事大 国的广泛重视。传统的无人侦察机是利用无人飞 行平台搭载各种侦察设备,机载光电成像平台来 实现对地面目标侦察定位,一般机载光电平台采 用单点定位法,通过姿态测量/激光测距对目标定 位。由于现代战场态势实时多变、目标数量众多, 对多个目标进行实时定位需要多架无人机同时飞 行侦察定位,或者频繁改变无人机飞行方向及改 变光电平台空间方向(方位角、高低角),消耗大 量时间同时增加了目标定位过程的误差。传统的 单目标定位方法已经无法适应现代战场的需要, 现代化战争中,谁优先掌握战场局面信息,谁就会 取得胜利先机。因此研究一种新型高效的多目标 实时定位技术是当前亟待解决的问题。

樊邦奎、段连飞等人^[15]提出无人机空间两点 交会的目标定位方法,以及 Gregory J. Toussaint、 Pedro De Lima 等人^[12]提出的基于多架无人机组 合目标定位的方法,采用空间两点交会是提高定 位精度的有效途径,在原有方法单点测量基础上 增加第二个测量点,构成空间三角形,进行三角几 何定位,这样需要对多架无人机,多个数据进行计 算处理,既降低计算效率又增加成本。周前飞等 人^[14]给出一种基于像元视线向量的多目标自主 定位系统来同时对多个目标实施定位。

针对上述多目标定位实时性较差、定位误差 较大、耗资成本高等问题,本文提出了一种多目标 实时自主定位的方法,该方法主要特点在于利用 北斗卫星导航系统取代 GPS 卫星导航系统,采用 三频北斗导航信号载波相位测量技术取代传统双 频观测方法,实现北斗定位精度,以减小无人机空 中定位误差;另一方面采用递归最小二乘法 (RLS)对多帧图像的定位数据进行滤波处理,减 小随机误差,提高定位精度。

2 多目标实时自主定位系统及工作 原理

空对地的多目标定位目的是求取地面目标三 维坐标值。如图1所示为本文将要采用的系统结 构,它包括如图中的主要部分:机载光电测量平 台,搭载北斗卫星导航定位系统及无人机空中姿 态测量系统等。







北斗卫星导航定位系统和航空姿态测量系统 与机载光电平台组为一体,消除平台对飞机的依 赖性,减小误差,实现目标自主定位。

无人机对地面目标进行侦察定位过程中,搭 载在机载光电平台上的摄像机搜索到地面目标, 并将目标锁定到相机视场中心,根据北斗导航系 统和航空姿态测量系统测得数据,无人机的空中 三维坐标、三姿态角以及光电平台视轴的俯仰角 和方位角、激光测距数据等信息,

进行数据处理、坐标转换计算出目标的大地 坐标。求解视场中的其余目标的大地坐标值,根 据激光测距值、数码相机焦距及建立主次目标几 何关系模型,计算次目标的大地坐标值。

3 目标定位算法与误差分析

3.1 机载目标定位基本原理

首先根据航拍图像中像点在相片坐标系中的 位置,计算出像点在摄像机坐标系中的坐标,这里 目标位于摄像机视场中心,在摄像机坐标系中的 齐次坐标为 $[x_e, y_e, z_e 1]^T = [0 0 \lambda_1 1]^T$,然后经过 从摄像机坐标系到载机机体坐标系的转换,再根 据载机机体坐标系与载机地理坐标系间的转换关 系到载机地理坐标系,然后经过地心地固坐标系 最后到大地坐标系(这里是 CGCS-2000 坐标系) 等多个坐标系的坐标转换,可计算出主目标在大 地坐标系中的地理坐标。目标定位就是解决坐标 系之间关系转换。

3.2 坐标转换数学模型

该系统使用了 5 个坐标系^[14] 如图 2、图 3 所 示。摄像机坐标系 $O_e \Rightarrow_e y_e z_e$,载机机体坐标系 $O_b = x_b y_b z_b$,载机地理坐标系 $O_v \Rightarrow_v y_v z_v$,地固坐标 $O_e = x_e y_e z_e$,大地坐标系 O-LMH。其中摄像机坐标系 的原点在摄像中心,其横轴(x_e)和纵轴(y_e)分别 平行于像片平面的横行轴(u)和纵列轴(v)。



图 2 各坐标系的定义及其相互关系示意图

Fig. 2 Schematic diagram of definition of the coordinate system and their mutual relations







根据我们建立的坐标几何转换关系,依据坐标转换矩阵,依次计算主目标像点在各个坐标系中的坐标值,最后计算出主目标像点在地心地固

直角坐标系(ECEF)中的坐标,公式(1)是从摄像 机坐标转换矩阵依次到地心地固坐标的组合计算 式:

$$\begin{bmatrix} x_{e} \\ y_{e} \\ z_{e} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -c_{L_{0}}s_{M_{0}} & -s_{L_{0}} & -c_{L_{0}}c_{M_{0}} & (N+H_{0})c_{M_{0}}c_{L_{0}} \\ -s_{L_{0}}s_{M_{0}} & c_{L_{0}} & -c_{M_{0}}s_{L_{0}} & (N+H_{0})c_{M_{0}}s_{L_{0}} \\ c_{M_{0}} & 0 & -s_{M_{0}} & [N(1-e^{2}) + H_{0}]s_{M_{0}} \end{bmatrix} \times \\ \begin{bmatrix} c_{e}c_{\beta} & -c_{\gamma}s_{\beta} + s_{\gamma}s_{e}c_{\beta} & s_{\gamma}s_{\beta} + c_{\gamma}s_{e}c_{\beta} \\ -s_{e} & s_{\gamma}c_{e} & c_{\gamma}c_{\beta} + s_{\gamma}s_{e}s_{\beta} & -s_{\gamma}c_{\beta} + c_{\gamma}s_{e}s_{\beta} \\ -s_{e} & s_{\gamma}c_{e} & c_{\gamma}c_{e} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_{\theta}s_{\Psi} & -s_{\theta} & c_{\theta}c_{\Psi} & 0 \\ s_{\Psi}s_{\theta} & c_{\theta} & s_{\theta}c_{\Psi} & 0 \\ -c_{\Psi} & 0 & s_{\Psi} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{e} \\ y_{e} \\ z_{e} \\ 1 \end{bmatrix} ,$$
(1)

其中 $\rho_{\Omega} = \cos(\Omega) \quad s_{\Omega} = \sin(\Omega)$ 。

Η

然后根据上述转换计算公式(2)~(5)求解 目标像点从地心空间直角坐标系(ECEF)到大地 坐标系(geodetic)的大地坐标如下:

$$L = \arctan(\frac{y_{\rm e}}{x_{\rm e}}) \quad , \qquad (2)$$

$$L = \begin{cases} \arctan(y_e/x_e) & x_e > 0\\ \pi + \arctan(y_e/x_e) & x_e < 0 \coprod y_e > 0\\ -\pi + \arctan(y_e/x_e) & x_e < 0 \coprod y_e < 0 \end{cases},$$
(3)

$$M = \arctan\left(\frac{z_{e}}{\sqrt{x_{e}^{2} + y_{e}^{2}}} (1 - \frac{e^{2}N}{(N + H)})^{-1}\right) ,$$
(4)

$$=\frac{\sqrt{x_{e}^{2}+y_{e}^{2}}}{\cos M}-N , \qquad (5)$$

式(2)~(5)中: *L*、*M*、*H*分别为目标在大地坐标 系中的大地经度,大地纬度和大地高程。其中,在 CGCS-2000大地坐标系中,

椭球长半轴 a = 6 378 137.0 m; 椭球短半轴 b = 6 356 752.0 m; 椭球第一偏心率 $e = \sqrt{a^2 - b^2}/a$; 椭球第二偏心率 $e' = \sqrt{a^2 - b^2}/b$;

椭球卯酉圈曲率半径 $N = a/\sqrt{1 - e^2 \sin^2 M}$ 。 根据以上的坐标转换计算过程,就可以计算得到 主目标在大地坐标系中的坐标。要求解像平面内 的次余目标大地坐标,要根据建立的几何关系模 型,通过测量计算主次目标之间的几何角度关系 计算得到次目标像点在摄像机坐标系下的三 维坐标($x_e y_e z_e$),然后根据计算主目标的过程 (1)~(5)式的坐标转换方法计算次目标大地坐标。设定各目标处于地势平坦的大地上,光电平台与各目标之间的相对高度均为h,建立几何定位模型如图4所示。



国中 多日你在世候空 Fig. 4 Model of multi-target orientation

如图所示中的 λ_1 为激光测距仪测得光电平 台到主目标的距离 λ_2 为光电平台到次目标的距 离 P 为主目标 Q 为次目标 K 为无人机垂直投 影点 摄像机摄像视线向量分别为 $s = \overrightarrow{GF} t = \overrightarrow{CP}$, $j = \overrightarrow{CQ} \delta$ 为 s 与 t 之间的夹角 α 为 s 与 j 之间的 夹角 β 为 t 与 j 之间的夹角 ,根据图中主次目标 与摄像机组成的关系几何模型可以得到:

$$h = \lambda_1 \cos \alpha \quad , \qquad (6)$$

$$\cos\delta = \frac{s \cdot t}{\|s\| \|t\|}$$

$$\cos\alpha = \frac{s \cdot j}{\|s\| \|j\|}, \quad (7)$$

$$\cos\beta = \frac{t \cdot j}{\|t\| \|j\|}$$

式中,视线向量 *s* t 在摄像机坐标系中的坐标为 $s = F_{c}^{T} [0 \ 0 \ f]^{T} t = F_{c}^{T} [u - u_{0} \ v - v_{0} \ f]^{T}$,其中f为 摄像机焦距,F 的像素坐标为 (u_{0},v_{0}) ,T的像素 坐标为 $(u \ v) \ j_{v_{0}}$ 其在载机地理坐标系中的坐标 θ 为载机地理坐标系纵轴与摄像机坐标系纵轴之间 的夹角,

$$j_{v_0} \frac{f}{\cos\theta} = \frac{f}{2(\cos\frac{1}{2}\theta)^2 - 1} = \frac{2f}{\operatorname{tr} R_{\mathrm{ev}} - 1} , \qquad (8)$$

视线向量 j 沿载机地理坐标系的 z_a轴向下,

$$\boldsymbol{j}_{v} = \boldsymbol{F}_{c} \boldsymbol{j} = \boldsymbol{F}_{v}^{\mathrm{T}} [0 \ 0 \ \boldsymbol{j}_{v_{c}}]^{\mathrm{T}}.$$
(9)

*R*_{cb}为从载机机体坐标系到摄像机坐标系的转换 矩阵,其余以此类推。

求解 j 在摄像机坐标系下的坐标为:

$$\boldsymbol{j}_{c} = R_{cv}\boldsymbol{j}_{v} = R_{cb}R_{bv}\boldsymbol{j}_{v} = \begin{bmatrix} c_{\theta}c_{\Psi} & c_{\Psi}s_{\Theta} & -s_{\Psi} \\ -s_{\Theta} & c_{\Theta} & 0 \\ c_{\Theta}s_{\Psi} & s_{\Theta}s_{\Psi} & c_{\Psi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_{\varepsilon}c_{\beta} & c_{\varepsilon}s_{\beta} & -s_{\varepsilon} \\ c_{\beta}s_{\gamma}s_{\varepsilon} - c_{\gamma}s_{\beta} & c_{\gamma}c_{\beta} + s_{\gamma}s_{\varepsilon}s_{\beta} & c_{\varepsilon}s_{\gamma} \\ s_{\gamma}s_{\beta} + c_{\gamma}c_{\beta}s_{\varepsilon} & c_{\gamma}s_{\varepsilon}s_{\beta} - c_{\beta}s_{\gamma} & c_{\gamma}c_{\varepsilon} \end{bmatrix} \boldsymbol{j}_{v} , \quad (10)$$

将式(8) 求得的 $j_{\nu_{z}}$ 的值代入式(9)、(10)中, 求得在摄像机坐标系下的坐标 j_{c} ,下步将 j_{c} 代入 上式(7)中得到数据值 $\cos\alpha_{x}\cos\beta$,前面激光测距 仪测得的主目标离光电平台的距离 λ_{1} ,根据公式 (6)计算平台目标间的相对高度 h 和次目标到光 电平台的距离 λ_{2} 。根据求得的次目标离平台距 离及其在摄像机坐标系下的视线向量j,可根据式 (11) 求得次目标在摄像机坐标系下坐标,



图 5 坐标转换流程

Fig. 5 Process of coordinate conversion

$$[c_{c} y_{c} z_{c}]^{\mathrm{T}} = \lambda_{2} \frac{t}{\|t\|} , \qquad (11)$$

综上所述,计算次目标大地坐标是根据主次 目标几何关系求出其在摄像机坐标系下坐标,然 后将该坐标值代入(1)~(5)式计算次目标的大 地坐标 在计算多目标坐标转换流程如图5所示。

4 北斗导航厘米级定位精度实现

目标的定位精度是无人机侦察定位系统的最 重要指标 在无人机定位系统设计中占有重要地 位。目标定位误差主要有以下几种误差组成:无 人机空中定位误差、无人机姿态角误差、激光测距 误差及光轴稳定平台误差等。

针对无人机空中定位误差,卫星导航系统扮演了重要角色,美国全球导航系统(GPS)在以往 定位中起到重要作用,由于战时形势严峻,如果单 纯依靠 GPS 定位,将会处处受制于人。

中国研制的北斗卫星导航系统区别于 GPS 的特征在于,北斗卫星较 GPS 多 3 颗中轨道卫星 (MEO) 即 27 颗中轨道卫星(分布在倾角 55 度 的 3 个平面上),此外还有 5 颗静止轨道卫星 (GEO)和 3 颗倾斜同步卫星(IGSO) 北斗还具有 GPS 不具备的短报文通信能力。

通过解读北斗卫星导航系统空间信号接口控 制文件公开服务信号 [BDS-SIS-ICD-2.0(2013. 12)],采用三频北斗导航信号能够实现北斗厘米 级定位,三频北斗导航信号 B1、B2、B3。其中 B3 为加密信号,使用需得到相关授权,B1、B2 信号表

$$\begin{aligned} S_{B1}^{j}(t) &= A_{B11}C_{B11}^{j}(t) D_{B11}^{j}(t) \cos(2\pi f_{2}t + \varphi_{B11}^{j}) \\ S_{B2}^{j}(t) &= A_{B21}C_{B21}^{j}(t) D_{B21}^{j}(t) \cos(2\pi f_{2}t + \varphi_{B21}^{j}) \end{aligned}$$

采用北斗三频卫星导航信号求取载波相位测 量 整 周 模 糊 度 的 初 始 值,北 斗 卫 星 用 B1 = 1 561.098 MHz、B2 = 1 207.140 MHz、B3 = 1 268.520 MHz三个载波频率 相应求得波长λ₁ = 达式分别如式(11)所示:

其中,上角标*j*表示卫星编号;下角标 I表示 I支路;下角标 Q表示 Q支路;*A*表示信号振幅;*C* 表示测距码; *D*表示调制在测距码的数据码;*f*表 示载波频率; *φ*表示信号载波初相。

$$+ A_{B1Q} C^{j}_{B1Q}(t) D^{j}_{B1Q}(t) \cos(2\pi f_{1}t + \varphi^{j}_{B1Q}) + A_{B2Q} C^{j}_{B2Q}(t) D^{j}_{B2Q}(t) \cos(2\pi f_{2}t + \varphi^{j}_{B2Q})$$
, (12)

0. 192 2 m λ_2 = 0. 248 5 m λ_3 = 0. 236 6 m。当用 调制在上列 3 个载波上的一个伪噪声码测得 3 个 伪距(P_{B1} , P_{B2} 和 P_{B3})时 则可按式(13)求得载波 相位测量整周模糊度的初始值(N_i^0):

$$N_{1}^{12} = \frac{A_{12}P_{B1}}{\lambda_{1}} - \frac{B_{12}P_{B2}}{\lambda_{2}}, N_{2}^{12} = \frac{B_{12}P_{B1}}{\lambda_{1}} - \frac{A_{12}P_{B2}}{\lambda_{2}};$$

$$N_{1}^{13} = \frac{A_{13}P_{B1}}{\lambda_{1}} - \frac{B_{13}P_{B3}}{\lambda_{3}}, N_{3}^{13} = \frac{B_{13}P_{B1}}{\lambda_{1}} - \frac{A_{13}P_{B3}}{\lambda_{3}};$$

$$N_{2}^{23} = \frac{A_{23}P_{B2}}{\lambda_{2}} - \frac{B_{23}P_{B3}}{\lambda_{3}}, N_{3}^{23} = \frac{B_{23}P_{B2}}{\lambda_{2}} - \frac{A_{23}P_{B3}}{\lambda_{3}};$$

其中:

$$A_{12} = \frac{f_1^2 + f_2^2}{f_1^2 - f_2^2}, B_{12} = \frac{2f_1f_2}{f_1^2 - f_2^2};$$

$$A_{13} = \frac{f_1^2 + f_3^2}{f_1^2 - f_3^2}, B_{13} = \frac{2f_1f_3}{f_1^2 - f_3^2};$$

$$A_{23} = \frac{f_2^2 + f_3^2}{f_2^2 - f_3^2}, B_{23} = \frac{2f_2f_3}{f_2^2 - f_3^2};$$

解得:

$$N_{1}^{0} = \frac{1}{2} (N_{1}^{12} + N_{1}^{13})$$

$$N_{2}^{0} = \frac{1}{2} (N_{2}^{12} + N_{2}^{23})$$

$$N_{3}^{0} = \frac{1}{2} (N_{3}^{13} + N_{3}^{23})$$
(13)

式中,N₁⁰、N₂⁰和N₃⁰分别表示第一、二、三信号 (B1、B2、B3)的载波相位整周模糊度的初始值。 所以可以按所测得的伪距P_{B1}、P_{B2}、P_{B3}和通过上 式求得的A、B的值求解整周模糊度的初始值。 比起以往、现在常用的单频及双频观测求取的整 周模糊度初始值更准确、更接近真实值,而且能够 缩小整周模糊度的搜索空间,大大提高整周模糊 度求解效率,节省解算时间。采用三频北斗信号 的载波相位测量是实现北斗精确定位关键技术, 将对我国未来北斗导航定位系统发展起到重大作用。

5 实验仿真与分析

实验分为以下3部分:

(1)对"北斗二代"进行星座仿真(由于采用的是 MEO 星座,所以这里仅对 27 颗 MEO 星星座 仿真)。

(2)采用蒙特卡洛法对多目标定位误差进行 仿真分析。

(3) 采用最小二乘算法(RLS) 对图像进行滤 波处理 减小随机误差 提高目标地位精度。

实验一:北斗二代星座仿真

根据美国 Trimble 公司的 Center-Point RTX 全球跟踪网于 2013 年春天对北斗 GEO-3、IGEO-6 和 MEO-14 卫星三频导航信号的测量成果可知 3 颗北斗卫星的载波相位观测值均能达到 ±11 mm 左右的测量精度,因此在无人机目标侦察定位系 统采用三频北斗导航信号能够使目标定位精度有 很大提高。

根据公示的北斗卫星导航系统空间信号接口 控制文件公开服务信号 [BDS-SIS-ICD-2.0(2013. 12)],对北斗二代星座仿真,然后基于此仿真测 量无人机空中定位精度。

如图 6 是对 27 颗 MEO 卫星星座仿真。



图 6 北斗 MEO 卫星仿真图 Fig. 6 Simulation figure of BDS-MEO

设飞机地面之间相对高度为1200m,飞行位 置经度为122.672813°纬度为45.125187°。

如图 7 是在仿真星座模型下对无人机空中定 位精度结果,北斗定位系统固有精度对应经度误 差为 1 × 10⁻⁴(°),纬度误差为 2 × 10⁻⁴(°),对应 东向误差为 10 m,北向误差为 20 m 左右,大地高 误差小于 10 m,授时精度为 20 ns,测速精度为 0.2 m/s。

以某航拍图像数据作为实验对象。光电平台





俯仰轴以水平方向为 0°, 垂直向下为 – 90°。平 台高低角为 – 90°(垂直下视)时,平台方位角为 0°, 高低角和方位角的测量误差为 0.5 mrad(约 0.028 65°)激光测距精度为 5 m。

实验二:蒙特卡洛法多目标定位误差分析

蒙特卡洛法是一种通过计算大量数据,随机 模拟,计算数据概率的一种方法,是一种随机抽样 技术。利用蒙特卡洛法根据随机数据解决很多实 际计算问题。

蒙特卡洛法的理论基础为大数定理和伯努利 定理 根据蒙特卡洛法建立目标定位误差模型:

$$[\Delta L \ \Delta M \ \Delta H]^{\mathrm{T}} = F'(X) - F'(X - \Delta X) \quad ,$$
(14)

式中: $\Delta L_{\Lambda} \Delta M_{\Lambda} \Delta H$ 为目标的定位误差 , ΔX 为定位 参数误差 ,F 为目标定位模型。视场内 3 个目标 的定位误差如表 1 所示。

			-8	
目标	经度定位误差/(°)	纬度定位误差/(°)	大地高定位误差/m	平面定位误差/m
主目标	0.000 103 4	0.000 200 6	21.64	49.89
次目标1	0.000 145 6	0.000 217 2	22.47	82.82
次目标2	0.000 111 9	0.000 203 7	19.89	70.46

表1 多目标定位误差 Tab.1 Error of multi-target location

实验三: 实现地面多目标定位的 RLS 滤波 最小二乘算法是一种通过最小化误差的平方 和找到一组数据的最佳匹配方法。最小二乘法是 用最简单的方法求得一些误差值,使数据趋近真 值。在这里采用递归最小二乘算法对数据进行滤 波处理,减小随机误差,提高目标定位误差。

RLS 滤波算法如表 2 所示。

819

表 2 RLS 算法流程

Tab. 2 Flowchart of RLS algorithm

Algorithm RLS Filter:
Input: $x_k = 1 \ 2 \ \cdots \ t$;
Initialize: $A_{\rm N} = I_{1 \times 1}$;
$k = 1 p_{\mathrm{N}} = \left[A_{\mathrm{N}}^{\mathrm{T}} A_{\mathrm{N}} x_{k} \right];$
$P_{\rm N} = ()^{-1};$
$X_k = P_{\rm N} A_{\rm N}^{\rm T} b_{\rm N};$
And $k = 2$, $a_{\rm N1} = I_{1 \times 1}$
If $k \leq t$ then
$P_{\rm N1} = P_{\rm N} - P_{\rm N} a_{\rm N1}^{\rm T} a_{\rm N1} P_{\rm N} / (1 + a_{\rm N1} P_{\rm N} a_{\rm N1}^{\rm T});$
$A_{\mathrm{N}1} = [A_{\mathrm{N}} a_{\mathrm{N}1}]^{\mathrm{T}};$
$b_{\mathrm{N1}} = \begin{bmatrix} b_{\mathrm{N}} & b_{\mathrm{N1}} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}};$
$X_k = P_{\mathrm{N}1} A_{\mathrm{N}1}^{\mathrm{T}} b_{\mathrm{N}1};$
else if
$P_{\rm N} = P_{\rm N1};$
$A_{\rm N} = A_{\rm N1};$
$b_{\rm N} = b_{\rm N1};$
$k = k + 1 \ p_{N1} = [x_k];$
return X_k



图 8 RLS 滤波后的定位结果

Fig. 8 Localization results after RLS filtering

采用 RLS 算法对各目标滤波处理后与未处 理之前得到仿真图如图 9 所示,平面定位误差如 图 10 所示(在这里平面定位误差取东向误差与 北向误差平方和的根即 $\sigma_{\text{DPM}} = \sqrt{\sigma_{\text{N}}^2 + \sigma_{\text{E}}^2}$) 高程 误差如图 11 所示。



图 9 RLS 滤波后的定位误差





图 10 RLS 滤波后的高程定位误差

Fig. 10 Altitude localization errors after RLS filtering

经过 RLS 滤波处理后的各目标定位误差如 表 3 所示。

表 3 RLS 滤波后多目标定位误差

Tab. 3	Errors	of	multi-target	location	after	RLS	filter
140.0	LITUIS	o,	munn target	location	ance	ILD	muu

目标	经度定位误差/(°)	纬度定位误差/(°)	大地高定位误差/m	平面定位误差/m
主目标	0.000 093 4	0.000 191 6	9.64	23.06
次目标1	0.000 120 9	0.000 202 6	11.55	70.46
次目标2	0.000 105 3	0.000 207 1	10.63	62.94

比较表1中各目标定位数据可以看出,各目 标定位误差均在期望误差范围内,各目标高程误 差均在 20 m 左右 平面定位误差取东向误差与北 向误差平方和的根 ,即 $\sigma_{\text{DPM}} = \sqrt{\sigma_{\text{N}}^2 + \sigma_{\text{E}}^2}$,有较大 的差距,首先主目标定位误差最小,两个次目标较 主目标大且有一定差距。比较表1和表2个目标 定位数据及仿真定位图分析得,经过递归最小滤 波处理后,能够有效减小误差,能够使目标更精确 定位。各目标之间出现较大差距的定位误差,主 要有几点原因:各目标与光电平台之间的斜距不 同,斜距越大,产生更大的定位误差;计算次目标 到摄像机下的坐标,比主目标多了一个流程,由坐 标转换引起的误差;图像畸变引起像素坐标误差 等。

6 结 论

(1)提出了一种基于无人机侦察多目标实时

定位技术,该方法只需激光测距机对地面主目标 进行一次测距,然后根据摄像机焦距及摄取图像 上各目标像素坐标即可求出其余各目标大地坐 标,该技术用于地面平坦战场,较之传统单目标定 位,该技术能大大提高无人机侦察效率。

(2)此外,也提出了利用北斗导航系统对无 人机进行空中定位,"北斗二代"组网成功预示着 利用北斗导航将会对定位精度有质的提高。

(3)同时,采用递归最小二乘算法进行滤波,有效减小定位过程随机误差,提高目标定位精度10 m 左右。

(4) 接下来要进一步解决的问题是在地形复 杂情况下如何实现多目标快速实时定位。

参考文献:

- [1] 孙辉 李志强 涨建华 等. 机载光电平台目标交会定位[J]. 中国光学 2015 8(6):987-996.
 SUN H LI ZH Q ZHANG J H *et al.*. Target localization with intersection measurement for air borne electro optical platform [J]. *Chinese Optics* 2015 8(6):987-996. (in Chinese)
- [2] 闫辉,许廷发,吴青青,等.多特征融合匹配的多目标跟踪[J].中国光学 2014 6(2):163-170.
 YAN H, XU T F, WU Q Q *et al.*. Multi object tracking based on multi-feature joint matching[J]. *Chinese Optics* 2014, 6(2):163-170. (in Chinese)
- [3] 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.
 SUN H. Target localization and error analysis of airborne electro optical platform [J]. Chinese Optics 2013 6(6):912-918. (in Chinese)
- [4] 刘晶红 孙辉 涨葆 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):1305-1309.
 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):1305-1309. (in Chinese)
- [5] 宋悦铭 孙敬辉 ,王帅. 基于 GPS 基准点的航空吊舱垂直下视目标定位方法研究 [J]. 液晶与显示 ,2012 ,27(5):
 714-717.
 SONG Y M SUN J H ,WANG S. Air pod target location method research using GPS datum mark in vertical down of view

[J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays 2012 27(5):714-717. (in Chinese)

- [6] 闫明 杜佩,王惠林,等. 机载光电系统的地面多目标定位算法[J]. 应用光学 2012 33(4): 717-720.
 YAN M, DU P, WANG H L, *et al.*. Ground multi target positioning algorithm for airborne optoelectronic system [J].
 Journal of Applied Optics 2012 33(4): 717-720. (in Chinese)
- [7] 徐诚,黄大庆,等.基于光电测量平台的多目标定位算法[J].中南大学学报(自然科学版) 2015 46(1):175-163.
 XU C, HUANG D Q. Multiple target localization based on electro-optical measurement platform [J]. Journal of Central South University(Science and Technology) 2015 46(1):157-163. (in Chinese)
- [8] 金光. 机载光电跟踪测量的目标定位误差分析和研究 [D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2001: 3-6.

JIN G. Studying and analyzing on the error of positioning in airborne photo – electricity tracking survey equipment [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics , Fine Mechanics and Physics , Chinese Academy of Sciences 2001: 3-6. (in Chinese)

- [9] 张葆 姚俊峰 高利民. 机载 GPS 测量定位技术研究[J]. 光学 精密工程 2009 ,17(1):1723-1728. ZHANG B, XAOJ F, GAOL M. Measuring orientation technology based on airborne GPS[J]. Opt. Precision Eng. 2009, 17(1):1723-1728. (in Chinese)
- [10] HAN K ,DESOUG N. Multiple targets geo location using SIFT and stereo vision on airborne video sequences [C]. The 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems St. Louis JUSA 2009: 5327-5332.
- [11] REDDING J D ,MCLAIN T W. Vision based target localization from a small fixed-wing Miniature Air Vehicle [C]. Proceedings of the 2006 American Control Conference ,Minneapolis ,Minnesota ,USA 2006: 2862-2867.
- [12] 周前飞,刘晶红,熊文卓,等. 机载光电成像平台的多目标自主定位系统研究[J]. 光学学报 2015 35(1):1-45.
 ZHOU Q F LIU J H XIONG W ZH *et al.*. Multi Target self-determination orientation system based onairborne photoe-lectric imaging platform[J]. *Acta Optica Sinica* 2015 35(1):1-45. (in Chinese)
- [13] MORBIDIF , MARIOTTINIG L. Active target tracking and cooperative localization for teams of aerial vehicles [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology 2013 21(5):1694-1707.
- [14] TOUSSAINTG J ,DE LIMA P. Localizing RF Targets with Cooperative UAV [C]. Proceedings of 2007 American Control Conference New York City JUSA 2007: 5928–5933.
- [15] 樊邦奎 段连飞. 无人机侦察目标定位技术 [M]. 北京: 国防工业出版社 2014. FAN B K , DUAN L F. UAV Reconnaissance Target Location Technology [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014.

作者简介:

第5期



蔡明兵(1990—),男,山东潍坊人,硕士 研究生,主要从事导航定位方面的研究。 E-mail:1617335036@qq.com



刘晶红(1967—),女,吉林长春人,研究 员,博士生导师,主要从事机载光电成像 与测量技术方面的研究。E-mail: liu1577 @126.com