



研究与开发

## 基于区块链的频谱共享算法

韩英杰<sup>1,2</sup>, 朱琦<sup>1,2</sup>

1. 南京邮电大学江苏省无线通信重点实验室, 江苏 南京 210003;
2. 南京邮电大学教育部泛在网络健康服务系统工程研究中心, 江苏 南京 210003)

**摘要:** 无人机因其具有成本低、移动性高且部署灵活等特点, 可以广泛应用于许多场景, 但是大多数无人机工作在免执照频段, 缺乏安全监管。为此, 构建了一种基于区块链的频谱共享系统模型, 其中移动网络运营商为联盟链的全节点, 同时作为区块链的预言机节点, 各个移动运营商可以实时更新频谱的使用情况, 此外, 整个频谱交易运行在区块链上, 利用智能合约进行交易, 提高了频谱交易的有效性和安全性。同时引入激励机制, 激励移动网络运营商积极参与出租频段和计算频谱共享策略。提出一种基于累计干扰的图着色频谱共享拍卖算法, 该算法综合考虑租赁频谱收益、服务费以及干扰影响, 定义了运营商的效用函数, 采用基于累计干扰的图着色方法实现了高效的频谱共享。仿真结果表明, 提出的方法可以提高无人机和运营商双方的收益, 同时保证了频谱交易的安全性。

**关键词:** 区块链; 智能合约; 频谱共享; 无人机

**中图分类号:** TN929.5

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11959/j.issn.1000-0801.2026006

## Blockchain-based spectrum sharing algorithm

Han Yingjie<sup>1,2</sup>, Zhu Qi<sup>1,2</sup>

1. Jiangsu Key Lab of Wireless Communications, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China
2. Engineering Research Center of Health Service System Based on Ubiquitous Wireless Networks, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China

**Abstract:** Unmanned aerial vehicles (UAVs) can be widely used in many scenarios due to their low cost, high mobility and flexible deployment, but most UAVs work in license-free frequency bands and lack safety supervision. A blockchain-based spectrum sharing system model was constructed. In this model, the mobile network operator was the full node of the consortium chain and the oracle node of the blockchain, each mobile operator could update the spectrum usage in real time, and the entire spectrum transaction ran on the blockchain and used smart contracts to trade, which improved the effectiveness and security of spectrum trading. At the same time, an incentive mechanism

收稿日期: 2025-02-27; 修回日期: 2025-06-07

通信作者: 朱琦, zhuqi@njupt.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.92367302); 江苏省重点研发计划项目 (No.BE2022068-2)

**Foundation Items:** The National Natural Science Foundation of China (No.92367302), Jiangsu Provincial Key and Development Program (No.BE2022068-2)

was introduced to incentivize mobile network operators to actively participate in leased frequency bands and computing spectrum sharing strategies. A graph coloring spectrum sharing auction algorithm based on cumulative interference was proposed, which comprehensively considered the revenue of leased spectrum, service fee and interference impact to define the utility function of operators, and realized efficient spectrum sharing based on cumulative interference map coloring method. The simulation results show that the proposed method can improve the benefits of both the UAV and the operator, and at the same time ensure the security of spectrum trading.

**Key words:** blockchain, smart contract, spectrum sharing, unmanned aerial vehicle

## 0 引言

无人机 (unmanned aerial vehicle, UAV) 成本低、移动性高且部署灵活, 作为物联网技术的重要组成部分, 广泛应用于许多工业和科学领域<sup>[1-3]</sup>。但是由于频谱资源的匮乏, 无人机没有其专用频谱, 大多数无人机工作在免执照的频谱上, 缺乏有效的频谱监管, 易受干扰。认知无线电技术的出现缓解了这一问题, 认知无线电技术能够根据干扰情况调整设备的参数, 经过主用户 (primary user, PU) 授权后允许次用户 (secondary user, SU) 共享其频谱<sup>[4]</sup>, 因此基于频谱共享的无人机通信系统得到人们的广泛关注。

基于频谱共享的无人机通信系统中存在许多潜在的挑战, 特别是如何通过动态频谱共享技术更有效地共享有限的频谱资源<sup>[5]</sup>。文献[6]研究了无人机与D2D通信网络的频谱共享问题, 提出无人机通过空间频谱感知技术, 使运营商能够在占用D2D的许可频段上进行机会性频谱访问。文献[7]提出了3D时空频谱感知(3DSTS)方法, 利用无人机的灵活性提高频谱感知的效率, 从而使无人机可以更好地使用主用户的空闲频谱, 实现频谱共享。文献[8]设计了一种智能频谱分配和轨迹优化方案, 提升了无人机通信系统在干扰和频谱资源有限的环境中的性能。文献[9]通过模糊逻辑算法提出了一种优化信道分配的方法, 提升了无人机网络的效率和可靠性。上述研究均未充分考虑频谱共享中的安全问题, 包括频谱交易的安全问题和信息的隐私问题。

区块链是一种分布式账本, 具备去中心化、难以篡改、透明的特性, 可以为频谱交易提供安全保障, 通过智能合约保证了交易的有效性和可拓展性, 其中的预言机节点可以获取链下的数据, 弥合链上与链下世界的鸿沟<sup>[10-11]</sup>。用户和运营商可以通过智能合约进行频谱资源的交易, 使得频谱交易更加有效和可靠。文献[12]提出了一个框架, 通过区块链技术创建去中心化的频谱交易二级市场, 以优化频谱利用率。文献[13]设计了一种基于干扰的交易验证机制, 用来验证区块中存储的频谱交易, 提高了频谱共享的效率。文献[14]提出了一种基于区块链和人工智能的动态频谱共享模型, 利用区块链实现动态频谱共享的功能, 并利用人工智能提高动态频谱共享中的模式识别和决策性能, 提高了频谱共享的安全性和有效性。文献[15]提出了一种基于信誉的赢家选择机制和维克里拍卖的付款规则, 在保障无人机辅助通信网络满足最低速率需求的同时, 最大化蜂窝系统的总传输容量, 提高了共识算法的效率。文献[16]在现有免执照频谱无线电业务模型的基础上, 提出了一种区块链辅助动态频谱管理模型, 利用区块链技术提高用户的频谱管理效率和服务质量。文献[17]提出了一个基于区块链的动态频谱使用权框架, 解决了传统静态分配的局限性, 同时提出了一种新颖的定价模型, 该模型结合了影响频谱价值的多个因素, 并在Canton ledger互操作性区块链协议上使用数字资产建模语言(DAML)智能合约平台演示了其实现。



上述文献对基于区块链的动态频谱共享进行了研究,但是还存在不完善之处。文献[13]缺少激励机制,并未考虑主用户共享频谱的意愿。文献[16]中,无人机之间的干扰采用二元冲突,对干扰的考虑不够充分。据此,本文提出了一种基于区块链的频谱共享方法,无人机通过租赁移动运营商的频段进行工作,该算法在保证运营商主用户和无人机次用户服务质量(quality of service, QoS)的前提下,最大化频谱分配效率和运营商的收益,保证频谱分配的有效性和频谱交易的安全性。具体创新点如下。

(1) 构建了基于区块链的频谱共享系统模型,该系统由移动网络运营商部署与无人机组成,无人机需要租赁移动网络运营商的频谱进行通信,在保证用户 QoS 的前提下允许多个用户共享同一信道,通过区块链的智能合约进行无人机的频谱分配,此外移动运营商作为预言机节点可以实时更新频谱使用情况,保证频谱交易的有效性。

(2) 提出了基于累计干扰的图着色频谱共享拍卖算法,该算法在保证运营商和无人机用户 QoS 下,综合考虑租赁价格、服务费和干扰定义了移动运营商的效用函数,建立了运营商效益最大化的优化问题。通过无人机的干扰情况建立无人机的冲突图,根据 UAV 的出价以及受到的累计干扰对冲突图进行着色处理,使得 UAV 之间以及 UAV 与运营商之间可以共存,获得最优的信道分配,提高了无人机的接入比例,同时提高了运营商的收益。

## 1 频谱共享系统模型与共享流程

### 1.1 系统模型

系统模型如图 1 所示,该系统由移动网络运营商、无人机、预言机模块、智能合约模块和频谱许可证模块组成。无人机通过租赁移动运营商的频段进行通信,1 个无人机只可租赁 1 个信道,

在满足无人机和运营商 QoS 条件下,1 个信道可以出租给多个无人机。为了保证频谱交易的安全性,频谱交易在区块链上进行。移动运营商作为区块链中的全节点,无人机作为轻节点。通过预言机模块获取频谱使用情况,整个交易使用智能合约模块。

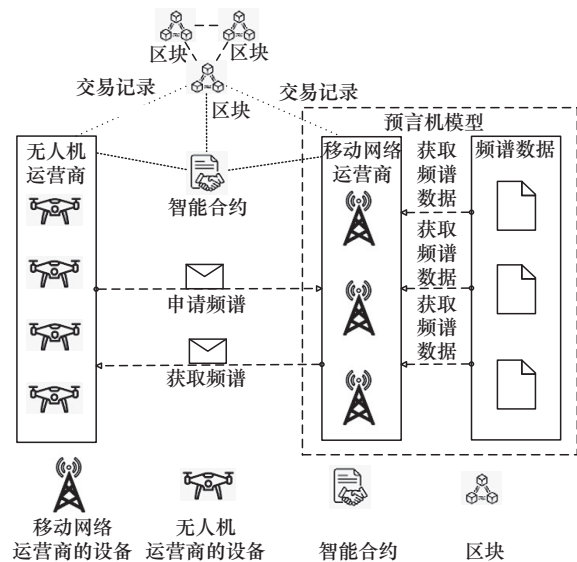


图 1 系统模型

(1) 移动运营商:作为区块链的全节点,维护完整区块链数据并参与共识,获取最优信道分配策略。同时作为挖矿节点,当有交易和状态更新时,将信息打包区块上链。此外,作为预言机节点,实时获取频谱的使用情况,实现区块链上和链下信息交互。在新一轮的频谱分配时会轮流担任主节点,主节点承担发布密钥和调用智能合约的功能。

(2) 无人机:作为区块链的轻节点,只参与频谱交易,无人机作为竞拍者进行频谱租赁,通过运营商的频谱进行通信。

(3) 预言机模块:区块链无法直接获得链下的频谱资源数据,移动网络运营商担任区块链的预言机节点,移动网络运营商获取频谱的使用情况,然后上传至区块链上,可以实时更新频谱的使用情况。

(4) 智能合约模块：智能合约根据各个注册的无人机的地理位置和发射功率，得到各个无人机之间的干扰情况，结合无人机的出价，得到最优的频谱分配策略，自动执行频谱交易。

### 1.2 动态频谱共享流程

无人机通过租赁移动网络运营商的频谱进行通信，其中频谱交易流程分为无人机提交注册信息、运营商提交出租频段、运营商调用合约获取频谱分配策略、无人机和运营商进行频谱的交易、无人机获取频谱许可证 5 个步骤，频谱共享流程如图 2 所示。

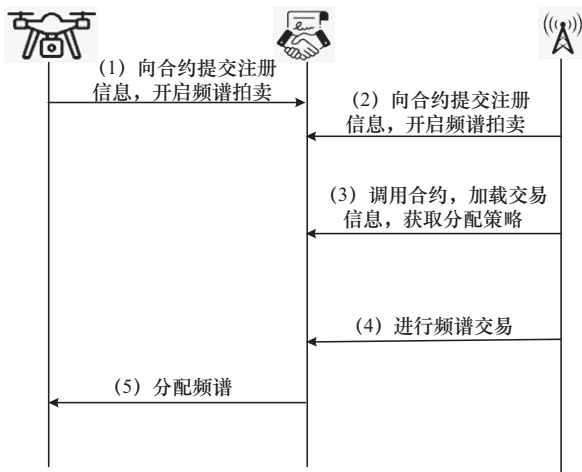


图 2 频谱共享流程

(1) 无人机提交注册信息：假设有  $N$  个无人机，无人机向智能合约提交注册信息包括发射功率  $P_o$ 、执行业务的物理位置、是否申请信道、拍卖的出价、保证金。

(2) 运营商提交注册信息：假设有  $M$  个移动网络运营商，可以出租  $L$  个频段，其中  $k$  个正在使用，如果移动网络运营商  $m$  可以出租频段  $l$ ，记作  $b_{m,l}=1$ ，如果运营商  $m$  出租的频段  $l$  运营其正在使用，记作  $k_{m,l}=1$ 。

(3) 获取最优频谱分配策略：运营商的设备在每轮频谱分配时会轮流担任主节点，加载无人机在一定时间段内提交的注册信息，调用智能合

约，得到各个节点之间的干扰信息，记作  $e_{i,j}$ ，主节点调用智能合约通过基于累计干扰的图着色频谱共享拍卖算法进行频谱的分配，获取最优的信道分配策略，若信道  $l$  分配给无人机  $n$ ，则记作  $c_{n,l}=1$ 。

(4) 频谱交易：在获取频谱分配策略后，各个无人机需要向运营商支付服务费用以及租赁频谱的费用。

(5) 分配频谱：无人机可以在许可时间内使用分配给它的频段，如果未分配许可证的用户使用未经分配的频段，对其他用户造成干扰，将扣除其保证金。

## 2 频谱共享算法

在上述频谱共享系统模型中，频谱并不是统一定价，无人机需要通过拍卖租赁运营商的频段。为了激励移动网络运营商积极出租频谱为 UAV 服务，运营商收益与租赁频谱的无人机数成正比，但当 UAV 使用租赁的频谱时，运营商会受到来自 UAV 的干扰，且干扰与出租的信道数成正比，综合考虑移动运营商出租频谱带来的收益和干扰，在满足无人机 QoS 的保证下，定义移动网络运营商的效用函数计算式为：

$$U = \alpha X + \sum_{i=0}^X a_i - \beta \ln(1 + Y) \quad (1)$$

其中，第 1 项为运营商获取的服务费， $\alpha$  表示每个 UAV 获取频谱许可证所支付的服务费， $X$  是成功租赁频谱的 UAV 数；第 2 项是租赁信道获得的收益， $a_i$  是无人机  $i$  拍卖频谱的价格；第 3 项是租赁频谱所受到的干扰给运营商效益带来的损失， $\beta$  是加权系数， $Y$  是出租的信道数。

本文频谱分配的目标就是获取一个最优的信道分配方案，在保证移动网络运营商 QoS 和无人机运营商的 QoS 的约束下获得最大收益，优化问题表示为：



$$\begin{aligned}
 & \max_{c_{x,l}} U = \alpha X + \sum_{x=0}^X a_x - \beta \ln(1 + Y) \\
 \text{s.t.} \quad & \text{C1: } \sum_{l=1}^L c_{x,l} = 1 \quad \forall x \in X \\
 & \text{C2: } \sum_{g=1}^G e_{g,j} + \sum_{\substack{m=0 \\ g \neq j}}^M e_{m,j} \leq I_{\text{th}} \quad \forall g, j \in G, \forall m \in M, \exists l \in L, b_{m,l} = c_{g,l} = c_{j,l} = 1, \\
 & \text{C3: } \sum_{g=1}^G e_{g,m} \leq I_s \quad \forall m \in M, \exists l \in L, c_{g,l} = b_{m,l} = k_{m,l} = 1 \\
 & \text{C4: } Y \leq L
 \end{aligned} \tag{2}$$

其中,  $c_{x,l}$ 表示信道  $l$  是否分配无人机  $i$ ,  $e_{g,j}$ 表示无人机  $g$  对无人机  $j$  的干扰,  $e_{m,j}$ 表示移动网络运营商  $m$  对无人机  $j$  的干扰,  $e_{g,m}$ 表示无人机  $g$  对运营商  $m$  的干扰,  $b_{m,l}$ 表示运营商  $m$  是否出租信道  $l$ ,  $k_{m,l}$ 表示运营商  $m$  是否占用信道  $l$ ,  $G$ 表示同一个共存组里的无人机数量。C1 保证每个 UAV 只可以租赁 1 个信道, C2 保证任一 UAV 受到来自同信道的累计干扰要小于或等于干扰阈值  $I_{\text{th}}$ , C3 表示移动运营商受到同信道的累计干扰要小于可以容忍的最小干扰  $I_s$ , C4 保证只能租赁运营商出租的频谱。

优化目标关于租赁频谱的 UAV 数  $X$  是单调递增的, 关于信道数  $Y$  是单调递减的, 因此目标函数的最大值主要取决于租赁频谱的 UAV 数  $X$  和出租的信道数  $Y$ 。  $X$  与  $Y$  是相关的, 二者之间是非线性的,  $X$  与  $Y$  之间的变化取决于同一信道的  $X$  之间的干扰情况, 所以  $Y$  的增大并不一定会导致  $X$  的增大,  $Y$  的减小也不一定会导致  $X$  的减小。据此, 本文设计并使用基于累计干扰的图着色频谱共享拍卖算法来解决目标优化问题, 该频谱分配算法要先构建冲突图获取干扰情况, 然后再进行信道分配, 最后对冲突图进行着色。

### 2.1 构建冲突图

根据 UAV 和 MNO 的地理位置、发射功率、干扰阈值  $I_{\text{th}}$  以及移动网络运营商可容忍的最小干扰  $I_s$  等构造给定冲突图  $G(V_{\text{uav,mno}}, (E_{\text{uav-uav}}, E_{\text{uav-mno}}))$ ,  $V_{\text{uav,mno}}$  表示 UAV 和移动运营商节点的集合,

$E_{\text{uav-uav}}$  表示的是无人机与无人机之间的干扰, UAV-UAV 干扰图如图 3 所示;  $E_{\text{uav-mno}}$  表示无人机与运营商节点的干扰, UAV-MNO 干扰图如图 4 所示。其中  $R_i$  是无人机的干扰范围。

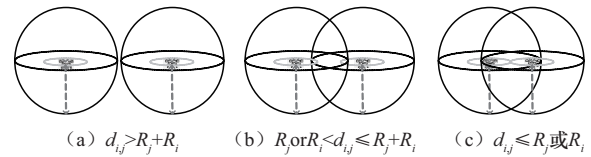


图3 UAV-UAV 干扰图

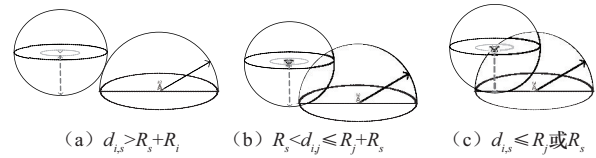


图4 UAV-MNO 干扰图

无人机的空中干扰模型——UAV-UAV 干扰图如图 3 所示,  $E_{\text{uav-uav}}$  表示无人机之间的干扰情况的集合。其中, 图 3 (a) 表示无人机之间的干扰远小于干扰阈值, 此类型干扰在冲突图中不赋予边; 图 3 (b) 表示无人机之间存在干扰, 但干扰并未超过阈值, 此类型干扰在冲突图中两者之间为虚线; 图 3 (c) 则表示二者之间的干扰非常严重, 超过了干扰阈值, 影响无人机的 QoS, 在冲突图中两者之间为实线。其中,  $R_s$  是移动网络运营商的干扰范围。

无人机对移动网络运营商的空地干扰模型, UAV-MNO 干扰图如图 4 所示,  $E_{\text{uav-uav}}$  表示无人机和移动网络运营商干扰情况的集合, 移动网络

运营商与无人机之间的干扰情况不同，其容忍干扰的阈值要小于无人机的干扰阈值。其中，图4 (a)表示无人机与运营商之间干扰远小于各自的干扰阈值，冲突图不设置线；图4 (b)表示存在干扰，但干扰并未超过各自的干扰阈值，冲突图中设置虚线；图4 (c)则表示二者之间的干扰非常严重，超过了各自的干扰阈值。

假设有2个移动网络运营商A和B，5个无人机，其中A有2个用户节点，B有2个用户节点，二者共出租3个信道，其中A拥有2个信道，但其中1个正在使用，B只有1个信道正在使用，冲突图如图5所示。

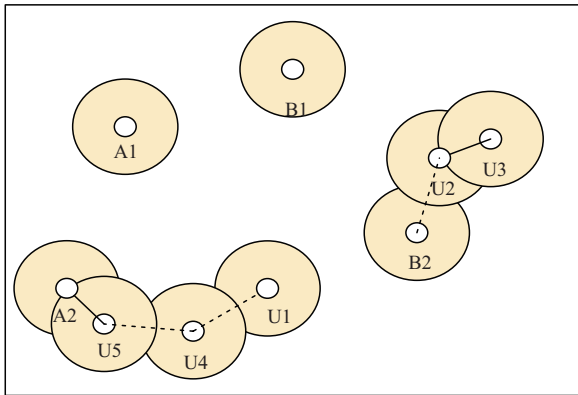


图5 冲突图

## 2.2 信道分配

在式 (2) 优化问题的目标中，第1项为服务费，第2项是租赁费用，第3项是干扰带来的影响，前两项是收益，租赁成功的无人机数越多，收益越高，最后一项是干扰，租赁的信道数越多，对运营商的干扰越大。因此求解该优化问题转化为获取最优的信道分配策略，即用尽可能少的信道数接入更多的无人机。本文采用基于累计干扰的图着色频谱共享拍卖算法进行信道分配，分配规则如下：

(1) 将无人机根据出价大小进行排队编号，出价最大的编号为1，按照编号从小到大依次分配信道；

(2) 按照顺序分配运营商的空闲频段，当一

个频段分配完成后，再分配下一个频段，空闲频段分配完成后，依次分配运营商正在使用的信道；

(3) 对于空闲信道，当2个UAV不冲突时（冲突图中的虚线和没有线都代表二者不冲突），则认为二者可以共享同一信道，将其分配在1个共存组中，当有无人机新加入共存组中，要对这个共存组中的UAV分别求其受到的累计干扰，如果所有UAV受到的累计干扰均小于干扰阈值，则新加入共存组的UAV可以共享这个信道，就将新加入的无人机分配到该信道，如果有1个UAV超过干扰阈值，就不能将该UAV分配到这个信道；

(4) 对于运营商已经占用的信道，当UAV与MNO不冲突时，则认为该UAV可以与MNO共享同一个信道，然后再使用规则 (3) 去处理UAV之间的冲突；

(5) 如果剩余所有待分配信道的无人机依次分配某个信道时，均会使得已经分配到该信道的UAV累计干扰大于阈值，此时该信道分配完毕，分配下一个信道；

(6) 假设通过当前轮次优化得到 $N_1$ 个UAV可以租赁到频谱，如果 $X=N_1$ ，则所有UAV均可租赁到频谱，算法结束，如果 $X>N_1$ ，则还有部分UAV没有租赁到频谱，没有获取频谱的无人机要进行下一轮的频谱分配。

对冲突图进行着色，着色规则是将相同颜色的顶点分配同一个信道，对图5进行信道着色后，着色的冲突图如图6所示。先分配A的第一个空闲信道，分配U1时，将其放入共存组，同时给其分配空闲频段；分配U2时，其与冲突组中的U1没有冲突，可以分配在同一个共存组中，计算共存组中任一UAV累计干扰，未超过干扰阈值，U2可以分配此频段；分配U3时，U3与U2有冲突，不可以放入同一个共存组；分配U4时，其与共存组中任一UAV无冲突，因此可以放置在同一个共存组，在共存组中求任一UAV的累计干



扰小于干扰阈值，U4可以分配此频段；分配U5时，U5与共存组中的UAV均无冲突，可以分配在同一共存组，但计算共存组中任一UAV的累计干扰时，发现U4的累计干扰超过干扰阈值，因此U5不可分配此频段，同时不可分配在这个共存组里，信道A的空闲频段分配完成。轮流分配运营商空闲信道，此时分配B的空闲频段，分配U3时，与B没有冲突，放入新的共存组中，共存组中各个设备受到的累计干扰并未超过干扰阈值，U3分配此信道。分配U4时，此时U4与运营商B没有冲突，放入共存组中，共存组中各个设备受到的累计干扰并未超过其干扰阈值，将其分配该频段，基于累计干扰的图着色频谱共享拍卖算法如算法1所示。

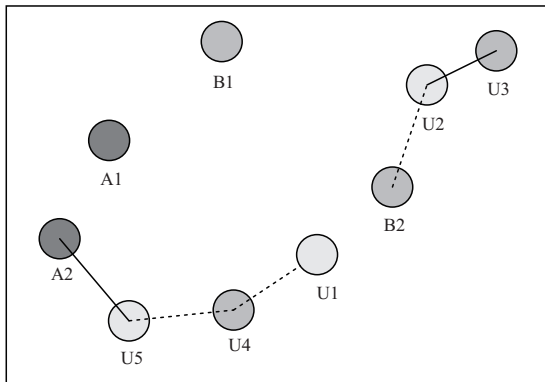


图6 着色的冲突图

**算法1** 基于累计干扰的图着色频谱共享拍卖算法

**输入** 冲突图  $G(V_{uav,mno}, (E_{uav-uav}, E_{uav-mno}))$ , 干扰阈值  $I_{th}$ , MNO可容忍的干扰  $I_s$ , 移动运营商拥有的频段的情况, 各个UAV的出价  $a_i$

**输出** 各个频段下的无人机集合和容纳的无人机数量  $N_l$

将未分配频段的  $uav_i$  按照  $a_i$  的大小从大到小排列形成一个集合冲突组  $a_{set}$

**for**  $l \in L_{free}$   
**for**  $uav_i \in a_{set}$

将处于可容忍干扰的  $uav_i$  放入共存数组  $g_{set}$ , 此时  $g_{set}$  长度为  $H_g$

**for**  $uav_i \in g_{set}$

求在  $g_{set}$  下的  $uav_i$  受到的聚合干扰  $I_i^{uav} =$

$$\sum_{\substack{h=1 \\ h \neq i}}^{H_g} e_{h,j}$$

if  $I_i^{uav} < I_{th}$

将  $uav_i$  放入信道  $l_{set}$  中

**for**  $l \in L_{busy}$

**for**  $uav_i \in a_{set}$

将处于可容忍干扰的  $uav_i$  放入共存数组  $g_{set}$ , 此时  $g_{set}$  长度为  $H_g$

**for**  $uav_i, mno_i \in g_{set}$

求在  $g_{set}$  中的  $uav_i$  受到的聚合干扰  $I_i^{uav} =$

$$\sum_{\substack{h=1 \\ h \neq i}}^{H_g} e_{h,j}$$

求在  $g_{set}$  中  $mno_i$  受到的聚合干扰  $I_i^{mno} =$

$$\sum_{h=H_g^{MNO}}^{H_g} e_{h,j}$$

if  $I_i^{uav} < I_{th}$  或  $I_i^{mno} < I_s$

将  $uav_i$  放信道  $l_{set}$  中

$l_{set}$  长度为  $H_l$

$N_l = N_l + H_l$

return  $l_{set}, l \in L, N_l$

### 3 仿真分析

本文采用 MATLAB 对频谱共享算法进行仿真, 以验证算法的性能, 仿真场景如图1所示。在长宽都是 1 500 m 的正方形区域随机产生 40 个无人机, 无人机在进行通信业务时不移动, 3 个运营商 A、B 和 C, 其中运营商 A 随机分布 2 个用户 A1、A2, 拥有 3 个信道, 1 个空闲, 另外 2 个 A1、A2 正在使用; 运营商 B 同样随机分布 2 个用户 B1、B2, 拥有 4 个信道, 2 个空闲, 另外 2 个 B1、

B2 正在使用；运营商 C 随机分布了 1 个用户 C1，拥有 2 个信道，1 个空闲，另外 1 个 C1 正在使用。综上所述，该区域内共出租 9 个信道，其中 4 个空闲，5 个正在使用。本文采用蒙特卡洛仿真（1 000 次）分析性能，每一次仿真无人机都是随机分布的。运营商的总效用受干扰情况、分配情况、频谱收益多方因素影响，因此效用值的大小表示运营商多方面的获益程度，没有具体单位。

假设无人机飞行在同一高度，无人机在空中通信链路模型采用文献[18]中基于对数距离的链路传输模型，通信链路的路径损耗模型表示为：

$$L_u(d) = L(d_0) + 10 \cdot n \ln\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (3)$$

其中，文献中  $L(d_0)$  取 16 dB， $d_0$  是参考距离， $n$  是路径损耗指数， $d$  是传播距离。

运营商用户与无人机之间的通信链路与无人机互相之间的通信链路不同，采用文献[19]的基于概率的视距和非视距的空地信道模型，无人机的接收灵敏度基于文献[18]。即：

$$L_M(d) = L_{\text{LOS}}(d)P_{\text{LOS}} + L_{\text{NLOS}}(d)P_{\text{NLOS}} \quad (4)$$

$$L_{\text{LOS}}(d) = 20 \ln\left(\frac{4\pi f_c d}{c}\right) + \eta_{\text{LOS}} \quad (5)$$

$$L_{\text{NLOS}}(d) = 20 \ln\left(\frac{4\pi f_c d}{c}\right) + \eta_{\text{NLOS}} \quad (6)$$

$$P_{\text{LOS}}(\theta) = \frac{1}{1 + a \exp[b(a - \arctan(|\theta|))]} \quad (7)$$

$$P_{\text{NLOS}} = 1 - P_{\text{LOS}} \quad (8)$$

其中， $L_{\text{LOS}}$  和  $L_{\text{NLOS}}$  是视距路径和非视距路径的损耗， $P_{\text{LOS}}$  和  $P_{\text{NLOS}}$  是通信链路中视距路径和非视距路径的概率， $\eta_{\text{NLOS}}$  和  $\eta_{\text{LOS}}$  是非视距和视距路径损耗的平均附加损耗， $a$  与  $b$  是和环境有关的常数， $\theta$  是无人机与移动网络运营商设备的夹角。无人机  $i$  受到聚合干扰的计算式为：

$$I_i^{\text{nav}} = 10 \cdot \ln\left(\sum_{g=1}^G 10^{\frac{[p_o - L_u(d_{g,i})]}{10}} + \sum_{m=1}^M 10^{\frac{[p_m - L_M(d_{m,i})]}{10}}\right) \quad (9)$$

移动网络运营商受到聚合干扰的计算式：

$$I_i^{\text{mno}} = 10 \cdot \ln\left(\sum_{g=1}^G 10^{\frac{[p_o - L_m(d_{g,m})]}{10}}\right) \quad (10)$$

其他仿真参数见表 1。

表 1 其他仿真参数

参数	值
参考距离 $d_0$	1 m
参考路径损耗 $L(d_0)$	16 dB
路径损耗指数 $n$	3.6
环境特性系数 $a$	9.61
衰减系数 $b$	0.16
无人机的发射功率 $p_o$	15 dBm
无人机的接收灵敏度 $p_r$	-80 dBm
无人机干扰阈值 $I_{th}$	-96 dBm
运营商设备发送功率 $p_m$	15 dBm
运营商干扰阈值 $I_s$	-100 dBm
运营商出租的频段 $L$	9
服务费 $\alpha$	0.1 ether
权重 $\beta$	0.1 ether

为了验证本文提出的算法的性能，将其与其他 2 种算法进行比较。

对比算法 1：该算法为文献[18]算法，采用二元冲突方法进行信道分配，本文采用聚合干扰代替二元冲突，该算法按照受到干扰的程度从大到小进行频段分配。

对比算法 2：该算法按照用户的拍卖价格分配频段，先依次轮流给用户划分进共存组中，再计算频段内用户受到的干扰，最后进行频段的分配。

干扰阈值对性能的影响如图 7 所示，该图比较了 3 种算法的 MNO 总收益（相对值）和租赁频谱成功率，可以看出，随着干扰阈值的减小（即对干扰的要求提高），MNO 的总收益和租赁频谱成功率均在降低，这是因为随着干扰阈值的降低，用户容许干扰的能力降低，导致用户之间越难共存。此外还可以看出，本文算法明显优于对比算法 1，这是因为对比算法 1 采用二元冲突方法进行信道分配，而本文采用聚合干扰代替二元冲突，如图 6 所示。采用二元冲突，U1、U4、



U5存在干扰不可分配,但实际上U4受到的累计干扰并未超过干扰阈值,并未影响U4的QoS,是可以容忍的干扰。此外,本文算法明显优于对比算法2,这是因为对比算法2采用轮流分配信道,先将用户轮流分配到各个共存组中,再计算各个共存组之间的干扰,最后确定频谱分配情况,存在干扰较小但是在其他频段可能共存、却未进行分配的情况。本文算法在分配频段时先分配一个信道,当该信道再加入任何一个无人机时,若会对该信道内存在的任何一个无人机造成干扰,才分配下一个信道。

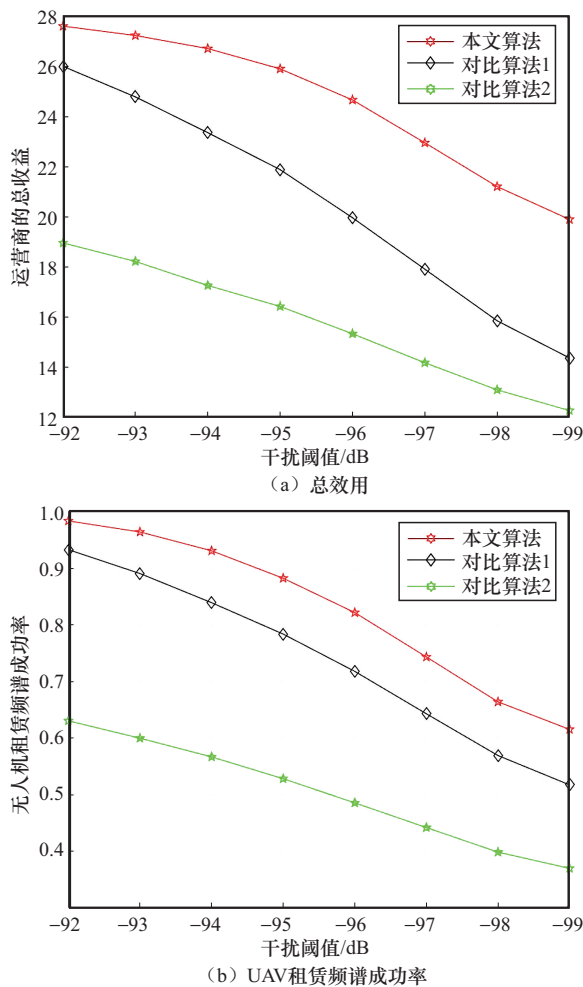


图7 干扰阈值对性能的影响

UAV数量对性能的影响如图8所示,该图给出了不同UAV数量对性能的影响,可以得出,本文算法性能均优于对比算法。同时随着UAV数量的增

加,MNO的总收益逐渐增大,这是因为随着UAV数量的增加,容纳的UAV数量会一直增加,同时总收益的速度会减缓,因为频谱是有限的,容纳的UAV数量越多其受到的聚合干扰越接近干扰阈值;随着UAV数量的增加,UAV租赁成功率则逐渐下降,因为随着UAV数量的增加,频段上容纳的UAV数量越来越多,容纳UAV的能力会逐渐下降。

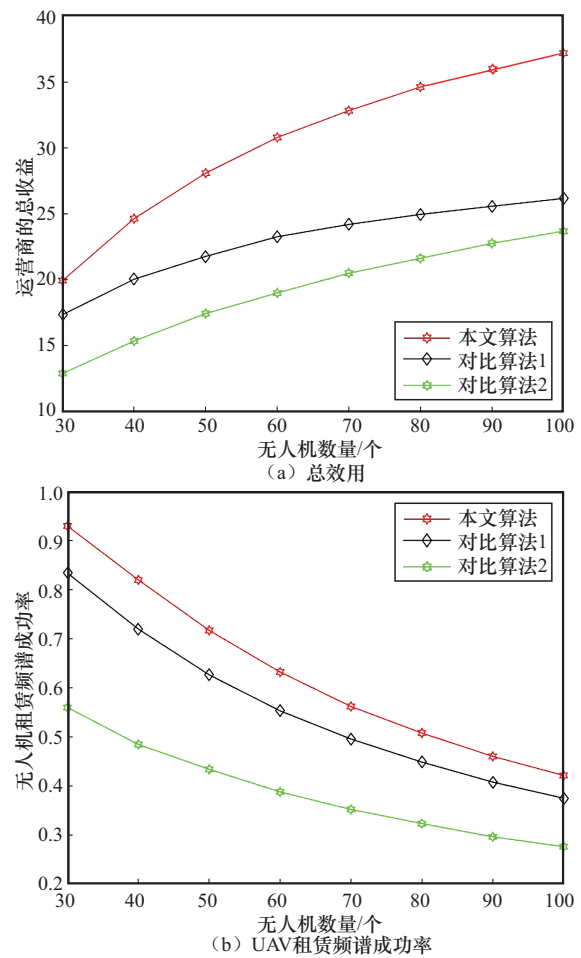


图8 UAV数量对性能的影响

信道数对性能的影响如图9所示,该图给出了不同信道数对性能的影响,可以得出,本文算法性能均优于对比算法。随着信道数的增加,MNO的总收益与UAV租赁频谱成功率均增加,因为信道数的增加会使得系统可以容纳更多的无人机。随着信道数的增加,总收益和UAV租赁成功率的速度下降,因为空闲频谱与繁忙频段相

比，空闲频谱可以容纳更多的 UAV。

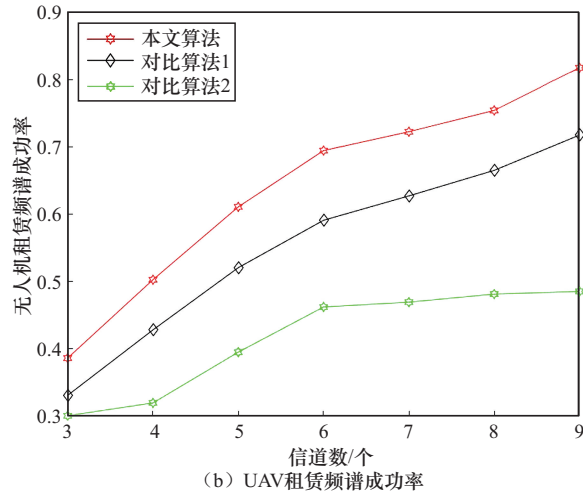
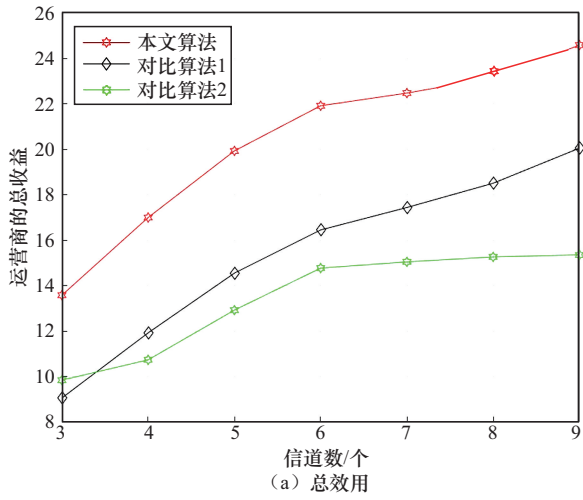


图9 信道数对性能影响

### 4 结束语

本文提出了一种基于区块链的频谱共享算法，主要由两部分组成：（1）频谱共享算法。使用累计干扰代替二元冲突，优化分配机制，在保证 UAV 服务质量的情况下，使用基于累计干扰的拍卖图着色算法帮助 UAV 进行频谱资源分配，以运营商效用函数为目标函数，获取最大化的 UAV 租赁频谱成功率和运营商最大收益。（2）区块链系统。本文设计智能合约来帮助 UAV 获取频谱分配策略，让运营商节点作为全节点和预言机节点，保证频谱信息和交易信息的安全性和实时性。

### 参考文献：

- [1] Zeng Y, Zhang R, Lim T J. Wireless communications with unmanned aerial vehicles: opportunities and challenges[J]. IEEE Communications Magazine, 2016, 54(5): 36-42.
- [2] Mozaffari M, Taleb Z K A, Saad W, et al. Beyond 5G with UAVs: foundations of a 3D wireless cellular network[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2019, 18(1): 357-372.
- [3] Hossein M N, Taleb T, Arouk O. Low-altitude unmanned aerial vehicles-based Internet of things services: comprehensive survey and future perspectives[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2016, 3(6): 899-922.
- [4] 赛图德, 赫金. 认知无线电基础[M]. 王莹, 译. 北京: 机械工业出版社, 2019: 5-19.
- [5] Setoodeh P, Haykin S. Fundamentals of cognitive radio [M]. Translated by Wang Y. Beijing: China Machine Press, 2019: 5-19.
- [6] Bhattarai S, Park J J, Gao B, et al. An overview of dynamic spectrum sharing: ongoing initiatives, challenges, and a roadmap for future research[J]. IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, 2016, 2(2): 110-128.
- [7] Shang B D, Liu L J, Rao R M, et al. 3D spectrum sharing for hybrid D2D and UAV networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2020, 68(9): 5375-5389.
- [8] Shen F, Ding G R, Wang Z, et al. UAV-based 3D spectrum sensing in spectrum-heterogeneous networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(6): 5711-5722.
- [9] Ding R, Zhou F H, Qu Y B, et al. Novel online-offline MA2C-DDPG for efficient spectrum allocation and trajectory optimization in dynamic spectrum sharing UAV networks[C]//Proceedings of the 2023 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC). Piscataway: IEEE Press, 2023: 1-6.
- [10] Hosen M S, Peng Y F. Dynamic channel allocation technique for cognitive radio based UAV networks[C]//Proceedings of the 2021 International Conference on Artificial Intelligence and Big Data Analytics. Piscataway: IEEE Press, 2021: 152-155.
- [11] Adler J, Berryhill R, Veneris A, et al. Astraea: a decentralized blockchain oracle[C]//Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Internet of Things (iThings) and IEEE Green Computing and Communications (GreenCom) and IEEE Cyber, Physical and Social Computing (CPSCom) and IEEE Smart Data (SmartData). Piscataway: IEEE Press, 2018: 1145-1152.
- [12] Al-Breiki H, Rehman M H U, Salah K, et al. Trustworthy



- blockchain oracles: review, comparison, and open research challenges[J]. IEEE Access, 2020, 8: 85675-85685.
- [12] Alqahtani T, Ansari S, Sambo Y, et al. Blockchain based decentralized spectrum trading using smart contracts[C]//Proceedings of the 2024 7th International Conference on Advanced Communication Technologies and Networking (CommNet). Piscataway: IEEE Press, 2024: 1-5.
- [13] Liang Y F, Lu C, Zhao Y P, et al. Interference-based consensus and transaction validation mechanisms for blockchain-based spectrum management[J]. IEEE Access, 2021, 9: 90757-90766.
- [14] Hu S S, Liang Y C, Xiong Z H, et al. Blockchain and artificial intelligence for dynamic resource sharing in 6G and beyond[J]. IEEE Wireless Communications, 2021, 28(4): 145-151.
- [15] 周平, 朱江. 无人机协作通信系统中基于区块链的频谱共享机制[J]. 电讯技术, 2022, 62(8): 1029-1036.
- Zhou P, Zhu J. Spectrum sharing mechanism based on blockchain in UAV cooperative communication system[J]. Telecommunication Engineering, 2022, 62(8): 1029-1036.
- [16] Paroushev D, Ruskov P. Blockchain-enabled dynamic spectrum usage rights: a framework for 5G/6G spectrum allocation and pricing[C]//Proceedings of the 2024 32nd National Conference with International Participation (TELECOM). Piscataway: IEEE Press, 2024: 1-4.
- [17] Li Z G, Wang W, Guo J, et al. Blockchain-assisted dynamic spectrum sharing in the CBRS band[C]//Proceedings of the 2021 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC). Piscataway: IEEE Press, 2021: 864-869.
- [18] Sun K, Wang P, Li Y Z. Path loss models for suburban scenario at 2.3GHz, 2.6GHz and 3.5GHz[C]//Proceedings of the 2008 8th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory. Piscataway: IEEE Press, 2008: 438-441.

#### [作者简介]



韩英杰 (2001-), 男, 南京邮电大学通信与信息工程学院硕士生, 主要研究方向为无线通信。



朱琦 (1965-), 女, 南京邮电大学通信与信息工程学院教授, 主要研究方向为移动通信与无线技术。