

5G 网络切片规划中的资源分配优化算法研究

武琴

惠州城市职业学院，广东 惠州 516000

摘 要： 当随着 5G 网络技术的发展，切片资源分配的有效性对网络服务质量与运营效率至关重要，尤其是在面对不同应用需求和动态网络环境时。本文研究了基于博弈论与机器学习的资源分配优化算法，提出了一种混合优化模型。研究首先分析了 5G 网络切片资源分配的关键问题，接着设计并优化了基于博弈论和机器学习的优化算法，最后探讨了该模型在 5G 网络切片资源分配中的应用。研究的意义在于为提高 5G 网络的资源利用效率、降低延迟、确保公平性提供了理论支持和技术指导，对未来 5G 网络优化具有重要的现实与理论价值。

关 键 词： 5G 网络切片；资源分配；优化算法；博弈论；机器学习

Research on Resource Allocation Optimization Algorithm in 5G Network Slice Planning

Wu Qin

City College of Huizhou, Huizhou, Guangdong 516000

Abstract： With the development of 5G network technology, the effectiveness of slicing resource allocation is crucial for network service quality and operational efficiency, especially when facing different application requirements and dynamic network environments. This article studies resource allocation optimization algorithms based on game theory and machine learning, and proposes a hybrid optimization model. The study first analyzed the key issues of 5G network slicing resource allocation, then designed and optimized optimization algorithms based on game theory and machine learning, and finally explored the application of this model in 5G network slicing resource allocation. The significance of the research lies in providing theoretical support and technical guidance for improving the resource utilization efficiency, reducing latency, and ensuring fairness of 5G networks, which has important practical and theoretical value for optimizing future 5G networks.

Keywords： 5G network slicing; resource allocation; optimization algorithm; game theory; machine learning

引言

随着 5G 技术的快速发展，网络切片技术使得物理网络资源能够虚拟化并构建多个独立的虚拟网络，从而根据不同应用需求实现灵活的资源调度与优化。5G 网络切片的资源分配问题在多种业务场景下尤为关键，如何在有限资源的条件下实现不同切片的高效、均衡分配，成为亟待解决的挑战。现有的资源分配方法大多依赖于静态模型与简单算法，无法适应 5G 网络的动态变化和复杂需求，特别是在面对大规模用户、低时延服务和高带宽需求时，现有方案往往无法满足服务质量（QoS）的严格要求。因此，本文提出了一种基于博弈论与机器学习的混合优化模型，以应对 5G 网络中资源分配的挑战，提升资源利用效率，降低延迟，保证公平性，进而为 5G 网络切片资源分配问题提供新的思路和解决方案。

一、5G 网络切片规划中的资源分配问题分析

（一）5G 网络切片架构与资源管理需求

5G 网络切片中，每个切片可以根据具体业务需求，优化配置网络资源，提供不同的网络性能，如低时延、高带宽或大规模连接等。5G 网络切片架构通常包括三个主要组成部分：切片管理与

控制、切片资源调度与分配、以及切片性能监控与优化。每个切片在功能上相对独立，拥有自己的网络功能、控制逻辑及资源调度策略。资源管理需求体现在切片的动态资源分配和调度上，需要根据实时的网络负载、服务需求以及网络条件进行精细化的资源管理。每个切片都可能面临不同的应用场景和质量要求，这就要求切片资源的调度策略可以精准地满足各类切片的特定需求，

如流量波动、用户分布、网络切换等。随着5G网络的复杂性提升，对资源管理的精度和灵活性要求也愈加严苛，传统的静态资源管理方法已无法适应5G网络的实时性和动态性需求^[1]。

（二）切片资源分配面临的关键问题

5G网络切片的资源分配过程中，5G网络的资源需求呈现动态变化特性，用户需求的波动和切片功能的多样性要求资源分配系统可以在不并刻、不同场景下做出快速反应，这对资源的动态调度提出了更高的要求。尤其是在网络负载高峰期，如何保证各切片的资源公平分配，并避免资源瓶颈对关键服务（如远程医疗、自动驾驶等）的影响，成为一大难题^[2]。由于5G网络的多样化业务需求，切片的资源分配必须根据不同切片的服务等级进行精细化的预测与管理。此外，服务质量（QoS）保证，尤其是在面对大规模用户和多样化应用时，如何保证每个切片可以按照预定的服务等级协议（SLA）提供可靠的服务，并避免在高需求场景下某些切片无法满足质量要求，是资源分配中不可忽视的挑战。

（三）现有解决方案的不足与挑战

传统的资源分配方法通常依赖于静态网络模型，忽视了网络环境的动态变化，导致其在面对高负载或突发流量时无法快速调整资源配置，且常常无法适应各类切片的个性化需求，导致切片之间的资源分配不均衡。此外，现有的资源管理算法在多切片并发的场景下，容易出现资源竞争问题，尤其是在高峰时段，资源分配策略往往无法有效避免切片之间的互相干扰，导致某些切片无法达到预定的服务质量目标^[3]。尽管一些解决方案引入了智能化算法，如机器学习和深度学习模型，但这些算法的训练和预测过程往往需要大量的历史数据支持，而在5G网络中，数据的实时性和环境的快速变化使得现有模型很难有效应对实时的资源分配需求。另一方面，切片的异质性和复杂性也使得现有解决方案在针对特定应用需求（如低时延、超大规模连接等）进行精确调度时，存在一定的局限性。此外，现有方案在切片资源隔离性和多维度服务质量保证方面也存在不足，特别是在面对极端网络条件时，如何有效保障不同切片间的性能稳定性和服务质量成为一大挑战。

二、资源分配优化算法设计与模型

（一）基于博弈论的优化算法

5G网络切片资源分配的优化过程中，博弈论的核心思想在于采取对各个切片（或用户）之间的策略选择和资源分配行为进行建模，找到一个均衡状态，使得所有切片的资源利用率最大化，并满足质量保障和公平性要求。博弈论在资源分配中的应用，可以分为非合作博弈和合作博弈两大类，具体应用时，主要依赖于切片之间的资源竞争与博弈模型的构建。

在非合作博弈的框架下，每个切片都作为一个理性决策者，独立地选择资源分配策略，以最大化自身的效用函数。效用函数通常考虑到切片的带宽需求、时延要求、吞吐量要求等因素，模型形式可以表示为：

$$U_i = f(R_i, QOS_i)$$

其中， U_i 为切片*i*的效用函数， R_i 为切片*i*所分配的资源量， QOS_i 为该切片的服务质量指标^[4]。此博弈中，各切片采取调整其资源需求与分配策略，使得整个网络达到一个纳什均衡状态，在此状态下，没有任何一个切片能采取单方面改变自己的资源分配策略来提高其效用。所以，博弈论采取求解纳什均衡来实现切片资源的最优分配。对于合作博弈模型，各切片采取联合优化实现资源的最优分配。切片之间的合作可以借助资源合并或资源共享来共同达到系统效益最大化。合作博弈理论的应用，尤其是核心集和Shapley值的应用，可以有效地解决切片间资源共享的公平性问题。

（二）基于机器学习的优化算法

基于机器学习的资源分配优化算法通常采用监督学习、无监督学习和强化学习等方法，针对不同的网络场景进行精细化的调度。监督学习中，训练数据集集中的输入输出关系，模型可以学习到资源分配与网络性能之间的映射关系。以神经网络为例，输入可以是历史的网络流量数据、切片的实时负载信息等，输出则是针对各切片的资源分配方案。具体的模型可以采用深度神经网络（DNN）或者卷积神经网络（CNN）等，训练过程中的损失函数可以定义为网络性能优化目标（如延迟最小化、吞吐量最大化等），目标是采取不断优化损失函数，得到最优的资源分配策略^[5]。无监督学习则可应用于网络状态的聚类分析，自动识别网络中的不同流量模式和资源需求特征。如基于K均值聚类算法，可以将网络切片根据其需求特征进行分组，在同一组内的切片共享相似的资源调度策略，从而提高资源利用效率，降低调度复杂度。强化学习框架中，资源调度系统被视为一个智能体，智能体采取与环境的互动（即网络状态的变化）获得奖励信号，并采取试错过程逐步提高资源分配策略的优化程度。实际应用中，强化学习可以为每个切片分配最优的资源，在满足质量要求的并，最大化系统的整体效益^[6]。

（三）混合优化模型的设计与实现

5G网络切片资源分配问题中，混合优化模型凭借博弈论对切片之间的资源竞争关系进行建模，保证资源分配的公平性；机器学习对历史数据和网络状态进行实时分析，动态调整资源分配策略，提高分配的效率和适应性。为了具体实现该优化模型，需要建立一个包括多个切片、多个资源维度（如带宽、延迟等）的资源分配数学模型。假设网络中共有NN个切片，每个切片需要分配的资源包括带宽BB、时延DD和吞吐量TT，每个切片的效用函数依赖于其资源需求。为了对切片进行优化，模型将每个切片的资源分配问题视为一个博弈论问题，并引入机器学习的强化学习方法对博弈策略进行优化。每个切片的效用函数 U_i 由其资源配置和服务质量需求决定，可以表示为：

$$U_i = \alpha_1 \cdot f_1(B_i) + \alpha_2 \cdot f_2(D_i) + \alpha_3 \cdot f_3(T_i)$$

其中， B_i 、 D_i 和 T_i 分别表示*i*切片分配到的带宽、时延和吞吐量； f_1 、 f_2 、 f_3 分别是与资源相关的效用函数；而 α_1 、 α_2 、 α_3 是权重系数，反映了切片对不同资源的依赖程度，通常根据切片的业务需求进行调整^[7]。博弈论框架中，切片之间的资源分配可以建模为一个非合作博弈。每个切片*i*作为一个博弈参与者，选择自己的资

源需求策略 $R_i = (B_i, D_i, T_i)$ 来最大化自己的效用。博弈的目标是寻找一个纳什均衡状态，即在该状态下，所有切片的策略都不再有改进空间。对于切片 i ，其效用的最大化目标可以表示为：

$$\max_{R_i} U_i = \alpha_1 \cdot f_1(B_i) + \alpha_2 \cdot f_2(D_i) + \alpha_3 \cdot f_3(T_i)$$

博弈中，切片 i 的策略不仅受到自身资源需求的影响，还受到其他切片策略的影响，即每个切片的效用与所有切片的资源分配有关。该博弈模型可以表示为：

$$U_i = U_i(R_1, R_2, \dots, R_N)$$

其中 U_i 表示其他切片的资源分配策略。博弈的最终目的是采取优化切片 i 的资源需求 R_N ，使得系统整体效用最大化。为了提高资源分配策略的适应性和实时性，模型引入了强化学习算法。此过程中，系统采取与环境的交互不断优化博弈策略^[9]。具体来说，强化学习的核心在于定义一个奖励函数 $R_i(t)$ ，该奖励函数反映了切片在当前时间步 U_{min} 资源分配策略的效果。奖励函数通常设计为切片的网络效能（如吞吐量、延迟等）与实际资源分配之间的差异：

$$R_i(t) = \gamma_1 \cdot f_1(B_i(t)) + \gamma_2 \cdot f_2(D_i(t)) + \gamma_3 \cdot f_3(T_i(t)) - \lambda \cdot P$$

其中， r_1 、 r_2 、 r_3 是每个资源维度的权重， λ 是惩罚因子，表示当切片未能满足服务质量时的惩罚， P 是由于资源不满足要求而产生的惩罚值。基于这一奖励函数，强化学习采取 Q 学习或深度 Q 网络（DQN）算法不断调整资源分配策略，从而使得切片在不同网络环境下始终保持最优的资源利用效率。混合优化模型的目标函数可表示为系统总效用的最大化，系统总效用是各个切片效用函数的加权和。即：

$$\max \sum_{i=1}^N \lambda_i U_i(R_i)$$

其中， λ_i 为切片 i 的权重，表示切片在系统中的重要性， $\sum_{i=1}^N \lambda_i = 1$ ，保证系统总效用最大化的并，满足所有切片的资源需求^[9]。此外，该模型还需要满足一些约束条件，包括资源总量约束和服务质量约束。资源总量约束可以表示为：

$$\sum_{i=1}^N R_i \leq R_t$$

其中， R_t 表示网络可用的总资源。服务质量约束要求每个切片的效用满足其最低质量要求，即：

$$U_i(R_i) \geq U_{min}^i$$

其中， U_{min}^i 表示切片 i 对应的最低效用要求。这个约束保证了每个切片在资源分配过程中可以满足其基本的服务质量要求，避免出现低效或不公平的资源分配情况^[10]。

三、5G 网络切片资源分配优化策略及其应用分析

在 5G 网络切片资源分配的实际应用中，切片的资源调度不仅要考虑网络的稳定性，还需优化资源的分配策略，以应对多样化的业务需求。不同的网络切片服务如增强移动宽带（eMBB）、海量机器类型通信（mMTC）和超可靠低延迟通信（URLLC）对资源的需求差异显著，如何在保持网络高效稳定的前提下，最大化各类服务的性能，是网络切片设计中的核心挑战。

5G 网络切片资源分配的有效性依赖于对切片需求的精准预测和动态调度能力。在实际操作中，资源的过度集中或不均衡分配可能导致网络性能的极大下降，尤其在流量波动较大或高峰时段。因此，采取多维度的资源分配策略，对于优化系统的整体效能至关重要。在这一过程中，考虑到每个切片的业务类型、优先级及其对资源的敏感性是至关重要的。例如，对于时延要求较高的 URLLC 切片，其资源分配需要保证低时延、高稳定性，而 eMBB 切片则更关注带宽和吞吐量的需求。

在动态环境下，基于实时数据的资源调度算法变得尤为关键。通过对网络状态的实时监测和预测，优化资源分配可以大幅度提高系统的响应能力，降低网络延迟，同时保证切片之间的公平性。这要求资源管理系统能够快速适应网络负载变化，调整资源分配以确保各切片能满足其服务质量（QoS）要求。无论是通过博弈论模型还是机器学习方法，都必须处理好资源分配的公平性与效率问题，避免因资源竞争导致的服务质量下降。

综上所述，随着 5G 网络规模的扩大和业务需求的不断变化，切片资源的高效管理和优化依赖于先进的算法设计，尤其是在数据驱动的资源分配策略下，能够实现灵活、精准的资源调度，提升整个网络的运行效率和用户体验。

四、结语

本文针对 5G 网络切片中的资源分配优化问题，提出了一种结合博弈论与机器学习的混合优化算法模型，旨在解决传统静态资源分配方法无法应对 5G 网络动态变化与复杂需求的不足。通过引入博弈论的资源竞争模型和机器学习的智能调度能力，本文所提模型有效提升了资源利用效率，降低了延迟并保证了公平性，从而显著优化了 5G 网络切片的性能与服务质量。该优化算法能够应对大规模用户、低时延服务和高带宽需求等多种复杂场景，具有较强的适应性和实用性。未来，需进一步提升算法的实时性与适应性，以满足更高效、灵活的资源分配需求，为 5G 网络的持续发展提供更加有效的解决方案。

参考文献

- [1] 张导, 秦晓, 周之楠, 等. 基于深度强化学习的 5G 电力虚拟专用光网络切片时延优化算法研究 [J]. 半导体光电, 2024, 45(06): 977-985.
- [2] 赵星炜. 基于 5G 移动通信的智能网络资源分配技术研究 [J]. 中国高新技术, 2024, (19): 66-68.
- [3] 王卫华. 5G 网络切片安全防护技术研究 [J]. 警察技术, 2024, (05): 50-54.
- [4] 王孟源. 5G 的网络切片技术在通信系统中的应用与性能优化 [J]. 家电维修, 2024, (07): 53-55.
- [5] 袁思雨. 基于深度强化学习的无线接入网资源分配技术研究 [D]. 北京邮电大学, 2024.
- [6] 陈俊杰. 基于软件定义的光接入网切片方案与资源分配算法研究 [D]. 北京邮电大学, 2024.
- [7] 王来明. 基于网络切片的算力网络资源分配算法研究 [D]. 河北工程大学, 2024.
- [8] 荣鑫. 面向 5G 网络切片的攻防检测及群组安全认证研究与仿真实现 [D]. 北京邮电大学, 2024.
- [9] 唐开华. 5G 网络切片技术在不同场景中的应用与优化 [J]. 中国宽带, 2024, 20(05): 10-12. 024.05.04.
- [10] 邱自强. 5G 网络资源分配及流量分类算法研究 [D]. 云南财经大学, 2024.