

光电侦察平台目标定位方法研究

杨松普¹, 王养柱¹, 胡永浩²

(1.北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院,北京 100191; 2.天津市津航物理技术研究所,天津 300308)

摘要: 分析了某型光电侦察平台目标定位原理,误差来源及定位结果,提出了利用非线性最小二乘法估计其系统误差,并对系统进行修正。为使估计结果具有较强的泛化能力,将系统误差分配给侦察平台的方位角和高低角。飞行试验表明,系统经过修正后,定位精度有了较大提高。

关键词: 光电侦察平台; 目标定位; 非线性最小二乘

中图分类号: V271.4; TP391.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2014)02-0009-03

Research on Positioning Method of Photoelectric Reconnaissance Platform

YANG Song-pu¹, WANG Yang-zhu¹, HU Yong-hao²

(1. School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China; 2. Tianjin Jinhang Institute of Technical Physics, Tianjin 300308, China)

Abstract: The positioning theory, error sources and positioning results of a certain type photoelectric reconnaissance platform are presented. Nonlinear least square method was used to estimate the system error and to modify the system. To make the estimation results with strong generalization ability, the system error was assigned to azimuth and elevation angle of photoelectric reconnaissance platform. Flight test shows that the positioning accuracy was improved greatly after the system was modified.

Key words: optoelectronic reconnaissance platform; target positioning; nonlinear least square

0 引言

现代战争中,通过目标定位获取敌方目标的精确坐标,对于战场形势的分析,以及利用导弹进行超视距攻击等具有重要意义。目前,我国对目标定位技术的研究主要集中在构建新的定位模型,或者将不同的定位模型相结合,而对已有定位模型(系统)的改进研究较少。如基于姿态测量/激光测距定位模型^[1]、基于DEM的定位模型、基于共线构象原理的定位模型^[2]、空间两点交会法^[3]和空间三点定位模型^[4],文献[4]提出了一种利用空间三点定位与基于共线构象原理的定位相结合的差分定位算法。本文通过对某型光电侦察平台目标定位系统的研究,提出了利用非线性最小二乘估计系统常值误差,并对系统进行修正,有效地提高了系统的目标定位精度。

1 目标定位原理

所用坐标系规定如下所述:地理系(t),东北天坐标系;机体系(b),与飞机固联且与三轴平行, X 轴指向左, Y 轴指向前, Z 轴指向下;侦察平台系(z),与侦察平台固联且与三轴平行, X 轴指向左, Y 轴指向前, Z 轴指向下。在没有安装误差、机体形变和角振动的情况下,机体坐标系和侦察平台坐标系重合。

目标定位原理如图1所示。

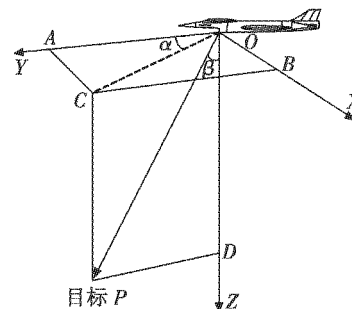


图1 目标定位原理图

Fig.1 Schematic diagram of target positioning

收稿日期:2013-04-11 修回日期:2013-05-07

基金项目:国家“八六三”计划(2008AA121802)

作者简介:杨松普(1990—),男,河北晋州人,硕士生,研究方向为导航、制导与控制。

图中: α 为光轴相对侦察平台的方位角; β 为光轴相对光电侦察平台的高低角; $|\overrightarrow{OP}|$ 为激光测量距离, $|\overrightarrow{OP^z}|=L$ 。

在侦察平台对目标实施跟踪后,通过激光测距得到的距离 $|\overrightarrow{OP}|$ 和角编码器给出的精确角度信号 α 和 β 就可以获得 \overrightarrow{OP} 在侦察平台坐标系(z 系)中的三维坐标。

设 $\overrightarrow{OP^z}$ 为 \overrightarrow{OP} 在侦察平台坐标系的投影,则

$$\overrightarrow{OP^z} = \begin{bmatrix} L \sin \alpha \sin \beta \\ L \cos \alpha \sin \beta \\ L \cos \beta \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$C_z^b = \begin{bmatrix} -\cos \varphi \cos \gamma - \sin \varphi \sin \gamma \sin \theta & \cos \theta \sin \varphi & \cos \gamma \sin \varphi \sin \theta - \cos \varphi \sin \gamma \\ \cos \gamma \sin \varphi - \cos \varphi \sin \gamma \sin \theta & \cos \varphi \cos \theta & \sin \varphi \sin \gamma + \cos \varphi \cos \gamma \sin \theta \\ \cos \theta \sin \gamma & \sin \theta & -\cos \gamma \cos \theta \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: φ 为航向角; θ 为俯仰角; γ 为横滚角。

C_z^b 为侦察平台坐标系到机体系的方向余弦矩阵。

$$C_z^b = \begin{bmatrix} 1 & -\delta_x & \delta_y \\ \delta_x & 1 & -\delta_z \\ -\delta_y & \delta_z & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中, $\delta_x, \delta_y, \delta_z$ 为侦察平台坐标系和机体系之间的小误差角。

综合以上分析可知,在已知飞机的位置和姿态角、侦察平台的方位角和高低角以及激光测量距离的情况下,可求取目标的坐标。

2 目标定位结果分析

飞机近似定高飞行,飞行高度约7000 m(具体参数见表1),分别对位置坐标已精确标定的目标点A、B进行多次定位。为使图形表达更为直观,在此采用地球直角坐标系(e)。

图2、图3分别为对目标点A、B定位时飞机飞行轨迹以及目标A、B正上方7000 m处的对应点A'、B'在 e 系XOY面的投影;图4、图5为相应的目标定位误差在 e 系XOY面的投影。

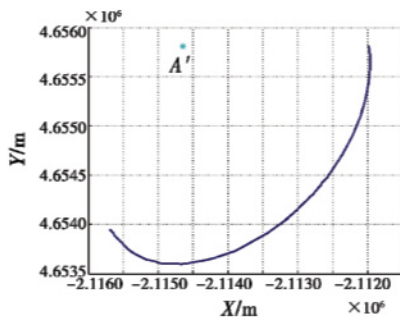


图2 飞行轨迹A

Fig. 2 Flight trajectory A

则目标点的位置为

$$X_p^e = X_b^e + C_z^b C_z^e \overrightarrow{OP^z} \quad (2)$$

式中: $X_p^e = \begin{bmatrix} x_p^e \\ y_p^e \\ z_p^e \end{bmatrix}$ 为目标P在地理系中的投影; $X_b^e = \begin{bmatrix} x_b^e \\ y_b^e \\ z_b^e \end{bmatrix}$ 为飞机位置在地理系中的投影; $\overrightarrow{OP^z}$ 为 \overrightarrow{OP} 在侦察平台系中的投影。

C_z^e 为机体系到地理系的方向余弦矩阵。

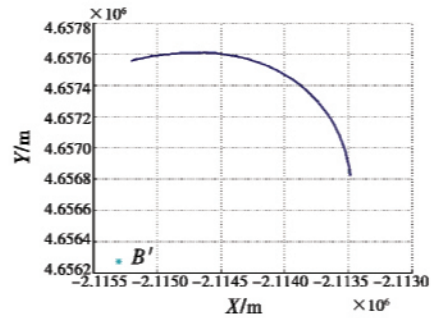


图3 飞行轨迹B

Fig. 3 Flight trajectory B

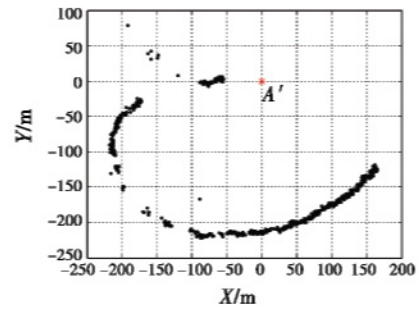


图4 目标A定位误差

Fig. 4 Positioning error of target A

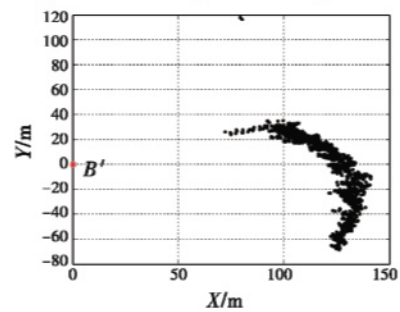


图5 目标B定位误差

Fig. 5 Positioning error of target B

通过对比图2和图4、图3和图5可知,飞机飞行轨迹与相应的定位结果具有很强的相关性,它们均在目标点的同侧,且形状和位置上具有高度一致性。由此可以推知,目标定位系统存在常值误差。

3 定位误差来源与系统误差估计

3.1 误差来源定性分析

由式(2)可知,误差来源主要包括以下几个方面:1) X_i^r 的误差,为飞机的绝对定位误差;2) C_i^r 的误差,为惯导系统姿态角 φ, θ, γ 的误差;3) C_i^d 的误差,为侦察平台与飞机之间的安装误差角 $\delta_x, \delta_y, \delta_z$ 的误差;4) $\overrightarrow{OP^r}$ 的误差,为侦察平台方位角 α 和高低角 β 的测角误差和激光测距误差。

在实际情况下,飞机的绝对定位误差可以认为是白噪声,激光测距误差为几米,相比几千米的测量距离可以忽略不计。

设 $\varphi, \theta, \gamma, \delta_x, \delta_y, \delta_z, \alpha, \beta$ 的常值误差分别为 $\Delta\varphi, \Delta\theta, \Delta\gamma, \Delta\delta_x, \Delta\delta_y, \Delta\delta_z, \Delta\alpha, \Delta\beta$ 。由式(2)可知, $\Delta\varphi, \Delta\theta, \Delta\gamma, \Delta\delta_x, \Delta\delta_y, \Delta\delta_z$ 对最终目标定位误差的影响与 $\varphi, \theta, \gamma, \delta_x, \delta_y, \delta_z, L, \alpha, \beta$ 有关。若对 $\Delta\varphi, \Delta\theta, \Delta\gamma, \Delta\delta_x, \Delta\delta_y, \Delta\delta_z$ 进行估计,则估计结果只能应用于 $\varphi, \theta, \gamma, \delta_x, \delta_y, \delta_z, L, \alpha, \beta$ 的值相同或相近的场合,泛化能力很差。

同样由式(2)可知, C_i^r 和 C_i^d 为方向余弦矩阵,因此, $\Delta\alpha, \Delta\beta$ 对最终目标定位误差的影响与 $\varphi, \theta, \gamma, \delta_x, \delta_y, \delta_z$ 无关,而仅与 L, α, β 有关。又因

$$|d\overrightarrow{OP^r}| = L \sqrt{(\Delta\alpha)^2 \sin^2\beta + (\Delta\beta)^2 \cos^2\beta} \quad (5)$$

而 L 主要受飞机飞行高度和 β 的影响,因此可以认为 $\Delta\alpha$ 和 $\Delta\beta$ 对最终目标定位的影响仅与飞机飞行高度和 β 有关。若对 $\Delta\alpha, \Delta\beta$ 进行估计,则估计结果可以应用于飞机飞行高度以及 β 相同或相近的情形,具有较强的泛化能力。

综合以上分析,本文仅对 $\Delta\alpha, \Delta\beta$ 进行估计。

3.2 系统误差估计

将式(2)的目标定位模型记为 $X_i^r = f(X_i^r, \varphi, \theta, \gamma, \alpha, \beta, L, \delta_x, \delta_y, \delta_z)$, 设 T_{true} 为目标真实坐标。设共有 n 组定位数据,则列写方程组

$$\begin{cases} f(X_{i_1}^r, \varphi_1, \theta_1, \gamma_1, \alpha_1 + \Delta\alpha, \beta_1 + \Delta\beta, L_1) = T_{true} \\ f(X_{i_2}^r, \varphi_2, \theta_2, \gamma_2, \alpha_2 + \Delta\alpha, \beta_2 + \Delta\beta, L_2) = T_{true} \\ \vdots \\ f(X_{i_n}^r, \varphi_n, \theta_n, \gamma_n, \alpha_n + \Delta\alpha, \beta_n + \Delta\beta, L_n) = T_{true} \end{cases} \quad (6)$$

利用高斯-牛顿法求解此非线性最小二乘问题,

对 $\Delta\alpha, \Delta\beta$ 进行估计,即求解出使得 $\sum_{i=1}^n (f(X_{i_i}^r, \varphi_i, \theta_i, \gamma_i, \alpha_i + \Delta\alpha, \beta_i + \Delta\beta, L_i) - T_{true})^2 = \min$ 的 $\Delta\alpha, \Delta\beta$ 的值。

利用目标点 A, B 的定位数据进行估计,估计结果如表1所示。

表1 估计结果
Table 1 Estimation results

序号	目标	β 范围 / (°)	飞机飞行高度/m	$\Delta\alpha$ 估值 / (°)	$\Delta\beta$ 估计值 / (°)	n 的值
1	A	21 ~ 30	6999 ~ 7007	-2.2443	1.0336	563
2	A	30 ~ 40	6999 ~ 7007	-2.5694	0.9014	688
3	B	17 ~ 20	6998 ~ 7001	-2.3221	0.6859	2711

4 试验验证

飞机近似定高飞行,对目标 C, D 进行4次定位实验,实验参数如表2所示。

表2 目标 C, D 实验参数

Table 2 Experiment parameters of target C and D

实验序号	目标	β 范围 / (°)	飞机飞行高度/m
实验1	C	17 ~ 20	6998 ~ 7006
实验2	C	20 ~ 30	6998 ~ 7006
实验3	C	30 ~ 40	6998 ~ 7006
实验4	D	19 ~ 23	6995 ~ 7000

利用表1第1、2组的 $\Delta\alpha, \Delta\beta$ 分别对实验2、3进行修正,第3组的 $\Delta\alpha, \Delta\beta$ 对实验1、4进行修正。取所有定位结果与目标距离的均值为精度考核标准,则修正前后的定位误差如表3所示。

表3 目标定位误差

Table 3 Target positioning error

实验序号	修正前/m	修正后/m
实验1	168.59	55.16
实验2	192.36	28.27
实验3	228.63	36.42
实验4	110.10	33.84

实验结果表明,修正后,目标定位精度有了较大幅度提高。

本文限于条件,并未对 $\beta(0^\circ \sim 90^\circ)$ 的所有取值进行实验。对实验1~4估计的结果如表4所示。由表2和表4可知, β 在 $20^\circ \sim 30^\circ$ 和 $30^\circ \sim 40^\circ$ 时,估计结果 $\Delta\alpha, \Delta\beta$ 的值相近。所以在实际应用中,令飞机做定高飞行,将 β 的取值范围分为若干部分,如以 10° 或 20° 为间隔等分,分别进行定位实验,得到若干组 $\Delta\alpha, \Delta\beta$ 。定位时,可以根据 β 的取值选择相应的 $\Delta\alpha, \Delta\beta$ 来修正 α, β 。

表4 实验1~4的估计结果

Table 4 Estimation results of experiment 1 to 4

实验序号	$\Delta\alpha$ 估值 / (°)	$\Delta\beta$ 估计值 / (°)	n 的值
实验1	-2.1947	1.1039	516
实验2	-2.4879	1.0670	1075
实验3	-2.4054	1.0319	505
实验4	-1.7980	0.5537	1518

92.
WU Y, DONG H R, WANG J P. Research on queuing system M/M/C/m/m in aircraft battle damage repair [J]. *Electronics Optics & Control*, 2009, 16(4):90-92.
- [19] 赵晓明, 武昌, 齐胜利, 等. TPN 通信导航装备战场抢修系统建模[J]. *空军工程大学学报: 自然科学版*, 2007, 18(6):55-58.
ZHAO X M, WU C, QI S L, et al. Research on modeling for battlefield damage assessment repair system of communication and navigation equipment based on TPN[J]. *Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition*, 2007, 18(6):55-58.
- [20] 董成喜, 武昌, 郑志海. 基于有色 Petri 网的通信装备战场抢修效能评估[J]. *装备指挥技术学院学报*, 2006, 17(3):112-115.
DONG C X, WU C, ZHENG Z H. The effectiveness assessment on BDAR for communication equipment based on colored Petri nets[J]. *Journal of the Academy of Equipment Command & Technology*, 2006, 17(3):112-115.
- [21] 董成喜, 郑志海, 武昌. 基于 CPN 的通信装备战场抢修效能优化[J]. *空军工程大学学报: 自然科学版*, 2006, 17(4):75-78.
DONG C X, ZHENG Z H, WU C. BDAR system effectiveness optimization for communication equipment based on CPN[J]. *Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition*, 2006, 17(4):75-78.
- [22] 齐胜利, 武昌, 赵晓明. 基于 UML-BD 的通信装备战场抢修系统建模研究[J]. *军械工程学院学报*, 2007, 19(1):4-6.
QI S L, WU C, ZHAO X M. Study on modeling of communication equipment BDAR system based on UML-BD [J]. *Journal of Ordnance Engineering College*, 2007, 19(1):4-6.
- [23] 叶庆, 宋建柱, 陈春霞. 基于边需求的抢修分队选址问题[J]. *西南交通大学学报*, 2012, 47(3):495-501.
YE Q, SONG J Z, CHEN C X. Repairing unit location problem in background of mobile battle [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2012, 47(3):495-501.
- [24] 孙宇. 基于蚁群算法的通信线路最佳抢修路径问题[J]. *电脑知识与技术*, 2011, 7(7):1619-1621.
SUN Y. Research for optimal repair path of communication lines based on ant colony algorithm [J]. *Computer Knowledge and Technology*, 2011, 7(7):1619-1621.
- [25] 叶珍. 基于 AHP 的模糊综合评价方法研究及应用[D]. 广州: 华南理工大学, 2010.
YE Z. Application and study of fuzzy comprehensive evaluation methods based on AHP [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010.
- [26] 薛文格. 基于灰色关联分析的图像边缘检测研究[D]. 昆明: 云南师范大学, 2008.
XUE W G. Study on image edge detection based on gray correlation [D]. Kunming: Yunnan Normal University, 2008.
- [27] 常建娥, 蒋太立. 层次分析法确定权重的研究[J]. *武汉理工大学学报: 信息与管理工程版*, 2007, 29(1):153-156.
CHANG J E, JIANG T L. Research on the weight of coefficient through analytic hierarchy process [J]. *Journal of Wuhan University of Technology: Information and Management Engineering*, 2007, 29(1):153-156.
- [28] 侯媛彬, 杜京义, 汪梅. 神经网络[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2007.
HOU Y B, DU J Y, WANG H. Neural network [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2007.

(上接第 11 页)

5 结束语

通过对某型光电侦察平台目标定位系统定位误差的详细分析, 提出了利用非线性最小二乘估计侦察平台方位角和高低角的常值误差 $\Delta\alpha$ 和 $\Delta\beta$, 然后对系统进行修正。实验证明, 修正后的系统定位精度有较大提高, 对于提高军队侦察能力和超视距精确打击能力具有重要意义。

参考文献

- [1] 毛昭军, 汪德虎. 姿态测量/激光测距的无人机目标定位模型[J]. *火力与指挥控制*, 2003, 28(5):15-17.
MAO Z J, WANG D H. A model of target position for UAV based attitude measuring/laser range finder [J]. *Fire Control & Command Control*, 2003, 28(5):15-17.
- [2] 何文涛. 无人机定位技术及其应用[J]. *光电技术应用*, 2003(5):3-6.
HE W T. UAV position technology and its application [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2003(5):3-6.
- [3] 孙超, 都基焱, 段连飞. 一种空间两点交会无人机定位方法[J]. *兵工自动化*, 2011, 30(6):35-36.
SUN C, DU J Y, DUAN L F. A technology of UAV positioning to target by two-point space rendezvous [J]. *Ordnance Industry Automation*, 2011, 30(6):35-36.
- [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.