专题: IoT即服务-

doi:10.3969/j.issn.1003-3114.2024.04.001

引用格式:郭泓志, 詹文, 孙兴华. 5G 物联网接入及数据传输的跨层建模与性能分析[J]. 无线电通信技术, 2024, 50(4): 618-624. [GUO Hongzhi, ZHAN Wen, SUN Xinghua. Cross-layer Modeling and Performance Analysis of Access and Data Transmission in 5G for Internet of Things[J]. Radio Communications Technology, 2024, 50(4): 618-624.]

5G 物联网接人及数据传输的跨层建模与性能分析

郭泓志,詹 文,孙兴华

(中山大学 电子与通信工程学院,广东 深圳 518107)

摘 要:物联网设备数量的爆发式增长对5G 承载链路的建立和管理都带来了巨大的挑战。为有效支撑海量物 联网通信,综合考虑海量承载链路的建立、维持和释放过程,借助离散时间排队论,围绕5G 媒体接入控制(Medium Access Control, MAC)及无线资源控制(Radio Resource Control, RRC)层协议,对设备的随机接入和数据传输过程构建排队 模型。基于该模型,推导了能量效率和数据吞吐量等关键性能指标关于数据传输速率、节点数据到达率、不活跃定时 器等系统参数的数学表达式,并通过仿真进行了验证。为分析海量设备通信场景提供了跨协议层数学模型的支撑,对 该场景下网络参数配置方案的设计有重要指导意义。

关键词:跨层建模;随机接入;数据传输;性能分析;离散时间排队论

中图分类号:TN919.23 文献标志码: A 文章编号: 1003-3114(2024)04-0618-07 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Cross-layer Modeling and Performance Analysis of Access and Data Transmission in 5G for Internet of Things

GUO Hongzhi, ZHAN Wen, SUN Xinghua

(School of Electronics and Communication Engineering, Sun Yat-sen University, Shenzhen 518107, China)

Abstract: The explosive growth in internet of things devices poses great challenges for establishing and managing 5G bearer links. To effectively support massive internet of things communications, this paper comprehensively considers the processes of establishing, maintaining, and releasing massive bearer links. With the help of discrete time queuing theory, focusing on the 5G Medium Access Control (MAC) and Radio Resource Control (RRC) layer protocol, a queuing model is constructed for random access to devices and data transmission process. Based on this model, the mathematical expressions of key performance indicators such as energy efficiency and data throughput concerning system parameters such as data transmission rate, node data arrival rate and inactive timer are derived and verified by simulation. This paper provides a cross-protocol layer mathematical model to support the analysis of massive device communication scenarios. It has important guiding significance for designing network configuration schemes in such scenarios.

Keywords: cross-layer modeling; random access; data transmission; performance analysis; discrete-time queuing theory

0 引言

随着物联网行业的不断发展,无线设备数量也 呈现爆发式增长的趋势。用户在进行数据传输前需 要通过随机接入和基站、核心网建立连接^[1],因此 设备数量的爆发式增长导致基站要管理的数据承载 链路随之增长,给大规模数据承载链路的建立与管理带来了巨大挑战^[2]。

在承载链路的建立过程中,海量终端设备同时 发起随机接入请求会带来接入信道的拥塞,进而导 致接入性能的恶化。为了解决大规模随机接入的拥 塞问题,部分研究根据媒体接入控制(Media Access

收稿日期:2024-03-20

基金项目:深圳市科技计划资助项目(RCBS20210706092408010);广东省基础与应用基础研究基金(2024A1515012015)

Foundation Item: Shenzhen Science and Technology Program (RCBS20210706092408010); Guangdong Basic and Applied Basic Research Foundation (2024A1515012015)

专题: IoT即服务

Control,MAC)层协议对承载链路的建立过程进行建 模与性能分析,聚焦大规模随机接入的性能优化问 题^[3-8]。其中,文献[3-5]通过刻画设备缓冲区的 队首数据包行为,推导出接入请求稳态成功传输概 率、接入吞吐量的显式表达式,进而求解得到吞吐量 最大化^[4-5]、接入时延最小化^[3]时的最佳退避参数 设置方案。本质上是利用退避机制将并发的大规模 接入需求在时域上进行稀释来解决大规模随机接入 的拥塞问题。而文献[6-8]通过物理层的机制改进 来解决接入网络拥塞问题,利用多智能体集群接入 技术^[6]、非正交多址接入的功率域复用与连续干扰 消除技术^[7]和接入前导码的设计^[8]来优化接入网 络性能。但是大多简化了数据传输过程太简化了承 载链路的管理过程,忽视了数据传输过程对随机接 入过程的影响。

另一方面,设备数量的爆发式增长同样给承载 链路的维护与管理带来了巨大的挑战。数据传输过 程中,网络端既要合理调度时频资源以提高数据传 输效率^[9],又要及时地释放不活跃的承载链路以提 高用户的能量效率^[10]。部分研究以无线资源控制 (Radio Resource Control, RRC)协议层为切入点,通 过模拟实验的方式来探究 RRC 层参数对能量效率 的影响^[11-13],但是缺乏理论上的分析,且大多忽略 承载链路建立过程。

以往的研究大多将随机接入和数据传输视为 两个相互独立的过程,但实际上,随机接入和数据传 输的关系密不可分,二者相互影响。例如,如果接入 网络参数设置不当,大量用户将在随机接入过程竞 争碰撞,基站无法成功解码用户的接入请求,导致传 输网络大量数据传输资源处于空闲状态。另一方 面,若数据传输网络的参数设置不当,也会影响到随 机接入过程。例如当传输资源不足时,即使基站成 功解码了用户的连接建立请求,也会因传输资源受 限而拒绝用户的接入,这不仅会恶化接入性能,还会 给网络和用户带来巨大的信令开销,加剧网络端和 用户端的负担。

因此,综合考虑承载链路的建立、维持和释放过 程,建立统一的分析框架是解决上述问题的必经之 路。文献[14]运用离散时间排队论对蜂窝网络中 的海量机器设备的接入和数据传输过程进行了建 模,分析得到了该场景下信道利用率和信令开销的 显式表达式。文献[14]虽然综合考虑了随机接入 和数据传输过程,但是却忽视了基站能建立的承载 链路数是有限的。文献[15]讨论了承载链路数有 限场景下的海量设备通信的上行数据传输资源分配 问题,推导出了不同分配方案下的拒绝接入概率和 网络吞吐量。虽然综合考虑了随机接入和数据传输 过程,但简化了承载链路的释放过程,认为一旦完成 数据传输就立即释放连接,忽视了 RRC 协议层参数 如不活跃定时器的影响。

综上所述,在有限的数据传输资源和网络协调 信令资源下,如何综合考虑海量承载链路的建立、维 持和释放过程,为海量终端通信的性能分析提供数 学模型支撑,是尚待解决的问题。

本文旨在为上述问题提供解决方案。本文结合 海量设备的随机接入和数据传输过程,建立了跨 MAC 协议层和 RRC 协议层的统一分析框架。在数 据传输资源有限的假设下,以非空闲服务台个数为 研究对象进行马尔科夫分析,得到非空闲服务台的 稳态分布 II。基于该稳态分布,推导出了能量效率 η (成功传输的数据包总个数与用户总能量消耗的 比值)、数据吞吐量 λ^{d}_{aut} 的数学表达式,揭示了数据 传输速率 μ 、节点数据到达率 γ 等 MAC 层参数和 RRC 层参数如不活跃定时器 T_{in} 对性能的影响。本 文研究显示,当接入网络的接入需求较低时,可以适 当提高不活跃定时器 Tin,提高数据传输资源的利用 率,以获得较高的数据吞吐量和能量效率。但是当 网络接入需求较大,数据传输资源供不应求时,应当 适当降低不活跃定时器 Tin,及时释放数据传输需求 较低的轻流量节点的承载链路,避免轻流量节点长 时间占据着数据传输资源,导致的接入性能恶化、传 输性能降低。

1 系统模型

根据 5G 标准^[16],用户只有进入 RRC 连接态, 与基站建立连接后才能进行数据传输,此时基站会 为连接态用户分配上行汇报资源用于数据传输,并 设置一个不活跃定时器 *T*_{in}。用户传输完毕后,若基 站在定时期间内没有检测到数据传输,则认为该用 户不活跃,释放对应上行汇报资源,断开用户与基站 端的连接,将用户变为 RRC INACTIVE 态。

本文采用离散时间排队论对上述大规模接入及 数据传输过程进行建模分析,将基站为连接态用户 分配的时频承载资源视为服务台,并考虑到传输资 源有限,将基站可以支撑的承载链路数量,即排队系 统服务台数量,设定为 c。假设经历随机接入过程 请求转变为 RRC 连接态的用户个数 Λ 服从参数为 λ 的泊松分布^[17]。

专题: IoT即服务=

基站会根据空闲时频资源和请求接入服务台的 用户的数量拒绝部分用户的接入。具体而言,若存 在 k 个空闲服务台/承载链路,则至多允许 k 个新用 户成功接入服务台进行数据传输,其余新到达用户 将被拒绝接入。成功接入基站的用户将以μ 的服务 速率进行数据传输,即服务时长服从参数为μ 的几 何分布,传输完毕后由传输(Trans)态转变为等待 (Sus)态。节点的数据包到达率为γ,若定时期间内 产生了数据传输需求,则可立即通过分配的时频资 源回归 Trans态进行数据传输。但是若连续 T_{in} 个 时隙无数据到达,则将其释放离开服务台。对应的 系统模型如图1 所示。



Fig. 1 System model

2 理论建模及性能指标

本文关注的性能指标为能量效率和吞吐量,而 非空闲的服务台的稳态分布 Π 是推导性能指标的 关键。因此,本节建立马尔科夫模型分析非空闲的 服务台的稳态分布 Π ,论述能量效率 η 与吞吐量 λ_{out} 的定义及其推导过程。

2.1 马尔科夫模型

以非空闲的服务台个数 X 为研究对象,建立马尔科夫链,其状态空间为 $\Omega = \{0,1,\dots,c\}$,有稳态分布 $\Pi = \{\pi_0, \pi_1, \dots, \pi_c\}$,通过分析用户的到达和离去过程,可得概率转移矩阵如下:

$$p_{ij} = \begin{cases} a_j, & i = 0, j \in [0, c] \\ \sum_{k+i=j}^{k+i=j} a_k b_i, & i \in [1, c-1], j \in [0, c] \\ b_j, & i = c, j \in [0, c] \end{cases}$$
(1)

$$\begin{cases} a_{k} \in \mathbb{A}_{i} = \{\Lambda_{0}, \Lambda_{1}, \cdots, \Lambda_{c-i-1}, 1 - \sum_{x=0}^{c-i-1} \Lambda_{x}\}, & k \in [0, c-i] \\ b_{t} = \left(\frac{i}{i-t}\right) \beta^{i-t} (1-\beta)^{t}, & t \in [0,i] \end{cases}$$

$$(2)$$

式中: p_{ij} 为服务台中用户个数由 i 变为j的概率, a_k 为到达系数,即请求接入的用户数的概率分布, $\Lambda_i = P\{\Lambda = i\} = \frac{e^{-\lambda}\lambda^i}{i!}, i \ge 0$,其中 i为基站成功解码的接 入请求个数, b_i 为离去系数,即超时离开服务台的用 户数的概率分布, β 为用户因定时器超时而离开服 务台的概率,详细推导见后文。根据式(1)和式(2) 即可确定服务台个数为c时的概率转移矩阵 \tilde{P} 。根据马尔科夫分析的平衡条件可得:

$$\begin{cases} \Pi = \Pi \widetilde{P} \\ \Pi I_{(c+1)\times(c+1)} = I_{1\times(c+1)} \end{cases}$$

$$(3)$$

求解式(3)可得:

$$\boldsymbol{\Pi} = \boldsymbol{I}_{1 \times (c+1)} \left(\widetilde{\boldsymbol{P}} - \boldsymbol{E} + \boldsymbol{I}_{(c+1) \times (c+1)} \right)^{-1}, \qquad (4)$$

式中: E 为 c+1 维单位矩阵, I 为全1 矩阵。

2.2 能量效率与吞吐量

本文关注的性能指标主要为能量效率 η 和吞 吐量。能量效率 η 可通过平均每次接入成功传输 的数据包的个数除以平均每次"发起接入到完成传 输后因超时离开服务台"消耗的能量计算,对应表 达式为:

$$\eta = \frac{E[N]}{P_{\text{Trans}}E[N]E[T_{\text{Trans}}] + P_{\text{Sus}}E[N]E[T_{\text{Sus}}] + P_{\text{Access}}E[T_{\text{Access}}]} = \left(P_{\text{Trans}}E[T_{\text{Trans}}] + P_{\text{Sus}}E[T_{\text{Sus}}] + \frac{P_{\text{Access}}E[T_{\text{Access}}]}{E[N]}\right)^{-1},$$
(52)

式中: $E[T_{Access}]$ 为平均接入时延,详细推导见后文; $E[T_{Trans}]$ 、 $E[T_{Sus}]$ 分别为平均传输时间和在 Sus 状态的平均等待时间,E[N]为进入传输态的平均次数,也是一次随机接入能传输的数据包的平均个数。 建模采用早到直接入口协议,分析的离散系统为有 直接入口的早到系统^[18],即时隙初产生的数据包可 以在时隙末立刻传输,因此时隙初统计的平均传输 时间为:

$$E[T_{\text{Trans}}] = \frac{1}{\mu} - 1_{\circ} \tag{6}$$

根据文献[14]可知:

$$E[T_{Sus}] = \frac{1 - (1 - \gamma)^{T_{in}}}{\gamma}$$
(7)

$$E[N] = \frac{1}{(1-\gamma)^{T_{\rm in}}}$$
(8)

联立式(5)~式(8)可得:

■专题: IoT即服务

$$\eta = \left[P_{\text{Trans}} \left(\frac{1}{\mu} - 1 \right) + P_{\text{Sus}} \frac{1 - (1 - \gamma)^{T_{\text{in}}}}{\gamma} + P_{\text{Access}} (1 - \gamma)^{T_{\text{in}}} E[T_{\text{Access}}] \right]^{-1}$$
(9)

式中: P_{Trans}、 P_{Sus} 和 P_{Access} 分别为用户处于传输态、 等待态和随机接入状态的平均功率, 可通过文 献[19]确定对应的功率量级。

吞吐量分为接入吞吐量和数据吞吐量。其中, 接入吞吐量 λ_{out}^{a} 定义为平均每个时隙通过随机接入 成功接入基站的用户数,接入吞吐量 λ_{out}^{a} 与用户的 随机接入过程和非空闲服务台的分布有关。若存在 k个非空闲服务台,有i个新用户请求接入,则至多 允许c-k个到达的新用户接入基站,若 $i \ge c-k$,则新 增成功接入用户数为c-k,由全概率公式可得:

$$\lambda_{\text{out}}^{a} = \sum_{i=1}^{c-1} \Lambda_{i} \sum_{k=0}^{c-1} \min(i, c-k) \pi_{k} + (1 - \sum_{i=0}^{c-1} \Lambda_{i}) \sum_{k=0}^{c} (c-k) \pi_{k}$$
(10)

数据吞吐量 λ_{out}^{d} 定义为平均每个时隙成功传输的数据包的个数,数据吞吐量 λ_{out}^{d} 与用户的数据传输速率和非空闲服务台的分布有关,由全概率公式可得:

 λ_{out}^{d} =忙碌服务台数×传输态节点占比×服务速率=

$$\sum_{i=1}^{c} i\pi_{i} \cdot \frac{E[T_{\text{Trans}}] + 1}{E[T_{\text{Trans}}] + E[T_{\text{Sus}}]} \cdot \mu_{\circ}$$
(11)

联立式(6)、式(7)、式(11)可得:

$$\lambda_{\text{out}}^{\text{d}} = \sum_{i=1}^{\infty} i \pi_i \left(\frac{1 - (1 - \gamma)^{T_{\text{in}}}}{\gamma} + \frac{1}{\mu} - 1 \right)^{-1} \circ (12)$$

2.3 超时概率

当前时隙用户因定时器超时而离开服务台等价 于以下3个事件同时发生:"当前时隙占据服务台 的用户为Sus用户""在所有Sus节点中选中了一个 定时器时长走到*T*_{in}-1的Sus节点""该时隙没有产 生数据传输需求"。因此用户超时因定时器超时而 离开服务台的概率为:

$$\beta = \frac{E \lfloor T_{\text{Sus}} \rfloor}{E[T_{\text{Trans}}] + E[T_{\text{Sus}}]} \cdot \frac{(1-\gamma)^{T_{\text{in}}-1}}{1 + (1-\gamma) + (1-\gamma)^{2} + \dots + (1-\gamma)^{T_{\text{in}}-1}} \cdot (1-\gamma)_{\circ} \quad (13)$$

$$\text{K} \, \dot{\square} \, \vec{\square} \, (6) \sim \vec{\square} \, (8) \, , \vec{\square} \, (13) \, \vec{\square} \, \vec{\square} \, \vec{\square} \, \vec{\square} \, ;$$

$$\beta = \frac{(1-\gamma)^{T_{\text{in}}}}{\frac{1-(1-\gamma)^{T_{\text{in}}}}{\gamma} + \frac{1}{\mu} - 1} = \frac{1}{E[N] \left(E[T_{\text{Trans}}] + E[T_{\text{Sus}}] \right)^{\circ}} \quad (14)$$

直观上说明节点因定时器超时而离开服务台的 概率等于节点在服务台平均逗留时间的倒数。 2.4 平均接入时延 E[T_{Access}]

根据文献[3]可得拒绝接入概率 $p_{\rm B}$ = 0 时可达 到的最优平均接入时延为:

$$E[T_{\text{Access}}] = \begin{cases} \frac{ne}{M} - \frac{1}{\gamma}, & \gamma > \frac{M\gamma_0}{n} \\ \frac{n\left(-2W_{-1}\left(-\frac{\sqrt{n\gamma}}{2}\right) - 1\right)}{4MW_{-1}^2\left(-\frac{\sqrt{n\gamma}}{2}\right)p}, & \text{ if } th \end{cases}$$

式中: $\hat{\gamma}_0 \approx 0.48$, *M* 为前导码个数, *n* 为用户总个数, W₋₁为朗伯 W 函数在[-1/e,0)内的分支^[20], *p* 为接 入请求成功发送概率。考虑接入网络饱和 $\gamma > M\hat{\gamma}_0 / n$ 的场景,承载链路个数有限,故拒绝接入概率 p_B 不可忽略,此时平均接入时延为:

$$E[T_{\text{Access}}] = \frac{\frac{ne}{M} - \frac{1}{\gamma}}{1 - p_{\text{B}}}$$
(16)

用户被拒绝接入的概率 *p*_B 可通过每个时隙被 拒绝接入的用户个数除以每个时隙到达服务台的用 户个数计算,又因为有用户被拒绝的前提是"有用 户请求接入服务台",根据全概率公式可得:

$$p_{\rm B} = \sum_{i=0}^{c} \pi_i \sum_{k=1}^{\infty} \max\left[\frac{k - (c - i)}{k}, 0\right] \frac{\Lambda_k}{1 - \Lambda_0}$$
(17)

3 仿真结果与分析

本节将给出对应的仿真结果来验证上述理论分 析。本文通过 Matlab 程序设计了一个基于时隙的 仿真系统,模拟传输资源有限的情况下,基站为用户 建立连接、分配资源进行数据传输的过程,仿真中设 置服务台个数 c=40、用户总个数 n=1 000、接入前 导码个数 M=10。假设请求接入基站的用户个数服 从参数为 λ 的泊松分布,若存在k个空闲承载链路, 则至多允许 k 个新用户成功接入进行数据传输,其 余新到达用户将被拒绝接入。对于成功接入的用 户,将以服务速率 μ 进行数据传输,即数据传输时长 服从参数为 μ 的几何分布,传输完毕的用户由 Trans 态转变为 Sus 状态。Sus 状态的用户只有在连续 T_{in} 个时隙没有数据包到达时才会被断开连接,基站才 会释放该用户的承载链路。Sus 状态的用户的数据 包的到达过程遵循参数为 y 的伯努利过程,若用户 在定时器超时前产生了数据传输需求,则回归 Trans 态进行数据传输,如此反复直到定时器超时。用户 在各个状态的平均功率根据文献[19]设置,其中

 $P_{\text{Trans}} = 1 \text{ mW}, P_{\text{Sus}} = 0.18 \text{ mW}, P_{\text{Access}} = 0.68 \text{ mW}$ 。离 散时隙仿真系统为有直接入口的早到系统,每个仿 真点运行 10^6 个单位时隙。

图 2 展示了 $\lambda = 1, \gamma = 0.01, \mu = 0.4$ 时,不同定 时器时长 T_{in} 非空闲服务台概率分布,可以看出理 论值与仿真值相吻合,验证了式(1)~式(4)的推导。



图 2 λ=1、γ=0.01、μ=0.4时,不同定时器时长 T_{in} 非空闲 服务台概率分布

Fig. 2 Probability distribution of busy servers with different inactivity timer T_{in} when $\lambda = 1, \gamma = 0.01$, $\mu = 0.4$

图 3 展示了当 $\lambda = 1$ 、 $\gamma = 0.01$ 时,不同服务速率 μ 下,数据吞吐量 λ_{out}^{d} 随定时器长度 T_{in} 的变化情 况。如图 3 所示,数据吞吐量 λ_{out}^{d} 随着定时器长度 T_{in} 增大先增后减,这是因为在数据到达率 γ 较小且 不活跃定时器长度 T_{in} 较小时,服务台空闲率较高, 传输资源相对充足。此时适当提高定时器长度 T_{in} 能提高服务台的利用率,在不影响后续用户接入的 前提下,可以有效提高数据吞吐量。但是当定时器 长度 T_{in} 过大时,服务台被大量数据传输需求较低 的轻流量用户占据,而有数据传输需求的随机接入 用户却无法进入服务台,导致定时器长度 T_{in} 较大 时,提高 T_{in} 反而会降低数据吞吐量。此外,提高服 务速率 μ 有助于提高数据吞吐量。



图 3 $\lambda = 1_{\gamma} = 0.01$ 时,不同服务速率 μ 下数据吞吐量 λ_{out}^{d} 随不活跃定时器 T_{in} 的变化情况

Fig. 3 Data throughput λ_{out}^{d} versus inactivity timer T_{in} with different sevice rate μ when $\lambda = 1, \gamma = 0.01$

实际上,如何调整不活跃定时器 T_{in} 以获得最 大数据吞吐量取决于随机接入用户的到达率 λ 和 用户的数据到达率 γ 。图 4 展示了给定服务速率 时,不同流量到达场景数据吞吐量 λ_{out}^{d} 随不活跃定 时器 T_{in} 的变化情况。如图 4 所示,当接入用户到达 率 λ 较小,例如 $\lambda = 1$ 时,数据吞吐量 λ_{out}^{d} 随着定时 器长度 T_{in} 先增后减,此时为了获得最大数据吞吐 量,应该适当地提高定时器长度 T_{in} 。而接入用户到 达率 λ 较大,数据到达率 γ 较小时,例如 $\lambda = 5$ 、 $\gamma =$ 0.01 时,数据吞吐量 λ_{out}^{d} 随着定时器长度 T_{in} 单调 递减,此时应适当地降低 T_{in} ,让完成数据传输的轻 流量用户尽快释放连接。另一方面,提高不活跃定 时器 T_{in} 使承载链路逐渐满载,在承载链路个数 c、 传输速率 μ 固定的情况下,承载链路满载后的数据 吞吐量主要取决于用户的数据到达率 γ 。



- 图 4 $\mu = 0.4$ 时,不同流量到达场景数据吞吐量 λ_{out}^{d} 随不活 跃定时器 T_{in} 的变化情况
- Fig.4 Data throughput λ_{out}^{d} versus inactivity timer T_{in} in different traffic scenario when $\mu = 0.4$

图 5 展示了给定服务速率 μ =0.4 时,不同流量 到达场景下能量效率 η 随不活跃定时器 T_{in} 的变化 情况。如图 5 所示,当 λ =1、 γ =0.01 时能量效率 η 随着定时器长度 T_{in} 先增大后减小。这是因为定时 器长度 T_{in} 较小时提高定时器长度 T_{in} 几乎不影响 拒绝接入概率,接入时延几乎不变,此时增大 T_{in} 可 以增加一次随机接入传输的数据包平均个数 E[N],将一次接入过程的能量耗费分摊到多次数据 包的传输上,因此能量效率随之递增。但是,当定时 器 T_{in} 过大时,大量轻流量用户占据服务台将严重 恶化后续用户的接入性能。随着定时器长度 T_{in} 的 继续增加,拒绝接入概率将逐渐增大至1,导致接入 时延大幅增加、接入吞吐量降低至0。虽然一次接 入过程的能量耗费可以分摊到多次数据包的传输 上,但由于数据到达率 γ 较小,一次随机接入能传输

专题: IoT即服务

的数据包的平均个数 E[N]随定时器长度 T_{in} 的增速较小,不足以承担接入时延大幅增加带来的巨大接入能耗,因此定时器设置过大时,能量效率反而下降。但是,当用户的数据到达率 γ 较大时,例如 $\lambda = 1, \gamma = 0.1$ 时,能量效率随着定时器长度 T_{in} 单调递增。因为此时占据服务台的用户为重流量用户,提高定时器长度 T_{in} 能显著增加一次随机接入能传输的数据包的平均个数 E[N],足以承担接入时延大幅增加带来的巨大接入能耗。



图 5 μ=0.4 时,不同流量到达场景下能量效率 η 随不活 跃定时器 T_{in} 的变化情况

Fig. 5 Energy efficiency η versus inactivity timer T_{in} in different traffic scenario when $\mu = 0.4$

综上,能量效率 η 的直接影响因素为平均接入 时延 $E[T_{Access}]$ 和一次随机接入能传输的数据包的 平均个数 E[N]。但本质上,提高定时器长度 T_{in} 能 否获得能量效率的增益还是由随机接入用户的到达 率 λ 和用户的数据到达率 γ 决定的。为了提高能 量效率,应该根据不同流量到达场景合理地设置不 活跃定时器的长度 T_{in} 。

4 结束语

面向海量物联网通信场景,本文基于5G协议, 运用离散时间排队论,针对MAC层随机接入过程和 RRC链路管理过程,构建跨协议层分析模型,分析 了数据传输资源有限的情况下,节点的能量效率和 网络的数据吞吐量,并以此为基础,讨论了海量设备 带来的海量承载链路的管理问题和参数配置问题。 仿真结果表明:在请求接入的节点到达率较高时,应 该及时释放数据传输需求较低的轻流量节点的连 接,避免接入性能的恶化。另一方面。当在请求接 入节点的到达率λ较高时,可以适当提高不活跃定 时器的长度,以获得较高的资源利用率和数据吞吐 量。此外,为了提高能量效率和数据吞吐量,应该根 据不同流量到达场景调整不活跃定时器的配置。本 文为5G网络下的海量设备通信场景构建了跨协议 层排队模型,理论分析结果对该场景下的5G网络 参数配置方案设计有重要指导意义。

参考文献

- [1] 3GPP.5G;NR;Radio Resource Control (RRC);Protocol Specification;3GPP TS 38.331 V17.0.0[S].3GPP,2022.
- [2] ZHAN W, XU C, SUN X H, et al. Toward Optimal Connection Management for Massive Machine-type Communications in 5G System [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(17):13237-13250.
- [3] ZHAN W, DAI L. Access Delay Optimization of M2M Communications in LTE Networks [J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2019,8(6):1675-1678.
- [4] DAI L. Stability and Delay Analysis of Buffered Aloha Networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2012, 11(8):2707-2719.
- [5] ZHAO X R, DAI L. Connection-based Aloha: Modeling, Optimization, and Effects of Connection Establishment
 [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2024,23(2):1008-1023.
- [6] BAI J N, SONG H, YI Y, et al. Multiagent Reinforcement Learning Meets Random Access in Massive Cellular Internet of Things[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(24):17417-17428.
- [7] XIA B, WANG J L, XIAO K X, et al. Outage Performance Analysis for the Advanced SIC Receiver in Wireless NOMA Systems [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(7):6711-6715.
- [8] LIN X Q, ADHIKARY A, WANG Y P E. Random Access Preamble Design and Detection for 3GPP Narrowband IoT Systems [J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2016,5(6):640-643.
- [9] TANG X R,ZHANG Z C, WU L, et al. Energy Efficient Fuzzy Time Slot Scheduling Scheme for Massive Connections[C] // 2019 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC). Changchun: IEEE, 2019:117-122.
- [10] HAILU S, SAILY M, TIRKKONEN O. RRC State Handling for 5G [J]. IEEE Communications Magazine, 2019, 57 (1):106-113.
- [11] RYOO S, JUNG J, AHN R. Energy Efficiency Enhancement with RRC Connection Control for 5G New RAT [C] // 2018 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). Barcelona: IEEE, 2018:1–6.

专题: IoT即服务=

- [12] KHLASS A, LASELVA D, JARVELA R. On the Flexible and Performance-enhanced Radio Resource Control for 5G NR Networks[C] //2019 IEEE 90th Vehicular Technology Conference (VTC2019-Fall). Honolulu: IEEE, 2019:1–6.
- [13] OLIVEIRA L A N, ALENCAR M S, LOPES W T A, et al. On the Performance of Location Management in 5G Network Using RRC Inactive State [J]. IEEE Access, 2022,10:65520-65532.
- [14] MO Y H, CAI W W, ZHAN W. et al. Modeling and Performance Analysis of 5G RRC Protocol with Machine-type Communications[C] // 2022 IEEE 33rd Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC). Kyoto:IEEE,2022:475-480.
- [15] MANCUSO V, CASTAGNO P, SERENO M, et al. Modeling MTC and HTC Radio Access in a Sliced 5G Base Station[J]. IEEE Transactions on Network and Service Management, 2021, 18(2):2208-2225.
- [16] 3GPP.5G; NG-RAN; Architecture Description (Release 17):3GPP TS 38.401 V17.3.0[S].3GPP,2023.

- [17] HUANG H H, YE T, LEE T T, et al. Delay and Stability Analysis of Connection-based Slotted-Aloha [J]. IEEE/ ACM Transactions on Networking, 2021, 29(1):203-219.
- [18] 田乃硕,徐秀丽,马占友. 离散时间排队论[M]. 北京: 科学出版社,2008.
- [19] 3GPP. Study on User Equipment (UE) Power Saving in NR (Release 16): 3GPP TS 38. 840 V16. 0. 0 [S]. 3GPP,2019.
- [20] CORLESS R M, GONNET G H, HARE D E G, et al. On the Lambert W Function [J]. Advances in Computational Mathematics, 1996, 5: 329–359.

作者简介:

郭泓志 男,(2000—),硕士研究生。主要研究方向: 5G协议建模、随机接入。

詹 文 男,(1990—),博士,副教授。主要研究方向: 物联网、下一代移动通信系统建模与性能优化、强化学习、排 队论及其在无线通信中的应用。

孙兴华 男,(1985—),博士,副教授。主要研究方向: 5G/6G 无线网络、智能物联网、智能学习等。