面向区块链无线接入网络的建模与分析

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：区块链无线接入网络（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网络深度融合，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负载均衡。针对B-RAN架构与工作流程，系统性梳理了刻画B-RAN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。然后，针对B-RAN的快速可信接入方法，建立博弈模型，并深入分析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，仿真结果展示了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
doi：10.11959/j.issn.1000–436x.TXXB260144

Blockchain-enabled radio access network: modeling and analysis

Huang Kun[1,2], Le Yuwei[2], 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 telecommunications. By integrating blockchain with wireless networks and breaking trust barriers, B-RAN enables secure and trustworthy wireless resource sharing, mobile device access, and cross-network load balancing. With a focus on the architecture and workflow of B-RAN, the access models and analysis methods used to characterize B-RAN were systematically reviewed. First, blockchain-enabled wireless access model was established via queuing theory, and the relations and differences among various queuing models were summarized. Then, for B-RAN's fast trustworthy access method, the game model was established, and the impact of wireless channel uncertainty on the game cooperation conditions was analyzed. For B-RAN's 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 demonstrate the performance of B-RAN across different scenarios and validate the effectiveness of the corresponding mathematical models.

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

---

收稿日期：2026–03–24；**修回日期：**2026–05–21
通信作者：凌昕彤，xtling@seu.edu.cn
基金项目：国家自然科学基金资助项目（No.U22B2006, No.62471137, No.72231002）；江苏省前沿引领技术基础研究重大基金资助项目（No.BK20222001, No.BK20212001）；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 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)

0　引言

区块链无线接入网络（blockchain radio access network, B-RAN）旨在实现区块链与无线网络的深度融合，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、设备商和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、开放和高效的多边融合网络[1-2]，支持无线资源共享、接入控制等多项可信安全功能，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服务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，为跨运营商和跨设备的资源共享与接入服务提供可信支撑。在 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，保障永久可溯和公开透明，从而实现可信安全的无线资源调配、共享与接入控制[3]。

Kotobi 等[4]率先考虑将区块链应用于无线频谱资源接入，并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）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、性能损失及收益等方面。在融合框架方面，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 6 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，区块链云无线接入网络（blockchain cloud-RAN, BC-RAN）[11]增强了云端协作与资源调度的可信性。区块链使能的无线接入网络（blockchain-enabled RAN, BE-RAN）[12]支持去中心化的身份管理与设备可信接入认证。双跳区块链无线接入网络（dual-hop B-RAN, DH-BRAN）[13]通过双跳传输实现了更广的覆盖范围。分层区块链无线接入网络[14]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。区块链雾无线接入网络（blockchain fog-RAN, BF-RAN）[15]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，首先需建立完善的数学模型用于刻画 B-RAN 服务流程，相关工作结合排队论、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融入无线网络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 服务时延与安全性，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，推导出了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 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，以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 快速可信接入的影响，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需解出哈希谜题，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]，但现有工作大多仍

针对特定问题或场景展开，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]只聚焦快速可信的接入场景。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，深入剖析B-RAN整体架构与服务流程，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，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。

图1展示了面向B-RAN无线接入的整体建模与分析框架，上述分散的相关研究可归纳到3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，利用区块链建立多方协作信任并保障B-RAN接入过程的安全性与可信性。排队模型可以很好地刻画该场景中的请求上链与服务排队过程，有效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之间的多轮博弈交互过程，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网络负载均衡策略。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和吞吐量，讨论跨网络负载均衡策略对网络性能的提升效果。

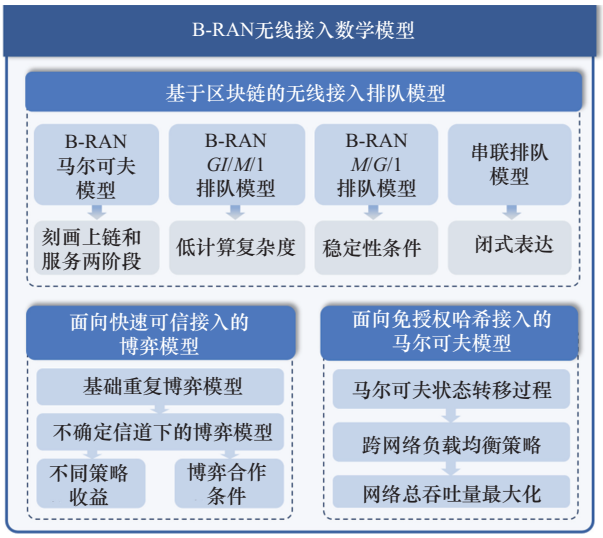


图1　面向B-RAN无线接入的整体建模与分析框架

1　区块链无线接入网络

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成多边融合网络，构建链上无线资源聚合、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整体架构与面向不同场景的无线接入过程如图2所示，其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。用户设备若向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无线接入过程进行不可篡改的记录，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，用户设备需先与SP预先签署服务智能合约并向SP支付服务费用，以获得频谱资源分配，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的有效性，随后将已验证的接入请求打包进入候选区块，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

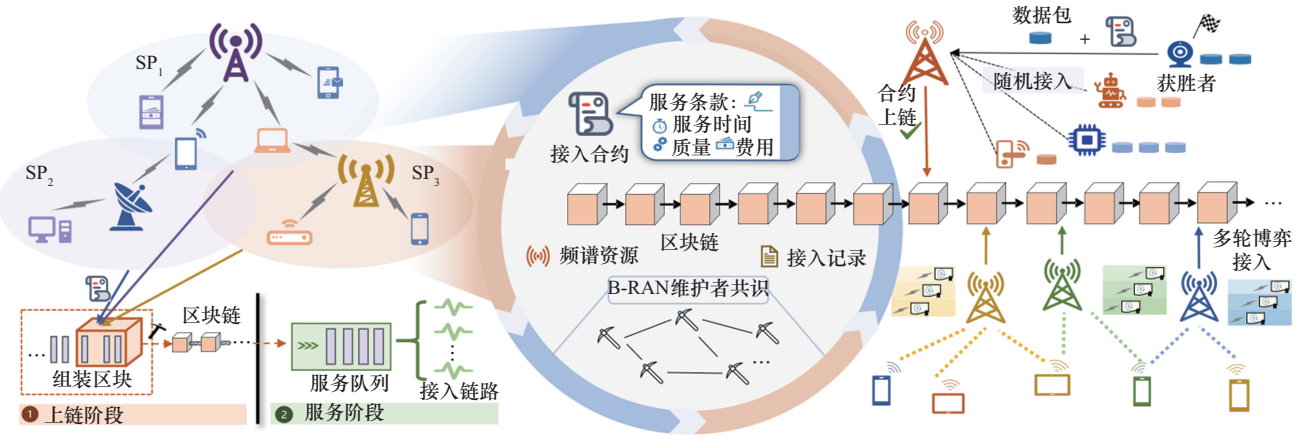


图2　B-RAN整体架构与面向不同场景的无线接入过程

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，直至所需频谱资源空闲。

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，基于区块链的无线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排队的过程，因此利用排队模型能够有效刻画该排队过程，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地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、B-RAN *GI*/*M*/1排队模型、B-RAN *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，系统的总接入请求到达率为$\lambda^a=\sum_{k=1}^{K}\lambda_k^a$。区块生成可建模为参数为$\lambda^b$的泊松过程，每个接入请求需经$N$个区块确认后才能生效。将区块大小上限设为$m$，即单个区块最多可容纳$m$个接入请求。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$\frac{1}{\lambda^c}$的指数分布。此外，本节统一采用如下符号定义：$\mathbf{1}_n$和$\mathbf{0}_n$分别表示由1和0构成的n维列向量，$\boldsymbol{I}_n$表示$n\times n$单位矩阵，$\mathbf{0}_{n\times l}$表示$n\times l$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。

具体来说，设i_n为已获得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$E\left(i_0,i_1,\cdots,i_{N-1},j\right)$表示，其中$\mathbb{Z}_+^{N+1}$表示$N+1$维非负整数集合。因此，得到如下

随机过程，并记作：

$$\left\{Y(t)=E\left(i_0,i_1,\cdots,i_{N-1},j\right)\in\mathbb{Z}_+^{N+1},\ t\geqslant 0\right\} \tag{1}$$

文献[17]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，由此该模型也被称为B-RAN马尔可夫模型。

首先，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，完成区块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$\left\{\left(I(t),J(t)\right)=\left(i_0,j\right),\ t\geqslant 0\right\}$表示，为简化符号，后文将省略$i_0$的下标。B-RAN队列状态$(i,j)$代表有$i$个待上链请求和$j$个在服务阶段等待服务的请求。令$w_{i,j}(t)=\Pr\left\{\left(I(t),J(t)\right)=(i,j)\right\}$表示$t$时刻B-RAN队列状态为$(i,j)$的概率，$w_{i,j}=\lim\limits_{t\to\infty}w_{i,j}(t)$表示稳态概率。

B-RAN队列状态，即随机过程$\left(I(t),J(t)\right)$，将在请求到达、区块生成和服务完成3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)转变为$(i+1,j)$；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B-RAN队列状态将从(i,j)转变为$\left(i-\min(i,m),j+\min(i,m)\right)$；③若有服务完成，B-RAN队列状态将从$(i,j)$转变为$(i,j-1)$。B-RAN马尔可夫模型的队列状态转移关系如图3所示。

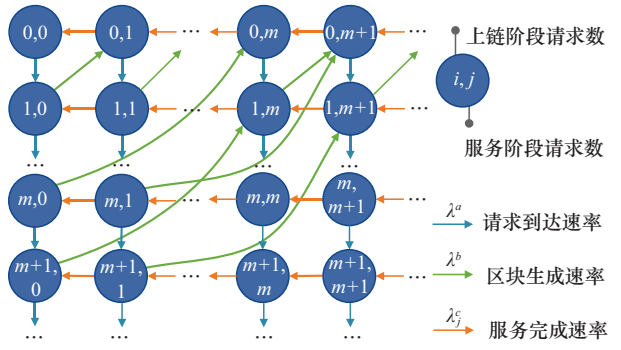


图3　B-RAN马尔可夫模型的队列状态转移关系

基于B-RAN马尔可夫模型的队列状态转移关系，可推导出状态转移平衡方程为：

$$w_{i,j}\left(\lambda^a+\lambda_j^c\right)=\sum_{k=1}^{m}w_{k,j-k}\lambda^b+w_{i,j+1}\lambda_{j+1}^c,\quad i=0,j=0,1,\cdots \tag{2}$$

$$w_{i,j}\left(\lambda^a+\lambda^b+\lambda_j^c\right)=w_{i-1,j}\lambda^a+w_{i,j+1}\lambda_{j+1}^c,\quad i=1,2,\cdots,j=0,\cdots,m-1 \tag{3}$$

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

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

2.1.1　矩阵方程方法

本节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)所示的顺序排列为一维向量，记为：

$$\boldsymbol{w}=[w_{0,0}\quad w_{1,0}\quad w_{0,1}\quad w_{2,0}\quad w_{1,1}\quad w_{0,2}\quad\cdots]=[\boldsymbol{w}_0\quad\boldsymbol{w}_1\quad\boldsymbol{w}_2\quad\cdots] \tag{5}$$

其中，$w_i=[w_{i,0}\quad w_{i-1,1}\quad\cdots\quad w_{0,i}]$，$i=0,1,\cdots$。将状态转移平衡方程式(2)~式(4)组织为向量形式，可写出矩阵方程$\boldsymbol{wQ}=\boldsymbol{0}_\infty^{\mathrm{T}}$，其中状态转移率矩阵$\boldsymbol{Q}$如式(9)所示。矩阵$\boldsymbol{Q}$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$\sum\limits_{i,j}w_{i,j}=1$，可得到方程：

$$\boldsymbol{w}[\boldsymbol{Q},\quad\boldsymbol{1}_\infty]=[\boldsymbol{0}_\infty^{\mathrm{T}},\quad 1] \tag{6}$$

通过求解式(6)，可得B-RAN队列稳态分布$\boldsymbol{w}$。在第一次区块确认下用户平均等待时延$\mathbb{E}[T;1]$为：

$$\mathbb{E}[T;1]=\frac{\sum\limits_{i,j}(i+j)w_{i,j}}{\lambda^a}-\frac{1}{\lambda^c} \tag{7}$$

对于需要N次区块确认的情形，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，相较于单次区块确认，引入了额外的等待区块确认时延，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：

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

尽管式(8)中$w_{i,j}$仍为隐式表达，但可以看出用户平均等待时延与区块确认次数N之间呈现线性正比关系。同时，区块确认次数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安全性越高。因此，增加区块确认次数能够提升B-RAN安全性，但也会导致更长的平均等待时延。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。

$$\boldsymbol{Q}=\begin{bmatrix}-\lambda^a & \lambda^a & & & & & & \cdots\\ & -\lambda^a-\lambda^b & \lambda^b & & \lambda^a & & & \cdots\\ \lambda_1^c & & -\lambda^a-\lambda_1^c & & & \lambda^a & & \cdots\\ & & & -\lambda^a-\lambda^b & & & \lambda^b & \cdots\\ & \lambda_1^c & & & -\lambda^a-\lambda^b-\lambda_1^c & \lambda^b & & \cdots\\ & & \lambda_2^c & & & & -\lambda^a-\lambda_2^c & \cdots\\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \end{bmatrix} \tag{9}$$

2.1.2　QBD方法

矩阵方程方法基于式(6)计算B-RAN队列稳态分布，其计算复杂度随状态转移率矩阵$\boldsymbol{Q}$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$\frac{(L+1)(L+2)}{2}$。根据文献[18]，可将$\boldsymbol{Q}$表示为具有分块三对角结构形式的矩阵。

$$\boldsymbol{Q}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{F}_0 & \boldsymbol{D}_1 & & & \\ \boldsymbol{G}_1 & \boldsymbol{F}_1 & \boldsymbol{D}_2 & & \\ & \boldsymbol{G}_2 & \boldsymbol{F}_2 & \ddots & \\ & & \ddots & \ddots & \boldsymbol{D}_L\\ & & & \boldsymbol{G}_L & \boldsymbol{F}_L\end{bmatrix} \tag{10}$$

其中，$\boldsymbol{D}_i=[\lambda^a\boldsymbol{I}_i \quad \boldsymbol{0}_i]\in\mathbb{R}^{i\times(i+1)}$, $i=1,\cdots,L$，$\boldsymbol{G}_i=\begin{bmatrix}\boldsymbol{0}_i^{\mathrm{T}}\\ \mathrm{diag}\left(\lambda_1^c,\cdots,\lambda_i^c\right)\end{bmatrix}\in\mathbb{R}^{(i+1)\times i}$, $i=1,\cdots,L$，$\boldsymbol{F}_i=\mathrm{diag}\left(-\lambda^a-\lambda^b-\lambda_0^c,\cdots,-\lambda^a-\lambda^b-\lambda_i^c\right)+\lambda^b\boldsymbol{P}_i$，$\boldsymbol{F}_L=\mathrm{diag}\left(-\lambda^b-\lambda_0^c,\cdots,-\lambda^b-\lambda_L^c\right)+\lambda^b\boldsymbol{P}_L\in\mathbb{R}^{(i+1)\times(i+1)}$, $i=0,\cdots,L-1$，$\boldsymbol{P}_i=\left[\boldsymbol{0}_{(i+1)\times i}\quad \boldsymbol{1}_{i+1}\right]$, $i=0,\cdots,m$，$\boldsymbol{P}_i=\begin{bmatrix}\boldsymbol{0}_{(i-m)\times m} & \boldsymbol{I}_{i-m} & \boldsymbol{0}_{i-m}\\ \boldsymbol{0}_{(m+1)\times m} & \boldsymbol{0}_{(m+1)\times(i-m)} & \boldsymbol{1}_{m+1}\end{bmatrix}$, $i=m+1,\cdots$。

由于矩阵$\boldsymbol{Q}$为三对角结构，因此当前状态$\boldsymbol{w}_i$仅限于转移至最近的相邻状态$\boldsymbol{w}_{i-1}$和$\boldsymbol{w}_{i+1}$。式(6)可重写为：

$$\boldsymbol{w}_0\boldsymbol{F}_0+\boldsymbol{w}_1\boldsymbol{G}_1=0 \tag{11}$$

$$\boldsymbol{w}_{i-1}\boldsymbol{D}_i+\boldsymbol{w}_i\boldsymbol{F}_i+\boldsymbol{w}_{i+1}\boldsymbol{G}_{i+1}=\boldsymbol{0}_{i+1}^{\mathrm{T}},\ i=1,\cdots,L-1 \tag{12}$$

$$\boldsymbol{w}_{L-1}\boldsymbol{D}_L+\boldsymbol{w}_L\boldsymbol{F}_L=\boldsymbol{0}_{L+1}^{\mathrm{T}} \tag{13}$$

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(13)求出向量$\boldsymbol{w}_L$，随后，通过以下迭代方程依次计算所有状态向量$\boldsymbol{w}_i$。

$$\boldsymbol{w}_i=-\boldsymbol{w}_{i+1}\boldsymbol{G}_{i+1}\boldsymbol{C}_i^{-1},\ i=0,\cdots,L-1 \tag{14}$$

其中，$\boldsymbol{C}_0=\boldsymbol{F}_0$，$\boldsymbol{C}_i=-\boldsymbol{G}_i\left(\boldsymbol{C}_{i-1}\right)^{-1}\boldsymbol{D}_i+\boldsymbol{F}_i, i=1,\cdots,L$。最后，结合概率归一化条件$\boldsymbol{w}\boldsymbol{1}_{\frac{(L+1)(L+2)}{2}}=1$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。

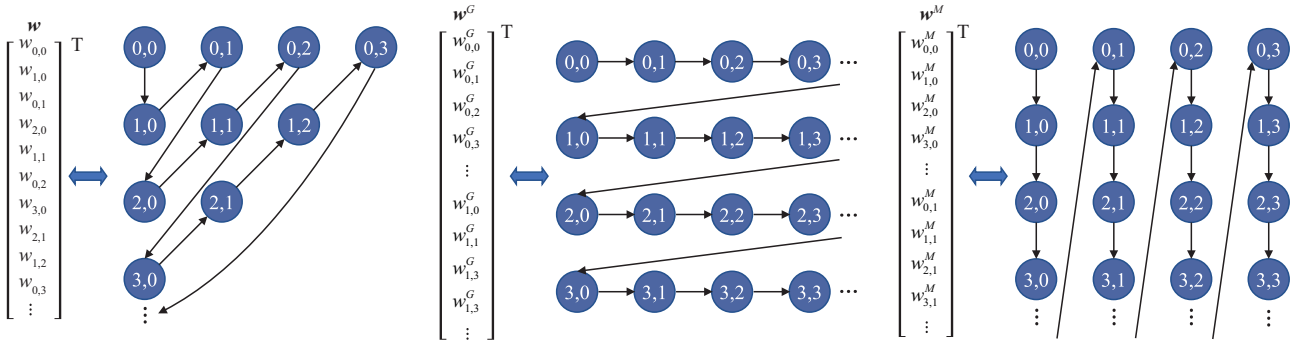
2.2　B-RAN *GI*/*M*/1排队模型

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，B-RAN*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：

$$\boldsymbol{w}^G=[\boldsymbol{w}_0^G \quad \boldsymbol{w}_1^G \quad \boldsymbol{w}_2^G \quad \cdots] \tag{15}$$

$$\boldsymbol{w}_i^G=\left[w_{i,0},w_{i,1},w_{i,2},\cdots\right],\ i=0,1,\cdots \tag{16}$$

由此，状态转移率矩阵$\boldsymbol{Q}^G$可写为分块矩阵，即：



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

图4　B-RAN排队模型二维状态$(I(t), J(t))$排列为一维向量

$$\boldsymbol{Q}^G=\begin{bmatrix}\boldsymbol{B}_0 & \boldsymbol{A}_0 & & & \\ \boldsymbol{B}_1 & \boldsymbol{A}_1 & \boldsymbol{A}_0 & & \\ \vdots & & \ddots & \ddots & \\ \boldsymbol{B}_m & & & \boldsymbol{A}_1 & \boldsymbol{A}_0 \\ & \boldsymbol{A}_{m+1} & & & \boldsymbol{A}_1 \\ & & \ddots & & \end{bmatrix} \tag{17}$$

其中，$\boldsymbol{A}_0=\lambda^a\boldsymbol{I}_\infty$，$\boldsymbol{A}_{m+1}=\boldsymbol{B}_m$，$\boldsymbol{A}_1=\begin{bmatrix}-\lambda^a-\lambda^b & & \\ \lambda_1^c & -\lambda^a-\lambda^b-\lambda_1^c & \\ & \ddots & \ddots\end{bmatrix}$，$\boldsymbol{B}_0=\boldsymbol{A}_1+\lambda^b\boldsymbol{I}_\infty$，$\boldsymbol{B}_i=\lambda^b[\boldsymbol{0}_{\infty\times i}\quad\boldsymbol{I}_\infty]$，$i=1,\cdots,m$。

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。

$$\boldsymbol{w}_i^G=\boldsymbol{w}_{i-1}^G\boldsymbol{R},\ i=1,2,\cdots \tag{18}$$

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

$$\boldsymbol{R}^{m+1}\boldsymbol{A}_{m+1}+\boldsymbol{R}\boldsymbol{A}_1+\boldsymbol{A}_0=\boldsymbol{0}_{\infty\times\infty} \tag{19}$$

根据式(19)，进一步采用迭代法求解$\boldsymbol{R}$。

$$\boldsymbol{R}_n=\left(\boldsymbol{R}_{n-1}^{m+1}\boldsymbol{A}_{m+1}+\boldsymbol{A}_0\right)\left(-\boldsymbol{A}_1\right)^{-1} \tag{20}$$

迭代循环直至$\|\boldsymbol{R}_n-\boldsymbol{R}_{n-1}\|$收敛。接着，结合平衡方程$\boldsymbol{w}^G\boldsymbol{Q}^G[:1]=\boldsymbol{0}_\infty^{\mathrm{T}}$与概率和条件$\boldsymbol{w}_0^G\sum_{k=0}^{\infty}\boldsymbol{R}^k\boldsymbol{1}_\infty=1$解得$\boldsymbol{w}_0^G$，根据式(18)递归计算余下状态向量$\boldsymbol{w}_i^G$。

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$\boldsymbol{w}_i^G$。

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B-RAN *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。本节将通过B-RAN *M*/*G*/1 排队模型，进一步推导B-RAN的稳定性条件。

B-RAN *M*/*G*/1 排队模型重新排列了二维状态空间$\left(I(t),J(t)\right)$，将其表示为如图4(c)所示的一维向量$\boldsymbol{w}^M$，记为：

$$\boldsymbol{w}^M=\left[\boldsymbol{w}_0^M|\boldsymbol{w}_1^M|\boldsymbol{w}_2^M\cdots\right] \tag{21}$$

$$\boldsymbol{w}_j^M=\left[w_{0,j}^M,w_{1,j}^M,w_{2,j}^M,\cdots\right],\quad j=0,1,\cdots \tag{22}$$

由此，状态转移率矩阵$\boldsymbol{Q}^M$可写成分块矩阵形式，即：

$$\boldsymbol{Q}^M=\begin{bmatrix}\boldsymbol{H}_{1,0} & \boldsymbol{H}_2 & \boldsymbol{H}_3 & \cdots & \boldsymbol{H}_{m+1} & & \\ \boldsymbol{H}_{0,1} & \boldsymbol{H}_{1,1} & \boldsymbol{H}_2 & \cdots & \boldsymbol{H}_m & \boldsymbol{H}_{m+1} & \\ & \boldsymbol{H}_{0,2} & \boldsymbol{H}_{1,2} & \cdots & \boldsymbol{H}_{m-1} & \boldsymbol{H}_m & \ddots \\ & & \boldsymbol{H}_{0,3} & \cdots & \boldsymbol{H}_{m-2} & \boldsymbol{H}_{m-1} & \ddots \\ & & & \ddots & \cdots & \ddots & \ddots\end{bmatrix} \tag{23}$$

其中，$\boldsymbol{H}_{0,j}=\lambda_j^c\boldsymbol{I}_\infty$，$\boldsymbol{H}_k=\lambda^b\boldsymbol{E}_{k,1},k=2,\cdots,m$，$\boldsymbol{H}_{m+1}=\sum_{i=1}^{\infty}\lambda^b\cdot\boldsymbol{E}_{m+i,i}$，$\boldsymbol{H}_{1,j}=\begin{bmatrix}-\lambda^a-\lambda_j^c & \lambda^a & & \\ & -\lambda^a-\lambda^b-\lambda_j^c & \lambda^a & \\ & & -\lambda^a-\lambda^b-\lambda_j^c & \ddots \\ & & & \ddots\end{bmatrix}$，$\boldsymbol{E}_{i,j}\in\mathbb{R}^{\infty\times\infty}$表示第$(i,j)$个元素为1、其余元素均为0的无限维矩阵。

B-RAN *M*/*G*/1 排队模型的状态转移率矩阵$\boldsymbol{Q}^M$呈现出与*M*/*G*/1队列相似的块结构，即在次对角线的下方及其左侧元素均为0。定义层级j由状态$\{(i,j)|i=0,1,\cdots\}$构成，对于$j\geqslant 0$且$\ell\geqslant 0$，从第j层

到第$j+\ell-1$层的转移由块矩阵$\boldsymbol{H}_\ell$的元素决定，而单次转移可跨越的最大层数受限于区块大小上限m。该模型凭借矩阵$\boldsymbol{Q}^M$的结构优势，为推导B-RAN稳定性条件提供支撑。

排队系统的稳定性条件是指系统的稳态分布存在，且可由平衡方程唯一确定[31]。稳定性条件保证系统有能力长期处理到达负载。只有在满足稳定性条件的前提下，系统才会收敛到稳态分布。此时，讨论系统的稳态分布，以及与之相关的等待时延和平均队长才是有意义的；否则，系统队长等指标会随着时间无限增长。B-RAN $M/G/1$排队模型的稳定性等价于连续时间马尔可夫过程的不可约性与正常返性，唯一稳态分布由平衡方程确定[22]。由式(23)易判定B-RAN马尔可夫过程具有不可约性，故仅需确保正常返性成立即可说明B-RAN稳定性。根据文献[32]，当且仅当以下条件成立时，B-RAN马尔可夫过程具有正常返性。

$$\max\left\{\boldsymbol{\theta}\boldsymbol{H}_{0_j}\mathbf{1}\right\}>\sum_{k=2}^{\infty}(k-1)\boldsymbol{\theta}\boldsymbol{H}_k\mathbf{1} \tag{24}$$

其中，$\boldsymbol{H}=\boldsymbol{H}_{0_j}+\boldsymbol{H}_{1_j}+\sum_{k=2}^{m+1}\boldsymbol{H}_k$是随机矩阵，$\boldsymbol{\theta}$是线性方程组$\boldsymbol{\theta}\boldsymbol{H}=\mathbf{0}^{\mathrm{T}}$和$\boldsymbol{\theta}\mathbf{1}=1$的唯一解。式(24)左侧可转化为服务阶段的总服务速率$s\lambda^c$，右侧可转化为请求到达速率λ^a，于是得到$s\lambda^c>\lambda^a$。此外，为确保唯一解$\boldsymbol{\theta}$存在，需满足$\frac{\lambda^a}{\lambda^b}<m$。因此，B-RAN系统稳定的充要条件为：

$$\lambda^a<m\lambda^b \tag{25}$$

$$\lambda^a<s\lambda^c \tag{26}$$

根据式(25)和式(26)可知，B-RAN的稳定性同时受两个因素约束：一方面，区块在高负载请求下常被填满，$m\lambda^b$刻画了请求上链的最大速率；另一方面，$s\lambda^c$则表征在所有链路均提供服务时B-RAN所能达到的最大服务速率。因此，请求到达速率λ^a需同时小于这两项速率。

2.4　串联排队模型

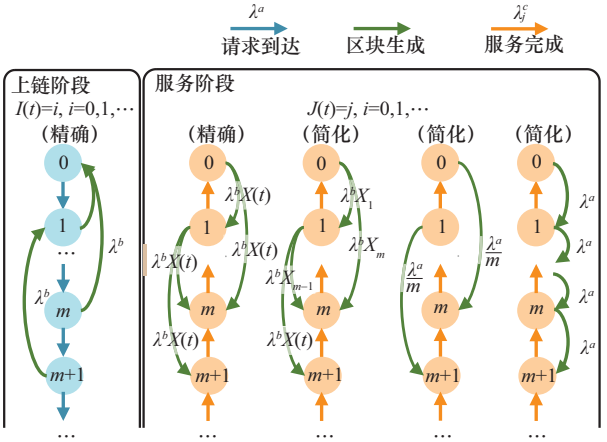
在B-RAN中，请求到达速率λ^a、区块大小上限m与出块速率λ^b主要影响上链阶段的排队时延，服务速率λ^c和链路数s决定了服务阶段的队列拥塞程度，这些网络参数将共同影响B-RAN的整体性能。前述小节建立了B-RAN的精确排队模型，可通过数值方法求解队列稳态分布及服务平均时延，但是均无法提供网络性能的闭式表达式，因而难以显式地体现网络参数对系统性能的影响。因此，本节将针对上链和服务阶段构建串联排队模型，以获得便于性能分析的闭式表达式。

2.4.1　上链阶段

针对上链阶段，将$\{I(t)=i,\ i=0,1,\cdots\}$作为其状态空间。上链过程可以建模为一个批服务队列，记为$M\left(\lambda^a\right)/M^{X(t)}\left(\lambda^b\right)/1$，其中$X(t)$表示区块大小。图5(a)展示了上链阶段队列状态转移关系。定义$u_i=\lim_{t\to\infty}\Pr\{I(t)=i\}$为待上链请求数$I(t)=i$的稳态概率，根据上链阶段的状态转移平衡方程，易得$u_i=(1-r)r^i$，其中比例常数$r$满足等式$\sum_{k=1}^{m}r^k=\frac{\lambda^a}{\lambda^b}$。因此，上链阶段的平均时延为：

$$\mathbb{E}\left[T_A\right]=\frac{1}{\lambda^b\left(1-r^m\right)} \tag{27}$$

式(27)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的增长都会使上链阶段时延减小。



(a) 上链阶段　(b) 服务阶段　(c) 稳态到达　(d) 满块到达　(e) 单个到达

图5　串联排队模型的队列状态转移关系

2.4.2　服务阶段

将已确认请求数$\{J(t)=j,\ j=0,1,\cdots\}$作为服务阶段的状态空间，定义$v_j=\lim_{t\to\infty}\Pr\{J(t)=j\}$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$X(t)=\min\left(I\left(t^-\right),m\right)$。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：

$$\Pr\{X^S=j\}=\begin{cases}(1-r)r^j, & j=0,\cdots,m-1\\ r^m, & j=m\end{cases} \tag{28}$$

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，该模型存在闭式表达的平均时延为：

$$\mathbb{E}[T_Q^S]=\frac{\sum_{j=1}^{s-1}j(s-j)v_j^S}{s\lambda^a(1-\rho)}+\frac{\rho\left(-m\left(\lambda^a+\lambda^b\right)r+(m+1)\lambda^a\right)}{(1-\rho)\left(\lambda^a\right)^2(1-r)}-\frac{1}{\lambda^c} \tag{29}$$

其中，$\rho=\dfrac{\lambda^a}{s\lambda^c}$表示服务阶段的负载强度，且当$s=1$时，式(29)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，一个区块也可能包含许多请求。实际上，区块大小依赖区块生成时间间隔，快速生成的区块通常包含较少的请求。因此，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$\lambda^b=\dfrac{\lambda^a}{m}$，其服务阶段可建模为$M\left(\dfrac{\lambda^a}{m}\right)/M(\lambda^c)/s$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：

$$\mathbb{E}\left[T_Q^F\right]=\frac{\sum_{j=1}^{s-1}j(s-j)v_j^F}{s\lambda^a(1-\rho)}+\frac{\rho(m+1)}{2(1-\rho)\lambda^a}-\frac{1}{\lambda^c} \tag{30}$$

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，故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，队列状态转移关系如图5(e)所示，其平均时延为：

$$\mathbb{E}\left[T_Q^I\right]=\frac{\rho(s\rho)^s}{\lambda^a(1-\rho)^2s!}\left[\sum_{i=0}^{s-1}\frac{(s\rho)^i}{i!}+\frac{(s\rho)^s}{s!(1-\rho)}\right]^{-1}-\frac{1}{\lambda^c} \tag{31}$$

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$\mathbb{E}\left[T_Q^I\right]$是关于负载强度$\rho$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的整体平均时延。

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$\mathbb{E}\left[T_Q^I\right]$随着服务链路数$s$的增加而减少，即多个SP资源整合形成的协作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4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马尔可夫模型涉及的高维复杂矩阵方程，采用矩阵方程方法求解较为复杂，通过QBD方法迭代求解有效降低了稳态计算的复杂度。在状态数较多时，B-RAN *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3种模型都是B-RAN的精确排队模型，但无法显式刻画出网络参数对系统性能的影响，因此构建了串联排队模型，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和空间复杂度两个角度定量评估不同模型的计算开销，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$\boldsymbol{Q}$是维数为$\frac{(L+1)(L+2)}{2}$的方阵，因此使用矩阵方程方法求解的时间复杂度为$O\left(\frac{1}{8}L^6\right)$，采用稀疏矩阵形式存储矩阵$\boldsymbol{Q}$的空间复杂度为$O\left(2L^2\right)$。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$O\left(\frac{3}{4}L^4\right)$，随后反向迭代计算$\boldsymbol{w}_i$的时间复杂度为$O\left(\frac{1}{4}L^4\right)$，故总时间复杂度为$O\left(L^4\right)$。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$\boldsymbol{R}$，单次迭代的时间复杂度为$O\left((m+3)L^3\right)$。若在c次迭代后收敛，则总时间复杂度为$O\left(cmL^3\right)$。在空间复杂度方面，若采用稀疏矩阵形式存储，则空间复杂度为$O(mL)$。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。在这一过程中，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和链下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，实现快速可信接入，

表1　　**基于区块链的无线接入排队模型的特点**

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	$O\left(\frac{1}{8}L^6\right)$	$O\left(2L^2\right)$	联合刻画上链和服务两个阶段
	QBD方法	$M^{X(t)}/M/s$	精确	$O\left(L^4\right)$	$O\left(\frac{1}{3}L^3\right)$	
B-RAN *GI*/*M*/1排队模型		$M^{X(t)}/M/s$	精确	$O\left(cmL^3\right)$	$O(mL)$	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		$M^{X^S}/M/s$ $M^m/M/s$ $M/M/s$	近似	$O(1)$	$O(1)$	闭式表达便于分析

注:上链过程均建模为$M/M^{X(t)}/1$队列。

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 展示了基于重复博弈的快速可信接入流程，将接入流程划分为若干等长时隙轮次，每轮包括试用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。试用服务阶段结束前，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和本轮正式服务所需的费用。若用户按约定支付，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，用户能够通过在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。

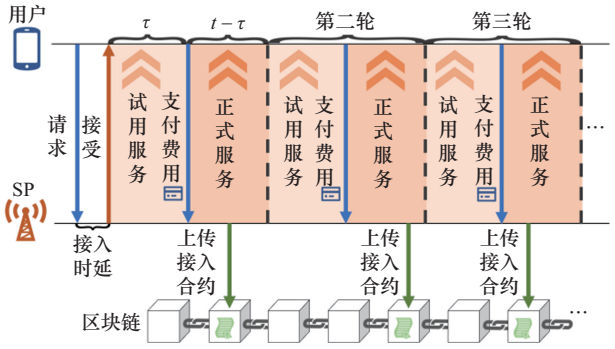


图6　基于重复博弈的快速可信接入流程

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。下文基于重复博弈模型推导该快速可信接入方法保障用户接入 QoS 的条件。

3.1　重复博弈模型

使用重复博弈模型刻画上述快速可信接入。考虑单轮服务时长t，其中试用服务时间为$\tau(\tau < t)$，单位时间服务价格为p，单位时间服务成本为c，用户收到服务的效益为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 和用户在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，如果不提供服务则 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，若用户拒绝付费，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$(pt - c\tau, g\tau - pt)$。

在每一轮博弈中，SP 有 3 种策略：从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提供服务（履约）。用户有两种策略：选择不付费（拒付）和在试用服务结束前付费（支付）。双方在不同策略下的收益矩阵如表 2 所示。

表 2　　收益矩阵

SP 策略	用户支付	用户拒付
履约	$(pt - ct, gt - pt)$	$(-c\tau, g\tau)$
违约	$(pt - c\tau, g\tau - pt)$	$(-c\tau, g\tau)$
不服务	(0,0)	(0,0)

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。假设在某一轮中因一方违约而打破合作状态，需要j轮来修复合作关系。

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：

$$\varphi_D = g\tau + \left(g(t-\tau) - pt\right)\omega^j \tag{32}$$

如果用户一直履约，则$j+1$轮的总收益为：

$$\varphi_H=(gt-pt)\sum_{i=0}^{j}\omega^i=\begin{cases}\dfrac{gt-pt}{1-\omega}\left(1-\omega^{j+1}\right), & 0\leqslant\omega<1\\ (gt-pt)(j+1), & \omega=1\end{cases}\tag{33}$$

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

$$\frac{gt-pt}{1-\omega}>g\tau\tag{34}$$

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，以恢复信任关系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。

$$\frac{pt-ct}{1-\omega}>pt-c\tau\tag{35}$$

综上可知，当同时满足式(34)和式(35)时，用户和 SP 合作策略构成纳什均衡。本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。

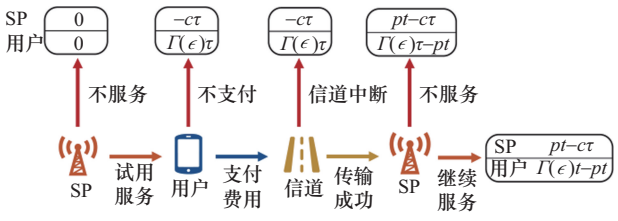


图7　不确定信道下的博弈树

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：始终合作策略，S_A：始终违约策略，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：

$$\varphi_s(S_C,S_C)=\frac{(1-\epsilon)(pt-ct)-\epsilon c\tau}{1-(1-\epsilon)\omega}\tag{36}$$

$$\varphi_c(S_C,S_C)=\frac{(1-\epsilon)(\Gamma(\epsilon)t-pt)+\epsilon\Gamma(\epsilon)\tau}{1-(1-\epsilon)\omega}\tag{37}$$

（2）在始终违约策略下，违约方只在第一轮中获益。

$$\varphi_s(S_A,S_C)=(1-\epsilon)pt-c\tau\tag{38}$$

$$\varphi_c(S_C,S_A)=\Gamma(\epsilon)\tau\tag{39}$$

（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：

$$\varphi_s(S_J,S_C)=\frac{(1-\epsilon)(pt-\omega^{j-1}c(t-\tau))-c\tau}{1-(1-\epsilon)\omega^j}\tag{40}$$

$$\varphi_c(S_C,S_J)=\frac{\Gamma(\epsilon)\tau+\omega^{j-1}(1-\epsilon)(\Gamma(\epsilon)(t-\tau)-pt)}{1-(1-\epsilon)\omega^j}\tag{41}$$

当 $j=1$ 时，S_J 收益等同于 S_C，而当 $j\to\infty$ 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策略 S_C 更高的收益。由此，保证双方合作需满足以下条件。

$$\omega\geqslant\frac{1-\dfrac{\tau}{t}}{(1-\epsilon)\dfrac{p}{c}-\dfrac{\tau}{t}}\tag{42}$$

$$\omega\geqslant1-\frac{1-\dfrac{p}{\Gamma(\epsilon)}}{\dfrac{\tau}{t}}\tag{43}$$

式(42)和式(43)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，该下界也随之增大，这表明更高的信道中断概率，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。在该方法中，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双方在快速可信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　面向免授权哈希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和互相干扰的情况，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时，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展示了哈希接入的工作流程。在采用哈希接入协议的B-RAN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的接入流量，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$d=\dfrac{h_m}{h_c}$。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。

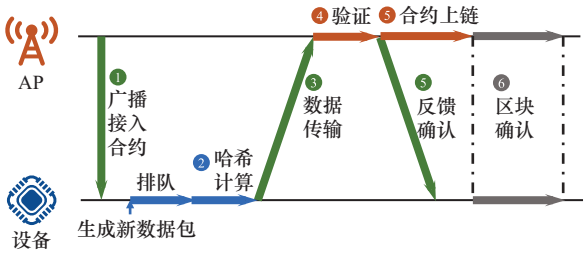


图8　哈希接入的工作流程

4.1　哈希接入的马尔可夫模型

本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和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ξ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ξ。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。哈希接入数据包状态转移关系如图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$\mu=\dfrac{P_s}{d}$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$\gamma=\dfrac{\xi}{\mu}=\dfrac{\xi d}{P_s}$。

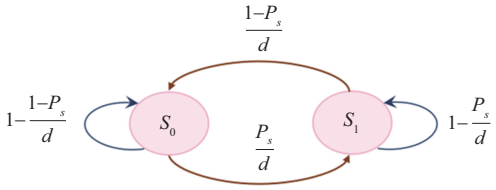


图9　哈希接入数据包状态转移关系

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$\dfrac{\alpha}{sd}$。因此，数据包成功传输的概率可表示为：

$$P_s = (1-\frac{\alpha}{sd})^{n-1} = \begin{cases} \left(1-\dfrac{\xi}{sP_s}\right)^{n-1}, & \gamma < 1 \\ \left(1-\dfrac{1}{sd}\right)^{n-1}, & \gamma \geqslant 1 \end{cases} \tag{44}$$

在低负载条件下，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：

$$T = \frac{n\alpha P_s}{d} = \begin{cases} n\xi, & \gamma < 1 \\ \dfrac{n}{d}\left(1-\dfrac{1}{sd}\right)^{n-1}, & \gamma \geqslant 1 \end{cases} \tag{45}$$

由式(45)可知，在设备数n和接入链路数s不变的情形下，当网络负载强度较小时，吞吐量与设备数和数据包生成率ξ成正比。当网络达到饱和（$\gamma \geqslant 1$）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$d^{\star} = \dfrac{n}{s}$时，网络吞吐量达到最大，即$T^{\max} = s\left(1-\dfrac{1}{n}\right)^{n-1}$。

进一步考虑物理层丢包对哈希接入的影响。数据包在传输过程中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条信道上成功传输的概率可表示为：

$$P_{s,i} = \left(1-q_i\right)(1-\frac{\alpha}{sd_i})^{n-1} \tag{46}$$

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：

$$T_q = \sum_{i=1}^{s}\frac{n\alpha P_{s,i}}{sd_i} = \begin{cases} \displaystyle\sum_{i=1}^{s}\left(1-q_i\right)\frac{n}{s}\xi, & \gamma < 1 \\ \displaystyle\sum_{i=1}^{s}\left(1-q_i\right)\frac{n}{sd_i}\left(1-\frac{1}{sd_i}\right)^{n-1}, & \gamma \geqslant 1 \end{cases} \tag{47}$$

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$d_i^{\star} = \dfrac{n}{s}$时，网络吞吐量达到最大，即$T_q^{\max} = \displaystyle\sum_{i=1}^{s}\left(1-q_i\right)\left(1-\frac{1}{n}\right)^{n-1}$。

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，提供了实现最大网络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$s = \displaystyle\sum_{k=1}^{K} s_k$条接入链路和$n = \displaystyle\sum_{k=1}^{K} n_k$台设备。在跨网络负载均衡场景下，暂不考虑信道丢包影响，设单个子网络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排序，即$d_1 \geqslant d_2 \geqslant \cdots \geqslant d_K$。定义子网$k$哈希计算通过的概率为$\eta_k = \dfrac{1}{d_k}$，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，并且$\eta_0 = 0$。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$k \sim K$个子网络的链路集合中选择一条链路进行接入，此时可用链路总数为$s_k^{\text{sum}} = \displaystyle\sum_{i=k}^{K} s_i$。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：

$$x_k = \gamma\sum_{j=1}^{k}\frac{\Delta\eta_j}{s_j^{\text{sum}}} \tag{48}$$

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

$$T = \begin{cases} n\xi, & \gamma < 1 \\ n\displaystyle\sum_{k=1}^{K}\Delta\eta_k\left(\sum_{i=k}^{K}\frac{s_i}{s_k^{\text{sum}}}\left(1-\gamma\sum_{j=1}^{i}\frac{\Delta\eta_j}{s_j^{\text{sum}}}\right)^{n-1}\right), & \gamma \geqslant 1 \end{cases} \tag{49}$$

文献[29]证明了在高负载条件下，当且仅当所有子网络采用统一接入难度$d_1 = d_2 = \cdots = d_K = \dfrac{n}{s}$时，系统吞吐量达到上界$s\left(1-\dfrac{1}{n}\right)^{n-1}$。

上述结果表明，在跨网络负载均衡场景下，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哈希接入流量。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，从而实现跨网络负载均衡并提升系统总体吞吐量。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$Q(Q\leqslant s)$个规模相同的小组，各小组平均分配到的接入链路数和设备数分别是$\frac{s}{Q}$和$\frac{n}{Q}$，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，网络总吞吐量为$s(1-\frac{Q}{n})^{\frac{n}{Q}-1}$，并且随分组数量$Q$增大，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。而在跨网络负载均衡场景下，将所有子网络视作一个资源池，设置相同的接入难度，提供统一的接入服务，从而实现跨网络负载均衡。进一步，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排队模型的理论与仿真结果的对比，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、$GI/M/1$排队模型和$M/G/1$排队模型）的理论结果，验证了B-RAN精确模型的准确性。此外，当λ^a较小时，服务资源充足，大多数已上链请求在进入服务阶段后不需要排队而直接被服务，因此服务阶段的等待时延可以忽略不计，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，依旧能够较好地逼近精确模型。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。

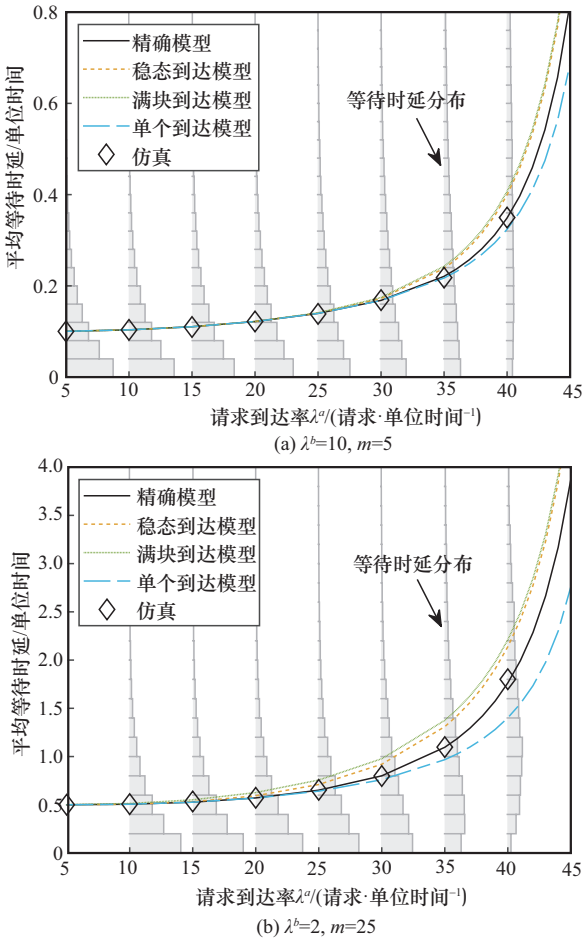


图10　不同排队模型下B-RAN的平均等待时延

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（$1-P_{\text{orphan}}$），其中P_{orphan}为区块链孤块率。图11展示了不同孤块率下B-RAN的平均等待时延随请求到达率变化的情况。可以看到，区块链孤块现象会带来额外的性能损失，在请求到达率较低时，孤块率引起的有效出块率下降对平均等待时延影响较小。随着请求到达率增大，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。

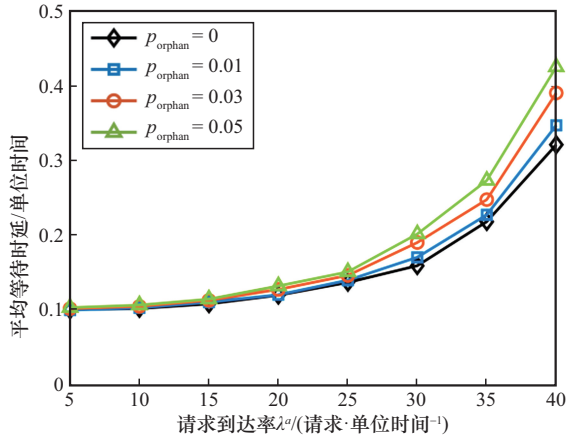


图11　不同孤块率下B-RAN的平均等待时延

针对第3节基于重复博弈模型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，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，非合作和合作区域的边界用虚线标注，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$\tau=0.6$。当采用始终违约策略S_A时，SP和用户的长期收益均保持不变，而在始终合作策略S_C下，SP和用户的长期收益会随合作意愿ω增大而单调增加。对SP而言，如图12(a)所示，当满足其合作下界，即式(42)时，始终合作策略将获得比其他违约策略更高的收益；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(43)时，用户会选择合作以最大化收益。当同时满足式(42)和式(43)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13中可以看出，考虑丢包后，各信道吞吐量均低于无丢包情况，当各信道采用最优接入难度$d_i^{\star}=\dfrac{n}{s}$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$d_i>d_i^{\star}$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最优接入难度方案显著降低。当$d_i<d_i^{\star}$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。

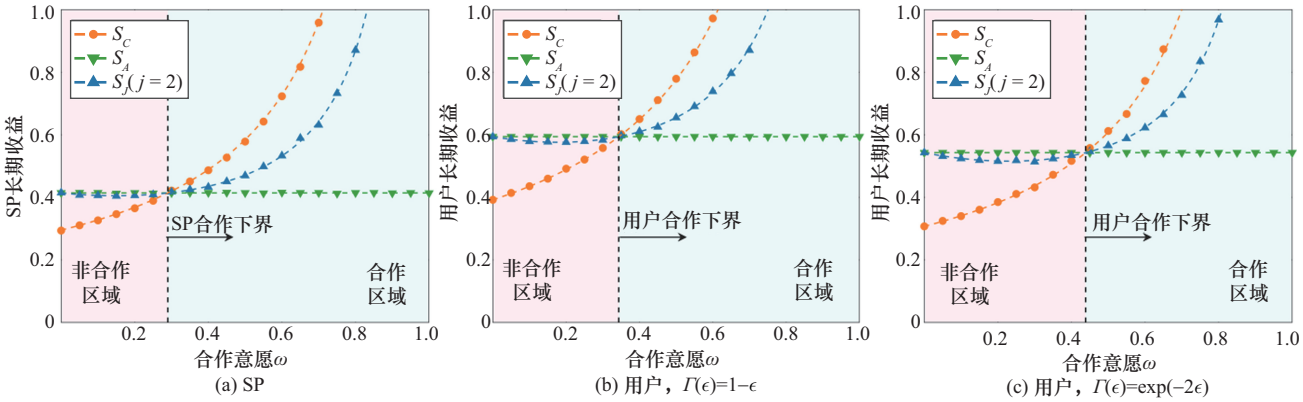


图12　不确定信道下B-RAN快速可信接入的SP和用户采用不同策略的长期收益

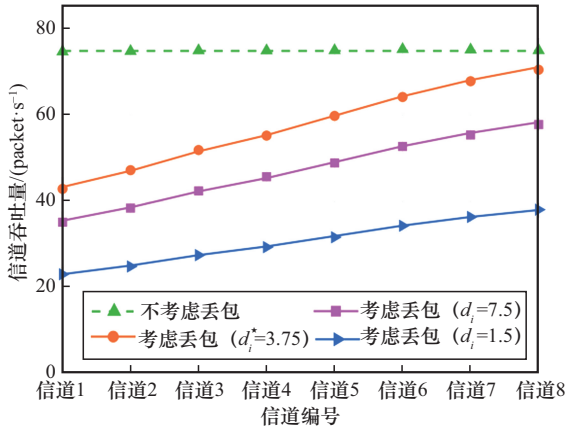


图 13　考虑丢包时不同 d_i 下 B-RAN 免授权哈希接入的信道吞吐量

图 14 展示了在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，表明该模型能够准确刻画哈希接入过程及网络吞吐量变化情况。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。当网络负载变大时，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。

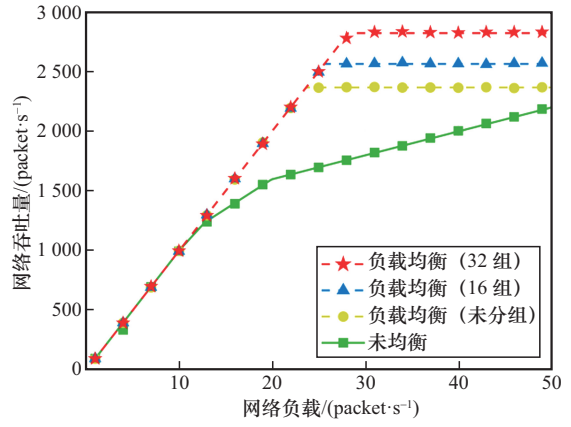


图 14　不同负载均衡策略下 B-RAN 免授权哈希接入的网络吞吐量

总体而言，3 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 3 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，并提高双方稳定合作的门槛。免授权哈希接入分析结果表明，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、缺乏系统性梳理等不足，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 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 接入过程的安全性与可信性，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指标，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，分析了接入成功率和网络吞吐量，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无线接入性能，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网络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(9): nwab069.

[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, Bilén S G. Blockchain-enabled spectrum access in cognitive radio networks[C]//Proceedings of the 2017 Wireless Telecommunications Symposium (WTS). Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-6.

[5] Rosenworcel J. Remarks of commissioner Jessica Rosenworcel at mobile world congress 2018[R]. 2018-09.

[6] Latva-Aho M, Leppänen K, Clazzer F, et al. Key drivers and research challenges for 6G ubiquitous wireless intelligence[R]. 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]. 2021-05.
Wang J H, Ling X T, Le Y W, et al. Blockchain-enabled 6G mobile communication white paper: system architecture and technical principles[R]. 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 2019 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops). Piscataway: IEEE Press, 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: 179-186.

[12] Xu H, Zhou Z H, Zhang L, et al. BE-RAN: blockchain-enabled open RAN for 6G with DID and privacy-preserving communication[PP]. V4. (2024-09-13)[2026-03-24]. arXiv: arXiv.2101.10856.

[13] Sachinidis T, Boulogeorgos A A, Sarigiannidis P. Dual-hop blockchain radio access networks for advanced coverage expansion[C]//Proceedings of the 2021 10th International Conference on Modern Circuits and Systems Technologies (MOCAST). Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-5.

[14] Kouvakis V, Trevlakis S E, Boulogeorgos 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, 64(4): 150-157.

[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: 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]. Journal of Advances in Mathematics and Computer Science, 2022: 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 2024 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps). Piscataway: IEEE Press, 2024: 1-6.

[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 2022 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops). Piscataway: IEEE Press, 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]. The 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, 等. 基于哈希接入的跨网络负载均衡[J]. 电子学报, 2024, 52(7): 2201-2211.
Xie H, Ling X T, Wang Z H, et al. Inter-network load balancing based on hash access[J]. Acta Electronica Sinica, 2024, 52(7): 2201-2211.
[30] Neuts M F. Matrix-geometric solutions in stochastic models[M]. Baltimore: Johns Hopkins University Press, 1981.
[31] Bosq D, 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 Sixth Annual ACM Symposium on Theory of Computing. New York: ACM Press, 1974: 317-322.
[34] Hardin G. The tragedy of the commons[J]. Science, 1968, 162(3859): 1243-1248.
[35] Naor M, Yung M. Universal one-way hash functions and their cryptographic applications[C]//Proceedings of the Twenty-First Annual ACM Symposium on Theory of Computing. New York: ACM Press, 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.

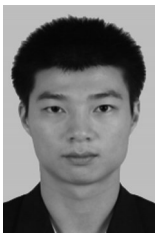
[作者简介]



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。



乐煜炜（1995– ），男，博士，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，博士，东南大学副教授，主要研究方向为移动通信、分布式系统等。



王家恒（1978– ），男，博士，东南大学教授，主要研究方向为通信系统、无线网络、区块链等。