

面向区块链无线网络的接入建模与分析

黄琨^{1,2}, 乐煜炜², 凌昕彤^{1,2}, 王家恒^{1,2}

(1.东南大学移动通信全国重点实验室, 江苏南京210096; 2.紫金山实验室, 江苏南京211111)

摘要: 区块链无线网络 (blockchain radio access network, B-RAN) 是一种面向可信移动通信的分布式网络架构, 通过将区块链与无线通信深度融合, 突破网络间信任壁垒, 以安全可信的方式实现无线资源共享、移动设备接入与跨网络流量均衡。针对B-RAN架构与工作流程, 本文系统性梳理了刻画B-RAN无线网络的接入模型与分析方法。首先通过排队论建立了基于区块链的无线接入模型, 并总结不同排队模型的差异与内在关联; 针对B-RAN的快速可信接入方法, 建立博弈模型, 并深入挖掘无线信道不确定性对博弈合作条件的影响; 针对B-RAN的免授权哈希接入机制, 基于马尔可夫模型分析其性能并探讨了基于区块链的跨网络负载均衡。最后, 本文通过仿真展示了B-RAN在不同场景下的性能, 并验证了对应数学模型的有效性。

关键词: 无线网络; 区块链; 数学模型; 排队论; 博弈论; 马尔可夫模型

中图分类号: TN915

文献标志码: A

Blockchain-enabled wireless access: Modeling and analysis

Huang Kun^{1,2}, Le Yuwei², Ling Xintong^{1,2}, Wang Jiaheng^{1,2}

1. National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing 210096, China

2. Purple Mountain Laboratories, Nanjing 211111, China

Abstract: Blockchain radio access network (B-RAN) is a distributed network architecture for trustworthy mobile communications. It deeply integrates blockchain with wireless networks, breaks trust barriers, and enables secure and trustworthy wireless resource sharing, mobile device access, and cross-network load balancing. Focusing on the B-RAN's architecture and workflow, this paper systematically reviewed the models and analysis methods used to characterize B-RAN wireless access. First, blockchain-enabled wireless access was modeled via queuing theory, and the relations and differences among various queuing models were summarized; for the B-RAN fast trustworthy access method, this paper established the game model and deeply analyzed the impact of wireless channel uncertainty on the game cooperation conditions; for the B-RAN grant-free hash access mechanism, the Markov model was used to analyze its performance, and blockchain-enabled cross-network load balancing was discussed. Finally, simulation results demonstrated the performance of B-RAN across different scenarios and validated the effectiveness of the corresponding mathematical models.

收稿日期: XXXX-XX-XX; 修回日期: XXXX-XX-XX

通信作者: 凌昕彤, xtling@seu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(No.U22B2006, No.62471137, No.72231002); 江苏省前沿引领技术基础研究重大项目(No.BK20222001, No.BK20212001); 国家科技重大专项(No.2440STCZB2587); 江苏省重点研发计划(产业前瞻与关键核心技术)重大项目(No.BE2022068-3); 江苏省科技重大专项(No.BG2024005); 南京市科技重大专项(No.202405020); 中央高校基本科研业务费专项(No.2242022K60002); 青年人才托举工程(No.2023QNRC001)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.U22B2006, No.62471137, No.72231002), The Natural Science Foundation on Frontier Leading Technology Basic Research Project of Jiangsu (No.BK20222001, No.BK20212001), The Research Program of Ministry of Industry and Information Technology of China (No.2440STCZB2587), The Key Technologies R&D Program of Jiangsu (Prospective and Key Technologies for Industry) (No.BE2022068-3), The Jiangsu Province Major Science and Technology Project (No.BG2024005), The Science and Technology Major Project of Nanjing (No.202405020), The Fundamental Research Funds for the Central Universities (No.2242022K60002), The Young Elite Scientists Sponsorship Program By CAST (No.2023QNRC001)

Key words: wireless network, blockchain, mathematical model, queuing theory, game theory, Markov model

0 引言

区块链无线网络 (B-RAN, blockchain radio access network) 旨在实现区块链与无线网络深度融合, 利用区块链去中心化、公开透明、不可篡改等特性, 在缺乏信任乃至零信任环境中建立多方互信桥梁, 为从属不同运营商、设备商、制造商的网络实体构建分布式可信协作渠道, 促进多方多维资源可信聚合、调配与共享, 从而形成安全、可信、开放、高效的多边融合网络^[1-2], 支持无线资源共享、接入控制等数项可信安全功能, 有效提升无线网络可信性、安全性、效率及整体服务质量 (quality of service, QoS)。目前, 无线网络呈现出业务多样化、服务开放化等发展趋势, 多主体之间资源共享与协同服务将是提升用户体验与资源利用效率的重要途径, B-RAN 高度契合未来开放异构无线网络的需求, 为跨运营商、跨设备的资源共享与接入服务提供可信支撑。B-RAN 中, 由多方集体维护的共识机制保障全域资源状态及操作一致性, 链上部署的智能合约集成了资源聚合调度与设备接入策略, 以去中心化方式可信自主执行资源共享与接入, 同时, 资源流转与设备接入过程被记录在链上, 保障永久可溯、公开透明, 从而实现可信安全的无线资源调配、共享与接入控制^[3]。

2017年, K. Kotobi 与 S. G. Bilén^[4]率先考虑了将区块链应用于无线频谱资源接入, 提出利用区块链实现频谱公开透明拍卖。美国联邦通信委员会 (federal communications commission, FCC) 于 2018 年提出区块链在下一代无线网络中将发挥重要作用^[5]。此后, 相关理论与技术研究成果、标准、白皮书等陆续发布^[6-7], 逐步开展区块链在移动通信中的适用性探索, 包括融合框架及方法、性能损失及收益等多个方面。在网络框架方面, 文献[8]提出了区块链与无线网络深度融合的 B-RAN 框架, 支持多种异构网络融合与跨域无线资源调配及共享。在此基础上, 文献[9]构建了 B-RAN 资源共享与交易的六层架构及原型平台, 设计了多项可插拔的安全功能模块, 包括增强型哈希时间锁、快速智能合约部署等^[10]。随后, 围绕 B-RAN 形成了一系列衍生工作, 区块链云无线网络^[11] (blockchain cloud-RAN, BC-RAN) 增强了云端协作与资源调度

的可信性; 区块链使能的无线网络^[12] (blockchain-enabled RAN, BE-RAN) 支持去中心化的身份管理与设备可信接入认证; 双跳区块链无线网络^[13] (dual-hop B-RAN, DH-BRAN) 通过双跳传输实现更广覆盖范围; 分层区块链无线网络^[14] (Hierarchical B-RAN) 构建了双层区块链协同架构, 支持终端设备借助中间节点实现多跳可信接入; 区块链雾无线网络^[15] (blockchain fog-RAN, BF-RAN) 将功能下沉至雾侧以降低服务时延。此外, 基于区块链的分布式可信协作框架被拓展至大模型训练与推理等协作计算场景, 以增强计算结果的可追溯性与真实性^[16]。

为量化分析并评估区块链融入无线网络后对接入时延、安全性与吞吐量等关键性能的影响, 需首先建立完善的数学模型用以刻画 B-RAN 服务流程, 相关工作结合批排队论、博弈论与马尔可夫模型等理论工具对 B-RAN 接入过程进行建模, 并在此基础上分析评估区块链引入无线接入过程后的性能增益与潜在损耗。在 B-RAN 中, 用户请求通常需要经历打包上链与等待服务的排队过程, 文献[17]据此构建了排队模型, 分析了 B-RAN 服务时延及安全性, 并探明了 B-RAN 服务时延与安全性之间的权衡关系。在此基础上, 文献[18]建立了串联排队模型, 推导出具有闭合解形式的时延边界, 文献[19-20]分别建立了 B-RAN 多维连续时空扩散马尔可夫模型和基于离散时间的嵌入式马尔可夫模型。相关研究进一步量化评估了 B-RAN 网络的池化效应^[21]与资源聚合收益^[22], 分析了服务满意度和用户设备容量等性能指标^[23]。文献[24]从区块链挖矿视角评估了算力池化带来的集中化风险。文献[25]提出了 B-RAN 快速可信接入方法, 并建立重复博弈模型, 刻画服务商与用户的多轮博弈交互过程。文献[26]进一步考虑了无线信道不确定性对 B-RAN 快速接入的影响, 推导了衰落信道条件下服务商与用户合作的边界条件。文献[27]设计了基于区块链的哈希接入协议, 要求用户设备在数据传输前须求解出哈希谜题, 强制设备遵循随机退避, 从而规避恶意节点抢占信道的自私接入行为。文献[28-29]将建模问题推广到哈希接入方案, 基于马尔可夫模型分析了哈希接入协议的用户接入时延、吞吐量等性

能,提出了通过优化接入难度实现网络整体吞吐量最大化的方法。

尽管已有研究围绕B-RAN建模理论展开了大量探索,利用多种理论工具对B-RAN接入过程进行了较为丰富的建模分析^[17-29],但现有工作大多针对特定问题或场景展开,例如,文献[17-20]围绕需经历上链与服务排队的接入过程,分析了接入时延和安全性;文献[21-22]关注资源池化、聚合增益等性能;文献[25-26]只聚焦快速可信接入场景;文献[27-29]则面向免授权哈希接入进行建模。相关研究在关注场景、聚焦问题与性能分析等方面存在较大差异,现有数学模型与分析方法仍较为分散,尚缺乏对不同模型之间内在联系、差异及适用场景的梳理与总结。本文旨在从整体视角出发,为厘清B-RAN无线接入建模研究的整体思路,将深入剖析B-RAN整体架构与服务流程,针对B-RAN当前建模与性能分析相关的分散研究成果进行系统性梳理。在此基础上分析不同模型的研究目的与建模思路,揭示各类模型之间的关联和差异,以形成对B-RAN建模相关工作的整体认识,为后续理论研究与优化设计提供支撑。

方协作信任并保障B-RAN接入过程的安全性及可信性。排队模型可以很好地刻画该接入场景中的请求上链与服务排队过程,有效地分析接入服务中的时延与安全问题,推导系统的稳定性条件。快速可信接入面向对接入时延敏感的业务需求,能够在保障用户QoS的同时降低接入时延,对应的博弈模型用于刻画服务商和用户间多轮博弈交互过程,并分析双方在不同策略下的长期收益及博弈合作条件。免授权哈希接入面向设备免授权开放接入场景,其作用在于规范设备接入行为,应对多方设备竞争接入带来的冲突和自私接入等问题,马尔可夫模型则刻画了哈希接入过程并建立了跨域负载均衡策略。在后续章节中,本文首先探讨面向B-RAN接入服务过程的多种排队模型,分析不同排队模型在刻画精度、计算复杂度等方面的特性。针对B-RAN快速可信接入方法,基于重复博弈模型分析其激励服务方守信、保障用户QoS所需满足的条件。针对基于区块链的免授权哈希接入机制,利用马尔可夫模型分析接入成功率及吞吐量,讨论跨网络负载均衡策略对网络性能的提升效果。

1 区块链无线网络

B-RAN融合区块链技术,能够在无线网络参与实体间建立多方协作信任,将多个独立网络重组为多边融合网络,构建了链上无线资源聚合、调配与共享渠道,支持无线设备安全可信、可靠高效的频谱接入。

B-RAN整体架构如图2所示,B-RAN中包括各类用户设备,拥有接入频谱资源的服务提供商(service provider, SP),以及区块链。各SP通过智能合约来发布接入服务。用户若向SP发起接入请求,需与SP签署服务智能合约,并由SP提交至B-RAN网络维护者,经核验无误后执行分布式共识并上链。该服务智能合约明确了服务时间、质量、费用以及双方行为规范等服务条款。用户设备和SP之间的接入服务通过智能合约自动化执行,共识机制保障全网对频谱资源状态达成一致,区块链作为公共账本对接入过程进行不可篡改记录,保障多方设备接入安全可信,为开放异构的无线网络提供了统一的可信协作框架。

在B-RAN中,用户设备需与SP预先签署服务合约并向SP支付服务费用,以获得频谱资源分配,



图1 面向B-RAN无线接入的各类数学建模与分析方法

图1展示了本文面向B-RAN无线接入的整体建模与分析框架,前述分散的相关研究可归纳到三类相互并列的B-RAN核心数学模型,分别对应不同接入场景下的建模需求。其中,基于区块链的无线接入面向安全可信接入需求,利用区块链建立多

随后在接入链路上传输数据。由此，用户设备的接入请求通常需经过上链和服务两个核心阶段。在上链阶段，B-RAN 维护者首先核验接入合约有效性，随后将已验证的接入请求打包进候选区块，执行共识机制生成正式区块，并将其添加至区块链末端。为防范“双花”攻击等安全风险，新生成的正式区块需在全网广播并等待其后续追加若干区块完成确认，其中的服务智能合约方可被认定为安全有效，这一过程通常被称为区块确认。

经区块确认的合约进入服务阶段等待被执行，若 SP 当前拥有可用频谱资源，则立即按照合约中声明的 QoS 交付服务；否则，在服务队列中等待，直至所需资源空闲。

B-RAN 构建了聚合多方 SP 的去中心化可信协作平台，为用户提供安全的无线接入服务。值得注意的是，基于区块链的接入过程还需要考虑共识时延、链下 QoS 以及免授权场景下潜在的竞争接入。因此，对于不同场景，需要合适的建模与分析方法刻画 B-RAN 的特征与性能。

2 基于区块链的无线接入排队模型

本节将对 B-RAN 接入服务过程进行建模分析，评估区块链与无线网络融合后的接入时延、安全性、系统稳定性等关键性能。考虑到 B-RAN 中基于区块链的无线接入服务请求通常需依次经过上链和服务的排队过程，因此利用排队模型能够有效刻画该排队接入过程，并进一步量化分析 B-RAN 队列稳态分布、平均时延和稳定性条件，揭示网络关键参数对性能的影响，为 B-RAN 参数配置和优化

网络性能提供理论支撑。现有工作已面向 B-RAN 的接入服务流程提出了多种排队模型，为便于研究者系统性掌握这些模型并针对特定分析目标选择合适的理论研究方法，本节将这些分散的数学模型整合到统一的 B-RAN 建模框架中，梳理并归纳 B-RAN 马尔可夫模型、GI/M/1 排队模型、M/G/1 排队模型与串联排队模型，分析不同排队模型的优势、局限与适用场景。

设 B-RAN 网络中聚合了 K 个 SP，其中第 k 个 SP 的用户接入请求到达可建模为参数为 λ_k^a 的泊松过程，根据泊松过程的可加性，系统的总请求到达率为 $\lambda^a = \sum_{k=1}^K \lambda_k^a$ 。区块生成可建模为参数为 λ^b 的泊松过程，每个接入请求需经 N 个区块确认后生效。将区块大小上限设为 m ，即单个区块最多可容纳 m 个服务请求。用 s_k 表示第 k 个 SP 的链路数，因此整个网络最多同时服务的用户数为 $s = \sum_{k=1}^K s_k$ 。在服务阶段，每个接入请求的服务时间相互独立，服从均值为 $1/\lambda^c$ 的指数分布。此外，本节统一采用如下符号定义， $\mathbf{1}_n$ 和 $\mathbf{0}_n$ 分别为由 1 和 0 构成的 n 维列向量， \mathbf{I}_n 是 $n \times n$ 单位矩阵， $\mathbf{0}_{n \times l}$ 表示维数为 $n \times l$ 的零矩阵。

2.1 B-RAN 马尔可夫模型

根据第 1 节中描述的 B-RAN 框架下的用户服务流程，用户请求需经过上链和服务两个关键阶段。若分别将上链与服务建模为串联队列，则服务阶段到达具有批量相关性，该阶段队列并非马尔可夫过程，处理较为困难，因此需联合设计状态空间。

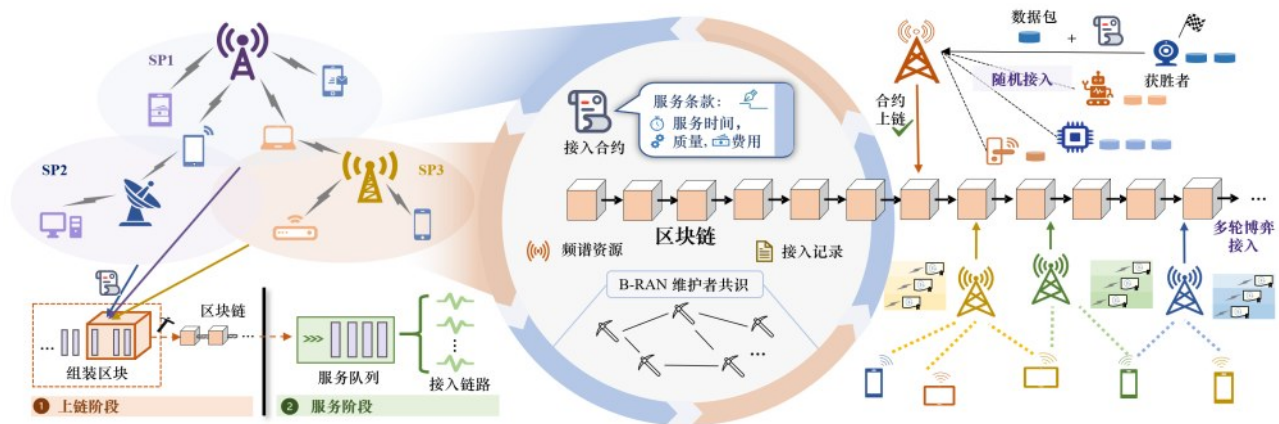


图 1 B-RAN 整体架构与面向不同场景的无线接入过程

具体来说, 设 i_n 是已获得 n 个区块确认的待处理请求数量, 待处理请求在收到 N 个区块确认之后进入服务阶段, 用 $j = \sum_{n=N}^{+\infty} i_n$ 表示处于服务阶段并在等候服务的请求数量, 则 B-RAN 队列状态可由状态空间 \mathbb{Z}_+^{N+1} 中的元素 $E(i_0, i_1, \dots, i_{N-1}, j)$ 表示, 其中 \mathbb{Z}_+^{N+1} 表示 $N+1$ 维非负整数的集合。因此, 得到如下随机过程, 记作:

$$\{Y(t) = E(i_0, i_1, \dots, i_{N-1}, j) \in \mathbb{Z}_+^{N+1}, t \geq 0\}. \quad (1)$$

文献[17]理论证明了上述随机过程具有马尔可夫性和时间齐次性。因此, $Y(t)$ 是一个连续时间齐次马尔可夫过程, 即未来状态仅与当前状态有关, 与历史状态无关, 且状态转移概率与起始时间无关, 由此该模型也称作 B-RAN 马尔可夫模型。

先从单次区块确认配置着手, 将用户服务请求所在区块被添加至区块链视为一次确认, 完成确认的请求随后进入服务阶段 (方便地, 单次确认过程也可以推广到一般的多次确认过程^[17])。在单次区块确认下, B-RAN 马尔可夫模型可用二维随机过程 $\{(I(t), J(t)) = (i_0, j), t \geq 0\}$ 表示, 为简化符号, 后文将省略 i_0 下标。B-RAN 队列状态 (i, j) 代表有 i 个待上链请求, j 个在服务阶段等待服务的请求。令 $w_{i,j}(t) = \Pr\{(I(t), J(t)) = (i, j)\}$ 表示 t 时刻 B-RAN 队列状态为 (i, j) 的概率, $w_{i,j} = \lim_{t \rightarrow \infty} w_{i,j}(t)$ 表示稳态概率。

B-RAN 队列状态, 即随机过程 $(I(t), J(t))$,

$$w_{i,j}(\lambda^a + \lambda^b + \lambda_j^c) = w_{i-1,j} \lambda^a + w_{i+m_j-m,j} \lambda^b + w_{i,j+1} \lambda_{j+1}^c, i = 1, 2, \dots, j = m, m+1, \dots, \quad (4)$$

其中, $\lambda_j^c = \min(j, s) \cdot \lambda^c$ 表示网络总服务率。

2.1.1 矩阵方程方法

本小节将采用矩阵方程方法求解上述状态转移平衡方程, 进而得到 B-RAN 队列稳态分布。将 B-RAN 队列的二维状态按照图 4(a) 所示的顺序排列为二维向量, 记为:

$$\begin{aligned} \mathbf{w} &= [w_{0,0} \quad w_{1,0} \quad w_{0,1} \quad w_{2,0} \quad w_{1,1} \quad w_{0,2} \quad \dots] \\ &= [\mathbf{w}_0 \quad \mathbf{w}_1 \quad \mathbf{w}_2 \quad \dots], \end{aligned}$$

其中 $w_i = [w_{i,0} \quad w_{i-1,1} \quad \dots \quad w_{0,i}]$, $i = 0, 1, \dots$ 。将状

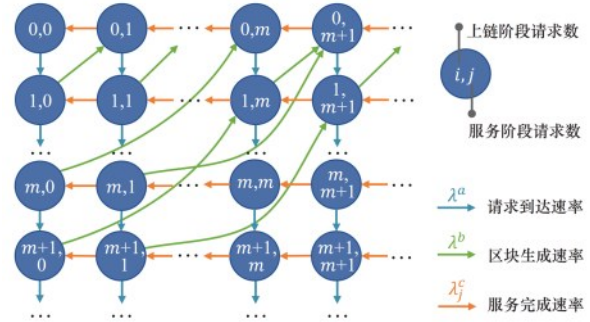


图3 B-RAN 马尔可夫模型的队列状态转移关系

将在请求到达、区块生成和服务完成三种事件发生时变化: 1) 若有新请求到达, B-RAN 队列状态将从 (i, j) 转换到 $(i+1, j)$; 2) 若生成了新的区块, 由于区块大小限制, 最多有 m 个请求可以被打包进入候选区块, 因此队列状态将从 (i, j) 转变为 $(i - \min(i, m), j + \min(i, m))$; 3) 若有服务完成, 队列状态将从 (i, j) 转移为 $(i, j-1)$ 。B-RAN 马尔可夫模型的队列状态转移关系如图 3 所示。

基于 B-RAN 队列状态转移关系, 可推导出状态转移平衡方程:

$$w_{i,j}(\lambda^a + \lambda_j^c) = \sum_{k=1}^m w_{k,j-k} \lambda^b + w_{i,j+1} \lambda_{j+1}^c, \quad (2)$$

$$i = 0, j = 0, 1, \dots,$$

$$w_{i,j}(\lambda^a + \lambda^b + \lambda_j^c) = w_{i-1,j} \lambda^a + w_{i,j+1} \lambda_{j+1}^c, \quad (3)$$

$$i = 1, 2, \dots, j = 0, \dots, m-1,$$

态转移平衡方程式(2) - 式(4)组织为向量形式, 可写出矩阵方程 $\mathbf{w}\mathbf{Q} = \mathbf{0}_{\infty}^T$, 其中状态转移率矩阵 \mathbf{Q} 如式(6)所示。矩阵 \mathbf{Q} 中每个元素值等于其所在位置对应状态的转移率。结合稳态概率和为 1 的条件, 即 $\sum_{i,j} w_{i,j} = 1$, 得到以下方程:

$$\mathbf{w}[\mathbf{Q}, \mathbf{1}_{\infty}] = [\mathbf{0}_{\infty}^T, 1]. \quad (5)$$

通过求解矩阵方程(5), 可得 B-RAN 队列稳态分布 \mathbf{w} 。

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} -\lambda^a & \lambda^a & & & & \cdots \\ & -\lambda^a - \lambda^b & \lambda^b & \lambda^a & & \cdots \\ \lambda_1^c & & -\lambda^a - \lambda_1^c & & \lambda^a & \cdots \\ & & & -\lambda^a - \lambda^b & & \lambda^b \cdots \\ & \lambda_1^c & & & -\lambda^a - \lambda^b - \lambda_1^c & \lambda^b \cdots \\ & & \lambda_2^c & & & -\lambda^a - \lambda_2^c \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \ddots \end{bmatrix}. \quad (6)$$

基于队列稳态分布, 可进一步求得用户从请求服务到开始被服务的等待时延 T , 其中, 平均等待时延是平均系统逗留时间与平均服务时间之差。根据 Little 定理, 在稳态排队系统中, 用户在系统中的平均逗留时间等于系统中的平均请求数除以请求到达速率。而在仅需一次区块安全确认时, B-RAN 系统中平均请求数为 $\sum_{i,j}(i+j)w_{ij}$, 因此, 单次区块确认下用户平均等待时延 $\mathbb{E}[T; 1]$ 为:

$$\mathbb{E}[T; 1] = \frac{\sum_{i,j}(i+j)w_{ij}}{\lambda^a} - \frac{1}{\lambda^c}. \quad (7)$$

对于需要 N 次区块安全确认的情形, 直接分析 B-RAN 队列状态空间极具挑战性, 但以平均等待时延为目标, 从均值的角度可简化分析复杂度。在区块确认数为 N 时, 用户服务请求被装入新区块并被添加至区块链后, 还需再等待 $N-1$ 个区块确认, 相较于单次区块安全确认, 引入了额外等待区块确认时延, 这 $N-1$ 次额外区块确认相当于 $N-1$ 个独立同分布的区块生成时间累加, 服从 $N-1$ 阶参数为 λ^b 的 Erlang 分布, 因此, 在 N 次区块确认下用户平均等待时延 $\mathbb{E}[T; N]$ 为:

$$\mathbb{E}[T; N] = \frac{\sum_{i,j}(i+j)w_{ij}}{\lambda^a} - \frac{1}{\lambda^c} + \frac{(N-1)}{\lambda^b}. \quad (8)$$

尽管式(8)中 w_{ij} 仍为隐式表达, 但可以看出, 用户平均等待时延与区块安全确认次数 N 之间呈现线性正比关系。同时, 安全确认数 N 越大, 接入合约所在区块的深度越大, 回滚该区块的难度越高, B-RAN 安全性更高。因此, 增加区块安全确认数能够提升 B-RAN 安全性, 但也会导致更长平均等待时延。正如文献[17]所探讨的, 需要合理设置 N 以实现 B-RAN 安全性与服务时延之间的权衡。

2.1.2 QBD 方法

矩阵方程方法基于方程(5)计算 B-RAN 队列稳态分布, 其计算复杂度随状态转移率矩阵 \mathbf{Q} 维数的增加而急剧上升。针对这一问题, 将介绍降低稳态计算复杂度的准生灭 (quasi-birth-death, QBD) 方法。假设 B-RAN 系统中最多同时容纳 L 个用户请求, 队列状态数为 $(L+1)(L+2)/2$ 。根据文献 [18], 可将 \mathbf{Q} 表示为具有分块三对角结构形式的矩阵:

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_0 & \mathbf{D}_1 & & & \\ \mathbf{G}_1 & \mathbf{F}_1 & \mathbf{D}_2 & & \\ & \mathbf{G}_2 & \mathbf{F}_2 & \ddots & \\ & & \ddots & \ddots & \mathbf{D}_L \\ & & & \mathbf{G}_L & \mathbf{F}_L \end{bmatrix},$$

其中, $\mathbf{D}_i = [\lambda^a \mathbf{I}_i \quad \mathbf{0}_i] \in \mathbb{R}^{i \times (i+1)}$, $i = 1, \dots, L$,

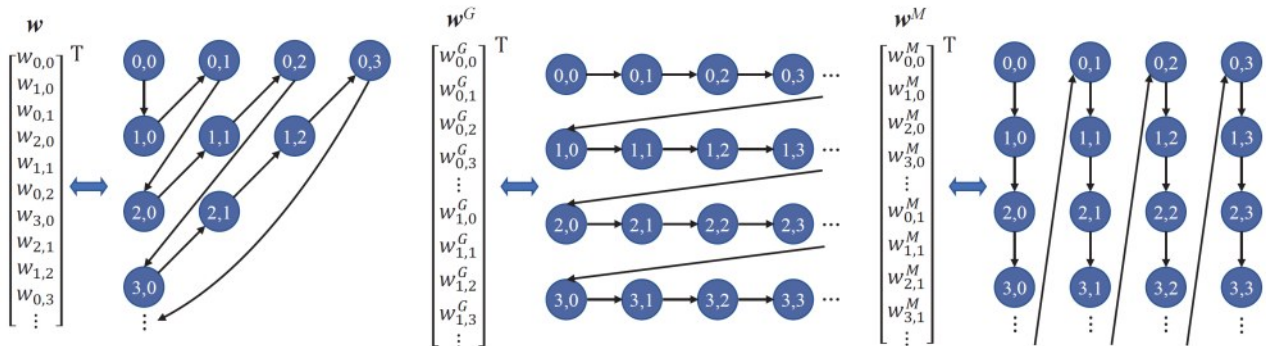


图4 B-RAN 排队模型二维状态 $(I(t), J(t))$ 排列为一维向量

(a) B-RAN 矩阵方程模型二维状态排列为一维向量 \mathbf{w} (b) B-RAN GI/M/1 排队模型二维状态排列为一维向量 \mathbf{w}^G (c) B-RAN M/G/1 排队模型二维状态排列为一维向量 \mathbf{w}^M

$$\mathbf{G}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_i^T \\ \text{diag}(\lambda_1^c, \dots, \lambda_i^c) \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{(i+1) \times i}, i = 1, \dots, L,$$

$$\mathbf{F}_i = \text{diag}(-\lambda^a - \lambda^b - \lambda_0^c, \dots, -\lambda^a - \lambda^b - \lambda_i^c) + \lambda^b \mathbf{P}_i \mathbf{F}_L = \\ \in \mathbb{R}^{(i+1) \times (i+1)}, i = 0, \dots, L-1, \\ \text{diag}(-\lambda^b - \lambda_0^c, \dots, -\lambda^b - \lambda_L^c) + \lambda^b \mathbf{P}_L,$$

$$\mathbf{P}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{(i+1) \times i} & \mathbf{1}_{i+1} \end{bmatrix}, i = 0, \dots, m, \mathbf{P}_i = \\ \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{(i-m) \times m} & \mathbf{I}_{i-m} & \mathbf{0}_{i-m} \\ \mathbf{0}_{(m+1) \times m} & \mathbf{0}_{(m+1) \times (i-m)} & \mathbf{1}_{m+1} \end{bmatrix}, i = m+1, \dots$$

由于矩阵 \mathbf{Q} 为三对角结构, 因此当前状态 \mathbf{w}_i 仅限于转移至最近的相邻状态 \mathbf{w}_{i-1} 和 \mathbf{w}_{i+1} 。矩阵方程(5)可重写为:

$$\mathbf{w}_0 \mathbf{F}_0 + \mathbf{w}_1 \mathbf{G}_1 = \mathbf{0}, \quad (9)$$

$$\mathbf{w}_{i-1} \mathbf{D}_i + \mathbf{w}_i \mathbf{F}_i + \mathbf{w}_{i+1} \mathbf{G}_{i+1} = \mathbf{0}_{i+1}^T, i = 1, \dots, L-1, \quad (10)$$

$$\mathbf{w}_{L-1} \mathbf{D}_L + \mathbf{w}_L \mathbf{F}_L = \mathbf{0}_{L+1}^T. \quad (11)$$

在此基础上, 可利用迭代算法求解系统稳态分布。首先, 根据式(11)求出向量 \mathbf{w}_L , 随后, 通过以下迭代方程依次计算出所有状态向量 \mathbf{w}_i :

$$\mathbf{w}_i = -\mathbf{w}_{i+1} \mathbf{G}_{i+1} \mathbf{C}_i^{-1}, i = 0, \dots, L-1, \quad (12)$$

其中 $\mathbf{C}_0 = \mathbf{F}_0$, $\mathbf{C}_i = -\mathbf{G}_i (\mathbf{C}_{i-1})^{-1} \mathbf{D}_i + \mathbf{F}_i$, $i = 1, \dots, L$ 。最后, 结合概率归一化条件 $\mathbf{w} \mathbf{1}_{(L+1)(L+2)/2} = 1$ 确定状态向量系数, 从而获得 B-RAN 系统稳态分布。QBD 求解方法采用递归方式计算稳态分布, 从而避免直接求解高维矩阵。相比依赖单个状态间转移关系的矩阵方程方法, QBD 求解方法通过对多个低维矩阵的迭代计算显著降低了计算复杂度。

B-RAN 马尔可夫模型基于状态转移平衡方程, 建立了马尔可夫特性与时间齐次性, 提供了求解 B-RAN 队列的稳态分布以及平均等待时延的方法, 是描述 B-RAN 服务过程最为基础的精确模型。

2.2 B-RAN GI/M/1 排队模型

尽管 B-RAN 马尔可夫模型的 QBD 方法通过分块结构降低了稳态求解所需处理的矩阵维度, 但在状态数较多时, 其求解仍依赖高维块矩阵运算, 导致计算开销大。为进一步降低较大状态空间下的计算复杂度, 将深入挖掘 B-RAN 状态转移特性, 建立 B-RAN GI/M/1 排队模型以实现稳态分布的高效计算。(根据 Kendall 标记法, GI/M/1 表示到达时间间隔服从一般独立分布(GI), 服务时间服从指数

分布(M)且仅含单服务台(1)的排队系统。)不同于 B-RAN 马尔可夫模型, GI/M/1 排队模型将 B-RAN 状态空间按图 4(b)所示方式重新排列为:

$$\mathbf{w}^G = [\mathbf{w}_0^G \quad \mathbf{w}_1^G \quad \mathbf{w}_2^G \quad \dots],$$

$$\mathbf{w}_i^G = [w_{i,0}, w_{i,1}, w_{i,2}, \dots], i = 0, 1, \dots$$

由此, 状态转移率矩阵 \mathbf{Q}^G 可写为分块矩阵:

$$\mathbf{Q}^G = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_0 & \mathbf{A}_0 & & & & \\ \mathbf{B}_1 & \mathbf{A}_1 & \mathbf{A}_0 & & & \\ \vdots & & \ddots & \ddots & & \\ \mathbf{B}_m & & & \mathbf{A}_1 & \mathbf{A}_0 & \\ & \mathbf{A}_{m+1} & & & \mathbf{A}_1 & \ddots \\ & & & & \ddots & \ddots \end{bmatrix},$$

其中, $\mathbf{A}_0 = \lambda^a \mathbf{I}_\infty$, $\mathbf{A}_{m+1} = \mathbf{B}_m$,

$$\mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} -\lambda^a - \lambda^b & & & & \\ \lambda_1^c & -\lambda^a - \lambda^b - \lambda_1^c & & & \\ & \ddots & \ddots & & \\ & & & \ddots & \ddots \end{bmatrix}, \mathbf{B}_0 = \mathbf{A}_1 +$$

$$\lambda^b \mathbf{I}_\infty, \quad \mathbf{B}_i = \lambda^b [\mathbf{0}_{\infty \times i} \quad \mathbf{I}_\infty], i = 1, \dots, m.$$

根据文献[30]中的矩阵解析方法, 稳态分布呈现出矩阵几何特性, 即状态空间中任意相邻两项之间存在比例关系:

$$\mathbf{w}_i^G = \mathbf{w}_{i-1}^G \mathbf{R}, i = 1, 2, \dots \quad (13)$$

矩阵 \mathbf{Q}^G 从第二列之后的每一列都呈现出重复的块结构, 用 $\mathbf{Q}^G[:, y]$ 表示矩阵 \mathbf{Q}^G 的第 y 列, 根据 \mathbf{Q}^G 第二列对应的平衡方程 $\mathbf{w}^G \mathbf{Q}^G[:, 2] = \mathbf{0}_\infty^T$, 可得:

$$\mathbf{R}^{m+1} \mathbf{A}_{m+1} + \mathbf{R} \mathbf{A}_1 + \mathbf{A}_0 = \mathbf{0}_{\infty \times \infty}. \quad (14)$$

根据上式, 进一步采用迭代法求解 \mathbf{R} :

$$\mathbf{R}_n = (\mathbf{R}_{n-1}^{m+1} \mathbf{A}_{m+1} + \mathbf{A}_0) (-\mathbf{A}_1)^{-1}. \quad (15)$$

迭代循环直至 $\|\mathbf{R}_n - \mathbf{R}_{n-1}\|$ 收敛。接着, 结合平衡方程 $\mathbf{w}^G \mathbf{Q}^G[:, 1] = \mathbf{0}_\infty^T$ 与概率和条件 $\mathbf{w}_0^G \sum_{k=0}^{\infty} \mathbf{R}^k \mathbf{1}_\infty = 1$ 解得 \mathbf{w}_0^G , 根据式(13)递归计算余下状态向量 \mathbf{w}_i^G 。

B-RAN GI/M/1 排队模型将状态转移率矩阵组织成更紧凑及高效的分块结构, 受益于此矩阵几何特性, 可以通过递归方式高效计算系统稳态 \mathbf{w}_i^G 。

2.3 B-RAN M/G/1 排队模型

上述两类稳态求解模型提供了 B-RAN 队列稳态分布的求解方法, 其中, B-RAN 马尔可夫模型的 QBD 方法和 GI/M/1 排队模型构建了更紧凑的状态转移率矩阵, 采用迭代求解方法有效降低了稳态计算的复杂度。本小节将通过 B-RAN M/G/1 排队

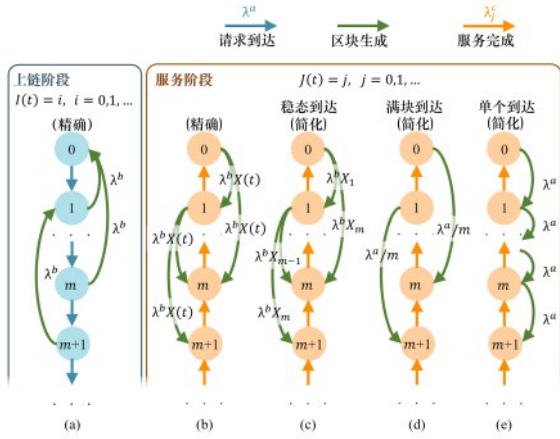


图5 串联排队模型的队列状态转移关系

上式表明, 当用户接入请求到达率 λ^a 一定时, 出块速率 λ^b 或区块大小上限 m 的增长都会使得上链阶段时延减小。

2.4.2 服务阶段

将已确认请求数 $\{J(t) = j, j = 0, 1, \dots\}$ 作为服务阶段的状态空间, 定义 $v_j = \lim_{t \rightarrow \infty} \Pr\{J(t) = j\}$ 为 $J(t) = j$ 的稳态概率, 队列状态转移关系如图5(b)所示。服务阶段的请求是批量到达的, 批次大小由上链阶段的队列状态 $I(t)$ 决定, 且小于区块大小上限 m , 即 $X(t) = \min(I(t), m)$ 。服务阶段可建模为批到达队列, 记为 $M^{X(t)}(\lambda^b)/M(\lambda^c)/s$ 。然而, 由于区块大小 $X(t)$ 是时间依赖的, 故服务阶段模型具有非马尔可夫性, 需引入适当近似来建立简化模型以分析服务阶段的队列特性。

用上链阶段的队列稳态分布近似 $I(t)$, 此时区块大小是与时间独立的随机变量 X^S , 其概率分布为:

$$\Pr\{X^S = j\} = \begin{cases} (1-r)r^j, & j = 0, \dots, m-1, \\ r^m, & j = m. \end{cases} \quad (20)$$

因此, 服务过程可以建模为一个批到达大小时间独立的队列, 记为 $M^{X^S}(\lambda^b)/M(\lambda^c)/s$, 服务队列的状态转移关系如图5(c)所示。该模型存在闭式的平均时延:

$$\mathbb{E}[T_Q^S] = \frac{\sum_{j=1}^{s-1} j(s-j)v_j^S}{s\lambda^a(1-\rho)} + \frac{\rho(-m(\lambda^a + \lambda^b)r + (m+1)\lambda^a)}{(1-\rho)(\lambda^a)^2(1-r)} - \frac{1}{\lambda^c}, \quad (21)$$

其中, $\rho = \lambda^a/(s\lambda^c)$ 表示服务阶段负载强度, 且当 $s = 1$ 时, 式(21)为闭式表达式。稳态到达模型中假设区块大小与区块生成时间无关, 因此即使在较短的区块生成时间内, 一个区块可能包含许多请求, 然而实际上, 区块大小依赖于区块生成时间间隔, 快速生成的区块通常包含较少的请求。由此, 该近似在忽略批量与出块间相关性时给出服务阶段时延的上界。

区块链维护者可能会将尽可能多的请求聚合到一个区块中以增加区块奖励。假设区块总是满的, 即 $X = m$ 。这被称为满块到达模型。在该模型下, 区块生成率调整为 $\lambda^b = \lambda^a/m$, 其服务阶段可建模为 $M(\lambda^a/m)/M(\lambda^c)/s$ 队列, 队列状态转移关系如图5(d)所示, 服务阶段的平均时延为:

$$\mathbb{E}[T_Q^F] = \frac{\sum_{j=1}^{s-1} j(s-j)v_j^F}{s\lambda^a(1-\rho)} + \frac{\rho(m+1)}{2(1-\rho)\lambda^a} - \frac{1}{\lambda^c}. \quad (22)$$

在满块到达模型中, 区块链维护者需积累足够多的待上链请求, 才能生成新区块, 因此对于较小的 m , 满块到达模型具有较高的精确性。此外, 在高负载下, 由于区块更可能被装满, 满块到达模型会更精确。然而, 实际场景中区块并非总是满的, 区块生成率被低估了, 因此该模型是平均时延的上界。

相反地, 假设区块生成速度极快, 即请求到达后立即被装入区块并上链, 因此每次出块仅有一个请求进入服务队列, 这被称为单个到达模型。该模型下区块生成率与请求到达率相等, 即 $\lambda^b = \lambda^a$ 。对应的服务阶段可建模为 $M(\lambda^a)/M(\lambda^c)/s$ 队列, 状态转移关系如图5(e)所示, 其平均时延为:

$$\mathbb{E}[T_Q^I] = \frac{\rho(s\rho)^s}{\lambda^a(1-\rho)^2 s!} \left[\sum_{i=0}^{s-1} \frac{(s\rho)^i}{i!} + \frac{(s\rho)^s}{s!(1-\rho)} \right]^{-1} - \frac{1}{\lambda^c}. \quad (23)$$

单个到达模型假设区块生成速度极快, 请求一旦到达便完成上链即刻进入服务阶段, 因此该模型高估了出块速度, 可作为时延下界模型。

在区块大小与出块时间间隔的相关性更弱时, 稳态到达模型作为上界会更紧。在区块大小上限较小或负载较大时, 区块更容易被装满, 因此满块到达模型作为上界将更紧。在出块速率很快或负载较低时, 单个到达模型作为下界更紧。

在多数实际配置下，单个到达模型相对准确。该模型可用于进一步量化评估 B-RAN 池化所带来的流量卸载增益和网络共享增益。B-RAN 利用基于智能合约的跨域卸载机制，将资源按需灵活分配，从而保障网络负载均衡并提升用户 QoS。通过单个到达模型，文献[22]证明了服务阶段平均时延 $\mathbb{E}[T'_Q]$ 是关于负载强度 ρ 的凸函数，即负载均衡后的系统时延小于等于不均衡状态下的加权平均时延。在 B-RAN 中，当多个 SP 之间负载不均衡时，

高负载 SP 可以将部分服务流量卸载到低负载 SP，从而有效降低网络服务阶段整体平均时延。

B-RAN 通过整合与共享多个 SP 资源，形成具有更强服务能力的融合网络，从而获得网络共享增益。文献[22]证明了当 ρ 一定时，服务阶段平均时延 $\mathbb{E}[T'_Q]$ 随着服务链路数 s 的增加而减少，即多个 SP 资源整合所形成的协作 B-RAN 性能优于各子网独立工作的性能叠加。该性质表明 B-RAN 能够降低服务阶段的平均时延，B-RAN 的整体网络效率会随着更多 SP 的加入协作而提升。此外，池化效应带来的 QoS 提升将吸引更多用户，进而激励更多 SP 参与 B-RAN。用户和 SP 之间的正反馈将促进 B-RAN 规模扩展并提升整体网络性能。

本节对 B-RAN 服务过程的四种典型排队模型进行了系统性梳理与分析。表 1 简要归纳了基于区块链的无线接入排队模型的特点。其中，B-RAN 马尔可夫模型是刻画 B-RAN 服务过程的基础数学模型，联合刻画了上链和服务两个阶段，建立了状态转移平衡方程，并分析得到了队列稳态分布和等待时延。针对 B-RAN 马尔可夫模型涉及高维复杂

矩阵方程，采用矩阵方程方法求解较为复杂的问题，通过 QBD 方法迭代求解有效降低了稳态计算的复杂度。而在状态数较多时，GI/M/1 排队模型利用稳态分布的矩阵几何特性，实现了更优的计算效率。为刻画 B-RAN 排队系统的稳定性条件，本节还建立了 B-RAN M/G/1 排队模型，对二维状态空间重新排列，得到具有分层块结构的状态转移率矩阵，利用该矩阵结构特性推导出 B-RAN 系统的稳定性条件。上述三种模型都是 B-RAN 的精确排队模型，但无法显式刻画出系统参数对性能的影响，因此构建串联排队模型，对服务和上链两个阶段分别建模，并为服务阶段引入适当近似，提供易于分析的闭式表达式，作为服务时延上下界模型。

此外，本文从稳态计算的时间复杂度和空间复杂度两个角度定量评估对比不同排队模型的计算开销，其中时间复杂度表示完成稳态求解的总计算时间，空间复杂度表示求解过程中所需的存储空间。设 L 为系统可容纳的请求数上限，复杂度可用 $O(\cdot)$ 表示。根据文献[33]，求解规模为 $n \times n$ 的矩阵方程通常具有 $O(n^3)$ 的时间复杂度。由于 B-RAN 马尔可夫模型中矩阵 Q 是维数为 $(L+1)(L+2)/2$ 的方阵，因此使用矩阵方程方法求解的时间复杂度是 $O\left(\frac{1}{8}L^6\right)$ ，采用稀疏矩阵形式存储矩阵 Q 的空间复杂度为 $O(2L^2)$ 。QBD 方法求解的关键在于迭代计算矩阵序列。在第 i 次迭代中，需要一次矩阵求逆与两次矩阵乘法，时间复杂度为 $O(3i^3)$ ，因此，计算整个矩阵序列的时间复杂度为 $O\left(\frac{3}{4}L^4\right)$ ，随后反

表 1 基于区块链的无线接入排队模型

排队模型	服务过程	精确性	时间复杂度	空间复杂度	特征	
B-RAN 马尔可夫模型	矩阵方程方法	$M^{X(t)}/M/s$	精确	$O\left(\frac{1}{8}L^6\right)$	$O(2L^2)$	联合刻画上链和服务两阶段
	QBD 方法	$M^{X(t)}/M/s$	精确	$O(L^4)$	$O\left(\frac{1}{3}L^3\right)$	
B-RAN GI/M/1 排队模型	$M^{X(t)}/M/s$	精确	$O(cmL^3)$	$O(mL)$	迭代求解降低计算复杂度	
B-RAN M/G/1 排队模型	$M^{X(t)}/M/s$	精确	/	/	推导稳定性条件	
串联排队模型	$M^{X^S}/M/s$	近似	$O(1)$	$O(1)$	闭式表达便于分析	
	$M^m/M/s$					
	$M/M/s$					

*上链过程均建模为 $M/M^{X(t)}/1$ 队列

向迭代计算 w_i 的时间复杂度为 $O\left(\frac{1}{4}L^4\right)$, 故总时间复杂度为 $O(L^4)$ 。存储整个矩阵序列的空间复杂度为 $O\left(\frac{1}{3}L^3\right)$ 。B-RAN $GI/M/1$ 排队模型的求解关键在于迭代计算比例矩阵 R , 单次迭代时间复杂度为 $O((m+3)L^3)$ 。若在 c 次迭代后收敛, 则总时间复杂度为 $O(cmL^3)$ 。在空间开销方面, 若采用稀疏存储, 空间复杂度为 $O(mL)$ 。串联排队模型给出了闭式表达, 因此时间复杂度与空间复杂度均为 $O(1)$ 。

3 面向快速可信接入的博弈模型

B-RAN 的上述接入机制需要经过区块链共识过程与区块确认。这一过程中, 区块链共识过程可能导致接入时延较大。同时, 上述过程也不能完全保证链下 QoS。为解决上述接入时延高、链下 QoS 难以保障的问题, 本节介绍基于区块链的快速可信接入方法, 通过多轮博弈过程构建用户与 SP 之间的信任关系, 实现高效可信接入, 并利用重复博弈模型分析 SP 和用户在不同策略下的收益, 探讨信道不确定性对博弈合作条件的影响。

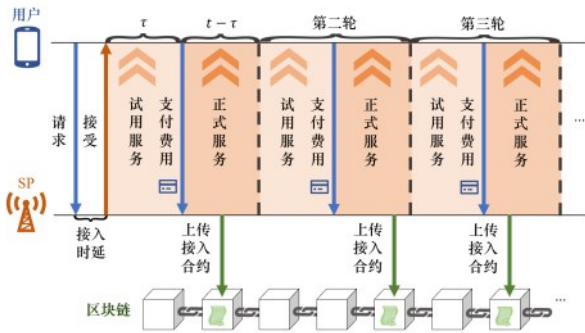


图6 基于重复博弈的快速可信接入流程

图6展示了基于重复博弈的快速可信接入流程, 将接入过程划分为若干等长时隙轮次, 每轮包括试用服务和正式服务两个阶段。在每一轮开始时, SP先向用户提供持续时间为 τ 的试用服务。试用阶段结束前, 用户需通过智能合约等方式向SP支付本轮服务费用^[25], 该费用包含已产生的试用服务费, 以及本轮正式服务所需的费用。若用户按约支付, SP会完成后续服务。若用户未按约定支付, 则SP立即终止提供服务。若双方均履约, 一轮结束后, 用户已支付足额费用, SP也完整交付

对应服务, 该轮合作履约完成。此后, 双方可以继续开启新的服务轮次, 直至完成该接入请求的全部服务。在上述机制下, 用户能够通过某一轮次停止支付的方式来终止合作, SP可通过停止服务终止合作。

在上述方案中, SP能够在合约完成链上共识确认前为用户提供服务, 可显著降低接入时延。在双方多轮交互过程中, 任何违约行为都将导致合作终止, 使得违约方无法从后续轮次中获益, 从长期收益角度来看, 用户和SP保持合作将成为最大化自身收益的最优策略。下文基于博弈模型推导该快速接入方法保障用户接入QoS的条件。

3.1 重复博弈模型

使用博弈模型刻画上述快速可信接入。考虑单轮服务时长为 t , 其中试用服务时间为 τ ($\tau < t$), 单位时间服务价格为 p , 单位时间服务成本是 c , 用户收到服务的效益是 g 。显然 $g > p > c$ 。

在试用服务阶段, SP先提供服务后收费, 而在正式服务阶段, 用户先付费再享受服务, 因此这一过程可被刻画为顺序博弈, 即SP和用户已知对方所作选择的情况下依次行动。首先SP选择是否提供服务, 如果不服务则SP和用户均无收益, 即SP和用户收益对为 $(0,0)$ (收益对中前者为SP的收益, 后者为用户的收益); 如果SP按要求提供试用服务, 则由用户决定是否支付费用, 若用户拒绝付款则免费获得试用服务并导致SP立即终止后续服务, 收益对为 $(-c\tau, g\tau)$; 如果用户按要求付费则再需由SP决定是否履约, 若SP履约并继续提供服务则SP和用户的收益对为 $(pt - ct, gt - pt)$; 否则收益对为 $(pt - ct, g\tau - pt)$ 。

在每一轮博弈中, SP有三种策略: 从一开始就不提供任何服务 (不服务); 一旦用户完成付费就停止服务 (违约); 只要用户按照要求付费就持续服务 (履约)。而用户有两种策略, 选择不付费 (拒付), 或是在试用结束前付费 (支付)。双方不同策略下各自收益如表2所示。

在多轮重复博弈过程中, 单轮违约可能是有利的, 但会破坏彼此间的信任, 使博弈双方无法在接下来的潜在轮次中获益。假设博弈者双方继续博弈的意愿为 ω , 第 i 轮的收益应乘以系数 ω^i 。假设在某一轮中因有一方违约而打破合作状态, 需要 j 轮来修复合作关系。

表2 收益矩阵

SP	支付	拒付
履约	$pt - ct, gt - pt$	$-ct, gt$
违约	$pt - ct, gt - pt$	$-ct, gt$
不服务	0,0	0,0

从用户的角度来看,如果在某一轮中,用户选择不付费,那么SP将不会提供服务,随后用户可以选择补偿其拒付行为从而恢复合作关系,或不补偿停止合作。设用户在 j 轮后恢复合作,则中间 $j-1$ 轮中用户收益为0,因此这 $j+1$ 轮总收益为:

$$\varphi_D = g\tau + (g(t - \tau) - pt)\omega^j. \quad (24)$$

但如果用户一直履约, $j+1$ 轮的总收益为:

$$\varphi_H = (gt - pt) \sum_{i=0}^j \omega^i = \begin{cases} \frac{gt - pt}{1 - \omega} (1 - \omega^{j+1}), & 0 \leq \omega < 1, \\ (gt - pt)(j + 1), & \omega = 1. \end{cases} \quad (25)$$

当 $\omega = 1$ 时, $\varphi_H > \varphi_D$ 。当 $0 \leq \omega < 1$ 时,为了使得用户保持履约,必须保证其履约收益大于违约收益,即满足:

$$\frac{gt - pt}{1 - \omega} > g\tau. \quad (26)$$

在此条件下,试图违约并在一定轮次后恢复信任的行为都会导致用户的收益降低。

对SP而言,如果SP在某一轮中选择违约,用户将暂停付款,直至SP补偿用户应得的服务,即在后续轮次提供与未交付部分等时长的服务,随后SP可以选择补偿用户,以恢复信任或不提供服务并停止合作。设SP在 j 轮后恢复合作关系,则在满足以下条件时,SP将持续履约以获取更高收益:

$$\frac{pt - ct}{1 - \omega} > pt - ct. \quad (27)$$

综上所述,当同时满足式(26)和式(27)时,用户和SP合作策略构成纳什均衡。本小节构建的重复博弈模型刻画了快速可信接入过程的基本交互过程与不同策略下的收益。

3.2 考虑信道不确定性的博弈模型

前述模型假设用户与SP之间的交互是基于无衰落理想信道,然而无线信道通常会发生衰落,进而造成交互分组丢失(信道中断)。信道不确定性将影响用户与SP的收益。本小节在重复博弈模型

的基础上,建立不确定信道下的博弈模型。设信道中断概率为 ϵ ,对用户而言,信道中断会影响用户的QoS,用户单位时间内获得服务的收益 $\Gamma(\epsilon)$ 将随 ϵ 单调递减^[26]。另外,SP可能会因为信道中断无法收到用户支付的服务费用。由此,不确定信道下的博弈树如图7所示。

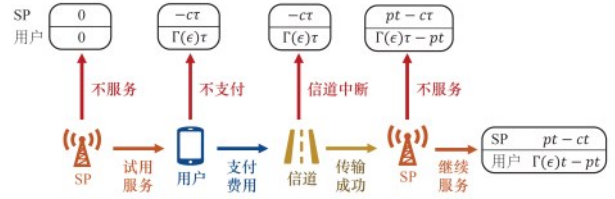


图7 不确定信道下的博弈树

定义 φ_s 和 φ_c 分别为不确定信道环境下SP和用户的长期收益,当一方采用不先背离合作的策略,即始终合作 S_C ,另一方采用备选策略(S_C :始终合作, S_A :始终违约, S_J :切换策略)时双方的收益:

1) 选择始终合作策略,SP和用户的长期收益为:

$$\varphi_s(S_C, S_C) = \frac{(1 - \epsilon)(pt - ct) - \epsilon c\tau}{1 - (1 - \epsilon)\omega},$$

$$\varphi_c(S_C, S_C) = \frac{(1 - \epsilon)(\Gamma(\epsilon)t - pt) + \epsilon\Gamma(\epsilon)\tau}{1 - (1 - \epsilon)\omega}.$$

2) 始终违约策略下,违约方只在第一轮中获益,

$$\varphi_s(S_A, S_C) = (1 - \epsilon)pt - ct, \quad \varphi_c(S_C, S_A) = \Gamma(\epsilon)\tau.$$

3) 在某一轮次违约后,经过 j 轮恢复合作,并反复在违约与合作间切换,此时期长期收益为:

$$\varphi_s(S_J, S_C) = \frac{(1 - \epsilon)(pt - \omega^{j-1}c(t - \tau)) - c\tau}{1 - (1 - \epsilon)\omega^j},$$

$$\varphi_c(S_C, S_J) = \frac{\Gamma(\epsilon)\tau + \omega^{j-1}(1 - \epsilon)(\Gamma(\epsilon)(t - \tau) - pt)}{1 - (1 - \epsilon)\omega^j}.$$

当 $j = 1$ 时, S_J 收益等同于 S_C ,而当 $j \rightarrow \infty$ 时 S_J 收益与 S_A 相同。因此,只要始终合作策略的收益对于任意 $j > 1$ 都大于切换策略的收益,任何包含违约的策略都无法获得比始终合作 S_C 更高的收益。由此,保证双方合作需满足以下条件:

$$\omega \geq \frac{1 - \tau/t}{(1 - \epsilon)p/c - \tau/t}, \quad (28)$$

$$\omega \geq 1 - \frac{1 - p/\Gamma(\epsilon)}{\tau/t}. \quad (29)$$

式(28)和式(29)分别给出了 SP 和用户双方达成合作的意愿下界。随着信道中断概率 ϵ 的增加, 该下界也随之变大, 这表明更高的中断概率, 即更差的信道质量, 需要用户和 SP 有更强的主观合作意愿才能达成合作。此外, 信道中断概率 ϵ 增加将导致用户的收益减少, 当 ω 一定时, SP 需要更高的服务价格 p 以维持合作。

快速可信接入方法将一次接入服务过程拆分为多轮交互, 并将其建模为用户与 SP 之间的重复博弈。该方法中, 用户可在合约完成链上确认前接受服务, 降低了用户接入时延。同时, 本节还给出了用户与 SP 双方在快速接入方法下选择按约服务和付费的条件, 实现了低时延可信接入。在此基础上, 本节进一步考虑无线信道衰落特性, 量化了信道不确定性对双方收益的影响, 分析了用户和 SP 采用不同策略时的长期收益, 准确得到了双方进行可信安全接入服务的前提条件。

4 面向免授权接入的马尔可夫模型

上述接入方法在海量设备接入的场景下可能会出现来自多方的设备竞争接入, 互相干扰的情况, 导致公共频段的开放接入难题^[27]。自私节点会无视免授权随机接入 (grant-free random access, GFRA) 协议, 随意调整等待时延, 提高个体收益。但是当更多节点采用这种利己行为, 整个网络的碰撞概率会显著提高, 反而降低了每个人的收益。上述现象被总结为公共频段的公地悲剧^[34]。为了解决上述问题, B-RAN 采用免授权的哈希接入机制, 用于规范并强制设备遵守接入协议。具体将利用马尔可夫模型分析哈希接入协议下的设备可信接入成功率及吞吐量, 并探讨跨网络负载均衡策略。

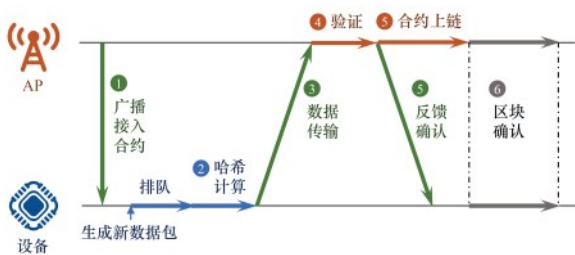


图8 哈希接入工作流程

图8展示了哈希接入的工作流程。在采用哈希接入协议的B-RAN网络中, 设备在接入前需进行哈希计算, 仅当计算出的哈希值低于接入点 (access point, AP) 广播的目标哈希值时, 才能尝试接入并传输数据。由于哈希计算具有随机性和单向性^[35], 因此, AP 可快速验证哈希值的合规性, 并且设备难以伪造合规的哈希值。在接入过程中, AP 需选择合适的目标哈希值 h_c , 用于动态控制网络中接入流量, 以权衡接入时延与数据碰撞概率。使用接入难度 d 衡量找到低于 h_c 的合规哈希值的复杂度, 并将其定义为哈希算法输出最大值 h_m 与 h_c 的比值, 即 $d = h_m/h_c$ 。接入难度限制了单个时隙内能接入的设备数量, 当接入流量较大时, 可以通过合理调节接入难度 d , 降低数据传输冲突概率。

4.1 哈希接入的马尔可夫模型

本小节将根据上述哈希接入工作流程, 构建基于马尔可夫模型的待发数据包队列模型, 分析哈希接入的性能。

假设 B-RAN 某一子网络内有 n 台互不信任的异构设备, 以及 s 条接入链路, 设备生成新数据包的过程可被建模为参数为 ζ 的伯努利过程, 即设备在单个时隙内有一个数据包生成的概率为 ζ 。当设备中存在待发数据包时, 数据包所处状态有两种, 定义 S_0 为待传输状态, S_1 为重传状态, 即数据包曾尝试传输但因冲突需重传。如图9所示, 两种状态的转化关系可以用两步马尔可夫状态转移过程表示, 其中, P_s 是数据包传输成功概率。定义 $\mu = P_s/d$ 为待传输或需重传的数据包的成功接入概率, 因此, 网络负载强度为 $\gamma = \zeta/\mu = \zeta d/P_s$ 。

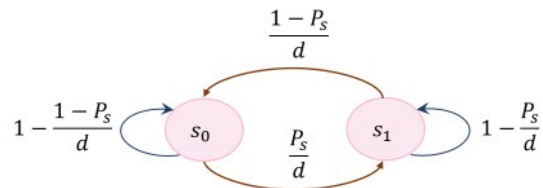


图9 哈希接入数据包状态转移关系图

采用哈希接入协议的设备存在忙碌和空闲两种状态。在忙碌状态下, 设备有待发数据包并尝试进行接入, 在空闲状态下, 设备待发数据包队列为空。将设备处于忙碌状态的概率记为 α , 当网络负载强度较低时, $\alpha = \gamma$; 当网络达到饱和时, $\alpha = 1$ 。

当同一时隙内至少两台设备选择同一信道传输时，将发生碰撞，设备传输数据包时发生碰撞的概率为 $\alpha/(sd)$ 。因此，数据包成功传输概率可表示为：

$$P_s = (1 - \alpha/(sd))^{n-1} = \begin{cases} \left(1 - \frac{\zeta}{sP_s}\right)^{n-1}, & \gamma < 1, \\ \left(1 - \frac{1}{sd}\right)^{n-1}, & \gamma \geq 1. \end{cases} \quad (30)$$

低负载条件下 P_s 是一个隐式表达式；而在高负载条件下，网络已达到饱和， P_s 的值与 γ 无关，仅与设备数和接入链路数相关。进一步可求得网络吞吐量 T 为：

$$T = \frac{n\alpha P_s}{d} = \begin{cases} n\zeta, & \gamma < 1, \\ \frac{n}{d} \left(1 - \frac{1}{sd}\right)^{n-1}, & \gamma \geq 1. \end{cases} \quad (31)$$

从式(31)可知，在设备数 n 和链路数 s 不变的情形下，当网络中的负载强度较小时，吞吐量与设备数和数据包生成率 ζ 成正比。当网络饱和 ($\gamma \geq 1$) 时，网络吞吐量不再受流量负载影响，而是取决于接入难度，当接入难度值为 $d^* = n/s$ 时，吞吐量达到最大 $T^{\max} = s(1 - 1/n)^{n-1}$ 。

进一步考虑物理层丢包对哈希接入的影响。数据包在传输过程可能会受到信道衰落、干扰等因素影响导致丢包，因此设备数据包的成功传输不仅取决于接入过程中是否发生竞争碰撞，还依赖信道的物理层传输状态。设在第 i 条信道上丢包率为 q_i 。由此，当信道存在丢包时，数据包在第 i 条信道上成功传输概率可表示为：

$$P_{s,i} = (1 - q_i) \left(1 - \frac{\alpha}{sd_i}\right)^{n-1}, \quad (32)$$

其中， d_i 表示第 i 条信道的接入难度。此时，网络吞吐量 T_q 为：

$$T_q = \sum_{i=1}^s \frac{n\alpha P_{s,i}}{sd_i} = \begin{cases} \sum_{i=1}^s (1 - q_i) \frac{n}{s} \zeta, & \gamma < 1, \\ \sum_{i=1}^s (1 - q_i) \frac{n}{sd_i} \left(1 - \frac{1}{sd_i}\right)^{n-1}, & \gamma \geq 1. \end{cases} \quad (33)$$

当网络处于饱和状态时，网络吞吐量主要受接入难度影响，当接入难度值为 $d_i^* = n/s$ 时，网络吞

吐量达到最大，即 $T_q^{\max} = \sum_{i=1}^s (1 - q_i) (1 - 1/n)^{n-1}$ 。

4.2 跨网络负载均衡

上文基于马尔可夫模型分析了单个子网络内异构设备哈希接入性能，提供了实现最大吞吐量的接入难度设置方案。然而，B-RAN 包含众多子网络，各子网络流量可能分布不均，因此本小节将探讨哈希接入在跨网络场景下的负载均衡策略，促进无线网络资源高效协同，提升无线网络接入能力。

假设 B-RAN 网络中有 K 个由不同 SP 管辖的子网络，第 k 个子网络拥有 s_k 条接入链路和 n_k 台设备，则聚合网络中共有 $s = \sum_{k=1}^K s_k$ 条链路和 $n = \sum_{k=1}^K n_k$ 台设备。在跨网络负载均衡场景下，暂不考虑信道丢包影响，并设单个子网内部采用统一接入难度。假定信道数多的子网络处理接入请求的能力较强，因此可以设置较低的接入难度。设第 k 个子网哈希接入难度为 d_k ，并将各子网按照接入难度值进行排序，即 $d_1 \geq d_2 \geq \dots \geq d_K$ 。定义子网 k 哈希计算通过的概率为 $\eta_k = 1/d_k$ ，将 $\Delta\eta_k = \eta_k - \eta_{k-1}$ 视作一个哈希区间，表示计算哈希值满足子网 k 的要求但不满足子网 $k+1$ 要求的概率。当设备计算得到的哈希值最多只能满足子网 k 时，它可以在第 $k \sim K$ 个子网络的链路集中选择一条进行接入，此时可用链路总数为 $s_k^{\text{sum}} = \sum_{i=k}^K s_i$ 。因此，当设备在第 k 个子网传输数据时，与另一台设备发生碰撞的概率为：

$$x_k = \gamma \sum_{j=1}^k \frac{\Delta\eta_j}{s_j^{\text{sum}}}. \quad (34)$$

设备在子网 k 数据成功传输的概率为 $(1 - x_k)^{n-1}$ 。最终得到网络整体吞吐量为：

$$T = \begin{cases} n\zeta, & \gamma < 1, \\ n \sum_{k=1}^K \Delta\eta_k \left(\sum_{i=k}^K \frac{s_i}{s_k^{\text{sum}}} \left(1 - \gamma \sum_{j=1}^i \frac{\Delta\eta_j}{s_j^{\text{sum}}}\right)^{n-1} \right), & \gamma \geq 1. \end{cases} \quad (35)$$

文献[29]证明了，在高网络负载下，当且仅当所有子网络采用统一接入难度 $d_1 = d_2 = \dots = d_K = n/s$ 时，系统吞吐量达到上界 $s(1 - 1/n)^{n-1}$ 。

上述结果表明，在跨网络场景下，最优的负载均衡策略是将各子网信道资源视作统一资源池，并采用统一接入难度，即在各子网设置相同的通过概

率, 共同处理聚合网络内所有设备的免授权接入流量。资源池化实现了服务能力的整合与共享, 而统一难度使接入流量在各子网间分摊, 从而实现跨子网的负载均衡并提升总体吞吐量。此时网络整体吞吐量与 4.1 节中单网络哈希接入数学模型中给出的吞吐量上限值一致。

在负载流量均衡的基础上, 还可考虑对设备和信道进行分组的策略, 当允许流量被分组至不同子网络时, 哈希接入协议能够在资源整合的基础上调配网络中的设备和信道资源, 进一步提升网络吞吐量。将整合后的网络划分为 Q ($Q \leq s$) 个规模相同的小组, 各小组平均分配到的链路数和设备数分别是 s/Q 和 n/Q , 并采用相同的接入难度, 文献[29]证明了各小组在负载均衡且网络饱和条件下的最优吞吐量相同, 网络总吞吐量 $s(1 - Q/n)^{n/Q - 1}$, 并且随分组数量 Q 越大, 总体吞吐量也将提升。

免授权哈希接入机制通过在接入前引入哈希计算, 强制设备遵循退避规则, 保障网络设备公平有序接入。利用马尔可夫模型刻画了哈希接入过程, 将接入难度这一关键参数, 与数据包发送成功概率和网络吞吐量耦合关联, 给出了使单个网络吞吐量最大化的最优接入难度。而在跨网络场景下, 将所有子网络视作一个资源池, 设置相同接入难度, 提供统一的接入服务, 从而实现网络负载均衡。进一步地, 在负载完全平衡的基础上, 对资源整合后的融合网络进行设备和信道分组, 提升网络总吞吐量。

5 重要结果与分析

本节通过多项仿真结果来验证上述数学模型与分析结果。图 10 展示了第 2 节中 B-RAN 排队模型

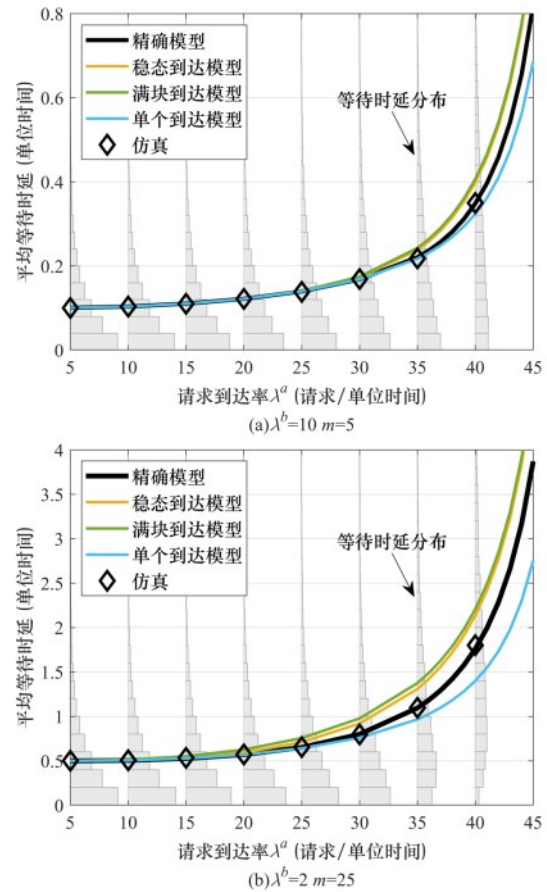


图 10 基于区块链的无线接入: 不同排队模型下的平均等待时延

的理论结果与仿真结果的对比, 评估了请求到达率对平均等待时延的影响, 并设置不同的出块速率 λ^b 和区块大小上限 m , 假定上链阶段和服务阶段的处理请求能力相等, 即 $m\lambda^b = s\lambda^c = 50$ 。图 10(a)和图 10(b)展现出相似结果, 其仿真结果都很好地契合了精确模型 (B-RAN 马尔可夫模型、GI/M/1 排队模型、M/G/1 排队模型) 的理论结果, 验证了 B-RAN 精确排队模型的准确性。此外, 当 λ^a 较小时,

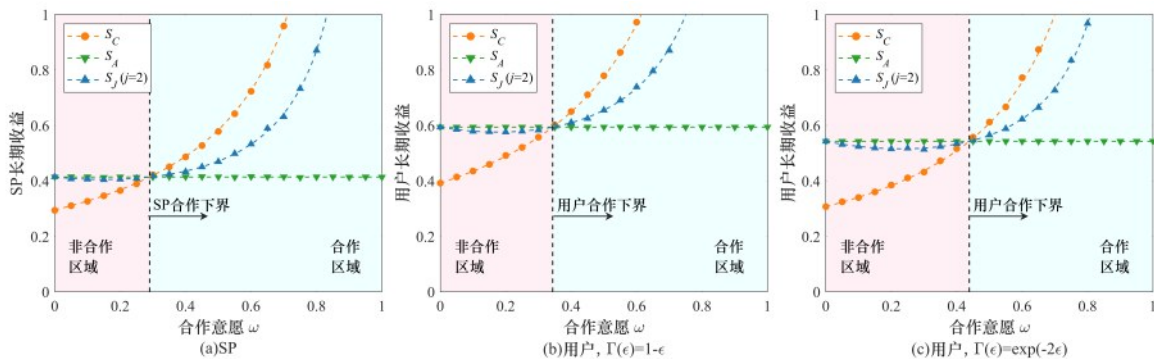


图 12 B-RAN 快速可信接入: 不确定信道下 SP 和用户采用不同策略的长期收益

服务资源充足,大多数已上链请求在进入服务阶段后无需排队而直接被服务,因此服务阶段的等待服务时延可以忽略不计,上链阶段的时延成为影响整体服务时延的主导因素。由于串联排队模型准确刻画了上链阶段,因此在低流量情况下串联排队模型与精确模型贴合得非常紧密。然而,随着 λ^a 增加,网络发生拥塞,串联排队模型的近似能力有所下降,但稳态到达和满块到达模型作为上界模型,单个到达模型作为下界模型,依旧能够较好逼近精确模型。对比图10(a)和图10(b)可知,B-RAN在更快的区块生成速率和更小的区块大小限制下平均等待时延具有更优表现,且与模型分析结果一致。

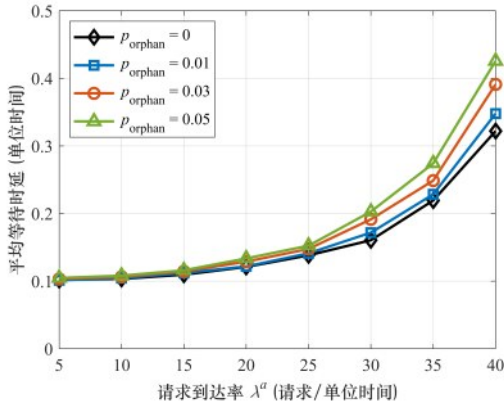


图11 基于区块链的无线接入:不同孤块率下的平均等待时延

在实际区块链场景中,新生成的区块被成功纳入主链需要该区块能被其他区块链节点及时接收并通过验证。若在区块传播期间,网络中已经出现并传播了竞争区块,则会引发区块链分叉,导致该区块成为孤块而不被主链接收[36-37]。基于此,本文进一步考虑孤块率对基于区块链的无线接入过程的影响,孤块率会降低区块链的出块能力,因此有效区块生成速率可表示为 $(1-p_{\text{orphan}})\lambda^b$,其中为区块链孤块率。图11展示了不同孤块率下B-RAN平均等待时延随请求到达率变化情况。可以看到,区块链孤块现象会带来额外性能损失,在请求到达率较低时,孤块率所引起有效出块率下降对平均等待时延影响较小。随着到达率增大,孤块率越高,平均等待时延增长越快,在高负载时,系统对服务能力下降更为敏感,由孤块率升高引起的有效出块率下降更容易造成队列积压,从而显著增加平均等待时延。

针对第3节基于重复博弈的快速可信接入方法,图12展示了在信道中断概率 $\epsilon = 0.01$ 情况下,当SP或用户中一方固定采用合作策略 S_c ,而另一方使用不同策略时,SP和用户的长期收益随合作意愿 ω 的变化曲线。理论和仿真结果分别用线条和记号表示,系统参数设为 $c = 0.3$, $p = 0.6$,每轮时隙作为单位时长,试用时长为 $\tau = 0.6$ 。采用始终违约策略 S_d 时,SP和用户的长期收益均保持不变,而在合作策略 S_c 下,收益会随合作意愿 ω 增大而单调增加。图中还使用不同颜色标注出了非合作区域和合作区域。如图12(a)所示,对SP而言,当满足其合作下界,即式(28)时,始终合作策略将获得比其他违约策略获得更高收益;而对用户来说,图12(b)和图12(c)使用了不同用户效用函数 $\Gamma(\epsilon)$,但都表明,当满足用户合作下界,即式(29)时,用户会选择合作以最大化收益。当同时满足式(28)和式(29)时,双方更愿意采取合作策略获得更高收益。此外,图12(c)采用了边际效用递减函数作为用户效用函数,相比于采用线性效用函数的图12(b),其合作下界更大。这表明当用户收益随信道环境恶化而锐减时,双方合作阈值将变高。

图13给出了考虑信道丢包时,哈希接入在不同信道上的吞吐量表现。设定信道数为8,设备数为30,网络处于饱和状态,并假设信道编号越大,对应的物理层传输条件越好,即丢包率 q_i 越低。从图中可以看出,考虑信道丢包后,各信道吞吐量均低于无丢包情况,当各信道都采用最优接入难度 $d_i^* = n/s$ 时,各信道的吞吐量均高于非最优接入难度方案,且信道吞吐量之和,即网络吞吐量可达到上界 T_q^{max} ,这是因为各信道能够通过调整接入难度控制接入流量强度,从而平衡接入碰撞概率。当接入难度 $d_i > d_i^*$ 时,设备通过哈希计算的概率降低,尝试发送数据包的设备变少,导致信道吞吐量相较于最优接入难度方案显著降低。当 $d_i < d_i^*$ 时,信道上尝试发送的设备数量增加,过小的接入难度会带来更大的接入竞争并增加碰撞概率,导致各信道吞吐量下降。

图14展示了采用哈希接入的网络中,网络吞吐量随网络负载变化曲线,对比展示了不同跨网络负载均衡策略的提升作用,设置网络总链路数 $s = 32$,总设备数 $n = 100$ 。根据马尔可夫模型分析得到的理论值与仿真结果高度吻合,表明该模型能够

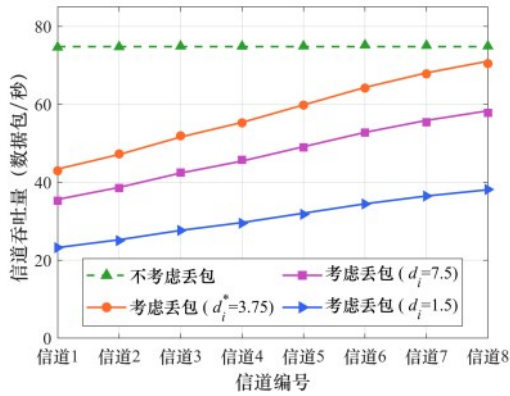


图13 B-RAN免授权哈希接入:考虑丢包时不同 d_i 下的信道吞吐量

准确刻画哈希接入过程及吞吐量变化情况。在网络负载较低时,网络有足够能力承载接入流量,网络吞吐量随网络负载单调增加。当负载变大时,网络逐渐达到饱和状态并受限于网络容量,相比于未均衡方案,负载均衡下的网络吞吐量更高。同时,在负载均衡条件下,对设备和信道进行分组后的网络整体吞吐量显著高于未分组的网络吞吐量,且分组数量越多,网络整体吞吐量越大。

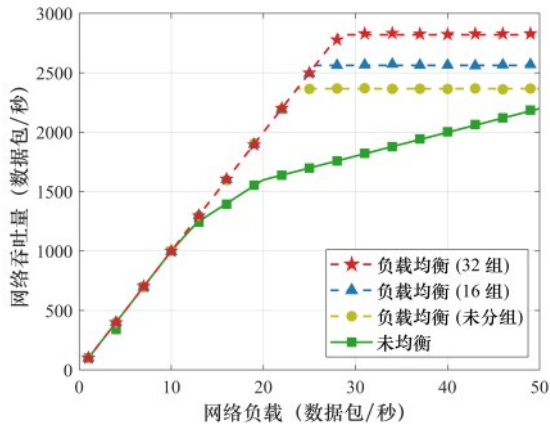


图14 B-RAN免授权哈希接入:不同负载均衡策略下的网络吞吐量

总体而言,三类数学模型分别对应B-RAN无线接入中的不同场景,刻画了各场景下的接入过程及其性能特性,共同构成了B-RAN无线接入分析框架。本文进一步从不同接入机制的作用效果、关键影响因素和性能变化规律三个维度,对相关分析结果进行讨论。其中,基于区块链的无线接入分析结果表明,接入请求上链确认过程在提升接入安全性的同时也会引入额外时延,接入请求的平均等待时延受请求到达强度、区块生成和服务能力等因素

共同影响;快速可信接入通过多轮交互机制缩短接入等待时延,并在满足SP与用户之间的博弈合作条件时,有效保障用户QoS,进一步地,在考虑信道不确定性后,信道中断概率会影响SP和用户双方的长期收益,并提高了双方稳定合作的门槛;免授权哈希接入分析结果则表明,在非受信开放竞争接入环境中,利用哈希接入协议可以有效规范设备接入行为,降低接入冲突并提升网络吞吐量,同时,跨网络负载均衡策略能够在不同子网之间实现均衡的接入流量分配,并在资源整合的基础上采用设备和信道分组方法,进一步提升网络整体吞吐量。

6 结束语

B-RAN作为区块链赋能的新一代无线网络,以分布式方式建立起多方信任,提供安全可靠的无线资源调配、共享与接入服务。针对现有研究中B-RAN相关建模工作较为分散、缺乏系统性梳理等缺陷,本文围绕B-RAN无线接入服务过程,对其数学建模与分析方法进行了归纳与总结。

6.1 总结与讨论

本文介绍了B-RAN的整体架构与服务流程,从接入场景、建模方法、性能指标、仿真验证等多个维度,梳理了刻画B-RAN无线网络接入的数学模型与分析方法。

从接入场景与建模方法来看,基于区块链的接入主要面向安全可信接入需求,利用区块链保障B-RAN接入过程的安全性及可信性,相应采用排队模型分析请求上链确认与服务过程。比较了不同排队模型在状态空间、刻画精度、计算复杂度和适用条件等方面的特性,讨论了不同排队模型的差异与内在关联。快速可信接入主要面向低时延接入场景,利用多轮交互降低接入等待时延,结合重复博弈模型分析SP与用户之间的多轮交互。免授权哈希接入则主要面向非受信多方竞争接入场景,相应采用马尔可夫模型描述设备在多信道上的竞争接入过程。三类并列的B-RAN数学模型虽然建模思路和分析方法不同,但在B-RAN无线接入研究中相互补充。

从性能指标与仿真验证角度,基于区块链的接入分析了平均等待时延、安全性和稳定性等关键性能,仿真展示了不同请求到达强度、区块生成速率

和区块大小等系统参数下的性能变化规律。在快速可信接入中,总结了双方在不同策略选择下的收益特性与维持合作的阈值条件,并深入分析了无线信道质量对博弈合作的影响,仿真结果表明信道不确定性会降低双方长期收益并提高稳定合作门槛。针对免授权哈希接入,分析了接入成功率及网络吞吐量,推导了最优接入难度,探讨了跨网络负载均衡和分组策略带来的性能增益,仿真结果验证了相关理论分析的有效性。

6.2 未来研究展望

尽管本文对 B-RAN 的数学模型与分析方法进行了梳理总结,但该领域仍有尚未解决的问题,有待未来开展进一步探索研究。在 B-RAN 排队模型与性能评估方面,本文主要采用平均时延刻画接入性能,后续可扩展到时延分布指标,评估给定时延门限下的超时概率,以更精准反映时延尾部特性。并且,也可在分析中考虑切合实际情况的突发到达与业务优先级等更为复杂的业务形态。针对快速可信接入,本文分析以单用户与单 SP 交互为主,后续可扩展到多用户与多 SP 交互场景,并研究动态条件下的博弈合作条件。在免授权哈希接入与跨网络负载均衡方面,后续研究可面向子网部分重叠与覆盖异构等场景,分析重叠区域设备接入策略及其对吞吐量与负载均衡的影响,并在更一般的网络拓扑下实现接入难度联合优化。

参考文献:

- [1] Wang J H, Ling X T, Le Y W, et al. Blockchain-enabled wireless communications: a new paradigm towards 6G[J]. *National Science Review*, 2021, 8: 168-192.
- [2] Ling X T, Wang J H, Le Y W, et al. Blockchain radio access network beyond 5G[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2020, 27(6): 160-168.
- [3] Wu M N, Ling X T, Wang J H, et al. Blockchain-driven resource management in wireless communications and networks: Models, approaches, and applications[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2026, 28: 2306 - 2344.
- [4] Kotobi K and Bilen S G. Blockchain-Enabled Spectrum Access in Cognitive Radio Networks[C]// *Proceedings of the IEEE Wireless Telecommunications Symposium (WTS)*. Chicago, US: IEEE, 2017: 1-6.
- [5] Rosenworcel J. Remarks of commissioner Rosenworcel at mobile world congress 2018[R]. <https://www.fcc.gov/document/remarks-commissioner-rosenworcel-mobile-world-congress-2018>. 2018-09.
- [6] Latva-aho M, Leppänen K, Clazzer F, et al. Key drivers and research challenges for 6G ubiquitous wireless intelligence[R]. <http://urn.fi/urn:isbn:9789526223544>. 2019-03.
- [7] 王家恒, 凌昕彤, 乐煜炜, 等. 区块链赋能 6G 移动通信白皮书: 体系架构与技术原理[R]. <http://www.future-forum.org.cn/cn/ onews.asp? id=1262>. 2021-05.
- [8] Ling X T, Wang J H, Bouchoucha T, et al. Blockchain radio access network (B-RAN): Towards decentralized secure radio access paradigm[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 9714-9723.
- [9] Le Y W, Ling X T, Wang J H, et al. Resource sharing and trading of blockchain radio access networks: Architecture and prototype design[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2023, 10(14): 12025-12043.
- [10] Le Y W, Ling X T, Wang J H, et al. Prototype design and test of blockchain radio access network[C]// *Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC)*. Shanghai, CN: IEEE, 2019: 1-6.
- [11] Tong W, Dong X W, Shen Y L, et al. BC-RAN: Cloud radio access network enabled by blockchain for 5G[J]. *Computer Communications*, 2020, 162(1): 179 - 186.
- [12] Xu H, Zhou Z, Zhang L, et al. BE-RAN: Blockchain-enabled open RAN for 6G with DID and privacy-preserving communication[R]. <https://arxiv.org/pdf/2101.10856.pdf>. 2024-09.
- [13] Sachinidis T, Boulogeorgos A-A A, Sarigiannidis P. Dual-hop blockchain radio access networks for advanced coverage expansion[C]// *Proceedings of the International Conference on Modern Circuits and Systems Technology (MOCAS)*. Thessaloniki, GR: IEEE, 2021: 1 - 5.
- [14] Kouvakis V, Trevlakis S E, Boulogeorgos A-A A, et al. Hierarchical blockchain radio access networks: Architecture, modelling, and performance assessment[J]. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 2025, 6: 576-592.
- [15] Wang Z X, Cao B, Liu C X, et al. Blockchain-based fog radio access networks: Architecture, key technologies, and challenges[J]. *Digital Communications and Networks*, 2022, 8(5): 720 - 726.
- [16] Zhu W H, Shi L, Wei K, et al. When MoE meets blockchain: A trustworthy distributed framework of large models[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2026. doi:10.1109/MCOM.001.2500142.
- [17] Ling X T, Le Y W, Wang J H, et al. Practical modeling and analysis of blockchain radio access network[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2021, 69(2): 1021-1037.
- [18] Le Y W, Ling X T, Chen S Y, et al. Modeling blockchain-based wireless access services and applications: A queuing perspective[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2025, 73(6): 4153-4167.
- [19] Kontorovich V. Some aspects of blockchain-enabled radio access networks (B-RAN) modeling: Review and theoretical study[J]. *Advances in Mathematics of Communications*, 2022, 1(1): 44 - 60.
- [20] Huang K, Le Y W, Jiang Y H, et al. Blockchain-enabled secure data interactions for responsive cyber-physical spaces[C]// *Proceedings of the IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*. Cape Town, ZA: IEEE, 2024: 8-12.
- [21] Wang Z Y, Cao W H, Ling X T, et al. Analysis of pooling principle in blockchain radio access network[C] // *Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC)*. Seoul, KR: IEEE, 2022: 13 - 18.
- [22] Ling X T, Le Y W, Chen S Y, et al. Blockchain-enabled decentralized services and networks: Assessing roles and impacts[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2025, 43(6): 2141-2154.
- [23] Roopa V, Pradhan H S. Mathematical modeling and performance evaluation of BeRAN for 6G wireless networks[J]. *Journal of Supercomputing*, 2023, 79(15): 16479 - 16528.

- [24] Shi L, Wang T T, Li J, et al. Pooling is not favorable: decentralize mining power of PoW blockchain using age-of-work[J]. IEEE Transactions on Cloud Computing, 2023, 11(3): 2756-2769.
- [25] Cao W H, Ling X T, Wang J H, et al. A framework for QoS-guaranteed fast access services in blockchain radio access network[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2024, 23(4): 2711-2725.
- [26] Chen B W, Ling X T, Cao W H, et al. Analysis of channel uncertainty in trusted wireless services via repeated interactions[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2025, 43(6): 2248-2265.
- [27] Ling X T, Le Y W, Wang J H, et al. Hash access: Trustworthy grant-free IoT access enabled by blockchain radio access networks[J]. IEEE Network, 2020, 34(1): 54-61.
- [28] Ling X T, Zhang B W, Xie H, et al. Hash access in blockchain radio access networks: Characterization and optimization[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(11): 8053-8066.
- [29] 谢辉, 凌昕彤, 汪子涵, 王家恒. 基于哈希接入的跨网络负载均衡[J]. 电子学报, 2024, 52(7): 2201-2211.
- [30] Neuts M F. Matrix-Geometric Solutions in Stochastic Models: An Algorithmic Approach[M]. Baltimore: The Johns Hopkins University Press, 1981.
- [31] Bosq D and Nguyen H T. A Course in Stochastic Processes: Stochastic Models and Statistical Inference[M]. Dordrecht: Springer Dordrecht, 1996.
- [32] Neuts M F. Structured Stochastic Matrices of $M/G/1$ Type and Their Applications[M]. New York: Marcel Dekker, 1989.
- [33] Miller W. Computational complexity and numerical stability[C]// Proceedings of the 6th Annual ACM Symposium on Theory of Computing (STOC). Seattle, WA, US: ACM, 1974: 317-322.
- [34] Hardin G. The tragedy of the commons[J]. Science, 1968, 162(3859): 1243 - 1248.
- [35] Naor M and Yung M. Universal one-way hash functions and their cryptographic applications[C]// Proceedings of the 21st Annual ACM Symposium on Theory of Computing (STOC). Seattle, WA, US: ACM, 1989: 33-43.
- [36] Ling X T, Jiang R, Cao W H, et al. Exploring MEC server strategy in

blockchain networks: mining for mobile users or for self[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2025, 24(7): 6030-6044.

- [37] Liu Q L, Xu Y Y, Cao B, et al. Unintentional forking analysis in wireless blockchain networks[J]. Digital Communications and Networks, 2021, 7(3): 335-341.

[作者简介]



乐煜炜 (1995-), 男, 2024 年于东南大学获得博士学位。现为紫金山实验室助理研究员, 主要研究方向为无线网络、区块链等。



凌昕彤 (1991-), 男, 2018 年于东南大学获得博士学位。现为东南大学移动通信全国重点实验室副教授。主要研究方向为移动通信、分布式系统等。



王家恒 (1978-), 男, 2010 年于香港科技大学获得博士学位。现为东南大学移动通信全国重点实验室教授, 主要研究方向为通信系统、无线网络、区块链等。

黄琨 (2001-), 女, 东南大学博士生, 主要研究方向为无线网络、区块链等。