

# 基于差异性隔离和复用的网络切片无线资源分配方案

孙君, 霁振宇

(南京邮电大学通信与信息工程学院, 江苏 南京 210003)

**摘要:** 为研究网络切片无线资源复用, 同时考虑复用、隔离和优先级三者之间的权衡问题, 提出了一种基于差异性隔离和复用的网络切片无线资源分配方案。在现有文献成果基础上, 重新定义复用增益和隔离因子2个参数, 以复用增益和隔离因子构建加权和函数, 并引入切片优先级。为求解优化问题设计了复用隔离优先级无线接入 (MIPWA) 算法, 该算法基于改进的遗传算法 (GA), 引入矩阵编码、轮盘赌选择和最优保留方法来解决。结果表明, MIPWA 算法使切片1、切片2和切片3的隔离性能分别提高了66.37%、52.73%和21.16%, 复用增益仅损失了5.82%、3.86%和3.50%。与仅考虑隔离的算法相比, 复用增益分别提高了65.35%、52.74%和22.81%, 隔离增益仅损失了2.85%、3.85%和1.86%。以复用增益为例, 3个切片下MIPWA算法的优化结果要比传统GA分别高出5.07%、1.81%和1.4%。

**关键词:** 网络切片; 资源分配; 无线资源隔离; 无线资源复用; 矩阵编码

**中图分类号:** TN92

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.11959/j.issn.1000-436x.2025044

## Wireless resource allocation scheme for network slicing based on differentiated isolation and multiplexing

SUN Jun, AI Zhenyu

School of Communication and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China

**Abstract:** In order to study wireless resource multiplexing in network slicing, the trade-off among multiplexing, isolation and priority was considered, a network slicing wireless resource allocation scheme based on differential isolation and multiplexing was proposed. On the basis of existing research findings, the parameters of multiplexing gain and isolation factor were redefined. A weighted sum function was constructed based on multiplexing gain and isolation factor, considering slice priority. The multiply isolation priority wireless access (MIPWA) algorithm was designed, which was based on an improved genetic algorithm (GA), introducing matrix coding, roulette wheel selection, and elitism. The results show that the MIPWA algorithm improves the isolation performance of slice 1, slice 2, and slice 3 by 66.37%, 52.73%, and 21.16% respectively, with only a loss of 5.82%, 3.86%, and 3.50% in multiplexing gain. Compared with algorithms of only isolation, its multiplexing gain increases by 65.35%, 52.74%, and 22.81% respectively, with only a loss of 2.85%, 3.85%, and 1.86% in isolation gain. Taking multiplexing gain as an example, the optimization results of the MIPWA algorithm under three slices are 5.07%, 1.81%, and 1.4% higher than those of the traditional GA.

**Keywords:** network slice, resource allocation, wireless resource isolation, wireless resource multiplexing, matrix coding

收稿日期: 2024-10-19; 修回日期: 2025-02-13

通信作者: 孙君, sunjun@njupt.edu.cn

基金项目: 江苏省重点研发计划基金资助项目 (No.BE2022067, No.BE2022067-1)

**Foundation Items:** The Key Research and Development Program of Jiangsu Province (No.BE2022067, No.BE2022067-1)

## 0 引言

传统移动网络“一刀切”的网络架构无法在垂直方向上满足网络在可扩展性、可用性和可靠性方面的性能差异要求<sup>[1]</sup>。为适应多种类型垂直行业的需求,网络切片(NS, network slicing)的概念应运而生。网络切片是一种新型的网络架构,在共享同一个网络基础设施上提供多个逻辑网络,每个逻辑网络服务于特定的业务类型或者行业用户。下一代移动网络(NGMN, the next generation mobile network)联盟将网络切片定义为在相同的物理基础设施上运行的多个虚拟网络<sup>[2]</sup>,每个网络切片是一个独立的虚拟网络,它可以根据特定的服务需求(如超低时延、高可靠性和移动性等)选取配置相应的虚拟网络功能,并创建可编程的网络切片实例(NSI, network slice instance)。网络切片技术在增强型移动宽带(eMBB, enhanced mobile broadband)、海量机器类通信(mMTC, massive machine type communication)和超高可靠低时延通信(URLLC, ultra reliable low latency communication)<sup>[3]</sup>三大场景中已有应用,在未来网络中也将成为核心技术之一。尽管5G系统在无切片情况下可通过动态调度满足多样化业务需求,但其存在资源竞争、服务质量(QoS, quality of service)保障不足和扩展性受限等问题。网络切片技术通过资源隔离、定制化服务和动态调整,能够有效解决这些问题,为eMBB、URLLC、mMTC等业务提供严格的QoS保障(如低时延、高带宽),并提升网络的灵活性、扩展性和安全性。因此,面对5G系统的多样化业务需求,网络切片在资源利用率、性能优化和网络管理方面具有显著必要性,其优势已在工业互联网、智慧城市等实际应用中得到验证<sup>[4]</sup>。在当前5G系统多种业务集中调度不同切片的背景下,若进行切片,需首先分析资源竞争、QoS保障不足、调度复杂等核心问题,同时文献[5]对虚拟网络和业务模型关系进行了阐述,使切片准确匹配多样化业务需求。如文献[6]所述,原有5G系统中仅支持部分网络共享(如RAN或核心网),且隔离性差,切片通过端到端虚拟化实现更精细的资源控制和性能保障。切片支持动态服务链按需编排网络功能,优化流量路径(如URLLC的低时延、eMBB的高吞吐量),而传统网络需固定功能链,无法灵活适配。切片支持差异化无线资源配置,针对不同切片

类型(如URLLC的低时延、mMTC的高密度连接)优化频谱效率和QoS,传统网络无法实现此类定制化服务。引入切片可以提高业务有效吞吐率、时延或频谱效率等网络性能<sup>[7]</sup>。NS可以共享无线资源和通信系统的基础设施<sup>[8-10]</sup>。基站根据用户特性,将用户分为不同的类别,并分别为同一类别的用户构建一个网络切片。图1为网络切片实例部署,网络切片实例到物理网络的映射被称为网络切片实例部署,实际是将虚拟节点映射到物理服务器上,将虚拟链路映射到一组物理链路上。由于无线资源的有限性,如何有效地分配无线资源以实现复用增益至关重要。为了提高无线资源利用率,需要在切片之间有效地复用无线资源,同时无线资源隔离对于满足一个切片的QoS要求及切片间的优先级也非常重要<sup>[11]</sup>,尤其当切片间存在信道条件、数据流量发生变化等动态因素时,为了保证各个切片的QoS,切片的优先级和切片间无线资源隔离是必不可少的。因此,将无线资源分配给切片时,复用、隔离和切片间的优先级需要兼顾考虑,三者缺一不可,考虑优先级有助于精准地隔离,而考虑隔离是为了更好地复用无线资源。

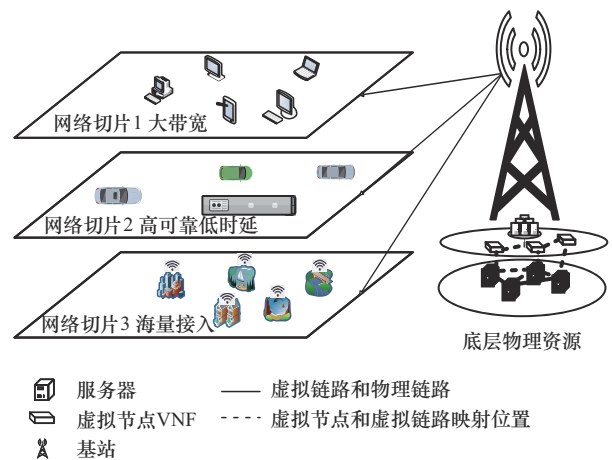


图1 网络切片实例部署

针对通信系统中网络切片无线资源的复用、隔离和优先级的问题,当下已经有不少研究者对其进行了研究。涉及切片之间资源分配的问题,文献[12]将资源分配问题表述为一个非凸混合整数规划问题,并用拉格朗日对偶方法进行求解。文献[13]引入博弈论建模无线资源提供者、切片运营商和用户之间的关系,并在此基础上提出了不同的资源分配方案。文献[14]提出了一种点对点的资源交易方法,

切片间的用户直接进行通信,而不依赖集中式控制器提高资源利用率。考虑到网络切片的运营费用,文献[15]以切片运营商向无线资源提供者支付的费用最少和最大化切片吞吐量来最大化切片的效用,而文献[16-17]则通过设计切片间复用无线资源,最大限度地提高切片运营商和无线资源提供者的效用。文献[18]考虑了有限资源下多个基站的无线接入网场景,并设计了一种基于强化学习的高效资源编排技术,优化了不同服务之间的资源利用率。文献[19]将资源分配问题转化为一个部分可观测的马尔可夫决策过程,提出了一种基于多智能体深度确定性策略梯度的资源分配算法。文献[20]在资源分配阶段,为了满足切片的应用场景,提出了一种基于切片服务的资源分配策略。

以上文献比较侧重于资源分配问题,很少提到切片间的隔离。对于无线资源的隔离,可以分为硬隔离和软隔离。硬隔离是无线资源被静态地分配给一个切片<sup>[18]</sup>,意味着带宽只能由切片本身使用。软隔离则是无线资源被动态地分配到切片中,这意味着带宽可以在切片之间共享。文献[21]提出了一种两层激励方案,促进移动终端和切片间的合作,并基于此定义了软隔离的隔离指标,用来评估切片层和移动终端层的隔离性能。文献[22-23]提出了物理资源块(PRB, physical resource block)和功率分配方案,以最大限度提高系统的能源效率,同时满足隔离要求。他们使用切片的吞吐量来评估隔离性能,但是没有给出具体隔离的定义。文献[24]定义了隔离因子为所有相邻单元中切片之间分配资源差的总和。它强调不同单元分配给切片的资源平衡,但忽略了切片的QoS要求。文献[25]将隔离因子定义为无线电的传输速率达到所要求的速率。文献[26]根据包供应时间和最大包时延定义了切片隔离,提高了隔离QoS。而文献[27]根据切片间的资源利用情况定义了隔离因子,并规定了5个隔离等级,实现了较高的无线资源利用率。但文献[26-27]都未考虑切片间的优先级问题。文献[28]提出了一种基于启发性的优先级资源分配方案,以满足切片的QoS需求。文献[29]针对不同的服务类型,为不同切片分配了不同的优先级和资源,确保满足切片的QoS需求。

综上所述,现有的研究在复用增益、隔离和切片优先级之间往往只关注其中一两个因素,同

时考虑三者的研究还很少。提高切片的复用增益能够提高系统的资源利用率,提升系统的整体性能。而保证切片间的隔离能够保证不同业务的性能,确保各种业务互不干扰、安全运行,并优化网络管理。在实际网络环境中,只有将三者兼顾,才能有效避免网络动态因素的影响,提高资源利用率,保证用户的QoS。因此,本文将三者同时考虑兼顾优化,基本思路是将优先级级别分配给不同类型的切片,复用时引入切片优先级系数并定义切片间的隔离。在文献[24,26-27]的基础上,重新定义了复用增益和隔离因子,在一些经典的切片业务场景下,定义复用增益和隔离因子能够将资源共享和干扰情况进行量化,在干扰可控的情况下最大化复用增益,提高了系统的资源利用率。

本文旨在考虑切片优先级的条件下最大化切片间隔离和系统的无线资源复用增益。为实现这一目标,本文在资源块(RB, resource block)层面引入了切片优先级系数,定义了切片的隔离和无线资源复用增益。主要研究工作如下。

1) 依据切片间共享资源的差异性定义了隔离因子,用来评估切片间的隔离度大小。并根据不同切片的QoS需求,为不同类型的切片配置不同级别的优先级系数。根据切片间共享资源的情况定义复用增益参数并引入切片优先级系数,用来评估切片的资源复用增益大小。

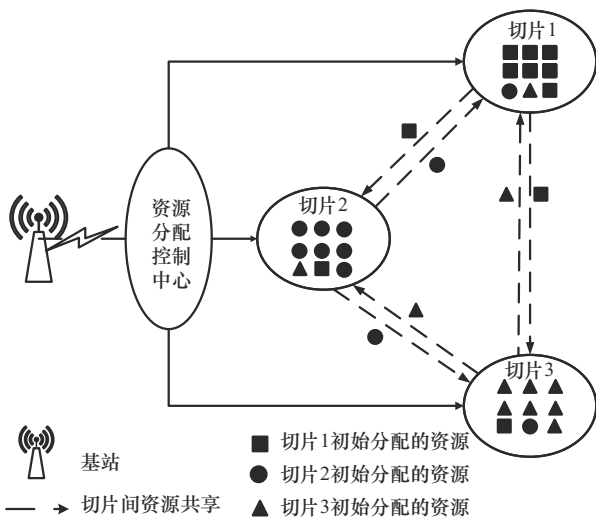
2) 由于分配给切片的无线资源以浮点数形成,在有限的时间内难以得到最优解。因此,本文提出了一种复用隔离优先级无线接入(MIPWA, multiply isolation priority wireless access)算法,该算法基于改进的GA,引入矩阵编码、轮盘赌选择和最优保留方法来解决该问题。

3) 仿真结果表明,本文算法能够在牺牲了少部分复用增益的情况下,提高切片间的隔离。同时,考虑复用增益时引入了切片间的优先级,从是否考虑切片优先级和资源共享情况对比中得出,从其他切片共享资源时,本文算法在考虑优先级的前提下,能够保证切片优先从优先级较低的切片共享资源,从而保证优先级较高的切片的QoS。

## 1 系统模型与问题建模

本文考虑的网络场景及资源分配过程如图2所

示<sup>[27-28]</sup>, 3 个切片共享同一基站资源。当需要提高系统的资源复用增益时, 切片间应共享资源, 而当切片间资源共享程度很大时, 又会降低切片间的隔离度, 且在切片间资源共享时, 还应兼顾考虑切片的优先级。为了满足所有切片的 QoS, 提高切片间的资源利用率和切片间的隔离水平, 应根据系统上运行切片过程中的资源复用增益和切片间隔离程度来调整资源分配。因此, 本文定义了切片间的隔离因子和无线资源复用增益 2 个参数, 用来评估切片间的隔离程度和资源利用率, 并分析了他们之间的关系, 以优化资源分配, 更好地保证切片的 QoS。



### 1) 隔离因子的定义

为了满足切片的 QoS 需求, 每个切片既需要足够的无线资源又不能影响其他切片对资源的共享使用, 兼顾隔离度的共享才有意义。为了能够准确评估切片的隔离度, 本文定义了隔离因子参数。

假设所述场景中存在  $G$  个切片, 定义每个切片为  $g, g=1,2,3,\dots,G$ 。  $T_g$  表示总观测时间, 将  $T_g$  分为  $n$  个单位, 其中  $n = \frac{T_g}{\tau}$ ,  $\tau$  表示单位持续时间。假设系统总的资源块数量为  $R$ , 分配给切片  $g$  的初始资源块数量为  $r_g$ ;  $\alpha_{j,i}^g$  和  $\beta_{j,i}^g$  分别表示单位时间  $i$  内, 切片  $g$  给切片  $j$  共享的资源块数量和切片  $g$  从切片  $j$  中获取的资源块数量。不同切片所用的资源差异性越大, 即切片间相互共享的资源差异性较大时, 切片之间产生的干扰就越小, 切片间的隔离水平也就越高。假设在单位时间  $i$  内切片  $g$  的资源块数

量需求为  $d_{g,i}$ , 当分配给切片  $g$  的初始资源块数量  $r_g$  在给其他切片共享资源后, 切片剩余的资源仍能够满足切片自身的需求, 即当  $r_g - \sum_{j=1, j \neq g}^G \alpha_{j,i}^g \geq d_{g,i}$  时, 隔离度为 1。而当切片剩余的资源不足以满足自身需求时, 需要从其他切片中获取共享资源, 即当  $r_g - \sum_{j=1, j \neq g}^G \alpha_{j,i}^g < d_{g,i}$  时,  $r_g - \sum_{j=1, j \neq g}^G \alpha_{j,i}^g$  代表切片  $g$  共享后剩余的资源,  $r_g + \sum_{j=1, j \neq g}^G \beta_{j,i}^g - \sum_{j=1, j \neq g}^G \alpha_{j,i}^g$  代表切片  $g$  从其他切片共享资源后剩余的资源。根据文献[24,26], 可以利用资源差异性, 即两者的比值定义隔离因子, 比值越大, 即资源差异性越大, 隔离度越大, 隔离效果越好。比值越小, 则反之。由此, 可以给出单位时间  $i$  内切片隔离因子  $iso_{g,i}$  为

$$iso_{g,i} = \begin{cases} 1 & , r_g - \sum_{j=1, j \neq g}^G \alpha_{j,i}^g \geq d_{g,i} \\ \frac{r_g - \sum_{j=1, j \neq g}^G \alpha_{j,i}^g}{r_g + \sum_{j=1, j \neq g}^G \beta_{j,i}^g - \sum_{j=1, j \neq g}^G \alpha_{j,i}^g} & , r_g - \sum_{j=1, j \neq g}^G \alpha_{j,i}^g < d_{g,i} \end{cases} \quad (1)$$

则在总观测时间  $T_g$  内, 对  $n$  个时间段的隔离因子求和后取均值, 得到切片  $g$  的平均隔离因子  $iso_g$  为

$$iso_g = \sum_{i=1}^n \frac{iso_{g,i}}{n} \quad (2)$$

将隔离性能阈值定义为  $\phi_g$ , 其中  $\phi_g \in [0,1]$ , 当  $iso_g \geq \phi_g$  时, 切片  $g$  满足隔离需求。不同的切片具有不同的隔离性能阈值。文献[27]提供了 5 个切片能力等级以满足多样化的 QoS 需求, 包括 L0 到 L4, 5 个等级隔离阈值分别为  $\{0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1\}$ 。其中, L0 和 L1 构建在公共网络上, L2、L3 和 L4 基于 5G 行业网络基础设施构建, 而文中 3 个场景中的切片均是基于 5G 行业网络基础设施构建的。因此, 本文设定切片间的隔离阈值为 0.4。

### 2) 复用增益的定义

网络切片是一种将通信网络划分为多个虚拟网络的技术, 以满足不同业务或应用的需求。无线资源的多路复用增益可以表示为各切片之间交换无线资源的比例。因此, 切片无线资源的复用增益可以由与其他切片共享的资源来定义。根据文献[27]描

述, 可以利用  $\alpha_{j,i}^g - \beta_{j,i}^g$  与  $r_g$  的比值进行定义。因此, 切片  $g$  在单位时间  $i$  内的复用增益  $U_{g,i}$  可定义为

$$U_{g,i} = \left| \frac{\sum_{j=1, j \neq g}^G (\alpha_{j,i}^g - \beta_{j,i}^g)}{r_g} \right| \quad (3)$$

在本文系统模型中, 考虑了3个场景的切片 ( $G=3$ ), 分别是中央商务区 (CBD, central business district) 场景、公园场景和学校场景。由于场景的不同, 满足 QoS 所需的资源也不同, 为了保证优先级较高的切片的 QoS, 在计算切片复用增益时需要考虑切片的优先级。

在真实的通信场景中, 不同的切片对资源有着不同的需求, 因此本文根据不同切片表现出的不同 QoS 需求, 为不同类型的切片配置不同的优先级, 在此引入切片优先级系数  $P_g$ <sup>[30]</sup>,  $P_g$  表示切片  $g$  的优先级, 具有较高 QoS 需求的切片被分配更高的优先级。本文场景中的切片优先级配置及切片应用场景如表1所示, 而优先级系数也可以随着切片应用场景的变化而变化。当切片  $g$  从其他切片共享资源时, 会降低其他切片的 QoS, 为了保证共享资源切片中优先级较高的切片的 QoS, 在切片共享资源时, 应当优先从优先级较低的切片获取资源。而在此基础上, 引入切片优先级系数后, 保证优先从优先级较低的切片获取资源, 则切片  $g$  在单位时间  $i$  内的复用增益  $U_{g,i}^P$  定义为

$$U_{g,i}^P = \left| \frac{\sum_{j=1, j \neq g}^G \left( \frac{(\alpha_{j,i}^g - \beta_{j,i}^g)}{P_j} \right)}{r_g} \right| \quad (4)$$

表1 各切片对应场景及其优先级系数

切片	应用场景	优先级系数
切片1	学校	$\frac{1}{4}$
切片2	CBD	$\frac{5}{8}$
切片3	公园	$\frac{1}{8}$

通过以上定义, 当相同的资源块在其他切片上分配比例较高时, 资源复用增益就会相应增加。这是因为其他切片在相同资源块上的分配比例更高意味着更多的资源被共享使用, 从而提高了复用程度。根据式(4)可以得出, 在总观测时间内,  $T_g$  被

分为  $n$  段单位观测时间, 对每个单位观测时间的切片的复用增益求和后再求均值, 可得到切片  $g$  的平均复用增益  $U_g$  为

$$U_g = \left| \frac{\sum_{j=1, j \neq g}^G \left( \frac{(\alpha_{j,i}^g - \beta_{j,i}^g)}{P_j} \right)}{nr_g} \right| \quad (5)$$

为了在最大化复用增益的同时, 提高切片间的隔离度, 必须要对式(2)和式(5)进行优化。根据文献[24], 解决多目标优化问题最一般和最直接的方法之一是加权和方法。因此, 当同时优化复用增益和切片间隔离时, 可以引出效用函数 Sys, 如式(6)所示。

$$\text{Sys} = \omega_1 U_g + \omega_2 \text{iso}_g \quad (6)$$

其中,  $\omega_1 + \omega_2 = 1$ , 权值可以改变, 当环境发生变化时, 可以更改权值的大小以适应环境的变化。

由式(2)和式(5)可知,  $\alpha_{j,i}^g$  和  $\beta_{j,i}^g$  给出了某一切片的复用增益和该切片  $\text{iso}_g$  的隔离性能。其中一个切片的复用增益和隔离性能通过切片之间的资源交换量影响另一个切片, 由此给出式(6)所示总的优化目标。

为了在切片之间合理地分配无线资源, 并在最大化切片资源复用增益的同时, 提高切片间的隔离度, 将资源分配问题考虑成效用函数的优化问题, 该问题可以由式(7)和约束条件式(8)表述。

$$\max_{\alpha_{j,i}^g, \beta_{j,i}^g} \text{Sys} \quad (7)$$

$$\text{C0: } \omega_1 + \omega_2 = 1$$

$$\text{C1: } r_g + \sum_{j=1, j \neq g}^G \beta_{g,i} - \sum_{j=1, j \neq g}^G \alpha_{g,i} =$$

$$d_{g,i} r_g - \sum_{j=1, j \neq g}^G \alpha_{j,i}^g < d_{g,i}, \forall g \in G$$

$$\text{C2: } r_g \leq R, \forall g \in G$$

$$\text{C3: } \sum_{j=1, j \neq g}^G \alpha_{g,i} \leq r_g$$

$$\text{C4: } \sum_{j=1, j \neq g}^G \beta_{j,i}^g \leq R - r_g, \forall g \in G$$

$$\text{C5: } \sum_{g=1}^G P_g = 1, \forall P_g \geq 0, \forall g \in G$$

$$\text{C6: } R \geq \sum_{g=1}^G r_g, \forall g$$

$$\text{C7: } \text{iso}_g \geq 0.4 \quad (8)$$

其中, 式(7)表示优化的目标函数; 约束C0表示隔离和复用增益的加权系数和为1; 约束C1表示式(1)中当  $r_g - \sum_{j=1, j \neq g}^G \alpha_{j,i}^g < d_{g,i}$  时, 切片初始分配的资源、共享出去的资源和其他切片获取的资源代数和为单位时间  $i$  内切片  $g$  的资源需求  $d_{g,i}$ ; 约束C2表示切片  $g$  的初始分配资源  $r_g$  应不超过系统总资源; 约束C3表示切片  $g$  的共享资源应不大于切片  $g$  的初始分配资源; 约束C4表示切片  $g$  获取的资源应不大于系统中剩余的资源; 约束C5表示系统中定义各个切片优先级指数和应为1, 且均为非负值; 约束C6表示系统中分配给切片的无线资源数量应不超过系统中的可用资源。

## 2 基于改进遗传算法的无线资源分配方案

基于改进遗传算法提出的 MIPWA 算法求解式(7)的无线资源分配解决方案的算法框架如图3所示, 其具有以下3个优点。

- 1) 算法在提高切片复用增益和切片间隔度的同时兼顾切片优先级。
- 2) 采用矩阵编码改进传统的遗传算法。
- 3) 遗传算法需要很少的领域知识。

本文提出的 MIPWA 算法具体包括以下4个步骤。

1) 染色体编码。传统的遗传算法中染色体个体往往是一维向量, 由于系统中含有多个切片, 且切片  $g$  可以共享其他切片上的资源, 因此本文这里使用改进的遗传算法, 使用矩阵构建染色体, 染色体编码由  $\alpha_{j,i}^g$  和  $\beta_{j,i}^g$  组成, 矩阵维度为  $2(G-1)n$ 。一个染色体编码  $A_g$  如式(9)所示。

$$A_g = \begin{bmatrix} \alpha_{11}^g & \alpha_{12}^g & \cdots & \alpha_{1n}^g \\ \alpha_{21}^g & \alpha_{22}^g & \cdots & \alpha_{2n}^g \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha_{(g-1)1}^g & \alpha_{(g-1)2}^g & \cdots & \alpha_{(g-1)n}^g \\ \alpha_{(g+1)1}^g & \alpha_{(g+1)2}^g & \cdots & \alpha_{(g+1)n}^g \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha_{G1}^g & \alpha_{G2}^g & \cdots & \alpha_{Gn}^g \\ \beta_{11}^g & \beta_{12}^g & \cdots & \beta_{1n}^g \\ \beta_{21}^g & \beta_{22}^g & \cdots & \beta_{2n}^g \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \beta_{(g-1)1}^g & \beta_{(g-1)2}^g & \cdots & \beta_{(g-1)n}^g \\ \beta_{(g+1)1}^g & \beta_{(g+1)2}^g & \cdots & \beta_{(g+1)n}^g \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \beta_{G1}^g & \beta_{G2}^g & \cdots & \beta_{Gn}^g \end{bmatrix} \quad (9)$$

2) 种群初始化。在一代种群中, NUM 代表种群的大小, 即初始个体的数量。初始个体是根据系统中的切片数量和单位次数随机生成的。

3) 适应度函数。根据式(5)和式(6), 基于最大化无线资源复用增益和最大化切片间的隔离目标给出适应度函数  $f(x)$ , 如式(10)所示。

$$f(x) = \max_{\alpha_{j,i}^g, \beta_{j,i}^g} \text{Sys} = \max_{\alpha_{j,i}^g, \beta_{j,i}^g} (\omega_1 U_g + \omega_2 \text{iso}_g) \quad (10)$$

4) 遗传操作。遗传操作包括种群迭代中的基因选择、交叉和突变, 以产生适应度值最高的资源分配方案。

① 基因选择。在选择阶段, 每一代种群采取随机竞争选择和最优保存方法来确定父代群体中的个体, 以供下一代繁殖。首先, 本文算法利用约束

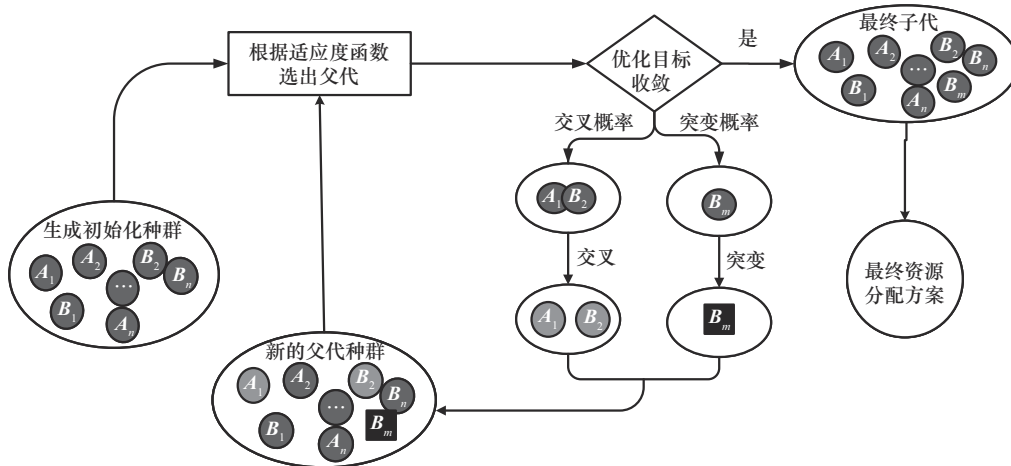


图3 MIPWA算法框架

条件进行初步选择, 消除不能满足约束的解决方案。其次, 选择时采用玻尔兹曼选择方式, 设置生存压力, 对适应度值较大的个体使其具有更大的可能性被选中, 得到更多的繁殖。同时采用轮盘赌选择方法从所有个体中选出新一代父代种群, 允许适应度值较小的个体有一定的机会被选中, 以维持个体种群的多样性。

② 交叉。选择后, 对新一代种群中的个体进行交叉操作以生成新的个体。这一过程模拟了生物界的杂交过程。首先将新一代父代种群中的个体进行随机配对, 然后假设亲本个体是  $A_g$  和  $B_g$ ,  $p$  和  $q$  是 2 个随机数, 其中  $p, q \in [1, n]$ ,  $p < q$ 。  $A_g$  和  $B_g$  分别表示为

$$A_g = \begin{bmatrix} \alpha_{11}^g & \cdots & \alpha_{1p}^g & \cdots & \alpha_{1q}^g & \cdots & \alpha_{1n}^g \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \alpha_{(g-1)1}^g & \cdots & \alpha_{(g-1)p}^g & \cdots & \alpha_{(g-1)q}^g & \cdots & \alpha_{(g-1)n}^g \\ \alpha_{(g-1)1}^g & \cdots & \alpha_{(g-1)p}^g & \cdots & \alpha_{(g-1)q}^g & \cdots & \alpha_{(g-1)n}^g \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \alpha_{G1}^g & \cdots & \alpha_{Gp}^g & \cdots & \alpha_{Gq}^g & \cdots & \alpha_{Gn}^g \\ \beta_{11}^g & \cdots & \beta_{1p}^g & \cdots & \beta_{1q}^g & \cdots & \beta_{1n}^g \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \beta_{(g-1)1}^g & \cdots & \beta_{(g-1)p}^g & \cdots & \beta_{(g-1)q}^g & \cdots & \beta_{(g-1)n}^g \\ \beta_{(g+1)1}^g & \cdots & \beta_{(g+1)p}^g & \cdots & \beta_{(g+1)q}^g & \cdots & \beta_{(g+1)n}^g \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \beta_{G1}^g & \cdots & \beta_{Gp}^g & \cdots & \beta_{Gq}^g & \cdots & \beta_{Gn}^g \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$B_g = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11}^g & \cdots & \varepsilon_{1p}^g & \cdots & \varepsilon_{1q}^g & \cdots & \varepsilon_{1n}^g \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \varepsilon_{(g-1)1}^g & \cdots & \varepsilon_{(g-1)p}^g & \cdots & \varepsilon_{(g-1)q}^g & \cdots & \varepsilon_{(g-1)n}^g \\ \varepsilon_{(g+1)1}^g & \cdots & \varepsilon_{(g+1)p}^g & \cdots & \varepsilon_{(g+1)q}^g & \cdots & \varepsilon_{(g+1)n}^g \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \varepsilon_{G1}^g & \cdots & \varepsilon_{Gp}^g & \cdots & \varepsilon_{Gq}^g & \cdots & \varepsilon_{Gn}^g \\ \delta_{11}^g & \cdots & \delta_{1p}^g & \cdots & \delta_{1q}^g & \cdots & \delta_{1n}^g \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \delta_{(g-1)1}^g & \cdots & \delta_{(g-1)p}^g & \cdots & \delta_{(g-1)q}^g & \cdots & \delta_{(g-1)n}^g \\ \delta_{(g+1)1}^g & \cdots & \delta_{(g+1)p}^g & \cdots & \delta_{(g+1)q}^g & \cdots & \delta_{(g+1)n}^g \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \delta_{G1}^g & \cdots & \delta_{Gp}^g & \cdots & \delta_{Gq}^g & \cdots & \delta_{Gn}^g \end{bmatrix} \quad (12)$$

交换  $A_g$  和  $B_g$  中的  $p$  到  $q$  列, 得到子代  $A'_g$  和  $B'_g$  分别为

$$A'_g = \begin{bmatrix} \alpha_{11}^g & \cdots & \varepsilon_{1p}^g & \cdots & \varepsilon_{1q}^g & \cdots & \alpha_{1n}^g \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \alpha_{(g-1)1}^g & \cdots & \varepsilon_{(g-1)p}^g & \cdots & \varepsilon_{(g-1)q}^g & \cdots & \alpha_{(g-1)n}^g \\ \alpha_{(g+1)1}^g & \cdots & \varepsilon_{(g+1)p}^g & \cdots & \varepsilon_{(g+1)q}^g & \cdots & \alpha_{(g+1)n}^g \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \alpha_{G1}^g & \cdots & \varepsilon_{Gp}^g & \cdots & \varepsilon_{Gq}^g & \cdots & \alpha_{Gn}^g \\ \beta_{11}^g & \cdots & \delta_{1p}^g & \cdots & \delta_{1q}^g & \cdots & \beta_{1n}^g \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \beta_{(g-1)1}^g & \cdots & \delta_{(g-1)p}^g & \cdots & \delta_{(g-1)q}^g & \cdots & \beta_{(g-1)n}^g \\ \beta_{(g+1)1}^g & \cdots & \delta_{(g+1)p}^g & \cdots & \delta_{(g+1)q}^g & \cdots & \beta_{(g+1)n}^g \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \beta_{G1}^g & \cdots & \delta_{Gp}^g & \cdots & \delta_{Gq}^g & \cdots & \beta_{Gn}^g \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$B'_g = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11}^g & \cdots & \alpha_{1p}^g & \cdots & \alpha_{1q}^g & \cdots & \varepsilon_{1n}^g \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \varepsilon_{(g-1)1}^g & \cdots & \alpha_{(g-1)p}^g & \cdots & \alpha_{(g-1)q}^g & \cdots & \varepsilon_{(g-1)n}^g \\ \varepsilon_{(g+1)1}^g & \cdots & \alpha_{(g+1)p}^g & \cdots & \alpha_{(g+1)q}^g & \cdots & \varepsilon_{(g+1)n}^g \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \varepsilon_{G1}^g & \cdots & \alpha_{Gp}^g & \cdots & \alpha_{Gq}^g & \cdots & \varepsilon_{Gn}^g \\ \delta_{11}^g & \cdots & \beta_{1p}^g & \cdots & \beta_{1q}^g & \cdots & \delta_{1n}^g \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \delta_{(g-1)1}^g & \cdots & \beta_{(g-1)p}^g & \cdots & \beta_{(g-1)q}^g & \cdots & \delta_{(g-1)n}^g \\ \delta_{(g+1)1}^g & \cdots & \beta_{(g+1)p}^g & \cdots & \beta_{(g+1)q}^g & \cdots & \delta_{(g+1)n}^g \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \delta_{G1}^g & \cdots & \beta_{Gp}^g & \cdots & \beta_{Gq}^g & \cdots & \delta_{Gn}^g \end{bmatrix} \quad (14)$$

③ 变异。通过引入一定概率  $P_m$  的基因突变, 即对染色体实施翻转、插入和交换等操作, 在种群中产生新的染色体个体, 体现了遗传多样性, 能够避免算法陷入局部最优。突变个体  $A_g^*$  可以表示为

$$A_g^* = \begin{bmatrix} \alpha_{11}^g & \cdots & \alpha_{1\lambda}^g & \cdots & \alpha_{1n}^g \\ \alpha_{21}^g & \cdots & \alpha_{2\lambda}^g & \cdots & \alpha_{2n}^g \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \alpha_{(g-1)1}^g & \cdots & \alpha_{(g-1)\lambda}^g & \cdots & \alpha_{(g-1)n}^g \\ \alpha_{(g+1)1}^g & \cdots & \alpha_{(g+1)\lambda}^g & \cdots & \alpha_{(g+1)n}^g \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \alpha_{G1}^g & \cdots & \alpha_{G\lambda}^g & \cdots & \alpha_{Gn}^g \\ \beta_{11}^g & \cdots & \beta_{1\mu}^g & \cdots & \beta_{1n}^g \\ \beta_{21}^g & \cdots & \beta_{2\mu}^g & \cdots & \beta_{2n}^g \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \beta_{(g-1)1}^g & \cdots & \beta_{(g-1)\mu}^g & \cdots & \beta_{(g-1)n}^g \\ \beta_{(g+1)1}^g & \cdots & \beta_{(g+1)\mu}^g & \cdots & \beta_{(g+1)n}^g \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \beta_{G1}^g & \cdots & \beta_{G\mu}^g & \cdots & \beta_{Gn}^g \end{bmatrix} \quad (15)$$

计算每一代个体的适应度函数值, 在每一代中, 重复上述基因遗传操作的步骤。选出新的父代, 再通过交叉和变异得到新的子代, 每一代都试图寻找更好的解决方案。直至算法收敛或达到最大迭代次数。具体求解过程如算法 1 所示。

#### 算法 1 基于改进 GA 的 MIPWA 算法

**输入** 初始资源数  $R$ , 切片数量  $G$ , 交叉概率  $P_c$ , 突变概率  $P_m$ , 种群大小 NUM, 迭代次数 MaxIt, 优先级系数矩阵  $\mathbf{Pri}$ , 资源需求矩阵  $\mathbf{D}$ , 生存压力  $\beta$ , 适应度函数  $f(x)$

**输出** 资源分配方案  $\text{pop}_i$

- 1) 根据式(8)的约束条件初始化种群  $\text{pop}_0$
- 2) 根据  $P_c$  和  $P_m$  计算交叉和突变产生的新个体数目  $N_c$  和  $N_m$
- 3) 通过适应度函数  $f(x)$ , 计算得到初代种群的适应度值  $f(\text{pop}_0)$
- 4) for  $i \leq \text{MaxIt}$  do
- 5) 得到  $\text{pop}_i$  代的种群
- 6) for  $k \leq \frac{N_c}{2}$
- 7) 根据生存压力  $\beta$ , 采用玻尔兹曼选择方式对初代种群  $\text{pop}_i$  中的个体随机选取的 2 个个体进行交叉操作, 得到 2 个新的个体
- 8) 计算交叉个体的适应度值
- 9) end for
- 10) 得到交叉后的个体集合  $\text{pop}_c$
- 11) for  $m \leq N_m$
- 12) 根据突变概率, 随机选择种群中个体进行突变操作, 产生新的突变个体
- 13) 计算突变个体的适应度值
- 14) end for
- 15) 得到突变后的个体集合  $\text{pop}_m$
- 16) 将  $\text{pop}_i$ 、 $\text{pop}_c$  和  $\text{pop}_m$  中的个体根据适应度值从大到小排序
- 17) 从根据适应度值排序后的个体中从大到小选出 NUM 个个体作为  $\text{pop}_{i+1}$  代
- 18) 记录适应度值最大的个体
- 19) end for

### 3 仿真分析

本节通过仿真实验评估本文所提 MIPWA 算法的性能。首先在引入优先级系数的条件下, 针对切

片 1、切片 2 和切片 3 对比了 MIPWA、复用优先级的无线接入 (MPWA, multiply priority wireless access) [27] 和隔离优先级的无线接入 (IPWA, isolation priority wireless access) [27] 这 3 种算法的性能, 其中 MPWA 算法是仅考虑复用增益未考虑隔离的算法, IPWA 算法是仅考虑隔离未考虑复用增益的算法。然后在是否引入切片优先级系数的条件下, 对比了 MIPWA 算法和 MIWA 算法下切片 1、切片 2 和切片 3 资源共享情况, 其中在 MIWA 算法中, 并未引入切片优先级系数。

在本文中, 根据文献[27]考虑的 3 个切片场景分别是 CBD、公园和学校, 并为其提供服务。公园里面通常包含大量的传感器设备、监控摄像头、智能照明等物联网设备, 需要满足大量设备的连接和低功耗需求, 属于 mMTC 网络切片。学校需要提供高速稳定的网络连接来满足学生和教职工的上网需求, 如在线学习、电子图书馆、视频会议等, 属于 eMBB 网络切片。CBD 是一个繁忙的商业区域, 包含金融机构、办公楼、商场等, 属于 uRLLC 网络切片, 能够提供极低的时延和高可靠性, 满足相应的应用需求。所以这 3 个应用场景是 3 种具有代表性的不同业务模型, 能够代表生活中大多数的应用场景。此外, 根据文献[27]可得到 3 个场景的流量函数和单位观测时间, 并将迭代次数设置为 500 次, 观察计算半天内不同场景切片的流量需求。而效用函数中复用增益和隔离度的加权系数值大小可以随环境发生变化, 不同大小的加权系数值能适应不同的环境, 这里加权系数值均设置为 0.5, 以适应大多数环境。不同场景下的相关模拟参数如表 2 所示[24,27]。

单位时间内的总数据流量可以由式(16)计算得到。

$$\text{traffic}(i) = \int_{\frac{i-1}{N}}^{\frac{i}{N}} m_g(t) dt \quad (16)$$

其中,  $\text{traffic}(i)$  表示切片  $g$  在第  $i$  个单位时间内的总数据流量, 根据切片的数据流量需求, 可以得到以下仿真结果, 所得结果均做归一化处理。

图 4 分别给出了切片 1 的复用增益和隔离度随着迭代次数增加而变化的情况。图 4(a) 中, 随着迭代次数增加, MPWA 算法的复用增益达到最大值 92.08%, IPWA 算法的复用增益从初始的 61.72% 下降到 22.89%, MIPWA 算法的复用增益达到最大值 86.26%, 相较 MPWA 算法损失了 5.82%, 但是相较

表2 模拟参数

参数	值
学校场景流量函数 $m_1(t)$	$323.04 + 148.3\sin(\frac{\pi}{12}t + 2.98) + 109.4\sin(\frac{\pi}{6} + 2.15) + 38.43\sin(\frac{\pi}{4}t + 1)$
CBD场景流量函数 $m_2(t)$	$75.75 + 47.52\sin(\frac{\pi}{12}t - 2.56) + 16.71\sin(\frac{\pi}{6} + 1.45)$
公园场景流量函数 $m_3(t)$	$351.06 + 222.7\sin(\frac{\pi}{12}t + 3.11) + 96.24\sin(\frac{\pi}{6}t + 2.36)$
最大迭代次数/次	500
总观测时间/h	12
单位观测时间/min	15
单位观测时间数量	48
系数	$\omega_1 = 0.5, \omega_2 = 0.5$
效用函数	$\omega_1 U_g + \omega_2 iso_g$

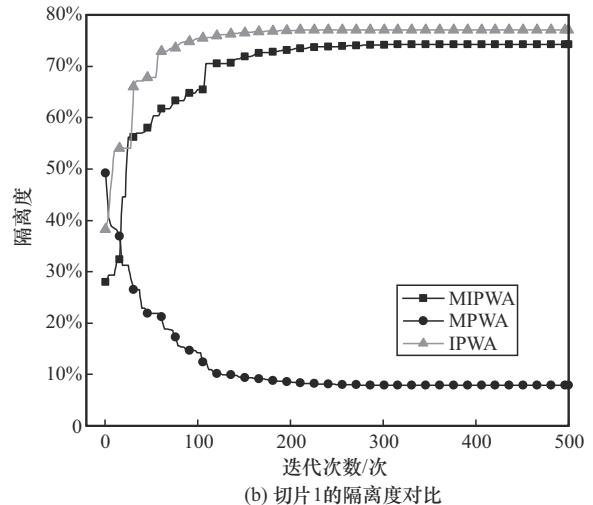
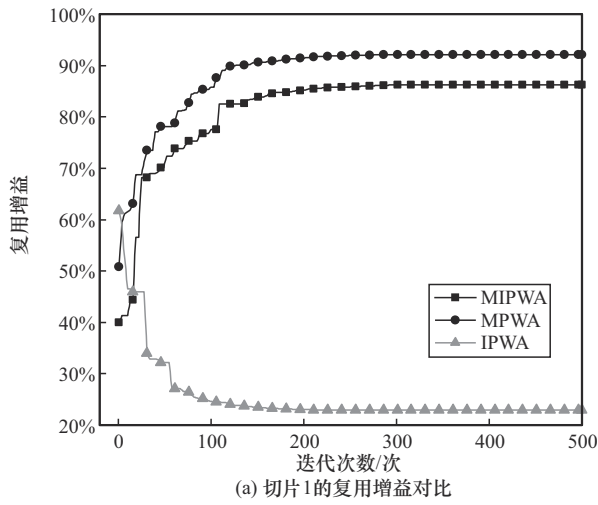
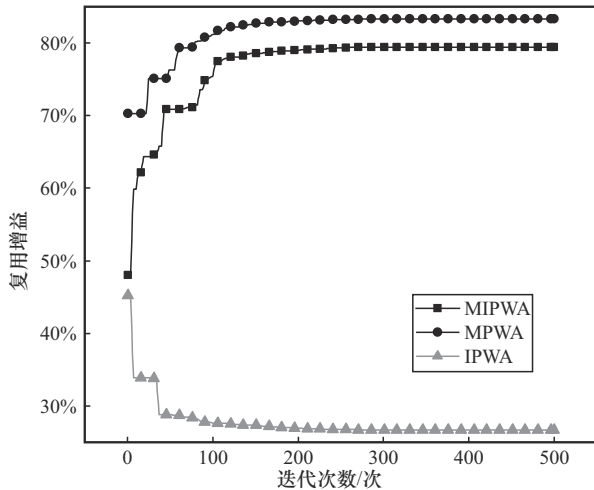


图4 切片1的性能

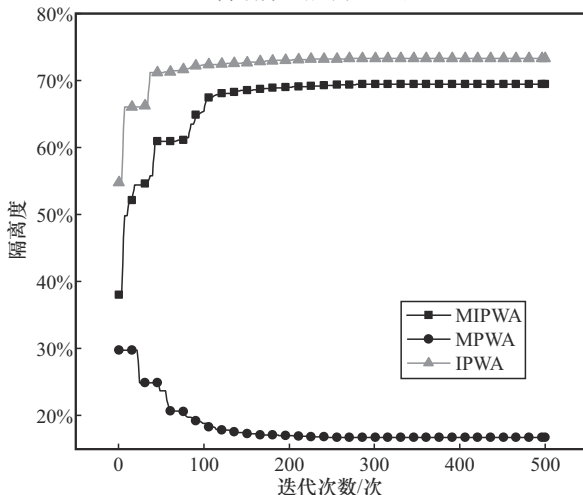
于IPWA算法,其复用增益要高出63.37%。图4(b)中,随迭代次数增加,IPWA算法的隔离度达到最大值77.11%,MPWA算法的隔离度下降到最小值7.92%,MIPWA算法的隔离度达到最大值74.26%,相较IPWA算法损失了2.85%,但是相较于MPWA算法,其隔离度要高出66.34%。可以看出,MPWA算法虽然有着较高的复用增益,但其隔离度却一直降低,不能保证切片间的隔离度。IPWA算法虽然有77.11%的较高隔离度,但其复用增益仅有22.89%。因此,虽然MIPWA算法的复用增益和隔离度都有所减少,但是却能够兼顾复用增益和隔离度,在最大化复用增益的同时实现较高的隔离度。

图5分别给出了切片2的复用增益和隔离度随着迭代次数增加而变化的情况。图5(a)中,随着迭代次数增加,MPWA算法的复用增益达到最大值

83.30%,IPWA算法复用增益下降到最小值26.71%,MIPWA算法的复用增益达到最大值79.44%,相较MPWA算法损失了3.86%,但是相较于IPWA算法,其复用增益要高出52.73%。图5(b)中,随迭代次数增加,IPWA算法的隔离度达到最大值73.29%,MPWA算法的隔离度下降到最小值16.70%,MIPWA算法的隔离度达到最大值69.44%,相较IPWA算法减少了3.85%,但是相较于MPWA算法,其隔离度要高出52.74%。可以看出,MPWA算法虽然有着较高的复用增益,但其隔离度却一直降低,不能保证切片间的隔离度。IPWA算法虽然有73.29%的较高隔离度,但其复用增益仅有26.71%。因此,虽然MIPWA算法的复用增益和隔离度都有所减少,但是却能够兼顾复用增益和隔离度,在最大化复用增益的同时实现较高的隔离度。



(a) 切片2的复用增益对比

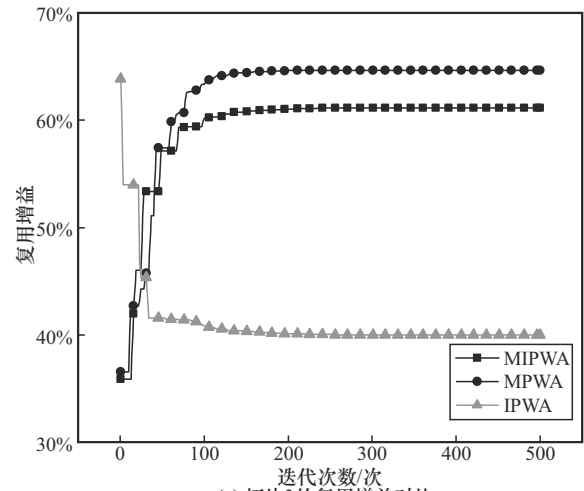


(b) 切片2的隔离度对比

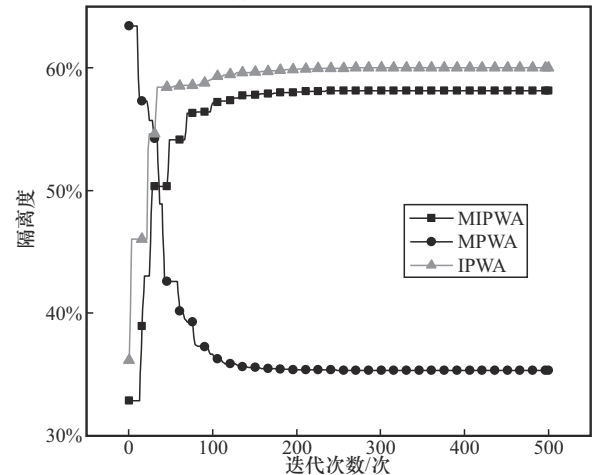
图5 切片2的性能

图6分别给出了切片3的复用增益和隔离度随着迭代次数增加而变化的情况。图6(a)中，随着迭代次数增加，MPWA算法的复用增益达到最大值64.66%，IPWA算法的复用增益下降到最小值39.99%，MIPWA算法的复用增益达到最大值61.16%，相较MPWA算法减小了3.50%，但是相较于IPWA算法，其复用增益要高出21.17%。图6(b)中，随迭代次数增加，IPWA算法的隔离度达到最大值60.01%，MPWA算法的隔离度下降到最小值35.34%，MIPWA算法的隔离度达到最大值58.15%，相较IPWA算法隔离度减少了1.86%，但是相较于MPWA算法，其隔离度要高出22.81%。可以看出，MPWA算法虽然有着较高的复用增益，但其隔离度却一直降低，不能保证切片间的隔离度。IPWA算法虽然有60.01%的较高隔离度，但其复用增益仅有39.99%。因此，虽然MIPWA算法的

复用增益和隔离度都有所减少，但是却能够兼顾复用增益和隔离度，在最大化复用增益的同时实现较高的隔离度。



(a) 切片3的复用增益对比



(b) 切片3的隔离度对比

图6 切片3的性能

图7给出了切片1在MIPWA算法与MIWA算法下从另外2个切片共享资源的情况。从图7可以看到，当迭代次数增加、数据收敛时，考虑优先级条件的MIPWA算法，切片1最终从切片2共享了16个资源块，从切片3共享了27个资源块。而不考虑优先级条件的MIWA算法，切片1最终从切片2共享了30个资源块，从切片3共享了12个资源块。由表1可知，切片2优先级高于切片3，MIWA算法会造成切片1从优先级较高的切片2共享较多的资源，从优先级较小的切片3共享较少的资源，不能够更好地保证优先级较高的切片的QoS。而MIPWA算法，在提高切片1的隔离度并最大化切片资源复用的同时，能够保证切片1优先从优先级

较低的切片3共享资源,使优先级较高的切片2能够更好地保证自己的服务质量。

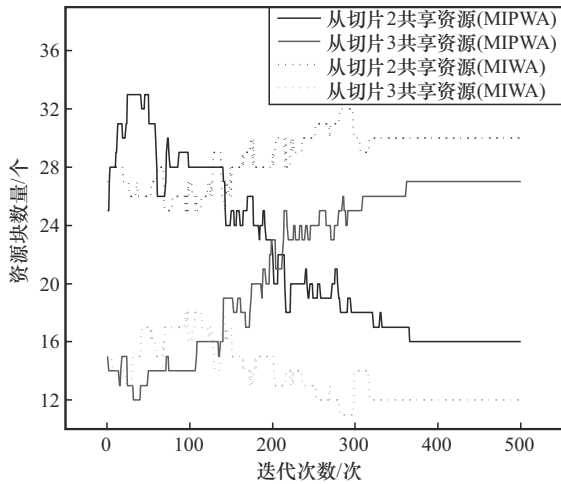


图7 切片1从其他切片共享资源的情况

图8给出了切片2在MIPWA算法与MIWA算法下从另外2个切片共享资源的情况。从图8可以看到,当迭代次数增加、数据收敛时,考虑优先级条件的MIPWA算法,切片2最终从切片1共享了15个资源块,从切片3共享了30个资源块。而不考虑优先级条件的MIWA算法,切片2最终从切片1共享了28个资源块,从切片3共享了16个资源块。由表1可知,切片1优先级高于切片3,MIWA算法会造成切片2优先从优先级较高的切片1共享较多的资源,从优先级较小的切片3共享较少的资源,降低了优先级较高的切片1的QoS。而MIPWA算法,在提高切片2的隔离度并最大化切片资源复用的同时,能够保证切片2优先从优先级较低的切片3共享资源,使优先级较高的切片1能够更好地保证自己的QoS。

法,在提高切片3的隔离度并最大化切片资源复用的同时,能够保证切片3优先从优先级较低的切片1共享资源,使优先级较高的切片2能够更好地保证自己的QoS。

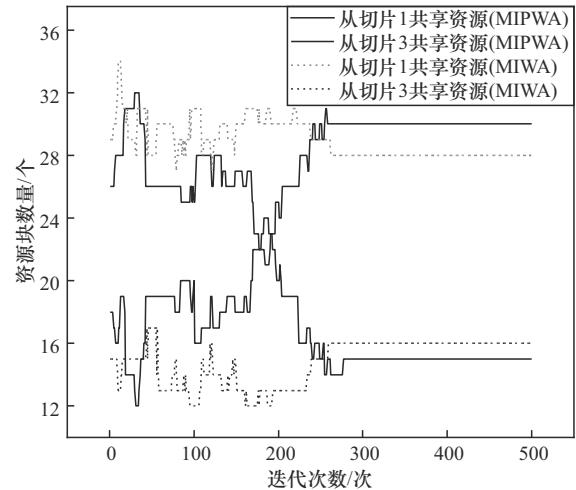


图8 切片2从其他切片共享资源的情况

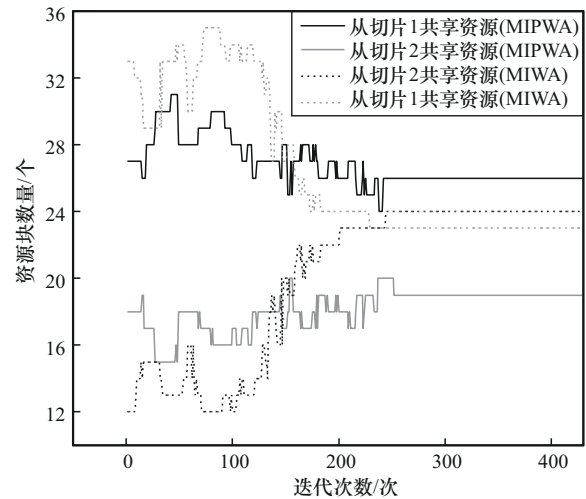


图9 切片3从其他切片共享资源的情况

图9给出了切片3在MIPWA算法与MIWA算法下从另外2个切片共享资源的情况。从图9可以看到,当迭代次数增加、数值收敛时,考虑优先级条件的MIPWA算法,切片3最终从切片1共享了26个资源块,从切片2共享了19个资源块。而不考虑优先级条件的MIWA算法,切片3最终从切片1共享了23个资源块,从切片2共享了24个资源块。由表1可知,切片2的优先级高于切片1,MIWA算法会使切片3优先从优先级较高的切片2共享较多的资源,从优先级较小的切片1共享较少的资源,降低了优先级较高的切片1的QoS。而MIPWA算

以复用增益为例,图10给出了3个切片在MIPWA算法和传统GA下收敛速度与收敛结果的对比。由图10(a)可以看出,在传统GA下,初始时目标的收敛速度较快,但在迭代次数达到179次时,目标已经收敛到最大值81.19%。但通过观察MIPWA算法下目标收敛情况发现,虽然初始时收敛速度不及传统GA,但是在迭代次数达到331次时收敛到86.26%,收敛结果比传统GA高5.07%,虽然收敛速度提高了一些,但是优化性能要比传统GA高。由图10(b)可以看出,在传统GA下,初始时目标收敛速度较快,但是在迭代次数达到213次

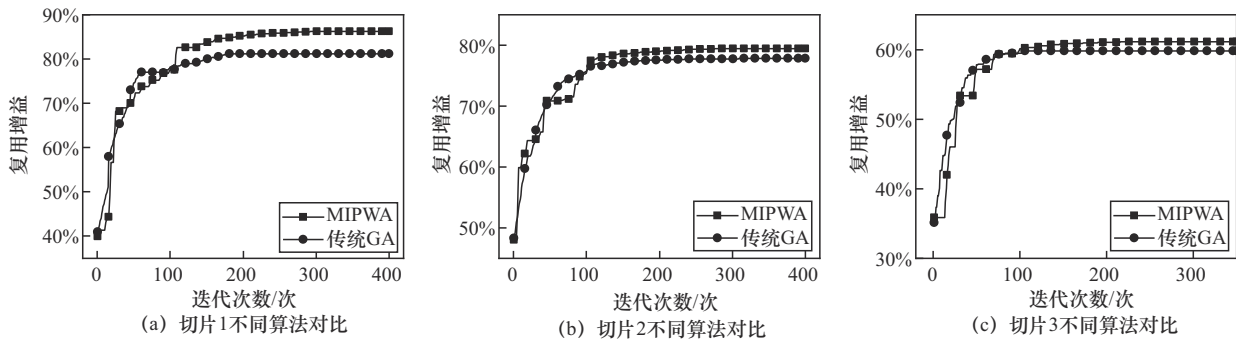


图 10 MIPWA 算法与传统 GA 基于复用增益的对比

时, 优化目标收敛到最大值 77.63%, 通过观察 MIPWA 算法下目标收敛情况发现, 虽然初始时收敛速度不及传统 GA, 但是在迭代次数达到 298 次时收敛到 79.44%。收敛结果比传统 GA 高出 1.81%。观察图 10(c) 可以看出, 在传统 GA 下, 迭代次数达到 195 次时, 优化目标收敛到最大值 59.76%。但通过观察 MIPWA 算法下目标收敛情况发现, 虽然初始时收敛速度不及传统 GA, 但是在迭代次数达到 274 次时收敛到 61.16%, 收敛结果比传统 GA 高出 1.81%。综合 3 个切片在 MIPWA 算法和传统 GA 下的复用增益收敛情况对比可以看出, 传统 GA 虽然初始时收敛速度较快, 但是其最终优化结果是不如 MIPWA 算法的。MIPWA 算法能够更好地优化目标, 给出更好的资源分配方案。

根据仿真结果分析可得, MIPWA 算法在考虑不同切片优先级的情况下, 实现了切片间最大的复用增益并提高了切片间隔离度, 由此能够更好地保证其他优先级较高的切片的 QoS。

#### 4 结束语

本文提出了一种切片网络中考虑切片优先级的资源复用增益和切片间隔离性能之间权衡的 MIPWA 算法。首先, 定义了能够兼顾切片优先级的复用增益参数, 根据切片间资源的差异性定义了隔离性能参数。它们之间的耦合关系根据切片之间的无线资源交换得到。然后, 将资源分配问题描述为一个优化问题。为了得到优化问题的解, 在基础的遗传算法上进行了改进, 设计了一种基于矩阵编码的改进 GA 来寻找最优解。最后, 通过仿真评估了 MIPWA 算法的性能。与 MPWA 和 IPWA 算法相比, MIPWA 算法在最大化系统资源复用增益的同时, 提高了切片间的隔离性能。此外, 对 MIPWA 算法得到最优解时目标切片从其他切片共享资源的

情况与 MIWA 算法下的最优解的共享情况进行对比分析。本文算法能够保证优先从其他切片中优先级较低的切片共享资源, 进而能够保证其他切片中优先级较高的切片的 QoS。与传统的 GA 进行了对比分析, 结果表明, MIPWA 算法有更好的优化结果。

#### 参考文献:

- [1] IMT-2020 (5G) Promotion Group. White paper on 5G concept[R]. 2015.
- [2] KAZMI S M A, KHAN L U, TRAN N H, et al. Network slicing for 5G and beyond networks[M]. Berlin: Springer International Publishing, 2019.
- [3] ALSENWI M, TRAN N H, BENNIS M, et al. eMBB-URLLC resource slicing: a risk-sensitive approach[J]. IEEE Communications Letters, 2019, 23(4): 740-743.
- [4] ZHANG Y, ZHANG H. Service-oriented resource allocation for 5G network slicing[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2021, 20(5): 2100-2115.
- [5] FOUKAS X, PATOUNAS G, ELMOKASHFI A, et al. Dynamic network slicing for diverse service requirements in 5G networks[J]. IEEE Transactions on Network and Service Management, 2020, 17(4): 2626-2640.
- [6] ZHANG S L. An overview of network slicing for 5G[J]. IEEE Wireless Communications, 2019, 26(3): 111-117.
- [7] ALWIS C D, PORAMBAGE P, DEV K, et al. A survey on network slicing security: attacks, challenges, solutions and research directions[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2024, 26(1): 534-570.
- [8] SUN Q, TIAN L, SHI J L, et al. Joint management of communicating and computing resources in sliced 5G networks[C]//Proceedings of the GLOBECOM 2020-2020 IEEE Global Communications Conference. Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-6.
- [9] LIU L, ZHOU Y Q, YUAN J H, et al. Economically optimal MS association for multimedia content delivery in cache-enabled heterogeneous cloud radio access networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2019, 37(7): 1584-1593.
- [10] LIU L, ZHOU Y Q, ZHUANG W H, et al. Tractable coverage analysis for hexagonal macrocell-based heterogeneous UDNs with adaptive interference-aware CoMP[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2019, 18(1): 503-517.
- [11] SUN Q, TIAN L, ZHOU Y Q, et al. A two-layered incentive scheme for cooperation in sliced 5G D2D networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(11): 13289-13304.

- [12] LEE Y L, LOO J, CHUAH T C, et al. Dynamic network slicing for multitenant heterogeneous cloud radio access networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2018, 17(4): 2146-2161.
- [13] QIAN B, ZHOU H B, MA T, et al. Multi-operator spectrum sharing for massive IoT coexisting in 5G/B5G wireless networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2021, 39(3): 881-895.
- [14] AYEPAH-MENSAH D, SUN G L, BOATENG G O, et al. Blockchain-enabled federated learning-based resource allocation and trading for network slicing in 5G[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2024, 32(1): 654-669.
- [15] SAPAVATH N N, RAWAT D B. Wireless virtualization architecture: wireless networking for Internet of things[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020, 7(7): 5946-5953.
- [16] AKGÜL Ö U, MALANCHINI I, CAPONE A. Dynamic resource trading in sliced mobile networks[J]. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 2019, 16(1): 220-233.
- [17] FENG J, PEI Q Q, YU F R, et al. Dynamic network slicing and resource allocation in mobile edge computing systems[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(7): 7863-7878.
- [18] JANJUA H K, MIGUEL I D, BARROSO R J D, et al. Efficient optimization of actor-critic learning for constrained resource orchestration in RAN with network slicing[C]//*Proceedings of the 2023 26th Conference on Innovation in Clouds, Internet and Networks and Workshops (ICIN)*. Piscataway: IEEE Press, 2023: 100-104.
- [19] CUI Y P, SHI H J, WANG R Y, et al. Multi-agent reinforcement learning for slicing resource allocation in vehicular networks[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2024, 25(2): 2005-2016.
- [20] GUO J W, ZHU G H, ZHANG D Y, et al. Resource management algorithm for slicing function in 5G network slicing[C]//*Proceedings of the 2023 5th International Conference on Natural Language Processing (ICNLP)*. Piscataway: IEEE Press, 2023: 367-372.
- [21] KOKKU R, MAHINDRA R, ZHANG H H, et al. CellSlice: cellular wireless resource slicing for active RAN sharing[C]//*Proceedings of the 2013 Fifth International Conference on Communication Systems and Networks (COMSNETS)*. Piscataway: IEEE Press, 2013: 1-10.
- [22] KOTULSKI Z, NOWAK T W, SEPCZUK M, et al. Towards constructive approach to end-to-end slice isolation in 5G networks[J]. *EURASIP Journal on Information Security*, 2018(1): 2.
- [23] HUIN N, MEDAGLIANI P, MARTIN S, et al. Hard-isolation for network slicing[C]//*Proceedings of the IEEE INFOCOM 2019-IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHP)*. Piscataway: IEEE Press, 2019: 955-956.
- [24] YANG X, LIU Y, WONG I C, et al. Genetic algorithm for inter-slice resource management in 5G network with isolation[C]//*Proceedings of the 2020 International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM)*. Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-6.
- [25] TIAN L, DAI L L, SUN Q, et al. Wireless resource management in sliced networks based on isolation indexes[C]//*Proceedings of the 2021 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*. Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-6.
- [26] DEMIROVIĆ S, KIŠ P, JANKOVIĆ J, et al. Resource utilization-QoS isolation trade-off in 5G networks considering network slicing reconfiguration interval[C]//*Proceedings of the 2020 43rd International Conference on Information, Communication and Electronic Technology (MIPRO)*. Piscataway: IEEE Press, 2020: 407-412.
- [27] HUI N, SUN Q, WANG Y Y, et al. Wireless resource allocation based on multiplexing and isolation in sliced 5G networks[C]//*Proceedings of the 2022 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*. Piscataway: IEEE Press, 2022: 1629-1634.
- [28] DIGHRIRI M, ALFOUDI A S D, LEE G M, et al. Resource allocation scheme in 5G network slices[C]//*Proceedings of the 2018 32nd International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops (WAINA)*. Piscataway: IEEE Press, 2018: 275-280.
- [29] SUN J W, MA W Z, LI X, et al. Optimization of channel resource QoS allocation based on 5G slicing in the field of power information communication[C]//*Proceedings of the 2024 4th International Conference on Neural Networks, Information and Communication Engineering (NNICE)*. Piscataway: IEEE Press, 2024: 1225-1229.
- [30] MARABISSI D, FANTACCI R. Highly flexible RAN slicing approach to manage isolation, priority, efficiency[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 97130-97142.

#### [作者简介]



孙君 (1980-), 女, 山东龙口人, 博士, 南京邮电大学教授、硕士生导师, 主要研究方向为无线通信网络、无线资源管理、信道测量、干扰管理、机器学习等。



霏振宇 (2000-), 男, 河南唐河人, 南京邮电大学硕士生, 主要研究方向为无线通信网络、网络切片资源分配等。