

## 面向 6G 混合云频谱共享的区块链技术

芒 戈

(中国电信股份有限公司研究院, 北京 102209)

**摘 要:** 随着越来越多的物联网(IoT)设备需要在有限的频谱范围内进行通信,研究了 6G 增强超可靠低延迟通信(euRLLC)服务中的动态频谱共享问题,并将区块链技术与 6G 混合云相结合,实现物联网设备之间的频谱共享。由于区块链的分布式存储和可靠性,基于区块链的动态频谱共享可以实现灵活、可行和更高效的频谱分配。分析了频谱共享的过程,并提出了一种基于强化学习(RL)的 euRLLC 无线频谱资源共享结构,包括资源分类、资源调度、整体模型和神经网络优化,通过将区块链与混合云相结合,基于公共管理平台,使用统一的编码和识别标准来注册和管理物联网设备的信息。

**关键词:** euRLLC; 频谱共享; 6G 混合云; 区块链

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.211772

中文引用格式: 芒戈. 面向 6G 混合云频谱共享的区块链技术[J]. 电子技术应用, 2021, 47(6): 10-14, 21.

英文引用格式: Mang Ge. Blockchain based spectrum sharing over 6G hybrid cloud[J]. Application of Electronic Technique, 2021, 47(6): 10-14, 21.

## Blockchain based spectrum sharing over 6G hybrid cloud

Mang Ge

(China Telecom Research Institute, Beijing 102209, China)

**Abstract:** This work investigates the dynamic spectrum sharing in the 6G enhanced ultra-reliable and low latency communications (euRLLC) services, as more and more Internet of Things(IoT) devices need to communicate between each other in the limited spectrum. This paper combines blockchain technology with 6G hybrid cloud to realize the spectrum sharing between IoT devices. Due to blockchain's distributed storage and credibility, blockchain based dynamic spectrum sharing can achieve flexible, feasible and much more efficient spectrum allocation. This paper analyzes the process of spectrum sharing and proposes a wireless spectrum resource sharing structure in euRLLC based on reinforcement learning(RL), including resource classification, resource scheduling, overall model and neural network optimization. This design integrates blockchain and hybrid cloud to build a public management platform to register and manage the information of IoT devices using unified coding and identification standards.

**Key words:** euRLLC; spectrum sharing; 6G hybrid cloud; blockchain

## 0 引言

第六代移动通信技术(6G)可以灵活地满足不同场景下业务的特定需求,并将为垂直行业带来各种创新应用,提高社会经济效率并降低成本<sup>[1-2]</sup>。5G 中的超可靠性和低延迟通信(uRLLC)旨在支持关键任务应用程序,这些应用程序要求高可靠性和低延迟<sup>[3-7]</sup>。当然,未来 6G 中的 uRLLC 预计将比其 5G 版本有更好的能力,称为增强 uRLLC(euRLLC)。这是由关键任务应用程序(如机器人和自动系统)渴望更高的可靠性和更低的延迟驱动的;另一方面,由于更高的可靠性、更低的延迟和更高的数据速率,euRLLC 在未来 6G 中可能会产生一个新的应用场景,融合物联网、大数据、云计算、边缘计算、区块链、频谱共享、人工智能等,形成新型信息基础设施。

6G 正为产业、经济和社会的数字化转型带来前所未有的动力。

6G 研究已经确定太赫兹频谱是移动通信网络的一个主要领域。此外,许多国家目前用于 2G/3G/4G/5G 的频段将继续用于未来的 6G 网络。因此,6G 的频谱范围将比以往任何时候都大,这导致了需要更复杂的频谱共享方法来解决中、高甚至超高频段的差异。此外,6G 的频谱共享需求比以往任何时候都更加迫切,以保护现有的频谱用户。然而,频段越高,路径损耗越大,覆盖半径越小,网络建设成本越大。因此,从需求和成本的角度来看,共建共享将成为未来 6G euRLLC 网络建设的重要方向。此外,一些垂直行业也有相应的专利授权频谱。垂直行业专有许可频谱通常只在一定的地理区域或一定的

行业领域使用,没有形成有效的应用规模,专有许可频谱利用效率低。相反,大量的垂直行业只能使用有限的无许可频谱。因此,如何有效地利用垂直行业和电信运营商的许可频谱,为整个行业提供公平、可靠的共享频谱资源,是未来 6G 网络亟待解决的问题。

为支持 6G euRLLC 应用,混合云旨在为用户提供高质量、高效、灵活的云计算服务,可用于实现海量电力设备的连接、各种电力数据(视频、图片、传感器数据等)<sup>[6]</sup>的采集、本地应用卸载和处理、智能判断和故障定位、秒级的故障恢复。近年来,区块链<sup>[8-11]</sup>凭借其分布式数据存储、共识机制、加密算法等计算机新技术<sup>[12]</sup>,在贸易金融、工业互联网等应用领域取得了初步成功。区块链和 6G 都是新技术,两者结合的巨大潜力日益突出。

6G euRLLC 网络推动了智能设备的大规模采用,这意味着区块链将拥有比以往任何时候都多的数据,这些数据将大大促进技术的全球化。区块链将能够为全球数万亿种商品提供稳定的跟踪、可追溯性和分布式点对点交易功能。区块链技术正好可以弥补 6G 隐私安全性差、对虚拟交易缺乏信任、产权保护不足的问题。区块链的去中心化、交易信息隐私保护、历史记录防篡改、可追溯性将有效推动 6G 网络和新商业模式的发展。6G 可以保证可追溯数据传输的完整性、全面性和速度,区块链可以保证可追溯数据的可信度。6G 与区块链的融合将推动可追溯行业的快速发展。

6G 混合云为应用开发者和内容服务提供商提供 6G 网络边缘所需的云计算功能和 IT 服务环境。基于区块链技术的去中心化混合云计算将在数据安全、身份认证、隐私保护<sup>[13]</sup>等方面更具优势,从而启发和推动混合云应用场景的大规模部署。在实际部署时,可以将区块链平台或应用部署在混合云服务器上,为不同的应用场景提供区块链功能支持。基于混合云的区块链边缘云服

务与核心云和终端管务协同,可以促进区块链在 6G euRLLC 网络中的实施。

本文介绍了 euRLLC 服务的频谱共享过程,提出了一种基于强化学习的无线电频谱资源共享结构;并且将区块链技术和混合云引入了动态频谱共享。此外,基于 6G 混合云网络架构,提出了一种基于混合区块链的动态频谱共享机制。

## 1 频谱共享中的物联网设备识别

### 1.1 频谱共享过程

6G 无线接入网络架构如图 1 所示。卫星运营商通过卫星网络提供覆盖范围广的基本通信能力,地面电信运营商提供基于太赫兹、毫米波、子 6G 频段的大带宽热点业务。垂直行业通过租用电信运营商授权的频带或其他垂直行业在专有地区提供移动网络。个人用户通过部署即插即用设备和租用频段为个人和周边地区提供移动网络。在多方 6G 网络中,如何实现公平、可信、准确、高效、实时的共享频谱交易是保证整个网络稳定运行的关键。区块链采用匿名技术是可行的解决方案,在基于区块链的分布式频谱共享方法中,采用区块链分布式存储技术,将完整的数据保存在区块链节点中,确保用户事务数据的完整性和安全性。设备编码在动态频谱共享中也起着不可或缺的作用,标准化的物联网设备编码和识别将成为建立统一数据库的关键。

### 1.2 5G/6G 的 euRLLC

为了应对多样化的通信业务,国际电信联盟(ITU)将 5G 业务分为 3 类:增强型移动宽带(eMBB)、海量机器通信(mMTC)和低时延高可靠通信(uRLLC)。在以上 3 个类别中,uRLLC 可能是最具挑战性的。这是因为 uRLLC 中两个相互排斥的性能需求。这使得无线电频谱混合接入范式的发展更加迫切。频谱资源分为 uRLLC 独占频谱和共享的非独占频谱。在某些情况下,uRLLC 应用程序

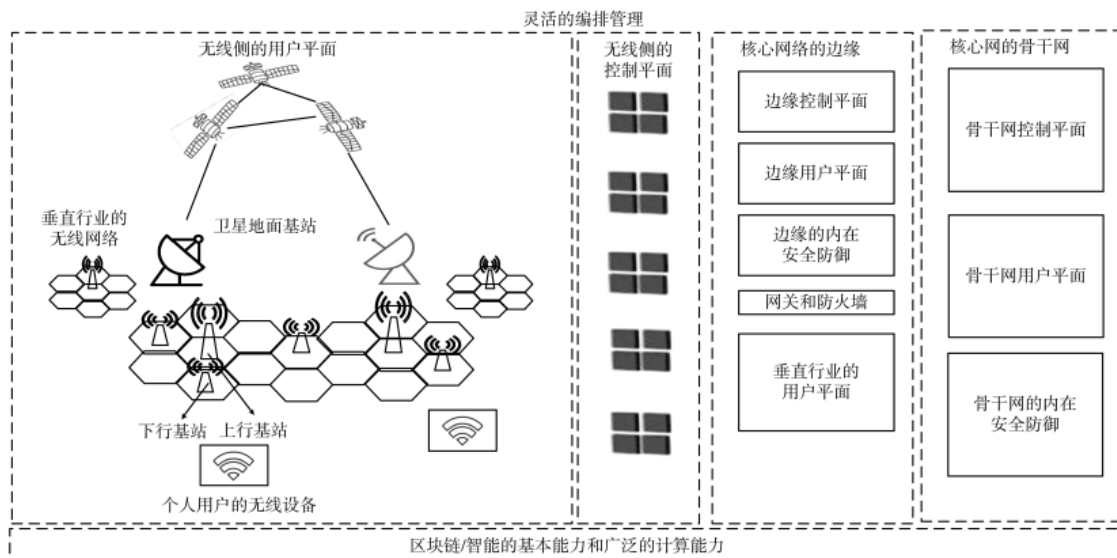


图 1 6G 无线接入网络体系结构

可能会由于没有足够的独占频谱而使用非独占频谱。非独家频谱作为一种替代频谱资源可以为 uRLLC 提供额外的传输能力。

此外,为了进一步满足部分 uRLLC 业务对可靠性的严格要求,对 R16 级进行了以下改进:传输块可根据空间划分、频率划分、时隙内时间划分和时隙间时间划分重复发送;为了提高分集增益,还支持上述模式的组合和不同模式(包括组合模式)之间的动态切换;支持多种连接机制,通过更高层次的冗余传输,实现进一步的分集增益,提高可靠性。

2020 年 2 月,国际电联发布了初步的 6G 计划,该计划是在进一步增强移动宽带(feMBB)、巨量机器通信(umMTC)和增强型低时延高可靠通信(euRLLC)3 种 5G 应用场景的基础上展开研究。

### 1.3 6G 动态频谱共享建模

在动态频谱共享网络中,所有数据都可以通过动态频谱从 6G 核心网传输,并且有  $n_s$  个频谱提供者  $S=S_i (i=1, \dots, n_s)$  和  $n_d$  个频谱需求者  $D=D_i (i=1, \dots, n_d)$ 。第  $i$  个频谱提供商共有  $B_i^l (i=1, \dots, n_s)$  的谱资源和参数为  $\lambda_i^s (i=1, \dots, n_s)$  的泊松分布谱需求  $x_i^s(t) (i=1, \dots, n_s)$ ,  $n_d$  个频谱需求者的频谱需求  $x_i^d(t) (i=1, \dots, n_d)$  服从参数为  $\lambda_i^d (i=1, \dots, n_d)$  的泊松分布。假设所有的频谱需求都是独立且平均分布的,那么频谱提供者  $S=S_i (i=1, \dots, n_s)$  通常优先满足自己的频谱需求,以确保服务质量。因此,共享频谱资源  $\Delta_i^s (i=1, \dots, n_s)$  由频谱提供商提供的是:

$$\Delta_i^s = B_i^l - x_i^s \quad i \in \{1, \dots, n_s\} \quad (1)$$

如果  $\Delta_i^s (i=1, \dots, n_s) > 0$ , 频谱提供商的共享频谱资源  $S_i^s (i=1, \dots, n_s)$  服从参数为  $(B_i^l - \lambda_i^s) \delta(B_i^l - \lambda_i^s) (i=1, \dots, n_s)$  的泊松分布,其中  $\delta(g)$  是一个阶跃函数。整个网络中可动态共享的所有频谱资源服从参数  $\lambda_s$  的泊松分布,其中:

$$\lambda_s = \sum_{i=1}^{n_s} (B_i^l - \lambda_i^s) \delta(B_i^l - \lambda_i^s) \quad (2)$$

如果  $\Delta_i^s (i=1, \dots, n_s) < 0$ ,  $S_i^s (i=1, \dots, n_s)$  从频谱提供者变为频谱需求者,其频谱需求服从参数为  $(\lambda_i^s - B_i^l) \delta(\lambda_i^s - B_i^l) (i=1, \dots, n_s)$  的泊松分布。整个网络的所有频谱要求都服从参数为  $\lambda_d$  的泊松分布,其中:

$$\lambda_d = \sum_{i=1}^{n_s} (\lambda_i^s - B_i^l) \delta(\lambda_i^s - B_i^l) + \sum_{i=1}^{n_d} \lambda_i^d \quad (3)$$

因此,在动态频谱共享的 6G 网络中,供方和需求方达成的动态频谱共享交易服从参数为  $\lambda$  的泊松分布:

$$\lambda = \min(\lambda_s, \lambda_d) \quad (4)$$

为了保证频谱动态共享事务数据的真实性和可信性,在区块链系统中,将每  $L_p$  个频谱动态共享事务数据

按照先入先出规则打包生成一个块。假设区块链系统对每个动态频谱共享事务的处理时间服从参数为  $\mu_0$  的负指数分布,且包含  $L_p$  个频谱动态共享事务的块的平均增长服从参数为  $\mu = \mu_0 / L_p$  的负指数分布:

$$f(t) = \begin{cases} \frac{\mu_0}{L_p} e^{-\frac{\mu_0 t}{L_p}} & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases} \quad (5)$$

当  $\mu_0 > \lambda L_p$ , 链上动态频谱共享事务的平均延迟为:

$$E[T] = \frac{L_p}{\mu_0 - \lambda L_p} \quad (6)$$

队列中挂起的动态频谱共享事务的平均数量为:

$$E[T] = \frac{\lambda^2 L_p^2}{\mu_0 - \lambda \mu_0 L_p} \quad (7)$$

稳定条件是:

$$\lambda L_p < \mu_0 < \lambda^2 \quad (8)$$

### 1.4 基于 RL 的动态频谱共享建模

随着计算机技术特别是人工智能的快速发展,6G 系统有望比前几代网络更加智能。将人工智能应用于无线资源共享的一个目标是预测用户未来的位置、下一个请求和移动轨迹以及蜂窝网络环境。这样有利于平衡资源,兼顾各种类型的通信请求服务,保证了较高的资源效率,降低了网络成本。

基于强化学习(RL)的 euRLLC 的无线电频谱资源共享结构如图 2 所示,包括资源分类、资源调度、整体模型和神经网络优化。RL 由两个主要部分组成:代理和环境。这两部分交换 3 个控制数据:奖励、状态和行动。代理在  $t$  时刻观察环境状态  $S_t$ , 通过神经网络预测得到结果  $\pi(A|S) = \Pr\{\arg \max_A R\}$ , 并在  $A_t$  时刻做出相应的动作,在时间  $t+1$  时,代理将从环境中获得由动作  $A_t$  带来的奖励  $R_{t+1}$ 。如果当时传输容量有限,在接到 euRLLC 数据后,可以将其缓存在 euRLLC 专用的队列  $Q$  中,将频域中最小的可调度资源块(RB)的大小定义为 12 个连续子载波。

假设 RL 代理知道每个 euRLLC 数据的大小  $r = \{L, sr, \delta\}$ , 其中  $L$  和  $sr$  分别是数据 euRLLC 的时间长度和频谱宽度,  $\delta$  表示使用的是独占频谱或者是非独占频谱。为了保证 euRLLC 数据的低延迟特性,提高频谱利用率,将频谱资源分为 euRLLC 专用频谱和非专用频谱。它规定代理可以同时处理队列中多个 euRLLC 数据的资源分配任务。euRLLC 数据的平均延时为  $E[\sum_{j=1}^Q \frac{D_j}{L_j}]$ 。其中, euRLLC 数据  $j$  的总等待时间为  $D_j$ ,  $Q$  为接收到的 euRLLC 数据的总数。状态函数是  $S = \{r_p, r_1, r_2, \dots, r_Q\}$ 。其中,  $r_p$  是剩余的可用频谱资源信息。

在下一个时刻,分配有频谱资源的多个 euRLLC 数据将发送在 euRLLC 队列中。动作功能是  $A = \{r_1, r_2, \dots, r_q\}$ 。其中  $q \in [1, Q]$ 。考虑到 euRLLC 的低延迟目标,将奖



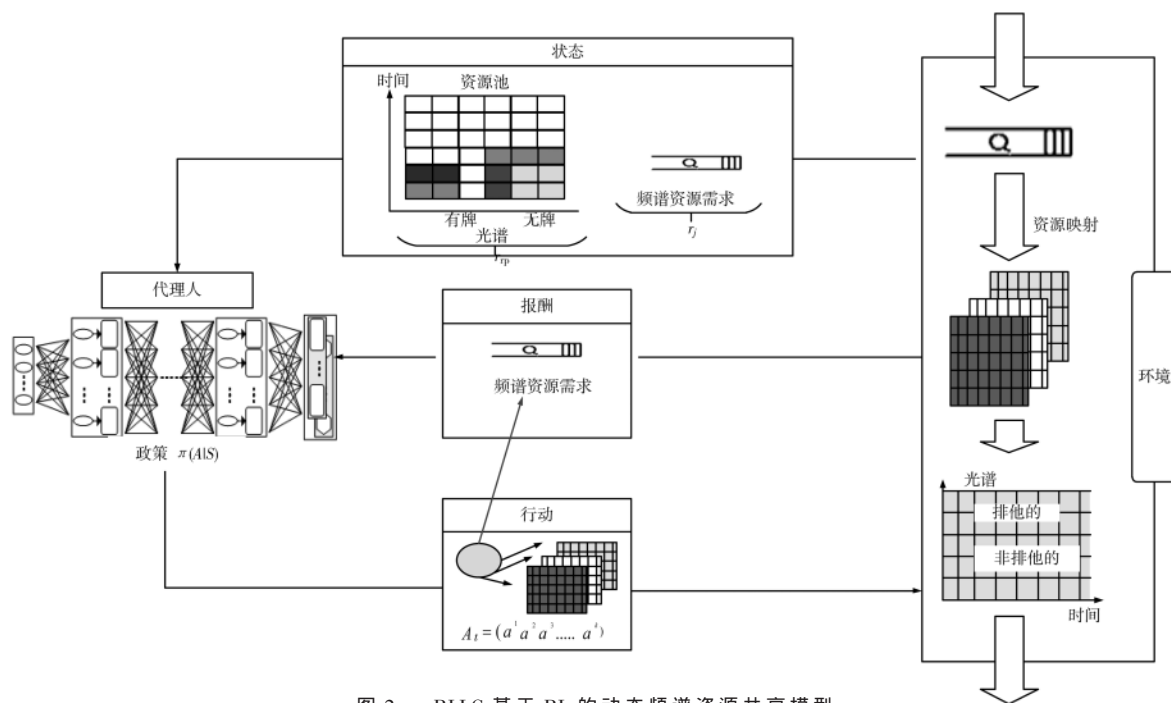


图2 euRLLC 基于 RL 的动态频谱资源共享模型

励功能设计为  $R = \sum_{j=1}^q \frac{D_j}{-L_j}$ 。

## 2 基于 6G 混合云的区块链的 IoT 设备/频谱管理

### 2.1 为未来物联网设备/频谱管理构建模块：区块链和 6G 混合云

频谱共享是传统电力系统的新发展趋势,它融合了物联网、区块链和 6G 混合云等现代先进技术,实现了电力系统各个环节的万物互联和人机交互。此外,可以实现无处不在的智能物联网,它可以完全感知系统状态并有效地处理信息。近年来,区块链凭借其分布式数据存储、共识机制、加密算法和其他新的计算机技术在贸易金融和工业互联网等应用领域取得了初步成功。区块链和 6G 混合云都是新技术,两者结合的巨大潜力变得越来越突出。

考虑到与 6G 网络的深度集成,本文将专注频谱共享的研究。首先,应完成物联网设备的统一编码和识别技术,将结合区块链和混合云,构建一个公共管理平台,以统一的编码和识别标准注册和管理设备的信息。然后,将频谱共享系统移至混合区块链,以提高可靠性和安全性。频谱需求者在混合区块链的节点上发送频谱应用程序,该应用程序决定频谱价格并将其反馈给频谱需求者,交易在混合云上完成。通过将频谱资源出租给频谱需求者而不影响其自身使用,可以达到共享资源的目的,频谱提供者本身也可以获得最大的利益。

### 2.2 混合区块链系统

区块链系统包含多个组件,包括网络、共识、应用程序和元应用程序层。当前使用的区块链可以分为 3 种类型,包括公共、私有和联盟链。联盟链是部分分散的,由

多个组织共同建立。只有一些授权节点参与共识,这提高了共识和整个交易的效率。当计费节点在其计费期间检查正在验证的数据时,该节点将打包数据并将其添加到新生成的数据块中。之后,数据将永久存储在区块链中,并随时支持查询。另外,选择条件合适(硬件更好,运行环境更好)的节点并用它们来验证数据,可以通过使用生成的块来提高系统的执行效率,也可以确保系统的安全性。

单一的区块链架构将导致不同组织之间的信息数据屏蔽。混合区块链架构将促进不同组织之间的通信。如图 3 所示,混合区块链中的每个组织都构建自己的彼此独立的私有链。当不同组织之间发生数据交互时,由组织本身来选择存储在其自己的私有链中的数据,然后将其压缩并上传到联盟链。混合区块链是多中心的,将公共区块链的低信任度与私有链的单个高信任度相结合。它继承了集中化的优势,减轻了垄断问题。就像互联网上的搜索引擎(例如谷歌)一样,它需要一个区块链浏览器来找到存储在区块链网络中的首选数据。本文认为可以使用特定的关键字来搜索区块链数据,例如物联网设备/频谱标识符。在工作中,可以通过使用物联网设备/频谱标识符作为与数据块散列、区块编号或交易 ID 关联的索引来构建区块链浏览器。

传统的无线接入网(Radio Access Network, RAN)面临着快速增长的用户数量,并且需要实时接入,导致频谱资源分配缓慢,满足用户需求的难度越来越大。此外,随着将来无线网络转向分布式解决方案,运营商将部署数千个小区,数百万个用户将彼此通信。在这方面,固定频谱分配方法和运营商的中央节点分配算法将无法更有

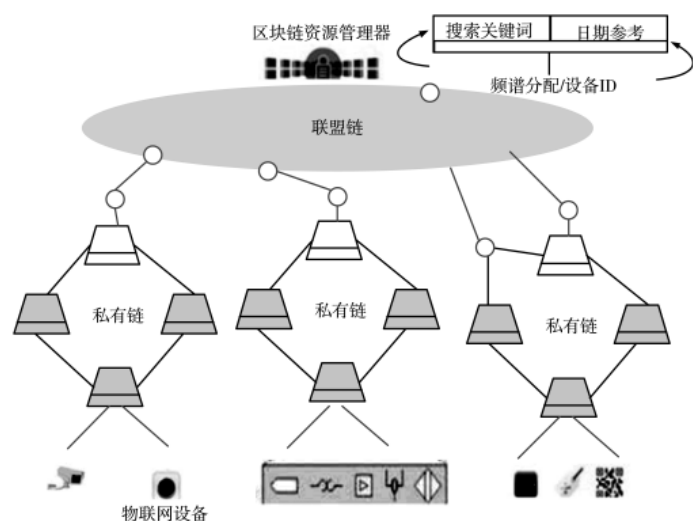


图 3 混合区块链架构

效地扩展。

因此,在将区块链引入频谱资源管理的基础上,分布式频谱共享方法可以有效提高系统的整体吞吐量和频谱利用率,提高系统的稳定性,使未来的网络更加可扩展,并提供更好、更高效的频谱共享和资源管理解决方案。通过使用分布式区块链网络架构,用户可以直接进行点对点通信,从而提高安全性并降低传输成本。采用区块链分布式分类账存储技术将完整的数据保存在区块链节点中,以确保用户交易数据的完整性和安全性。以频谱提供商为共识节点、频谱需求者为轻量级节点,所有节点均在区块链中提供服务。因此,可以利用区块链技术解决认知无线网络中频谱共享的安全性问题。

### 2.3 6G 混合云和区块链

6G 具有大带宽、超连接和低延迟等出色的技术特征<sup>[14]</sup>,可以灵活地满足服务的特定需求,从而提高社会经济效率并降低成本。混合云技术在 6G 网络边缘为应用程序开发人员和内容服务提供商提供了所需的云计算功能。基于区块链技术的混合云将在数据安全、身份认证、隐私保护等方面具有更多优势,从而启发和促进混合云应用场景的大规模部署。在实际部署中,可以在混合云服务器上部署区块链平台或应用程序,以为不同的应用场景提供区块链功能支持。

混合云的网络体系结构使计算能够在移动网络的边缘完成,并实现云侧协作。混合云的主要好处是可以减少移动网络的拥塞,这将在减少 6G 网络延迟方面发挥重要作用。通过使数据更接近最终用户并更直接地将数据流发送到用户终端,可以实现这种低延迟通信。因此,混合云可以为移动区块链环境中的设备提供丰富的计算能力。

基于区块链的混合云<sup>[15]</sup>是两种有前途的技术的结合,可以为未来的 6G 提供高效、安全的服务环境。基于区块链的混合云解决了移动区块链环境中计算资源有

限的问题,并确保了计算资源的分布式部署和交易数据的可追溯性。通过混合云服务器的分布式部署,可以轻松实现物联网设备的管理和基于区块链的频谱共享。

### 3 结论

动态频谱共享是 6G euRLLC 服务中的关键组件之一。本文将区块链技术集成到 6G 混合云中,以实现 IoT 设备之间的频谱共享。分析了频谱共享的过程,提出了基于 RL 的 euRLLC 中的无线频谱资源共享结构。在这种结构中,将区块链与混合云相结合,首先构建了一个用于注册和管理 IoT 设备信息的公共管理平台;然后,为提高可靠性和安全性,提出了一种基于混合区块链的频谱共享系统,以有效提高整体频谱利用率。

### 参考文献

- [1] Fan Mochan, Zhang Xiaohong. Consortium blockchain based data aggregation and regulation mechanism for smart grid[J]. IEEE Access, 2019, 7: 35929–35940.
- [2] ZHANG S, LEE J. A group signature and authentication scheme for blockchain-based mobile-edge computing[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 7(5): 4557–4565.
- [3] SUN S, KADOCH M, GONG L, et al. Integrating network function virtualization with SDR and SDN for 4G/5G networks[J]. IEEE Network, 2015, 29(3): 54–59.
- [4] ZHANG N, CHENG N, GAMAGE A T, et al. Cloud assisted HetNets toward 5G wireless networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(6): 59–65.
- [5] WU Y, RONG B, SALEHIAN K, et al. Cloud transmission: a new spectrum-reuse friendly digital terrestrial broadcasting transmission system[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2012, 58(3): 329–337.
- [6] RONG B, QIAN Y, LU K, et al. Call Admission control optimization in WiMAX networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2008, 57(4): 2509–2522.
- [7] CHEN N, RONG B, ZHANG X, et al. Scalable and flexible massive MIMO precoding for 5G H-CRAN[J]. IEEE Wireless Communications, 2017, 24(1): 46–52.
- [8] LI Y, HU B. An iterative two-layer optimization charging and discharging trading scheme for electric vehicle using consortium blockchain[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(3): 2627–2637.
- [9] SUN W, LIU J, YUE Y, et al. Joint resource allocation and incentive design for blockchain-based mobile edge computing[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2020, 19(9): 6050–6064.
- [10] FENG J, YU F R, PEI Q, et al. Cooperative computation offloading and resource allocation for blockchain-enabled mobile-edge computing: a deep reinforcement learning approach[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 7(7): 6214–6228.

(下转第 21 页)

- (CVPR), 2019: 5693–5703.
- [30] PISHCHULIN L, INSAFUTDINOV E, TANG S, et al. Deep-Cut: joint subset partition and labeling for multi person pose estimation[C]. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition(CVPR), 2016: 5667–5675.
- [31] INSAFUTDINOV E, PISHCHULIN L, ANDRES B, et al. DeeperCut: a deeper, stronger, and faster multi-person pose estimation mode[C]. Proceedings of the European Conference on Computer Vision(ECCV), 2016: 34–50.
- [32] CAO Z, HIDALGO G, SIMON T, et al. OpenPose: realtime multi-person 2D pose estimation using part affinity fields[C]. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition(CVPR), 2017: 7291–7299.
- [33] NEWELL A, HUANG Z, DENG J. Associative embedding: end-to-end learning for joint detection and grouping[C]. Advances in Neural Information Processing Systems, 2017: 2277–2287.
- [34] PAPANDREOU G, ZHU T, CHEN L C, et al. PersonLab:

person pose estimation and instance segmentation with a bottom-up, part-based, geometric embedding model[C]. Proceedings of the European Conference on Computer Vision(ECCV), 2018: 269–286.

- [35] KREISS S, BERTONI L, ALAHI A. PifPaf: composite fields for human pose estimation[C]. IEEE Computer Vision and Pattern Recognition(CVPR), 2019: 11977–11986.
- [36] CHENG B, XIAO B, WANG J, et al. HigherHRNet: scale-aware representation learning for bottom-up human pose estimation[C]. IEEE Computer Vision and Pattern Recognition(CVPR), 2020: 5386–5395.

(收稿日期: 2020-11-10)

## 作者简介:

乔迺(1996-), 女, 硕士, 主要研究方向: 计算机视觉。

曲毅(1976-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向: 雷达、深度学习。



扫码下载电子文档

(上接第 14 页)

- [11] LIU Y, YU F R, LI X, et al. Decentralized resource allocation for video transcoding and delivery in blockchain-based system with mobile edge computing[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(11): 11169–11185.
- [12] GUO F, YU F R, ZHANG H, et al. Adaptive resource allocation in future wireless networks with blockchain and mobile edge computing[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2020, 19(3): 1689–1703.
- [13] HAO Y, LI Y, DONG X, et al. Performance analysis of consensus algorithm in private blockchain[C]. 2018 IEEE Intelligent Vehicles Symposium(IV), Changshu, 2018: 280–285.

- [14] XU H, ZHANG L, LIU Y, et al. RAFT based wireless block-chain networks in the presence of malicious jamming[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2020, 9(6): 817–821.

- [15] WANG S, OUYANG L, YUAN Y, et al. Blockchain-enabled smart contracts: architecture, applications, and future trends[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2019, 49(11): 2266–2277.

(收稿日期: 2021-05-20)

## 作者简介:

芒戈(1985-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向: 频谱工程。



扫码下载电子文档



## 欢迎订阅, 2021年度 《信息技术与网络安全》

中国科技期刊数据库来源期刊

主管单位: 中国电子信息产业集团有限公司 主办单位: 华北计算机系统工程研究所(中国电子信息产业集团有限公司第六研究所)

月刊 定价: 26 元/期

编辑部电话: (010) 66608908 66608981

电话订阅: (010) 82306084

邮局订阅: 邮发代号 82-417



广告

## 版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所