

· 协同探测应用技术 ·

DOI:10.16592/j.cnki.1004-7859.2024.09.011

雷达组网联合目标分配与指向规划方法

兰剑^{*1}, 周琳², 龚彦豪¹, 吴生盛¹

(1. 西安交通大学自动化科学与工程学院, 陕西西安 710049)

(2. 南京电子技术研究所, 江苏南京 210039)

摘要:现代雷达大多会被安装在可旋转的平台上,其阵面指向可动态调节。但当前主流的目标分配算法通常假定雷达的阵面指向固定不变,忽略了其灵活调整的能力,从而在一定程度上限制了雷达组网在复杂战场环境中的整体作战效能。针对上述问题,一种联合目标分配与指向规划算法被提出。该算法首先通过扩展分配矩阵的维度,将原目标-传感器分配问题细化至阵面指向层面;其次,通过引入新约束条件,确保每部雷达在每个时刻仅选择一种阵面指向;最后,结合模型特性设计遗传算法,实现对该分配问题的高效求解。仿真实验证明:相较于传统假设阵面固定的目标分配方法,这一种联合目标分配与指向规划的新方法可得到更高的目标覆盖率与覆盖重数。

关键词:雷达组网;目标分配;阵面指向;遗传算法

中图分类号: TN957 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-7859(2024)09-0085-05

引用格式: 兰剑, 周琳, 龚彦豪, 等. 雷达组网联合目标分配与指向规划方法[J]. 现代雷达, 2024, 46(9): 85-89.

LAN Jian, ZHOU Lin, GONG Yanhao, et al. Joint target assignment and orientation planning method for radar networking[J]. Modern Radar, 2024, 46(9): 85-89.

Joint Target Assignment and Orientation Planning Method for Radar Networking

LAN Jian^{*1}, ZHOU Lin², GONG Yanhao¹, WU Shengsheng¹

(1. School of Automation Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an Shaanxi 710049, China)

(2. Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing Jiangsu 210039, China)

Abstract: Most modern radars are installed on rotatable platforms, allowing their array orientations to be dynamically adjusted. However, current mainstream target assignment algorithms often assume that the radar array orientations are fixed, neglecting their flexible adjustment capabilities, thereby limiting the overall operational effectiveness of radar networks in complex battlefield environments. To address this issue, a joint target assignment and orientation planning algorithm has been proposed. Firstly, by extending the dimensions of the assignment matrix, the target-sensor assignment is refined to the level of array orientation. Secondly, by introducing new constraint conditions, it ensures that each radar selects only one array orientation at each moment. Finally, a genetic algorithm is designed based on the model characteristics to achieve efficient solution of the assignment problem. Simulations demonstrate that compared to traditional fixed-orientation methods, the proposed assignment method achieves higher target coverage and overlap coverage.

key words: radar networking; target assignment; array orientation; genetic algorithm

0 引言

随着战争环境复杂化,单雷达效能受限,雷达组网因其显著提升探测效能和抗干扰能力的优势^[1-3]日益受到重视。

雷达组网目标分配属于传感器管理领域,为雷达组网的核心技术之一^[4],近年来得到了广泛的研究。文献[5]将雷达组网聚类成几个子集,每个子集专门用于跟踪特定目标,从而在观测时间和通信负载方面实现资源节省。文献[6]提出了一种协方差控制方法来选择传感器组合,以将目标的跟踪误差限定在特定

范围内。文献[7]采用改进遗传算法,避免了非可行解的产生,实现了目标分配问题的快速求解。

现有方法大多认为任务期间各雷达的探测范围是固定不变的。然而实际上,现代雷达大多会被安装在可旋转的平台上,以灵活地应对不同方向、不同高度的威胁。合理利用雷达阵面可调节的特性,可以在任务期间进一步提高雷达组网的作战效能。

针对所述问题,本文提出一种雷达组网联合目标分配与指向规划方法,考虑雷达转台灵活性,通过扩展分配矩阵维度,将目标-传感器分配细化至阵面指向级,构建相应模型。并设计遗传算法以高效求解该模型。仿真实验说明了本文方法的有效性。

收稿日期:2024-05-16 修订日期:2024-07-15

本文聚焦于雷达组网目标分配问题,故假定目标位置已知以简化研究。实际中,目标状态需通过定位跟踪技术从含噪声的量测中估计得到,详见文献[8]。未特别说明时,文中目标位置均视为真实值。

1 应用背景与问题描述

雷达组网的部署依据任务需求与监测范围的不同呈现多种形式,但为了兼顾雷达组网覆盖的全面性与冗余性,组网的相邻雷达之间通常都会存在一定的重叠探测区域。图1为一个典型的线状部署场景,其优势为具有大面积的正面监测区域,能及时定位入侵目标,为后续应急操作争取时间,常见于边境、沿海等区域^[9]。

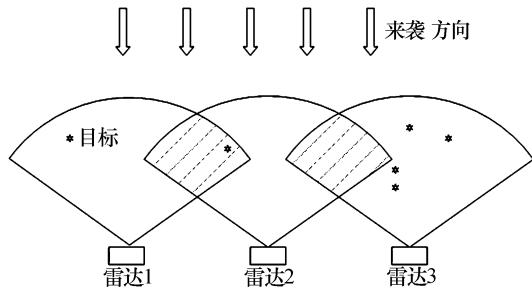


图1 雷达组网部署示意图
Fig.1 Radar network deployment diagram

图1中,雷达的天线阵面指向相同,虚线部分为雷达的重叠探测区域,空白部分为各自的专属探测区域。

即使现代雷达大多都具备转动阵面的功能,现有目标分配方法大多假设雷达的探测区域一经部署后便不再发生变化,位于各雷达专属探测区域的目标只能分配给该雷达进行跟踪。这种分配方法会造成一定程度的资源浪费,当目标集中出现在雷达专属区域时,会给该雷达造成较大资源压力,而其他雷达无法进行支援,如图1所示。

实际上在保证来袭方向全覆盖的条件下,各雷达阵面还是可以进行一定程度的旋转,以分担相邻雷达的目标跟踪压力,如图2所示。

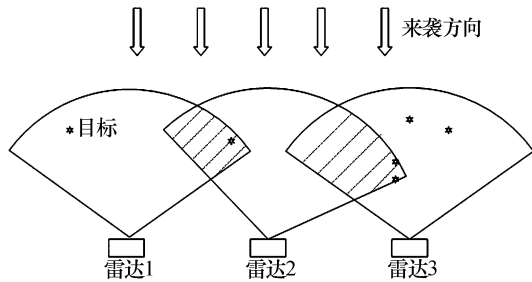


图2 任务过程中阵面旋转示意图
Fig.2 Radar orientation rotation diagram

综上所述,为了充分利用雷达资源,本文假设任务期间雷达的阵面指向是可变的,并提出一种雷达组网联合目标分配与指向规划方法。该方法通过分配矩阵

扩维,将目标-传感器分配细化至目标-传感器阵面指向分配,以提升雷达组网的作战效力。

2 数学模型

2.1 基于探测时间窗的任务划分

根据雷达对目标的探测能力,可以得到雷达对目标的可探测时间窗口。假设雷达的可探测范围为完整的圆,得到雷达与目标在每时刻的可探测关系矩阵

$$\mathbf{S}(t) = \begin{bmatrix} s_{11}(t) & s_{12}(t) & \cdots & s_{1J}(t) \\ s_{21}(t) & s_{22}(t) & \cdots & s_{2J}(t) \\ \vdots & \vdots & s_{ij}(t) & \vdots \\ s_{I1} & s_{I2}(t) & \cdots & s_{IJ}(t) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:元素 $s_{ij}(t) = 1$,则说明 t 时刻,雷达 i 具有完成针对目标 j 探测任务的能力;再根据 $\mathbf{S}(t)$,使用文献[10]中的任务分解原则将总体任务划分为 k 个时间段并得到 \mathbf{S}_k

$$\mathbf{S}_k = \begin{bmatrix} s_{11k} & s_{12k} & \cdots & s_{1,Jk} \\ s_{21k} & s_{21k} & \cdots & s_{2,Jk} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_{N1k} & s_{N2k} & \cdots & s_{N,Jk} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{S}_k = \mathbf{S}(t), t \in [t_{k-1}, t_k] \quad (3)$$

假设雷达在第 k 个任务时段内的可探测半径圆内共有 D 个目标,那么以每个目标与雷达的相对方位角为雷达的扇面边缘,都可以得到雷达的一种有效扇面指向。则雷达在第 k 个任务时段共有 D 种不同的有效扇面指向。

根据雷达的 D 个不同扇面指向,可以将1台雷达扩维成 D 台位置相同、指向不同的子雷达装备,且子装备的数量与雷达可探测半径圆内的目标数量保持一致,并可能随时间发生变化。使用扩维法后, \mathbf{S}_k 中的每一个元素 s_{njik} 被扩维为向量,表示由装备 n 扩维出的若干有效指向的子装备

$$\mathbf{S}_{njik} = [s_{njik}^1 \ s_{njik}^2 \ \cdots \ s_{njik}^D] \quad (4)$$

$$s_{njik}^d = \begin{cases} 0, & k \text{ 时, 雷达 } n \text{ 指向 } d \text{ 不可探测到目标 } j \\ 1, & k \text{ 时, 雷达 } n \text{ 指向 } d \text{ 可探测到目标 } j \end{cases} \quad (5)$$

2.2 决策变量

多雷达协同任务分配,本质为确定每个划分好的任务时间段内,各个雷达满足约束的最优探测目标集和最优指向,其可以描述为01规划问题。定义第 k 个任务时段的决策矩阵 \mathbf{M}_k 如下

$$\mathbf{M}_k = \begin{bmatrix} X_{11k} & X_{12k} & \cdots & X_{1,Jk} \\ X_{21k} & X_{22k} & \cdots & X_{2,Jk} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{N1k} & X_{N2k} & \cdots & X_{N,Jk} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: \mathbf{M}_k 表示在第 k 个任务时段下, 雷达 n 对目标 j 的分配决策。

使用扩维方法, 若雷达 n 在 k 任务时段中有 D 个扇面指向, 则 \mathbf{X}_{nj} 可扩维为 D 维向量, 表示由雷达 n 扩维出的若干位置重合, 指向不同的子装备

$$\mathbf{X}_{nj} = [x_{nj}^1 \quad x_{nj}^2 \quad \cdots \quad x_{nj}^d \quad \cdots \quad x_{nj}^D] \quad (7)$$

$$x_{nj}^d = \begin{cases} 0, & k \text{ 时, 雷达 } n \text{ 不探测目标 } j \\ 1, & k \text{ 时, 雷达 } n \text{ 以指向 } d \text{ 探测目标 } j \end{cases} \quad (8)$$

由于 x_{nj}^d 是雷达 n 扩维出的若干互斥子装备, 在同一任务时段下探测同一目标时, 同一雷达扩维出的子装备集合里只能有一个子装备存在, 因为一台雷达在某一时刻中只能以一种指向探测特定目标。因此对于扩维矩阵 \mathbf{X}_{nj} 有

$$\sum_{d=1}^D x_{nj}^d = 1 \quad (9)$$

2.3 目标函数

多雷达联合任务分配的目标, 是在雷达传感器数量与可用资源受限的条件下, 在雷达-目标的可探测窗口时间内, 最大化雷达整体的效能。目标函数包含以下三个按照优先级排序的子指标:

(1) 在雷达-目标的可探测窗口时间内, 雷达对目标的覆盖数量应最大化, 尽可能不遗漏目标

$$f_1(\mathbf{X}_k) = \sum_{j=1}^J \left(\sum_{n=1}^N x_{nj}^d \geq 1 \right)_{\text{bool}} \quad (10)$$

(2) 在保证覆盖目标数量的条件下, 调用多台雷达同时跟踪同一目标, 实现多重覆盖, 交叉定位提高跟踪精度

$$f_2(\mathbf{X}_k) = \sum_{j=1}^J \sum_{n=1}^N x_{nj}^d \quad (11)$$

总体的目标函数是由以上子指标加权求和构成

$$f(\mathbf{X}_k) = \sum_{p=1}^2 a_p \times f_p(\mathbf{X}_k) \quad (12)$$

式中: a_p 为指标权重, 可用以调整各子指标的优先级。

2.4 约束条件

本文中分配问题有以下约束:

(1) 雷达-目标可探测约束: 当分配雷达 n 在 k 时段时跟踪目标 j , 需要目标 j 在雷达 n 探测范围内, 满足可视要求

$$x_{nj}^d \leq s_{nj}^d \quad (13)$$

式中: s_{nj}^d 为 0-1 变量, 表示 k 时段目标 j 是否在雷达 n 指向 d 的探测范围内。

(2) 雷达资源约束: 雷达探测目标消耗的资源不得超过雷达的总资源

$$r \times \left[\sum_{j=1}^J \left(\sum_{d=1}^D x_{nj}^d = 1 \right)_{\text{bool}} \right] \leq R \quad (14)$$

式中: r 为跟踪探测每个目标消耗的资源数; R 为雷达的总资源数。

(3) 同雷达指向唯一约束: 在使用雷达扩维方法后, 同一雷达的不同指向可视为位置相同的互斥子雷达, 同一雷达同一时段不能出现多种指向

$$\sum_{d=1}^D \left(\sum_{j=1}^J x_{nj}^d \right)_{\text{bool}} = 1 \quad (15)$$

3 基于改进遗传算法的算法设计

遗传算法 (GA) 起源于 1975 年, 由美国的 John Holland 提出, 他通过研究生物进化的规律, 最终设计了遗传算法。

GA 主要包括种群初始化, 选择算子, 变异算子, 交叉算子, 得到最优解等几个步骤, 其框图如图 3 所示。

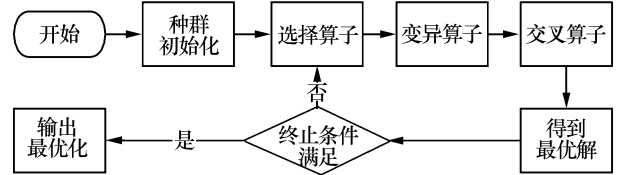


图 3 遗传算法流程图
Fig. 3 GA flow diagram

本文在 GA 的基础上, 改进算法中的编码、种群初始化和变异三个环节, 提出一种改进遗传算法, 用以准确高效地获得雷达组网联合目标分配与指向规划问题的最优解。

3.1 编码

GA 一般使用二进制编码, 这种编码方式在比较简单的优化问题中具有较好表现。在本文要解决的雷达组网联合目标分配与指向规划问题中, 需要同时优化包含雷达-目标分配和雷达指向多种决策, 如果使用二进制的编码方式会使得染色体过于冗长, 同时使得解码操作过于繁琐, 影响算法的进化寻优效率, 因此二进制的编码方式并不适用。

本文使用多层实数编码方法。假设整体任务被划分为 k 个时间段, 则每个染色体按 k 个时间段分为 k 层; 雷达在资源约束下可探测多个目标, 在每个基因位中用数组表示, 空集表示雷达不跟踪任何目标。同时, 染色体需要包含雷达的扇面指向信息, 每台雷达扇面指向为跟踪目标数组中的第一个目标与地基雷达的相

对方向。

3.2 种群初始化

为了提高算法寻优效率,本文使用基于贪婪思想的种群初始化方法。已知雷达的资源有限,初始化染色体时,应尽可能多使用雷达资源,达到跟踪更多目标和提升目标跟踪精度的目标。初始化步骤如下:

- (1) 随机给雷达分配可探测目标集合中的目标;
- (2) 根据所分配的目标,计算出雷达的扇面指向,重新计算雷达扇面内的可探测目标集合;
- (3) 计算雷达剩余资源,若剩余资源足够,则在雷达扇面内的可探测目标集合随机选取目标;
- (4) 从雷达可探测目标集合中删除选择的目标;
- (5) 判断雷达是否还有剩余资源,若没有资源则结束;
- (6) 判断雷达可探测目标集合是否为空,若为空则结束;
- (7) 重复上述(3)~(6)步。

3.3 变异

为了让变异后产生的解均为雷达组网联合目标分配与指向规划问题的可行解,避免染色体修复操作,提高算法优化效率,结合上文提出的扩维方法,本文使用子装备替换的变异方法。

当染色体中某个基因位被选中进行变异时,确定该基因位对应的任务时段和雷达,得到在该任务时段下,该雷达扩维出的子雷达装备集合,再从子雷达装备集合中随机挑选一个子装备,并将其跟踪目标信息编码后覆盖到需要变异的基因位中,完成算法的变异操作,具体操作如图4所示。

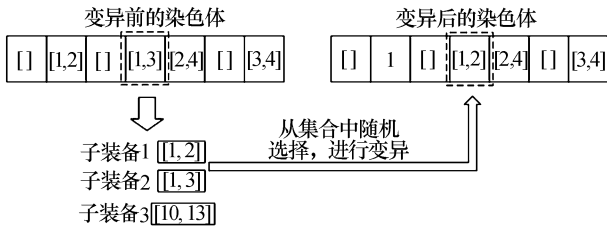


图4 变异操作示意图
Fig.4 Mutation operation diagram

4 仿真实验

4.1 仿真场景设置

为了验证本文算法的正确性和合理性,考虑如下的仿真场景。仿真场景总时长为70s,场景中共有3台雷达,雷达参数如表1所示。

表1 仿真场景雷达参数

雷达编号	雷达位置/m	探测距离/m	初始指向/rad
雷达1	[100,100]	200	0.5π
雷达2	[200,100]	200	0.5π
雷达3	[300,100]	200	0.5π

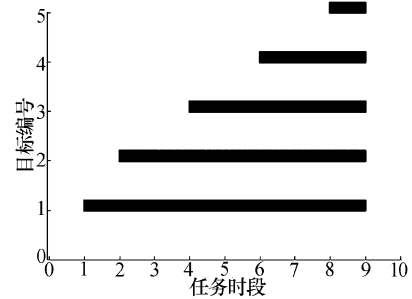
共有5个可被雷达探测的目标,目标初始位置与速度如表2所示。

表2 仿真场景目标信息

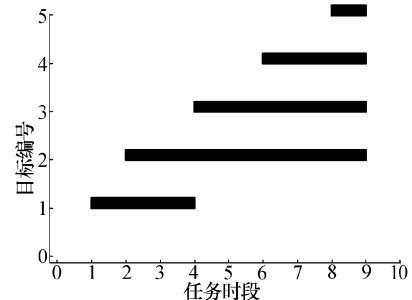
目标编号	初始位置/m	速度大小/($m \cdot s^{-1}$)	速度方向/rad
目标1	[0,300]	5	1.5π
目标2	[100,350]	5	1.5π
目标3	[200,400]	5	1.5π
目标4	[300,450]	5	1.5π
目标5	[500,500]	5	1.5π

4.2 仿真结果与分析

针对4.1中的典型场景,通过任务划分可将总体任务划分为9个任务时段,使用本文提出的算法进行雷达组网协同目标分配与指向规划计算,和雷达指向固定的目标分配方法进行对比,得到的目标分配时序图如图5所示。



a) 本文算法分配结果时序图
a) Sequence chart using proposed algorithm



b) 固定指向算法分配结果时序图
b) Sequence chart using fixed orientation

图5 目标分配时序图

Fig.5 Target assignment sequence chart

由时序图可计算得到不同方法在该典型场景中对目标的覆盖率与覆盖重数(所有雷达对所有目标的探测次数之和)如表3所示。

表3 计算结果覆盖率与覆盖重数

算法	覆盖率/%	覆盖重数
雷达固定指向算法	42.22	30
本文算法	62.22	32

现截取场景中第7个任务时段对目标分配结果进行分析,该任务时段结束时(第35s)的目标与雷达的坐标位置如图6所示。

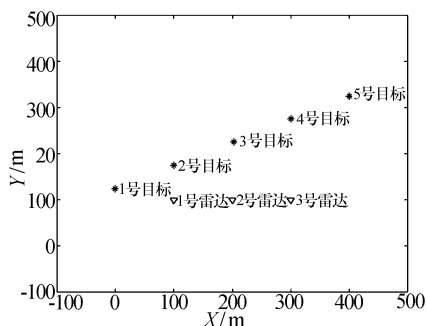


图6 第35 s 目标与雷达坐标图

Fig. 6 Radar and target coordinates at 35th second

不同方法的分配结果如表4所示。

表4 第7任务时段分配结果

Tab. 4 assignment result at 7th time frame

雷达编号	固定雷达指向 算法分配目标 编号	本文算法分配 目标编号	本文算法分配 雷达指向/rad
1	[2,3]	[1,2]	0.71π
2	3	[2,3]	0.65π
3	[3,4]	[3,4]	0.5π

在雷达指向不可更改的分配算法结果中,虽然2号雷达和3号雷达能够同时对多个目标进行探测以提升对目标的覆盖重数,但由于1号目标已经离开1号雷达的固定探测范围,导致在该任务时段对1号目标漏探。在本文提出的算法结果中,动态调整了1号雷达的探测指向,2号与3号雷达的指向保持不变,使得雷达组网能够在该任务时段全覆盖1-6号目标的同时,提高对目标的覆盖重数。

综上所述,本文提出的算法计算出的目标分配方案能够对目标有更高的覆盖率,在保证对目标的高覆盖率的同时,还能够保持较高的目标覆盖重数,提高雷达组网对目标的跟踪精度。

本文方法适用于雷达资源有限场景下的边境防御与重点保护任务。广域监视任务一般要求雷达持续旋转阵面以实现全向探测;雷达冗余时,通过预先大量重叠探测区域即可实现有效覆盖。针对目标数量显著多于雷达数量,雷达资源受限的场景,本文方法通过优化雷达目标指向,可增强组网对目标的覆盖能力。

5 结束语

针对现有目标分配算法假定阵面指向固定不变,限制了雷达组网的作战效能的问题,本文提出一种联合目标分配与指向规划算法,通过扩展分配矩阵维度,将目标-传感器分配细化至阵面指向级,并设计遗传算法以高效求解该分配问题,仿真实验证明了本文方法的有效性,对雷达组网的管理有参考意义。

参考文献 (References)

[1] 邵锡军, 周琳. 预警探测系统雷达组网技术研究[J]. 现代雷达, 2003, 1(9): 1-4.
SHAO Xijun, ZHOU Lin. Radar netting technique in early warn-

ing detection system[J]. Modern Radar, 2003, 1(9): 1-4.

- [2] 丁建江. 组网协同探测闭环与预案的设计[J]. 雷达科学与技术, 2021, 19(1): 7-13.
DING Jianjiang. Design of the closed-loop and pre-arranged planning for synergy-netted detection[J]. Radar Science and Technology, 2021, 19(1): 7-13.
- [3] 丁建江. 概论雷达组网多域融一预案工程化[J]. 现代雷达, 2018, 40(1): 1-6.
DING Jianjiang. An overview on the pre-arranged engineering of multi-domain fusion detection project for radar netted system[J]. Modern Radar, 2018, 40(1): 1-6.
- [4] 罗开平, 姜维, 李一军. 传感器管理述评[J]. 电子学报, 2010, 38(8): 1900-1907.
LUO Kaiping, JIANG Wei, LI Yijun. Review of sensor management[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(8): 1900-1907.
- [5] GODRICH H, PETOPULU A, POOR H. Cluster allocation schemes for target tracking in multiple radar architecture [C]// 2011 Conference Record of the 55th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers. Pacific Grove, CA: IEEE Press, 2011: 863-867.
- [6] KALANDROS M, PAO Y. Covariance control for multisensor systems[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2002, 38(4): 1138-1157.
- [7] 贾斌, 肖兵, 金宏斌. 改进遗传算法在雷达网目标分配中的应用[J]. 计算技术与自动化, 2008, 27(4): 80-83.
JIA Bin, XIAO Bing, JIN Hongbin. Application of an improved genetic algorithm on radar-netting object-distribution[J]. Computing Technology and Automation, 2008, 27(4): 80-83.
- [8] 兰剑. 多源信息目标定位与跟踪[M]. 北京: 电子工业出版社, 2024.
LAN Jian. Multi-source information target location and tracking[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2024.
- [9] 杨阳. 预警探测系统中雷达组网优化部署研究[J]. 科技创新与应用, 2020(31): 50-51.
YANG Yang. Research on radar network optimization deployment in early warning detection system[J]. Technology Innovation and Application, 2020(31): 50-51.
- [10] 孙苗苗, 张逊, 孟祥慈, 等. 基于分割时间窗的武器任务分配优化算法[J]. 战术导弹技术, 2023(3): 42-50.
SUN Miaomiao, ZHANG Xun, MENG Xiangci, et al. Weapon target assignment optimization using the segmented time window[J]. Tactical Missile Technology, 2023(3): 42-50.

作者简介:

兰剑 男, 1983年生, 博士, 教授, 研究方向为信息融合、目标跟踪、性能评估;

周琳 女, 1971年生, 研究员级高级工程师, 研究方向为预警探测系统总体论证、协同应用、系统仿真、系统集成等技术;

龚彦豪 男, 2000年生, 博士研究生, 研究方向为信息融合、传感器管理;

吴生盛 男, 1997年生, 博士研究生, 研究方向为信息融合、传感器管理。