

# 区块链赋能的战场分布式频谱分配： 一种快速匹配算法

侯 杰<sup>1</sup>, 陈 曦<sup>2\*</sup>, 陶诗飞<sup>1</sup>, 王 昊<sup>1</sup>, 侯至阳<sup>1</sup>, 胡乃杰<sup>2</sup>

(1. 南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏南京 210094; 2. 南京理工大学机械工程学院, 江苏南京 210094)

**摘要:** 针对战场环境中传统的频谱资源分配管理模式响应速度慢、实时性低的问题, 首先构建了区块链赋能的分布式频谱分配架构, 考虑了用频满意度、冲突及优先级等约束条件, 建立了优化目标模型, 提出一种基于匹配理论的分布式盖尔-沙普利(Distributed Gale-Shapley, D-GS)频谱分配算法, 使战场频谱分配从静态集中式转变为动态分布式, 大大提高了频谱分配的性能, 并通过加入贪心机制和用频单位的满意度阈值, 使作战单位能够在较晚提交用频需求的情况下, 显著提高频谱分配的满意度. 仿真结果表明: 所提方法在频谱资源受限情况下, 能够保障用频单位的用频满意度且极大发挥分布式频谱管理的实时性, 与静态集中式频谱分配方法相比, 时间开销降低超过1个数量级. 该算法具有更优的时间性能、频谱分配效率, 使得战场频谱分配获得更好的效果.

**关键词:** 联合作战; 分布式频谱管理; 频谱分配; 区块链; 匹配算法

**基金项目:** 国防科工局基础科研项目(No.JCKY2023XXXX007); 国家自然科学基金(No.61991404)

**中图分类号:** TN92

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0372-2112(2025)05-1390-15

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.12263/DZXB.20240687

## Blockchain-Enabled Distributed Spectrum Allocation in Battlefield: A Fast Matching Algorithm

HOU Jie<sup>1</sup>, CHEN Xi<sup>2\*</sup>, TAO Shi-fei<sup>1</sup>, WANG Hao<sup>1</sup>, HOU Zhi-yang<sup>1</sup>, HU Nai-jie<sup>2</sup>

(1. School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China;

2. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China)

**Abstract:** In response to the issue of slow responsiveness and low real-time performance in traditional spectrum resource allocation management within battlefield environments, a blockchain-enabled distributed spectrum allocation architecture is first established. Constraints such as spectrum satisfaction, conflicts, and priority are taken into consideration to formulate an optimization objective model. A distributed gale-shapley (D-GS) spectrum allocation algorithm based on matching theory is proposed, transforming battlefield spectrum allocation from static centralized to dynamic distributed, significantly improving spectrum allocation performance. By incorporating a greedy mechanism and a satisfaction threshold for spectrum units, combat units can notably enhance spectrum allocation satisfaction even when spectrum demands are submitted late. Simulation results demonstrate that the proposed method, under limited spectrum resource conditions, ensures unit satisfaction and maximizes the real-time nature of distributed spectrum management. Compared to static centralized spectrum allocation methods, the time overhead is reduced by over one order of magnitude, indicating significant advantages. The algorithm exhibits superior time performance and spectrum allocation efficiency, leading to improved spectrum allocation in battlefield scenarios.

**Key words:** joint operations; distributed spectrum management; spectrum allocation; blockchain; matching algorithm

**Foundation Item(s):** National Defense Technology Foundation Research Project (No.JCKY2023XXXX007); National Natural Science Foundation of China (No.61991404)

## 1 引言

电磁频谱是牵引着武器装备的风筝线<sup>[1]</sup>,电磁空间是敌我共用、军民共用、国际共用的战略空间,全维渗透陆、海、空、天和网络空间,已被公认为“第六作战域”<sup>[2]</sup>.电磁空间的军事斗争平战一体、无形无界,制电磁权的争夺在联合作战中首当其冲并贯穿全程,作战指挥依托的指挥链、情报链、杀伤链均高度依赖电磁频谱支撑,确保作战单元能够随时接入、高效利用、有效控制电磁频谱资源是发挥联合作战效能、取得作战胜利的基本前提.

现代战场的用频装备日益增多、电磁环境日趋拥挤、频谱资源供需矛盾日益尖锐以及战场物联网的数据传输等问题使得战场频谱资源的高效管控和科学利用成为困扰世界各国的共同难题<sup>[3]</sup>.最重要的是,现有的静态频谱分配方案导致频谱资源未得到充分利用<sup>[4,5]</sup>.在联合作战中,作战单元展开部署后,各频段的频谱资源需求急剧增加,作战地域的指控通信、预警探测、导航制导、电子对抗装备密集部署、频段交叠,重点地域固定部署的台站又与新部署的用频武器装备产生频谱冲突,同时作战地域广泛存在的民用无线电台站也随时可能与军队用频武器装备发生用频冲突,此外,由于敌对势力的干扰,可能出现通信中断<sup>[6]</sup>.如果没有科学有效的战场频谱资源分配,各种用频武器装备之间以及军民用频系统之间极易产生相互干扰,直接影响武器装备作战效能的发挥,夺取制电磁权将无从谈起<sup>[7]</sup>.

目前,世界各国主要采用静态集中的方式分配并管理战场频谱资源,用频需求通过集中式上报、下达,并在整个作战过程中基本保持不变,传统的频谱管理方法受到诸多挑战<sup>[8]</sup>.随着信息化、智能化、无人化逐渐成为联合作战的主要特征,静态集中式的战场频谱资源分配模式已经越来越不能适应瞬息万变的战场环境.为此,亟须打破传统静态、集中的频谱资源分配模式,提出新的战场电磁频谱资源分配方法.

为解决频谱需求剧增与频谱资源利用率不均衡的矛盾,Zhao 等人<sup>[9]</sup>和 Xing 等人<sup>[10]</sup>提出动态频谱接入的概念,进而取代静态频谱管理方式,将动态频谱管理应用于战场环境<sup>[11]</sup>.动态频谱管理的理念一定程度上缓解了战场频谱资源需求剧增的态势,但随着无人机、物联网、军用 5G 等技术的涌现,海量用频装备部署应用带来的海量用频需求使得传统集中式的频谱资源分配模式已难以为继.区块链技术的出现,将“分布式”的理念带入人们视野,使分布式战场频谱资源分配成为可能<sup>[12]</sup>.区块链是一种多中心的分布式数据库技术,区块链技术是利用块链式数据结构来验证与存储数据、利用分布式节点共识算法来生成和更新数据、利用密码

学的方式保证数据传输和访问的安全、利用由自动化脚本代码组成的智能合约来编程和操作数据的一种全新的分布式基础架构与计算范式<sup>[13-15]</sup>.人们从智能合约<sup>[16]</sup>、工作证明<sup>[17]</sup>、隐私保护<sup>[18]</sup>等角度对区块链赋能的分布式频谱管理展开了研究,并在空地频管网络融合<sup>[19]</sup>、下行链路频谱资源管控<sup>[20]</sup>、城市宽带资源调配<sup>[21]</sup>等领域开展应用实践,并希冀将其写入 6G 的空天地一体化网络协议<sup>[22]</sup>.在军事领域,区块链驱动的分布式网络和去中心化管理模式也早已在军事物联网<sup>[23]</sup>、军用供应链管理<sup>[24]</sup>、无人机蜂群控制与管理<sup>[25]</sup>等领域取得应用,并向其他军事领域逐步拓展.随着研究的深入,人们发现区块链驱动的分布式网络管理模式和边缘计算赋能的端-边-云网络架构与频谱资源管理有天然的结合潜力.文献[26]针对大规模部署环境下的物联网频谱共享需求,提出基于区块链技术的用频装备网络基本运行机制;文献[27]针对第六代蜂窝网中频谱接入管理,提出了一种基于动态两层区块链的异构网络频谱管理框,所提模型能够显著提高频谱利用率并适用动态网络环境;文献[28]在多个本地授权基站上建立联盟区块链,用于在 LET(Long Term Evolution)用户和网关之间进行频谱交易,提升空闲频谱资源利用率;文献[29]面向卫星物联网,提出一种基于区块链的安全频谱共享方案,拦阻恶意用户参与频谱共享;文献[30]提出基于联盟链的频谱交易与共享系统,使无人机与地面物联网节点在不依赖第三方的情况下进行分布式频谱交易与共享;文献[31]设计了基于区块链的用户认证策略,在确保安全的前提下提高车辆网的频谱效率;文献[32]针对在动态频谱接入仿真中,区块链使用传统共识机制在隐私保护和协作频谱感知性能方面存在不足,提出了一种高效安全的区块链动态频谱接入框架.可见,区块链凭借其特有的去中心化、不变性和可追溯特性,在频谱资源管理领域取得应用已经达成共识.自俄乌冲突及巴以冲突以来,现代战争信息化、智能化、无人化的特征愈发明显,无疑对战场频谱资源分配的速度与效率提出了更高要求,以区块链技术为驱动,促使战场频谱资源分配由静态集中式向动态分布式转变,将大大提高频谱资源分配的速度和效率,适应瞬息万变的战场态势.文献[33]提出了一种区块链赋能的分布式频谱共享框架,在此基础上通过非合作博弈取得对称贝叶斯纳什均衡;文献[34]提出了一种基于联盟链的动态频谱共享框架,在此基础上设计 Stackelberg 博弈模型求解最优频谱分配策略;文献[35]提出了一种基于联盟链的协作边缘计算框架,应用启发式优化算法实现联合任务卸载和频谱资源分配优化.上述研究表明,采用区块链驱动的分布式管理模式和边缘计算赋能的端-边-云网络架构对频谱资源

进行分配和管理,其速度和效率已经获得较大提升,但是与现代战场高速度、高动态的要求仍相去甚远,阻碍其效率倍增的“最后一公里”在于分布式频谱资源分配框架下,用频需求与频谱资源的快速匹配优化算法,上述优化算法要么求解最优频谱分配策略的时间复杂度较高,要么当用户数量倍增时求解的时间复杂度呈指数级上升。

综合所述,为使战场频谱资源分配能够适应信息化、智能化、无人化战场的高速和高动态特性,不但需要采用区块链技术将战场频谱分配由集中式转变为分布式,还需要设计高效的用频需求与频谱资源匹配算法,以发挥分布式频谱管理框架下并行优化处理的优势。针对战场大规模用频需求下频谱资源的高效分配问题,本文基于区块链技术构建分布式战场频谱资源分配框架,在此框架下设计了一种快速匹配算法,实现了用频需求与频谱资源的高效匹配。本文主要贡献概括如下:

(1)提出一种基于区块链技术的分布式战场频谱分配模型,将频谱资源分配由静态集中式转变为动态分布式,以适应信息化智能化无人化战场对频谱资源分配高速、高动态需求。

(2)在区块链赋能的动态分布式频谱资源分配框架下,将问题建模为多对一匹配模型,基于匹配理论,提出D-GS(Distributed Gale-Shapley)算法实现用频需求与频谱资源的高效匹配,在满足用频约束情况下取得战场频谱资源分配效率1个数量级以上的提升。

(3)在分布式频谱资源分配框架下,对D-GS算法引入贪心机制,使较晚提交用频需求的较大规模集群用频满意度满足要求,解决了频谱资源紧缺条件下用频需求激增导致的用频满意度陡降问题。

## 2 系统模型

### 2.1 分布式战场频谱分配框架

在战场频谱资源分配架构中,用频装备为末端节点,各用频装备按作战编成形成若干集群,协商节点负责提报各集群的用频需求,审核节点汇总各集群的用频需求后,进行用频需求的审核和频谱资源的分配。在静态集中式频谱分配架构中,审核节点需等待所有集群全部提报用频需求后,方能开始用频需求的审核和频谱资源的分配,较晚提报用频需求的集群往往导致整个战场频谱分配计划的滞后,显然难以适应瞬息万变的信息化智能化无人化战场。将区块链的优势应用于分布式战场频谱资源管理中,可以实现对频谱资源的快速、高效分配,下面将对传统集中式频谱管理方式和区块链赋能的分布式频谱管理方式进行对比。图1展示了传统集中式战场频谱分配架构,在这种架构中,频谱部门集中收集、集中分配和下放所有参战单位的

用频需求,由于这种方式需要频谱部门处理所有用频需求,效率低、耗时长,无法适应瞬息万变的高动态战场环境。区块链是一种去中心的分布式数据库技术,其与频谱资源管理的结合可以使战场频谱资源分配更加高效,去中心化、分布式的处理模式方式可提高战场频谱分配的效率、降低频谱资源管理的成本,且具有安全不易篡改、恶意行为可追溯等优势。

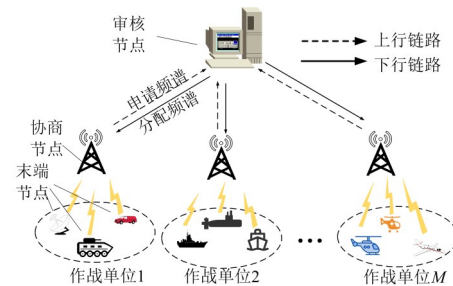


图1 静态集中式战场频谱分配架构

图2为区块链赋能的动态分布式战场频谱分配架构,审核节点—协商节点—末端节点构成战场三级频谱分配架构,联盟区块链是一种特定的区块链,可以以适中的成本建立分布式共享账本,因此引入联盟链作为分布式频谱管理的基础。与静态集中式频谱分配相比,区块链赋能的战场分布式频谱分配架构中,各集群对本集群提报的用频需求达成共识后,协商节点即将该用频需求发送至审核节点,由频谱区块链按智能合约“自动”进行频谱分配,审核节点仅需负责末端节点的准入和智能合约的维护,由智能合约驱动战场频谱分配将能够对各集群提报的用频需求做到“随到随分”,极大地提高战场频谱分配效率。

#### (1)审核节点

审核节点主要负责对参与频谱分配的用频装备进行准入认证,为其生成专用的公钥/私钥对,以防恶意节点、敌方节点加入区块链系统。末端节点可运用公钥/私钥对进行非对称加密,确保其与其他末端节点之间的频谱资源的交换、交易、共享过程的安全;协商节点可运用公钥/私钥对加密用频需求,确保将其写入频谱区块链过程的安全。同时,审核节点负责管理并维护智能合约,确保其高效执行。智能合约作为自动化执行的脚本代码,为每个提交至频谱区块链的用频需求提供动态处理机制。在本文中,智能合约采用D-GS算法执行分布式频谱分配策略,从而实现自主、高效的频谱管理。审核节点还负责持续监控智能合约的执行效果,并在整个分配过程中进行优化调整,以提升系统的自主性和灵活性。

#### (2)协商节点

所有参加联合作战的用频装备按作战编成形成若干集群,协商节点负责提报各集群的用频需求。协商节

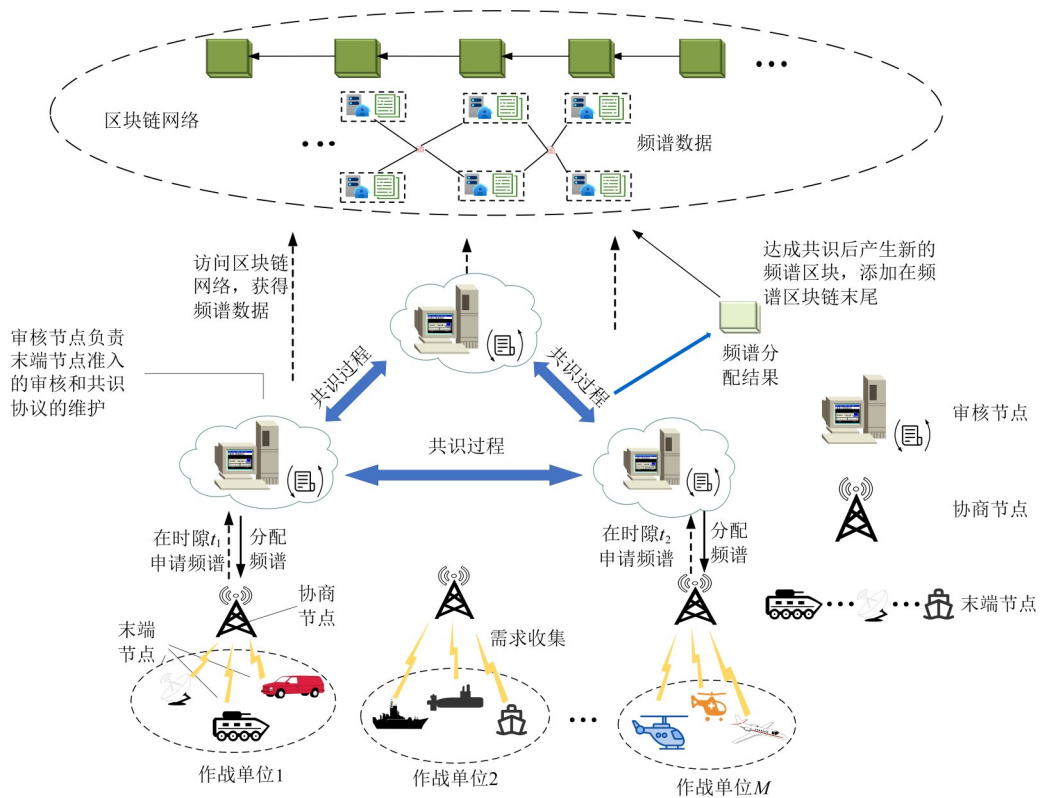


图2 区块链赋能的战场分布式频谱分配架构

点可以为集群的头节点,也可由集群的头节点指定,亦可根据地理位置由集群内末端节点经共识选出. 协商节点将加密后的集群需求提交到区块链系统,完成用频需求的上报流程,并实时接收审核节点反馈的分配结果.

(3)末端节点

末端节点为具体的参加联合作战所有用频装备,需经审核节点认证,在作战筹划阶段,末端节点在系统内以分布式方式安全上报用频需求,并在集群内通过共识协议确定协商一致、无争议.

如图2所示,本文所提区块链的频谱管理系统与传统的频谱分配相比,具有以下优势:①分布式,基于区块链的频谱管理系统不需要部署受信任的中央节点,从而避免单点故障;②灵活性,频谱区块记录用频装备的分配结果,为区块链中用户查找用频数据提供支持,并且可以通过调整智能合约的参数来动态执行多样化的频谱交易规则;③自主性,将频谱分配算法与智能合约结合,可以实现自主频谱管理,用户随时提交用频需求、审核节点随时开展频谱分配.

2.2 分布式战场频谱分配框架

直接参与作战行动的末端节点  $C_i$  根据具体任务生成用频需求时,通过非对称加密方式将用频需求传输给上级协商节点  $D_i$ ,  $D_i$  汇总所属本集群内末端节点的用

频需求后,若末端节点间存在用频冲突,则以一定的用频协同规则,如“次要让主要,后用让先用”,有用频冲突的低优先级末端节点重新提报用频需求,并附加建议,最终通过共识机制汇总生成不存在用频冲突的用频需求  $R_i$ ,并上报审核节点. 具体的流程如图3所示.

审核节点收到协商节点提报的用频需求后,根据频谱分配算法进行频谱规划,生成初始用频方案  $P_0$ . 随后,审核节点对所有协商节点发起对  $P_0$  的共识过程. 待所有协商节点对用频方案取得共识后,生成频谱区块,将此用频方案  $P'_0$  附加在频谱区块链末尾. 当末端节点受扰或者当前用频方案无法满足需求时,末端节点需向协商节点提出请求,在本集群内进行用频调整,协商节点  $d_i$  收到集群内末端节点的用频调整需求后,从频谱区块链下载当前频谱区块  $L$ , 获取当前用频方案  $P'_0$ , 根据用频协同规则和末端节点的用频优先级对当前用频方案进行调整,调整后更新频谱区块  $L'$ , 如有涉及其他低优先级末端节点需用频退让,则协商节点会将此调整信息以非对称加密方式通知该低优先级末端节点.

用频调整由末端节点发起,先由协商节点在集群内部按用频优先级进行用频调整,如集群内部无法满足用频调整需求,则上报至审核节点,由审核节点在集群间进行用频调整,按共识机制进行协商. 通过这种方式,在用频调整时,亦可分布式进行,避免“牵一发而动

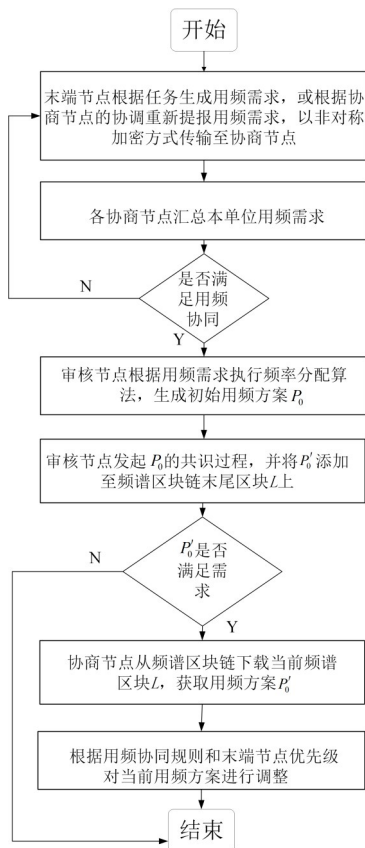


图3 频谱分配流程图

全身”, 频繁大规模调整用频方案。

### 2.3 分布式频谱分配建模

假设在  $L \times L$  大小的战场频谱资源分配中, 共有  $N_E$  个审核节点,  $M$  个作战单位参与行动, 作战单位集合  $U = \{u_1, u_2, \dots, u_M\}$ , 对于作战单位  $u_i (1 \leq i \leq M)$ , 其中作战单位  $u_i$  中用频装备数量为  $n_i$ . 定义用频装备总数为  $N = \sum_{i=1}^M n_i$ , 用频装备集合为  $D = \{d_1, d_2, \dots, d_N\}$ , 保存每个用频装备的编号及位置信息. 由于在实际的频谱分配中, 所分配的频谱为离散化的频点, 对于给定一段连续的频谱资源  $F$  时, 设置该频谱资源的频段  $(F_L, F_H)$ ,  $F_L$  为频段的起始频段,  $F_H$  为频段的终止频段, 设置频谱间隔为  $\Delta f$ , 则把可用频谱资源划分为离散频点, 定义战场环境中可供指配频谱资源集合为  $K = \{k_1, k_2, \dots, k_S\}$ , 共  $S$  个离散频点. 定义用频装备/可用频点比  $\eta = N/S$ ,  $\eta$  越小说明频点资源越丰富, 反之频点资源越匮乏. 每个作战单位根据本单位内用频装备申报用频需求, 为减少可能发生的用频干扰、故障, 确保战斗中通信装备的正常运行, 用频装备会申请多个频点作为备用频谱.

在大型军事编队的通信场景下, 频谱使用非常密集, 为了满足用频装备的实时通信需求, 需对频谱资源进行实时管理. 为了便于研究, 系统时间被分为  $T$  个长

度相等的离散时隙  $\mathcal{T} = \{t_1, t_2, \dots, t_i, \dots, T\}$ , 每个时隙  $t_i \in \mathcal{T}$  的持续时间为  $\tau$  秒, 用频装备  $d_i$  产生的频谱申请使用一个三元组表示, 即  $q_{d_i}(t_i) = \{k_{d_i}(t_i), \Delta_{d_i}(t_i), l_{d_i}(t_i)\}$ , 其中  $k_{d_i}(t_i)$  表示用频装备  $d_i$  在时隙  $t_i$  产生的用频需求集合,  $k_{d_i}(t_i) = \{k_{i1}, k_{i2}, \dots, k_{ij}, \dots, k_{iR}\}$ ,  $R$  代表用频装备  $d_i$  申请频点的数目,  $k_{ij}$  表示用频装备  $d_i$  申请  $k_{ij}$  频点,  $\Delta_{d_i}(t_i)$  表示用频装备的通信时长, 即在占用频点  $\Delta_{d_i}(t_i)$  后, 用频装备  $d_i$  退出对已经分配频点资源的占用, 系统会根据装备的通信时长进行频谱管理, 达到时域错开目的, 定义  $t_{i,\text{wait}} = t'_i - t_i$  来表示用频装备  $d_i$  申请频谱的等待时间, 其中  $t'_i$  为用频装备  $d_i$  完成频谱分配的时间.  $l_{d_i}(t_i)$  为用频装备  $d_i$  时隙  $t_i$  的坐标信息,  $l_{d_i}(t_i) = \{x_{d_i}(t_i), y_{d_i}(t_i)\}$ , 通过位置信息来计算频谱分配中的干扰情况  $v_{d_i}(t) = (v_x(t), v_y(t))$  代表用频装备  $d_i$  移动速度, 用于更新每个时隙的用频装备位置, 满足以下约束:

$$0 \leq x_{d_i}(t_i) \leq L, 0 \leq y_{d_i}(t_i) \leq L, \quad \forall d_i \in D.$$

在战场环境中, 不同用频装备执行任务, 紧急状况不同, 则用频优先级不同, 定义  $\text{Rank} = \{R_1, R_2, \dots, R_N\}$  为用频装备的用频优先级集合,  $R_N$  表示用频装备  $d_N$  的优先级, 其中  $R_N \in \{1, 2, 3\}$  分别表示高、中、低用频装备的 3 种优先级, 定义高优先级用频装备占比  $\varepsilon = N_h/N$ ,  $N_h$  为战场中高优先级用频装备数量, 在频谱分配过程中, 会优先考虑高优先级用频装备分配频谱.

#### 2.3.1 用频干扰模型

在所设计频谱规划区块链架构中, 协商节点可指二级频管部门, 末端节点可指具体的用频装备. 在实际分配过程中, 频谱分配应考虑用频装备干扰、用频装备优先级以及频谱分配时间开销. 下面对用频干扰、用频装备优先级以及频谱分配时间开销进行介绍.

##### (1) 基于用频冲突的频谱规划模型

频谱分配过程中需要分析用频装备之间可能存在的电磁干扰, 由于战场频谱分配中用频装备数量众多, 为简化问题描述, 本文主要关注同频干扰、邻频干扰以及敌方电磁干扰 3 种类型. 为此, 定义了一个  $N \times N$  的干扰矩阵, 表示用频装备之间的干扰关系, 具体表现形式为

$$\mathbf{I}_{(N \times N)} = \begin{bmatrix} I_1^1 & I_1^2 & \dots & I_1^N \\ I_2^1 & I_2^2 & \dots & I_2^N \\ \dots & \dots & I_i^j & \dots \\ I_N^1 & I_N^2 & \dots & I_N^N \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中,  $I_i^j$  表示为用频装备  $d_i$  和  $d_j$  之间是否存在用频干扰. 定义用频分配矩阵  $\mathbf{X}_{N \times S}$ , 对于  $x_i^k \in \mathbf{X}_{N \times S}$ ,  $1 \leq k \leq S$ ,  $1 \leq i \leq N$  表示用频装备  $d_i$  是否分得频点  $k$ , 如果用频装备  $d_i$  分得频点  $k$ , 那么  $x_i^k = 1$ , 反之  $x_i^k = 0$ . 针对同频干扰, 当 2 台或多台用频装备的用频装备偏好为同一频点时, 在一定

距离内会产生用频干扰,因此距离较近的用频装备所指配的频点不能相同,如式(2)所示:

$$I_i^j = \begin{cases} 1, & \text{if } d_i^j \leq D_i^j, \text{ 且装备 } i \text{ 和 } j \text{ 偏好为同一频点} \\ 0, & \text{if } d_i^j > D_i^j \end{cases} \quad (2)$$

其中,  $d_i^j$  为用频装备  $d_j$  和  $d_i$  之间实际距离,  $D_i^j$  为同频干扰的距离门限. 若  $I_i^j=1$ , 则用频装备  $d_j$  和  $d_i$  之间存在用频干扰, 不能分配相同频点. 除了同频干扰之外, 用频装备之间可能产生邻频干扰, 当 2 台用频装备使用的频点资源相邻时, 也可能产生干扰, 如式(3)所示:

$$I_i^j = \begin{cases} 1, & \text{if } |k-k'| \leq K_i^j \\ 0, & \text{if } |k-k'| > K_i^j \end{cases} \quad (3)$$

其中,  $|k-k'| \leq K_i^j$  表示用频装备  $d_j$  和  $d_i$  的频点相邻差值小于邻频干扰门限, 会产生用频干扰,  $K_i^j$  决定了用频装备  $d_j$  和  $d_i$  可以容忍的频点相邻程度. 例如, 当  $K_i^j=1$  时, 仅考虑相邻频点之间的干扰; 若  $K_i^j=2$ , 则允许更宽的邻频干扰范围.

在电磁对抗中, 敌方可能通过电磁干扰来干扰己方的频谱使用. 为此, 在同频和邻频干扰的基础上, 加入了敌方干扰源的建模. 假设若干个敌方干扰源随机分布在战场环境中, 干扰源  $j$  在时隙  $t_i$  对频点  $k$  的干扰强度表示为  $I_j^k(t_i)$ , 为了量化敌方干扰对通信的影响, 引入了信干噪比 SINR (Signal-to-Interference plus Noise Ratio), 用于敌方干扰的影响, 当我方用频装备  $d_i$  在时隙  $t$  如果要接入频点  $k$ , 则可以计算出信噪比 SINR<sub>*i*</sub> 如式(4)所示:

$$\text{SINR}_i = \frac{P_i}{\sum I_j^k(t_i) + N_0} \quad (4)$$

其中,  $P_i$  为用频装备  $d_i$  通信时的功率,  $\sum I_j^k(t_i)$  为敌方干扰源对其频点  $k$  的累计干扰,  $N_0$  为环境噪声. SINR 越高, 表示信号质量越高, 当 SINR<sub>*i*</sub> 低于某个阈值时, 会影响通信, 需要重新分配频谱. 由此得出敌方干扰下的用频约束如式(5)所示:

$$x_i^k = \begin{cases} 1, & \text{SINR}_i > \text{SINR}_{th} \\ 0, & \text{SINR}_i \leq \text{SINR}_{th} \end{cases} \quad (5)$$

因此, 考虑了同频、邻频以及敌方电磁干扰的复用限制, 约束条件为

$$\begin{cases} x_i^k = 1, x_j^k = 1, \forall d_i, d_j \in D, d_i^j > D_i^j \\ x_i^k = 1, x_j^k = 1, \forall d_i, d_j \in D, |k-k'| > K_i^j \\ x_i^k = 1, \forall d_i \in D, \text{SINR}_i > \text{SINR}_{th} \end{cases} \quad (6)$$

(2)用频优先级

当用频单位发起频谱请求时, 频管部门根据用频需求  $k_j$  以及用频装备的优先级对其进行频谱分配. 为确保大规模联合作战场景中重要信息的优先传输, 级别越高的用频装备用频优先级越高, 例如为武器制导

及指挥通信等分配最高用频优先级. 表 1 为不同用频装备频点需求及用频优先级.

表 1 用频装备频点需求及用频优先级

用频装备	用频需求集合				用频优先级
$d_1$	$k_{13}$	$k_{11}$	...	$k_{12}$	$R_1$
$d_2$	$k_{21}$	$k_{23}$	...	$k_{22}$	$R_2$
$d_3$	$k_{31}$	$k_{32}$	...	$k_{33}$	$R_3$
...	...	...	...	...	...
$d_N$	$k_{N3}$	$k_{N4}$	...	$k_{N1}$	$R_N$

在频点分配过程中, 频管部门遍历用频装备的用频需求, 当用频装备  $d_i$  申请频点为  $k_i$  时, 频管部门根据距离复用门限进行判断, 如果用频装备对已分配  $k_i$  的高优先级用频装备造成用频干扰, 则该用频装备退出频谱  $k_i$  的申请, 频管部门向申请表中后续频点进行分配. 在后续的迭代中, 频管部门依据申请表的剩余频点向未分配频点资源的用频装备继续分配频点, 直到所有用频装备都被分配频点或者所有频谱资源分配完毕.

表 1 中,  $d_1$  首先申请频点  $k_3$ , 再根据用频干扰门限判断是否将  $k_3$  分配给用频装备  $d_1$ , 否则  $d_1$  将在后续迭代中申请次一级偏好频点  $k_1$ . 对于  $d_2, d_3$ , 最开始均申请  $k_1$  频点, 如果满足干扰门限条件, 则两台用频装备会同时复用  $k_1$  频点, 否则频管部门会拒绝低优先级用频装备接入而使高优先级用频装备接入, 如果  $R_1 > R_3$ , 说明用频装备  $d_3$  优先级高, 因此高优先级用频装备  $d_3$  接入频点, 在之后的迭代过程中, 频管部门不再对  $d_3$  进行分配, 直至高优先级用频装备结束通信任务, 释放频谱资源, 因此频管部门需在整个系统时间内使整体用频满意度最大.

在本文定义中, 优先级  $R_i$  数值越小代表优先级越高, 高优先级用频装备和低优先级用频装备用频需求被满足时满意度分值不同, 令  $1/R_i$  代表不同用频装备的优先级系数, 并基于分配到的频点在用频需求集合中的顺序来评估用频质量, 根据对用频装备的频谱分配等待时间来体现实时性. 具体而言, 若某用频装备被分配的频点越接近其需求集合中的首选项, 即越靠近需求集合的前列, 则该用频装备的满意度越高. 因此, 假如在时隙  $t_i$  用频装备  $d_i$  分得频点  $k$ , 根据式(7)计算其用频满意度, 对单个用频装备和系统累计用频满意度进行定义. 式(8)为所有用频装备总的用频满意度.

$$S_i(t_i) = \frac{1}{R_i} + \left( \frac{(R+1)-k_{ij}}{R} \times x_i^k \right) - t_{i,wait}, \quad x_i^k \in \{1, 0\} \quad (7)$$

$$\text{Sat}(t) = \sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^N S_i(t) \quad (8)$$

单个用频装备在某个时隙内用频满意度计算如式(7)所示, 其中  $R$  表示用频装备的用频申请表长度,  $k_{ij}$  代表用频装备  $d_i$  获取的在表中第  $j$  个频点, 例如, 优先级

为 1 的用频装备  $d_3$  接入  $k_{31}$  频点时, 当等待时间  $t_{3, \text{wait}}=0$  时, 根据上述公式可计算得满意度为 100%.

### (3) 用频分配时间开销

时间开销是频谱分配算法的重要指标, 特别是在大规模联合作战中尤其关键. 战场环境具有瞬息万变的高动态特性, 在实际战场频谱资源分配中, 不同作战单位处理的任务、规模战场环境具有瞬息万变的高动态特性, 在实际战场频谱资源分配中, 不同作战单位处理的任务、规模不同、处理任务的时间也具有高度随机性, 因此提交用频需求的具有较高的不确定性和随机性. 图 4 对比了静态集中式和动态分布式频谱分配的时间开销差异.

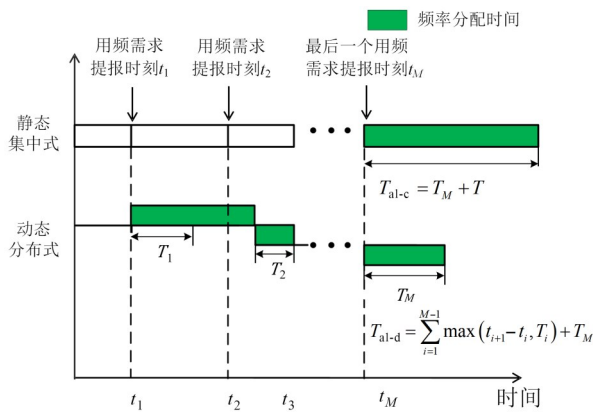


图 4 两种频谱管理方式性能分析

由图 4 可知, 相比于静态集中式频谱分配, 动态分布式频谱分配效率更高, 时间更短, 更加适应瞬息万变的战场环境. 在联合作战中, 各作战单位根据用频需求的时刻  $t_m, 1 \leq m \leq M$ , 进行需求提报, 假设单位从提交用频需求时, 进行计时并计算时间开销, 即  $t_1=0$ . 同时频谱分配时间  $T$  与分配的用频装备数量  $n$ 、算法复杂度  $o$  和用频单位数量  $m$  有关, 即  $T=f_T(n, m, o)$ . 在静态集中式频谱分配中, 审核节点需收集齐所有协商节点提报的用频需求后, 统一对所有单位空进行频谱分配, 则总频谱分配时间开销  $T_{\text{al-c}}=t_M+T$ , 其中  $t_M$  为各单位中最后提交用频需求的时刻,  $T$  为对所有作战单位进行集中频谱分配时间; 在动态分布式频谱分配中, 审核节点无需收集齐所有协商节点提报的用频需求再开始频谱分配, 而是采取“随到随分”的策略进行频谱分配, 而且频谱分配结果可以实时同步到“频谱区块链”, 则总频谱分配时间开销为  $T_{\text{al-d}}=\sum_{i=1}^{M-1} \max(t_{i+1}-t_i, T_i)+T_M$ , 其中  $T_i$  为对每个作战单位进行分布式频谱分配时间. 通过以上分析可知, 分布式频谱分配中时间开销  $T_{\text{al-d}}$  短于静态集中式的时间开销  $T_{\text{al-c}}$ . 由图 4 可见, 静态集中式在最后一个用户提报完用频需求后, 再统一所有  $M$  个单

位进行频谱分配, 动态分布式是以“随到随分”的形式在每个用户提报用频需求后, 立即对其进行频谱分配, 看似动态分布式只是节约了最后的用频分配时间. 实际上, 这种“随到随分”的模式意味着较早提交用频需求的单位有较大概率能够分配到较优的频谱资源, 从而鼓励用户尽快尽早提报用频需求; 其次, 单位分配到频谱资源后即可立即使用, 即“随分随用”, 未提交用频需求的单位并不影响已分配频谱资源的使用. 因此, 相比于静态集中式频谱分配模式, 动态分布式频谱分配将大大加快战场频谱分配的速度.

### 2.3.2 问题描述

根据前文分析, 本文将频谱分配的分体, 建模为在满足用频干扰条件下, 最大化用频装备的总满意度, 表述为以下优化问题:

$$P1: \max \text{Sat}(t) = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N S_i(t)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} C1: \sum_{k \in K} x_i^k \leq 1, \forall d_i \in D \\ C2: x_i^k = 1, x_j^k = 1, \forall d_i, d_j \in D, d_i^j > D_i^j \\ C3: x_i^k = 1, x_j^k = 1, \forall d_i, d_j \in D, |k-k'| > K_i^j \\ C4: x_i^k = \{0, 1\}, \forall d_i \in D, k \in K \\ C5: 0 \leq x_{d_i}(t_i) \leq L, 0 \leq y_{d_i}(t_i) \leq L, \forall d_i \in D \\ C6: x_i^k = 1, \forall d_i \in D, \text{SINR}_m > \text{SINR}_{\text{th}} \end{cases} \quad (9)$$

对于所有的用频单位而言, 在满足约束条件下应使得整体满意度最大, 其中限制条件 C1 规定对于一个用频装备至多接入一个频点, C2 规定当 2 台用频装备共用一个频点时应满足距离门限约束, 从而保证用频装备  $d_i$  和  $d_j$  的通信质量, C3 表示邻频干扰约束, C4 表示用频装备对于频点只有占用、不占用 2 个状态, C5 表示用频装备  $d_i$  每个时隙坐标约束, 即不能超出战场边界, C6 表示敌方电磁干扰约束.

频谱分配算法的关键目标是降低用频分配时间、提高整体用频满意度. 根据图 4 描述, 静态集中式频谱分配中, 会由于某一个单位提报用频时刻的拖延, 导致整个频谱分配过程无法开始; 而动态分布式频谱分配中, 某个单位的用频需求是否提报、何时提报, 并不影响其他单位提报用频需求和进行频谱分配, 相反, 如果该单位提报用频需求过迟, 其他单位均已完成频谱分配, 该单位只能从分配剩余的“边角料”里分配频谱资源, 在频谱资源紧张的情况下, 甚至面临“无频可分”的局面, 这就促使各单位尽快、尽早提报用频需求. 此外, 之所以采用动态分布式频谱分配方法, 就是希望能够克服作战单位提交用频需求的不确定性导致的整体用频分配方案延误, 那么, 频谱分配算法本身必须快速、高效, 以遗传算法为代表的低效全局寻优不再适合动态分布式频谱分配, 必须采用快速、高效的频谱分配算

法,运用于动态分布式频谱分配模式,为此,可以牺牲部分低优先级用频装备的频谱使用利益,从寻找全局最优解变为寻找局部最优解,以换取时间、效率上的大幅提高,适应瞬息万变的战场环境。

### 3 基于匹配理论分布式频谱分配算法

现代战场中,大量用频装备投入到战场中,战争样式愈加复杂,为确保频谱的使用需求管理能够适应战场的瞬息万变,应当根据战场特点,建立高效的频谱资源分配方. Gale 和 Shapley 根据稳定匹配理论提出的 Gale-Shapley 算法是组合数学中的匹配算法,一种能够高效解决频谱资源分配问题的方法. 考虑到在战场环境中频谱分配的复杂性,并且需要协商节点迅速对频谱分配任务快速求解,因此在决策过程中需要算法具有较低的复杂度并且保证大部分用频装备满意度.

#### 3.1 D-GS 频谱分配算法

用频分配优化问题属于混合整数非线性优化问题,如式(9)所示,在联合作战大规模用频背景下,传统集中式频谱分配算法复杂度随用频单位和用频装备数量呈指数上升,求解复杂度极高,难以适应瞬息万变的战场环境. 以区块链技术赋能战场用频分配,从静态集中式战场用频分配向动态分布式战场用频分配转变,本文通过 D-GS 算法按照偏好对用频装备快速匹配频谱,以逼近最优解的频谱分配方案大幅降低求解复杂度,以实现面向联合作战的战场快速频谱分配. 可以求得,当每个用频装备的用频需求为  $L$  个时,则 D-GS 算法时间复杂度为  $M \times O(n \times L)$ .

将战场用频装备的分配问题建模为多对一匹配问题,匹配的对象为用频装备与可用频谱资源,其中用频装备包括了用频偏好、同频干扰以及邻频干扰,通过设计匹配算法解决  $P1$  的优化分配问题,对以上问题简化并建模,并做出以下定义.

**定义 1** 匹配  $\mu$  是用频装备集合  $D$  与可用频点集合  $K$  之间的一种映射关系,满足以下条件.

(1) 每个用频装备  $d_i \in D$  能被分配到一个频点  $k \in K$  (唯一分配).

(2)  $\mu(d_i) = k$ : 表示用频装备  $d_i$  分配到频点  $k$ , 则  $d_i$  将使用  $k$  频点进行通信; 若  $\mu(d_i) = \emptyset$ , 则表示没有分配到可用频点资源.

(3)  $\mu(k) = \{d_1, d_2, d_3, \dots\}$ : 表示多个用频装备可以共享同一个频点  $k$ , 前提是这些用频装备之间的通信不会相互产生干扰,即满足系统干扰约束.

(4) 当且仅当  $(d_i, k) \in \mu$ : 表示稳定匹配,用频装备  $d_i$  与频点  $k$  之间的匹配满足所有干扰、优先级、时域等约束条件,并且该频点在之后的分配过程中不会被冲突用频装备占用.

**定义 2** 当用频装备  $d_i$  向频管部门申请频点  $k$  时,  $d_i$  不能对已经分配频点  $k$  的高优先级用频装备造成干扰,即  $d_i$  退出  $k$ , 转而向其他频谱提出申请,直到所有频谱分配完毕,表明用频装备与频谱之间形成稳定匹配,称此匹配为双边多对一匹配.

**定理 1** 基于以上 4 个规则,经过有限的迭代,频点和用频装备之间会收敛至稳定的匹配.

**证明:** 假设频点资源数量充足,因此最终所有的用频装备均会被匹配. 假设形成的匹配是不稳定,那么假设存在一个匹配组合  $(d_1, k_1)$ , 认为匹配结果优于 D-GS 算法下的分配结果,假设算法把  $k_1$  分配给了  $d_2$ , 给用频装备  $d_1$  分配了  $k_2$ , 因为  $d_1$  认为  $k_1$  优于  $k_2$ , 所以在向  $k_2$  发起匹配申请前一定执行了向  $k_1$  的匹配申请,而  $d_1$  最终分配结果为  $k_2$ , 说明  $d_1$  在申请  $k_1$  的过程中不满足用频复用条件,而被频管部门拒绝匹配,因此最终不会形成  $(d_1, k_1)$ . 因此这与假设矛盾,所得的匹配结果是稳定匹配.

**定理 2** 该匹配算法的最后匹配结果不一定是满意度最高的匹配.

**证明:** 假设对于同一频点  $k_1$ , 存在多个低优先级用频装备  $D_l = \{d_1, d_2, \dots\}$  和一个高优先级用频装备  $d_h$  均向该频点申请匹配,  $d_h$  与  $D_l$  中的低优先级用频装备不满足复用条件,且  $SAT_{d_h} < SAT_{D_l}$ , 根据定义 3 算法会将该频点分配给高优先级用频装备  $d_h$ .

基于 D-GS 区块链分布式频谱分配如算法 1 所示,主要通过 4 个步骤完成频谱分配: ①需求提交阶段,作战单位  $u_i$  在时隙  $t_n$  审核节点提交用频需求; ②频谱分配阶段,频谱区块链基于频谱数据,执行智能合约,即 D-GS 算法; ③方案共识阶段,对分配结果,通过 PBFT (Practical Byzantine Fault Tolerance) 在审核节点内达成共识,形成新的区块并添加至区块链中; ④分配反馈阶段,将分配结果发送给作战单位  $u_i$ . 其中,在方案共识阶段中,采用了 PBFT 共识机制来确保分布式频谱分配的安全性和一致性, PBFT 是联盟型区块链中广泛使用的主流共识协议,尤其是在部分节点可能失信的情况下,依然能够实现数据一致性和系统的高容错性,其中故障节点  $f$  应不超过  $\frac{N_E - 1}{3}$ , 其中  $N_E$  为审核节点数量. 智能合约与 PBFT 共识机制确保了数据在各节点之间的同步和安全流转. 智能合约实现频谱分配的自动化执行,使得每个节点在接收需求时自动调用算法生成分配方案; PBFT 共识确保所有节点对分配结果的验证达成一致,并将不可篡改的分配记录同步至所有节点.

#### 3.2 改进 D-GS 频谱分配算法

由于作战单位中用频装备是具有不同优先级,需

**算法 1 基于 D-GS 的分布式频谱分配算法**

输入: 提交用频需求作战单位集合  $U$ 、频谱数据 spectrum\_data、用频干扰矩阵  $D_{FH}$

输出: 用频分配结果  $X$

1. FOR  $t_i \in \mathcal{T}$  每个时隙内, 用频单位  $u_i$  上报用频需求
2. FOR EACH  $d_i \in u_i$  // 执行 D-GS 分配频谱
3. IF  $k_d(t_i) = \emptyset$  OR  $d_i$  经完成频谱分配
4. 将  $d_i$  从集合  $u_i$  移除
5. ELSE
6.  $k = k_{d_i}$ , 并将  $k$  从  $k_d(t_i)$  中移除
7. 根据式(6)判断是否存在干扰
8. IF 不存在干扰
9.  $x_i^k = 1$ , 根据式(7)、式(8)更新满意度
10. ELSEIF 有同频干扰的用频装备集合  $\varphi_l(d)$ , 且优先级低于  $d_i$
11.  $x_i^k = 1$ , 移除  $\varphi_l(d)$  与频点  $k$  的匹配
12. ELSE
13. 返回至步骤 2, 继续尝试分配
14. EDN IF
15. END FOR
16. 得到对用频单位  $u_i$  的分配方案 Proposal( $t_i$ ), 并广播给其他节点
17. 各节点对 Proposal( $t_i$ ) 验证, 并将验证信息附加到 Proposal( $t_i$ ) 中
18. 超过  $2f+1$  节点确认分配方案无误后, 进入提交阶段广播提交消息
19. 审核节点汇总提交消息, 生成新区块 Block, 追加至区块链, 并反馈分配结果
20. END FOR
21. FOR  $d_j \in \varphi(d)/\varphi(d)$  为已完成分配的用频装备集合
22. IF  $t_i - t_j \geq \Delta_d(t_i) // t_j$  为用频装备  $d_j$  提交时刻
23. 解除用频装备  $d_j$  与  $\mu(d_j)$  的匹配,  $x_j^{\mu(d_j)} = 0$
24. END IF
25. END FOR

要在频谱分配过程中, 重点对高优先级用频装备的用频需求提供保障. D-GS 会存在以下 2 个问题: ①传统的 Gale-Shapley 分配流程是按照偏好表顺序轮询用频装备, 当较低用频装备与频点构成稳定匹配关系时, 当高优先级用频装备与此用频装备不满足频谱复用条件, 有可能造成顺序靠后较高优先级用频装备“无频可用”; ②在分布式频谱分配架构中, 每个用频单位的提交用频需求的时间不同, 用频装备数量较少的单位往往提报用频需求较早, 用频装备较多的单位往往提报用频需求较晚, 区块链赋能的分布式架构中, “随到随分”的频谱分配机制往往导致用频装备多、优先级高、较晚提报用频需求的单位不得不在剩余频谱资源里“劣中选优”, 在大规模联合作战背景下, 甚至会出现“无频可分”的极端情况, 导致作战单位整体用频满意度趋低. 为克服上述 2 个问题, 对所提 D-GS 算法进行改进.

(1) 针对问题①, 传统的 Gale-Shapley 分配流程会导致较低用频装备与频点构成稳定匹配关系时, 较高

优先级用频装备可能无法找到可用的频谱. 为了解决这个问题, 可以考虑引入贪心机制. 具体实现时, 首先将所有用频装备按照优先级进行排序, 然后逐个分配频谱. 对于每个优先级最高的用频装备, 为其选择一个可用的频点进行分配. 如果该频点已被分配给本单位中其他用频装备, 在不满足复用条件且当前单位优先级大于其他用频装备时, 则考虑将该频点重新分配给当前用频装备, 同时将其他用频装备解除匹配关系. 通过贪心算法, 优先满足高优先级用频装备的频谱需求, 减少出现高优先级用频装备无频可用的情况.

(2) 针对问题②, 设置用频单位满意度阈值. 具体实现时, 当用频满意度高于满意度阈值时, 则不对该作战单位中优先级低的用频装备进行频谱分配, 然后进入下一个提交用频需求的作战单位中, 使得满整体作战单位均在一个较高的水平, 从而避免早提报需求单位中低优先级用频装备占据频谱资源, 后续提交需求的作战单位高、中优先级用频装备无频可用. 其中满意度阈值  $SAT_{th}$  定义如下: 作战单位内完成频谱分配的用频装备数量/单位内总用频装备数量.

基于以上对改进 DG-S 算法的分析, 改进 DG-S 频谱分配算法见算法 2, 记为 D-GS-mod (modified D-GS) 算法.

## 4 仿真分析与讨论

### 4.1 仿真参数及算法对比

本节面向一定区域大小的联合作战频谱分配场景, 对所提出的算法进行仿真验证, 仿真基于 Python3.7 实现, 其中运行硬件环境为 Intel(R) Core(TM) i512400F 处理器, GPU 为 NVIDIA GeForce GTX 4070, 编程软件为 VSCODE 软件. 考虑在大规模联合作战场景<sup>[34]</sup>, 将战场区域建立为  $100 \text{ km} \times 100 \text{ km}$  大小, 用频装备随机分布该区域内, 共有 10 个联合作战单位, 为简化分析, 取单位内的用频装备数量相等. 作战单位的频谱申请遵循排队论过程, 所有作战单位用频提报时刻  $t$  服从泊松过程, 即  $t \sim P(\lambda) = (\lambda t)^n e^{-\lambda t} / n!$ , 其建模为平均达到率为  $\lambda$  的泊松过程, 可按照  $\lambda=5$  的平均到达率来申请用频需求, 即单位时间(s)内有 5 个单位进行用频需求的提报, 则第  $m$  个用频单位用频提报时间服从下面的指数分布:

$$t_m = \lambda \exp[-\lambda(t_m - t_{m-1})], \quad m = 1, 2, \dots, M \quad (10)$$

在战前用频分配中为减少可能发生的用频干扰、故障, 确保战斗中用频装备的正常运行, 通常给用频装备分配 2~3 个备用频谱<sup>[36]</sup>, 结合联合作战存在大量的用频装备和实际战场用频情况, 取可用频点数量 2 000. 在本文仿真中每个用频装备申请 3 个频点, 邻频干扰门限频点数量为 2~3, 敌方干扰门限为 1~5 dB<sup>[37]</sup>. 仿真具

## 算法 2 基于 D-GS-mod 的分布式频谱分配算法

输入: 交用频需求作战单位集合  $U$ 、频谱数据 spectrum\_data、用频干扰矩阵  $D_{\text{TH}}$

输出: 用频分配结果  $X$

1. FOR  $t_i \in \mathcal{T}$ //每个时隙内,用频单位  $u_i$  上报用频需求
2. sort( $u_i$ )//对用频单位内用频装备根据优先级高低进行从高到低排序
3. FOR each  $d_i \in u_i$ //执行 D-GS 分配频谱
4. IF  $k_{d_i}(t_i) = \emptyset$  OR  $d_m$  经完成频谱分配
5. 将  $d_m$  从集合  $u_i$  移除
6. ELSE
7.  $k = k_{d_i}$ , 并将  $k$  从  $k_{d_i}(t_i)$  中移除
8. 根据式(6)判断是否存在干扰
9. IF 不存在干扰
10.  $x_i^k = 1$ , 根据式(7)、式(8)更新满意度
11. ELSEIF 有同频干扰的用频装备集合  $\varphi_i(d)$ , 且优先级低于  $d_m$
12.  $x_i^k = 1$ , 移除  $\varphi_i(d)$  与频谱  $k$  的匹配
13. ELSE
14. 返回至步骤 2, 继续尝试分配
15. EDN IF
16. 计算本单位满意度, IF Sat > SAT<sub>th</sub>, 结束对本单位的频谱分配
17. END FOR
18. 得到对用频单位  $u_i$  的分配方案 Proposal( $t_i$ ), 并广播给其他节点
19. 各节点对 Proposal( $t_i$ ) 验证, 并将验证信息附加到 Proposal( $t_i$ ) 中
20. 超过  $2f+1$  节点确认分配方案无误后, 进入提交阶段广播提交消息
21. 审核节点汇总提交消息, 生成新区块 Block, 追加至区块链, 并反馈分配结果
22. END FOR
23. FOR  $d_j \in \varphi(d)$ //已分配的用频装备集合
24. IF  $t_i - t_j \geq \Delta_{d_j}(t_j)$  //  $t_j$  为用频装备  $d_j$  提交时刻
25. 解除用频装备  $d_j$  与  $\mu(d_j)$  的匹配,  $x_j^{\mu(d_j)} = 0$
26. END IF
27. END FOR

体参数如表 2 所示。

为评估本文所提算法的性能, 将其与以下算法进行比较:

(1) 穷举搜索算法<sup>[38]</sup>. 穷举搜索 (Exhausted-Searching, ES) 枚举出所有匹配可能, 找到满意度最大分配组合, 作为该分配问题中的满意度理论上限. 但在大规模的频谱分配问题上具有极高的复杂度, 当用频装备规模为  $n$  时, 其复杂为  $O(|R+1|^n)$ , 其中  $|R|=3$  为用频装备申请的频点数量.

(2) 灰狼算法 (Grey Wolf Optimizer, GWO). 灰狼优化算法是一种新颖的群智能算法, 文献[23]的研究表明灰狼算法在资源分配等问题上优于其他的启发式算法, 广泛应用于资源分配、路径规划等优化问题, 其时间复杂度为  $O(NDT)$ ,  $N$  为灰狼种群规模,  $D$  为灰狼个体

表 2 仿真参数说明

参数名称	参数值
战场区域大小 $L/\text{km}$	100 × 100
作战单位数量 $M$	10
可用频点数量	2 000
泊松过程参数 $\lambda$	5
用频装备优先级 Rank	{1,2,3}
用频装备频点需求数	3
干扰功率/W	20
用频装备功率/W	{2 050 100}
SINR <sub>th</sub> /dB	1~5
时隙时长 $\tau/\text{ms}$	2
邻频干扰范围	2~3
用频装备移动速度 $v_{d_i}(t)/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	0~5

为维度, 在本文中  $D$  与用频装备数量维度一致, 每个个体代表一种频谱分配方案,  $T$  为最大迭代次数, 通常  $N$ 、 $T$  一般与问题规模呈正相关. 将 GWO 应用在动态分布式和静态集中式频谱方式下, 即分布式灰狼算法 (Distributed GWO algorithm, D-GWO) 与集中式灰狼算法 (Centralized GWO algorithm, C-GWO), 其中 D-GWO 种群规模  $N=50$ , 迭代次数  $T=100$ , C-GWO 种群规模  $N=100$ , 迭代次数  $T=200$ .

(3) 分布式多智能体频谱分配策略 (Multi-Agent Spectrum Allocation Strategy, MASAS)<sup>[18]</sup>. MASAS 是一种多智能体强化学习算法, 适用于复杂动态环境下的资源分配问题. 它在频谱分配场景中, 能够基于各个用频装备的局部信息自主决策, 然而, 因状态空间和计算复杂度较高, 导致执行效率受限, 其时间复杂度与智能体数量  $n$  相关, 同时还依赖于动作空间数量, 即申请频点数量  $R$ , 则时间复杂度为  $O(n \times |R|^n \times f)$ , 其中  $O(f)$  为单个智能体策略更新的复杂度, MASAS 参数设置为折扣因子  $\gamma=0.95$ , 学习率=0.01, 深度 Q 神经网络结构为 128-256-128, 训练次数为 10 000, 探索率从 0.5 线性衰减至 0.1.

(4) 联邦多智能体深度 Q-network (Federated Multi-agent Deep Q Network, FMDQN)<sup>[17]</sup>. 与多智能体算法不同的是, FMDQN 维护了全局神经网络, 每隔固定循环后对多个代理的本地模型参数进行汇总和更新, 实现加速收敛和协同学习. 其时间复杂度为  $O(n \times |R|^n \times f)$ , 其中  $O(f)$  表示单个代理模型更新和联邦聚合的复杂度, FMDQN 参数设置为折扣因子  $\gamma=0.95$ , 学习率=0.01, 训练次数=10 000, 联邦聚合间隔次数为 100.

以下通过仿真分析比较 ES、MASAS、FMDQN、D-GWO、D-GS、C-GWO 不同算法在战场频谱分配方面的性能, 其中强化学习算法 (MASAS、FMDQN) 基于 Tensorflow 1.14 框架进行训练. 如未特别说明, 仿真结果均

取自  $2 \times 10^5$  蒙特卡罗仿真后的平均值。

## 4.2 D-GS的频谱分配性能

### 4.2.1 用频装备/可用频点比对频谱分配性能影响

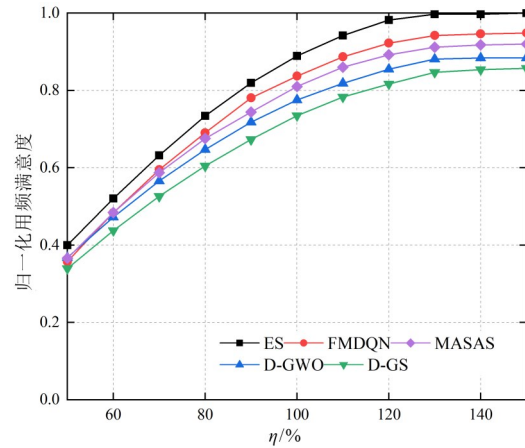
首先分析了所提算法在面向不同用频装备频谱比下频谱分配的时间复杂性和满意度变化。考虑到大规模联合作战涵盖作战区域广、海量用频装备的特点<sup>[36]</sup>，首先研究了用频装备/可用频点比  $\eta$  对频谱分配性能影响，取  $\eta$  为 50%~150%，频点数量  $S=2\ 000$ 。

图 5 为时间开销、用频满意度等频谱分配性能随  $\eta$  的变化趋势，为便于比较，对用频满意度和时间开销进行归一化处理。图 5(a) 为用频满意度随  $\eta$  的变化趋势，可见用频满意度随  $\eta$  的提升而不断升高，从用频满意度的角度来看，D-GS 与 MASAS、D-GWO 的差别不大，可以忍受。图 5(b) 为时间开销随  $\eta$  的变化趋势，ES 算法的时间复杂度最高，符合预期。相比于 D-GWO、FMDQN 和 MASAS 算法，D-GS 在时间开销方面表现出显著优势，与 D-GWO 相比，D-GS 的时间开销降低了 4~8 倍；而 MASAS 算法由于需要进行多智能体协同优化，导致时间开销明显高于 D-GS 算法。与 MASAS、FMDQN 相比，D-GS 算法在时间开销上减少了约一个数量级，表现出更高的执行效率，并且 FMDQN 与 MASAS 算法时间开销相对来说差别不大，因此在后续仿真中选其一进行对比分析。通过上述分析可见，进行分布式战场频谱分配，能够在用频满意度基本符合要求的情况下，极大地改善战场频谱分配的效率；而在分布式频谱分配框架下采用快速匹配算法，又能够进一步提高战场频谱分配的效率，极大地压缩战场频谱分配的时间，适应信息化战场的瞬息万变。

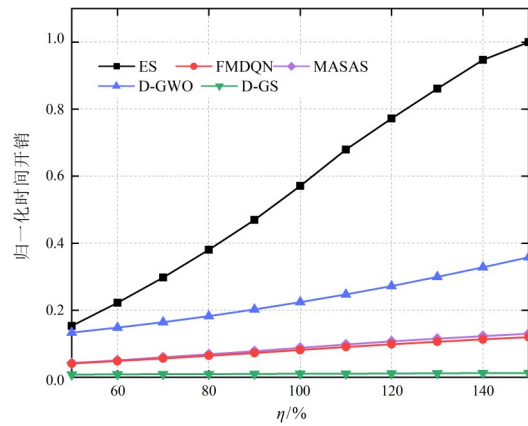
图 6 仿真分析了不同敌方干扰强度下的算法性能，从图 6 可以看出干扰数量增加时，频谱分配时间增大，其中 D-GWO 算法增加幅度明显，这是因为 GWO 算法本身是静态优化方式，相比之下，本文提出的 D-GS 算法则表现出更高的实时性和适应性，时间开销最低，显著低于当前主流的基于强化学习的 FMDQN 和 MASAS 算法。验证了所提算法能够在干扰条件下更快做出分配调整，减少重新分配延迟，且在性能指标上波动更小，体现出更高的抗干扰能力。

### 4.2.2 用频装备/可用频点比对频谱分配性能影响

评估高优先级用频装备占比  $\varepsilon$  对频谱分配性能的影响。图 7 为 MASAS、D-GWO 和 D-GS 的时间开销、用频满意度随  $\varepsilon$  的变化趋势，其中固定频点数量  $K=2\ 000$ ， $\varepsilon=10\% \sim 60\%$ ，其中  $\eta=0.8、1.0、1.2$ 。由图 7(a) 可见 MASAS 的满意度总体均高于 D-GWO 和 D-GS，且用频满意度均随  $\varepsilon$  的升高而升高，特别是在高优先级用频装备比例较高的情况下，MASAS 的多智能体优化进一步提



(a) 用频满意度随  $\eta$  的变化趋势



(b) 时间开销随  $\eta$  的变化趋势

图 5  $\eta$  对频谱分配性能的影响

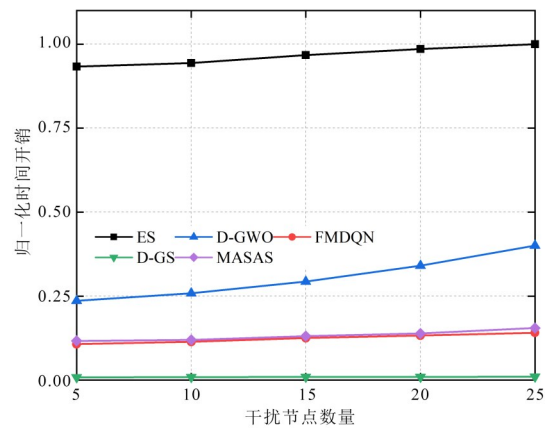
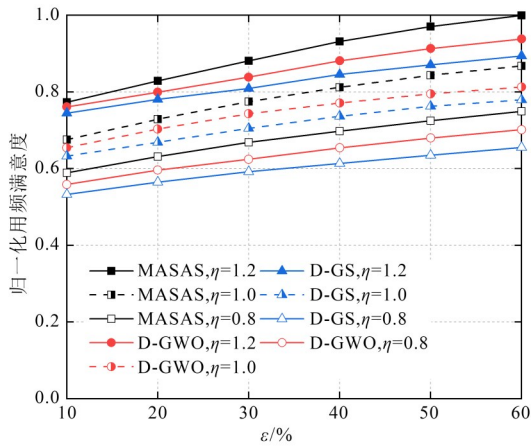


图 6 干扰节点数量对频谱分配性能的影响

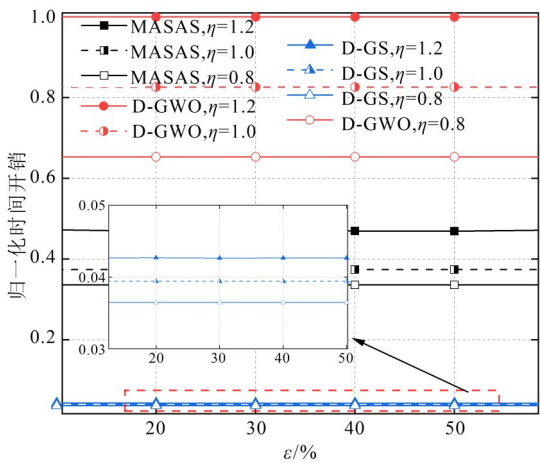
升了分配效果。图 7(b) 为时间开销随  $\varepsilon$  的变化趋势，D-GS 在时间开销方面的优势依旧明显， $\varepsilon$  的变化对时间开销影响无影响，其本质上均为对一个用频装备分配频谱，无论其是高优先级还是低优先级。

### 4.3 D-GS-mod的频谱分配性能

在分布式频谱分配架构下，由于用频单位提交时



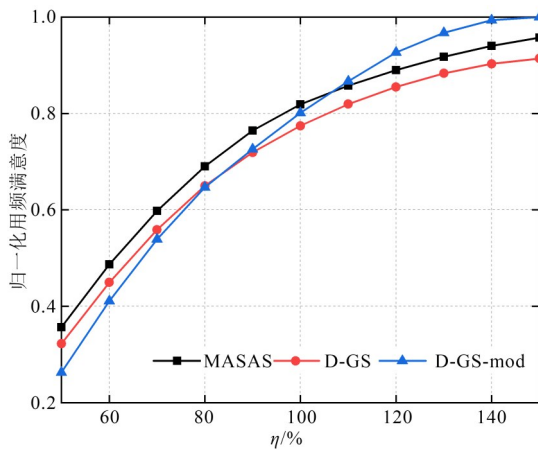
(a) 用频满意度随  $\varepsilon$  的变化趋势



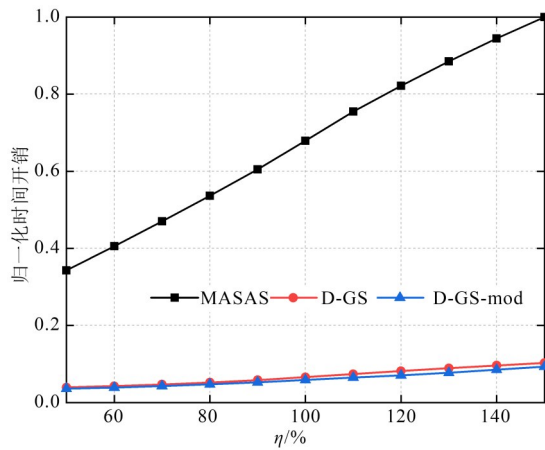
(b) 时间开销随  $\varepsilon$  的变化趋势

图 7  $\varepsilon$  对频谱分配性能的影响

刻不同,使得先提交用频单位满意度较高,根据“先到先得”的原则,在不满足频谱复用条件时,存在先提交需求的用频装备对后续提交中高优先级用频装备的干



(a) 用频满意度随  $\eta$  的变化趋势



(b) 时间开销随  $\eta$  的变化趋势

图 9  $\eta$  对频谱分配性能的影响

扰,因此会产生晚提交用频需求的用频单位“无频可用”,对联合作战带来巨大隐患.为解决此问题,提出改进型D-GS算法(D-GS-mod),对D-GS加入贪心机制,未达到满意度阈值时,优先对单位内高优先级用频装备分配频谱(仿真中设置满意度阈值 $SAT_{th}=0.85$ ).

图 8 对比了 C-GWO、D-GS、D-GS-mod 和 MASAS 在用频装备  $N=1000, \eta=120\%$  时,10 个作战单位  $U_1 \sim U_{10}$  的用频满意度状况,可见, C-GWO 总体用频满意度较高且平均,不存在“厚此薄彼”的现象.在 D-GS、MASAS 中,先提报用频需求的单位用频满意度较高,后提报用频需求的单位用频满意度较低,由于在算法中使用了时域错开,最后提报用频需求的单位用频满意度在 20% 左右,仍低于集中式分配方式,说明提报用频需求的先后对用频满意度有很大影响;D-GS-mod 中,虽然用频满意度仍不及 C-GWO,但总体用频满意度已经得到了较大改善,并最后提报用频需求的单位,用频满意度从 D-GS 中的不足 10% 提高到 D-GS-mod 中的 40% 左右,说明改进型 D-GS 算法对于改进频谱分配性能有效.

图 9 为与 MASAS 和 D-GS 相比, D-GS-mod 在用频

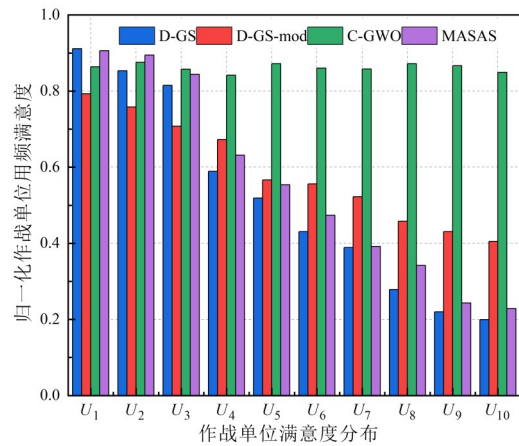


图 8 作战单位满意度分布( $SAT_{th}=85\%$ )

满意度和时间开销上随 $\eta$ 的变化趋势. 可见,与D-GS相比,D-GS-mod的用频满意度更高、时间开销更低,表明D-GS-mod算法的频谱分配性能优于D-GS算法. 需要注意的是,在图9(a)中,当 $\eta \approx 80\%$ 时,D-GS-mod算法与D-GS算法的用频满意度性能发生交叉,当 $\eta \approx 110\%$ 时,D-GS-mod满意度超过了MASAS算法,说

明D-GS-mod算法更加适用于频谱资源紧缺的情况.

图10为与MASAS和D-GS算法相比,D-GS-mod在用频满意度和时间开销上随 $\varepsilon$ 的变化趋势. 可见,D-GS-mod的用频满意度更高、时间开销更低,表明D-GS-mod的频谱分配性能整体优于D-GS算法.

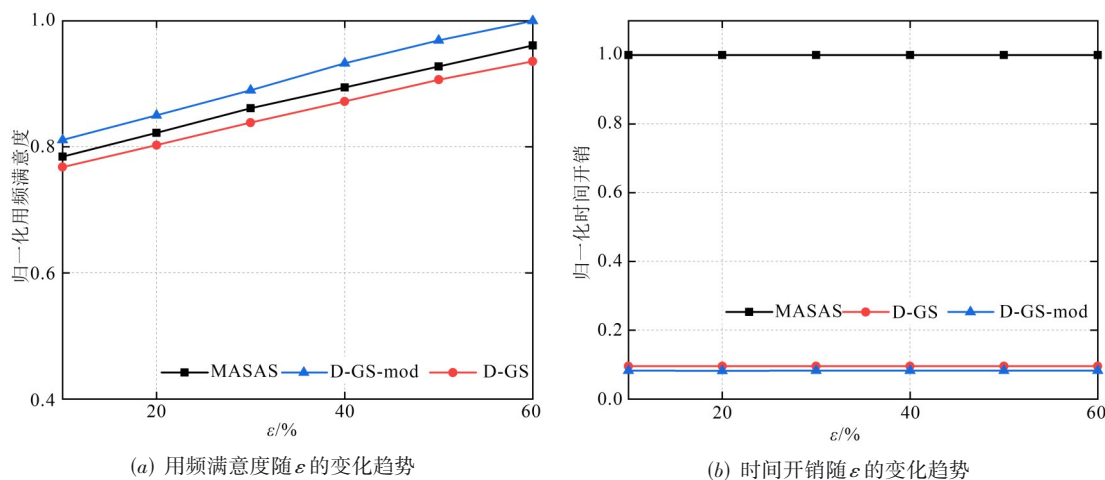


图10  $\varepsilon$ 对频谱分配性能的影响

## 5 结论

本文着眼于当前战场用频集中式管理分配效率低的问题,从区块链基本原理入手,基于战场用频的复杂性以及较高的实时性、机动性要求,提出一种基于区块链架构下D-GS算法. 通过区块链的去中心化管理和智能合约的自动化分配,本文所提算法能够更灵活、有效地满足大规模用频装备的频谱分配需求. 仿真表明,与主流分布式频谱算法相比,本文算法用频等待时间、时间开销上优于D-GWO算法、MASAS算法和FMDQN算法,可实现对大规模用频装备的快速分配,对于大规模用频装备的频谱申请,求解时间与用频装备数量成正比,保证了在极短的时间完成任务分配,使针对战场的频谱分配任务可以高效完成,不延误战机,并且体现出更高的抗干扰能力,减少分配延迟. 对D-GS进行改进,D-GS-mod算法使对整体作战单位的满意度分布更为合理,提高了整体用频装备用频满意度. 下一步工作中,将进一步优化频谱分配算法,探索基于区块链的频谱管理架构,提高战场频谱分配效率.

## 参考文献

[1] LUONG N C, LU X, HOANG D T, et al. Radio resource management in joint radar and communication: A comprehensive survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2021, 23(2): 780-814.

[2] 刘玲. 未来电子战展望[J]. 电子信息对抗技术, 2021, 36(6): 30-33, 99.  
LIU L. Look into the future of electronic warfare[J]. Electronic Information Warfare Technology, 2021, 36(6): 30-33, 99. (in Chinese)

[3] QU G Q, HE C G, CHEN Q, et al. Tactical data-oriented decentralized communication scheme in vehicle-assisted networks: Challenges and solutions[J]. IEEE Communications Magazine, 2024, 62(1): 56-61.

[4] 王为念, 苏健, 陈勇, 等. 基于多智能体深度强化学习的车联网频谱共享[J]. 电子学报, 2024, 52(5): 1690-1699.  
WANG W N, SU J, CHEN Y, et al. Multi-agent reinforcement learning enabled spectrum sharing for vehicular networks[J]. Acta Electronica Sinica, 2024, 52(5): 1690-1699. (in Chinese)

[5] 阮天宸, 吴启晖, 赵世瑾, 等. 认知学习: 电磁频谱空间机器学习新范式[J]. 电子学报, 2023, 51(6): 1430-1442.  
RUAN T C, WU Q H, ZHAO S J, et al. Cognitive learning: A new paradigm for machine learning in electromagnetic spectrum environment[J]. Acta Electronica Sinica, 2023, 51(6): 1430-1442. (in Chinese)

[6] ZHANG C D, WANG L, JIANG R D, et al. Radar jamming decision-making in cognitive electronic warfare: A review[J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(11): 11383-11403.

[7] TANER GÜÇLÜ T, KARASAN O E, AKGÜN İ, et al. Radio communications interdiction problem under deterministic and probabilistic jamming[J]. Computers & Operations

- Research, 2019, 107: 200-217.
- [8] 陈平平, 张旭, 谢肇鹏, 等. 基于多智能体近端策略优化的多信道动态频谱接入[J]. 电子学报, 2024, 52(6): 1824-1831.  
CHEN P P, ZHANG X, XIE Z P, et al. Multi-channel dynamic spectrum access based on multi-agent proximal policy optimization[J]. Acta Electronica Sinica, 2024, 52(6): 1824-1831. (in Chinese)
- [9] ZHAO Q, SADLER B M. A survey of dynamic spectrum access[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2007, 24(3): 79-89.
- [10] XING Y P, CHANDRAMOULI R, MANGOLD S, et al. Dynamic spectrum access in open spectrum wireless networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2006, 24(3): 626-637.
- [11] LIE A, HÅKEGÅRD J E, ULVERSØY T, et al. Dynamic spectrum management and routing solutions for multi-radio mobile ad hoc networks[J]. IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, 2024, 10(2): 580-593.
- [12] LIANG Y C. Dynamic Spectrum Management: from Cognitive Radio to Blockchain and Artificial Intelligence[M]. Berlin: Springer Nature, 2020.
- [13] SONG X Q, HUA Y Q, YANG Y, et al. Distributed resource allocation with federated learning for delay-sensitive IoV services[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2024, 73(3): 4326-4336.
- [14] CHAI F R, ZHANG Q, YAO H P, et al. Multi-agent DDPG based resource allocation in NOMA-enabled satellite IoT[J]. IEEE Transactions on Communications, 2024, 72(10): 6287-6300.
- [15] 景旭, 刘滋雨. 基于超图和 MuSig2 聚合签名的联盟链主从多链共识机制[J]. 电子学报, 2024, 52(3): 803-813.  
JING X, LIU Z Y. Master-slave multi-chain consensus mechanism of consortium blockchain based on hypergraph and MuSig2[J]. Acta Electronica Sinica, 2024, 52(3): 803-813. (in Chinese)
- [16] ARIYARATHNA T, HARANKAHADENIYA P, ISTHIKAR S, et al. Dynamic spectrum access via smart contracts on blockchain[C]//2019 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). Piscataway: IEEE, 2019: 1-6.
- [17] ZHANG H W, LENG S P, CHAI H Y. A blockchain enhanced dynamic spectrum sharing model based on proof-of-strategy[C]//2020 IEEE International Conference on Communications (ICC). Piscataway: IEEE, 2020: 1-6.
- [18] YE J W, KANG X, LIANG Y C, et al. A trust-centric privacy-preserving blockchain for dynamic spectrum management in IoT networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(15): 13263-13278.
- [19] LI Z G, WANG W, GUO J, et al. Blockchain-empowered dynamic spectrum management for space-air-ground integrated network[J]. Chinese Journal of Electronics, 2022, 31(3): 456-466.
- [20] JIANG M, LI Y Q, ZHANG Q, et al. Decentralized blockchain-based dynamic spectrum acquisition for wireless downlink communications[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2021, 69: 986-997.
- [21] LI Z G, WANG W, GUO J, et al. Blockchain-assisted dynamic spectrum sharing in the CBRS band[C]//2021 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC). Piscataway: IEEE, 2021: 864-869.
- [22] MAKSYMUK T, GAZDA J, VOLOSIN M, et al. Blockchain-empowered framework for decentralized network management in 6G[J]. IEEE Communications Magazine, 2020, 58(9): 86-92.
- [23] TOSH D K, SHETTY S, FOYTIK P, et al. Blockchain-empowered secure Internet-of-battlefield things (IoBT) architecture[C]//2018 IEEE Military Communications Conference (MILCOM). Piscataway: IEEE, 2018: 593-598.
- [24] BUENROSTRO E D, RIVERA A O G, TOSH D, et al. Evaluating usability of permissioned blockchain for Internet-of-battlefield things security[C]//2019 IEEE Military Communications Conference (MILCOM). Piscataway: IEEE, 2019: 841-846.
- [25] GHIMIRE B, RAWAT D B, LIU C M, et al. Sharding-enabled blockchain for software-defined Internet of unmanned vehicles in the battlefield[J]. IEEE Network, 2021, 35(1): 101-107.
- [26] 杨健, 陈曦, 丁国如, 等. 基于区块链的频谱设备网络中防御拜占庭攻击的分布式共识机制[J]. 通信学报, 2020, 41(3): 1-16.  
YANG J, CHEN X, DING G R, et al. Blockchain-driven distributed consensus mechanism in defending Byzantine attack for the Internet of spectrum device[J]. Journal on Communications, 2020, 41(3): 1-16. (in Chinese)
- [27] ZHANG H W, LENG S P, YIN H B, et al. Intelligent consensus enhanced spectrum sharing in heterogeneous wireless networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2024, 11(19): 30939-30952.
- [28] 孙君, 熊关. SCMA mMTC 系统中基于联盟区块链的无线电资源交易的信用支付[J]. 电子学报, 2019, 47(8): 1677-1684.  
SUN J, XIONG G. Credit payment for radio resources transactions based on consortium blockchain in SCMA mMTC[J]. Acta Electronica Sinica, 2019, 47(8): 1677-1684. (in Chinese)
- [29] WANG L, ZHENG Y H, ZHANG Y, et al. Secure spectrum sharing for satellite Internet-of-things based on blockchain[J]. Wireless Personal Communications, 2023, 131(1): 357-369.
- [30] LIU L J, SHAFIQ M, SONAWANE V R, et al. Spectrum trading and sharing in unmanned aerial vehicles based on

- distributed blockchain consortium system[J]. Computers and Electrical Engineering, 2022, 103: 108255-108265.
- [31] CHEEMA M A, SHEHZAD M K, QURESHI H K, et al. A drone-aided blockchain-based smart vehicular network[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2021, 22(7): 4160-4170.
- [32] FERNANDO P, DADALLAGE K, GAMAGE T, et al. Distributed-proof-of-sense: Blockchain consensus mechanisms for detecting spectrum access violations of the radio spectrum[J]. IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, 2023, 9(5): 1110-1125.
- [33] ZHANG H W, LENG S P, WEI Y K, et al. A blockchain enhanced coexistence of heterogeneous networks on unlicensed spectrum[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2022, 71(7): 7613-7624.
- [34] LI Z G, WANG W, WU Q H, et al. Multi-operator dynamic spectrum sharing for wireless communications: A consortium blockchain enabled framework[J]. IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, 2023, 9(1): 3-15.
- [35] XU W J, WANG W, LI Z G, et al. Joint task allocation and resource optimization for blockchain enabled collaborative edge computing[J]. China Communications, 2024, 21(4): 218-229.
- [36] 彭军, 熊辉. 改进 AC-Tabu 算法在军用频率指配中的应用[J]. 计算机仿真, 2014, 31(11): 6-10, 14.  
PENG J, XIONG H. The application of an improved AC-tabu algorithm for the military frequency assignment[J]. Computer Simulation, 2014, 31(11): 6-10, 14. (in Chinese)
- [37] 刘铭, 查淞, 黄纪军, 等. 基于多目标优化的联合作战用频规划方法[J]. 电波科学学报, 2022, 37(3): 434-442.  
LIU M, ZHA S, HUANG J J, et al. Frequency planning method for joint operations based on multi-objective optimization[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2022, 37(3): 434-442. (in Chinese)
- [38] CHEN X, YANG J, QIU J F. Blockchain-empowered high-frequency spectrum management IoT: A multilayer PBFT consensus perspective[J]. Wireless Communications and Mobile Computing, 2022, 1: 2857510.

#### 作者简介



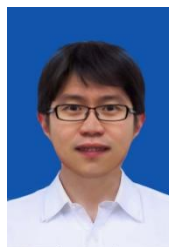
侯杰 男, 1997年12月出生于山东省泰安市. 现为南京理工大学电子工程与光电技术学院博士研究生. 主要研究方向为电磁频谱管理、深度学习、强化学习.  
E-mail: 223104130109@njust.edu.cn



陈曦 女, 1984年10月出生于江苏省徐州市. 现为南京理工大学研究员、硕士生导师. 主要研究方向为电磁频谱管理技术、电磁空间数字孪生.  
E-mail: chenxi@njust.edu.cn



陶诗飞 男, 1987年7月出生于江苏省南京市. 现为南京理工大学副教授、硕士生导师. 主要研究方向为雷达目标特性分析、雷达成像及信号处理、计算电磁学.  
E-mail: s.tao@njust.edu.cn



王昊 男, 1980年7月出生于江苏省南京市. 现为南京理工大学电子工程与光电技术学院研究员、博士生导师. 主要研究方向为数字波束形成天线系统、多功能雷达天线系统、新型通信天线系统. 中国电子学会会员编号: E190159575M.  
E-mail: haowang@mail.njust.edu.cn



侯至阳 男, 2000年1月出生于内蒙古自治区鄂尔多斯市. 现为南京理工大学电子工程与光电技术学院博士研究生. 主要研究方向为频谱感知、小样本学习.  
E-mail: houzhongyang@njust.edu.cn



胡乃杰 男, 2001年6月出生于山东省日照市. 现为南京理工大学机械工程学院硕士研究生. 主要研究方向为电磁空间数字孪生、频谱感知.  
E-mail: hunaijie@njust.edu.cn