分类号： 单位代码：11232

密级：





工学硕士学位论文

**高可靠低时延网络下的资源分配策略研究**

学 院： 计算机学院

学科(专业)： 计算机应用技术

学 号： 2011020222

作 者： 刘宗奇

指导教师： 陈昕 教授

完成日期： 二○一三年十二月三日

学 院： 计算机学院

学科(专业)： 计算机应用技术

学 号： 2011020222

作 者： 刘宗奇

指导教师： 陈昕 教授

完成日期： 二○一三年十二月三日

学 院： 计算机学院

学科(专业)： 计算机应用技术

学 号： 2011020222

作 者： 刘宗奇

指导教师： 陈昕 教授

完成日期： 二○一三年十二月三日

学 院：计算机学院

专 业：计算机技术

学 号：2016020291

作 者：马圣程

学校指导教师：陈昕 教授

完成日期：二○一九年三月三十一日

**学位论文版权使用授权书**

本人完全了解北京信息科技大学关于收集、保存、使用学位论文的规定，按照学校要求提交学位论文的印刷本和电子版本。学校有权保留学位论文并向中国科学技术信息研究所等国家主管部门或其指定机构送交论文的电子版和纸质版，允许论文被查阅和借阅，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。学校有权适当复制、公布论文的全部或部分内容。学校有权将本人的学位论文加入《中国优秀硕士学位论文全文数据库》和编入《中国知识资源总库》。

学位论文作者签名：

年 月 日

□公开 □保密（\_\_\_\_年\_\_\_\_月） (保密的学位论文在解密后应遵守此协议)

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 指导教师签名： | |  | 学位论文作者签名： | |  |
|  | 年 月 日 | |  | 年 月 日 | |

**硕士学位论文原创性声明**

本人郑重声明：所呈交的论文题目为《高可靠低时延网络下的资源分配策略研究》学位论文，是本人在导师指导下，进行研究工作所取得的成果。尽我所知，除了文中特别加以标注的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人创作的、已公开发表或者没有公开发表的作品的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明并表示了谢意。本学位论文原创性声明的法律责任由本人承担。

作者签字：

年 月 日

分类号： 单位代码：11232

密级：

# 摘 要

**关键词**：

ABSTRACT

**KEY WORDS**:

**目 录**

[摘 要 I](#_Toc4570593)

[ABSTRACT II](#_Toc4570594)

[英文缩略词表 VI](#_Toc4570595)

[第1章 绪论 1](#_Toc4570596)

[1.1 研究背景及意义 1](#_Toc4570597)

[1.2 国内外研究现状 3](#_Toc4570598)

[1.2.1 高可靠低延时通信技术研究现状 3](#_Toc4570599)

[1.2.2 网络性能评价问题研究现状 4](#_Toc4570600)

[1.2.3 网络资源分配问题研究现状 5](#_Toc4570601)

[1.3 研究内容与创新点 7](#_Toc4570602)

[1.3.1 主要研究内容 7](#_Toc4570603)

[1.3.2 主要创新点 8](#_Toc4570604)

[1.4 论文组织结构 9](#_Toc4570605)

[第2章 高可靠低时延网络性能分析与资源分配关键研究 18](#_Toc4570606)

[2.1 高可靠低时延网络的架构及性能指标研究 18](#_Toc4570607)

[2.2 基于随机网络演算的高可靠低时延网络性能评价研究 19](#_Toc4570608)

[2.2.1 关于时延分析的研究 20](#_Toc4570609)

[2.2.2 关于可靠性分析的研究 22](#_Toc4570610)

[2.3 高可靠低延时网络资源分配问题研究 23](#_Toc4570611)

[2.4 本章小结 23](#_Toc4570612)

[第3章 高可靠低时延网络性能评价 23](#_Toc4570613)

[3.1 高可靠低时延网络的时延分析 23](#_Toc4570614)

[3.2 高可靠低时延网络的可靠性分析 23](#_Toc4570615)

[3.3 本章小结 24](#_Toc4570616)

[第4章 高可靠低时延网络资源分配策略研究 31](#_Toc4570617)

[4.1 高可靠低时延网络切片模型 31](#_Toc4570618)

[4.2 基于强化学习方法的网络切片优化策略 31](#_Toc4570619)

[4.3 网络切片算法实现 31](#_Toc4570620)

[4.4 性能分析 31](#_Toc4570621)

[4.4.1 通信开销 32](#_Toc4570622)

[4.4.2 计算开销 32](#_Toc4570623)

[4.5 本章小结 32](#_Toc4570624)

[第5章 网络性能评价与算法仿真 40](#_Toc4570625)

[5.1 随机网络演算性能分析 40](#_Toc4570626)

[5.2 时延分析器 40](#_Toc4570627)

[5.3高可靠低时延的网络切片策略性能分析 40](#_Toc4570628)

[5.4 本章小结 41](#_Toc4570629)

[第6章 结论与展望 48](#_Toc4570630)

[6.1 结论 48](#_Toc4570631)

[6.2 展望 48](#_Toc4570632)

[致谢 50](#_Toc4570633)

[参考文献 51](#_Toc4570634)

[附录1 图目录 54](#_Toc4570635)

[附录2 表目录 55](#_Toc4570636)

[个人简历、在学期间发表的学术论文及研究成果 56](#_Toc4570637)

# 英文缩略词表

| 缩略词 | 英文全称 | 中文全称 |
| --- | --- | --- |
| 5G | The Fifth Generation | 第五代移动通信系统 |
| ITU | International Telecommunication Union | 国际电信联盟 |
| 3GPP | The Third Generation Partnership Project | 第三代合作伙伴计划 |
| eMBB | Enhance Mobile Broadband | 增强型移动宽带 |
| mMTC | Massive Machine Type Communication | 海量积极类型通信 |
| URLLC | Ultra Reliable and Low Latency Communication | 高可靠低时延通信 |
| LTE-A | Long Term Evolution Advanced | 高级第四代移动通信系统 |
| SNC | Stochastic Network Calculus | 随机网络演算 |
| SDN | Software Defined Network | 软件定义网络 |
| NFV | Network Function Virtualized | 网络功能虚拟化 |
| NS | Network Slicing | 分组核心网 |
| API | Application Program Interface | 应用程序编程接口 |
| VNF | Virtual Network Function | 虚拟化网络功能 |
| RL | Reinforcement Learning | 强化学习 |
| DRL | Deep Reinforcement Learning | 深度强化学习 |
| PD | Packet Duplication | 数据包复制 |
| RAN | Radio Access Network | 无线接入网 |
| HARQ | Hybrid Automatic Repeat Request | 混合自动重传 |
| D2D | Device to Device | 设备对设备通信 |
| MIMO | Multiple-Input-Multiple-Output | 多入多出 |
| UDN | Ultra Dense Network | 超密集组网 |
| FDD | Frequency Division Duplexing | 频分双工 |
| TDD | Time Division Duplexing | 时分双工 |
| MGF | Moment Generating Functions | 矩母函数 |
| OFDMA | Orthogonal Frequency Division Multiple Access | 正交频分多址 |
| QoE | Quality of Experience | 用户体验质量 |
| E2E | End to End | 端到端 |
| EC | Edge Computing | 边缘计算 |
| NR | New Radio | 新型无线 |
| 4G | The fourth Generation | 第四代移动通信系统 |
| NSA | Non-Stand Alone | 非独立组网 |
| SA | Stand-Alone | 独立组网 |
| EPC | Evolved Packet Core | 演进型核心网 |
| NGC | Next Generation Core | 下一代核心网 |
| 5GC | The Fifth Generation Core | 5G核心网 |
| UP | User Plane | 用户平面 |
| CP | Control Plane | 控制平面 |
| UL | Uplink | 上联 |
| DL | Downlink | 下联 |
| BLER | Block Error Rate | 误块率 |
| gNB | gNodeB | 5G基站 |
| RRU | Radio Remote Unit | 远端射频单元 |
| BBU | Building Baseband Unit | 室内基带处理单元 |
| AAU | Active Antenna Unit | 有源天线单元 |
| DU | Distributed Unit | 分布式单元 |
| CU | Centralized Unit | 集中式单元 |

# 绪论

## 1.1 研究背景及意义

随着移动通信技术的快速发展，第五代移动通信技术已经渗透到生活中的多个领域，从视频直播到在线支付，从无人驾驶再到智慧城市。5G通信技术首次应用出现在2018年韩国平昌冬季奥运会上，主办方通过应用5G技术顺利地实现了体育赛事的在线直播，让观众可以通过网络流畅的观看比赛。根据国际电信联盟（ITU，International Telecommunication Union）公布的5G标准时间表，5G将在2020年开始全面商业化[1]。5G网络从设计之初，就被考虑用来支持各种复杂的通信场景。第三代合作伙伴计划（3GPP，The Third Generation Partnership Project）将这些不同的场景分为三大类：增强型移动宽带（eMBB, enhance Mobile Broadband）、海量机器类型通信（mMTC, massive Machine Type Communication）和高可靠低时延通信（URLLC, Ultra Reliable and Low Latency Communication）[2]。

高可靠低时延通信广泛应用于自动驱动、工业控制和其它一些延迟敏感系统。在5G通信系统中，对系统延迟和可靠性等指标具有严格的要求。3GPP组织对高可靠低时延通信标准的关键要求是，保证下行和上行用户平面数据的延迟小于1ms，同时保持数据接收可靠性在99.999%[3]。如此严格的延迟要求就需要新的5G技术来满足。虽然现有的LTE网络能够实现可靠性目标，但是代价是要付出几十毫秒的时间延迟。这远远超出了URLLC的低时延要求。因此，延迟成为URLLC网络设计中的瓶颈，也是最亟需解决的问题。许多科研院校和科技公司已经提出了一些从工程上解决的方案以尽量降低延迟，如HARQ重传和免授权传输技术。然而，如何从理论角度分析时延的产生，并提出有效的资源分配策略，从而在保证传输时延的前提下，提高资源利用率是一个重要的研究课题。

随机网络演算（SNC，Stochastic Network Calculus）理论是延迟性能分析的有效工具。随机网络演算理论目前仍然在不断发展中，该理论的优点在于分析网络流量特性和评估系统通信性能[4]。与排队论不同，随机网络演算理论允许以很小的概率违背期望的指标限值，利用这一特性可以更好地获得统计复用增益。随机网络演算理论具有丰富的网络流量分析模型，可以针对数据积压、时延、可靠性等指标对网络系统进行性能分析与评价[5]。通过分析导致时延产生的原因，针对关键因素进行优化，调整网络资源部署，从而满足高可靠低延时场景下的性能的要求。

(本段缩减，或拆开，8行-10行，中心要表达的内容，前面说因，核心技术，我围绕核心技术如何解决)随着软件定义网络(SDN，Software Defined Network)和网络功能虚拟化(NFV,Network Function Virtualized)技术的快速发展，网络切片技术也应运而生。软件定义网络和网络功能虚拟化是实现可编程和灵活传输网络的一个新型网络架构。软件定义网络技术允许网络服务提供商通过应用程序编程接口(API，Application Program Interface)控制其资源来引入网络可编程性[6]。此外，软件定义网络技术采用OpenFlow协议来描述控制器与交换机之间的交互信息[7]，从而实现了网络控制层面与转发层面的分离，为网络切片技术提供了更广阔的设备兼容性。网络功能虚拟化技术将原有的负责不同网络功能的物理设备转化为了虚拟化的网络功能(VNF，virtual network function)，可以在传输网络的不同部分动态创建网络功能虚拟化基础设施，为网络资源的部署和分配提供了灵活性[8]。软件定义网络和网络功能虚拟化为网络切片技术的实现提供了可能。网络切片技术可以将服务内容传递给定制的软件进行处理，同时可以根据特定的服务需求动态分配硬件资源[9]。因此，网络切片技术为5G通信的网络部署和资源分配提供了一种可行的解决方案[10]。此外，网络切片技术可以根据网络服务需求动态调度网络中的硬件资源，形成虚拟网络单元，从而支持不同的网络服务需求，实现网络硬件资源的复用。此功能可以提高不同的服务质量和网络资源利用效率。同时，网络切片可以集成和分配一些相互独立的网络资源，为低延迟、高可靠性的应用场景提供服务[11]。

在5G网络应用中，如何根据不同场景的性能要求，为通信请求灵活的提供所需的资源，目前仍是一个比较前沿的问题。随着人工智能技术的兴起，大量的采用机器学习方法对网络资源进行分配的研究不断涌现[12]。但目前5G网络仍未完全投入运营,对网络资源进行分配的网络切片策略还处于研究阶段。在这种情况下，缺乏大量的实际应用数据供有监督学习的智能算法进行训练。强化学习(RL，Reinforcement Learning)是一种不需要标记数据的学习方法，其算法思想是通过智能体与环境不断交互，获得反馈并调整动作以达到奖励值最大化[13]。已经广泛的应用在棋牌博弈、游戏比赛、机器人、自动驾驶等领域。在最复杂的围棋比赛中战胜韩国李世石和中国柯洁的AlphaGo[14]其核心算法就是强化学习。当问题的复杂程度增加，环境的状态和动作的范围不断扩大，需要深度学习的方式来解决维度爆炸的问题。因此，深度强化学习(DRL,Deep Reinforcement Learning)结合了深度学习和强化学习的优点，成为了人工智能领域的新浪潮[15]。

（有吸引人的事件，生活中，吸引人眼球的东西，先提事件，在说技术，后面是自己要说的事情）为了将通信时延降低在标准要求以内，同时确保通信的可靠性，本文围绕URLLC场景下的性能分析与资源分配问题开展研究。首先，研究URLLC场景下的通信特点，以及用于分析性能的随机网络演算理论，解决资源分配问题的网络切片技术和强化学习技术。其次，我们要研究5G网络URLLC场景的网络架构，了解其性能指标，根据网络架构的特点建立分析模型，根据网络模型中各个要素的实际意义，定义随机网络演算理论分析中需要的流量过程。依据随机网络演算中时延的分析方法，结合随机网络演算中的一些特性，得出时延边界。再者，针对URLLC场景的应用特点，为满足通信需求而通过网络切片的方式进行资源分配。通过强化学习方法制定网络切片的分配策略，设置合理的切片划分的激励函数，利用贪心算法的思想选择激励值最大的行为，根据系统当前状态与行为值的选择建立贝尔曼方程，利用马尔科夫决策过程迭代更新完成系统的资源分配优化策略，有效的提高了系统的资源利用率。最后，通过实验分析，得到了影响时延产生的主要因素，分析了在满足URLLC时延要求情况下，各个影响因素变量的合理范围值。为URLLC通信的网络部署提供了有价值的指导和借鉴意义。通过仿真实验，我们验证了基于强化学习的网络切片策略的有效性，从而为实际环境下URLLC通信的资源分配提供了一种可选择的方案。

本课题依托于国家自然科学基金面上项目《5G超密集接入网智能动态资源分配及其优化方法研究》，项目编号：61872044，是5G超密集接入网智能动态资源分配及其优化方法问题中的子问题，目的在于为通信时延的降低提供理论依据和优化方向，为智能动态资源分配方法进行前期预研，以提供一种既满足性能需求又提高资源利用率的解决方案。

## 1.2 国内外研究现状

随着自动驾驶、无人机控制等时延敏感通信应用的发展，URLLC通信越来越受行业关注。今年来，国内外学者围绕着URLLC的时延与可靠性等性能指标进行研究，提出了很多的性能评价方法与实施方案。针对网络部署与资源分配问题，以网络切片为技术手段的实现方式已在5G标准中敲定。（体现人，团队，体现单位，体现成功，多写华为，顶天立地，格局大）

### 1.2.1 高可靠低时延通信技术研究现状

由于URLLC的标准尚未制定完成，许多研究者对URLLC的设计提出了不同的解决方案。总所周知，URLLC场景对于时延和可靠性的要求是极高的，所以许多学者将研究重点放在了如何设计和实现URLLC通信以满足性能要求。

Jimmy等提出了一种无需干预的物理层接口，将多种不同的协议接口整合为一个整体，提高了接口的兼容性。并且设计了一种分析架构。这种架构不但可以用传统的模型来分析可靠性，还可以分析特定技术的延迟概率分布,通过这种方式，他们能够根据延迟和可靠性来评价一个集成通信系统的性能[16]。

为了降低无线接口与互联网通信时的抖动，并且保证端到端通信的低时延，Delgado R A等人提出了一种新的多入多出级联控制器，该控制器的优点是解决了控制节点的数据流分割问题[17]。

Jaya Rao和Sophie Vrzic提出了一种数据包复制(PD, Packet Duplication)方法来满足延迟和可靠性的要求[18]。该数据包复制技术的原理是通过生成多个实例并在不相关的通道中同时发送，接收端再根据信道情况选择最佳的分组，以达到更好的传输可靠性。这种数据包复制技术可以在不增加无线接入网(RAN，Radio Access Network)复杂性的情况下提供一种经济有效的解决方案。

为了满足包括延迟和可靠性在内的关键需求，在文献[19][20][21][22]中讨论了目前主流的一些解决方案。这些技术包括HARQ快速重传(Hybrid Automatic Repeat request)、MIMO(Muiltiple-input-multiple-output)、波束形成、多协议接口整合、D2D(Device to Device)通信、超密集组网等。其中一些技术可以单独使用以提高性能，而有一些技术需要结合在一起，组合使用才能获得更好的性能。这些文章都提到了设计架构，需要在时域与频域上进行灵活的划分，需要这些精心的设计，都是这是因为URLLC应用对低延迟和高可靠性的严格要求。

### 1.2.2 网络性能评价问题研究现状

针对URLLC场景的各项性能指标进行评价，是进一步优化改进URLLC通信，提高网络服务质量和用户服务体验的重要基础。由于URLLC对延迟和可靠性有着严格的要求，因此对URLLC的性能进行评估是非常有意义的。

**1）针对时延性能评估的研究**

Joachim等人在他们的文章中提出一个可实现的延迟评估边界。他们比较了5G RAN传输中不同配置的延迟[23]。这些配置包括频分双工(FDD, Frequency Division Duplexing)、时分双工(TDD, Time Division Duplexing)、频段和时隙的使用。根据分析可知，利用高频带宽可以有效减少延迟，这也是毫米波技术得到广泛应用的原因。

随机网络演算理论是分析排队系统随机边界特性的有力理论工具，简化了性能指标的求解，在性能分析和理论边界计算中具有很好的实用效果。目前，针对无线网络边界性能评价已经取得了部分有效成果。Beck等人[24]设计了基于随机网络演算的DISCO网络性能分析器，分析了网络积压和延迟等边界特性，并获取网络随机边界性能，以适应新的网络需求。Li等人运用随机网络演算分析多基站网络时延，使用随机服务曲线和M/M/N模型推导排队延迟界限[25]。蒋玉明等人分析了无线电力通信系统的吞吐性能[26],他们将时延定义为约束条件，采用随机流量到达模型，推导出累计数据传输能力。M.Fidler等人使用随机服务过程来分析TCP的端到端延迟性能[27]。这篇文章采用随机服务过程实现了闭环流量的评价方法，并且同时分析了流量的积压和时延。K.Zheng, F.Liu, L.Lei, C. Lin and Y.Jiang等人分析了无线有限状态马尔可夫信道的性能，基于矩母函数 (MGF，Moment Generating Functions) 推导出了马尔可夫信道的延迟边界 [28] 。陈昕团队专注于LTE网络，研究通过优化资源分配以保证延迟性能[29]。在其研究中，证明了通信延迟受随机到达曲线和随机服务曲线的差值的约束。参考[30]是M.Fidler和Y.Jiang共同合作完成的，这两位作者是随机网络演算理论研究的代表性人物，他们在这篇文章中利用随机网络演算理论分析了多服务器系统的延迟边界。

**2）针对可靠性评估的研究**

文献[31]提出了一种基于工作负载损失率的网络概率计算方法，该方法可通过对损失的计算来衡量网络服务的可靠性。文献[32]参考包络过程理论和矩母函数，得出了网络演算中的确定损失边界。文献[33]提出了一种新的网络服务模型，这种模型通过设置丢包参数来分析网络的丢包率。一篇来自华为公司的文章提出了一种免费模式的上行链路传输机制。一篇来自华为公司的文章提出了一种免授权模式的上行链路传输机制[34]。该机制在没有调度请求的情况下动态授予传输权限，在保证安全性的前提下满足了上行传输中URLLC的可靠性要求。通过模拟不同数量活跃用户的随机到达请求，采用免授权模式，可以有效提高数据传输的可靠性。

### 1.2.3 网络资源分配问题研究现状

5G通信技术的设计初衷就是要满足不同类型的服务和应用。目前，很多学者在资源配置和能源效率方面做了很多研究。在URLLC场景中，如何将频谱资源合理分配以满足用户端设备的通信需求是一项长期引起关注的研究。

**1）结合能耗的资源分配问题研究**

Anand A和De Veciana G基于5G标准技术正交频分多址(OFDMA，Orthogonal Frequency Division Multiple Access)建立了一次性传输模型，该模型采用排队论对频谱资源进行分析的[35]。他们发现在一次性传输系统中，长时间的小带宽比短时间的大带宽资源利用率更高。Mukherjee A等人[36]提出了一个节能方案。这种方案对一组相邻的基站进行协调，通过彼此共享一个睡眠时间表，让基站在休眠与唤醒的状态中切换。如果基站当前负载较低的流量和较少的连接任务，它们将被设置为休眠模式。在保证延时的前提下，这种切换方案比传统方式更加节能。

**2）基于网络切片的资源分配问题研究**

网络切片使网络运营商能够将逻辑上相互独立的网络资源分配给服务提供者、虚拟运营商和普通用户，并在网络基础设施上提供定制化的面向服务的功能，从而支持多种不同的服务和应用。通过对软件定义网络和网络功能虚拟化技术的应用，网络运营商可以提供自动化的，弹性的，可编程的网络切片。

随着网络应用数量增加，用户需求越来越复杂，应该考虑如何具体实现网络切片的算法，制定策略和机制来处理资源分配，特别需要应对高度动态化的资源共享需求。S. Vassilaras等学者关注于实时环境下的网络切片资源分配和控制算法，将网络资源管理和编排作为虚拟网络嵌入的一个实例 [37] 。在考虑到当前网络的动态特性基础上，应用图论将网络切片问题从网络拓扑的角度去描述，并将其归约为整数线性规划中的多商品流问题。S.Sharma等人阐述了面向服务的5G切片概念，分析了从实体网络到功能网络的范式转换[38]。充分考虑到了网络切片在整个生命周期内的设计、实现和编排，并提出了原生云网络切片方法。通过一个概念验证系统的演示，验证了端到端移动网络中的原生云网络切片方法在资源利用率方面的优越性。通过建立一种网络切片系统，并提出特定算法或者分配机制来解决问题的研究还有[39][40][41][42][43]他们都对服务编排和切片操作进行了深入的研究，指出了满足所需定制和性能要求的关键支持技术。

**3）结合强化学习的资源分配研究**

随着人工智能的不断发展，很多技术都与人工智能相结合实现了效率的提升。此外，网络服务和应用需求的多样化、复杂化也需要通过智能的方法来提供支撑。很多学者建立的网络资源分配问题的求解，都借助于强化学习的方法来实现。文献[44][45]都是通过深度强化学习的方法分别解决了无线网和车联网下的资源分配问题。Yixue Hao等人利用网络切片技术来解决智能穿戴网络的资源分配问题，提出了基于超密集组网的新型的5G智能穿戴网络[46]。面对时延敏感设备的海量接入、不同设备对用户体验质量QoE(Quality of Experience)要求不同和如何智能管理等挑战，结合机器学习和强化学习的方法实现了数据驱动的网络分配管理系统，很好的解决了资源分配的问题。文献[47]通过深度强化学习方法结合边缘计算等技术手段，解决了为满足URLLC通信性能要求的资源分配问题。为了提高端到端(E2E，End to End)的平均可靠性，他们在边缘计算(EC，Edge Computing)节点上设计了一个智能代理，开发了一个实时自适应的多用户卸载任务的计算资源分配策略。文献[48]本文从混合整数线性规划公式和启发式算法两方面给出了动态切片问题的求解方法。比较了动态切片与静态切片的优点，与静态切片相比动态切片可以将网络请求拒绝概率降低一个数量级。这可以帮助网络提供商接受更多的网络请求到其基础设施中，并可能增加其收入。（去掉所有的人称代词）

## 1.3 研究内容与创新点

### 1.3.1 主要研究内容

（针对问题，尽量不要本文）本文将研究高可靠低延时网络下的性能评价及资源分配策略，具体内容包括：（1）高可靠低时延网络的通信特点及性能要求研究；（2）基于随机网络演算理论的高可靠低时延网络性能评价研究；（3）基于网络切片技术的高可靠低时延网络资源分配方法研究；（4）结合强化学习方法的高可靠低时延资源分配优化方法研究。（3和4也可以考虑结合成一个，就是智能资源分配优化方法研究）

**（1）高可靠低时延网络的架构及性能指标研究**

分析5G高可靠低时延网络架构，研究网络通信过程中的核心组件，为分析网络性能提供模型依据。研究5G标准中关于高可靠低时延网络性能要求的规定，为后续分析时延和可靠性等指标提供数据支撑。

**（2）基于随机网络演算理论的高可靠低时延网络性能评价研究**

围绕5G高可靠低时延网络的性能要求，分别从时延和可靠性两个方面，系统构建分析模型。分析用户到达数据流量、系统服务速率以及网络部署结构，运用随机网络演算理论，建立时延边界分析模型。针对高可靠低时延网络性能指标要求的时延和可靠性等参数，给出其相应的服务速率和建议的网络结构，为网络资源分配的研究提供指导方向。

**（3）基于网络切片技术的高可靠低时延网络资源分配方法研究**

根据高可靠低时延网络的性能要求，为满足提供需要服务速率，需要对网络的带宽、计算等资源进行分配。本文研究5G网络主流的资源分配技术网络切片技术，结合高可靠低时延通信的特点，建立随时间变化的资源动态分配模型。该模型可以反映当前网络的资源分配状态，以及任务对所分配资源的利用情况，通过对资源利用情况设置效用函数，以实现最大化网络资源利用率的目标。

**（4）结合强化学习方法的高可靠低时延资源分配优化方法研究**

由于5G网络高可靠低时延场景的实施技术标准正在完善中，尚无实际的应用数据产生，无法采用监督学习的方式对所建资源分配模型进行求解。另外，所建立的动态资源分配模型其状态空间随着时间的推移将呈指数增长，产生“维数灾难”问题。本文针对动态资源分配模型的求解问题，运用深度强化学习方法，通过不断动态学习划分网络切片行为，自适应调整分配策略，在不需要标注数据的情形下，给出智能动态资源分配策略。

### 1.3.2 主要创新点

加铺垫，创新性主要体现在几个方面：

**（1）针对5G网络架构特点，建立网络性能评价模型**

针对5G高可靠低时延网络架构的特点，建立串联网络模型。该模型可以分析从用户端到云服务器的数据传输。根据随机网络演算理论中的随机服务过程和串联属性来对系统进行延迟分析。基于模型分析，得出时延与到达率和服务率之间的关系。计算了满足高可靠低延迟要求的最小系统服务速率。此外，通过分析显示，减少串联服务器的数量也可以减少系统延迟。这些分析结果为网络部署与资源分配提供了有价值的指导。

**（2）针对高可靠低时延网络的性能要求，得出系统时延边界**

为了满足低延迟高可靠的性能需要，本文提出了基于随机网络演算理论的分析方法，得到了一个适合于分析从用户端到基站接入网时延的随机边界。在此基础上进行扩展，推导得出了用于分析从用户端到云服务器整个网络的时延的随机边界。为了分析网络的可靠性，本文提出了一个随机损失过程来表示错误块率。研究了错误块对延迟的影响，提出了一种延迟边界分析方法。基于分析结果，得到了时延与数据到达率、数据服务率之间的关系，并运用Python语言结合Matplotlib库设计并开发了时延模拟器，提高了时延分析效率。

**（3）运用强化学习去解决网络切片问题**

利用网络性能分析所得到的结果，指导网络资源分配的优化方向。为满足高可靠低时延的性能要求，设计基于网络切片的资源分配模型。综合考虑网络带宽、服务计算能力等资源，以及切片有效时间等因素，提出了结合深度强化学习方法的资源分配策略。通过设置评价网络切片利用的效用函数，以最大化系统效用为目标，以是否划分切片为动作空间，利用马尔科夫决策理论，给出智能动态资源分配策略，有效的提高了网络资源利用率。

## 1.4 论文组织结构

本文在高可靠低延时场景下，对网络性能进行评价并对网络资源分配策略进行研究。全文共分为六章，主要内容安排如下：

第一章 阐述了课题的研究背景及意义，结合研究问题介绍了研究方向的国内外研究现状，简述了课题的主要研究内容、创新点和组织结构。

第二章 研究了5G网络架构以及高可靠低时延通信的特点；结合5G的架构特点和性能指标，研究了用于分析时延的随机网络演算理论。针对资源分配问题，研究了网络切片技术。对于网络切片如何划分的策略优化问题，研究了深度强化学习优化方法。

第三章，研究了

第四章，研究了

和其它方案做出了对比。

第五章，

第六章，总结全文，对未来的工作方向进行展望。

# 

# 高可靠低时延网络性能分析与资源分配关键研究

本章将重点研究高可靠低时延网络的结构特点，以及关于性能的指标要求。根据网络结构的特点，研究随机网络演算理论中适合描述此类网络的模型和特性，从而为时延和可靠性的分析提供理论工具。深入研究了基于网络切片的技术的网络资源分配问题，同时对的强化学习方法进行了研究，为资源分配问题提供了解决方案。

## 2.1 高可靠低时延网络的架构及性能指标研究

**(1)5G网络架构**

高可靠低时延网络由国际电信联盟(ITU, nternational Telecommunications Union)提出，由第三代合作伙伴计划组织(3GPP, 3rd Generation Partnership Project)制定具体标准。在3GPP的TSG RAN WG1会议中，提出了5G NR(New Radio)的技术规范[49]。在NR中，将MIMO、HARQ、信道编码、双工通信模式等技术纳入到了5G接入网规范中，同时支持5G NR与4G LTE可以同时共存。这就引出了5G网络部署模式的问题。

表1. 非独立组网与独立组网对比

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 组网方式 | NSA | NSA | NSA | SA |
| 接入网 | LTE,NR | eLTE | eLTE,NR | NR |
| 核心网 | EPC+ | 5GC | 5GC | 5GC |
| 新业务功能支持  定位 | 提供新业务但功能受限  过渡部署架构，适用于5G初期 | 引入5G核心网  过渡部署架构，适用于5G中期 | 引入5G核心网  准目标部署架构，适用于5G初期 | 网络切片、新型QoS  5G目标部署架构，适用于5G全生命周期 |

根据3GPP标准Releas15的规范，5G的网络部署模式主要分为两大类: 独立组网(SA，Stand-Alone)和非独立组网(NSA, Non-Stand Alone)[50]。在非独立组网架构中，5G无线接入网络（RAN），也称为新无线（NR）与现有4G无线LTE和4G EPC基础设施核心网络结合使用，从而使新的5G无线技术无需更换原有4G的基础设施即可使用。在这种配置中，只支持4G服务，但可以享受5G网络提供的更高容量以及较低的延迟。在独立组网架构中，5G接入网NR连接到5G核心网NGC(Next Generation Core)，支持全套的5G服务，完全没有4G的存在[51][52]。关于非独立组网与独立组网的对比如表1所示。

**(2)性能指标研究**

3GPP对高可靠低时延网络的时延要求是，在用户平面(UP, User Plane)延迟的目标应为：上联(UL, Uplink)为0.5ms，下联(DL, Downlink)为0.5ms。此外，如果可能，延迟也应足够低，以支持将下一代接入技术用作可在下一代接入体系结构中使用的无线传输技术。

可靠性可以通过在一定延迟内传输指定字节的成功概率来评估，即在一定的信道质量下，从无线协议层入口点向无线接口的出口点传送小数据包所需的时间。对于URLLC可靠性要求是：在发送32字节小数据包的情况下，保证传输的误块率(BLER, Block Error Rate)在1\*10-5以内，同时满足用户平面延迟为1毫秒[2]。

如此严格的要求使得URLLC成为一项具有挑战性的服务，在技术实现方面，许多企业与学者都提出了不同的解决方案。 然而，如何从理论上分析延迟的产生，并提出有效减少延迟的部署方案和资源分配策略，加些链接的话，是本文重点要研究的问题。

## 2.2 基于随机网络演算的高可靠低时延网络性能评价研究

### 2.2.1 随机网络演算基础知识

随机网络演算是一种用于分析通信网络的系统理论方法，其中使用最小加代数描述网络操作。网络服务元素（例如有线或无线链路）被建模为最小加代数线性时变系统，输入输出关系由最小加代数中的线性时变系统理论控制。同时，将原有的确定性系统分析理论推广到具有概率特性的随机网络演算中，从而对随机网络进行建模和分析。将网络演算扩展到随机特性的方法是基于矩母函数和Chernoff边界理论[53]。随机网络演算能够从理论方法上提供随机服务保证，从而更好地利用网络中的多路复用增益特性。此外，许多网络，如无线网络和多址网络，可能只提供随机的服务保证。在无线网络中，由于信道损坏、争用、干扰等原因，无线信道的容量随时间随机变化。对于此类网络中性能分析和服务保证，随机网络演算能够很好的满足应用的需求。

在实际情况下，计算机网络由数据流和网络元素组成。于此对应的，随机网络演算理论也是建立在这两个基本概念之上的:流量模型和服务器模型。流量模型描述数据流的流量行为，服务器模型描述网络元素的服务行为[54]。为了便于将随机网络演算理论应用于网络分析，其流量模型和服务器模型应满足一些基本性质。通常情况下，随机网络演算理论具有五个基本特性用来处理网络分析：

(1) 服务保证特性

在选定的流量模型和选定的服务器模型下，可以得到诸如积压和延迟保证等单节点随机服务保证。

(2) 输出特性

流量模型的输入流可以表示服务器的输出流。

(3) 串联特性

多个的服务器的串行连接可以使用相同的服务模型来表示。

(4) 剩余服务特性

对于具有多个竞争关系数据流的服务器，其上面的服务可以使用相同的服务器模型表示。

(5) 叠加特性

数据流的叠加可以用相同的流量模型表示。

通过运用这五个基本特性，可以将网络模型简化，便于进行网络时延等性能指标的分析[4]。

### 2.2.1 关于时延分析的研究

随机网络演算是一种应用最小加代数来分析队列系统的理论。定义 为非负增函数的结合，定义 为非负减函数的集合。使用累积过程来表示数据流的总量。到达过程(Arrival Process)，离开过程(Departure Process)和服务过程分别表示为，，还有。 对于任意的有，，且表示从*0*时刻到*t*时刻的累积达到数据量。和也表示各自的*0*到*t*时刻的累积数据量。通过到达过程、离开过程和服务过程的描述，就可以对随机到达曲线(Stochastic Arrival Curve)、随机服务曲线(Stochastic Service Curve)以及对时延(Latency)进行定义。

**定义2.1** **随机到达曲线**. 设 是一个数据流，如果存在一个随机到达曲线 和一个边界概率函数使得对于任意，满足：

 (1)

则称数据流具有随机到达曲线，并以为其边界概率函数。记为。

其中，作为随机到达曲线，其含义是数据流的上界，是违背概率(violation probability)函数。定义所要表达的含义是，数据流并不是严格的被限制在随机到达曲线内，有时可能突破边界，这种突破边界的可能性由边界概率函数来约束。

**定义 2.2** **随机服务曲线.** 设一个网络系统*S*，如果存在一个随机服务曲线 和一个边界概率函数，使得对于任意，满足：

 (2)

则称网络系统*S*具有随机服务曲线，并以为其边界概率函数。记为。

符号 表示累积最小加卷积操作，例如：

 (3)

其中是随机服务曲线，表示网络系统*S*在最坏情况下所能提供的的服务能力。与随机到达曲线类似，需要处理的数据可能比已离开的数据还要多，也就是说系统可能处理不过来到达的数据，但是这种可能性被边界概率函数约束。

在式(2)中出现的表示离开过程，随机离开过程与随机到达过程和随机服务过程相关，当时，它被描述为：

 (4)

通过式(4)，我们可以更好地了解达到过程、离开过程和服务过程之间的关系。利用这些基本过程和随机曲线，我们可以讨论延迟边界的定义。

**定义 2.3 随机时延过程.** 设和分别表示随机到达过程和随机离开过程。当时，时延过程描述为：

 (5)

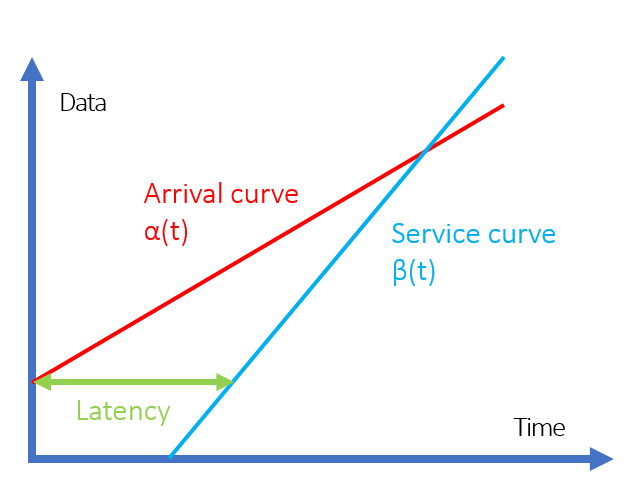
式(5)表示时延过程的最小时值是，当满足条件使得*t*时刻到达的数据量小于或等于*t + d*时刻离开的数据量。这意味着数据不是立即离开服务器的，数据在服务器中的持续时间就是时延。到达过程小于等于离开过程，这意味着在*t*时刻到达服务器的数据在*t+d*时刻离开了服务器。如果大于离开过程，则表示*t*时刻到达的数据经过*d*时间,服务器没有处理完成。因此，使用小于或等于来描述服务器处理数据所需的最短时间，这就是时延。

根据延迟过程定义，利用随机到达过程和随机服务过程，就可以得出随机延迟边界。

**定理 2.4 随机时延边界.** 在一个网络系统*S*中，设是一个随机到达过程，其随机到达曲线为，边界概率函数为，记为；系统*S*其随机服务曲线为，边界概率函数为，记为；那么对于所有，有：

 (6)

其中函数表示与之间的最大水平距离，如图1所示；表达式表示边界概率函数与的累积最小加卷积运算。

图1. 随机网络演算中时延的定义

### 2.2.2 关于可靠性分析的研究

随机网络演算目前仍是一个处于不断发展完善的理论，并没有专门的随机过程用来分析可靠性。然而，有一种用于描述服务器出现服务错误的障碍过程，通过与随机服务过程做减法运算，可以用来表示数据处理的可靠性[4]。此外，还可以将随机网络演算理论进行发展，定义一种新的随机过程以及相应的边界曲线，来实现对可靠性的问题。

定义 2.5 随机差错曲线. 设一个网络系统的随机差错过程 具有以为边界概率函数的随机差错曲线，记为，对于任意,满足：

 (7)

式(7)表示网络系统在接受和处理数据时，有一定的几率会产生错误。过程表示时刻s到时刻t这段时间的错误块率。随机差错曲线是过程的上界，但是这个上界有一定的概率会被突破，这个概率由边界概率函数来约束。

## 2.3 高可靠低延时网络资源分配问题研究

介绍网络切片技术

扩展具体的应用技术

## 2.4 本章小结

# 高可靠低时延网络性能评价

根据第二章对高可靠低时延网络的架构的研究，以及对网络性能评价问题的研究，本章根据高可靠低时延网络的特点进行建模，并针对性能评价问题从时延和可靠性两个方面进行分析，得出影响时延的关键因素，为性能优化以及网络资源分配提出有价值的指导意见。

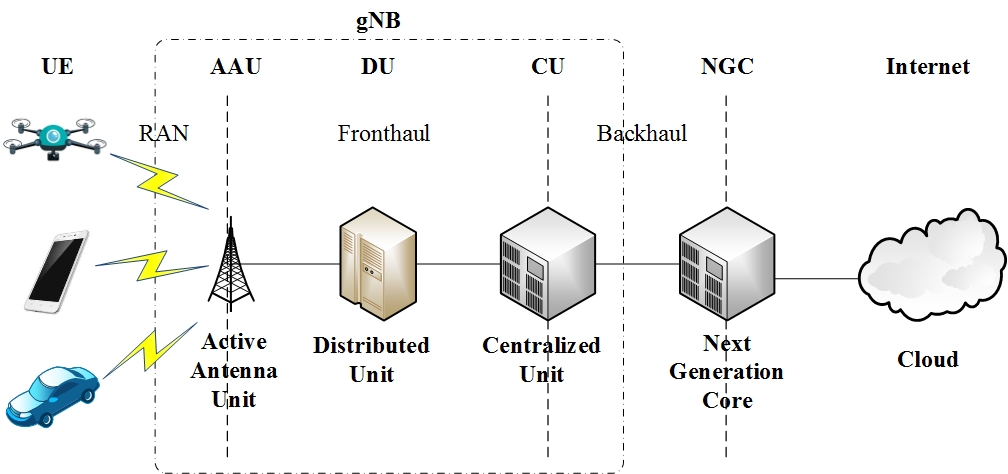
## 3.1 高可靠低时延网络的时延分析

### 3.1.1 高可靠低时延网络模型

本文利用随机到达曲线来描述用户设备UE数据发送到基站(gNB, gNodeB)端的过程，以此来代表无线接入网（RAN）中的通信。在此基础上，根据5G网络拓扑结构和随机网络演算的串联特性，推导出基站到云服务器其余阶段的数据传输。随机到达曲线的每一阶段都具有延迟特性，因此，URLLC系统的整个时延是从UE到云服务器各端通信的时延共同组成的。

由第二章的URLLC通信技术研究现状可知，5G网络包括独立网络(SA)和非独立网络(NSA)。 SA模式是建立全新的5G网络，而NSA模式是5G和4G LTE的结合，根据接入网和核心网所采用的具体实现技术，还可以进一步划分不同的组合方案，然而NSA模式只是为了节省部署成本而采取的一种过渡方案。为了简化系统模型，适应将来的5G全新网络，本文只讨论SA模式组网的情况。

4G LTE网络由UE、远端射频单元(RRU, Radio Remote Unit)、室内基带处理单元(BBU, Building Baseband Unit)、EPC组成，EPC是4G LTE的核心网，远端为云服务器。与4G 网络不同，5G网络主要由UE、gNB、NGC和云服务器组成。其中，5G基站gNB由有源天线单元(AAU, Active Antenna Unit)、分布式单元(DU, Distributed Unit)和集中式单元(CU, Centralized Unit)三部分组成[53]。AAU取代了原来4G中的RRU，还结合了一些BBU在物理层上的功能。4G中的BBU功能将在5G中重建为DU和CU，其中CU负责接入端的服务汇聚，专注于处理低实时性的协议而采用集中式部署；DU主要为终端设备提供访问接入，包括射频和部分信号处理，DU专注于实时性高的传输，适合采用分布式部署；DU和CU根据特定需要可以部署在一起也可以分开部署。NGC作为5G的核心网取代了4G中的EPC，5G核心网基于SDN/NFV技术而设计实现，旨在更好地适应多样化的云平台应用。总体网络架构如图2所示。

图2. 5G网络架构

由于3GPP中对于用户平面的时延要求远远高于控制平面，所以本文主要讨论用户平面(UP)上的时延，而不是控制平面(CP)上的时延。用户平面的时延主要是用户终端与网络节点在IP层传输和接收数据产生的通信时间，而控制平面时延则是无线资源分配以及从空闲状态切换到活动状态所花费的时间[36]。

在实际通信中，UE设备首先接入AAU，AAU实际上是基站的一部分，这部分通信属于RAN。UE的数据将被AAU接受并转发给DU，如果DU和CU是联合部署的，那么数据可以直接到达CU，否则DU再将数据转发给CU。从AAU到CU这段通信属于前传(fronthaul)。数据离开CU继续向核心网NGC传输，这部分的通信属于回传(backhaul)。核心网处理数据并将其发送到云端，数据最终到达其目的地，整个通信过程结束。因此，5G系统的整体时延是由以下几个部分组成的：RAN接入网的处理时延，前传时延，回传时延，核心网处理时延，云端的时延。时延的构成可由式(8)描述：

 (8)

其中，表示UE到AAU这段通信的时延，表示AAU到CU这段通信的时延，表示gNB到核心网这段通信的时延，表示核心网处理数据消耗的时延，表示数据从核心网到云端这段通信的时延，对于URLLC网络的时延分析，主要研究。

数据从用户终端UE经过各个网络节点最终到达云服务器端，根据随机网络演算理论，对通信的时延分析可以描述为：

 (9)

根据3GPP标准的要求，URLLC的用户平面时延要求在一毫秒以内，那么就需要式(9)中的*d*小于1，单位是毫秒 (ms, millisecond)，作为概率边界是一个很小的值，式(9)表示URLLC网络成功传输数据并且满足时延要求，不满足时延要求的情况其概率是非常小的[5]。

URLLC的网络特性可以用前面介绍的随机过程描述为动态服务器模型。从UE发送的数据可以用随机到达过程*A(t)*来表示，网络服务节点提供的服务能力可以描述为随机服务过程*S(t)*。根据式(8)的假设，将URLLC网络描述为一个串联系统，因此，URLLC的时延适用于第二章中提到的随机网络演算串联特性，基于此特性，本章开始针对URLLC网络进行时延分析。

### 3.1.2 高可靠低时延网络时延分析

根据对网络架构以及通信过程的分析，UE的网络流以串联式的方式依次经过gNB、核心网和云端。每个网络节点 都提供了相应的随机服务曲线。先从无线接入网部分的时延开始分析，即UE到gNB部分，再对这部分的分析结果进行扩展，从而获得UE到云端的整个通信时延。

基站gNB包括AAU，DU和CU，相应的随机服务曲线为，，。数据是从UE发起的，最先到达AAU，所以随机到达过程用来描述数据的到达。数据从AAU离开在发向DU，以此类推，DU到CU，我们可以得出，，也就是前一个网络节点的输出正是后一个节点的输入，前一个节点的随机离开过程等于后一个节点的随机到达过程。数据开始的是无线接入网系统gNB的到达过程，最后CU节点的随机离开过程也是gNB的随机离开过程。

考虑到gNB是一个串联部署的网络系统，用来表示有源天线单元AAU的数据处理能力，应用式(4)对于随机离开过程的定义可得：

 (10)

同理，我们可以得到DU的随机离开过程：

 (11)

又因为，用式(10)不等号的右端来替换式(11)中的可得：

 (12)

继续迭代，得到CU的随机离开过程：

 (13)

根据最小加卷积运算的结合律，可得：

 (14)

从gNB的无线接入网的子系统来看，是gNB的输入，是gNB的输出。因此，，，得到gNB子系统的离开过程：

 (15)

应用随机时延过程的定义和式(15)的结果，可以得到gNB系统的随机时延过程：



 (16)

在这里要引入随机网络演算中的串联特性，以便于对随机时延边界的推导。

**定理3.1 串联特性.** 在有多个服务节点串联部署的网络*S*中，数据流依次经过各个节点。如果服务节点能够提供的服务具有随机服务曲线，那么整个串联部署的网络*S*能提供随机服务曲线为，其中：

 (17)

 (18)

应用定理2.4和定理3.1，结合式(16)，可以得出gNB系统的时延边界。

**推论3.2 gNB系统时延边界.** 在gNB子系统中，设为随机到达过程，其随机到达曲线为，边界概率函数为，记为；子系统中服务节点的随机服务过程分别为，和，并且，，记为，，；当，时有：



 (19)

其中，。

证明：因为时延过程的定义如式(5)：，就意味着，将不等式右边左移，结合式(16)得到：

 (20)

对于部分，结合式(15)展开得到：



 (21)

由于，，，，利用串联属性可以得出gNB随机服务过程等于, 其随机服务曲线等于，gNB能够提供的服务率小于，其边界概率函数由限制。因此，式(21)可以化为：







 (22)

根据式(3)，可将变换为，带入式(22)得：









  (23)

在式(23)中，利用为了构造式(1)的形式，增加了随机到达曲线，根据定义2.1可知，的概率是由来约束的，由随机服务曲线的定义可知，的概率是由违背概率函数来约束的。再利用定理2.4，将表示时延的变量*d*替换为，为和之间的最大水平距离，在时，其隐含的条件是：

 (24)

最后得出：













至此，推论3.2证明结束。

对于gNB子系统的时延分析，适用于接入网RAN的通信，即UE到CU这一阶段的网络通信。例如目前较为流行的移动边缘计算部署方式，将计算资源部署在基站，靠近用户侧。运用推论3.2可以尝试此类的场景的时延分析。对于整个网络通信，从UE到云端的时延分析，需要继续将推论3.2进行扩展，从而得到整个URLLC网络的时延边界。

**推论3.3 URLLC系统时延边界.** 在URLLC系统中，设为随机到达过程，具有随机到达曲线以及，记为；服务节点的随机服务过程分别为，和，随机服务曲线分别为，边界概率函数为，记为，，；那么，当，，系统整体时延满足：



 (25)

其中，

证明：gNB子系统是有AAU,DU和CU三部分组成的，而对于整个URLLC网络来说，不仅包含gNB，还包括核心网NGC和云服务，对推论3.2中的网络节点进行扩展就可以证明本推论。根据定理3.1的随机网络演算串联特性，整个网络提供的服务能力具有随机服务曲线以及违背概率函数，记为，其中：

 (26)

将带入式(26)，得到：

 (27)

 (28)

将带入式(28)，得到：

 (29)

根据时延过程的定义2.3，URLLC网络的时延过程可以定义为：

 (30)

那么时延边界为：

 (31)

同样关注于这一部分，根据随机离开过程的定义可知：













 (32)

根据随机到达曲线式(1)可知，的概率边界由约束，由式(2)可知，的概率边界由来约束。对于长期运行的系统来说时，趋近于0。最后应用定理2.4得URLLC系统的时延边界：

 (33)

至此，推论3.3得证。

## 3.2 高可靠低时延网络的可靠性分析

对于评价URLLC网络的可靠性，目前的随机网络演算理论还没有完全吻合的评价方法。学术界常用的方法是从其它角度来考虑[31][32][33]，通过研究网络系统的丢包、错误和异常等的发生概率来反映了系统的可靠性。本文尝试在随机服务过程中考虑发生差错的概率，以系统的服务率和误块率共同作用的效果作为系统的最终服务能力，从而对系统的可靠性进行分析。

为了研究URLLC的可靠性，误块率是一个需要讨论的重要指标。本文提出了随机差错过程来描述系统中的误块率。如定义2.5中的式(7)所示，用定义的 来表示系统的误块率，如果的数值很小，表示误块率很低，说明系统运行非常稳定，出现错误的几率很小。在随机服务过程定义中，表示服务的数据量是没有考虑误码率的，那么现在引入了来约束误码率的发生上界，就是排除了错误发生只留下正确处理的数据的比率，设为不考虑误码率的系统服务率，那么为考虑了误码率以后系统正确处理数据的能力，可以通过设置，将其简化为。

在随机网络演算理论中，经常使用矩母函数来计算系统的性能边界。矩母函数由于其幂指数的形式，可以很方便的用乘法的运算来表达随机过程的求和关系，本文对于误码率和随机差错过程的分析将采用矩母函数的方法，结合式(7)可得出当时，随机差错过程的矩母函数为：

 (34)

应用Chernoff边界理论可知随机差错边界为：

 (35)

## 3.3 本章小结

本章针对高可靠低延时网络的性能评价问题从时延和可靠性两方面进行研究，分别求得这两个性能指标的概率边界。在时延分析方面，分析了5G网络URLLC通信的网络架构，分析其时延的构成，根据网络架构设计基于随机网络演算理论的分析模型。在此基础上，从gNB子系统和整体网络两个视角分析了数据到达与服务，利用随机网络演算的串联特性，获得了系统的随机时延概率边界。在可靠性分析方面，引入误块率这一性能指标，采用随机差错过程来表达系统出现错误的情况，并利用矩母函数及chernoff边界获得了随机差错过程的概率边界。

# 高可靠低时延网络资源分配策略研究

## 4.1 高可靠低时延网络切片模型

## 4.2 基于强化学习方法的网络切片优化策略

## **4.3 网络切片算法实现**

## 4.4 性能分析

### 4.4.1 通信开销

### 4.4.2 计算开销

## 4.5 本章小结

# 网络性能评价与算法仿真

## 5.1 随机网络演算性能分析

在第三章，通过建立URLLC通信模型来分析时延，在本节来将讨论时延边界的计算。由推论3.3可知，有四个部分的因素需要讨论，他们是网络的随机到达曲线，随机到达过程的概率边界函数，系统总体的随机服务曲线和随机服务过程的概率边界函数，若需要获得更具体的结果，可以通过分解和来实现。

在高可靠低延时通信场景下，数据的传输需要更高的速率，从而使用更大的带宽，往往是利用非常小的时隙结合频率比较高的频段，毫米波技术就是这样一种技术。

我们假设UE发送的数据是服从泊松分布的，其平均到达速率为，那么随机到达曲线=，随机到达过程的概率边界函数为：

 (34)

将式(34)转换为矩母函数的形式和并利用Chernoff边界理论[56]可得：

 (35)

在设定了和之后，需要考虑的是URLLC系统随机服务过程的和。

为了简化问题，假设系统的各个服务节点能够提供相同的服务能力，假设每个服务器提供的服务能力，*C*为单位时间的服务速率，随机服务过程的概率边界函数为，根据串联特性定理3.1可以得出：



 (36)

应用文献[57]中的结论，可得：

 (37)

其中，并且各个网络节点的服务边界概率函数为，，，，。将式(38)的结果带入式(33)

## 5.2 时延分析器

## 5.3高可靠低时延的网络切片策略性能分析

## 5.4 本章小结

# 结论与展望

## 6.1 结论

## 6.2 展望

# 致谢

# 参考文献

1. ITU-R M.2083-0, IMT Vision - Framework and Overall Objectives of the Future Development of IMT for 2020 and Beyond (2015)
2. 3GPP TR 38.913, Study on Scenarios and Requirements for Next Generation Access Technologies (2017)
3. Soldani D, Guo Y J, Barani B, et al., 5G for Ultra-Reliable Low-Latency Communications, IEEE Network, vol.32,no.2, pp.6--7 (2018)
4. Jiang Y, Liu Y, Stochastic Network Calculus, Springer, London (2009)
5. M.Fidler and A.Rizk, A Guide to the Stochastic Network Calculus, IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol.17, no.1, pp.92—105 (2015)
6. 纳多. 软件定义网络[M]. 人民邮电出版社, (2014)
7. 张笛, 李兴华, 刘海, 马建峰. SDN网络中面向服务的网络节点重要性排序方法[J]. 计算机学报, vol.41, no.11, pp.206-218. (2018)
8. 王进文，张晓丽，李琦，吴建平，江勇.网络功能虚拟化技术研究进展[J].计算机学报，vol.42, no.2, pp.185-206,(2019)
9. J.Chen et al., Batch Identifcation Game Model for Invalid Signatures in Wireless Mobile Networks, IEEE. Trans. Mobile Comp., vol.16, no.6, pp.1530–1543, (2017)
10. M.Chen et al., A 5G Cognitive System for Healthcare,Big Data and Cognitive Computing, vol.1, no.1, (2017)
11. S.Retal et al., Content Delivery Network Slicing: QoE and Cost Awareness, Proc. IEEE ICC 2017, Paris, France, May (2017)
12. 廖晓闽，严少虎，石嘉，谭震宇，赵钟灵，李赞.基于深度强化学习的蜂窝网资源分配算法，通信学报，vol.40,no.2,(2019)
13. 郭宪,方勇纯. 深入浅出强化学习原理入门[M],电子工业出版社,(2018)
14. Silver D , Huang A , Maddison C J , et al. Mastering the game of Go with deep neural networks and tree search[J]. Nature, vol.529, no.7587, pp.484-489, (2016)
15. ,刘全,翟建伟,章宗长.深度强化学习综述[J].计算机学报, vol.1,pp.1-27.(2018)
16. J.J.Nielsen, R.Liu and P. Popovski, Ultra-Reliable Low Latency Communication Using Interface Diversity, IEEE Transactions on Communications vol.66,no.3, pp.1322-1334 (2018)
17. Delgado R A, Lau K, Middleton R H, et al., Networked Delay Control for 5G Wireless Machine-Type Communications Using Multiconnectivity, IEEE Transactions on Control Systems Technology vol.99, pp.1-16 (2018)
18. Rao J, Vrzic S, Packet Duplication for URLLC in 5G: Architectural Enhancements and Performance Analysis, IEEE Network vol.32, no.2, pp.32-40 (2018)
19. Pocovi G, Shariatmadari H, Berardinelli G, et al., Achieving Ultra-Reliable Low-Latency Communications: Challenges and Envisioned System Enhancements, IEEE Network, vol.32, no.2, pp.8-15 (2018)
20. Popovski P, Nielsen J J, Stefanovic C, et al., Wireless Access for Ultra-Reliable Low-Latency Communication: Principles and Building Blocks, IEEE Network, vol.32, no.2, pp.16-23 (2018)
21. Ji H, Park S, Yeo J, et al., Introduction to Ultra Reliable and Low Latency Communications in 5G, (2017)
22. Ji H, Park S, Yeo J, et al., Ultra Reliable and Low Latency Communications in 5G Downlink: Physical Layer Aspects, (2018)
23. Sachs J, Wikstrom G, Dudda T, et al., 5G Radio Network Design for Ultra-Reliable Low-Latency Communication, IEEE Network, vol.32, no.2, pp.24-31.(2018)
24. M. A. Beck, S. Henningsen, Q. Xu, J. Wang, K. Wu and X. Liu. Demo abstract: An integrated tool of applying stochastic network calculus for network performance analysis[C]. 2017 IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS), Atlanta, GA, pp.964-965. ( 2017)
25. Z. Li, Y. Gao, B. A. Salihu, P. Li, L. Sang and D. Yang. Network Calculus Delay Bounds in Multi-Server Queueing Networks with Stochastic Arrivals and Stochastic Services[C]. 2015 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), pp.1-7. (2015)
26. Z. Li, Y. Jiang, Y. Gao, P. Li, L. Sang and D. Yang, Delay and Delay-Constrained Throughput Performance of a Wireless-Powered Communication System, IEEE Access, vol.5, pp.21620-21631 (2017)
27. R.Lübben and M.Fidler, Estimation method for the delay performance of closed-loop flow control with application to TCP, IEEE INFOCOM 2016-The 35th Annual IEEE International Conference on Computer Communications, pp.1-9 (2016)
28. K. Zheng, F. Liu, L. Lei, C. Lin and Y. Jiang, Stochastic Performance Analysis of a Wireless Finite-State Markov Channel, IEEE Transactions on Wireless Communications vol.12, no.2, pp.782-793. (2013)
29. Chen, Xin, Y. Si, and X. Xiang, Delay-bounded resource allocation for femtocells exploiting the statistical multiplexing gain, vo.71, pp.3217-3236. (2015)
30. M.Fidler, B.Walker and Y.Jiang, Non-Asymptotic Delay Bounds for Multi-Server Systems with Synchronization Constraints, IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, vol.29,no.7, pp.1545—1559. (2018)
31. Gulyás, András, Bíró, József, A stochastic extension of network calculus for workload loss examinations, Communications Letters IEEE, vol.10, no.5, (2006)
32. Deng Y, Lin C, An Extended Stochastic Loss Bound with Moment Generating Function, International Conference on Communications \& Mobile Computing IEEE (2010)
33. Sami Ayyorgun, et al., A Composable Service Model With Loss and a Scheduling Algorithm, Infocom (2004)
34. Wang C, Chen Y, Wu Y, et al., Performance Evaluation of Grant-Free Transmission for Uplink URLLC Services, IEEE Vehicular Technology Conference 2017
35. Anand A, De Veciana G, Resource Allocation and HARQ Optimization for URLLC Traffic in 5G Wireless Networks, (2018)
36. Mukherjee A, Energy Efficiency and Delay in 5G Ultra-Reliable Low-Latency Communications System Architectures, IEEE Network vol.32,no.2, pp.55--61 (2018)
37. Vassilaras S, Gkatzikis L, Liakopoulos N, et al. The Algorithmic Aspects of Network Slicing [J]. IEEE Communications Magazine, vol.55, no.8, pp.112-119. (2017)
38. Sameerkumar Sharma. Raymond Miller. Andrea Francini, A Cloud-Native Approach to 5G Network Slicing[J], IEEE Communications Magazine, vol.55, no.8, pp.120-127, (2017)
39. Xi Li, Ramon Casellas, Giada Landi, Antonio de la Oliva, Xavier Costa-Perez, Andres Garcia-Saavedra, Thomas Deiss, Luca Cominardi, Ricard Vilal，5G-Crosshaul Network Slicing: Enabling Multi-Tenancy in Mobile Transport Networks [J] IEEE Communications Magazine, vol.55, no.8, pp128-137. (2017)
40. Haijun Zhang, Na Liu, Xiaoli Chu, Keping Long, Abdol-Hamid Aghvami, Victor C, M. Leung. Network Slicing Based 5G and Future Mobile Networks: Mobility, Resource Management, and Challenges [J]. IEEE Communications Magazine. vol.55, no.8, pp138-145. (2017)
41. Katsalis K, Nikaein N, Schiller E, et al. Network Slices toward 5G Communications: Slicing the LTE Network [J]. IEEE Communications Magazine, vol.55, no.8, pp.146-154. (2017)
42. Lanfranco Zanzi, Vincenzo Sciancalepore, Andres Garcia-Saavedra, Xavier Costa-Perez. OVNES: Demonstrating 5G network slicing overbooking on real deployments. IEEE INFOCOM 2018 - IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS). pp.1-2. (2018)
43. Dario Bega, Marco Gramaglia, Albert Banchs, Vincenzo Sciancalepore, Konstantinos Samdanis, Xavier Costa-Perez. Optimising 5G infrastructure markets: The business of network slicing. IEEE INFOCOM 2017 - IEEE Conference on Computer Communications. pp.1-9. 2017
44. Ying H, Nan Z, Yin H. Integrated Networking, Caching, and Computing for Connected Vehicles: A Deep Reinforcement Learning Approach [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol.67, no.1, pp.44-55. (2018)
45. Ying H, Zheng Z, Yu F R, et al. Deep Reinforcement Learning-based Optimization for Cache-enabled Opportunistic Interference Alignment Wireless Networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol.66, no.11, pp.10433-10445. (2017)
46. Hao Y , Tian D , Fortino G , et al. Network Slicing Technology in a 5G Wearable Network[J]. IEEE Communications Standards Magazine, vol.2, no.1, pp.66-71.(2018)
47. Tianyu Yang. Yulin Hu. M. Cenk Gursoy. Anke Schmeink. Rudolf Mathar, Deep Reinforcement Learning based Resource Allocation in Low Latency Edge Computing Networks[C], 2018 15th International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS), pp.1-5, (2018)
48. Muhammad Rehan Raza. Matteo Fiorani. Ahmad Rostami. Peter Öhlen. Lena Wosinska. Paolo Monti, Dynamic slicing approach for multi-tenant 5G transport networks [invited], IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, vol.10, no.1, pp.77-90. (2018)
49. 3GPP. Final Report of 3GPP TSG RAN WG1. Hangzhou, China. (2017)
50. 3GPP. TR 21.915 v0.6.0. Technical Specification Group Services and System Aspects, Release 15 Description. (2019)
51. 3GPP TR 23.799 v14.0.0. Technical Specification Group Services and System Aspects, Study on Architecture for Next Generation System, Release 14. (2016)
52. 杨旭, 肖子玉, 邵永平, et al. 5G网络部署模式选择及演进策略[J]. 电信科学, vol.34, no.6, pp.144-152. (2018)
53. Yang G, Xiao M, Gross J, et al. Delay and Backlog Analysis for 60 GHz Wireless Networks [C]. 2016 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). (2016)
54. 吴璇, 朱晓荣. 基于随机网络演算的物联网业务流量建模与分析方法[J]. 南京邮电大学学报(自然科学版), vol.38, no.175, pp.26-32. (2018)
55. 3GPP TR 38.801 V14.0.0. Technical Specification Group Radio Access Network, Study on new radio access technology: Radio access architecture and interfaces, Release 14 (2017)
56. Wu K, Jiang Y, Li J, On the model transform in stochastic network calculus, In: International Workshop on Quality of Service IEEE, pp.1-9 (2010)
57. Sun F, Li L, Jiang Y, Impact of duty cycle on end-to-end performance in a Wireless Sensor Network, Wireless Communications and NETWORKING Conference IEEE, pp.1906{1911 (2015)

# 附录1 图目录

[图2.1 LTE-A系统架构 18](#_Toc4095619)

[图4.1 聚合切换认证 32](#_Toc4095620)

[图4.2 通信开销比较(m=2) 32](#_Toc4095621)

[图4.3 通信开销比较(m=5) 32](#_Toc4095622)

[图4.4 通信开销比较(m=10) 33](#_Toc4095623)

[图4.5 eNB计算开销比较 33](#_Toc4095624)

# 附录2 表目录

[表3.1 安全属性比较 20](#_Toc4358607)

# 个人简历、在学期间发表的学术论文及研究成果

**个人简历：**

**马圣程**，男，1986年5月生，辽宁人。

2003.09 -- 2007.06，北京信息工程学院，获学士学位。

2007.07 -- 2010.08，北京中科网威信息技术有限公司，研发工程师。

2010.09 -- 2014.06，北京天融信软件公司，研发工程师。

2016.09 -- 至今，北京信息科技大学计算机学院计算机技术专业学习，攻读硕士学位。

**参与科研项目：**

[1] 2019.01—2022.12，国家自然科学基金面上项目“5G 超密集接入网智能动态资源分及 其优化方法研究” （编号：61872044）

[2] 2014.01 -- 2017.12，国家自然科学基金面上项目“LTE-A飞蜂窝系统的动态资源分配与性能评价研究” (编号：61370065)

[3]“十二五”国家科技支撑计划项目“城镇化进程中社会安全风险评估与应急处置技术研究与示范” 子课题“城镇社会安全多源大数据处理关键技术”（编号：2015BAK12B03-03）

**发表论文：**

[1] Shengcheng Ma, Xin Chen, Zhuo Li, YingJie Yang. A Retrieval Optimized Surveillance Video Storage System for Campus Application Scenarios. Journal of Electrical & Computer Engineering, 2018(8):1-10. (EI: 20181805117616)

[2] Shengcheng Ma, Xin Chen, Zhuo Li, Ying Chen. Delay Analysis for URLLC in 5G Based on Stochastic Network Calculus. 2nd International Conference on 5G for Ubiquitous Connectivity. Nanjing, China. 2018