

文章编号: 1672-3392(2024)02-0009-07

一种机载光电平台下基于几何模型的被动定位方法

马捷¹ 张成² 樊新会²

(1 海军装备部, 北京 100000; 2 华中光电技术研究所—武汉光电国家研究中心, 湖北 武汉 430223)

摘要 现代军事冲突中, 光电对抗技术得到了越来越广泛的应用, 隐蔽性也是战机不可忽略的重要一环。由于发射电磁波测距容易暴露自身位置, 而单站无源或被动定位技术具有体积小、自身隐蔽性好和机动性高等诸多优点, 因此它在现代战争中具有重要的应用前景。按照先定位后测距的思想, 从对单机载被动定位算法的角度出发, 通过在大地坐标系下建立三种几何模型对比分析了所提方法与传统被动测距方法在解算速度和精度上的差异。通过对机载目标实际应用场景进行建模设计, 两种算法分别在高度 2 500 m、解算频率 500 Hz 情况下对俯仰角进行滤波后解算有效返回距离值, 实验对比得出所提被动定位算法比传统被动测距方法的计算复杂度大幅降低, 平均解算时间提升约 56.91%, 极大增加了机载目标解算频率, 节省了更多计算资源, 同时还保证了定位精度稳定性, 能够满足实际使用需求。

关键词 光电对抗; 被动定位; 运动模型; 解算频率; 均值滤波

中图分类号 TN206 **文献标识码** A

1 引言

近年来, 在信息与人工智能技术的推动下, 现代战争已经向高科技时代迈进。各种光学系统与传感器的革新, 使得传统作战方法面临降维打击的风险。随着各种隐身、反隐身新式装备的出现, 如何能不暴露自身的情况下对敌定位显得尤为重要^[1]。光电对抗技术在海陆空对战中发挥着越来越重要的作用, 目前各种先进的机动平台如洲际导弹、军用战斗机、军用舰艇、无人指挥系统都需配备光电对抗设备, 为了更全面地发挥光电对抗设备性能, 需要对来犯目标进行精确定位。红外单站被动定位技术, 其承载体积小且自身隐蔽性极强, 作战中具有高度机动性, 在未来战场中具有广阔的应用前景。

定位技术通常分成两步实现, 即定向和测距, 其中定向技术在制导跟踪中已经取得稳步发展, 而测距尤其光电单站被动测距技术是实现光

电定位的关键, 提升定位精度是现代作战中面临的技术难题。目前服役的防空装备基本以雷达进行目标探测, 在获得敌军目标位置时也会暴露自身位置, 容易受到打击。无源电磁波、红外及可见光结合的被动探测手段应运而生, 极大地弥补了雷达探测的劣势, 现在已逐步应用在国家防空装备中^[2,3], 提升了防空装备信息作战与战场生存能力。

被动跟踪系统作为一种被动探测手段, 已广泛应用在机载、舰载和车载等平台的防空装备上^[4], 使得装备具备隐蔽探测与跟踪能力。无源定位技术包含单站、多站无源定位^[5], 区别在于观测平台数量存在差异。多站平台需要通过传输大量数据运行, 系统复杂且机动性小。单站平台则更加灵活, 通过不断改变自身位置来估算目标移动信息, 无需依赖站间通讯。防空装备中红外跟踪系统对空目标进行跟踪, 可获取敌机位置信息以及图像信息, 指挥控制系统对两种捕获信息进行叠加处理, 可对敌机位置进行解算, 进而

收稿日期 2023-09-16 收修改稿日期 2023-11-07

作者简介 马捷(1978—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为航空装备。

通信作者 张成(1996—), 男, 硕士, 主要从事算法开发、机器学习方面的研究工作。

实现定位^[6]。

无源定位技术在机载光电上的应用非常广泛,光电对捕获目标后进行识别,结合机载导航上的位置与姿态信息,反解出敌机的大地坐标,实现目标被动定位功能^[7-13]。

本文根据观测平台、目标相对高度等信息,利用机动测量平台对机动目标单站被动定位的具体问题和关键技术进行了深入的研究。通过以地球切平面、观测目标和地面观测站建立几何模型,并基于地球半径与目标相对高度的三角函数关系,计算飞行目标与地面是否产生交点,在有交点的情况下返回计算有效目标距离值。同时对地面静态目标对比分析了几何模型与传统被动定位算法的测距精度,通过实验计算两个模型的相对误差,结果表明几何模型可在提高距离解算速度的同时保证定位精度,增强了定位结果的稳定性。

2 传统被动定位方法

传统被动定位方法运用最多的是运动单站交叉定位的方式实现对目标位置的解算^[14,15]。取多个观测点对飞行目标进行观测,每个观测点需保持视场中心对准目标,利用多条观测光线的交会进行目标定位。根据光线交会模型建立共线方程组,根据最小二乘法原理联立求解目标最优解。其被动定位原理如图1所示。

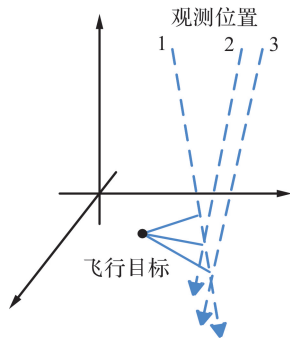


图1 飞行目标被动定位观测示意图

Fig. 1 Schematic diagram of passive localization observation of flight target

从图1可以看出,从1、2、3三个观测位置对飞行目标进行观察,假设飞行目标位置为 $P_i = (X_{pi}, Y_{pi}, Z_{pi})$,光电平台在三个观测角得到的方位

角为 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$,俯仰角为 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$,飞行目标航向角为 H_1, H_2, H_3 ,横滚角为 R_1, R_2, R_3 ,纵摇角为 P_1, P_2, P_3 , A_i 和 B_i 表示大地坐标转换为飞机坐标对应矩阵,可表示为

$$A_i = [f_1(X_{pi}, Y_{pi})] \quad (1)$$

$$B_i = [f_2(X_{pi}, Y_{pi})] \quad (2)$$

矩阵 C_i, D_i, E_i 表示飞行坐标下的飞机航向、横滚、纵摇角相关的参数矩阵,具体为

$$C_i = [f(H_i)] \quad (3)$$

$$D_i = [f(R_i)] \quad (4)$$

$$E_i = [f(P_i)] \quad (5)$$

经过计算转换,飞行目标与观测点连线在飞行目标坐标系下为 $a_i = (x_i, y_i, z_i)$,代入式(1)~(5)可等效为

$$\begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{pmatrix} = E_i \times D_i \times C_i \times B_i \times A_i \times \begin{pmatrix} X_{pi} - X_i \\ Y_{pi} - Y_i \\ Z_{pi} - Z_i \end{pmatrix} \quad (6)$$

为了保证上式成立,向量 a_i 为

$$\tan(\alpha_i) = x_i/y_i \quad (7)$$

$$\tan(\theta_i) = z_i/\sqrt{x_i^2 + y_i^2} \quad (8)$$

飞机在多个不同位置对目标进行观测时,可列出两倍于位置数量的观测方程组,该方程组通常使用最小二乘法联立进行求解,从而解算出最优目标位置。

对于联立后所得方程,需先对方程组进行求解,然后根据方程组解的情况对有效距离的返回值进行判定,判定结果如下:

$$\begin{cases} \Delta < 0 & \text{无有效返回距离值} \\ \Delta = 0 & \text{返回1个有效距离值} \\ \Delta > 0 & \text{返回2个有效距离值} \end{cases} \quad (9)$$

由式(9)可知对于有效距离值的返回情况依赖于6组观测方程利用最小二乘法的求解结果,此处理方法需要联立多组方程进行解算,涉及计算量较大,且对于有效距离值的返回判定步骤较为繁琐。

3 几何模型建立

传统被动定位算法通过使用最小二乘法联立观测点方程,在观测目标与地面有交点时对目

标位置求最优解^[16,17],该方法的计算量过大是制约其目标解算频率一个难以避免的因素,对于是否能解算到有效距离的评判方法时间成本较高,需要分配较大一部分计算资源进行求解。为

了解决上述问题,本文从降低计算复杂度、缩短解算时间提高解算频率以及简化判定有效距离值步骤等角度出发,构建了三种几何模型,如图2所示。

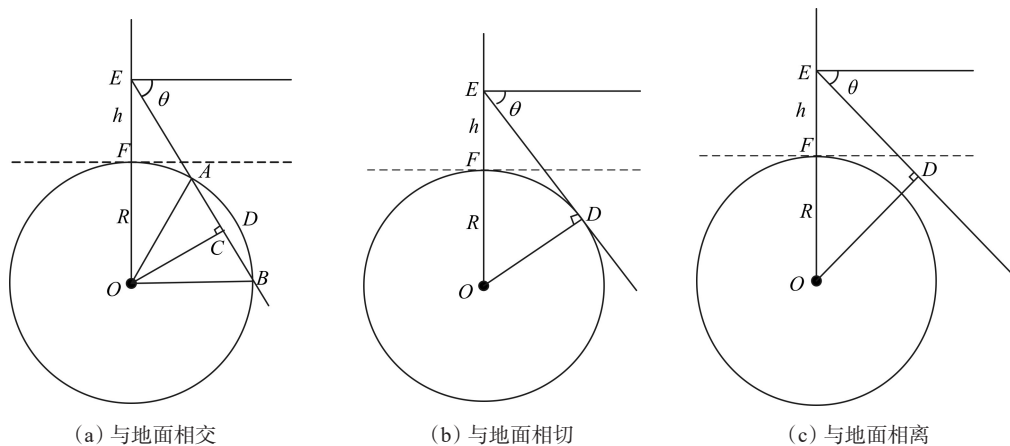


图2 三种几何模型结构

Fig. 2 Three geometric model structures

以目标的运动平面为坐标平面建立三维直角坐标系,得到机载观测平台与目标的空间位置关系。观测平台的位置坐标为 $\mathbf{r} = [r_x, r_y, r_z]^T$, 观测平台的速度向量 $\mathbf{v}_r = [v_{r,x}, v_{r,y}, v_{r,z}]^T$, 目标位置坐标向量表示为 $\mathbf{P} = [p_x, p_y, p_z]^T$ 。

图2(a)中,飞行目标轨迹相交于地平面为点A,AE表示地面观测点与飞行目标的距离值。为了更快速地计算出该距离值,将地球降维至二维平面,以地心中点为坐标原点,延长EA至与地球切面的另一个交点B,过圆心O作EB垂线使得OC垂直于EB,则可建立Rt△EOC。假设飞行目标的俯仰角度为θ,距离地表的高度EF为h,地球半径OF为R,则OE长度为R+h, Rt△EOC内∠OEC = π/2 - θ,根据三角函数关系原理进行变换可得到其长度 $OC = OE \times \sin(\pi/2 - \theta) = (h + R) \times \sin(\pi/2 - \theta)$ 。确定OC长度后,根据OC与地球半径OD及其地表高度h'之和h' + R进行比较(其中视轴与地球交点处的地表高度h'通过用户输入、数字高清地图等途径获得),可以判断出是否可以返回飞行目标距离地表观测站的有效距离,具体关系如下:

$$\begin{cases} OC < h' + R & \text{与地表相交} \\ OC = h' + R & \text{与地表相切} \\ OC > h' + R & \text{与地表相离} \end{cases} \quad (10)$$

飞行目标与地表观测站相交、相切和相离的情况分别对应图2中的(a)、(b)、(c)三种模型。由此可见,相比于传统被动定位算法中通过最小二乘法联立并根据方程有无解的情况来分析是否返回有效距离,所提几何模型只需根据式(10)中的三种关系,对三角函数求解就可判断出有效距离值的返回情况,大大降低了有效距离值的判定时间,降低了计算复杂度,可提升机载目标的解算频率。

4 量化分析

4.1 均值滤波

均值滤波表示在像素邻域内求平均值,使用该平均值替换原位置像素值,进而达到滤波的目的。

邻域运算实质上就是一种卷积计算方式,如图3所示是通过目标像素的邻域按照卷积核进行加权计算新的值。其中这个加权矩阵称为邻域算子,实均值滤波是对邻域内所有像素赋予同等权重进行计算的一种特殊的邻域滤波,其原理如图4所示。

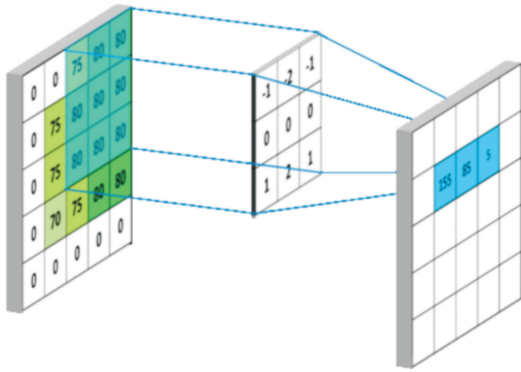


图 3 邻域滤波示意图

Fig. 3 Schematic diagram of neighborhood filtering

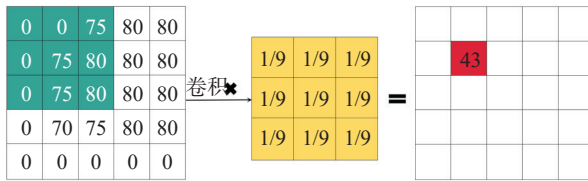


图 4 均值滤波示意图

Fig. 4 Schematic diagram of mean filtering

在实际应用场景中,由于光电设备自身或者受到地形干扰的影响,使得计算得出的俯仰角会出现部分野值,这些值会降低有效测距值的计算精度,为了对模型进行该频率稳定定位,本研究通过加入均值滤波方法去除该部分野值,通过前后值的平均值来进行替换计算,可有效增加实际定位中的稳定性。

4.2 实验分析

为了对比分析所提几何模型和传统被动定位模型在计算时间上的差异,以及两者在测算精度上的区别,设置飞行目标为 4 000 m 高度,地球半径取 6 371.393 km,俯仰角在 0~90°之间随机取值,在 500 Hz 解算频率下进行仿真计算两种模型的平均解算时间,每组实验进行 5 次取均值进行对比,两种实验的 5 次解算时间具体如表 1 所示。

表 1 几何模型与传统解算法 5 次解算时间

Table 1 Five solving times for the geometric model and the traditional solving algorithm

类别	实验一	实验二	实验三	实验四	实验五
几何模型	0.002 313	0.001 925	0.002 307	0.001 958	0.002 016
传统算法	0.005 623	0.004 127	0.004 985	0.005 162	0.004 512

几何模型与传统被动定位算法的 5 次仿真解算时间对比结果如图 5 所示。

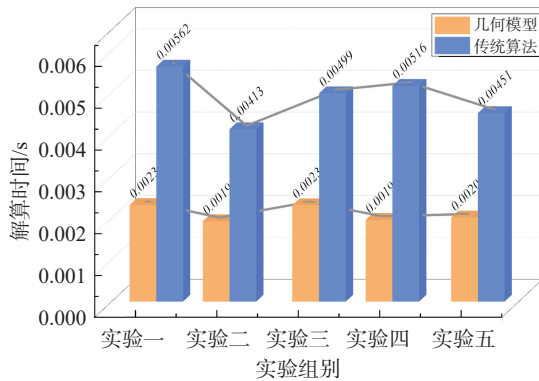


图 5 几何模型与传统被动定位算法解算时间对比图

Fig. 5 Comparison of solving time between geometric model and traditional passive localization algorithm

从图 5 可以看出,5 组实验下几何模型在 500 Hz 解算频率下的解算时间均远远低于传统被动定位解算模型,同时几何模型对于返回有效距离值的判定步骤也得到了极大简化,几何模型 5 次仿真实验平均解算时间相比于传统定位算法提升约 56.91%。

单次测量误差精度为真实距离与测量距离的差值,假设实际距离用 l 表示。根据图 2 模型可知:

$$OC = OE \times \sin(\pi/2 - \theta) = (h + R) \times \sin(\pi/2 - \theta) \quad (11)$$

在 $Rt\triangle OAC$ 中,

$$AC = \sqrt{R^2 - (h + R)^2 \cdot \sin^2(\pi/2 - \theta)} = \sqrt{R^2 - (h + R)^2 \cdot \cos^2\theta} \quad (12)$$

$$EC = (h + R) \cdot \cos(\pi/2 - \theta) = (h + R) \cdot \sin\theta \quad (13)$$

$$AE = (h + R) \cdot \cos(\pi/2 - \theta) - \sqrt{R^2 - (h + R)^2 \cdot \cos^2\theta} = (h + R) \cdot \sin\theta - \sqrt{R^2 - (h + R)^2 \cdot \cos^2\theta} \quad (14)$$

AE 表示观测站距离飞行目标的实际计算距离,测量误差为 $\Delta L = |AE - l|$ 。

基于光电平台的被动定位方法,由于光电自身的安装精度以及飞行器的实时姿态数据,都会影响被动定位精度。在实际定位过程中,计算实

际观测站与飞行目标的距离时,飞机飞行高度 H 与载荷空间俯仰角都存在一定的误差,使得目标被动定位位置会出现部分偏差。光电平台定位误差示意图如图 6 所示。

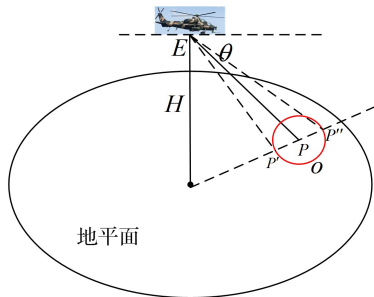


图 6 光电平台定位误差示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the positioning error of the electro-optics platform

飞机与水平面的俯仰角为 θ , 被动定位结果为 $P、P'、P''$, 其定位误差变化范围在 O 的最大半

径范围内,对超出误差范围的定位结果进行剔除,同时使用传统航迹预测算法对剔除目标进行补充定位,此处不再细述,落在误差范围内的最终定位结果通过预测与实际定位结果进行加权得到。

为了对比分析两种模型在测距精度上的表现,对斜距为 7 900 m 的固定目标进行定位实验,对比两个模型的实际测距误差。本次实验中选取飞机朝向目标正北分量为飞机的航向,飞机飞行高度设置为 2.5 km,定位基线以图 6 中 EP' 和 EP'' 为准,控制其变化范围。对实际定位结果与预测目标位置进行解算,在大地坐标系内对其相应的 $x、y$ 分量分别计算最大误差绝对值,当其超出误差最大变化半径时,对该实际值使用预测位置进行替换。两种实验均进行 10 次,具体误差值如表 2 所示。

表 2 几何模型与传统定位解算方法十次定位误差

Table 2 Geometric model and traditional localization solution method ten times localization error m

类别	一	二	三	四	五	六	七	八	九	十
几何模型	150.1	147.8	150.7	148.1	147.3	146.2	149.3	147.5	146.2	148.5
传统算法	148.6	148.5	147.4	149.8	145.8	148.1	147.9	145.2	147.1	146.8

两种模型的 10 组实验定位误差直观对比曲线如图 7 所示。

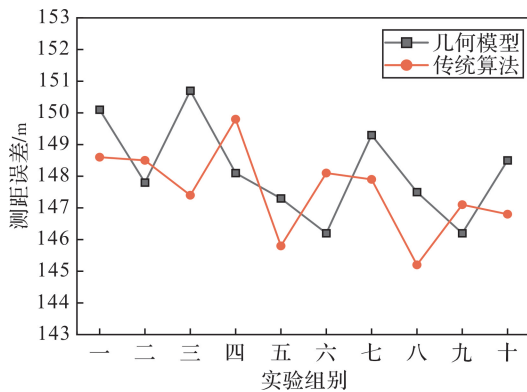


图 7 几何模型与传统被动定位算法解算精度误差图

Fig. 7 Geometric model and traditional passive localization algorithm solving accuracy error plot

从图 7 可以看出,本文所提几何模型和传统被动定位算法在 6 900 m 斜距下的测距误差较为接近,两者的 10 组实验误差均值相差 0.65 m,且整体误差水平保持在同一量级之内,由此说明所提几何模型与传统被动定位算法在测距精度

上无明显差别。

综上所述,本文通过空间降维提出的三种几何模型结构,通过使用三角函数求解对比地球半径与地表高度之和的大小关系来确定测距有效值的返回方法,相比于通过最小二乘法联立求解 6 组观测方程解的情况来确定是否与地面有交点,所提几何模型大大简化了判断流程与计算成本,提升了有效距离返回值的判定精度与机载目标的解算频率,几何模型相比于传统定位算法在解算时间上平均缩短了 56.91%。

同时在测距精度上,几何模型通过使用均值滤波对接收俯仰角野值进行平滑过滤,经过 10 组实验对两种模型的定位误差进行对比,实验得出两种算法在定位误差精度上无明显差异。可见几何模型在判定有效距离返回值上更有优势,同时能保证良好的测距精度,保证在实际定位应用中稳定进行。

5 结 论

在光电平台保持对飞行目标持续跟踪的过程中,持续接收目标的实时高度信息,根据光电平台自身的俯仰角,在下一时刻使用均值滤波对飞行目标的实时俯仰角进行过滤,剔除错误角度后使用均值进行替代,根据目标传回的飞行高度与地球半径的距离及其对应的三角函数关系来

判定与地面是否存在交点,在有交点的情况下求解目标位置的最优距离值,并在求解过程中对比几何模型与传统被动定位算法的解算时长。实验结果表明,本文方法能够获得较高的定位精度,同时解算时间短,与地面是否相交的判定机制简单高效,可极大提升机载目标的定位解算速度与解算频率,节省了计算资源。同时定位结果稳定性较强,可以满足实际场景下的使用需求。

参 考 文 献

- [1] 王阳. 多平台无源定位及跟踪技术研究[D]. 北京:北京理工大学, 2015.
WANG Yang. Research on multi-platform passive positioning and tracking technology [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2015.
- [2] 单月晖, 孙仲康, 皇甫堪. 不断发展的无源定位技术[J]. 航天电子对抗, 2002, (1): 36-42.
SHAN Yue-hui, SUN Zhong-kang, HUANGFU Kan. Evolving passive positioning technology [J]. Aerospace Electronic Countermeasures, 2002, (1): 36-42.
- [3] 孙仲康, 郭福成, 冯道旺. 单站无源定位跟踪技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008: 187-198.
SUN Zhong-kang, GUO Fu-cheng, FENG Dao-wang. Single station passive positioning and tracking technology [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2008: 187-198.
- [4] 王力民. 红外探测技术在军事上的应用[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(增刊): 571-574.
WANG Li-min. Infrared detection technology in military applications[J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37 (Suppl.): 571-574.
- [5] 李伦平, 谭仁龙. 一种机载光电平台下的目标被动定位方法[J]. 光学与光电技术, 2018, 16(6): 33-38.
LI Lun-ping, TAN Ren-long. A passive target location algorithm under airborne optoelectronic platform[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2018, 16(6): 33-38.
- [6] 孙全, 黄楷, 陈宇威, 等. 红外跟踪系统单站被动定位方法研究[J]. 光学与光电技术, 2018, 16(5): 55-59.
SUN Quan, HUANG Kai, CHEN Yu-wei, *et al.* Research on mono-station passive location method of infrared tracking system[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2018, 16(5): 55-59.
- [7] 何鹏, 庞澜, 何樱, 等. 一种直升机光电图像定位方法研究[J]. 光学与光电技术, 2018, 16(1): 83-88.
HE Peng, PANG Lan, HE Ying, *et al.* Research on helicopter photoelectric image positioning [J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2018, 16(1): 83-88.
- [8] 李伦平, 刘达. 机载光电侦察吊舱综合信息处理技术发展与分析[J]. 光学与光电技术, 2017, 15(6): 29-35.
LI Lunping, LIU Da. Development and analysis of synthetic information process technology for airborne electro-optical reconnaissance pod[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2017, 15(6): 29-35.
- [9] 艾宏山, 刘攀. 机载光电系统的目标定位研究[J]. 光学与光电技术, 2011, 9(2): 77-80.
AI Hong-shan, LIU Pan. Research on target positioning of airborne electro-optical system [J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2011, 9(2): 77-80.
- [10] 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 Hui. Target positioning and error analysis of airborne optoelectronic platform [J]. Chinese Optics, 2013, 6 (6): 912-918.
- [11] 万鹏武, 姚媛媛, 闫千里, 等. 能时频域信息融合的信源被动定位[J]. 西安电子科技大学学报, 2021, 48(6): 105-114.

- WAN Peng-wu, YAO Yuan-yuan, YAN Qian-li, *et al.* Passive source localisation with time-frequency domain information fusion[J]. *Journal of Xi'an Electronic Science and Technology University*, 2021, 48(6): 105-114.
- [12] Huiyuan W, Luning W, Huibing Y, *et al.* Unmanned aerial vehicle passive positioning technology based on cross-location and target splitting[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2023, 2558(1): 1-10.
- [13] 陈祎, 蒲彬, 张晓丽, 等. 基于网格搜索的被动单站旋转定位算法[J]. *制导与引信*, 2023, 44(2): 1-5+19.
CHEN Yi, PU Bin, ZHANG Xiao-li, *et al.* A passive single-station rotational positioning algorithm based on grid search[J]. *Guidance and Fuzing*, 2023, 44(2): 1-5+19.
- [14] 耿傲婷, 李迟生. 一种基于粒子群的多站测向交叉定位改进算法[J]. *无线电工程*, 2023, 53(9): 2012-2018.
GENG Ao-ting, LI Chi-sheng. A particle swarm-based improved algorithm for multi-station direction-finding cross-location[J]. *Radio Engineering*, 2023, 53(9): 2012-2018.
- [15] 曹志亮, 汪晋, 任芹, 等. 基于纯角度信息的单站无源定位算法[J]. *电子技术与软件工程*, 2017, (10): 118-120.
CAO Zhi-liang, WANG Jin, REN Qin, *et al.* A single-station passive positioning algorithm based on pure angle information[J]. *Electronic Technology and Software Engineering*, 2017, (10): 118-120.
- [16] 许诗文. 200 km 红外目标被动测距[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2021.
XU Shi-wen. Passive ranging of 200km infrared targets [D]. Xi'an: Xi'an Electronic Science and Technology University, 2021.
- [17] 闫千里, 万鹏武, 卢光跃, 等. 非视距环境下 RSS 和 TDOA 联合的信源被动定位[J]. *西安电子科技大学学报*, 2019, 46(3): 180-188.
YAN Qian-li, WAN Peng-wu, LU Guang-yue, *et al.* Joint RSS and TDOA for source passive localisation in non-line-of-sight environments[J]. *Journal of Xi'an Electronic Science and Technology University*, 2019, 46(3): 180-188.

A Geometric Model-Based Passive Localization Method Under Airborne Electro-Optics Platforms

MA Jie¹ ZHANG Cheng² FAN Xin-hui²

(¹ Ministry of Naval Equipment, Beijing 100000, China;

² Huazhong Institute of Electro-Optics — Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Wuhan 430223, China)

Abstract In the modern military conflict, the optoelectronic countermeasure technology has been more and more widely used, and concealment is also an important part of the warplanes, which can not be ignored. Due to the launch of electromagnetic wave ranging is easy to leak their own position, single station passive or passive positioning technology has many advantages such as small size, good concealment and high mobility, so it has an important application prospect in modern war. In this paper, in accordance with the idea of positioning before ranging, from the perspective of single airborne passive positioning algorithm, the differences between the proposed method and the traditional passive ranging method in terms of solving speed and accuracy are compared and analyzed by establishing three kinds of geometrical models under the geodetic coordinate system. By modeling and designing the actual application scenarios of airborne targets, the two algorithms are respectively used to solve the effective return distance values after filtering the pitch angle at an altitude of 4 000 m and a solving frequency of 500 Hz. The experimental comparisons result in a significant reduction in the computational complexity of the proposed passive positioning algorithm compared with the traditional passive ranging methods, and an increase in the average solving time of about 56.91%, which greatly increases the frequency of solving the airborne targets and saves more computational resources at the same time. It greatly increases the frequency of on-board target solving, saves more computational resources, and also ensures the stability of positioning accuracy, which can meet the requirements of practical use.

Key words electro-optical countermeasures; passive localization; motion model; solving frequency; mean filtering