

# 高维无线多用户通信网络频谱资源 动态分配算法

高 云, 周建慧, 郭艳萍

(山西大同大学 计算机与网络工程学院, 山西 大同 037009)

**摘要:** 针对高维无线多用户通信网络中因频谱资源分配不合理导致网络负载不均衡、通信质量不稳定, 传统的频谱资源分配方法无法实时响应用户需求的动态变化, 从而导致频谱资源的利用效率不高的问题, 提出了高维无线多用户通信网络频谱资源动态分配算法。通过确定频谱资源动态分配程序, 同时兼顾通信网络负载均衡目标与通信质量目标, 构造频谱资源动态分配目标函数, 并阐明其约束条件。引入改进遗传算法对目标函数进行求解, 获取频谱资源动态分配最优方案。实验表明, 应用本文算法获得的频谱资源利用率最大值达到了 95%, 频谱资源分配结果与实际结果一致, 充分证实了本文算法具备更优质的频谱资源分配性能。

**关键词:** 频谱资源; 用户需求; 网络性能; 高维无线多用户通信网络; 动态分配

**中图分类号:** TN929.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2025)06-2138-07

**DOI:** 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20240563

## Dynamic allocation algorithm of spectrum resources in high-dimensional wireless multi-user communication networks

GAO Yun, ZHOU Jian-hui, GUO Yan-ping

(School of Computer and Network Engineering, Shanxi Datong University, Datong 037009, China)

**Abstract:** In high-dimensional wireless multi-user communication networks, there is a problem of unreasonable spectrum resource allocation, which leads to uneven network load and unstable communication quality. Traditional spectrum resource allocation methods can not respond to dynamic changes in user needs in real time, resulting in low utilization efficiency of spectrum resources. Therefore, a dynamic allocation algorithm for spectrum resources in high-dimensional wireless multi-user communication networks was proposed. By determining the dynamic allocation program of spectrum resources, while considering the goals of communication network load balancing and communication quality, a dynamic allocation objective function of spectrum resources was constructed, and its constraint conditions were explained. An improved genetic algorithm was introduced to solve the objective function and the optimal solution for dynamic allocation of spectrum resources was obtained. The experimental

**收稿日期:** 2024-05-27.

**基金项目:** 山西省哲学社会科学规划项目(2023YJ125); 山西省软科学研究计划项目(2019041023-5); 山西大同大学基础青年科研基金项目(2022Q4); 国家自然科学基金项目(11871314).

**作者简介:** 高云(1976-), 女, 副教授, 硕士. 研究方向: 人工智能, 深度学习. E-mail: gylg2003@163.com

results show that the maximum spectrum resource utilization rate obtained by the proposed algorithm reaches 95%, and the spectrum resource allocation results are consistent with the actual results, fully confirming that the proposed algorithm has better spectrum resource allocation performance.

**Key words:** spectrum resources; user needs; network performance; high-dimensional wireless multi-user communication network; dynamic allocation

## 0 引言

频谱资源作为无线通信的核心要素,其有效管理和高效利用直接关系到无线通信系统的容量、覆盖范围和服务质量<sup>[1]</sup>。传统的频谱分配方式采用静态分配策略,即根据预设的规则和算法,将频谱资源划分为固定的块,并分配给不同的用户或业务。然而,此种分配方式无法适应无线网络动态变化的特点,尤其是在多用户、高维度的复杂网络环境中。在上述背景下,研究一种动态分配算法具有重要意义,其能够根据网络的实际需求和实时状态,灵活调整频谱资源的分配策略,实现频谱资源的高效利用,不仅有助于提高无线通信系统的整体性能,还能够满足不断增长的无线通信业务需求,推动无线通信技术的持续发展和创新<sup>[2]</sup>。

毛忠阳等<sup>[3]</sup>引入信息优先级保护理论设计了一种新的动态频谱分配算法,有效融合异步分布式定价算法与完全信息动态博弈模型设计效用函数,并在其中添加信息权重,更改效用函数成本,联合通信速率需求对频谱资源进行有效的、动态的分配。虽然此种算法能够提高通信网络的吞吐量,但是在频谱资源分配过程中耗费较多的算力去训练与优化模型或函数,致使频谱资源分配效率较低。王岳等<sup>[4]</sup>引入改进蜚蜉优化算法设计一种频谱分配算法,将频谱分配变量映射为蜚蜉个体位置信息,并设置适应度函数为接入公平性与网络吞吐量,通过不断迭代运算获取最优频谱分配方案。此种算法会受到改进蜚蜉优化算法收敛速度与搜索精度的影响,致使最终的频谱资源分配方案合理性无法保障。徐勇军等<sup>[5]</sup>引入硬件损伤理论设计一种通信网络资源分配算法,确定多种约束条件,例如认知反向散射用户的最小安全速率、反射系数等,构造吞吐量最大化非凸资源分配目标函数(多变量耦合),利用连续凸近似、最坏准则与交替优化方法对目标函数求解,即可获得资源分配最优方案。此种算法约束条件考虑较为

片面,致使目标函数求解运算量较大,降低了通信网络资源分配效率。孙林等<sup>[6]</sup>引入最大化能效理论设计一种分布式多跳中继频谱分配算法,分析莱斯衰落信道,对最低发射功率与最多子载波个数进行计算,选取备选子载波组,通过求解 KKT 条件完成功率的最终分配。此种算法应用求解方法容易陷入局部最优困境,致使频谱分配方案无法达到最优。Mai 等<sup>[7]</sup>以非正交多址设备到设备(D2D)的通信网络为研究对象,以最大化网络吞吐量为目标,联合用户分群、功率控制和 D2D 模式等相关信息,构建资源分配模型,通过鲸鱼优化算法求解模型获取资源分配最优方案。此种算法在鲸鱼优化算法过程中会浪费较多的算力,致使算法资源消耗居高不下。

为了提升高维无线多用户通信网络的整体性能,本文提出高维无线多用户通信网络频谱资源动态分配算法。这一算法的创新之处在于其能够实时响应用户需求的动态变化,通过引入改进遗传算法对频谱资源动态分配目标函数进行求解,有效解决传统方法无法适应复杂网络环境变化的局限性。该算法兼顾了通信网络的负载均衡目标和通信质量目标,通过构造合理的目标函数和约束条件,确保了频谱资源的高效利用。实验结果表明,该算法有效提升了频谱资源利用率,提高了频谱资源分配性能,为高维无线多用户通信网络的频谱资源管理提供了有效的解决方案。

## 1 通信网络频谱资源动态分配算法

### 1.1 频谱资源动态分配方法确定

在高维无线多用户通信网络中,频谱资源分配面临的主要难点是如何在动态变化的网络环境中,实现资源的合理分配,以同时满足负载均衡和通信质量的需求。由于传统分配方法无法实时响应用户需求的动态变化,导致频谱资源利用效率低下,通信质量不稳定,甚至网络负载失衡。针对这一难点,提出一种动态分配方法,该方法通过确定频谱资源动态分配程序,同时兼顾通信网络负

载均衡目标与通信质量目标<sup>[8]</sup>,构造频谱资源动态分配目标函数,并阐明与解析其约束条件,为最终频谱资源动态分配最优方案获取提供一定的助力。

设置高维无线多用户通信网络可用频段共有  $K$  个,则其频谱资源记为  $\zeta = \{\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_j, \dots, \zeta_K\}$ ,实施频谱资源的动态分配程序对于高维无线多用户通信网络至关重要。通过实时监测和预测用户需求,该程序能够更精确地根据网络状况和用户需求进行频谱资源的实时分配,确保高效利用,满足关键业务和高等级用户的需求,从而优化网络性能并提升用户体验。频谱资源的动态分配程序具体如下。

步骤 1:使用先进的传感器技术实时监测无线通信网络状态,确定当前时刻用户总数量  $N$ 。

步骤 2:基于用户行为和网络状态,预测用户的频谱资源需求<sup>[9]</sup>,并根据业务需求的重要性、紧急性和用户等级,设定用户使用频谱资源的优先级。用户频谱资源需求预测公式为:

$$\beta_i = \frac{Q_i}{\zeta_0} \quad (1)$$

式中: $\beta_i$ 为第  $i$  个用户通信所需的频谱资源(带宽); $Q_i$ 为第  $i$  个用户通信的数据传输量; $\zeta_0$ 为单位数据量所需的标准频谱资源。

用户优先级计算公式为:

$$\eta_i = \Phi(q_i, \kappa_i) \quad (2)$$

式中: $\eta_i$ 为第  $i$  个用户的优先级计算结果; $\Phi(\cdot)$ 为用户优先级计算函数; $q_i$ 为用户业务需求的重要程度; $\kappa_i$ 为用户业务需求的紧急程度。

步骤 3:按照用户优先级  $\eta_i$  及其频谱资源需求  $\beta_i$  分配适合的频谱资源,实时计算频谱的剩余资源  $\zeta'$ 。

步骤 4:重复进行步骤 3,直至全部用户分配到合适的频谱资源为止<sup>[10]</sup>,并且能够满足用户基本的通信需求。

尽管通过频谱资源动态分配程序确保了用户获得合适资源,但网络管理仍面临负载均衡和通信质量双重挑战。特别是在高维无线多用户通信网络中,确保通信网络的负载均衡和维持稳定的通信质量是两个至关重要的目标<sup>[11]</sup>。因此,需要构造一个综合考虑这两个目标的目标函数,并明确其约束条件,以优化频谱资源动态分配,实现网

络性能的最优化。构造频谱资源动态分配目标函数,表达式为:

$$F(X, \zeta) = \min(\xi - \zeta') \cdot \frac{f(X, \zeta) - f_{\min}(X, \zeta)}{f_{\max}(X, \zeta) - f_{\min}(X, \zeta)} - \max \gamma \cdot \frac{g(X, \zeta) - g_{\min}(X, \zeta)}{g_{\max}(X, \zeta) - g_{\min}(X, \zeta)} \quad (3)$$

式中: $F(X, \zeta)$ 为高维无线通信网络中多用户集合  $X$  与频谱资源集合  $\zeta$  动态分配目标函数数值; $\xi$ 为通信网络负载均衡目标的权重系数,取值范围为  $[0, 1]$ ;  $\gamma$ 为通信质量目标的权重系数,取值范围为  $[0, 1]$ ;  $f(X, \zeta)$ 为通信网络负载均衡目标; $f_{\min}(X, \zeta)$ 与  $f_{\max}(X, \zeta)$ 分别为  $f(X, \zeta)$ 的最小值与最大值; $g(X, \zeta)$ 为通信质量目标; $g_{\min}(X, \zeta)$ 与  $g_{\max}(X, \zeta)$ 分别为  $g(X, \zeta)$ 的最小值与最大值。

通信网络负载均衡目标函数计算公式为:

$$\begin{cases} \min f(X, \zeta) = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K \left[ L(j) - \frac{1}{K} L(j) \right]^2 \\ L(j) = \frac{M_j + \sum_{i=1}^N \beta_i \cdot x_{ij}}{C_j^{\max}} \\ C_j^{\max} = \max \left[ \zeta_j \log_2 \left( 1 + \frac{S_j}{\eta_j} \right) \right] \end{cases} \quad (4)$$

式中: $L(j)$ 为第  $j$  个可用频段的负载情况; $M_j$ 为第  $j$  个可用频段的初始负载; $x_{ij}$ 为用户与可用频段的关系取值,当第  $i$  个用户分配到第  $j$  个可用频段时, $x_{ij}$ 取值为 1,反之, $x_{ij}$ 取值为 0; $C_j^{\max}$ 为第  $j$  个可用频段对应的最大传输速率; $\zeta_j$ 为第  $j$  个可用频段的频谱资源; $S_j$ 为第  $j$  个可用频段传输信号的平均功率; $\eta_j$ 为第  $j$  个可用频段内部的噪声。

通信质量目标函数计算公式为:

$$g(X, \zeta) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^K x_{ij} \cdot C_j = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^K x_{ij} \cdot \zeta_j \log_2 \left( 1 + \frac{S_j}{\eta_j} \right) \quad (5)$$

式中: $C_j$ 为第  $j$  个可用频段的传输速率。

将式(4)与式(5)代入式(3),即可获取精确的频谱资源动态分配目标函数,其内部涉及参数较多,若是直接对其进行求解,势必会浪费较多的算力,从而降低频谱资源动态分配的效率<sup>[12]</sup>。因此,在频谱资源动态分配目标函数求解之前,需要对其约束条件进行确定,具体如下。

约束条件1:分配到同一可用频段的全部用户所需的频谱资源和小于等于可用频段最大容量,表达式为:

$$\sum_{i=1}^N \beta_i \cdot x_{ij} \leq \zeta_j \quad (6)$$

约束条件2:分配给用户的频谱资源需要大于等于其所需的最小频谱资源,表达式为:

$$\alpha_i \geq \beta_{i,\min} \quad (7)$$

式中: $\alpha_i$ 为分配给第*i*个用户的频谱资源; $\beta_{i,\min}$ 为第*i*个用户所需的最小频谱资源。

约束条件3:可用频段负载数值需小于等于其最大负载能力<sup>[13]</sup>,表达式为:

$$L(j) \leq L_{\max}(j) \quad (8)$$

式中: $L_{\max}(j)$ 为第*j*个可用频段的最大负载能力。

上述过程完成了频谱资源动态分配目标函数的构造及其约束条件的阐明,为研究目标的实现提供支撑。

## 1.2 频谱资源动态分配最优方案获取

由于高维无线多用户通信网络的复杂性,目标函数包含多个变量和约束条件,使得直接求解变得困难。因此,选择采用改进遗传算法来求解这一目标函数。该算法能够模拟自然选择和遗传机制,在复杂的解空间中搜索最优解,并且具有较强的适应性和灵活性,能够适应不同的问题和约束条件。通过此方法,能够获得频谱资源动态分配的最优方案,进一步提高频谱资源的利用效率,解决网络负载不均衡和通信质量不稳定的问题,从而获取频谱资源动态分配最优方案。

基于改进遗传算法的频谱资源动态分配目标函数求解流程如图1所示。

如图1所示,设置改进遗传算法个体与频谱资源动态分配方案一一对应,记为 $\{\psi_i, i=1, 2, \dots, N\}$ ,*N*为频谱资源动态分配可行方案的总数量。以构造的频谱资源动态分配目标函数为基础,确定适应度函数<sup>[14]</sup>,表达式为:

$$\delta(\psi_i) = \gamma_0 \cdot \frac{1}{F_{\psi_i}(X, \zeta)} \pm \varepsilon(\psi_i) \quad (9)$$

式中: $\delta(\psi_i)$ 为个体 $\psi_i$ 对应的适应度值; $\gamma_0$ 为改进遗传算法的关键参数——个体更新步长,其决定着改进遗传算法的收敛速度; $\varepsilon(\psi_i)$ 为适应度函数的辅助因子。通过调整适应度函数中的关键参数,如个体更新步长和辅助因子,确保算法的有

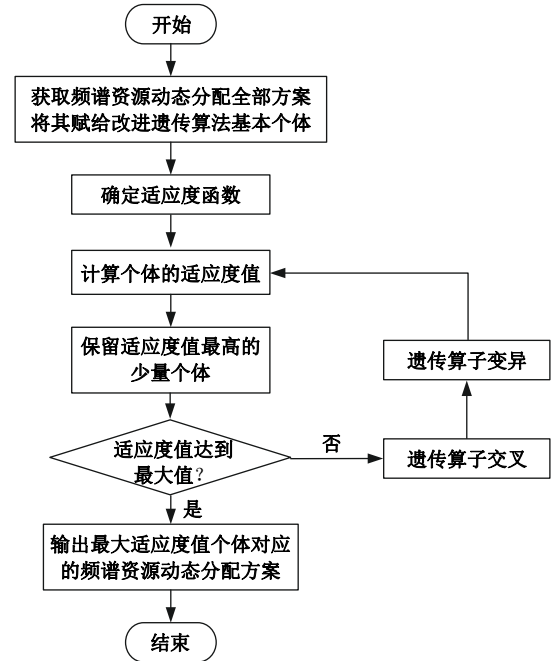


图1 频谱资源动态分配目标函数求解流程图

Fig. 1 Flow chart for solving the objective function of dynamic allocation of spectral resources

效性和准确性。

利用交叉率 $P_c$ 与变异率 $P_m$ 对改进遗传算法个体进行不断更新与迭代运算,不断优化分配方案,直至适应度值达到最大值为止,其对应方案即为频谱资源动态分配最优方案。执行此方案即可实现高维无线多用户通信网络频谱资源动态分配,为高维无线多用户通信网络的稳定运行提供帮助<sup>[15]</sup>。该方法能够有效解决网络负载不均衡和通信质量不稳定的问题,提高频谱资源的利用效率,为高维无线多用户通信网络的稳定运行提供有力支持。

## 2 实验及结果分析

设置文献[5]和文献[6]为对比算法1与对比算法2,联合本文算法共同进行高维无线多用户通信网络频谱资源动态分配对比实验,以此来验证本文算法的应用效果。

### 2.1 实验对象选取与介绍

选取某区域高维无线多用户通信网络作为研究对象,如图2所示。网络维度设置为13维,用户数量设置为15个,调制方式设置为正交频分复用技术,频谱资源(可用频段)设置为10个,频谱资源表如表1所示。

上述过程完成了实验对象及其相关参数(核心为频谱资源)的设置与介绍,为后续实验顺利进

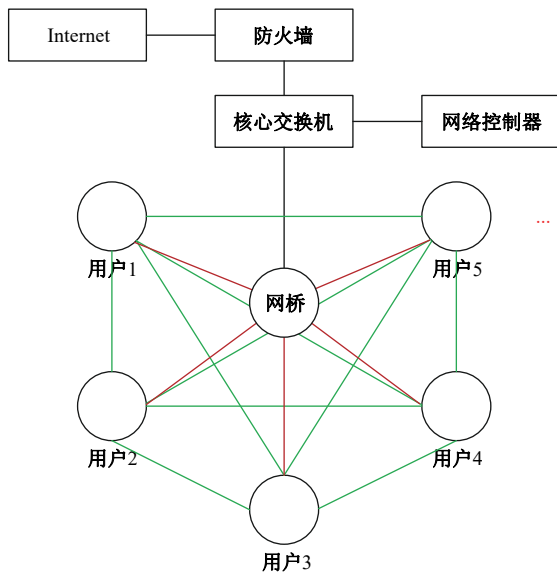


图 2 高维无线多用户通信网络模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of high-dimensional wireless multi-user communication network model

表 1 频谱资源表

Table 1 Spectrum resources table

代码	频段	频段名称
$\zeta_1$	300~3 000 Hz	特低频
$\zeta_2$	3~30 kHz	甚低频
$\zeta_3$	30~300 kHz	低频
$\zeta_4$	300~3 000 kHz	中频
$\zeta_5$	3~30 MHz	高频
$\zeta_6$	30~300 MHz	甚高频
$\zeta_7$	300~3 000 MHz	特高频
$\zeta_8$	3~30 GHz	超高频
$\zeta_9$	30~300 GHz	极高频
$\zeta_{10}$	300~3 000 GHz	至高频

行提供一定的便利。

### 2.2 实验参数寻优

本文算法应用改进遗传算法对频谱资源动态分配目标函数进行求解,涉及参数  $\gamma_0$ ,其决定着改进遗传算法的收敛速度,进而影响目标函数求解的效率。因此,在实验进行之前,需要对参数  $\gamma_0$  最优取值进行确定。

通过测试获得参数  $\gamma_0$  与改进遗传算法运算迭代次数之间的关系如图 3 所示。由图 3 可见,当参数  $\gamma_0$  取值为 1.2 时,改进遗传算法运算迭代次数达到最小值 10 次,即改进遗传算法的收敛速度最快。因此,确定参数  $\gamma_0$  最优取值为 1.2。

### 2.3 实验结果分析

进行高维无线多用户通信网络频谱资源动态分配实验,通过频谱资源利用率与频谱资源分配结果显示本文算法的应用性能。

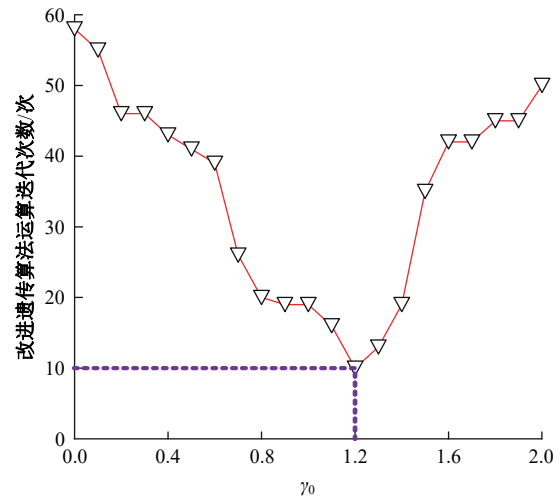


图 3 参数  $\gamma_0$  与改进遗传算法运算迭代次数关系图

Fig. 3 Relationship between  $\gamma_0$  parameter and iteration times of improved genetic algorithm operation

通过实验获得频谱资源利用率,如图 4 所示。如图 4 所示,应用本文算法获得的频谱资源利用率均高于对比算法 1 与对比算法 2,其最大值达到了 95%,且在测试过程中,该算法的利用率始终保持在较高水平,显示出其稳定性和高效性。这主要是因为该算法能够动态地响应网络中用户需求的实时变化,通过精确的资源分配,确保了频谱资源的最大化利用。该算法不仅提高了频谱资源的利用效率,而且通过优化网络负载均衡和保障通信质量,增强了网络的整体性能。

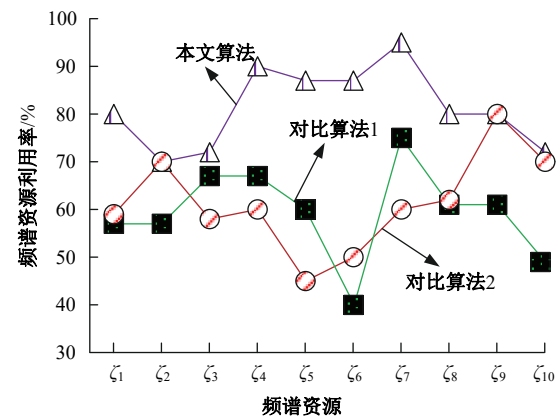


图 4 频谱资源利用率示意图

Fig. 4 Schematic diagram of spectrum resource utilization

通过实验获得频谱资源分配结果如表 2 所示。表 2 中数字代表用户编号,以第 1 行第 2 列数据为例,是指将频谱资源  $\zeta_1$  分配给用户 2 与用户 8。

实验结果如表 2 所示,清晰地展示了提出的

表2 频谱资源分配结果示意图

Table 2 Schematic table of spectrum resource allocation results

频谱资源	实际结果	本文算法	对比算法1	对比算法2
$\zeta_1$	2,8	2,8	5	2,8
$\zeta_2$	5	5	9	5,15
$\zeta_3$	9,15	9,15	2,15	4
$\zeta_4$	10,11	10,11	10	10,11
$\zeta_5$	1,4	1,4	1,4	1,9
$\zeta_6$	12	12	12	12,14
$\zeta_7$	6	6	6,8	6
$\zeta_8$	13	13	13	13
$\zeta_9$	3,14	3,14	3,14	3
$\zeta_{10}$	7	7	7,11	7

频谱资源动态分配算法在实际应用中的优越性能。通过对比分析,可以得出,该算法在频谱资源分配上与实际需求保持高度一致,而对比算法1和对比算法2则出现了不同程度的偏差。此方法的优势在于其精确性和适应性。本文算法能够根据网络的实时状态和用户需求,动态调整频谱资源的分配,确保了资源分配的准确性。这种精确的分配不仅提高了频谱资源的利用效率,而且通过减少资源分配的误差,增强了网络的稳定性和通信质量。此外,该算法在处理复杂的网络环境和多变的用户需求时,展现出良好的鲁棒性和灵活性,对于提升无线通信网络的整体性能至关重要。

### 3 结束语

在高维无线多用户通信网络中,频谱资源的分配存在不合理之处。传统的分配方法,如固定分配和随机分配算法,无法实时适应用户需求的动态变化,从而导致频谱资源的利用效率不高。因此,提出一种能够动态分配频谱资源的高维无线多用户通信网络算法。通过构建动态分配程序,整合负载均衡与通信质量目标,设计目标函数及约束条件,并采用改进遗传算法求解,实现频谱资源的动态最优分配。实验结果表明,本文算法有效提升了频谱资源利用率,提高了频谱资源分配性能,为高维无线多用户通信网络的后续发展提供参考与借鉴。未来将继续探索更先进的频谱资源分配算法,以适应不断变化的用户需求和网络环境,为高维无线多用户通信网络的持续优化提供动力。

### 参考文献:

- [1] 吴钢,周金辉,李慧. 面向边缘增强分布式电力无线传感网的资源分配[J]. 中国电力, 2023, 56(8): 77-85.  
Wu Gang, Zhou Jin-hui, Li Hui. Resource allocation for edge-enhanced distributed power wireless sensor network[J]. Electric Power, 2023, 56(8): 77-85.
- [2] 方海,高媛,赵扬,等. 卫星边缘计算中任务卸载与资源分配联合优化算法[J]. 小型微型计算机系统, 2023, 44(6): 1214-1219.  
Fang Hai, Gao Yuan, Zhao Yang, et al. Joint optimization of task offloading and resource allocation in satellite edge computing[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2023, 44(6): 1214-1219.
- [3] 毛忠阳,孙林,刘锡国,等. 信息优先级保护的动态频谱分配算法[J]. 电讯技术, 2022, 62(8): 1023-1028.  
Mao Zhong-yang, Sun Lin, Liu Xi-guo, et al. An information priority-protected dynamic spectrum allocation algorithm[J]. Telecommunication Engineering, 2022, 62(8): 1023-1028.
- [4] 王岳,王乐,孙文洋,等. 改进萤火虫算法求解认知车载网络频谱分配问题[J]. 计算机工程与设计, 2023, 44(10): 3012-3020.  
Wang Yue, Wang Le, Sun Wen-yang, et al. Using improved mayfly optimization algorithm to solve spectrum allocation problem of cognitive vehicular network[J]. Computer Engineering and Design, 2023, 44(10): 3012-3020.
- [5] 徐勇军,姜思巧,张海波,等. 基于硬件损伤的认知反向散射通信网络鲁棒安全资源分配算法[J]. 电子与信息学报, 2024, 46(2): 652-661.  
Xu Yong-jun, Jiang Si-qiao, Zhang Hai-bo, et al. Robust secure resource allocation algorithm for cognitive backscatter communication with hardware impairment[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2024, 46(2): 652-661.
- [6] 孙林,毛忠阳,康家方,等. 基于最大化能效的海上中继通信频谱分配算法[J]. 系统工程与电子技术, 2022, 44(8): 2661-2667.  
Sun Lin, Mao Zhong-yang, Kang Jia-fang, et al. Energy efficiency maximization-based spectrum allocation algorithm for maritime relay communication system[J]. Systems Engineering and Electronics, 2022, 44(8): 2661-2667.
- [7] Mai L, Pham Q V, Kim H C, et al. Enhanced Resource allocation in D2D communications with NO-

- MA and unlicensed spectrum[J]. IEEE systems journal, 2022, 16(2): 2856-2866.
- [8] 陈波, 张志华. 融合智能算法的软件定义网络负载均衡控制[J]. 计算机仿真, 2023, 40(3): 405-408.  
Chen Bo, Zhang Zhi-hua. Software defined network load balancing control with intelligent algorithm[J]. Computer Simulation, 2023, 40(3): 405-408.
- [9] 王改花, 谢健骊, 李翠然. 基于博弈资源分配的认知异构网络干扰协调算法[J]. 计算机应用研究, 2023, 40(1): 244-248.  
Wang Gai-hua, Xie Jian-li, Li Cui-ran. Interference coordination algorithm for cognitive heterogeneous networks resource allocation based on game theory [J]. Application Research of Computers, 2023, 40(1): 244-248.
- [10] 黄兴, 张文杰, 李曦, 等. 一种面向电力物联网的认知 D2D 网络能效资源分配算法[J]. 电测与仪表, 2023, 60(2): 97-103.  
Huang Xing, Zhang Wen-jie, Li Xi, et al. Energy-efficient resource allocation algorithm for cognitive D2D networks for power IoT[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(2): 97-103.
- [11] 葛瑞林, 江亮, 陈铭毓, 等. 基于图着色模型的弹性光网络频谱分配算法[J]. 光通信技术, 2023, 47(2): 59-63.  
Ge Rui-lin, Jiang Liang, Chen Ming-yu, et al. Spectrum allocation algorithm for elastic optical networks based on graph coloring model[J]. Optical Communication Technology, 2023, 47(2): 59-63.
- [12] 张钰, 赵雄文, 王晓晴, 等. 多载波 NOMA 安全通信系统稳健性资源分配算法[J]. 通信学报, 2022, 43(3): 42-52.  
Zhang Yu, Zhao Xiong-wen, Wang Xiao-qing, et al. Robust resource allocation algorithm for multicarrier NOMA security communication system[J]. Journal on Communications, 2022, 43(3): 42-52.
- [13] 刘焕淋, 王展鹏, 陈勇, 等. 物理损伤感知的多芯光纤网络动态路由资源分配方法[J]. 电子学报, 2022, 50(2): 502-507.  
Liu Huan-lin, Wang Zhan-peng, Chen Yong, et al. Physical impairment aware-based dynamic routing resource allocation method for multi-core fiber network [J]. Acta Electronica Sinica, 2022, 50(2): 502-507.
- [14] 晋春, 毛罕平, 马国鑫, 等. 基于改进遗传算法的温室环境动态优化控制[J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2022, 43(2): 169-177.  
Jin Chun, Mao Han-ping, Ma Guo-xin, et al. Dynamic optimal control of greenhouse environment based on improved genetic algorithm[J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2022, 43(2): 169-177.
- [15] 蔡一峰, 蓝求旺, 陈尚君, 等. 一种串扰感知的空分复用弹性光网络频谱分配算法[J]. 光通信技术, 2022, 46(5): 20-24.  
Cai Yi-feng, Lan Qiu-wang, Chen Shang-jun, et al. Crosstalk-aware spectrum allocation algorithm for space-division multiplexing elastic optical networks [J]. Optical Communication Technology, 2022, 46(5): 20-24.