

基于随机网络演算的车联网边缘计算多跳任务卸载性能分析

李松^{*①②} 王新荣^① 王博文^① 陈瑞瑞^① 孙彦景^{①②} 陈岩^①

^①(中国矿业大学信息与控制工程学院 徐州 221008)

^②(徐州市智能安全与应急协同工程研究中心 徐州 221008)

摘要: 车联网(IoV)边缘计算通过在网络边缘部署计算资源,可为车载用户提供低时延服务。该文通过随机网络演算(SNC)矩母函数(MGF)法分析车联网移动边缘计算的时延和数据积压性能。首先,分别对车辆高优先级和低优先级业务到达过程、单跳毫米波通信服务过程和边缘计算服务过程进行数学建模;其次,由服务级联定理获得不同优先级业务在多跳网络中的服务过程及其矩母函数表达式;接着,推导了车辆边缘网络不同优先级业务毫米波多跳通信任务卸载的时延和数据积压概率边界闭式解;最后通过蒙特卡罗仿真验证闭式解的准确性。

关键词: 边缘计算;毫米波通信;随机网络演算;多跳网络;概率边界

中图分类号: TN928

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2023)07-2459-08

DOI: 10.11999/JEIT220729

Performance Analysis of Multi-hop Task Offloading of Vehicular Edge Computing Based on Stochastic Network Calculus

LI Song^{①②} WANG Xinrong^① WANG Bowen^① CHEN Ruirui^①

SUN Yanjing^{①②} CHEN Yan^①

^①(School of Information and Control Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

^②(Xuzhou Engineering Research Center of Intelligent Industry Safety and Emergency Collaboration, Xuzhou 221008, China)

Abstract: The Internet of Vehicles(IoV) edge computing can provide low-latency services for vehicle users by deploying computing resources at the edge of the network. In this paper, the delay and data backlog performance of vehicular edge computing of the IoV are analyzed by the Moment-Generating Function(MGF) method of Stochastic Network Calculus(SNC) theory. Firstly, mathematical models of the arrival process of high-priority and low-priority tasks, the single-hop millimeter-wave communication service process, and the edge computing service process are established, respectively; Secondly, according to the service cascade theorem, the service process and the moment-generating function expression of different priority tasks of vehicles in the multi-hop network are obtained. Then, the closed-form solutions of delay and data backlog probability bounds of vehicle tasks with different priorities being completely offloaded to the edge server in millimeter-wave multi-hop communication are derived. Finally, the performance of the closed-form solution is verified by Monte Carlo simulation.

Key words: Edge computing; Millimeter-wave communications; Stochastic Network Calculus(SNC); Multi-hop networks; Probability bounds

1 引言

车联网(Internet of Vehicular, IoV)的发展使得新型车载应用不断涌现,如无人驾驶、路线规划

和虚拟现实等^[1]。这些新型车载应用在交通事故避免、交通路况改善和多样化服务等方面提供中发挥关键作用,但随着车载应用的更迭换代,车载业务数据计算量急剧增加并且从可靠性、时延和吞吐量等方面对IoV服务质量(Quality of Service, QoS)提出了严格的要求。车联网边缘计算通过在网络边缘处部署计算资源,车辆用户通过将任务卸载至边缘服务器处执行,以解决车辆计算资源不足与云计算数据传输时延过长的问题,并可为车联网提供边缘

收稿日期: 2022-06-02; 改回日期: 2023-02-15; 网络出版: 2023-02-19

*通信作者: 李松 lisong@cumt.edu.cn

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(2020ZDPYMS26)

Foundation Item: the Fundamental Research Funds for the Central Universities (2020ZDPYMS26)

智能等能力^[2,3]。车联网边缘计算的时延性能分析是车联网基础设施部署、任务卸载策略、资源联合优化等问题的理论基础。

随机网络演算(Stochastic Network Calculus, SNC)理论通过到达过程、服务过程和离开过程的建模表征一定时间内系统的业务累计到达量、系统提供的累计服务量和业务离开系统的累计量^[4],借助最小加代数理论获得网络的时延、积压和吞吐量的概率边界。随机网络演算已应用于建模多节点系统、多业务混合系统和多跳系统等,其获得的性能边界可衡量系统统计性能。近年来,国内外学者通过随机网络演算理论分析网络性能取得了许多成果。Al-Zubaidy等人^[5]提出了一种 (\min, \times) 网络演算法,将到达过程和服务过程从比特域映射到信噪比域,结合瑞利衰落信道的统计模型获得了无线多跳网络的延迟和积压统计边界闭式解。文献^[6]采用 (\min, \times) 网络演算法研究了多用户多输入单输出(Multiple-Input Single-Output, MISO)下行链路在理想和现实假设下的延迟性能,对于具有完美信道状态信息(Channel State Information, CSI)和长码字的理想场景,研究信道硬化的影响,探究了截止时间前实现高可靠性保障的天线数。对于不完美CSI和有限块长度信道码的现实场景,推导出条件中断概率的近似下限和上限。文献^[7]推导无线网络正交多址和非正交多址下行链路的积压和延迟上界的闭式解。目前关于 (\min, \times) 网络演算的研究中信道仅限于瑞利衰落信道模型。文献^[8]针对无线多跳网络中的流量直接传输、流量汇聚和流量分裂特性提出流量传输算子、流量汇聚算子和流量分裂算子的概念,结合SNC理论互补累积分布函数法分析无线多跳网络的延迟边界。文献^[9]研究5G资源预留模式下超可靠低延时(Ultra-Reliable Low-Latency Communication, URLLC)业务和增强移动宽带业务的资源分配占比,推导了概率时延约束下系统需要为URLLC业务预留资源的下界。Xiong等人^[10]通过随机网络演算的互补累积分布函数法研究专用短程通信(Dedicated Short Range Communication, DSRC)、基于蜂窝网的车载通信技术(Cellular Vehicle-to-Everything, C-V2X)和毫米波共存的车联网异构网络任务卸载时延性能,但是到达过程和服务过程模型的速率和激增均假设为常数,不满足现实中车联网业务到达和服务过程随机性的特征。文献^[11]通过多个全双工中继扩展通信范围,采用网络演算矩母函数(Moment-Generation Function, MGF)法求解室外全双工通信毫米波多跳无线网络性能边界,并根据已获得的性能边界研究网络中总功率约束一定时的最优功率分配。在文献^[11]工作

的基础上,Chen等人^[12]构建了一种支持6G协同自动驾驶的混合通信网络,即低频带蜂窝通信和6G高频带毫米波通信。其中蜂窝通信遵循IEEE 802.11p标准的指数后退机制,6G毫米波通信为全双工通信模式,对两种通信服务模型进行数学建模并获得其时延边界。

以上文献针对无线通信网络中不同信道模型和网络结构,在已知业务到达过程的条件下分析了通信过程的统计时延性能,未考虑车联网边缘计算场景中计算过程。本文针对车联网差异化业务边缘计算场景,研究毫米波通信多跳传输任务卸载的时延和数据积压性能,基于随机网络演算理论获得车联网中不同优先级业务的延迟和数据积压概率边界,其统计边界可以为MEC服务器计算资源部署、资源分配与任务卸载策略等系统级优化提供理论依据。本文主要贡献如下:

(1)根据车联网中业务差异化时延要求,将业务分为高优先级和低优先级业务,并分别对不同优先级业务到达过程进行建模,并推导业务到达过程的MGF。

(2)根据服务级联定理推导毫米波车联网多跳任务的传输服务、计算服务过程及其MGF表达式,并确定不同优先级业务的服务过程。

(3)通过SNC的MGF法推导不同优先级业务完全卸载时的时延和数据积压的概率边界闭式解,通过蒙特卡罗仿真验证推导结果的正确性。

2 系统模型

2.1 网络模型

本文考虑单蜂窝毫米波通信车联网场景,包括一个配备有移动边缘计算服务器的基站和该基站覆盖蜂窝内的车辆,车辆和基站都安装有毫米波定向天线^[13]。目标车辆将计算密集型应用程序产生的业务卸载到网络边缘服务器处。考虑到障碍物遮挡等导致车辆与基站无法建立直传通信链路的情况,本文考虑车联网多跳任务卸载场景,通过同蜂窝内的车辆中继转发完成任务卸载。

假设目标车辆经过 $N(N \geq 1)$ 个中继车辆多跳转发与基站建立通信链路。在这个 $N+1$ 跳的网络中,车辆业务获得毫米波传输服务到达基站后,在MEC服务器处获得计算服务。目标车辆完成业务卸载的每一跳均可抽象为如图1所示的一个节点模型,前一节点的离开过程为其后面一个节点的到达过程,因此业务卸载可看作 $N+2$ 个节点级联的系统,其中前 $N+1$ 个节点用于表示传输服务,最后的节点表示计算服务。

由于车联网中车辆业务对时延和数据积压的敏感程度不同,因此其获得服务的优先级也不相同,如车辆实时控制类业务在信息的实时性方面要求比

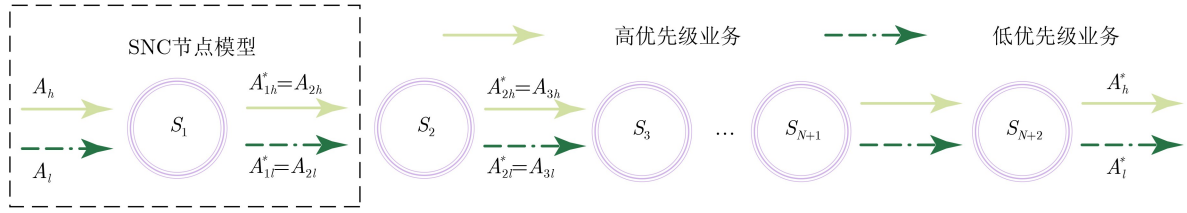


图1 节点级联服务模型

较高，车辆娱乐类业务与之相比，实时性要求则相对较低。根据车辆业务对时延的敏感程度，本文考虑2种优先级的业务，时延敏感且需要卸载到边缘服务器的业务设置为高优先级，如道路导航、路况分析等业务；时延不敏感且需要卸载的业务则设置为低优先级，如无线虚拟现实(Visual Reality, VR)业务、音视频业务等。高优先级和低优先级业务通过下标 h 和 l 进行区别。毫米波通信多跳网络中每一跳提供的传输服务记作 $S_j, 1 \leq j \leq N+1$ ，计算服务表示为 S_{N+2} 。多优先级业务在多跳网络的节点级联服务模型如图1所示，当高优先级业务和低优先级业务同时到达网络节点时，高优先级的业务优先接受服务，同一优先级的业务按照先到先服务顺序接受传输服务或计算服务。前一节点的离开过程作为后一节点的到达过程，业务按照上述顺序依次在多跳网络每一跳获得传输服务或计算服务，最后在计算服务结束后离开MEC服务器。

2.2 业务到达过程

本文将车联网行驶相关业务建模为高优先级业务，由于其数据包到达过程通常是非周期到达^[14]，因此建模为泊松过程， $A_h(t) = N(t)\alpha_h$ ， $N(t)$ 为时间 $[0, t)$ 内数据包的到达量， α_h 为高优先级业务数据包大小。高优先级业务MGF为

$$\begin{aligned} \mathbb{M}_{A_h}(\theta, \tau, t) &= \mathbb{E} \left[e^{\theta N(\tau, t)\alpha_h} \right] \\ &= \sum_{k=0}^{\infty} e^{\theta \alpha_h k} \frac{e^{-\rho(t-\tau)} (\rho(t-\tau))^k}{k!} \\ &= e^{\rho(t-\tau)} (e^{\theta \alpha_h} - 1) \\ &= p_h^{(t-\tau)}(\theta) \end{aligned} \quad (1)$$

其中， ρ 是高优先级业务数据包泊松到达过程的平均到达速率， $p_h(\theta) = e^{\rho(\exp(\theta \alpha_h) - 1)}$ 。

车联网中视频传输、虚拟现实等车载娱乐类业务对时延的敏感程度相对较低，但其计算量非常大。本文将这类业务建模为低优先级业务，设低优先级业务数据包到达速率为 r ，由于网络中的业务到达会在某个时间段内存在激增，因此设其到达过程包络受 (r, σ_1) 约束，若数据包大小固定为 α_l ，则低优先级业务到达过程为： $A_l(\tau, t) = r\alpha_l(t - \tau) + \sigma_1$ 。低优先级业务到达过程对应的MGF为

$$\begin{aligned} \mathbb{M}_{A_l}(\theta, \tau, t) &= \mathbb{E} \left[e^{\theta(r\alpha_l(t-\tau) + \sigma_1)} \right] \\ &= e^{\theta \sigma_1} p_l^{(t-\tau)}(\theta) \end{aligned} \quad (2)$$

其中， $p_l(\theta) = e^{\theta r \alpha_l}$ 。

2.3 服务过程

将车联网边缘计算任务卸载过程建模为传输服务和计算服务。其中传输服务中车辆与车辆、车辆与基站之间进行业务数据传输采用毫米波定向通信，因此车辆到车辆(Vehicle-to-Vehicle, V2V)与车辆到基础设施(Vehicle-to-Infrastructure, V2I)通信模型相同，其信道容量为^[15]

$$C \triangleq \left(\frac{T^s - \xi(T^s)}{T^s} \times T \right) B \log_2(1 + \Lambda g) \quad (3)$$

其中， B 为信道带宽， ξ 是毫米波天线对齐时延， T^s 为调度周期， T 为传输时隙， g 为信道增益， $\Lambda = \frac{p g^T g^R}{N_0 B}$ ， p 为发射功率， g^R 为接收端天线增益， g^T 为发射端天线增益， N_0 是噪声功率谱密度。那么，传输服务过程表示为

$$\begin{aligned} S_j(\tau, t) &\triangleq \sum_{i=\tau}^{t-1} \left(\frac{T^s - \xi(T_j^s(i))}{T^s} \times T \right) B \log_2(1 + \Lambda g_j(i)), \\ 1 \leq j &\leq N+1 \end{aligned} \quad (4)$$

依据文献^[16]，将车联网信道建模为Nakagami-m信道。针对车联网中车辆的移动性，发射机采用波束跟踪或波束切换技术使得发送波束指向接收车辆，接收端频率补偿进行纠正车辆移动所导致的多普勒频移。由于各时隙间服务过程相互独立，其服务过程MGF为

$$\begin{aligned} \bar{\mathbb{M}}_{S_j}(\theta, \tau, t) &= \mathbb{E} \left[\exp \left(-\theta \sum_{i=\tau}^{t-1} \frac{(T^s - \xi) T B}{T^s} \log_2(1 + \Lambda g_j(i)) \right) \right] \\ &= \mathbb{E} \left[\left[(1 + \Lambda g_j)^{-\theta \vartheta} \right]^{(t-\tau)} \right] \end{aligned} \quad (5)$$

$\vartheta = \frac{(T^s - \xi) T B}{T^s \ln 2}$ ，那么

$$\begin{aligned} &\mathbb{E} \left[(1 + \Lambda g_j)^{-\theta \vartheta} \right] \\ &= \int_0^{\infty} (1 + \Lambda x)^{-\theta \vartheta} \frac{m_j^m x^{m_j-1} \exp(-m_j x)}{\Gamma(m_j)} dx \\ &= \left(\frac{m_j}{\Lambda} \right)^{m_j} U \left(m_j, m_j + 1 - \theta \vartheta, \frac{m_j}{\Lambda} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

其中, m_j 为第 j 跳毫米波信道系数, $U(a, b, z) = \frac{1}{\tau(a)} \int_0^\infty x^{a-1} (1+x)^{b-a-1} e^{-zx} dx$ 为第2类合流超几何函数。将式(6)代入式(5)可得毫米波传输服务过程的MGF为

$$\bar{M}_{S_j}(\theta, \tau, t) = \left(\left(\frac{m_j}{\Lambda} \right)^{m_j} \cdot U \left(m_j, m_j + 1 - \theta\vartheta, \frac{m_j}{\Lambda} \right) \right)^{(t-\tau)} \quad (7)$$

由于该MEC服务器除了为小区内车辆提供计算服务, 还为同一蜂窝小区内的其他用户及设备服务。因此在MEC服务器处车辆卸载的业务同其他用户及设备竞争计算和通信资源, 设边缘计算服务器计算总容量为 C , 其他用户及设备的业务包络受 (λ, σ_2) 约束, 其中 λ 表示速率, σ_2 对应激增增量, 那么MEC服务器为车辆业务提供的计算服务过程为 $S_j(\tau, t) = (C - \lambda)(t - \tau) - \sigma_2, j = N + 2$, 其MGF为

$$\bar{M}_{S_j}(\theta, \tau, t) = \mathbb{E} \left[e^{-\theta S_j(\tau, t)} \right] = e^{\theta\sigma_2} e^{-\theta(C-\lambda)(t-\tau)} \quad (8)$$

若图1中 $N+2$ 个节点级联系统所能提供的服务记作 S_{net} , 由服务级联定理可知, 该节点级联网络的等效服务过程 S_{net} 表示为

$$S_{\text{net}}(\tau, t) = (S_1 \otimes S_2 \otimes \cdots \otimes S_{N+2})(\tau, t) \quad (9)$$

根据业务优先级可知, 高优先级业务优先获得网络服务, 因此其服务过程就是整个网络能够提供的服务过程, 即

$$S_h(\tau, t) = S_{\text{net}}(s, t) = (S_1 \otimes S_2 \otimes \cdots \otimes S_{N+2})(\tau, t) \quad (10)$$

其MGF推导过程为

$$\begin{aligned} \bar{M}_{S_h}(\theta, \tau, t) &= \mathbb{E} \left[\exp(-\theta (S_1 \otimes S_2 \otimes \cdots \otimes S_{N+2})(\tau, t)) \right] \\ &= \mathbb{E} \left[\exp \left(-\theta \inf_{\tau \leq u_1 \leq \cdots \leq u_{N+1} \leq t} \left\{ \sum_{j=1}^{N+2} S_j(u_{j-1}, u_j) \right\} \right) \right] \\ &\leq \sum_{\tau \leq u_1 \leq \cdots \leq u_{N+1} \leq t} \prod_{j=1}^{N+2} \bar{M}_{S_j}(\theta, u_{j-1}, u_j) \quad (11) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{M}_{S_i}(\theta, \tau, t) &= \mathbb{E} \left[\exp(-\theta ((S_1 \otimes S_2 \otimes \cdots \otimes S_{N+2})(\tau, t) - A_h(\tau, t))) \right] \\ &= \mathbb{E} \left[\exp \left(-\theta \left(\inf_{\tau \leq u_1 \leq \cdots \leq u_{N+1} \leq t} \left(\sum_{j=1}^{N+2} S_j(u_{j-1}, u_j) \right) - A_h(\tau, t) \right) \right) \right] \\ &= \bar{M}_{S_{\text{net}}}(\theta, \tau, t) \bar{M}_{A_h}(\theta, \tau, t) \quad (18) \end{aligned}$$

将式(1)代入式(18)可得

$$\bar{M}_{S_i}(\theta, \tau, t) \leq e^{\theta\sigma_2} p_h^{(t-\tau)}(\theta) \sum_{\sum_{j=1}^{N+2} \pi_j = t-\tau} \prod_{j=1}^{N+2} q_j^{\pi_j}(-\theta) \quad (19)$$

其中, $S_j(u_{j-1}, u_j)$ 为第 j 个服务节点在时间 $[u_{j-1}, u_j]$ 内的服务过程, 由于各时段间服务相互独立且服从相同的分布, 则第 j 个节点服务过程表示为

$$\bar{M}_{S_j}(\theta, \tau, t) = \begin{cases} q_j^{(t-\tau)}(-\theta), & 1 \leq j \leq N+1 \\ e^{\theta\sigma_2} q_j^{(t-\tau)}(-\theta), & j = N+2 \end{cases} \quad (12)$$

式(12)中的 $q_j(-\theta)$ 表示为

$$q_j(-\theta) = \begin{cases} \left(\frac{m_j}{\Lambda} \right)^{m_j} U \left(m_j, m_j + 1 - \theta\vartheta, \frac{m_j}{\Lambda} \right), & 1 \leq j \leq N+1 \\ e^{-\theta(C-\lambda)}, & j = N+2 \end{cases} \quad (13)$$

将式(12)和式(13)代入式(11)可得

$$\bar{M}_{S_h}(\theta, \tau, t) \leq e^{\theta\sigma_2} \sum_{\tau \leq u_1 \leq \cdots \leq u_{N+1} \leq t} \prod_{j=1}^{N+2} q_j^{(u_j - u_{j-1})}(-\theta) \quad (14)$$

令 $\pi_j = u_j - u_{j-1}$ 进行变量替换得

$$\bar{M}_{S_h}(\theta, \tau, t) \leq e^{\theta\sigma_2} \sum_{\sum_{j=1}^{N+2} \pi_j = t-\tau} \prod_{j=1}^{N+2} q_j^{\pi_j}(-\theta) \quad (15)$$

低优先级业务要在高优先级业务被服务结束后才能获得服务, 因此其服务过程不仅与整个网络能够提供的服务有关, 还取决于高优先级业务的到达过程, 其服务过程可以表示为

$$\begin{aligned} S_l(\tau, t) &= \max \{ S_{\text{net}}(\tau, t) - A_h(\tau, t), 0 \} \\ &= \max \{ (S_1 \otimes S_2 \otimes \cdots \otimes S_{N+2})(\tau, t) - A_h(\tau, t), 0 \} \quad (16) \end{aligned}$$

为简化计算, 设 $(S_1 \otimes S_2 \otimes \cdots \otimes S_n)(\tau, t) - A_h(\tau, t) \geq 0$, 则低优先级业务的服务过程可进一步表示为

$$S_l(\tau, t) = (S_1 \otimes S_2 \otimes \cdots \otimes S_{N+2})(\tau, t) - A_h(\tau, t) \quad (17)$$

低优先级业务服务过程MGF的推导过程与高优先级业务推导过程类似

3 性能边界

3.1 高优先级业务性能边界

对于高优先级业务对应的 $M_h(\theta, \tau, t)$

$$M_h(\theta, \tau, t) \triangleq \sum_{u=0}^t \bar{M}_{A_h}(\theta, u, t) \cdot \bar{M}_{S_h}(\theta, u, \tau) \quad (20)$$

把式(1)和式(15)代入式(20), 有

$$M_h(\theta, \tau, t) \leq e^{\theta\sigma_2} \sum_{u=0}^t p_h^{(t-u)}(\theta) \sum_{\sum_{j=1}^{N+2} \pi_j = \tau - u} \prod_{j=1}^{N+2} q_j^{\pi_j}(-\theta) \quad (21)$$

令 $\tau - u = \ell$ 进行变量替换, 式(21)可转化为

$$\begin{aligned} M_h(\theta, \tau, t) &\leq e^{\theta\sigma_2} \sum_{\ell=\tau-t}^t p_h^{(t-\tau+\ell)}(\theta) \sum_{\sum_{j=1}^{N+2} \pi_j = \ell} \prod_{j=1}^{N+2} q_j^{\pi_j}(-\theta) \\ &\leq e^{\theta\sigma_2} p_h^{(t-\tau)}(\theta) \\ &\quad \cdot \sum_{\ell=\tau-t}^{\tau} \sum_{\sum_{j=1}^{N+2} \pi_j = \ell} \prod_{j=1}^{N+2} (p_h(\theta) q_j(-\theta))^{\pi_j} \end{aligned} \quad (22)$$

根据文献[17]中定理5, 式(22)进一步转化为

$$\begin{aligned} M_h(\theta, \tau, t) &\leq e^{\theta\sigma_2} p_h^{(t-\tau)}(\theta) \sum_{\ell=s-t}^{\infty} \\ &\quad \cdot \sum_{j=1}^{N+2} \frac{(p_h(\theta) q_j(-\theta))^{N+\ell+1}}{\prod_{z \neq j} (p_h(\theta) q_z(-\theta) - p_h(\theta) q_z(-\theta))} \end{aligned} \quad (23)$$

令 $K_{jh}(\theta) = p(\theta) q_j(-\theta)$, $\Upsilon_{jh}(\theta) = \prod_{z \neq j} (p(\theta) q_z(-\theta) - p(\theta) q_z(-\theta))$, 则式(23)转化为

$$\begin{aligned} M_h(\theta, \tau, t) &\leq e^{\theta\sigma_2} p_h^{(t-\tau)}(\theta) \sum_{\ell=\tau-t}^{\infty} \sum_{j=1}^{N+2} \frac{K_{jh}(\theta)^{N+\ell+1}}{\Upsilon_{jh}(\theta)} \\ &= e^{\theta\sigma_2} p_h^{(t-\tau)}(\theta) \sum_{j=1}^{N+2} \frac{K_{jh}(\theta)^{N+\tau-t+1}}{\Upsilon_{jh}(\theta) (1 - K_{jh}(\theta))} \end{aligned} \quad (24)$$

其中, $K_{jh}(\theta) < 1$, $1 \leq j \leq N+2$, 由此可得高优先级业务的时延和数据积压违约概率边界分别为

$$\begin{aligned} \mathbb{P}(D_h(t) > d_h) &\leq \inf_{\theta > 0} e^{\theta\sigma_2} p_h^{-d_h}(\theta) \\ &\quad \cdot \sum_{j=1}^{N+2} \frac{K_{jh}(\theta)^{N+d_h+1}}{\Upsilon_{jh}(\theta) (1 - K_{jh}(\theta))} \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \mathbb{P}(B_h(t) > b_h) &\leq \inf_{\theta > 0} e^{\theta\sigma_2} e^{-\theta b_h} \\ &\quad \cdot \sum_{j=1}^{N+2} \frac{K_{jh}(\theta)^{N+1}}{\Upsilon_{jh}(\theta) (1 - K_{jh}(\theta))} \end{aligned} \quad (26)$$

依据式(25)、式(26), 时延和数据积压违约概率边界是跳数 N 的增函数, 表明跳数增加时车联网高优先级业务任务卸载的时延性能变差。

3.2 低优先级业务性能边界

低优先级业务对应的 $M_l(\theta, \tau, t)$ 推导过程与 $M_h(\theta, \tau, t)$ 的推导过程相似, 根据式(2)和式(19)可得

$$\begin{aligned} M_l(\theta, \tau, t) &\triangleq \sum_{u=0}^t \mathbb{M}_{A_l}(\theta, u, t) \cdot \overline{\mathbb{M}}_{S_l}(\theta, u, \tau) \\ &= \sum_{u=0}^t \mathbb{M}_{A_l}(\theta, u, t) \cdot \overline{\mathbb{M}}_{S_{\text{net}}}(\theta, u, \tau) \cdot \mathbb{M}_{A_h}(\theta, u, \tau) \\ &\leq e^{\theta\sigma_1} e^{\theta\sigma_2} \sum_{u=0}^t p_l^{(t-u)}(\theta) p_h^{(\tau-u)}(\theta) \\ &\quad \cdot \sum_{\sum_{j=1}^{N+2} \pi_j = \tau - u} \prod_{j=1}^{N+2} q_j^{\pi_j}(-\theta) \end{aligned} \quad (27)$$

令 $w = \tau - u$ 进行变量替换, 式(27)可转化为

$$\begin{aligned} M_l(\theta, \tau, t) &\leq \frac{e^{\theta(\sigma_1+\sigma_2)}}{p_l^{\tau-t}(\theta)} \sum_{w=\tau-t}^{\tau} p_l^w(\theta) p_h^w(\theta) \\ &\quad \cdot \sum_{\sum_{j=1}^{N+2} \pi_j = w} \prod_{j=1}^{N+2} q_j^{\pi_j}(-\theta) \\ &\leq \frac{e^{\theta(\sigma_1+\sigma_2)}}{p_l^{\tau-t}(\theta)} \\ &\quad \cdot \sum_{w=\tau-t}^{\tau} \sum_{j=1}^{N+2} \frac{(p_h(\theta) p_l(\theta) q_j(-\theta))^{N+w+1}}{\prod_{z \neq j} (p_h(\theta) p_l(\theta) q_z(-\theta) - p_h(\theta) p_l(\theta) q_z(-\theta))} \end{aligned} \quad (28)$$

记 $\Upsilon_{jl}(\theta) = \prod_{j \neq z} (p_h(\theta) p_l(\theta) q_j(-\theta) - p_h(\theta) p_l(\theta) q_z(-\theta))$, $K_{jl}(\theta) = p_h(\theta) p_l(\theta) q_j(-\theta)$, 式(28)转化为

$$\begin{aligned} M_l(\theta, \tau, t) &\leq \frac{e^{\theta(\sigma_1+\sigma_2)}}{p_l^{\tau-t}(\theta)} \sum_{w=\tau-t}^{\tau} \sum_{j=1}^{N+2} \frac{K_{jl}(\theta)^{N+w+1}}{\Upsilon_{jl}(\theta)} \\ &\leq \frac{e^{\theta(\sigma_1+\sigma_2)}}{p_l^{\tau-t}(\theta)} \sum_{j=1}^{N+2} \frac{K_{jl}(\theta)^{N+\tau-t+1}}{\Upsilon_{jl}(\theta) (1 - K_{jl}(\theta))} \end{aligned} \quad (29)$$

其中, $K_{jl}(\theta) < 1$ 。由式(29)可得, 低优先级业务性能边界为

$$\mathbb{P}(D_l(t) > d_l) \leq \inf_{\theta > 0} \frac{e^{\theta(\sigma_1+\sigma_2)}}{p_l^{d_l}(\theta)} \sum_{j=1}^{N+2} \frac{K_{jl}(\theta)^{N+d_l+1}}{\Upsilon_{jl}(\theta) (1 - K_{jl}(\theta))} \quad (30)$$

$$\mathbb{P}(B_l(t) > b_l) \leq \inf_{\theta > 0} e^{-\theta b_l} e^{\theta(\sigma_1+\sigma_2)} \sum_{j=1}^{N+2} \frac{K_{jl}(\theta)^{N+1}}{\Upsilon_{jl}(\theta) (1 - K_{jl}(\theta))} \quad (31)$$

同样, 式(30)和式(31)中时延和数据积压违约概率边界是跳数 N 的增函数, 表明车联网低优先级业务任务卸载的时延性能随跳数增加而变差。

4 仿真与分析

本节对车辆中继转发的多跳网络任务卸载性能

进行了仿真。仿真参数选取如下：中继车辆数目 $N=3$ ，每跳的信道参数分别设定为3, 3.5, 4, 4.5。由于最小加卷积具有交换性，因此各跳对应的信道系数取值与顺序无关，本节仿真信道衰落系数取值顺序为 $m_1 = 3, m_2 = 3.5, m_3 = 4, m_4 = 4.5$ 。本节分别仿真了所推导的闭式表达式性能和蒙特卡罗仿真性能，其中蒙特卡罗仿真点数为 10^5 。仿真中业务激增 $\sigma_1 = \sigma_2 = 0$ ，其他参数如表1所示^[13,15]。

图2为高优先级业务不同平均到达率的时延违约概率边界， λ 取值为7 Mbit/时隙。在图2(a)中， $\rho = 1/4$ 数据包/时隙时， $\mathbb{P}(D_h(t) > d_h) = 1, 0 \leq d_h \leq 17$ ，这种情况下的业务时延为确定时延，即此时车辆业务的最低时延是17个时隙。结合图2(b)相同条件下的数据积压违约概率边界可知此时网络数据积压队列超过50 Mbit，网络服务质量较差，数据积压队列较长。由此可知，当车联网中车辆高优先级业务数据包的到达速率大于或者等于1/4数据包/时隙的时候，车辆服务质量较差。随着高优先级业务

表1 车联网参数设置

| 参数名称及符号 | 数值 |
|------------------------|---------------|
| 信道带宽 B | 2.16 GHz |
| 发射功率 p | 5 mW |
| 调度时隙 T^S | 50 ms |
| 时隙 T | 2 ms |
| 导频传输时间 T_p | $0.01T^S$ |
| 噪声功率密度 N_0 | -174 dBm/Hz |
| 旁瓣增益 g | 0.1 |
| 接收端主瓣波束宽度 Ψ^R | 25° |
| 高优先级业务数据包大小 α_h | 8 Mbit |
| 低优先级业务数据包大小 α_l | 8 Mbit |
| 发射端主瓣波束宽度 Ψ^T | 25° |
| 扇区级波束带宽 ϕ | 45° |
| VEC服务器计算容量 C | 10000 Mbit/时隙 |

数据包平均到达率的减小，业务时延违约概率也在减小，即车辆业务边缘卸载时延较小。因此， $\rho = 1/6$ 和 $\rho = 1/8$ 数据包/时隙时，能够保证时延违约概率较小的前提下，网络能够容忍的车辆高优先级业务平均到达速率足够大。 $\varepsilon_{dh} = 10^{-3}$ 时， $\rho = 1/6$ 和 $\rho = 1/8$ 的概率时延分别约为20时隙和15时隙。

图3是MEC服务器处其他业务包络速率取值分别为8, 7, 6 Mbit/时隙的时延违约概率边界，数据包平均到达率为1/8数据包/时隙。如图3所示，违约概率随 λ 的增加而增加。这是由于 λ 越大，MEC服务器为车辆业务剩余的资源越小，则边缘计算服务量越小，导致实际时延的违约概率越大。 $\lambda = 8$ Mbit/时隙时，车辆业务的时延大于20个时隙的概率约为0.1。因此，为保证车辆业务的时延需求，MEC服务器处其他业务包络速率不得超过8 Mbit/时隙。 $\lambda = 7$ Mbit/时隙时，业务的时延违约概率比较小，既满足了车辆业务的时延敏感度，又为小区内其他用户保留了更多的计算资源。通过不同业务的时延要求及边界曲线仿真，能够合理分配MEC服务器资源，从而使其资源利用率最大化。

图4是 λ 取值分别为8, 7和6 Mbit/时隙的数据积压违约概率边界，数据包平均到达率为1/8数据包/时隙。随着车辆数据积压的增大，其违约概率不断减小，即网络中的数据积压队列大于横坐标数值的概率逐渐变小，这一规律符合随机网络演算的统计特征。从图4中性能曲线可观察到， $\lambda = 8$ Mbit/时隙时，数据积压超过50 Mbit的概率大于0.01，且这种情况下确定的最小队列积压不小于25 Mbit。因此，可通过数据积压违约概率边界合理设置网络节点缓冲队列大小。

图5为 ρ 取不同值时车辆低优先级业务时延边界。由图5(a)可知， $r = 1/6$ 数据包/时隙的时延违约概率与 $r = 1/8$ 数据包/时隙对应的违约概率几乎相等， $r = 1/4$ 数据包/时隙的违约概率相较于前两

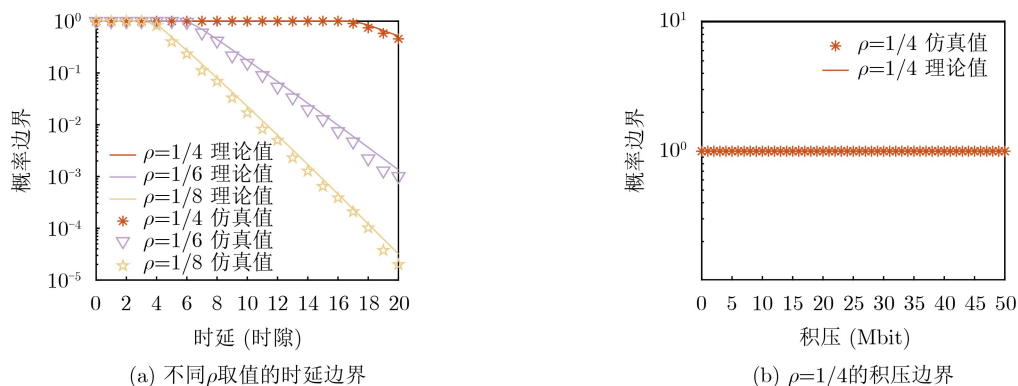


图2 高优先级业务性能边界

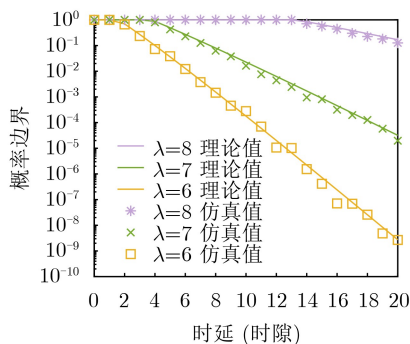


图3 不同λ取值的高优先级业务时延边界

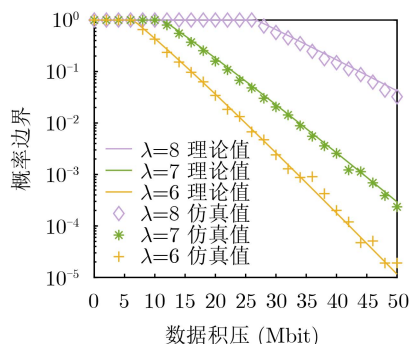
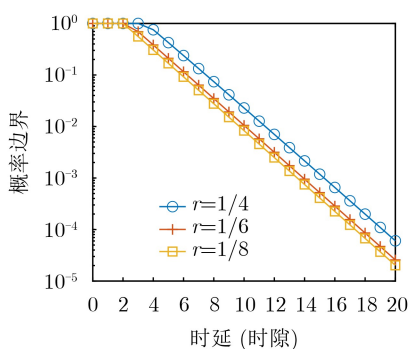
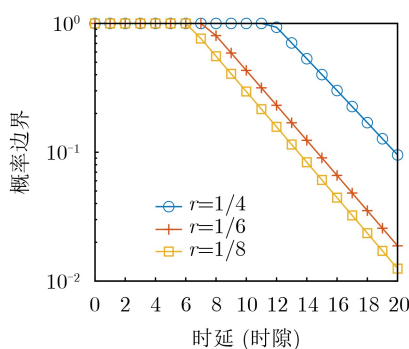


图4 不同λ取值的高优先级业务积压边界



(a) $\rho=1/16$ 的时延边界



(b) $\rho=1/8$ 的时延边界

图5 低优先级业务时延边界

者较大，但差距仍不明显。这是因为此时高优先级业务的到达率较小，网络为低优先级业务剩余的服务量非常充足， r 从1/8数据包/时隙增大到1/6数据包/时隙的时候，业务到达服务节点即可接受服务，因此其时延违约概率近似不变。1/8数据包/时隙时，网络的服务能力大于业务的到达，时延是网络处理车辆业务所用的时间。车联网中车辆高优先级业务到达速率增大时，低优先级业务的剩余服务量就会变小，其时延及违约概率增大。对比图5(a)和图5(b)， $\rho=1/16$ 数据包/时隙、 $r=1/4$ 数据包/时隙时， $\mathbb{P}(D_l(t) > 20) \approx 5 \times 10^{-5}$ ，而 $\rho=1/8$ 数据包/时隙、 $r=1/4$ 数据包/时隙时， $\mathbb{P}(D_l(t) > 20) \approx 0.1$ 。时延边界恶化较快，这是由于 $\rho=1/8$ 数据包/时隙时，低优先级业务的服务小于其到达量，队列产生一定的数据积压。如图5(b)所示， $\rho=1/8$ 数据包/时隙时，剩余服务量一定，随着低优先级业务数据包到达率的增大，低优先级业务的数据包在缓冲处不断积压，因此其违约概率值变化明显。

图6为 $\rho=r$ 时两种优先级业务的数据积压违约概率边界，数据包到达率分别为1/4、1/6和1/8数据包/时隙。从中可以观察到，随着数据包到达率增大，队列积压违约概率边界也在增大，且低优先级业务边界恶化得更快。 $\rho=r=1/4$ 数据包/时隙时，低优先级业务数据积压大于50 Mbit的概率为1，即这种情况

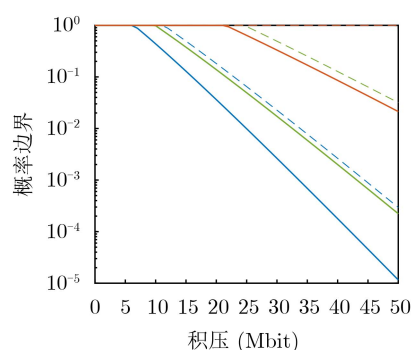


图6 $r = \rho$ 时的业务积压边界

下的低优先级业务等待队列长度一定大于50 Mbit，而高优先级业务积压超过50 Mbit的概率约为 2×10^{-2} 。由图6可知，随着高优先级业务数据包到达率增大，低优先级业务积压边界变化较为明显。这是因为高优先级业务数据包到达率增大时，网络服务量不变，低优先级业务获得的服务量减小，因此缓冲队列不断增大。

5 结束语

针对车联网边缘计算多跳传输任务卸载问题，本文推导了车联网多跳传输的服务过程，通过随机网络演算理论建模了两种优先级业务的服务过程，

并求得了其性能边界闭式表达式。最后对所推导的性能边界进行仿真,蒙特卡罗仿真曲线与理论仿真曲线重合度良好,验证所推导性能边界表达式的正确性。在车联网系统中,车辆移动性也是影响车联网通信与边缘计算性能的重要因素,在未来可进一步考虑车辆移动性对毫米波通信小尺度衰落统计特性的影响,分析车联网边缘计算统计性能。

参考文献

- [1] XU Yongjun, GUI Guan, GACANIN H, *et al.* A survey on resource allocation for 5G heterogeneous networks: Current research, future trends, and challenges[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2021, 23(2): 668–695. doi: [10.1109/COMST.2021.3059896](https://doi.org/10.1109/COMST.2021.3059896).
 - [2] YANG Zhaohui, PAN Cunhua, WANG Kezhi, *et al.* Energy efficient resource allocation in UAV-enabled mobile edge computing networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2019, 18(9): 4576–4589. doi: [10.1109/TWC.2019.2927313](https://doi.org/10.1109/TWC.2019.2927313).
 - [3] CHEN Mingzhe, YANG Zhaohui, SAAD W, *et al.* A joint learning and communications framework for federated learning over wireless networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2021, 20(1): 269–283. doi: [10.1109/TWC.2020.3024629](https://doi.org/10.1109/TWC.2020.3024629).
 - [4] JIANG Yong and LIU Yuming. Stochastic Network Calculus[M]. London: Springer, 2008. doi: [10.1007/978-1-84800-127-5](https://doi.org/10.1007/978-1-84800-127-5).
 - [5] AL-ZUBAIDY H, LIEBEHERR J, and BURCHARD A. Network-layer performance analysis of multihop fading channels[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2016, 24(1): 204–217. doi: [10.1109/TNET.2014.2360675](https://doi.org/10.1109/TNET.2014.2360675).
 - [6] SCHIESSL S, GROSS J, SKOGLUND M, *et al.* Delay performance of the multiuser MISO downlink under imperfect CSI and finite-length coding[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2019, 37(4): 765–779. doi: [10.1109/JSAC.2019.2898759](https://doi.org/10.1109/JSAC.2019.2898759).
 - [7] CHEN Yunpei, ZHU Qi, FENG Chunyang, *et al.* Analysis of backlog and delay in downlink power-domain non-orthogonal multiple access wireless networks[J]. *Computer Communications*, 2021, 166: 26–39. doi: [10.1016/j.comcom.2020.11.005](https://doi.org/10.1016/j.comcom.2020.11.005).
 - [8] 喻莉, 罗晶晶, 姜烈, 等. 基于随机网络演算的无线多跳网延迟边界分析[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(4): 933–938. doi: [10.3724/SP.J.1146.2012.01029](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2012.01029).
YU Li, LUO Jingjing, JIANG Lie, *et al.* Stochastic delay boundary analysis of multi-hop wireless networks based on stochastic network calculus[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(4): 933–938. doi: [10.3724/SP.J.1146.2012.01029](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2012.01029).
 - [9] 高月红, 李岚, 张欣, 等. URLLC业务概率时延约束及资源预留的分析与研究[J]. 北京邮电大学学报, 2018, 41(5): 98–102. doi: [10.13190/j.jbupt.2018-155](https://doi.org/10.13190/j.jbupt.2018-155).
 - GAO Yuehong, LI Lan, ZHANG Xin, *et al.* Analysis and research on the probabilistic delay constraint and resource reservation for URLLC traffic[J]. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*, 2018, 41(5): 98–102. doi: [10.13190/j.jbupt.2018-155](https://doi.org/10.13190/j.jbupt.2018-155).
 - [10] XIONG Kai, LENG Supeng, HUANG Chongwen, *et al.* Intelligent task offloading for heterogeneous V2X communications[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2021, 22(4): 2226–2238. doi: [10.1109/TITS.2020.3015210](https://doi.org/10.1109/TITS.2020.3015210).
 - [11] YANG Guang, XIAO Ming, AL-ZUBAIDY H, *et al.* Analysis of millimeter-wave multi-hop networks with full-duplex buffered relays[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2018, 26(1): 576–590. doi: [10.1109/TNET.2017.2786341](https://doi.org/10.1109/TNET.2017.2786341).
 - [12] CHEN Xiaosha, LENG Supeng, HE Jianhua, *et al.* Deep-learning-based intelligent intervehicle distance control for 6G-enabled cooperative autonomous driving[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 8(20): 15180–15190. doi: [10.1109/JIOT.2020.3048050](https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.3048050).
 - [13] WU Yu, YAN Li, and FANG Xuming. A low-latency content dissemination scheme for mmWave vehicular networks[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2019, 6(5): 7921–7933. doi: [10.1109/JIOT.2019.2907119](https://doi.org/10.1109/JIOT.2019.2907119).
 - [14] 3GPP R1–1809335. LTE Uu support for advanced V2X use cases[S]. 2018.
 - [15] PERFECTO C, SER J D, and BENNIS M. Millimeter-wave V2V communications: Distributed association and beam alignment[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2017, 35(9): 2148–2162. doi: [10.1109/JSAC.2017.2719998](https://doi.org/10.1109/JSAC.2017.2719998).
 - [16] HE Ruisi, RENAUDIN O, KOLMONEN V M, *et al.* A dynamic wideband directional channel model for vehicle-to-vehicle communications[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, 62(12): 7870–7882. doi: [10.1109/TIE.2015.2459376](https://doi.org/10.1109/TIE.2015.2459376).
 - [17] BELBACHIR H and BENCHERIF F. Linear recurrent sequences and powers of a square matrix[J]. *Integers*, 2006, 6(A12): 17.
- 李松: 男, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为工业物联网、边缘计算。
王新荣: 女, 硕士生, 研究方向为随机网络演算、边缘计算。
王博文: 男, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为地下空间无人机应急网络、工业物联网、社交物联网。
陈瑞端: 男, 讲师, 硕士生导师, 研究方向为无线资源分配、智能通信、涡旋电磁波通信。
孙彦景: 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为无线通信与组网、工业物联网。
陈岩: 男, 博士生, 研究方向为无线网络、边缘计算、物联网。