

文章编号:1001-5078(2025)04-0588-06

· 红外技术及应用 ·

基于最小张角的红外双站多目标配准方法

王 霄^{1,2}, 刘士建^{1,2}, 李 冰^{1,2}, 裘莉娅^{1,2}

(1. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083; 2. 中国科学院红外探测与成像技术重点实验室, 上海 200083)

摘要:为了解决双站多目标配准方法中受各种误差影响使得配准精度降低的问题,提出了一种基于最小张角的配准方法。首先计算双站中所有测角线对应的张角矩阵,然后利用每个站的航迹信息缩量更新张角矩阵,最后基于最小张角和全局最优的原则选择最佳的数据关联组合。通过蒙特卡罗仿真方法,对算法的性能进行了评估,结果表明,算法不仅可以提高配准的精度,还可以大幅度减少运算的时间;目标之间距离30 m时,关联的正确率大于97%,算法的运行时间约0.016 ms,在精度和性能上均优于其他算法,为提高目标多维定位的精度提供了重要的理论基础。

关键词:红外多目标配准;最小张角;航迹匹配;局部最优

中图分类号:TN219;TP73 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2025.04.016

Infrared multi-target dual-station registration method based on minimum angle

WANG Xiao^{1,2}, LIU Shi-Jian^{1,2}, LI Bing^{1,2}, QIU Li-Ya^{1,2}

(1. Shanghai Institute of Technical Physics of the Chinese Academy of Science, Shanghai 200083, China;

2. Key Laboratory of Infrared Detection and Imaging Technology, Chinese Academy of Sciences Shanghai 200083, China)

Abstract: In order to solve the problem of reduced registration accuracy due to various errors in the dual-station multi-target registration method, a minimum angle-based registration method is proposed. Firstly, the angle matrices corresponding to all the angle measurement lines in the dual stations are calculated, then the angle matrices are updated by scaling the trajectory information of each station, and finally the optimal combination of data associations is selected based on the principles of minimum angle and global optimum. The capability of the algorithm is evaluated by Monte Carlo simulation method, and the results show that the algorithm can not only enhance the accuracy of registration, but also drastically reduce computation time. When the distance between targets is 30 m, the correct rate exceeds 97%, and the algorithm's running time is approximately 0.016 ms. This algorithm outperforms other algorithms in terms of both accuracy and performance, providing an important theoretical foundation for improving the accuracy of multi-dimensional target positioning.

Keywords: infrared multi-target registration; minimum angle; track matching; local optimality

1 引言

红外双站测向交叉定位系统通常是基于红外搜

索跟踪技术,既具备红外探测的抗干扰性好、穿透雾霾能力强和全天时工作等优点^[1-2],又具备无源定

基金项目:国家十四五预研项目(No. 514010405-207)资助。

作者简介:王 霄(1993-)女,博士,工程师,主要研究方向为红外探测和信号处理技术。E-mail: wang_xiao529@163.com

通讯作者:刘士建(1975-)男,博士,研究员,主要研究方向为红外搜索跟踪和信号与信息处理技术。E-mail: shj_liu@ustc.edu。

收稿日期:2024-07-01

位技术的作用距离远和隐蔽性好等优点^[3-5],所以在军用和民用领域都具有广泛的应用前景。

双站测向交叉定位技术基于双站对同一目标的测向线在空间中交于实际位置的特点实现三维定位^[6],测向线由测站对目标测量的方位角和俯仰角决定。由于角度通常存在一定的测量误差,使得目标会出现误匹配的现象,从而直接影响目标的定位精度,所以双站间多目标的配准成为测向交叉定位的一个难点。

目前对于多站多目标配准的研究主要包括最短距离法^[7]、数据相关法^[8-10]、聚类法^[11]、谱相关法等算法,但是它们或计算复杂,耗时严重,或配准精度不高,或需要先验信息等,针对算法中现存的问题^[12],许多专家学者进行了研究,并取得了显著的成果。

文献[7]提出了一种基于最小距离门限判决的交叉定位假点剔除算法,利用目标的运动特性设置最小距离门限,计算开销非常小。文献[13]提出了基于角度余切值的多被动传感器数据关联算法,直接采用角度信息进行数据关联,采用指示函数对候选关联集进行分析,选择正确的关联组合。文献[14]提出一种基于传感器基线分组的快速数据关联算法,通过分组,减少了计算量,基于两条测向线间的距离越小,来自同一个目标的概率越大的原则建立候选关联集,提高了算法的准确度。文献[15]以倾角差为检验统计量,建立检验模型,提出了基于全局最优的被动传感器关联算法,可以有效完成密集目标环境下的被动传感器关联。

文献[16]提出一种基于改进 K-means 的聚类融合定位算法,对每条测向线上的交叉定位点进行聚类,获得每条测向线上的目标位置估计,具有较好的定位效果和鲁棒性。文献[1]提出了一种基于航迹方向最大密度估计的红外运动多目标双站定位方法,首先对多目标进行基于高程差的粗匹配,然后基于 Mean Shift 开展航迹方向最大密度估计,对误匹配的目标进行修正,利用了红外目标的运动特性,基于航迹匹配的方法,提高了多目标配准的精确度,但是需要多次迭代,直至收敛,使得计算量大增。

针对多目标配准算法中存在的或者由于计算方法简单导致配准精度较低,或者计算复杂导致耗时太过严重,从而不适用于实际工程应用的问题,本文

提出了一种基于最小张角和航迹匹配的双站多目标配准算法,建立了多目标配准模型。首先计算双站对应的张角矩阵,然后根据双站的航迹匹配信息对张角矩阵中的相应张角缩量更新,最后根据最小张角和局部最优原则选择双站的数据关联对。用蒙特卡洛模拟方法进行了仿真,实验结果表明,本文的方法配准精度较高,并且算法计算量适中,适合工程应用。

2 基于最小张角的数据关联

在被动交叉定位系统中,三个及其以上测量站之间的多目标配准可以转换成多个双站多目标配准问题,因此,双站多目标配准问题是研究的重点,本文主要考虑双站的目标配准情况。

2.1 最小张角模型

由于测量设备自身的局限性,使得测量站对目标进行观测时获得的角度与实际角度存在一定的误差,包括方位角和俯仰角的测量误差。但是测量设备的测量精度是确定的,即测量的角度误差在一定范围内。

假设有两个测量站 S_1 和 S_2 , 如图 1 所示,假设目标的实际位置为 P , 那么测站 S_1 对目标的测角线会出现在以测角线 S_1P 为轴线的圆锥区域内,测站 S_2 对目标的测角线会出现在以测角线 S_2P 为轴线的圆锥区域内,圆锥的角度为测量设备的测量精度。若两台测量设备不存在误差,那么 S_1 的测向线和 S_2 的测向线相交于空间中的 P 点,但是由于误差的存在,两个站的测向线在空间中不再相交。

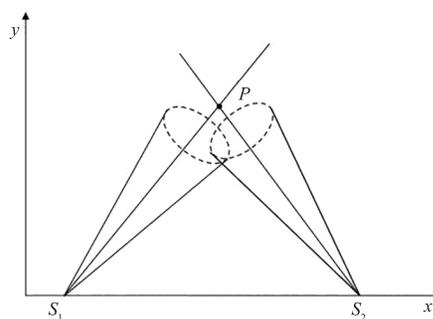


图 1 测量误差模型

Fig. 1 Measurement error model

本文用双站测向线之间的最短距离线段与测量站形成的张角来衡量测站当前测向线的测量误差,如图 2 所示。

图 2 中, D_{ij} 为 S_1 第 i 条测向线与 S_2 第 j 条测向

线的距离, SC_{ij} 为 D_{ij} 距离直线与 S_1 第 i 条测向线之间的交点到 S_1 的距离, 定义张角:

$$\theta_{ij} = \text{atan}(D_{ij}/SC_{ij}) \quad (1)$$

从测量站的测角精度看, 当双站的两条测向线指向同一目标时, 其对应的张角最小, 并且小于测量站的测量精度:

$$\forall i = 1, 2, \dots, N_1, j = 1, 2, \dots, N_2, \theta_{ij} \leq \sigma \quad (2)$$

其中, N_1 为站 S_1 的测角个数; N_2 为站 S_2 的测角个数; θ_{ij} 表示 S_1 第 i 个测角与 S_2 第 j 个测角关联在一起, 并且对应的张角小于测量站的测量精度。

针对双站所有的测角数据, 建立张角关联矩阵如下:

$$P = \begin{bmatrix} \theta_{11} & \theta_{12} & \cdots & \theta_{1j} \\ \theta_{21} & \theta_{22} & \cdots & \theta_{2j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \theta_{i1} & \theta_{i2} & \cdots & \theta_{ij} \end{bmatrix} \quad (3)$$

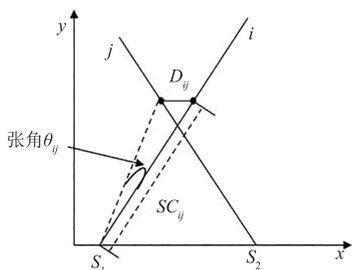


图2 张角示意图

Fig. 2 Angle schematic

2.2 缩量张角关联矩阵

与其他被动传感器测角数据不同, 红外设备要对目标所在场景成像, 然后检测图像中的目标, 计算目标相对设备的方位角和俯仰角。由于目标检测有误检的情况存在, 为了提高设备输出目标角度的有效性和降低目标检测的虚警率, 红外设备一般会对目标进行航迹匹配, 所以红外设备的测角信息中会包含目标的航迹信息。

本文首先根据最小张角的原则初步选取双站的所有关联对, 建立目标的标识关联矩阵:

$$P_{id} = \begin{bmatrix} id_{11} & id_{12} & \cdots & id_{1N} \\ id_{21} & id_{22} & \cdots & id_{2N} \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中, $N = \min(N_1, N_2)$, id_{1a} 和 id_{2a} 表示当前关联对在站 S_1 和站 S_2 中的目标标识号, $\forall a = 1, 2, \dots, N$, 连续记录 k 帧图像的标识关联矩阵, 根据标识关联矩阵更新当前帧计算的张角 θ_{ij} :

$$\theta_{sij} = \theta_{ij} \cdot \prod_{m=0}^k \in(m) \quad (5)$$

$$\in(m) = \begin{cases} 1 & \text{第 } m \text{ 帧 } P_{id} \text{ 中无匹配项, } m < k \\ \tau & \text{第 } m \text{ 帧 } P_{id} \text{ 中有不同匹配, } m < k \\ \varepsilon & \text{第 } m \text{ 帧 } P_{id} \text{ 中有相同匹配, } m < k \end{cases} \quad (6)$$

其中, θ_{sij} 为经过航迹匹配缩量后 S_1 第 i 条测向线与 S_2 第 j 条测向线对应的张角; ε 为角度加权系数, 取值通常为 0.75 ~ 0.9 之间; τ 为角度加权系数, 取值通常为 1.1 ~ 1.3 之间。由公式可以看出, 如果标识关联矩阵中出现过相同的双站目标关联对, 经过航迹加权后, 张角会变得更小; 如果标识关联矩阵中出现过与当前匹配项不同的匹配, 此时有可能是当前匹配为误匹配, 经过航迹加权后, 张角会变得更大, 减小误匹配的可能性。

2.3 局部最优原则

文献[17]提出了一种关联矩阵分析方法, 有效的提高了关联效率, 建立在以下两个假设的基础之上:

假设 1: 每个传感器量测源于且仅源于 1 个目标或 1 个杂波;

假设 2: 每个传感器量测只能和其他传感器量测关联 1 次;

由于双站对多目标的测量数据可能不是同一时间, 对于同一运动目标, 时间的差异会使得测角数据产生差异, 从而计算对应张角时不满足测角精度的要求, 进而影响多目标的配准, 所以本文加入第三个假设:

假设 3: 两个传感器的采样时间相同。

在这三个假设的基础上, 建立双站量测数据的关联矩阵如下:

$$P_s = \begin{bmatrix} \theta_{s11} & \theta_{s12} & \cdots & \theta_{s1j} \\ \theta_{s21} & \theta_{s22} & \cdots & \theta_{s2j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \theta_{si1} & \theta_{si2} & \cdots & \theta_{sij} \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中, 矩阵中的每个元素 θ_{sij} 表示站 S_1 第 i 个测角与 S_2 第 j 个测角对应的张角, $i = 1, 2, \dots, N_1, j = 1, 2, \dots, N_2$ 。

根据双站对同一目标测量时对应的张角较小并接近于 0 的原则, 寻找现阶段矩阵中张角的最小值 $\min(\theta_{sij})$, 确定关联对。由于通过最优化关联矩阵的方式不能保证每一对数据关联的结果都满足测量

站的精度要求,所以还需要判断当前关联结果对应的张角是否在测量站的测角精度范围内,进一步降低错误关联的概率:

$$\begin{cases} \text{success, } \min(\theta_{ij}) \leq \sigma \\ \text{failed, } \min(\theta_{ij}) > \sigma \end{cases} \quad (8)$$

由于 θ_{sij} 是对原始角度根据航迹信息更新过的角度,会与真实角度存在一定的差异,所以在检验测角精度时采用原始角度 θ_{ij} 。

基于局部最优的双站多目标数据关联步骤如下:

(1) $\forall i = 1, 2, \dots, N_1, j = 1, 2, \dots, N_2$, 计算每对待配准测角所对应的张角 θ_{ij} , 形成关联矩阵 P ;

(2) 根据每帧图像的航迹信息对关联矩阵 P 进行缩量更新,生成关联矩阵 P_s ;

(3) 在矩阵 P_s 中寻找最小的张角 $\min(\theta_{sij})$, 意味着站 S_1 第 i 个测角和站 S_2 的第 j 个测角为潜在关联对;

(4) 利用式(8)对当前潜在测量对 θ_{ij} 进行检验,若满足测站的精度要求,对应假设 1 的内容,将矩阵 P 中的 θ_{sij} 设为一个较大的数值 INF,后面将不再参与配准;

(5) 循环执行步骤(2)和(3),直至矩阵 P 中所有的数据都变为 INF 或者某一次 $\min(\theta_{ij})$ 大于测角精度。

3 计算机仿真结果与分析

红外双站多目标配准系统是红外探测设备的一个分支,本文基于红外成像的目标角度数据重点研究双站多目标的配准算法,而不关注目标的检测和航迹匹配过程。

现阶段的红外搜索跟踪系统可观测目标个数 X ,为了验证算法的有效性,在计算机仿真中设置 5 个观测目标,在空间中分别呈现“一”字形和“人”字形编队,测站 S_1 的位置为 $[0, 0, 0]$, 测站 S_2 的位置为 $[8 \text{ km}, 0.8 \text{ km}, 0]$ 。呈“一”字形编队的目标位置为 $[5 \text{ km} \pm 1 \cdot d, 5 \text{ km} \pm 1 \cdot d, 3 \text{ km}]$, $l = 0, 1, 2, d$ 为目标之间的距离;“人”字形编队的目标位置为 $[5 \text{ km} \pm 1 \cdot d \cdot \cos(\alpha), 5 \text{ km} \pm 1 \cdot d \cdot \sin(\alpha), 3 \text{ km}]$, α 设为 30° 。图 3 为目标与双站之间的位置关系,此时设置目标间距为 1 km。

在以上仿真场景的基础上,针对两种编队情况下目标距离对关联结果的影响,进行了基于最小张角的 1000 次蒙特卡洛仿真实验,仿真实验结果如表 1 所示。

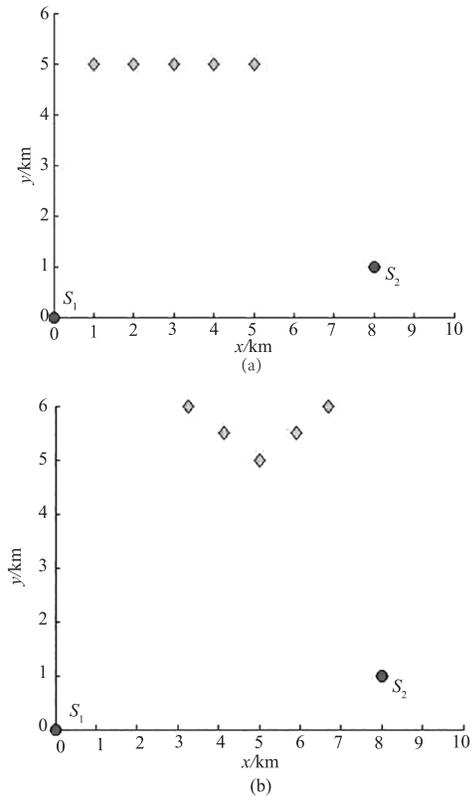


图 3 双站和目标的位置关系

Fig. 3 Positional relationship between the dual station and the target

表 1 不同目标距离时关联正确率的对比

Tab. 1 Comparison of correlation correctness at different target distances

d	测角精度 σ / mrad	航迹匹配前	
		一字编队	人字编队
100	3	1	1
50	3	0.99	1
40	3	0.92	1
30	3	0.88	0.99
25	3	0.5	0.98

从表 1 中可以看出,当目标距离和测角精度相同时,针对两种编队的情况,本文算法的关联正确率均比较高;目标间距 50 m 时,本文算法的人字编队比一字编队的关联正确率低,这是因为当目标连线与设备连线共面时,会出现“鬼点”^[18],目标连线与设备连线的夹角较小时,会出现近似“鬼点”,“鬼点”对关联正确率的影响比较大,此情况在本算法中通过航迹匹配的方式得以缓解。

一般情况下,红外探测设备的测角精度约在 3 mrad 左右,从表 1 可以看出,此条件下,目标间距不小于 50 m 时,本文算法的关联正确率高达 99 %。

表 2 为目标间距为 30 m 时,不同的测角精度对目标关联正确率的影响。

表 2 不同测角精度时关联正确率的对比

Tab. 2 Comparison of correlation correctness at different goniometric accuracies

d	测角精度 σ /mrad	航迹匹配前	
		一字编队	人字编队
30	5	0.78	0.98
30	4	0.82	0.98
30	3	0.88	0.99
30	2	0.95	1
30	1	0.99	1

从表 2 可以看出,随着设备测角精度的减小,目标的关联正确率越来越高。

针对目标连线与设备连线共面时形成“鬼点”或者近似“鬼点”而影响数据关联的问题,本算法将结合目标的航迹信息进行处理。从表 1 中可以看出,一字编队的情况最容易受影响,所以本文以一字编队为

表 4 算法关联正确率和性能对比

Tab. 4 Algorithm correlation correctness and performance comparison

d	测角精度 σ /mrad	本文算法		文献[13]算法	
		正确率	运算时间/ms	正确率	运算时间/s
30	4	0.94	0.016	0.72	22
30	3	0.97	0.016	0.7	25
30	2	0.99	0.016	0.67	27

从表 4 中可以看出,在相同的测角精度和目标距离情况下,本文算法的关联正确率高于文献[13]算法的同时,算法的耗时也较少。

4 结 论

本文针对双站多目标配准问题,提出一种基于最小张角和目标航迹匹配的数据关联算法。该方法首先建立双站的张角矩阵,然后根据目标的航迹匹配信息对张角矩阵进行缩量更新,最后根据最小张角和局部最优的原则选取双站的最佳数据关联对,从而在保证最高关联正确率的前提下提高关联的效率。仿真结果表明,本算法的数据关联效率较高,耗时较少,适合实际工程应用,为双站被动测距奠定了理论基础,具有较高的应用价值。

参考文献:

[1] Yue Juan, Li Fanming, Gao Sili. Infrared multi-target du-

例,航迹匹配前后的目标关联正确率如表 3 所示。

表 3 航迹匹配前后的关联正确率对比

Tab. 3 Correlation correctness comparison before and after track matching

d	测角精度 σ /mrad	匹配前	匹配后
		正确率	正确率
30	5	0.78	0.92
30	4	0.82	0.94
30	3	0.88	0.97
30	2	0.95	0.99
30	1	0.99	1

从表 3 可以看出,经过每个红外设备的目标识别和航迹匹配后,本算法对目标的关联正确率得到了大幅度的提升。在本文的仿真场景中,对于 3 mrad 测角精度的情况,当目标距离为 30 m 时,目标的关联正确率提升到了 97 %。

基于以上场景,在目标关联正确率和算法性能上与文献[13]中的算法进行对比,如表 4 所示。

al-station positioning based on maximum density estimation in track direction[J]. Optics and Precision Engineering, 2022, 30(12):1509-1522. (in Chinese)

岳娟,李范鸣,高思莉.基于航迹方向最大密度估计的红外多目标双站定位[J].光学精密工程,2022,30(12):1509-1522.

[2] Ding S. Research on non-uniformity correction technology of airborne infrared small target detection system[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2021. (in Chinese)

丁帅.机载红外小目标探测系统非均匀性校正技术研究[D].北京:中国科学院大学,2021.

[3] Yue Juan, Gao Sili, Li Fanming, et al. GPS-based infrared imaging direction finding cross-location[J]. Laser & Infrared, 2019, 49(12):1447-1454. (in Chinese)

岳娟,高思莉,李范鸣,等.基于GPS的红外成像测向交叉定位方法[J].激光与红外,2019,49(12):1447-1454.

- [4] Geng Aoting. Research on key technologies of multi-station passive location based on angle of arrival[D]. Nanchang; Nanchang University, 2023. (in Chinese)
耿傲婷. 基于 AOA 的多站无源定位关键技术研究[D]. 南昌:南昌大学, 2023.
- [5] Ren Han. Research on passive location technology of new radar signals in complex environment[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2023. (in Chinese)
任汉. 复杂环境下新体制雷达信号的无源定位技术研究[D]. 北京:中国科学院大学, 2023.
- [6] Chen Yuyu, Yang Yuming, Li Houbiao. Direction-finding cross position based on grid density peaks clustering[J]. Electronics Optics & Control, 2023, 30(4): 40-44. (in Chinese)
陈豫禹, 杨宇明, 李厚彪. 基于网格密度峰值聚类的测向交叉定位[J]. 电光与控制, 2023, 30(4): 40-44.
- [7] Jiang Yiwu, Wang Minyu, Chen Fengli. Algorithm of false location elimination based on range threshold judgment in cross-location[J]. Modern Radar, 2008, 30(8): 46-48. (in Chinese)
姜亦武, 王明宇, 陈锋莉. 基于距离门限判决的交叉定位假点剔除算法[J]. 现代雷达, 2008, 30(8): 46-48.
- [8] He S, Shin H. -S, Tsourdos A. Distributed joint probabilistic data association filter with hybrid fusion strategy[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2019, 69(1): 286-300.
- [9] He S, Shin H. -S, Tsourdos A. Information-theoretic joint probabilistic data association filter[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2020, 66(3): 1262-1269.
- [10] Tang Q, Liang J. Maneuvering multitargets tracking system using surveillance multisensors[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2021, 60: 1-12.
- [11] Jiang Weite, Yang Luing, Yang Yaqiao. Quadratic clustering algorithm based on least distance in DOA location[J]. Fire Control & Command Control, 2009, 34(10): 25-28. (in Chinese)
蒋维特, 杨露菁, 杨亚桥. 测向交叉定位中基于最小距离的二次聚类算法[J]. 火力与指挥控制, 2009, 34(10): 25-28.
- [12] Wang Guanqun, Zhang Chunhua, Zhang Shuran. Joint multi-station target association and positioning based on divide-and-conquer and greedy thoughts[J]. Acta Armamentarii, 2021, 42(12): 2700-2709. (in Chinese)
王冠群, 张春华, 张舒然. 基于分治贪心思想的联合多站目标关联定位[J]. 兵工学报, 2021, 42(12): 2700-2709.
- [13] Tian Yie, Ji Hongbing, Ou Yangcheng. Data association based on the cotangent of angles in multiple passive sensors[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010, 32(10): 2331-2335. (in Chinese)
田野, 姬红兵, 欧阳成. 基于角度余切值的多被动传感器数据关联[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(10): 2331-2335.
- [14] Li Qinglan, Wang Yunfeng. Research on bearing measurements association method in passive locating[J]. Computer Technology and Development, 2016, 26(2): 110-113. (in Chinese)
李卿澜, 王运锋. 无源测向定位中测向数据关联方法研究[J]. 计算机技术与发展, 2016, 26(2): 110-113.
- [15] Sheng Weidong, Lin Liangkui, An Wei, et al. A passive multisensor multitarget track association algorithm based on global optimization[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010, 32(7): 1621-1625. (in Chinese)
盛卫东, 林两魁, 安玮, 等. 基于全局最优的被动多传感器多目标轨迹关联算法[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(7): 1621-1625.
- [16] Sun Peng, Xiong Wei. K-means cluster and fusion algorithm for passive bearing-crossing localization system[J]. Electronics Optics & Control, 2016, 23(10): 36-40. (in Chinese)
孙鹏, 熊伟. 测向交叉定位系统中的 K-means 聚类融合算法[J]. 电光与控制, 2016, 23(10): 36-40.
- [17] Liu Hang, Dou Lihua, Pan Feng, et al. Research on data association in three passive sensors network[C]//2007 IEEE International Conference on Control and Automation, Guangzhou: IEEE, 2007: 3235-3238.
- [18] Li Songzhou, Zhou Di, Du Runle, et al. Condition for forming ghost nodes in multi-sensor multi-target passive tracking[J]. Acta Armamentarii, 2022, 43(12): 3103-3112. (in Chinese)
李松洲, 周荻, 杜润乐, 等. 多传感器多目标被动跟踪的“鬼点”形成条件[J]. 兵工学报, 2022, 43(12): 3103-3112.