文章编号:1001-5078(2025)04-0594-05

·红外技术及应用·

# 机载红外探测系统双机协同定位误差分析

冯 博<sup>1</sup>, 闯家亮<sup>2</sup>, 杨百剑<sup>2</sup>

(1. 中国电科电科院,北京 100043;2. 中国电科第十一研究所,北京 100015)

**摘 要:**针对高精度机载红外探测系统对空中点目标协同定位误差问题进行了研究,分析了协 同定位误差原理,梳理了误差影响因素并建立了误差模型,重点对单平台中基准误差、基准传 递误差等对红外双机协同探测误差的影响情况进行分析。通过仿真对本文误差分析的正确性 进行了验证。基于仿真分析结果,对提升协同探测精度的方法给出了建议。

关键词:机载红外探测系统;协同定位;误差分解;精度基准传递

中图分类号:TN216;TN976 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2025.04.017

# Accuracy evaluation of dual cooperative positioning for airborne infrared detection system

FENG Bo<sup>1</sup>, CHUANG Jia-liang<sup>2</sup>, YANG Bai-jian<sup>2</sup>

(1. China Academy of Electronics and Information Technology, Beijing 100041, China;2. The 11th Research Institute of CETC, Beijing 100015, China)

Abstract: In this paper, the cooperative positioning error of a high-precision airborne infrared detection system for aerial point targets is studied. The principle of cooperative positioning error is analyzed, the influencing factors of error are sorted out, and the error model is established. The influence of the Time-Space-Base error and the Base-Transfer error to cooperative detection error is analyzed. The analysis results are verified through simulation. Based on the results of simulation analysis, suggestions are given on the methods to improve the cooperative detection accuracy.

Keywords: airborne infrared detection system; cooperative positioning; error decomposition; precision datum transfer

#### 1 引 言

从俄乌战争、哈以冲突作战情况可以看出,高成 本、高性能装备在未来局部战争中的重要性在逐渐 降低,而低成本、小型化装备的作用则在不断提升, 美国近年也提出了"马赛克战"、"无人蜂群"等基于 低成本小型化装备的新型作战概念<sup>[1-2]</sup>。红外探测 系统相对于微波体质传感器装机需求更小,结合其 被动探测、精度高等优点,目前被越来越广泛的应用 于中小型机载 ISR 装备中<sup>[3-4]</sup>。

机载红外探测系统不具备独立测距能力,一般 通过双机协同实现被动三坐标定位。目前基于机载 红外探测系统自身误差对多平台协同定位精度影响 的评估已开展了较多的研究工作<sup>[5]</sup>,但随着红外探 测相关领域技术的飞速发展,机载红外探测系统的 精度已与时空基准设备接近,且时空基准在传递过 程中也会有误差产生,时空基准及其传递已成为红 外双机协同定位的重要误差来源。本文重点对基准 设备及其传递误差等对红外双机协同探测精度的影 响情况进行分析。

### 2 双机定位原理及流程

在三维直角坐标系 O(X,Y,Z) 中, $M_1(x_1,y_1, z_1)$ 、 $M_2(x_2,y_2,z_2)$ 分别为两个空中观测平台, $T(x_i, y_i,z_i)$ 为被探测空中目标, $M'_1(x_1,y_1,0)$ 、 $M'_2(x_2, y_2,0)$ 、 $T'(x_i,y_i,0)$ 分别为两个观测平台和空中目

收稿日期:2024-07-14

标在 O-X-Y 平面上的投影, $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\beta_1$ 、 $\beta_2$  分别为两个 观测平台对观测目标的俯仰角和方位角。





Fig.1 Geometric relationship of collaborative positioning 由三点之间的坐标几何关系,可以得到如下:

$$\begin{cases} \alpha_{1} = \arctan(\frac{z_{i} - z_{1}}{\sqrt{(y_{i} - y_{1})^{2} + (x_{i} - x_{1})^{2}}}) \\ \alpha_{2} = \arctan(\frac{z_{i} - z_{2}}{\sqrt{(y_{i} - y_{2})^{2} + (x_{i} - x_{2})^{2}}}) \\ \beta_{1} = \arctan(\frac{y_{i} - y_{1}}{x_{i} - x_{1}}) \\ \beta_{2} = \arctan(\frac{y_{i} - y_{2}}{x_{i} - x_{2}}) \end{cases}$$
(1)

其中两个观测平台自身位置  $x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2$  为已 知,通过两平台观测角  $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$  中的任意三个 即可求解出被观测目标的位置,如:

 $\begin{cases} x_t = x_1 + R_1 \cdot \cos \alpha_1 \cdot \cos \beta_1 \\ y_t = y_1 + R_1 \cdot \cos \alpha_1 \cdot \sin \beta_1 \\ z_t = y_1 + R_1 \cdot \sin \alpha_2 \end{cases}$ (2)

以公式(2)为理论基础即可计算出目标 T 的 位置。

#### 3 双机协同定位误差分析

公式(1)是机载红外探测系统的典型定位原 理,然而红外探测系统实际在应用过程中受装调、数 据处理等环节均存在误差项,设各误差均为满足零 均值高斯分布且相互独立,则红外传感器三轴测角 误差分别为其标准差 σ<sub>α1</sub>、σ<sub>α2</sub>、σ<sub>β1</sub>、σ<sub>β2</sub>。对公式(1) 中各变量求微分可得:

$$\begin{vmatrix} d\alpha_1 \\ d\alpha_2 \\ d\beta_1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} H_{11} & H_{12} & 0 \\ H_{21} & H_{22} & 0 \\ H_{31} & H_{32} & H_{33} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} dx \\ dy \\ dz \end{vmatrix} -$$

$$\begin{vmatrix} H_{11} \cdot dx_1 + H_{12} \cdot dy_1 \\ H_{21} \cdot dx_2 + H_{22} \cdot dy_2 \\ H_{31} \cdot dx_1 + H_{32} \cdot dy_1 + H_{33} \cdot dz_1 \end{vmatrix}$$
(3)  
其中:

$$\begin{split} f'H_{11} &= \frac{y_1 - y_t}{(x_1 - x_t)^2 + (y_1 - y_t)^2} \\ H_{12} &= \frac{x_t - x_1}{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_t)^2} \\ H_{21} &= \frac{y_2 - y_t}{(x_2 - x_t)^2 + (y_1 - y_t)^2} \\ H_{22} &= \frac{x_t - x_2}{(x_2 - x_t)^2 + (y_2 - y_t)^2} \\ H_{31} &= \frac{(x_1 - x_t)(z_t - z_1)}{L(L + z_t - z_1)^2} \\ H_{32} &= \frac{(y_1 - y_t)(z_t - z_1)}{L(L + z_t - z_1)^2} \\ H_{33} &= \frac{L}{(L + 2z_t - z_1 - z_2)^2} \\ fL &= \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2} \\ ml \not{E} \dot{\Box} \ddot{E} \dot{\Xi} \dot{\mathfrak{H}} : \\ P_{Lo} &= E \Biggl[ \begin{bmatrix} dx \\ dy \\ dz \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} dx \\ dy \\ dz \end{bmatrix}^T \Biggr] \\ &= (H^T H)^{-1} H^T (P_{Ang} + P_K) H (H^T H)^{-1} \end{aligned}$$
(5)

其中, $P_{Ang}$ 为 $d\alpha_2$ 的协方差矩阵,主要体现为两平 $d\beta_1$ 

台的测角误差。PK 为协方差矩阵:

依据公式(5)可以看出,平台测角误差、定位误 差越小、测量平台基线越大,则协同定位误差越小。 另外多平台的情报融合、解算产生的延时也会为协 同定位带来误差,该项误差的大小与平台观测数据 率、观测平台和目标的距离,目标与观测点的相对切 向速度等因素均有关联,可通过卡尔曼滤波等方法 进行补偿<sup>[6]</sup>。

#### 4 单平台测量精度分析及其对协同定位的影响

#### 4.1 误差组成分析

基于上小节分析可以看出,单平台的测量误差 是最终协同定位误差的重要影响因素,对于高精度 红外探测系统,单平台测量误差实际上由传感器自 身和时空基准两部分组成,在测量距离 300 公里量 级距离情况下,平台自身位置误差<sup>[7]</sup>可以忽略不 计,而测角误差会随距离增加而大幅放大。单平台 测角误差主要由以下几项构成:

1) 机载红外探测系统自身测角精度  $\theta_{\rm IR}$ 

机载红外探测系统主要由光学系统、热像仪、伺服机构、信号处理系统等部分组成,其探测精度主要 受伺服机构控制误差、图像处理误差、系统装调和标 定误差等三部分影响<sup>[8]</sup>,目前机载红外探测系统探 测精度可达0.05°~0.005°量级<sup>[9]</sup>。

2)导航设备航姿精度  $\theta_{\text{NAV}}$ 

目前载机平台一般加装惯性和卫星组合导航系统,卫星导航系统能够提供平台的高精度位置信息, 但在特定环境下卫导系统不具备可用性。惯性导航 能够提供飞机平台的位置、速度、航向姿态等数据, 但其数据会随时间不断累计误差,需要依靠卫星导 航系统进行实时修正。

红外探测系统的典型使用场景一般为卫导不可 用区域,能够稳定获取的只有纯惯导信息,当前精度 较高的激光捷联卫导系统,在卫导可用情况下其短 时间内典型导航精度一般可达 0.01°~0.05°量 级<sup>[10]</sup>,卫导长时间失效情况下将完全不可用。

3)导航设备与传感器间标校误差 $\theta_{CAL}$ 

红外探测系统与导航设备均为高精度传感器, 但由于机械加工、设备装配等环节均会产生误差,因 此需要进行标校。目前一般采用的标校方法有惯性 测量法、五棱镜法、相交校靶法、小口径平行光管法 等,最终标校残差约等于 θ<sub>IR</sub>、θ<sub>NAV</sub> 中较低者<sup>[11]</sup>。

4) 基准传递误差  $\theta_{\text{DEF}}$ 

θ<sub>DEF</sub>主要包含载机平台与红外探测系统间的机体形变,红外探测系统自身的减振模块两部分。对于大型飞机,红外设备与飞机基准间的机体形变可达分米量级<sup>[12]</sup>。红外探测系统为降低载机飞行过程中的震动、冲击影响,一般会加装减震系统,减震系统会导致红外系统的光轴与基准发生相对变化。参考当前典型减震器产品参数,红外探测系统由减

震器带来的位置变化约为厘米量级。基准传递误差 为随机误差无法有效补偿。

5) 时统误差 θ<sub>SYN</sub>

红外探测系统的数据帧频和导航设备的数据率 一般并不一致,在飞机平台进行机动、大倾角转弯的 情况下导航数据较所对应的红外图像帧会存在一定 的时统偏差,导致航姿基准存在较大的时统误差,载 机转弯速度越快、时统偏差越大则 θ<sub>SYN</sub> 越大。

4.2 误差合成

上述误差项中,  $\theta_{IR}$ 、 $\theta_{NAV}$ 、 $\theta_{DEF}$  属于随机误差,  $\theta_{CAL}$  属于已定系统误差,  $\theta_{SYN}$  属于未定系统误差, 依 据误差理论<sup>[13]</sup>, 在各误差项满足正态分布的情况 下,则红外探测系统最终测角结果的误差为:

 $\theta_{\text{SYS}} = \sqrt{\theta_{\text{IR}}^2 + \theta_{\text{NAV}}^2 + \theta_{\text{DEF}}^2 + \theta_{\text{SYN}}^2} + \theta_{\text{CAL}} \qquad (6)$ 

图 2 为双基线 300 km 距离情况下红外双机对 空中目标协同探测误差分布图,其中图 2 为仅考虑 红外探测系统自身误差  $\theta_{IR}$  情况下的系统误差,图 3 为增加  $\theta_{NAV}$ 、 $\theta_{CAL}$ 、 $\theta_{DEF}$ 、 $\theta_{SYN}$ 等其他因素后的误差分 布图,可以看出其他误差源对协同定位误差的影响 已超过红外探测系统自身误差。



#### 5 实验分析

5.1 单平台主要误差项影响分析

设两机载红外探测系统分别为 A(-100,0,9) 和 B(100,0,9),目标 T(0,300,10)匀速迎头飞行, 在不同红外系统探测精度、导航精度、基准传递误差 下的双机协同探测精度如表 1 所示。

表1 不同误差条件下双机协同定位精度对比

Tab. 1 Comparison of positioning accuracy

by different system parameters

$ heta_{ m IR}$	$ heta_{ m NAV}$	$ heta_{ ext{DEF}}$	协同定位误差
0.005°	0. 02°	0°	0.51
		0. 2°	1.55
	0. 2°	0°	2.78
		0. 2°	3. 33
0. 05°	0. 02°	0°	0.64
		0. 2°	1.59
	0. 2°	0°	2.82
		0. 2°	3.36

可以看出,在典型设备指标能力下,进一步通过 提升红外探测系统自身性能来提高协同定位误差的 效能较低,通过改善导航设备精度,优化红外探测系 统安装方式降低基准传递误差等手段,也可以有效 提升协同探测精度,且效费比更高。

## 5.2 导航系统影响分析

机载红外探测系统 A(-100,0,9)和 B(100,0, 9)在不同惯导精度下,分别对 100~300 km 距离的 高空目标协同探测精度如图 4 所示。可以看出,双 机协同定位误差会随着惯导误差的变大而正比例增 加,被测目标距离越远则协同定位误差增加幅度 越快。



Fig. 4 Collaborative positioning accuracy of different navigation accuracy

目前在卫导可用情况下,组合导航系统的精度 可达0.02°量级,能够与红外探测系统精度匹配。 但在卫导不可用的情况下,纯惯导精度降低1个数 量级,将极大影响协同探测精度。采用天文等高精 度自主导航系统,是在卫导不可用情况下提升双机 协同定位精度的有效手段。

5.3 基准传递误差影响分析

基准传递误差主要由两个部分组成,一是机体 在飞行过程中振动或形变,导致导航设备基准与红 外系统光轴发生角度偏差,该误差与两者间的安装 距离及机体刚度有关,形变可达毫米至分米量 级<sup>[14]</sup>。二是红外设备自身减震器造成基准变化。

探测系统 A(-100,0,9)和 B(100,0,9)在不同 基准传递误差下,分别对 100 km 至 300 km 距离的 高空目标协同探测经度如图 5 所示。可以看出,随 着基准传递误差增加,协同定位误差的增幅越快。 为尽量降低该项误差的影响,应尽量减小红外探测 系统与平台惯导设备的安装距离,或直接将红外探 测系统与高精度导航设备一体化安装。





#### 6 结 论

本文针对机载红外双站协同定位误差的影响因 素进行了研究,重点对单平台中基准误差、基准传递 误差等影响进行了分析,并基于误差模型完成仿真。 实验结果表明,当前典型设备能力下导航精度、基准 传递精度对双站协同定位精度的影响已超过红外探 测系统自身,通过提升系统导航精度、降低基准传递 误差等方式提升协同定位精度更为高效,是未来提 升机载红外系统协同效能的重要手段。

#### 参考文献:

Zhao Xiaokang, Lu Houqing, Ren Jingjing, et al. Understanding impact mosaic warfare to grasp the development of the war[J]. Command Control & Simulation, 2022, 44 (5):124 - 128. (in Chinese)

赵小康,卢厚清,任静静,等.认识"马赛克战"冲击,把 握战争发展脉络[J].指挥控制与仿真,2022,44(5): 124-128. Xu Tongle, Liu Fang, Xiao Yujie, et al. Operational application and technology development of foreign UAV swarm
 J. Journal of CAEIT, 2023, 18 (10): 946 - 951. (in Chinese)

徐同乐,刘方,肖玉杰,等.国外无人机蜂群作战典型 战例及发展趋势[J].中国电子科学研究院学报, 2023,18(10):946-951.

[3] Wu Yilun, Sun Chunshen. Development and operational application of compact photoelectric pod for military UAV
 [J]. Laser & Infrared, 2023, 53 (10): 1568 - 1574. (in Chinese)

吴依伦,孙春生.军用无人机载紧凑型光电吊舱发展及作 战运用[J].激光与红外,2023,53(10):1568-1574.

- [4] Wang Zhengyi, Chen Dengan. The present and future tasks and development trends of unmanned aircraft system in the united states[J]. Journal of CAEIT, 2023, 18(2): 195-202. (in Chinese)
  王正义,陈邓安. 美无人机系统当前和今后担负的任务及其发展趋势[J]. 中国电子科学研究院学报, 2023, 18(2): 195-202.
- [5] Darya Ismailova. Localization algorithms for passive sensor networks[D]. Astrakhan. University of Astrakhan, 2010.
- [6] Zhang Ran, Du Qing, Wan Yue, et al. Research on a passive cooperative positioning filtering algorithm based on interactive multi-model kalmanfilter[J]. Radar & ECM, 2023,53(10):1568 1574. (in Chinese) 张冉, 杜清, 万岳,等. 一种基于交互多模型卡尔曼滤波的被动协同定位滤波算法研究[J]. 雷达与对抗, 2023,53(10):1568 1574.
- [7] Liu Hao, Yang Weixiu, Jiao Shenghai, et al. Improvement of navigation accuracy of small UAV based on AHRS algorithm[J]. Journal of Caeit, 2020, 15(5):461 - 469. (in Chinese)

刘浩,杨薇秀,焦胜海,等.基于 AHRS 算法的小型无 人机导航精度改进方法[J].中国电子科学研究院学 报,2020,15(5):461-469.

[8] Zhang Shang, Huang Junfeng, Wang Hengtao, et al. Low altitude lightweight infrared weak small target detection algorithm[J]. Laser & Infrared, 2024, 54(1):122 - 129. (in Chinese)

张上,黄俊锋,王恒涛,等.低空轻量级红外弱小目标 检测算法[J].激光与红外,2024,54(1):122-129.

- [9] Li Xing, Kan Bohan, You Hongbo, et al. Research and analysis on the installation and adjustment method of small aperture mirror [J]. Laser & Infrared, 2023, 53(6): 933-938. (in Chinese)
  李星,阚博涵,尤宏波,等. 小口径反射式光学系统装调方 法研究分析[J]. 激光与红外,2023,53(6):933-938.
- [10] Li Xing. Research on accuracy evaluation technology of optical fiber strapdown inertial navigation system [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020. (in Chinese)

李金钊.光纤捷联惯性导航系统精度评估技术研究 [D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2020.

[11] Wen Zhongkai, Zhang Qingjun, Li Shuang, et al. Multi-optical axis parallelism calibration of space photoelectric tracking and aiming system[J]. Chinese Optics, 2021, 14 (3):625-633. (in Chinese)
温中凯,张庆君,李爽,等. 空间光电跟瞄系统多光轴 平行性标标研究[J] 中国光学 2021 14 (3).

平行性标校研究[J].中国光学,2021,14(3): 625-633.

- [12] Wu Danxia, Ma Yingcheng. Aircraft stress simulation research based on ANSYS workbench[J]. Mechanical Management and Development,2024,39(2):5-7. (in Chinese) 伍丹霞,马英成. 基于 ANSYS Workbench 飞机有限元 仿真分析[J]. 机械管理开发,2024,39(2):5-7.
- [13] Wang Yanchun, Shi Lixia. Instrument accuracy theory
  [M]. The Third Edition 3rd ed. Beijing: Beihang University Press, 2023. (in Chinese)
  王艳春,石利霞.仪器精度理论[M].第3版.北京:北京航空航天大学出版社,2023.
- [14] Zhang Jun, Chen Guanghui, Ni Guoxin. Application of FBG sensing technology in dynamic deformation monitoring of aircraft wings[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2023,44(11):252 - 260. (in Chinese) 张俊,陈光辉,倪国新. FBG 传感技术在飞机机翼动态 形变监测中的应用[J]. 仪器仪表学报,2023,44(11): 252 - 260.