

基于哈希接入的跨网络负载均衡

谢 辉¹, 凌昕彤^{1,2,3*}, 汪子涵⁴, 王家恒^{1,2,3}

(1. 东南大学移动通信国家重点实验室, 江苏南京 210000; 2. 网络通信与安全紫金山实验室, 江苏南京 211111;
3. 东南大学移动信息通信与安全前沿科学中心, 江苏南京 210000; 4. 加州大学洛杉矶分校, 加利福尼亚洛杉矶 90095)

摘要: 无线接入网复杂化持续加剧, 无线设备数量激增. 为了提升未来网络容量和资源利用率, 需要设计有效的拥塞控制手段和资源调配策略, 平衡子网络之间负载, 促进跨域资源协同共享. 为此, 本文在新近提出的哈希接入协议的基础上, 设计了哈希接入动态优化策略, 根据网络负载状况动态调整接入参数以缓解网络拥塞, 并在跨网络场景下进一步提出了负载均衡方案与资源整合再调配方案, 为无线接入网整合无线资源、均衡网络负载提供了有用的方法. 仿真结果表明, 本文提出的哈希接入动态优化策略在保证网络稳定的同时最大化网络吞吐量, 资源调配方案能有效地调配失衡的网络负载, 提升复杂融合网络性能和接入公平性.

关键词: 无线接入网; 哈希接入; 接入控制; 网络负载均衡

基金项目: 国家重点研发计划(No.2022YFB2902204); 国家自然科学基金(No.U22B2006, No.72231002, No.61901111); 江苏省前沿引领技术基础研究重大项目(No.BK20222001, No.BK20212001); 江苏省重点研发计划(产业前瞻与关键核心技术)重点项目(No.BE2022068-3); 青年人才托举工程(No.2023QNRC001); 中央高校基本科研业务费专项(No.2242022K60002, No.2242022K60001, No.2242023K5003); 华为-东南无线通信联合实验室项目(No.FA2019051081-2021-01)

中图分类号: TN915

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2024)07-2201-11

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20230063

Inter-Network Load Balancing Based on Hash Access

XIE Hui¹, LING Xin-tong^{1,2,3*}, WANG Zi-han⁴, WANG Jia-heng^{1,2,3}

(1. National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210000, China;

2. Purple Mountain Laboratories, Nanjing, Jiangsu 211111, China;

3. Frontiers Science Center for Mobile Information Communication and Security, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210000, China;

4. University of California Los Angeles, Los Angeles, California 90095, USA)

Abstract: The intricacy of wireless access networks continues to escalate, accompanied by a substantial proliferation in the number of wireless devices. In order to augment network capability and resource utilization, it is necessary to design effective access control and resource allocation schemes to balance traffic loads among subnetworks and promote cross-domain resource coordination and sharing. To address this, our paper builds upon the recently proposed Hash Access protocol and devises an optimization method, which dynamically adjusts access parameters based on the network load to alleviate network congestion. Furthermore, this paper presents traffic balancing and resource re-allocation schemes for multi-subnetwork scenarios, offering valuable approaches for integrating wireless resources and offloading traffics. Simulation results demonstrate that the proposed Hash Access optimization method maximizes network throughput while ensuring network stability, and the proposed resource allocation scheme effectively addresses load unbalancing issue, thereby enhancing the performance and fairness for complex integrated networks.

Key words: radio access network; Hash Access; access control; network load balancing

Foundation Item(s): National Key Research and Development Program of China (No.2022YFB2902204); National Natural Science Foundation of China (No.U22B2006, No.72231002, No.61901111); Natural Science Foundation on Frontier Leading Technology Basic Research Project of Jiangsu (No.BK20222001, No.BK20212001); Key Technologies Research and Development Program of Jiangsu (Prospective and Key Technologies for Industry) (No.BE2022068-3); Young Elite Scientists Sponsorship Program by CAST (No.2023QNRC001); Fundamental Research Funds for the Central Universities (No.2242022K60002, No.2242022K60001, No.2242023K5003); Huawei Cooperation Project (No.FA2019051081-2021-01)

1 引言

第六代(The 6th Generation, 6G)移动通信的研究正在全球范围内飞速发展. 6G 移动通信技术将提升网络容量和传输速率, 进一步支撑物联网(Internet of Things, IoT)和机器类通信(Machine-Type Communication, MTC). 而 IoT 和 MTC 所带动的新业务、新应用不断涌现, 使得无线设备数量激增, 预计到 2030 年, 将有 5 000 亿设备与 IoT 连接^[1]. 面对海量 IoT 设备, 迫切需要合适的方案来满足大规模的泛在无线连接需求并解决其导致的流量拥塞问题. 同时, 6G 将包含来自多方的大量子网络(subnetwork), 例如运营商网络、边缘网络、企业子网等, 把无线网络环境推进到包含多方的非可信开放网络^[2,3]. 这样的开放网络存在底层信任缺失的隐患, 网络中可能出现一些自私节点, 拒绝遵守接入协议中的媒体接入控制(Media Access Control, MAC)层的协议与规则达到为自身“牟利”的目标, 例如减少甚至无视退避时间以降低接入时延, 自私节点会很大程度上占用传输媒介造成信道长时间繁忙, 不仅破坏了接入公平性, 而且导致严重的网络拥塞, 使系统性能急剧下降. 同时, 不同子网络隶属于多方, 其资源仅在各自统属范围内被利用, 子网络之间流量不平衡. 这使得无线网络与资源被严重割裂, 进一步加剧了资源利用率低下的问题. 因此, 规范开放网络中底层设备的接入行为, 杜绝跳过退避的自私策略, 是保障 6G 网络接入公平性的前提. 设计有效的接入控制方法以缓解网络拥塞, 考虑合理有效的跨网络资源调配方案均衡子网络间负载, 是促进 6G 网络在不可信多方之间实现多维度、多层面的跨域资源协同共享、提升无线网络接入能力与资源利用效率的关键^[4].

针对 MTC 场景中随机接入的系统拥塞控制策略, 3GPP 中提出了基于接入等级禁止(Access Class Barring, ACB)的随机接入机制, 可以一定程度解决接入过程中的前导码碰撞问题以控制同一时刻接入的机器类通信设备(Machine-Type Communication Device, MTCD)数量^[5]. 文献[6]提出了 ACB 方法退避预测的估计模型, 通过估算活跃的 MTCD 数量自适应调整 ACB 参数缓解网络拥塞. 而针对不平衡的网络负载, 文献[7]和文献[8]研究了 ACB 的基站协作方案, 通过引入基站选择参数来控制接入同一个基站的 MTCD 数量, 合理调配无线资源从而卸载负载较重的基站流量. 文献[9]设计了一种基于设备分组的资源分配方案, 将 MTCD 进行分组接入, 有效地提升了系统性能和拥塞控制能力. 上述拥塞控制手段和网络均衡方案虽然在一定程度上缓解了网络中流量密集区的负载压力, 但是仅适用于隶属于一方的可信网络. 上述方案忽略了自私接入策略给系统带来的负面影响, 因此在非可信网络中难以发挥

作用. 当网络中存在自私节点时, 自私接入会使系统性能下降, 并且破坏接入的公平性. 例如, 在使用 IEEE 802.11 分布式协调功能(Distributed Coordination Function, DCF)接入协议的网络中含有自私节点时, 相比于可信环境, 自私接入策略会导致网络吞吐量显著下降^[10]. 相较于诚实节点, 自私节点也会获得更高的吞吐量^[11]. 文献[12]建立了一个简化的博弈模型, 分析了自私和诚实接入策略的收益. 结果表明, 自私接入带来的短期收益会诱导更多的诚实设备加入到自私接入的行列. 而自私设备比例的上升最终将导致数据传输冲突概率急剧上升, 网络接入性能下降, 最终导致所有设备的长期收益受到损害. 可见在非可信网络环境中, 传统的拥塞控制手段和负载均衡方案难以保障设备的公平接入, 因此也无法实现无线资源协同共享与高效利用.

现有研究针对开放网络的接入问题提出了区块链无线接入网(Blockchain Radio Access Network, B-RAN)的架构. B-RAN 底层采用了哈希接入的免授权随机接入机制, 规范 IoT 设备遵守接入协议以杜绝设备的自私接入行为^[12-15]. 哈希接入协议强制设备在接入网络之前需要计算得到符合条件的哈希值. 由于哈希函数的随机性和单向传递性, 设备得到的哈希值可以被容易验证却难以伪造. 因此, IoT 设备只能通过一定时长的计算得到符合要求的哈希值才能满足接入条件. 这种类似工作量证明机制(Proof of Work, PoW)的设计替代了传统无线网络的随机退避机制, 强制所有设备无法跳过退避时间.

现有的哈希接入研究工作在哈希接入协议的基础上完成了初步的分析, 但并未对哈希接入的稳定性开展论述, 也没有给出哈希接入难度参数动态调整方案. 而 MTC 流量具有数据包小、数量大、突发性强的特点, 哈希接入需要更精确、更全面的接入控制策略以应对网络拥塞. 同时, 哈希接入协议针对包含众多子网络的开放网络场景. 这样的场景中子网络流量的分布可能不均匀, 因此需要设计与哈希接入协议适配的跨网络负载均衡方案以共享、调配不同子网络的资源与流量, 有效均衡子网络间不平衡的网络负载以避免局部网络拥塞, 进而提高系统的性能和资源利用效率. 哈希接入协议可以在跨网络场景中合理地调配无线资源, 优化设备的接入选择, 进一步提升设备接入的公平性.

针对以上问题, 本文基于哈希接入协议提出了动态优化策略、负载均衡方案与资源整合再调配方案, 以促进无线网络资源高效协同共享, 提升无线网络接入能力. 本文的主要研究贡献如下:

(1) 针对哈希接入协议建立了数学模型, 分析了基

于哈希接入的无线网络性能指标,提出了哈希接入协议的动态优化策略:根据网络负载情况自适应调整接入难度参数,在网络未饱和时保证系统的稳定性的同时缩短接入时延,在网络饱和时最大化网络吞吐量。

(2)在跨网络场景中提出了基于哈希接入的负载均衡方案,通过整合多方网络的无线资源为所有设备提供统一的接入共享服务。相比于传统的接入方案,本文所提负载均衡方案可以池化汇聚相对孤立的子网络资源,平衡子网络之间流量负载,提高网络吞吐量。

(3)在上述子网络资源汇聚基础上,进一步提出了基于哈希接入的跨网络资源整合再调配方案,将大网络划分为分组网络,根据子网络信道资源数量调配接入设备,进一步提升了系统的吞吐性能和设备接入的

公平性。

2 哈希接入协议

哈希接入协议要求每个 IoT 设备应在发送数据包之前执行哈希计算,当且仅当根据当前时刻计算出的哈希值低于给定目标值才能允许传输数据包。由于哈希函数的不可逆性,IoT 设备很难伪造一个可用的哈希值,但基站却可以轻易地验证设备计算出的哈希值的有效性。在哈希接入机制中,随机退避以哈希计算的方式自动内嵌于协议中。任何设备都无法跳过这一过程,否则无法通过验证。这是哈希接入可以规范设备接入、强制退避的原因。哈希接入协议接入具体流程如图 1 所示,可以分为以下 7 个步骤^[12]。

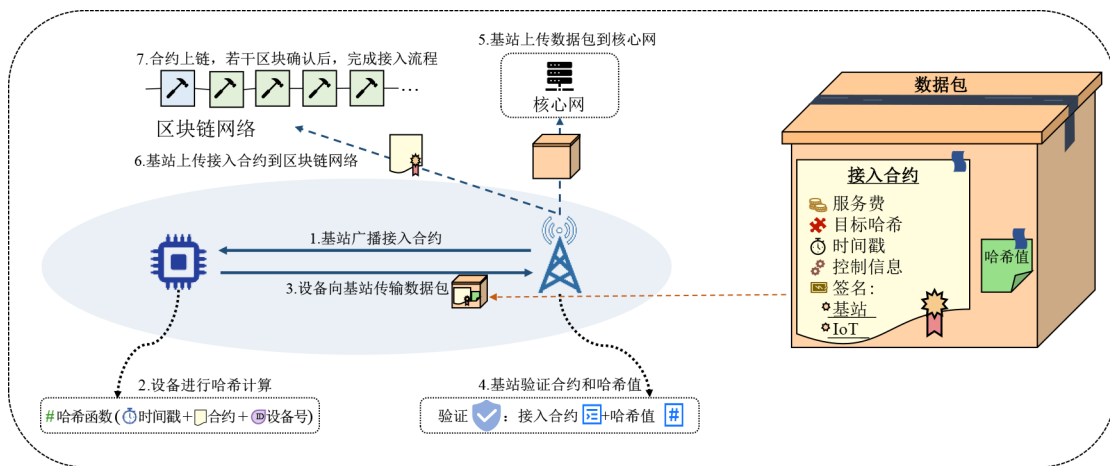


图 1 哈希接入流程图

步骤 1 在 B-RAN 中,基站定期对接入合约进行数字签名并向外广播,其中接入合约包含服务费、目标哈希值、接入控制等信息,以声明免授权接入服务的可用性。

步骤 2 如果设备缓存队列有需要发送的数据包,则进行哈希计算。哈希计算公式包括设备标识号、当前时间戳与签署设备自身电子签名的接入合约,计算得到低于目标哈希的结果才能进行数据传输,否则设备需要等待至下一个时隙重复步骤 2 的哈希计算。

步骤 3 如果设备计算出的哈希值低于目标哈希,则将数据包、哈希值和接入合约打包发送到基站,并且竞争解决计时器同时启动,如果没有数据包冲突,数据包则成功传输。

步骤 4 基站从 IoT 设备接收到包含接入合约的数据包之后,验证哈希值和接入合约的有效性。

步骤 5 如果设备上传的哈希值低于基站设置的目标哈希值,基站将上传数据包到核心网,并向设备发送确认消息。如果哈希值或接入合约无效,基站将忽略相应的数据包。若 IoT 设备在规定时间内未接收到确认消息,则将传输视为故障,并重复步骤 2 和步骤 3。

步骤 6 在发送确认消息时,基站同时将接入合约上传到区块链维护者网络,并收取服务费。

步骤 7 区块链维护者检查接入合约的有效性,检查有效后将合约提交给区块链。在接入合约上链并被一定数量的区块确认后,基站将接收此次接入服务的费用,接入流程完成。

需要指出的是,为保证算力或者能量受限的设备接入的公平性,哈希接入将时间戳纳入哈希计算,因此哈希接入协议严格限制设备在一个时隙只能进行一次哈希计算。相较于通信的能耗,哈希计算的能耗较少,适合算力有限的物联网设备^[16]。

定义接入难度 d 以描述设备计算出低于目标哈希的概率, d 满足:

$$d = \frac{h_m}{h_c} \quad (1)$$

其中, h_m 表示最大哈希值; h_c 表示基站广播的目标哈希值;在哈希接入中, d 是控制数据包接入的重要参数,代表接入难度,而 $1/d$ 表示哈希计算通过率,即当前时隙设备可以进行数据包传输的概率。

在 B-RAN 网络中,设备必须遵循哈希接入协议才能传输数据包.假设在 B-RAN 网络中存在 M 个隶属于多方的子网络,各个子网络拥有的信道数和设备数分别为 $n_{c,1}, n_{c,2}, \dots, n_{c,M}$ 和 $n_{d,1}, n_{d,2}, \dots, n_{d,M}$,信道总数和设备总数分别为 n_c 和 n_d .每个子网络内的接入请求均由己方基站进行管理并负责处理.在本文的系统中,假设设备的缓存队列是无限长的,数据包到达设备缓存队列的概率服从伯努利分布,即

$$\Pr\{X=k\} = \begin{cases} 1-\zeta, & k=0 \\ \zeta, & k=1 \\ 0, & k=2,3,\dots \end{cases} \quad (2)$$

其中,随机变量 X 是设备在一个时隙到达的数据包数量; ζ 表示当前时隙有一个数据包到达的概率.

3 哈希接入建模分析

上节介绍了哈希接入协议的系统模型和数据包模型,本节主要介绍哈希接入系统的性能指标,对数据包成功传输概率和网络吞吐量进行理论分析.尽管文献[12]建立了哈希接入机制的初步模型,但本文所研究的设备队列模型是无限长的,可以从数据包的视角建立一种更简单的数学模型,用于性能分析.

3.1 基于数据包的马尔可夫转移过程

在 B-RAN 中,网络中数据包到达设备的缓存队列后,将发生以下的状态转移,其马尔可夫状态转移过程如图 2 所示.

在图 2 中, S_0 表示数据包到达设备缓存队列后处于待传输的状态; S_1 表示数据包到达设备缓存队列后进行传输尝试但发生碰撞,即传输未成功仍然保留在设备缓存队列中,处于重传状态; p_s 表示数据包成功传输的概率.

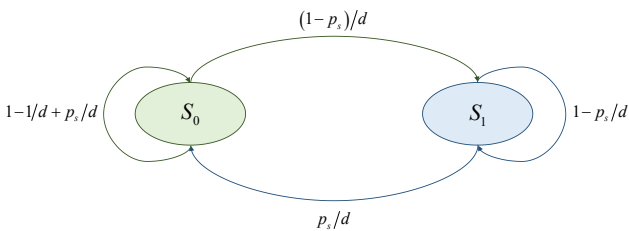


图 2 数据包状态转移过程

3.2 哈希接入性能分析

本节将针对哈希接入的性能指标开展分析.首先,数据包成功传输概率 p_s 是反映系统接入状况的重要指标.定义系统的服务率 μ 为处于待传输或者重传状态的数据包的成功接入概率:

$$\mu = \frac{(\pi_0 + \pi_1)p_s}{d} = \frac{p_s}{d} \quad (3)$$

其中, π_0 和 π_1 分别表示稳定状态下数据包处于待传输

和重传状态的概率.为了方便直接地描述系统的网络负载状况,本文定义一个系统负载强度 ρ 如下:

$$\rho = \frac{\zeta}{\mu} = \frac{d\zeta}{p_s} \quad (4)$$

从物理意义上看,负载强度 ρ 表示当前数据包平均到达率与系统服务率的比值,从侧面反映了当前系统条件能否容纳当前的网络流量.一般来说,若 $\rho < 1$,当前系统条件足以处理当前的接入请求;若 $\rho \geq 1$,表示当前系统已处饱和状态.

而在哈希接入系统中,设备的状态存在两种:一种是忙碌状态,即有数据包到达设备缓存队列并尝试进行接入;另外一种空闲状态,即设备缓存队列为空.将设备处于忙碌状态的概率记作 α .当系统处于低负载状态时,设备处于忙碌状态的概率为 ρ ;当系统处于饱和状态时,设备处于忙碌状态的概率为 1,即

$$\alpha = \begin{cases} \rho, & \rho < 1 \\ 1, & \rho \geq 1 \end{cases} \quad (5)$$

当同一时隙网络中至少有两台设备选择同一条信道传输数据时,便会发生数据传输冲突.设备传输数据包时发生碰撞的概率 p_{col} 应满足下式:

$$p_{col} = \sum_{i=1}^{n_c} p_{col,i} = \frac{\alpha}{n_c d} \quad (6)$$

其中, $p_{col,i}$ 表示在信道 i 发生数据传输冲突的概率.综合式(5)和式(6)可以得到数据包成功传输概率的表达式为

$$p_s = \begin{cases} \left(1 - \frac{\rho}{dn_c}\right)^{n_d-1}, & \rho < 1 \\ \left(1 - \frac{1}{dn_c}\right)^{n_d-1}, & \rho \geq 1 \end{cases} \quad (7)$$

不难发现,当 $\rho \geq 1$ 时,系统处于饱和状态, p_s 的值与 ρ 无关.因此综合式(4),可以得到 p_s 的完整表达式如下:

$$p_s = \begin{cases} \left(1 - \frac{\zeta}{p_s n_c}\right)^{n_d-1}, & \rho < 1 \\ \left(1 - \frac{1}{dn_c}\right)^{n_d-1}, & \rho \geq 1 \end{cases} \quad (8)$$

定义系统的网络吞吐量 T 为单位时间内数据包的平均成功传输数量,也可以理解为当前时隙可以成功接入的活跃设备数量,即

$$T = \frac{n_d \rho p_s}{d} = \begin{cases} n_d \zeta, & \rho < 1 \\ \frac{n_d}{d} \left(1 - \frac{1}{dn_c}\right)^{n_d-1}, & \rho \geq 1 \end{cases} \quad (9)$$

从式(9)可以看出,给定设备数和信道数的情况下,当网络中的负载强度较小时,吞吐量与设备数和数据包到达率成正比关系.此时网络未饱和,吞吐

量主要受网络流量影响,给定数据包到达率时,吞吐量是一个定值.当网络中负载强度较大时,此时网络饱和,网络吞吐量不再被负载影响,而是直接取决于接入难度.因此在大负载强度条件下优化吞吐量,需要合理设置接入难度参数,实现最大化网络吞吐量.

4 哈希接入动态分析与优化

上一节完成了对哈希接入性能的分析,本节将着重介绍哈希接入策略的动态优化方案.哈希接入难度参数的自适应调整是根据网络负载状况,以避免系统出现拥塞状况同时最优化吞吐量为目标设置的.

4.1 稳定性分析

上一节推导了单个子网络条件下的数据包成功传输的概率.然而式(8)在 $\rho < 1$ 条件下描述的是一种小负载条件下 p_s 的隐式表达式.实际上,即使网络负载较小,若接入难度选取过小,系统在同一时刻会有较多设备通过哈希计算尝试接入,增加了数据包碰撞概率,导致系统陷入拥塞的困境.因此,在负载强度较小时,为了避免系统出现拥塞,接入难度参数不能过小,需要进一步分析接入难度的下限阈值.本文认为,在小负载情况下,当系统的进入流量等于输出流量时,系统是稳定的.基于此,将通过 $\rho < 1$ 的成功接入概率 p_s 分析小负载强度下的系统稳定性.直观上看,小负载条件下的 p_s 表达式是一个隐函数,而当设备数足够大时,表达式渐进近似如下:

$$p_s = \left(1 - \frac{\xi}{p_s n_c}\right)^{n_d-1} \xrightarrow{n_d \rightarrow +\infty} \exp\left(-\frac{n_d \xi}{p_s n_c}\right) \quad (10)$$

从而,可以借助朗博函数对其函数性质展开研究^[17].首先,朗博函数有实数解的可行域为 $[-1/e, 0]$,因此,式(10)需满足:

$$-\frac{n_d \xi}{n_c} \geq -\frac{1}{e} \quad (11)$$

即数据包到达率的边界条件为 $[0, n_d/n_c e]$.为了直观呈现系统状态,如图3所示,将式(10)表述的隐式表达式根据以下函数绘制:

$$p_{t+1} = \exp\left(-\frac{n_d \xi}{p_t n_c}\right) \quad (12)$$

其中, p_t 表示 t 时刻的成功传输概率; p_{t+1} 表示 $(t+1)$ 时刻的成功传输概率.如图3所示,系统存在两个实数解,分别为

$$\begin{cases} p_L = \exp\left(\mathbb{W}_0\left(-\frac{n_d \xi}{n_c}\right)\right) \\ p_M = \exp\left(\mathbb{W}_{-1}\left(-\frac{n_d \xi}{n_c}\right)\right) \end{cases} \quad (13)$$

其中, p_L 表示较大的实数解; p_M 表示较小的实数解; \mathbb{W}_0 和 \mathbb{W}_{-1} 分别表示朗博函数 \mathbb{W} 的两个分支.

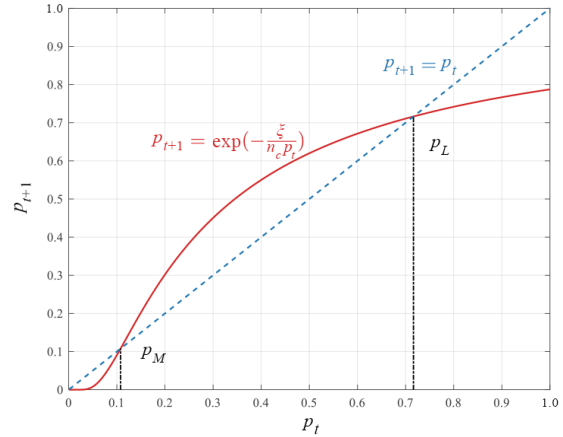


图3 网络未饱和时式(10)的 p_s 近似轨迹

根据朗博函数的性质^[17],假设当 p_t 落在不同的区间时, p_{t+1} 的函数变化如表1所示.从表1和图3中不难看出,当网络负载强度较小时,若 $p_s < p_M$,系统的数据包成功传输概率将会不断降低,最终会收敛到 $p_s = (1 - 1/dn_c)^{n_d-1}$,此种状态下虽然网络负载强度不大,但是由于接入难度太小导致数据包碰撞概率过高,系统处于拥塞状态;若 $p_s > p_M$,系统的数据包成功传输概率最终将会稳定在 p_L ,不难发现,较大的解 p_L 收敛,较小的解 p_M 并不稳定.因此,若要系统保持绝对的稳定,则需要设备传输数据包成功概率 p_s 始终保持在 $(p_M, 1]$.由于网络中的流量具备一定的复杂性和突发性,一个稳健的系统要求,即使当前网络流量波动很大,系统也必须保证稳定,因此数据包传输概率需保证:

$$\left(1 - \frac{1}{n_c d}\right)^{n_d-1} \geq p_M \quad (14)$$

即当小负载强度时,最小的接入难度应该满足以下关系:

$$d \geq \frac{1}{n_c \left(1 - \sqrt[n_d-1]{p_M}\right)} \quad (15)$$

可见,当负载强度 $\rho < 1$ 时,若接入难度选择式(15)给出的最小难度阈值,可以最大程度上保证系统处于稳定状态.

表1 哈希接入系统双稳态性质

区间	p_{t+1}
$(0, p_M]$	$p_{t+1} < p_t$
$(p_M, p_L]$	$p_{t+1} > p_t$
$(p_L, 1]$	$p_{t+1} < p_t$

4.2 吞吐量优化

上述分析给出了负载强度较小时为了保持系统稳定,接入难度参数设置的下限阈值.现在分析负载强度较大,即当负载强度 $\rho=1$ 时接入难度的设置方案.负载强度较大时的网络处于饱和状态,网络吞吐量的表达式为

$$T = n_d r \left(1 - \frac{r}{n_c}\right)^{n_d-1} \quad (16)$$

其中, $r=1/d$,代表设备计算出符合条件的哈希值概率,是接入难度参数的倒数.此时,系统处于饱和状态,已经无法完全处理所有的数据包,吞吐量是关于 r 的函数.将式(16)对 r 求导:

$$\frac{dT}{dr} = n_d \left(1 - \frac{rn_d}{n_c}\right) \left(1 - \frac{r}{n_c}\right)^{n_d-2} \quad (17)$$

$T(r)$ 在 $r < n_c/n_d$ 时单调递增,在 $r > n_c/n_d$ 时单调递减.因此在 $r = n_c/n_d$ 时,系统取得最大吞吐量,故大负载条件下为了缓解拥塞,最优的接入难度为 $d^* = n_d/n_c$.

综合式(14)和式(17)可以得到不同负载强度下的哈希接入动态调整策略,在负载强度较小时设置合理的接入难度保持系统稳定,负载强度较大时最大化吞吐量,可以给出接入难度参数动态控制的表达式如下:

$$d^* = \begin{cases} \frac{1}{n_c \left(1 - \frac{n_d-1}{\sqrt{\rho_M}}\right)}, & \rho < 1 \\ \frac{n_d}{n_c}, & \rho \geq 1 \end{cases} \quad (18)$$

接入难度在采用式(18)的动态调整策略下,网络的最优吞吐量 T^* 可以表示如下:

$$T^* = \begin{cases} n_d \xi, & \rho < 1 \\ n_c \left(1 - \frac{1}{n_d}\right)^{n_d-1}, & \rho \geq 1 \end{cases} \quad (19)$$

根据式(19)可以看出:小负载强度时,合理设置接入难度的下限阈值,可以避免系统陷入拥塞状态,保证系统稳定状态下的吞吐量是定值;大负载强度时,通过接入难度限制同一时隙尝试接入的设备数,从而最大化网络吞吐量.

5 跨网络负载均衡

上一节研究了哈希接入策略的动态调整方案.然而,B-RAN是包含大量子网络的融合网络,因此,本节将重点讨论哈希接入在跨网络场景中的负载均衡策略.假设B-RAN网络包含 M 个子网络,共同承担处理所有IoT设备的免授权接入流量.如第2节所述,每个子网络分别有 $n_{c,i}$ 条信道.每个子网络设置各自的目标哈希值和相应的接入难度参数,其中第 i 个子网络的接

入难度系数记作 d_i .当设备计算出的哈希值满足第 i 个子网络设置时,设备便可以使用该子网络所拥有的 $n_{c,i}$ 个信道资源进行数据包传输.

在B-RAN中,每个子网络拥有的频谱信道数不同,处理接入请求的能力也不同,在这样的条件下,子网络会基于自身信道资源数量设置对应的目标哈希值和接入难度参数.一般来说,信道数少的子网络,所能服务的设备较少,处理接入请求的能力较弱,因此需要设置较高的接入难度;信道数多的子网络所能服务的设备较多,处理接入请求的能力较强,因此可以设置较低的接入难度.不妨将子网络按照规模大小排列 $n_{c,1} \leq n_{c,2} \leq \dots \leq n_{c,M}$.若第 i 个子网络设置的接入门限哈希值为 h_i ,则有 $h_1 \leq h_2 \leq \dots \leq h_M$,如图4所示.同理,对于第 i 个子网络的接入难度系数 $d_i = h_m/h_i$,存在关系 $d_1 \geq d_2 \geq \dots \geq d_M$.引入变量 $r_i = 1/d_i = h_i/h_m$,代表得到哈希值满足第 i 个子网络接入难度的概率.根据图4可知,当得到的哈希值小于 h_i 时,设备可以从第 i 个至第 M 个子网络的信道集合中随机选择一条进行数据传输.令此时可选信道总数为 n_i ,即

$$n_i = \sum_{k=i}^M n_{c,k} \quad (20)$$

假设备A在第 i 个至第 M 个子网络中选择了第 k 个子网络进行数据传输.若此时设备B选择了第 $(k+1)$ 个至第 M 个子网络进行传输,则设备A与设备B不会发生传输冲突.若设备A与设备B发生传输冲突的情况,那么设备B计算哈希值应当满足第 k 个子网络的要求而小于 h_k ,此时其可选信道总数为 n_k .若设备B得到哈希值接入第 j 个子网络($j \leq k$),则设备A与设备B可能发生传输冲突,其概率为 $\rho(\Delta r_j/n_j)$.因此,设备A在第 k 个子网络传输数据时,与设备B发生碰撞的概率为

$$p_{\text{col}} = \rho \left(\sum_{j=1}^k \frac{\Delta r_j}{n_j} \right) \quad (21)$$

其中, $\Delta r_j = r_j - r_{j-1}$ 表示计算哈希值满足第 j 个子网络要求但不满足第 $j-1$ 个子网络要求的概率,并且 $r_0 = 0$.此时,设备A在第 k 个子网络传输数据时,成功发送的概率为

$$p = \left(1 - \rho \left(\sum_{j=1}^k \frac{\Delta r_j}{n_j} \right) \right)^{n_d-1} \quad (22)$$

而设备A在得到的哈希值小于 h_i 时,选择第 k 个子网络信道的概率是 $n_{c,k}/n_i$.此时,设备A可选第 i 个子网络到第 M 个子网络中任一子网络,其成功传输概率为

$$p_{s,i} = \Delta r_i \sum_{k=i}^M \frac{n_{c,k}}{n_i} \left(1 - \rho \left(\sum_{j=1}^k \frac{\Delta r_j}{n_j} \right) \right)^{n_d-1} \quad (23)$$

结合设备A计算哈希值成功发送的概率,得到成

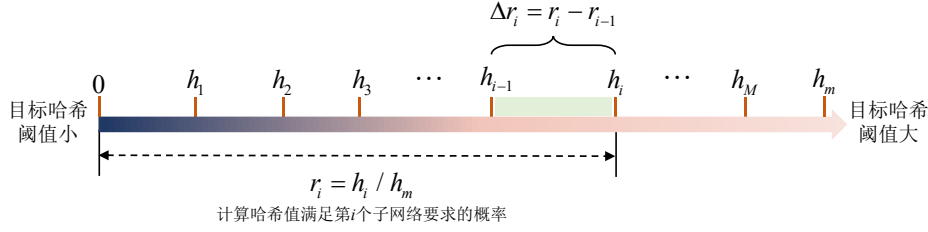


图4 子网络目标哈希阈值分段图

功传输概率为

$$p_s = \sum_{i=1}^M \Delta r_i \left(\sum_{k=i}^M \frac{n_{c,k}}{n_i} \left(1 - \left(\sum_{j=1}^k \frac{\Delta r_j}{n_j} \right)^{n_d-1} \right) \right) \quad (24)$$

结合网络负载强度,可以得到系统网络吞吐量为

$$T = \begin{cases} n_d \zeta, & \rho < 1 \\ n_d \sum_{i=1}^M \Delta r_i \left(\sum_{k=i}^M \frac{n_{c,k}}{n_i} \left(1 - \left(\sum_{j=1}^k \frac{\Delta r_j}{n_j} \right)^{n_d-1} \right) \right), & \rho \geq 1 \end{cases} \quad (25)$$

在上述子网络接入难度设置条件下,所有流量可以通过哈希接入的方式准许接入不同子网络.如何优化子网络接入难度参数设置,使得网络整体吞吐量最大,可以得到以下优化问题:

$$\underset{d_1, d_2, \dots, d_M}{\text{maximize}} \quad T \quad (26)$$

上述优化问题形式较复杂,但是本文通过以下定理指出其最优解.

定理 1 网络饱和 $\rho \geq 1$ 时,将各个独立的子网络资源整合,设置统一的接入难度 $d_1 = d_2 = \dots = d_M$,形成一个融合网络,能够提升网络吞吐量.此时,网络整体的最优接入难度为 $d^* = n_d / n_c$.

证明 系统处于小负载条件下,吞吐量仅受网络容量限制.因此仅考虑网络负载处于大负载条件下时,即 $\rho \geq 1$ 时,系统吞吐量在大负载条件下吞吐量计算式(25)可以改写为

$$\begin{aligned} \frac{T}{n_d} &= \Delta r_1 \left(\frac{n_{c,1}}{n_1} \left(1 - \frac{\Delta r_1}{n_1} \right)^{n_d-1} + \frac{n_{c,2}}{n_1} \left(1 - \left(\frac{\Delta r_1}{n_1} + \frac{\Delta r_2}{n_2} \right) \right)^{n_d-1} + \dots \right) \\ &+ \Delta r_2 \left(\frac{n_{c,2}}{n_2} \left(1 - \left(\frac{\Delta r_1}{n_1} + \frac{\Delta r_2}{n_2} \right) \right)^{n_d-1} + \dots \right) + \dots \\ &+ \Delta r_M \left(\sum_{k=M}^M \frac{n_{c,M}}{n_k} \left(1 - \left(\sum_{j=1}^k \frac{\Delta r_j}{n_j} \right) \right)^{n_d-1} \right) \end{aligned} \quad (27)$$

针对式(27),分别以 $n_{c,1}, n_{c,2}, \dots, n_{c,M}$ 为公共项合并同类项,可得

$$\begin{aligned} \frac{T}{n_d} &= n_{c,1} \left(\frac{\Delta r_1}{n_1} \right) \left(1 - \frac{\Delta r_1}{n_1} \right)^{n_d-1} \\ &+ n_{c,2} \left(\frac{\Delta r_1}{n_1} + \frac{\Delta r_2}{n_2} \right) \left(1 - \left(\frac{\Delta r_1}{n_1} + \frac{\Delta r_2}{n_2} \right) \right)^{n_d-1} \quad (28) \\ &+ \dots + n_{c,M} \left(\sum_{i=1}^M \frac{\Delta r_i}{n_i} \right) \left(1 - \left(\sum_{i=1}^M \frac{\Delta r_i}{n_i} \right) \right)^{n_d-1} \end{aligned}$$

考虑上述吞吐函数的结构,引入一个辅助函数:

$$y(x) = x(1-x)^{n_d-1} \quad (29)$$

接下来,对 $y(x)$ 求导,可得

$$y'(x) = (1-x)^{n_d-2} (1 - n_d x) \quad (30)$$

不难发现,当 x 满足 $x < 1/n_d$ 时, $y(x)$ 始终单调递增;当 x 满足 $x > 1/n_d$ 时, $y(x)$ 始终单调递减.因此,当且仅当

$$\frac{\Delta r_1}{n_1} = \frac{\Delta r_1}{n_1} + \frac{\Delta r_2}{n_2} = \dots = \sum_{i=1}^M \frac{\Delta r_i}{n_i} = \frac{1}{n_d} \quad (31)$$

等号成立,网络吞吐量最大.此时,最大的网络吞吐量为

$$T \leq \sum_{i=1}^M n_{c,i} \left(1 - \frac{1}{n_d} \right)^{n_d-1} = n_c \left(1 - \frac{1}{n_d} \right)^{n_d-1} = T^* \quad (32)$$

对于各个子网络,有

$$d_1 = d_2 = \dots = d_M = \frac{n_d}{n_c} \quad (33)$$

所有子网络的设置接入难度参数为 $d^* = n_d / n_c$ 时,可以取得最大的网络吞吐量.证毕

以上定理表明,所有子网络共同承担处理所有 IoT 设备的接入流量时,最优的资源整合方案是融合所有子网络的信道资源形成一个大网络,统一接入难度,共同为网络范围内的设备提供接入服务.资源整合后获取的最大网络吞吐量,与单一网络的最大吞吐量式(19)一致.

哈希接入跨网络整合管理各个子网络的信道和流量,促进了资源的高效利用.哈希接入正是为这些割裂的无线资源提供了统一的接入架构,无差别地提供了资源和服务,确保了充分利用网络中的无线资源.因此,哈希接入能够很好地整合资源进行负载均衡,保障底层接入的公平有序.这充分体现了哈希接入聚合无

线资源的优势,有效地平衡子网络之间的负载,提高了无线资源的利用率.

6 跨网络资源整合再调配

6.1 设备分组网络

上一节的结果表明,跨网络整合无线资源可以通过池化资源提升网络吞吐量.然而,当允许流量被进一步分组至不同子网络,哈希接入协议能够在整合的基础上调配网络中的设备和信道资源,从而进一步提高B-RAN网络的资源利用率.本节考虑在跨网络场景中,通过设备分组接入的方式以进一步提升网络整体的吞吐量和接入公平性.给出以下定理说明设备分组对网络吞吐量的有益效果.

定理 2 在每个子网络负载完全平衡且流量饱和 $\rho \geq 1$ 的前提下,设备分组的网络其吞吐量优于未对设备分组的网络.

证明 考虑流量均衡以及设备分组后,第 i 个子网络根据信道数 $n_{c,i}$ 和设备数 $n_{d,i}$ 设置最优难度值,单个子网络的最优吞吐量如式(19)所示,记作 T_i^* . 因此,网络整体的吞吐量如下:

$$T_{\text{sum}} = \sum_{i=1}^M T_i^* = \sum_{i=1}^M n_{c,i} \left(1 - \frac{1}{n_{d,i}}\right)^{n_{d,i}-1} \quad (34)$$

为了方便计算,引入辅助函数:

$$F(x) = \left(1 - \frac{1}{x}\right)^{x-1} \quad (35)$$

对 $F(x)$ 求导可得:

$$F'(x) = F(x) \left(\ln\left(1 - \frac{1}{x}\right) + \frac{1}{x} \right) \quad (36)$$

由于

$$\left(\ln\left(1 - \frac{1}{x}\right) + \frac{1}{x} \right)' = \frac{1}{x(x-1)} - \frac{1}{x^2} > 0 \quad (37)$$

因此式(36)一定满足:

$$F'(x) < F(x) \lim_{x \rightarrow +\infty} \left(\ln\left(1 - \frac{1}{x}\right) + \frac{1}{x} \right) = 0 \quad (38)$$

所以 $F(x)$ 单调递减. 基于式(34),存在如下关系:

$$\begin{aligned} T_{\text{sum}} &= \sum_{i=1}^M n_{c,i} \left(1 - \frac{1}{n_{d,i}}\right)^{n_{d,i}-1} > \sum_{i=1}^M n_{c,i} \left(1 - \frac{1}{n_d}\right)^{n_d-1} \\ &= n_c \left(1 - \frac{1}{n_d}\right)^{n_d-1} \end{aligned} \quad (39)$$

可以得到合适的均衡后设备分组网络的吞吐量优于未分组的融合网络. 证毕.

从定理2可以看出,在负载完全平衡的基础上,对哈希接入整合网络资源形成的融合网络进行设备分组,能够进一步提升所形成的分组网络的吞吐量.在保证负载完全平衡的前提下,所划分的子网络数越多,所

带来的吞吐量提升将越明显.

6.2 公平分组接入

在调配子网络资源时,网络整体吞吐量是一个重要的指标.然而,对于B-RAN这种包含大量子网络的融合网络而言,均衡子网络负载,合理调配资源,有效地保证公平接入同样重要.因此在本节中,基于最大化最小网络吞吐量的原则,深入探索更合理的设备和信道分配方案,以最大化性能最差的子网络吞吐量为目标,此优化问题可以表达成如下形式:

$$\begin{aligned} &\text{maximize} \quad \min_{\{n_{d,i}\}, \{n_{c,i}\}} \{T_1, T_2, \dots, T_M\} \\ &\text{subject to} \quad \sum_{i=1}^M n_{d,i} = n_d, \quad \sum_{i=1}^M n_{c,i} = n_c \end{aligned} \quad (40)$$

为了解决这一优化问题,本文给出如下定理.

定理 3 网络饱和 $\rho \geq 1$ 时,平均分配信道数和设备数,即 $\bar{n}_c = n_c/M$ 且 $\bar{n}_d = n_d/M$ 时,能够使得优化问题式(40)最优,即最小吞吐量最大化.

证明 假设 $n_{c,1} \leq n_{c,2} \leq \dots \leq n_{c,M}$. 采用反证法证明,假设定理3不正确,即存在调配方案使得其吞吐量最小的子网络优于平均分配方案的最小吞吐量子网络.平均分配网络的各个子网络吞吐量一致,均为 $\bar{n}_c F(\bar{n}_d)$,因此可以得到

$$\begin{aligned} n_{c,1} F(n_{d,1}) &> \bar{n}_c F(\bar{n}_d), \quad i=1 \\ n_{c,2} F(n_{d,2}) &> \bar{n}_c F(\bar{n}_d), \quad i=2 \\ &\vdots \\ n_{c,M} F(n_{d,M}) &> \bar{n}_c F(\bar{n}_d), \quad i=M \end{aligned} \quad (41)$$

对于任意子网络,显然 $n_{d,i} > n_{c,i}$ 成立. 式(38)证明了 $F(x)$ 单调递减,所以对于任意的子网络, $n_{c,i} F(n_{c,i}) > n_{c,i} F(n_{d,i}) > \bar{n}_c F(\bar{n}_d)$ 总是成立. 对 $F(x)$ 求二阶导,可得

$$F''(x) = F'(x) \left(\ln\left(1 - \frac{1}{x}\right) + \frac{1}{x} \right) + F(x) \left(\frac{1}{x(x-1)} - \frac{1}{x^2} \right) \quad (42)$$

而且 $\ln(1-1/x) + 1/x < \lim_{x \rightarrow +\infty} (\ln(1-1/x) + 1/x) = 0$, 因此显然有 $F''(x) > 0$. 现在,构造一个新的辅助函数:

$$f(x) = xF(x) - \frac{n_c}{M} F\left(\frac{n_d}{M}\right) \quad (43)$$

显然有 $f(n_c/M) > 0$. 对 $f(x)$ 求导,可得

$$f'(x) = F(x) \left(x \ln\left(1 - \frac{1}{x}\right) + 2 \right) \quad (44)$$

可以观察到 $x \ln(1-1/x) + 2$ 显然是单调递增的,故其满足 $1 > x \ln(1-1/x) + 2 > 0$, 所以可得 $f'(x) > 0$. 在此基础上,再次构造一个辅助函数:

$$G(x) = xF(x) - (x+1)\frac{1}{e} \quad (45)$$

对 $G(x)$ 求导, 可得

$$G'(x) = F(x)\left(x \ln\left(1 - \frac{1}{x}\right) + 2\right) - \frac{1}{e} \quad (46)$$

对 $G(x)$ 求二阶导, 可得

$$G''(x) = F'(x)\left(x \ln\left(1 - \frac{1}{x}\right) + 2\right) + F(x)\left(\ln\left(1 - \frac{1}{x}\right) + \frac{1}{x-1}\right) \quad (47)$$

已知 $F'(x) < 0$ 且 $0 < x \ln(1 - 1/x) + 2 < 1$, 因此可以发现:

$$G''(x) > F'(x) + F(x)\left(\ln\left(1 - \frac{1}{x}\right) + \frac{1}{x-1}\right) = F(x)\left(2\ln\left(1 - \frac{1}{x}\right) + \frac{1}{x-1} + \frac{1}{x}\right) \quad (48)$$

因此,

$$\left(2\ln\left(1 - \frac{1}{x}\right) + \frac{1}{x-1} + \frac{1}{x}\right)' = \frac{2}{x(x-1)} - \frac{1}{x^2} - \frac{1}{(x-1)^2} < 0 \quad (49)$$

所以有 $G''(x) > 0$, 即 $G'(x)$ 单调递增. 并且因为 $G'(x) < 0$, $G(x)$ 在其定义域内单调递减, 能得到 $G(x) < G(2) < 0$, 所以对于 $G(n_d/M - 1) < 0$, 故有 $(n_d/M - 1)F(n_d/M - 1) - (n_d/M)F(n_d/M) < 0$. 显然, $(n_d/M - 1)F(n_d/M - 1) < (n_d/M)F(n_d/M)$, 所以 $f(n_d/M - 1) < 0$. 至此发现 $f(x)$ 唯一的零点位于 $(n_d/M - 1, n_d/M)$.

通过对 $f(x)$ 的论述, 发现式(41)成立的前提: $n_c/M - 1 < n_{c,i} < n_c/M$. 所有的子网络都需要满足这一条件, 那么显然有

$$n_c - M < \sum_{i=1}^M n_{c,i} < n_c \quad (50)$$

这与题设 $\sum_{i=1}^M n_{c,i} = n_c$ 矛盾, 因此假设错误. 可以得到 $n_{c,1} = n_{c,2} = \dots = n_{c,M} = n_c/M$ 为最优. 当信道数满足平均分配时, 进一步地, 由 $F(x)$ 是单调函数, 那么, 当且仅当设备数也满足平均分配 $n_{d,1} = n_{d,2} = \dots = n_{d,M} = n_d/M$ 时, 可以取得最佳接入公平性. 证毕.

上述论述说明, 平均分配子网络信道数与设备数能够最大化子网络的最小吞吐量, 达到最公平的网络整体性能. 在这样的分配方案下, 若将大网络分割成 M 个子网络, 其系统总的吞吐量为

$$T = \begin{cases} n_d \zeta, & \rho < 1 \\ n_c \left(1 - \frac{M}{n_d}\right)^{\frac{n_d}{M} - 1}, & \rho \geq 1 \end{cases} \quad (51)$$

式(51)中的大负载条件下的吞吐量表达式跟子网络数 M 正相关, M 越大, 系统总体吞吐量越大. 然而对于现实而言, 存在无法平均分配的情况, 即设备数或者信道数无法被子网络数量整除的. 针对设备数无法整除的情况, 可以将设备最大程度平均分配到各个子网络, 余下的设备以相同的概率随机选取子网络接入. 即, 先为每个子网络分配 $\lfloor n_d/M \rfloor$ 台设备, 对于余下的设备则以 $1/M$ 的概率随机选取任意基站接入.

7 仿真结果及分析

本节通过仿真结果验证哈希接入的性能, 说明跨网络整合与资源再调配的性能提升. 在以下的仿真中, 本文采用 Matlab 对哈希接入协议进行仿真, 根据长期演进(Long Term Evolution, LTE)中物理随机接入信道的设置, 将时隙时间统一设置为 5 ms, 将网络内的设备总数设置为 100, 并将设备队列统一采用无限长队列, 仿真所用的网络流量强度用 ζ 表征. 仿真中所用到的未均衡网络参数统一设置成 4 个子网络: 信道数分别为 2、6、8、16; 设备数分别为 15、35、30、20. 通过分析系统数据包成功传输概率、网络吞吐量和信道利用率等性能指标来证明本文所提方案的优越性. 图中线条代表理论值, 实心点表示仿真值.

图 5 是当信道数 $n_c = 4$, 系统设备的初始队列为 10 时, 哈希接入过程中数据包成功传输概率随接入难度变化的仿真结果. 从图中可以看出, 当每设备一个时隙到达数据包数目 $\zeta < n_d/n_d e \approx 0.0147$ 时, 接入难度参数小于临界值时, 系统处于碰撞率较高的拥塞状态, 此时数据包成功传输概率很低; 当接入难度参数大于临界值时, 系统最终会回到成功传输概率较高的稳态. 而当 $\zeta > n_d/n_d e$ 时, 无论接入难度怎么取, 系统都处于饱和状态, 此时数据包传输概率是随接入难度单调递增的函数关系. 可见, 接入难度参数是影响哈希接入稳定性的重要条件, 根据网络负载条件合理调整接入难度, 可以保证系统始终处于较高传输概率的稳定点.

图 6 体现了 B-RAN 利用哈希接入协议跨网络整合优化无线资源的结果. 从图中不难发现, 本文所提跨网络负载均衡方案可以在一定程度上缓解轻载条件下的拥塞状况, 然而饱和情况下的吞吐量表现并不是很出色. 网络负载较大时, 即使在每个子网络设置最优的接入参数, 也难以支持数目庞大的接入请求, 未均衡的网络中可能存在某些子网络信道数很多但设备数很少的情况, 这样的子网络在负载较大时可以维持一定的性能

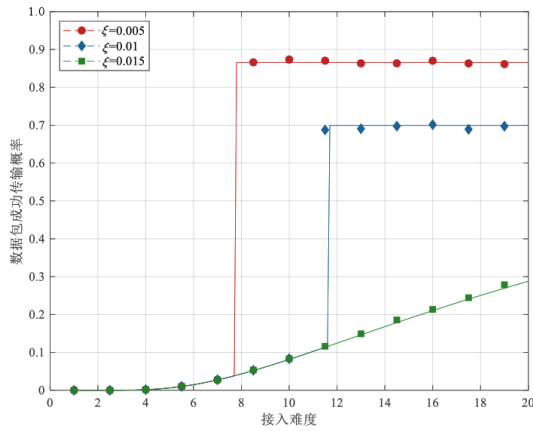


图5 哈希接入稳态接入难度阈值

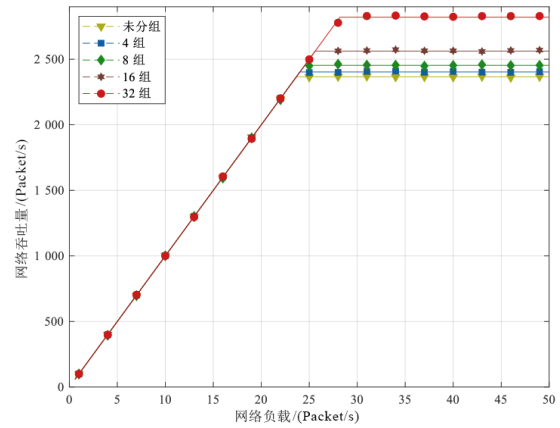


图7 分组接入的网络吞吐量

表现,然而其他子网络已经严重拥塞. 而经过优化后的负载均衡方案,也就是将网络中的所有无线资源整合进一个大网络,促进了基站相互协作,即B-RAN整合所有信道和设备资源实现统一接入,其性能较之前有较大提升,有效地均衡了网络负载,提升系统整体的吞吐量.

率非常低,系统网络负载极其不平衡;而采用本文提出的分组方案将100个设备和32个信道平均分成8个子网络,使用哈希接入跨网络负载均衡的方案,整合无线资源提供统一的接入架构,有效地利用了网络负载较轻的子网络的信道资源均衡网络负载较重的子网络. 而采用分组网络整合再调配资源的方案,可以在整合优化网络的基础上进一步提升网络性能,更加高效地均衡了不平衡的网络负载.

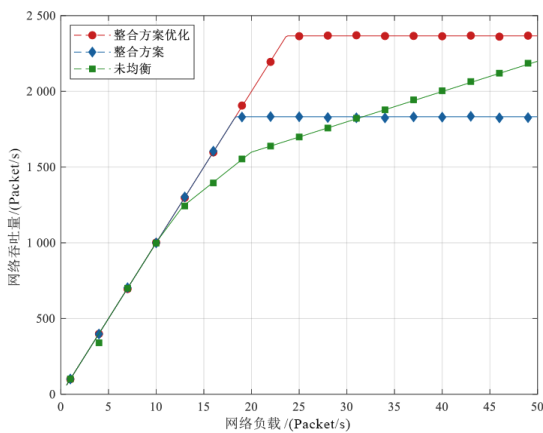


图6 B-RAN整合资源的优势

图7展示了B-RAN利用哈希接入协议整合再调配无线资源的结果. 从图中可以明显看出,在信道数 $n_c=32$ 的大网络内,将系统分成32组、16组、8组、4组和未分组,系统在网络负载强度较低时,系统吞吐量都是相同的,然而系统划分组数越多,网络饱和阈值越高,网络整体吞吐量也越大. 因此,将设备和信道再调配后,系统的整体吞吐量明显优于整合之前的大网络. 在负载完全平衡的前提下,将整个网络调配成32个包含单信道的分组网络时,可以取得最大的系统吞吐量.

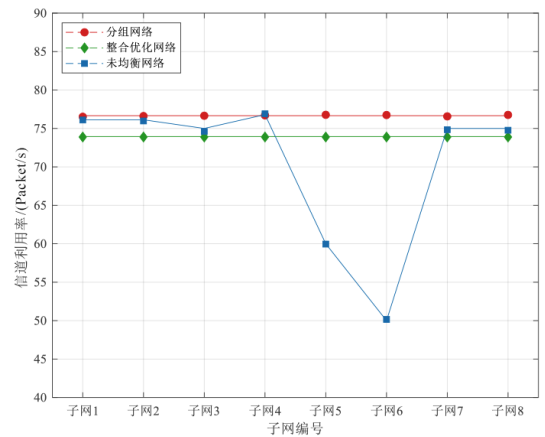


图8 分组接入的公平性体现

图8展示了本文所提整合和调配网络资源方案均衡网络负载的效果. 图8所用的信道利用率指标,本文采用单位信道的吞吐量来表征. 可以看出,网络负载在未均衡时,各个子网络的信道利用率差异很大,子网络4的信道利用率较高,子网络5和子网络6的信道利用

8 结论

在跨网络的免授权接入场景中,哈希接入协议可以规范底层IoT设备的接入行为,保障多源网络设备接入的公平性. 本文在此基础上,提出哈希接入协议动态优化策略,缓解设备激增导致的网络拥塞问题. 本文提出的哈希接入动态优化策略可以在网络负载强度较小时保证系统的稳定性,在负载强度较大时保证网络吞吐量最大化. 而在跨网络场景中,本文进一步提出哈希接入负载均衡方案和资源整合再调配策略:负载均衡方案通过跨网络整合无线资源为网络内的设备提供统

一的接入服务,有效地均衡了不平衡的网络负载;资源整合再调配策略将网络设备分组,通过合理配置信道和设备,在保障设备接入的公平性的前提下,进一步提升了复杂多源网络的接入能力。

参考文献

- [1] WÓJCICKI K, BIEGA SKA M, PALIWODA B, et al. Internet of Things in industry: Research profiling, application, challenges and opportunities—A review[J]. *Energies*, 2022, 15(5): 1806.
- [2] JIANG W, HAN B, HABIBI M A, et al. The road towards 6G: A comprehensive survey[J]. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 2021, 2: 334-366.
- [3] 安建平, 李建国, 于季弘, 等. 空天通信网络关键技术综述[J]. *电子学报*, 2022, 50(2): 470-479.
AN J P, LI J G, YU J H, et al. Key technologies of space-air-ground communication networks: A survey[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2022, 50(2): 470-479. (in Chinese)
- [4] YOU X H, WANG C X, HUANG J, et al. Towards 6G wireless communication networks: Vision, enabling technologies, and new paradigm shifts[J]. *Science China Information Sciences*, 2021, 64: 110301.
- [5] 3GPP. RAN Improvements for Machine-type Communications: 37.868[S]. Sophia Antipolis Cedex: 3GPP, 2015.
- [6] 孙君, 万聪, 闵宝成, 等. 基于退避预测的ACB动态接入新方案[J]. *电子学报*, 2019, 47(12): 2544-2549.
SUN J, WAN C, MIN B C, et al. A novel dynamic ACB accessing scheme based on back-off prediction[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2019, 47(12): 2544-2549. (in Chinese)
- [7] LIEN S Y, LIAU T H, KAO C Y, et al. Cooperative access class barring for machine-to-machine communications[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2012, 11(1): 27-32.
- [8] HSU Y H, WANG K C, TSENG Y C. Enhanced cooperative access class barring and traffic adaptive radio resource management for M2M communications over LTE-A[C]//2013 Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference. Piscataway: IEEE, 2013: 1-6.
- [9] 司欣然. 基于分组的MTC接入控制和资源分配研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2021.
SI X R. Research on Group-based Access Control and Resource Allocation of MTC[D]. Xi'an: Xidian University, 2021. (in Chinese)
- [10] KYASANUR P, VAIDYA N H. Selfish MAC layer misbehavior in wireless networks[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2005, 4(5): 502-516.
- [11] LIU C F, SHU Y T, YANG W C, et al. Throughput modeling and analysis of IEEE 802.11 DCF with selfish node [C]//IEEE GLOBECOM 2008—2008 IEEE Global Telecommunications Conference. Piscataway: IEEE, 2008: 1-5.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] CORLESS R M, GONNET G H, HARE D E G, et al. On the LambertW function[J]. *Advances in Computational Mathematics*, 1996, 5(1): 329-359.

作者简介



谢 辉 男,1993年12月出生于安徽省池州市.2023年毕业于东南大学信息科学与工程学院.主要研究方向为随机接入、无线网络和区块链.

E-mail: huixie@seu.edu.cn



凌昕彤 男,2018年毕业于东南大学.现为东南大学移动通信国家重点实验室副教授.主要研究方向为移动通信、分布式系统、区块链技术、优化方法等.中国电子学会会员编号: E190024175M.

E-mail: xtling@seu.edu.cn



汪子涵 男,2000年7月出生于江苏省连云港市.2022年毕业于东南大学吴健雄学院.现就读于加州大学洛杉矶分校.

E-mail: zhwang2000@g.ucla.edu



王家恒 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国家重点实验室教授,博士生导师.主要研究方向为通信系统、无线网络、区块链等.在国际核心期刊与会议上发表论文170余篇.

E-mail: jhwang@seu.edu.cn