

DOI:10.16356/j.1005-2615.2022.06.003

基于区块链的多先进战机协同作战资源自适应调度

吴诗平¹, 陈 谋¹, 朱荣刚², 贺建良²

(1. 南京航空航天大学自动化学院, 南京 211106; 2. 光电控制技术重点实验室, 洛阳 471000)

摘要: 对于多先进战机协同作战资源调度问题, 需综合考虑先进战机的攻击能力和防御能力, 以作战收益最大和代价最小为目标, 给出最优资源调度方案, 从而实现作战效能的最大化。本文针对资源调度问题中存在的先进战机间相互不信任进而导致作战效能降低的问题, 提出了基于区块链的多先进战机协同作战资源调度框架, 并基于智能合约建立了多先进战机协同作战资源调度数学模型, 同时利用改进遗传算法进行求解。仿真结果表明, 基于区块链的多先进战机协同作战资源自适应调度方法在保证先进战机间相互完全信任的基础上, 确保了战场信息交互的安全性和可靠性, 间接提升了作战效能。

关键词: 协同作战; 资源调度; 区块链; 改进遗传算法; 作战效能

中图分类号: TJ85; TP393 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2022)06-1021-09

Resource Adaptive Scheduling of Cooperative Combat for Multi-advanced Fighters Based on Blockchain

WU Shiping¹, CHEN Mou¹, ZHU Ronggang², HE Jianliang²

(1. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 211106, China;
2. Science and Technology on Electro-Optic Control Laboratory, Luoyang 471000, China)

Abstract: To solve the resource scheduling problem of cooperative combat for multi-advanced fighters, the attack and defense capabilities of the advanced fighters should be comprehensively considered, and the optimal resource scheduling scheme should be given with the goal of maximizing the combat benefits and minimizing the cost. Then, the combat effectiveness can be maximized. This paper aims at the problem that the mutual distrust among advanced fighters leads to the decrease of combat effectiveness in resource scheduling, and proposes a framework based on blockchain for the cooperative combat resource scheduling of multi-advanced fighters. A mathematical model of cooperative combat resource scheduling is established based on smart contract for multi-advanced fighters. The improved genetic algorithm is used to solve this problem. The simulation results show that the resource adaptive scheduling method of cooperative combat based on blockchain for multi-advanced fighters ensures the security and reliability of battlefield information interaction, as well as the complete trust between the advanced fighters, and thus the combat effectiveness is improved.

Key words: cooperative combat; resource scheduling; blockchain; improved genetic algorithm; combat effectiveness

人工智能、云计算和物联网等技术的发展及其在军事领域的广泛应用使现代信息化战争逐渐趋

基金项目: 科技创新 2030——“新一代人工智能”重大项目(2018AA0100800)。

收稿日期: 2021-11-08; **修订日期:** 2022-03-15

通信作者: 陈谋, 男, 教授, 博士生导师, E-mail: chenmou@nuaa.edu.cn。

引用格式: 吴诗平, 陈谋, 朱荣刚, 等. 基于区块链的多先进战机协同作战资源自适应调度[J]. 南京航空航天大学学报, 2022, 54(6): 1021-1029. WU Shiping, CHEN Mou, ZHU Ronggang, et al. Resource adaptive scheduling of cooperative combat for multi-advanced fighters based on blockchain[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2022, 54(6): 1021-1029.

于无人化、智能化以及全域化。战机集群作战和协同作战已经成为现代信息化战争的基本作战样式^[1],在这样复杂的作战背景下,为了提升多战机协同、集群作战效能,对作战资源调度以及作战信息交互可信性问题进行研究具有重要的意义。

作战资源调度主要根据具体的作战任务合理地分配作战资源,以求整体作战效益最大化,其核心技术是资源调度算法。性能优异的资源调度算法可以在很短的时间内精确地求出最优资源调度方案,这对提高作战效率具有重要意义。狼群算法、蜂群算法、蚁群算法以及遗传算法等群智能优化算法因其优异的寻优性能被广泛地用于求解作战资源调度问题。文献[1]借鉴蚁群算法的优化思想来改进狼群算法,提出了一种寻优性能更好的基于信息素启发的狼群算法,能够有效地解决无人机集群作战的火力分配问题;文献[2]针对防空作战体系中多传感器资源调度问题,对传统蝙蝠算法进行改进,并将其用于求解多传感器多目标分配问题;文献[3]在单亲遗传算法的基础上设计了双亲遗传算法,该算法能够更快、更精准地求出多无人机最优资源调度方案,有效地解决了无人机集群作战的任务分配问题。由于遗传算法在解决资源调度问题方面的优异表现及其算法本身潜在的巨大发展空间吸引了广大学者对其进行改进算法方面的研究,主要改进的方面包括进化概率、进化方式以及染色体种群的初始化等。文献[4-5]通过设计自适应交叉概率和自适应变异概率来加快算法的收敛速度;文献[6]提出了一种基于“定序模式”的自适应单点交叉方法和随机交换变异方法来改进交叉算子和变异算子,从而在提升了染色体种群多样性的同时增强了算法的寻优能力;文献[7]利用混沌映射法初始化染色体种群,通过丰富初始种群的多样性来提高其寻到最优解的概率。基于以上研究结果,本文利用混沌反向学习法来初始化染色体种群,以精英保留、优劣兼顾的方式改进选择算子,同时采用“优-中-差”分层诱导交叉、变异改进交叉算子、变异算子,进而提高了遗传算法的优化性能。

多先进战机最优资源调度方案由多先进战机协同执行,故先进战机间的信任程度势必会影响协同作战的效率。区块链是一种去中心化、分布式的数据存储结构,在多先进战机间建立区块链网络,先进战机间的信息交互在区块链上进行,从而在先进战机间建立了一种完全可信的信息交互环境,实现了作战效能的最大化。区块链和资源调度结合的核心是在智能合约内设计资源调度优化模型,然后智能合约根据发布在区块链上的作战信息自动

解算出作战资源调度方案。文献[8]在智能合约内设计了基于协作型协同进化算法的能源电力调度优化模型;文献[9]在智能合约内设计了基于差分进化算法的云制造资源调度优化模型;文献[10]在智能合约内设计了基于Benders分解算法的边缘服务器资源优化调度模型。

基于以上所述,为了确保多先进战机协同作战信息交互的安全性,同时为了加快算法优化求解多先进战机协同作战资源调度问题的速度,本文在设计基于区块链的多先进战机协同作战资源调度框架的基础上,从交叉、变异方式以及染色体种群初始化等方面对传统遗传算法进行改进,提出了一种基于改进遗传算法的多先进战机协同作战资源调度优化模型,并将其写入智能合约。动态作战环境下改进遗传算法相对于传统遗传算法、粒子群算法等智能优化算法能够以更快的速度求得最优资源调度方案。同时由于区块链下先进战机之间相互完全信任,协同作战的整体效能要高于非区块链下多先进战机协同作战的整体效能。

1 问题描述

1.1 基于区块链的多先进战机协同作战资源调度框架设计

参与作战的我方先进战机群去中心化连接建立区块链网络,各先进战机之间通过共识算法来决定由哪架先进战机产生下一个区块,以这样的方式隔一段时间就产生一个区块,将这些区块按照生成的时间顺序进行连接就形成了区块链。区块链的基本构成单元是区块,每个区块都由区块头和区块体组成,区块头包含父区块哈希值、时间戳以及默克尔树根等信息^[9],区块体包含从生成上一区块到当前区块这个时间段内在区块链上发布的作战信息以及根据智能合约解算得出的最优资源调度方案。将改进遗传算法写入智能合约,在智能合约内建立基于改进遗传算法的多先进战机协同作战资源调度优化模型,一旦作战信息在区块链上发布,智能合约便自动解算出当前最优资源调度方案,并将其存储在即将生成的下一区块中。

在 t_0 时刻,区块链上发布初始敌我双方先进战机的作战状态信息,智能合约解算出初始最优资源调度方案,将以上信息打包存入即将生成的编号为 $k-1$ 的区块中;在 t_1 时刻,区块链上发布新增敌方先进战机的作战状态信息,智能合约解算出当前最优资源调度方案,将以上信息打包存入即将生成的编号为 k 的区块中;在 t_2 时刻,区块链上发布新增我方先进战机作战状态信息,智能合约解算出当前

最优资源调度方案,将以上信息打包存入即将生成的编号为 $k+1$ 的区块中。先进战机群在区块链上发布作战信息的同时也能从区块链上查询得到当

前最优资源调度方案,并据此执行作战任务。基于区块链的多先进战机协同作战资源调度框架如图 1 所示。

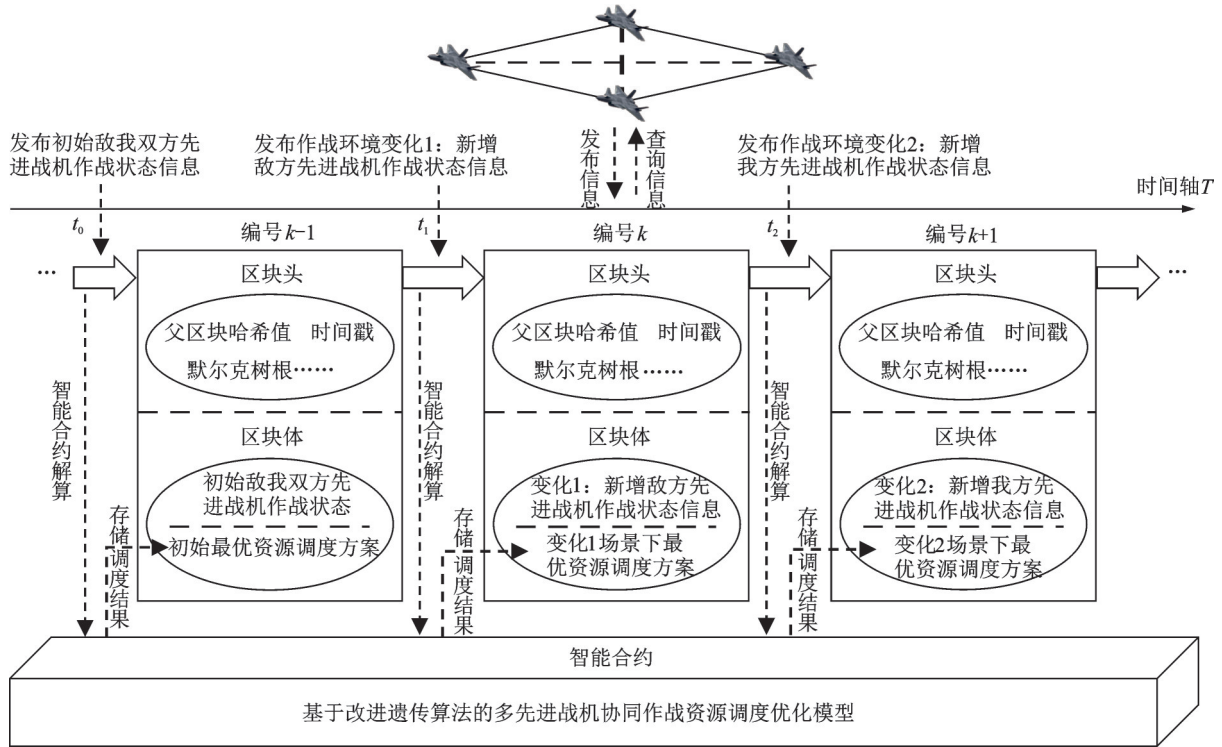


图 1 基于区块链的多先进战机协同作战资源调度框架

Fig.1 Framework of cooperative combat resource scheduling based on blockchain for multi-advanced fighters

1.2 多先进战机协同作战资源调度建模

在智能合约内建立多先进战机协同作战资源调度优化模型,根据在区块链上发布的敌我双方先进战机的作战状态信息,综合考虑其攻击能力和防御能力,以作战收益最大、代价最小为目标构建多先进战机协同作战资源调度数学模型^[11-12]。将相对空战能力作为衡量双方空战态势的标准,建立空战能力指标体系如图 2 所示^[13-14]。

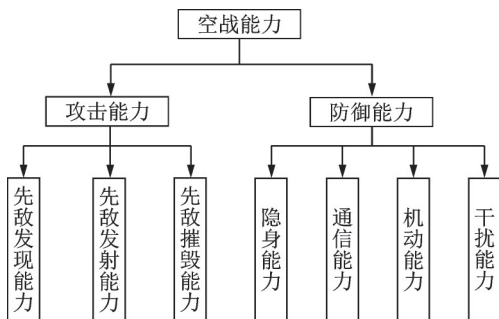


图 2 空战能力指标体系

Fig.2 Index system of air combat capability

1.2.1 攻击能力

先进战机的攻击能力由先敌发现能力、先敌发射能力以及先敌摧毁能力 3 部分构成。正常情况下,先敌发现之后才能先敌发射进而先敌摧毁,构

建攻击能力结构如图 3 所示^[13-14]。

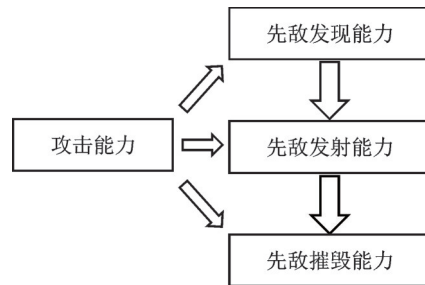


图 3 攻击能力构成

Fig.3 Composition of attack capability

由于先敌发现能力、先敌发射能力以及先敌摧毁能力是依次递进的关系,定义攻击能力 g_1 为^[13-14]

$$g_1 = \psi_1 \times \psi_2 \times \psi_3 \quad (1)$$

式中 ψ_1 、 ψ_2 、 ψ_3 分别为先敌发现能力、先敌发射能力以及先敌摧毁能力。先敌发现能力与敌我战机的相对位置关系以及红外、雷达等探测装备的性能有关;先敌发射能力与探测雷达、中远距雷达弹的性能以及双方战机的相对位置关系有关;先敌摧毁能力与导弹的命中能力、导弹的毁伤能力以及敌我战机间的距离有关。此 3 项能力指标的具体数学表达式请参见文献^[13-14]。

1.2.2 防御能力

先进战机的防御能力由隐身能力、通信能力、干扰能力以及机动能力4部分构成,这四者之间相互独立,没有先后关系,构建防御能力结构如图4所示^[13-14]。

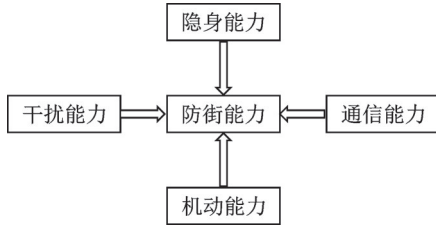


图4 防御能力构成

Fig.4 Composition of defense capability

结合上述分析,定义防御能力 g_2 为^[13-14]

$$g_2 = \lambda_1 \times \chi_1 + \lambda_2 \times \chi_2 + \lambda_3 \times \chi_3 + \lambda_4 \times \chi_4 \quad (2)$$

式中: $\chi_1, \chi_2, \chi_3, \chi_4$ 分别为隐身能力、通信能力、机动能力以及干扰能力; $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ 分别为各项能力权重,且和为1。隐身能力与我方战机的雷达反射截面积以及敌方战机探测雷达的性能有关;通信能力与友机间的距离、无线电台和数据链的可靠性以及无线电台的最大作用距离有关;机动能力与战机最大可用过载、过失速机动能力等机动参数有关;干扰能力与箔条、红外干扰弹的无源干扰以及电子干扰等的有源干扰有关。此4项能力指标的具体数学表达式请参见文献[13-14]。

多先进战机协同作战过程中,假设由我方 m 架战机对抗敌方 n 架战机,综合上述定义的先进战机攻击能力 g_1 和防御能力 g_2 ,则我方第 i 架先进战机相对敌方第 j 架先进战机的空战能力 $g(i, j)$ 为^[13-14]

$$g(i, j) = \omega_1 \times g_1(i, j) + \omega_2 \times g_2(i, j) \quad (3)$$

式中 ω_1, ω_2 为各项权重,且和为1。

将式(1,2)代入式(3),可得

$$g(i, j) = \omega_1 \times [\psi_1(i, j) \times \psi_2(i, j) \times \psi_3(i, j)] + \omega_2 \times [\lambda_1 \times \chi_1(i, j) + \lambda_2 \times \chi_2(i, j) + \lambda_3 \times \chi_3(i, j) + \lambda_4 \times \chi_4(i, j)] \quad (4)$$

同理,根据上述建立的先进战机攻击能力、防御能力数学模型,也可以求得敌方第 j 架战机相对于我方第 i 架战机的空战能力 $g'(j, i)$ 。据此,可以得出我方 m 架战机相对于敌方 n 架战机的空战能力矩阵 $G = [g(i, j)]_{m \times n}$ 以及敌方 n 架战机相对我方 m 架战机的空战能力矩阵 $G' = [g'(j, i)]_{n \times m}$ 。

区块链下和非区块链下多先进战机协同作战资源调度的区别在于区块链下多先进战机间相互完全信任,而非区块链下多先进战机间互不完全信

任,先进战机间的相互信任程度会通过影响协同作战信息交互环境来影响多战机协同空战效果,因此结合多先进战机间的相互信任程度,追求作战收益最大、代价最小,设计多先进战机协同作战资源调度目标函数为^[15]

$$Z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (\bar{g}(i, j) - \bar{g}'(j, i)) \cdot \zeta_{ij} \cdot T_i \quad (5)$$

式中: Z 为作战效能; m, n 分别为参与调度的我方先进战机的数量和敌方先进战机的数量; ζ_{ij} 取值为0或者1, $\zeta_{ij} = 1$ 代表我方第 i 架战机对抗敌方第 j 架战机,反之,则我方第 i 架战机与敌方第 j 架战机间没有相互对抗关系; T_i 表示我方第 i 架先进战机对友机的平均信任程度,区块链下先进战机间相互完全信任, $T_i = 1$,非区块链下先进战机间互不完全信任, $0 \leq T_i < 1$; $\bar{g}(i, j), \bar{g}'(j, i)$ 分别表示对 $g(i, j), g'(j, i)$ 进行归一化处理,具体操作如下^[13-14]

$$\begin{cases} \bar{g}(i, j) = \frac{g(i, j)}{\max\{\max(G), \max(G')\}} \\ \bar{g}'(j, i) = \frac{g'(j, i)}{\max\{\max(G), \max(G')\}} \end{cases} \quad (6)$$

式(5)的约束条件为

$$\sum_{i=1}^m \zeta_{ij} \geq 1 \quad (7)$$

$$\sum_{j=1}^n \zeta_{ij} \leq M_i \quad (8)$$

式中:式(7)表示对于敌方任何一架战机,都要为之分配至少1架我方战机与之对抗;式(8)表示我方第 i 架战机同时对抗的敌方战机的数量上限为 M_i 。

2 基于改进遗传算法的多先进战机协同作战资源调度优化

针对1.2节中构建的多先进战机协同作战资源调度数学模型,本文利用改进遗传算法对其进行优化求解^[16-17],建立基于改进遗传算法的多先进战机协同作战资源调度优化模型,并将其部署进智能合约,一旦作战信息在区块链上发布,智能合约便自行根据此信息解算出最优资源调度方案。遗传算法的主要改进内容如下:根据多先进战机协同作战资源调度的特点,本文设计了以敌方先进战机数量为编码长度和我方先进战机数量为基因值上限的实数编码;结合混沌映射法和反向学习法来初始化染色体种群;将父代、子代染色体融合,以精英保留、优劣兼顾的方式来改进选择算子;采用“优-中-差”分层诱导交叉、变异来改进交叉算子、变异算子。改进遗传算法的详细步骤如下。

步骤 1 染色体编码

假设从区块链上获取的敌我双方参与对抗的先进战机的数量分别为 n 、 m 。以敌方战机为参考对象,敌方每架战机都要为之分配 1 架我方战机与之对抗,因此染色体的编码长度为 n 。染色体上第 i 位基因值 x_i 表示对敌方第 i 架战机,分配我方第 x_i 架战机与之对抗,染色体中每个基因位上的基因值 $x \in [1, m]$,且为整数;以 $n=7$ 、 $m=4$ 为例,若某染色体编码为 3124134,则表示我方第 1 架战机对抗敌方第 2 架、第 5 架战机,我方第 2 架战机对抗敌方第 3 架战机,我方第 3 架战机对抗敌方第 1 架、第 6 架战机,我方第 4 架战机对抗敌方第 4 架、第 7 架战机。

步骤 2 混沌反向学习初始化染色体种群

鉴于混沌映射生成的混沌算子具有很好的随机性,故利用混沌映射法初始化染色体种群能让初始染色体种群在寻优空间随机均匀分布,这样通过提升初始染色体种群的整体多样性来增大寻到最优解的几率。本文采用 sine 混沌映射来进行研究,其公式如下

$$x_{k+1} = \frac{4}{a} \sin(\pi x_k) \quad (9)$$

$$X_k = \text{round}\left(\frac{x_k + 1}{2} \times m + 0.5\right) \quad (10)$$

式中: $0 < a \leq 4$, $-1 \leq x_k \leq 1$, x_k 表示第 k 次迭代 x 的值; $\text{round}(\Phi)$ 运算表示对 Φ 四舍五入取整数。sine 混沌映射初始化染色体种群的具体过程为:首先在 $[-1, 1]$ 内随机生成一个 n 维向量 $[x_{11}, x_{12}, \dots, x_{1n}]$,然后将该向量的每一维都代入式 (9) 迭代 $s_{\text{num}} - 1$ 次,生成 $s_{\text{num}} - 1$ 组 n 维向量,最后将以上这 s_{num} 组向量一起代入式 (10) 生成数量为 s_{num} 的混沌染色体种群 N_1 。

鉴于反向学习是在初始解的基础上通过透镜成像原理产生反向解来扩大可选解的范围这一特点,利用反向学习初始化染色体种群能够产生与原染色体种群对立的染色体种群,这样就在原先的基础上扩大了染色体种群的分布区域,增大了寻到最优解的概率。用 X_k 、 X'_k 依次表示原染色体和经反向学习操作后的反向染色体,由原染色体生成其反向染色体的数学公式如下

$$X'_k = 1 + m - X_k \quad (11)$$

将上述生成的染色体种群 N_1 代入式 (11) 生成数量为 s_{num} 的反向染色体种群 N_2 。合并 N_1 和 N_2 ,以式 (5) 为目标函数计算各染色体的适应度值,并按照适应度值由高到低进行排序,选择前 s_{num} 条染色体构成初始染色体种群。

步骤 3 选择算子

将经过选择操作后的染色体种群视为父代,该

父代经过交叉、变异操作后相对于此父代即为子代。此后每次进行选择操作时,将父代、子代染色体种群组合,按照适应度值由高到低进行排序,为了确保每代中的最优染色体能进入下一代并且新父代染色体种群具有一定的多样性,以优劣兼顾的方式,将前 $s_{\text{num}}/4$ 条染色体和后 $s_{\text{num}}/4$ 条染色体直接复制进入新父代,对于中间的 $3s_{\text{num}}/2$ 条染色体采用轮盘赌算法选取 $s_{\text{num}}/2$ 条染色体进入新父代。

步骤 4 交叉算子

首先根据交叉概率 p_c 对每一条染色体进行评判,将要交叉的染色体加入交配池中,计算交配池中染色体的数量 c_{num} ,并将交配池中的染色体按照适应度值由高到低进行排序,将前 $c_{\text{num}}/4$ 条染色体视为优秀染色体,中间 $c_{\text{num}}/2$ 条染色体视为中等染色体,最末 $c_{\text{num}}/4$ 条染色体视为差染色体。差染色体倾向于与中等染色体、优秀染色体交叉来获取较为优秀的基因段,中等染色体倾向于与优秀染色体交叉来获取优秀的基因段,同时优秀染色体、中等染色体以及差染色体在一定程度上也会存在内部(优秀染色体之间、中等染色体之间、差染色体之间)交叉和向下(优秀染色体与中等染色体、差染色体,中等染色体与差染色体)交叉。“优-中-差”分层诱导交叉原理如图 5 所示。

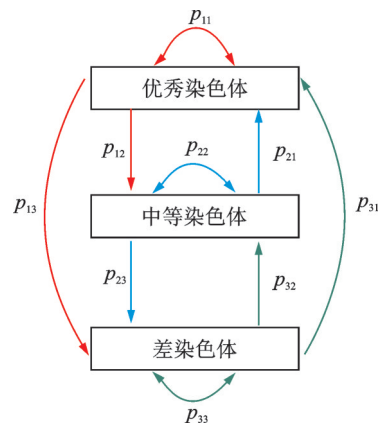


图 5 “优-中-差”分层诱导交叉示意图

Fig.5 “Good-mediocre-bad” stratified induced crossover

由图 5 可见,对于优秀染色体,其与优秀染色体、中等染色体和差染色体交叉的概率依次为 p_{11} 、 p_{12} 、 p_{13} ,且和为 1;对于中等染色体,其与优秀染色体、中等染色体和差染色体交叉的概率依次为 p_{21} 、 p_{22} 、 p_{23} ,且和为 1;对于差染色体,其与优秀染色体、中等染色体和差染色体交叉的概率依次为 p_{31} 、 p_{32} 、 p_{33} ,且和为 1。由此可计算得出,在交配池中优秀染色体与优秀染色体配对的概率为 $p_{11}/3$,优秀染色体与中等染色体配对的概率为 $(p_{12} + p_{21})/3$,优秀染色体与差染色体配对的概率

为 $(p_{13} + p_{31})/3$, 中等染色体与中等染色体配对的概率为 $p_{22}/3$, 中等染色体与差染色体配对的概率为 $(p_{23} + p_{32})/3$, 差染色体与差染色体配对的概率为 $p_{33}/3$, 且和为1。再按照轮盘赌算法产生所有的配对染色体, 并在配对染色体间利用单点交叉法进行交叉操作。

步骤5 变异算子

交叉操作结束后, 将 s_{num} 条染色体按照适应度值的大小由高到低排序, 前 $s_{num}/4$ 条染色体视为优秀染色体, 中间 $s_{num}/2$ 条染色体视为中等染色体, 后 $s_{num}/4$ 条染色体视为差染色体。变异操作分为向上变异、自我突破以及向下变异3种形式。向上变异是染色体朝着比自身优秀的染色体方向变异, 随机选取较优秀染色体上的一位或几位基因位, 将基因值复制到自身染色体的对应基因位上; 自我突破是染色体通过基本位变异的方式来更新自身基因; 向下变异是染色体朝着比自身差的染色体方向变异, 随机选取较差染色体上一位或几位基因位, 将基因值复制到自身染色体的对应基因位上。优秀染色体倾向于自我突破来更新自身基因; 中等染色体倾向于向优秀染色体方向变异, 在优秀染色体的指导变异下, 改善自身染色体的基因质量; 差染色体倾向于向优秀染色体、中等染色体方向变异, 在优秀染色体、中等染色体的指导变异下, 改善自身染色体的基因质量。同时考虑维持染色体种群的多样性, 优秀染色体、中等染色体也会有一定的几率向下变异, 即优秀染色体朝着中等染色体和差染色体的方向变异、中等染色体朝着差染色体的方向变异。“优-中-差”分层诱导变异原理如图6所示。

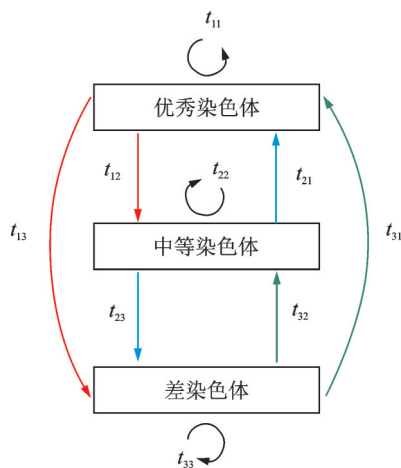


图6 “优-中-差”分层诱导变异示意图

Fig.6 “Good-mediocre-bad” stratified induced variation

由图6可见, 对于优秀染色体, 其向中等染色体、差染色体方向变异的概率为 t_{12} 、 t_{13} , 自我突破的概率为 t_{11} , 且和为1; 对于中等染色体, 其向优秀染

色体、差染色体方向变异的概率为 t_{21} 、 t_{23} , 自我突破的概率为 t_{22} , 且和为1; 对于差染色体, 其向中等染色体、优秀染色体方向变异的概率为 t_{32} 、 t_{31} , 自我突破的概率为 t_{33} , 且和为1。

以变异概率 p_m 对每一条染色体进行评判, 对要变异的染色体, 根据其染色体类型, 利用轮盘赌算法确定其将要执行哪种变异方式, 再按照上述操作对该染色体进行变异。

步骤6 判断算法终止条件

若算法达到最大迭代次数或者优化解满足预设精度要求, 则输出该优化解, 即最优多先进战机协同作战资源调度方案, 算法退出; 否则, 转步骤3, 继续下一次迭代。

综上, 基于改进遗传算法的多先进战机协同作战资源调度优化流程图如下所示。

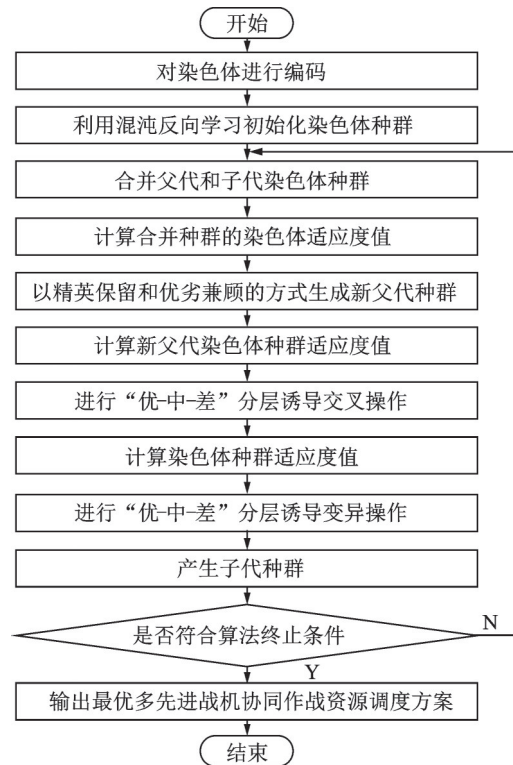


图7 基于改进遗传算法的多先进战机协同作战资源调度优化流程

Fig.7 Optimization process of cooperative combat resource scheduling based on improved genetic algorithm for multi-advanced fighters

3 实验分析

为验证本文提出的基于区块链的多先进战机协同作战资源调度方法的有效性, 以 Windows10 为平台, 利用 python3.8 和 matlab2020b 进行混合仿真实验。采用 python3.8 为编程语言运行区块链, 一旦作战信息在区块链上发布, python3.8 即调用 matlab2020b 执行多先进战机协同作战资源调度优

化算法生成最优资源调度方案。本文在初始资源调度的基础上,引入敌方新增先进战机这一作战环境动态变化方式对本文所提方法进行仿真验证。

(1)初始作战环境下

假设初始作战环境为我方 4 架先进战机 $P_1 \sim P_4$ 对抗敌方 6 架先进战机 $T_1 \sim T_6$, 根据敌我双方先进战机的作战状态信息,可计算得到归一化后我方先进战机相对敌方先进战机的空战能力矩阵 $G = [\bar{g}(i, j)]_{4 \times 6}$ 和敌方先进战机相对我方先进战机的空战能力矩阵 $G' = [\bar{g}'(j, i)]_{6 \times 4}$ 如下

$$G = \begin{bmatrix} 0.668 & 0.700 & 0.263 & 0.579 & 0.822 & 0.376 \\ 0.884 & 0.631 & 0.545 & 0.549 & 0.351 & 0.239 \\ 0.399 & 0.810 & 0.136 & 0.445 & 0.513 & 0.623 \\ 0.559 & 0.381 & 0.869 & 0.453 & 0.701 & 0.283 \end{bmatrix}$$

$$G' = \begin{bmatrix} 0.332 & 0.116 & 0.601 & 0.441 \\ 0.300 & 0.369 & 0.190 & 0.619 \\ 0.737 & 0.455 & 0.864 & 0.131 \\ 0.421 & 0.451 & 0.555 & 0.547 \\ 0.178 & 0.649 & 0.487 & 0.299 \\ 0.624 & 0.761 & 0.377 & 0.717 \end{bmatrix}$$

同时给出非区块链下我方先进战机 $P_1 \sim P_4$ 对友机的平均信任程度为 0.7、0.8、0.7、0.8。

基于以上所给数据,选择不同的资源调度算法,分别进行区块链下和非区块链下的多先进战机协同作战资源调度的仿真实验,作战效能 Z 随迭代次数的变化曲线如图 8 所示,初始作战环境下最优资源调度方案如表 1 所示。

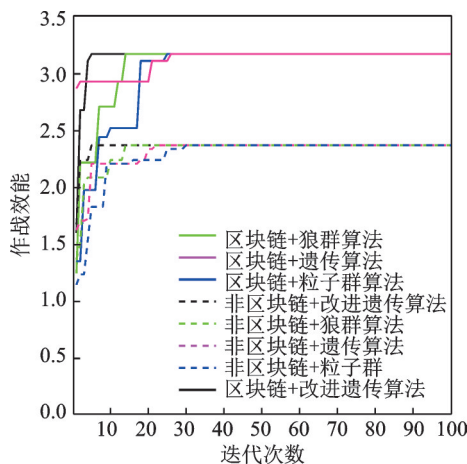


图 8 初始作战环境下作战效能随迭代次数的变化

Fig.8 Combat effectiveness changing with the number of iterations in initial combat environment

由图 8 可见,对于同一仿真场景,改进遗传算法相对于传统遗传算法、传统狼群算法以及传统粒子群算法能以更少的迭代次数寻到最优解,证明了改进遗传算法性能的优越性。资源调度结束后,区

表 1 初始作战环境下最优资源调度方案

Table 1 Optimal resource scheduling scheme in initial operational environment

我方战机	敌方战机
P_1	T_4, T_5
P_2	T_1
P_3	T_2, T_6
P_4	T_3

块链下、非区块链下的作战效能分别为 3.174、2.372。由于在非区块链下,先进战机之间相互不信任,进而间接降低了协同执行资源调度方案的效率,从而降低了协同作战的整体效能。

由表 1 可见,初始作战环境下的最优资源调度方案为:我方先进战机 P_1 对抗敌方先进战机 T_4 和 T_5 ,我方战机 P_2 对抗敌方战机 T_1 ,我方 P_3 对抗敌方 T_2 和 T_6 ,我方 T_4 对抗敌方 T_3 。

(2)敌方新增两架先进战机 T_7, T_8

根据新增的两架先进战机 T_7, T_8 的作战状态信息,计算可得归一化后我方先进战机相对敌方新增先进战机 T_7, T_8 的空战能力矩阵 $G = [\bar{g}(i, j)]_{4 \times 2}$ 以及敌方新增先进战机 T_7, T_8 相对我方先进战机的空战能力矩阵 $G' = [\bar{g}'(j, i)]_{2 \times 4}$ 如下

$$G = \begin{bmatrix} 0.517 & 0.485 \\ 0.235 & 0.851 \\ 0.661 & 0.568 \\ 0.313 & 0.703 \end{bmatrix}$$

$$G' = \begin{bmatrix} 0.483 & 0.765 & 0.339 & 0.687 \\ 0.515 & 0.149 & 0.432 & 0.297 \end{bmatrix}$$

结合以上数据,选择不同的资源调度算法,分别进行区块链下和非区块链下的资源调度仿真,作战效能 Z 随迭代次数的变化曲线如图 9 所示,当前作战环境下最优资源调度方案如表 2 所示。

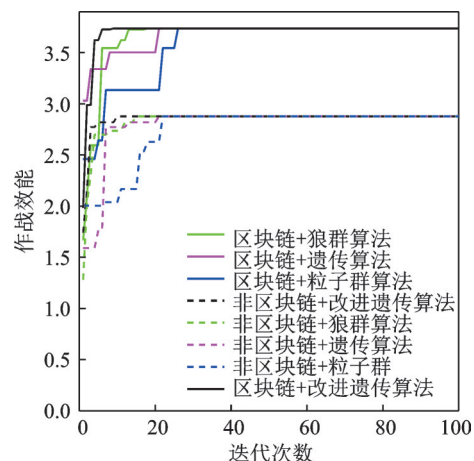


图 9 当前作战环境下作战效能随迭代次数的变化曲线

Fig.9 Combat effectiveness changing with the number of iterations under current operational environment

表2 当前作战环境下最优资源调度方案

Table 2 Optimal resource scheduling scheme under current operational environment

我方战机	敌方战机
P_1	T_2, T_4
P_2	T_1, T_8
P_3	T_6, T_7
P_4	T_3, T_5

由图9可见,区块链下、非区块链下的作战效能分别为3.736、2.876,同样由于先进战机之间相互不信任导致区块链下的作战效能要高于非区块链下的作战效能。

由表2可见,当前作战环境下的最优资源调度方案为:我方先进战机 P_1 对抗敌方先进战机 T_2 和 T_4 ,我方战机 P_2 对抗敌方战机 T_1 和 T_8 ,我方 T_3 对抗敌方 T_6 和 T_7 ,我方 T_4 对抗敌方 T_3 和 T_5 。

4 结 论

为了确保动态作战环境下多先进战机协同作战信息交互的安全性以及加快算法求解资源调度问题的速度,本文提出了一种基于区块链的多先进战机协同作战资源自适应调度方法。通过设计基于区块链的多先进战机协同作战资源调度框架来建立完全可信的信息交互环境,同时在考虑先进战机攻击能力和防御能力的基础上,以作战收益最大、代价最小为目标建立了多先进战机协同作战资源调度优化模型,并用改进遗传算法对该优化问题进行求解。由仿真结果可见,改进遗传算法相对于传统遗传算法、传统狼群算法以及传统粒子群算法能够以更快的速度求得最优资源调度方案;区块链下先进战机之间相互完全信任,使得其协同作战效能要高于非区块链下的协同作战效能。

参考文献:

- [1] 刘森琪,王鸿,于宁宇,等.基于信息素启发狼群算法的UAV集群火力分配[J].北京航空航天大学学报,2021,47(2):297-305.
LIU Senqi, WANG Hong, YU Ningyu, et al. Weapon-target assignment in UAV cluster based on pheromone heuristic wolf pack algorithm[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2021, 47(2): 297-305.
- [2] 张士磊,张朋,熊志刚.基于改进蝙蝠算法的多传感器多目标分配[J].光电与控制,2018,25(4):92-96.
ZHANG Shilei, ZHANG Peng, XIONG Zhigang. A multi-senor multi-target allocation method based on improved bat algorithm[J]. Electronics Optics & Control, 2018, 25(4): 92-96.
- [3] JIA Yiping. Research on UAV task assignment method based on parental genetic algorithm[C]//Proceedings of Advances in Swarm Intelligence the 10th International Conference. [S.l.]: ICSI, 2019: 439-446.
- [4] 刘畅,张承瑞,孙玉玺.改进自适应遗传算法在多载AGV调度的应用研究[J].小型微型计算机系统,2021,42(11):2241-2245.
LIU Chang, ZHANG Chengrui, SUN Yuxi. Research on application of improved adaptive genetic algorithm in multi-load AGV scheduling[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2021, 42(11): 2241-2245.
- [5] 许鹏程,舒健生,武健,等.基于改进遗传算法的联合防空目标分配优化[J].舰船电子工程,2020,40(11):30-33,63.
XU Pengcheng, SHU Jiansheng, WU Jian, et al. Optimization of joint air defense target allocation based on improved genetic algorithm[J]. Ship Electronic Engineering, 2020, 40(11): 30-33, 63.
- [6] 刘冠权,奚浩,王越,等.基于改进遗传算法的汽车混流装配线排序优化[J].计算机应用与软件,2021,38(8):78-83,137.
LIU Guanquan, XI Hao, WANG Yue, et al. Optimization of mixed-model automobile assembly line sequencing problem based on improved genetic algorithm[J]. Computer Applications and Software, 2021, 38(8): 78-83, 137.
- [7] PENG Juping. The application research of improved genetic algorithm based on chaos for job shop scheduling[C]//Proceedings of the 4th International Conference on Machinery, Materials and Computing Technology (ICMMCT). [S.l.]: Atlantis Press, 2016: 1663-1666.
- [8] 胡伟,姚文慧.基于区块链的能源电力供需网调度优化模型[J].系统管理学报,2019,28(6):1134-1142.
HU Wei, YAO Wenhui. Optimization model of energy power supply and demand network dispatching based on blockchain[J]. Journal of Systems & Management, 2019, 28(6): 1134-1142.
- [9] 程友凤,李芳,陈芳.基于区块链的云制造系统内可信资源调度方案[J].计算机应用研究,2021,38(6):1626-1630,1636.
CHENG Youfeng, LI Fang, CHEN Fang. Trusted resource scheduling scheme in cloud manufacturing system based on blockchain[J]. Application Research of Computers, 2021, 38(6): 1626-1630, 1636.
- [10] GAO Zhipeng, LIN Bang, XIAO Kaile, et al. A dynamic resource allocation algorithm based on auction model in mobile blockchain network[C]//Proceedings of 2019 the 3rd International Conference on Electronic Information Technology and Computer Engineering (EITCE). Xiamen, China: IEEE, 2019: 1605-1610.

- [11] 董彦非,王礼沅,张恒喜.战斗机空战效能评估的综合指数模型[J].航空学报,2006,27(6):1084-1087. DONG Yanfei, WANG Liyuan, ZHANG Hengxi. Synthesized index model for fighter plane air combat effectiveness assessment[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2006, 27(6): 1084-1087.
- [12] 王礼沅,张恒喜,徐浩军.基于粗糙集的空战效能多指标综合评估模型[J].航空学报,2008,29(4):880-885. WANG Liyuan, ZHANG Hengxi, XU Haojun. Multi-index synthesize evaluation model based on rough set theory for air combat efficiency[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008, 29(4): 880-885.
- [13] 李战武,常一哲,孙源源,等.中远距协同空战多目标攻击决策[J].火力与指挥控制,2016,41(2):36-40,46. LI Zhanwu, CHANG Yizhe, SUN Yuanyuan, et al. A decision-making for multiple target attack based on characteristic of future long-range cooperative air combat[J]. Fire Control & Command Control, 2016, 41(2): 36-40, 46.
- [14] 徐超,王玉惠,吴庆宪,等.基于模糊遗传算法的先进战机协同攻防决策[J].火力与指挥控制,2020,45(3):14-21. XU Chao, WANG Yuhui, WU Qingxian, et al. A decision-making of advanced fighter cooperative attack and defense based on fuzzy genetic algorithm[J]. Fire Control & Command Control, 2020, 45(3): 14-21.
- [15] 周同乐,陈谋,朱荣刚,等.基于狼群算法的多无人机协同多目标攻防满意决策方法[J].指挥与控制学报,2020,6(3):251-256. ZHOU Tongle, CHEN Mou, ZHU Ronggang, et al. Attack-defense satisficing decision-making of multi-UAVs cooperative multiple targets based on WPS algorithm[J]. Journal of Command and Control, 2020, 6(3): 251-256.
- [16] 黄刚,李军华.基于AC-DSDE进化算法多UAVs协同目标分配[J].自动化学报,2021,47(1):173-184. HUANG Gang, LI Junhua. Multi-UAV cooperative target allocation based on AC-DSDE evolutionary algorithm[J]. Acta Automatica Sinica, 2021, 47(1): 173-184.
- [17] RAMIREZ A C, DEL S J, CAMACHO D. Weighted strategies to guide a multi-objective evolutionary algorithm for multi-UAV mission planning[J]. Swarm and Evolutionary Computation, 2019, 44: 480-495.

(编辑:张蓓)