

无线超可靠低时延通信：关键设计分析与挑战

伏玉笋¹, 杨根科^{1,2}

(1. 上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200240;
2. 上海交通大学宁波人工智能研究院, 浙江 宁波 315000)

摘要: 目前超可靠低时延通信 (URLLC) 研究较碎片化, 且侧重于某一点, 因此以全景式视角, 从应用场景和需求开始, 介绍了 URLLC 相关的系统架构、关键技术和总体解决方案; 然后分别对物理层检测性能需求、链路自适应、无线资源管理、端到端分集解决方案以及如何与时间敏感网络集成进行了深入的分析, 并对候选方案进行了探讨。希望从广度到深度, 对 URLLC 的理论研究以及如何应用有一个透彻全面的介绍, 对其挑战有一个清晰的认识, 从而为相关研究和工程技术人员提供借鉴。

关键词: 5G 移动通信; 超可靠低时延; 时间敏感网络

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-436x.2020154

Wireless ultra-reliable and low-latency communication: key design analysis and challenge

FU Yusun¹, YANG Genke^{1,2}

1. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China
2. Ningbo Artificial Intelligence Institute of Shanghai Jiao Tong University, Ningbo 315000, China

Abstract: The current fragmented ultra reliable and low latency communication (URLLC) research focusing on a certain point was overcome. From the perspective of panoramic view, starting from the application scenarios and requirements, the system architecture, key technologies and solutions of URLLC were analyzed and introduced. Then, the physical layer detection performance requirements, link adaptation, radio resource management, end-to-end diversity solutions and how to integrate with TSN (time sensitive network) were analyzed in depth, and possible candidates were discussed. It hopes to have a thorough and comprehensive understanding of the theoretical research and application of URLLC, and a clear understanding of its challenges, so as to play a key reference for researchers and engineers in the related fields.

Key words: 5G mobile communication, URLLC, TSN

1 引言

从 20 世纪 80 年代以来, 移动通信技术逐步实现从固定到移动、模拟到数字、电路交换到云网融合、窄带到宽带, 以及人人互联到万物智联的演进, 为社会、经济的发展不断注入新的动力, 带动了整个产业生态的发展, 同时也提出了更高的生态系统

需求。5G 时代的到来, 促使 5G 与人工智能、云计算、大数据、物联网/工业互联网、边缘计算等融合交织, 在各行各业产生“聚变”反应。

3GPP 在 5G 考虑了 3 种不同的业务类别: 增强移动宽带通信 (eMBB, enhanced mobile broadband), 如增强现实/虚拟现实 (AR/VR, augmented reality/virtual reality) 等, 增强移动宽带场景主要是以

收稿日期: 2020-04-07; 修回日期: 2020-06-08

通信作者: 杨根科, gkyang@sjtu.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划基金资助项目 (No.2019YFB1705703, No.2017YFA60700602)

Foundation Item: The National Key Research and Development Program of China (No.2019YFB1705703, No.2017YFA60700602)

人为中心的通信；大规模机器类通信（mMTC, massive machine type communication），这是一个纯粹的以机器为中心的使用场景，主要特点是终端数量庞大；超可靠低时延通信（URLLC, ultra-reliable and low-latency communication），这是一个涵盖以人为中心和以机器为中心的通信场景，常被称为关键机器类通信（C-MTC, critical machine type communication）。URLLC 场景应用案例的特点是对时延、可靠性和可用性有严格的要求，比如有安全要求的车辆间的通信、工业设备的无线控制、远程手术及智能电网中的分布式自动化；又如以人为中心的 3D 游戏和“触觉互联网”，其特点是低时延和超高数据速率。

这 3 个场景并没有涵盖所有可能的应用案例，而是提供了一个对大多数可预见的应用情况的分类，来分析 5G 无线接入所需要的关键能力，这意味着新的无线接口必须具有高度的灵活性以支持未来可能的新应用。考虑对垂直业务的有效支撑，能为整个电信行业带来新的业务，URLLC 在其中扮演着非常重要的角色，因此，无论是学术界还是工业界都已做了大量研究^[1-120]，但大都侧重某一方面进行研究，或者不够全面的“综述”类研究^[1-2]。本文基于“系统设计”视角，首先从应用场景和需求着手，全面分析了 URLLC 所涉及的关键技术及可能的方案，包括从需求到架构和解决方案总体、端到端服务质量（QoS, quality of service）管理，然后重点对物理层检测性能要求、媒体接入控制（MAC, media access control）层链路自适应、无线资源管理（包括小区内无线资源管理和小区间无线资源管理）、端到端分集方案（包括从应用层到核心网、接入网）进行了分析，最后给出了 5G 中 URLLC 作为桥被时间敏感网络（TSN, time sensitive network）集成的方案等，以期对 URLLC 领域有一个全面、系统、深入的了解和判断。本文的写作逻辑和框架如图 1 所示。

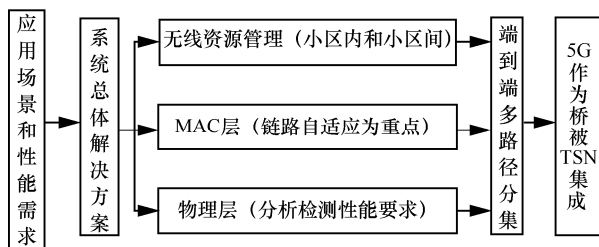


图 1 本文的写作逻辑和框架

需要说明的是，本文重点聚焦在 5G 标准未确定的关键技术，对于 5G 标准已确定的关键技术，只予以总体性提及，并不展开论述。

2 URLLC 应用场景和需求

通信服务可用性是指端到端通信服务根据约定的 QoS 交付的时间量和系统根据特定区域的规范预期交付端到端服务的时间量的百分比。

可靠性通常是指在网络层数据分组传输的上下文中，在目标服务所要求的时间限制内，成功传送到给定系统实体的已发送网络层数据分组数量和已发送网络层数据分组的总数的百分比。与时延相关的可靠性中，时延保证达到可靠性水平。可靠性由时延范围内未成功发送到接收器的分组故障概率 ϵ 来判定，这些分组要么是错误的、丢失的，要么是到达太晚。图 2 显示了与时延有关的可靠性定义，以及时延与可靠性的关系^[3]，其中，CDF (cumulative distribution function) 为累积分布函数。由图 2 可以看出，可靠性的提高是以增加时延为代价的。

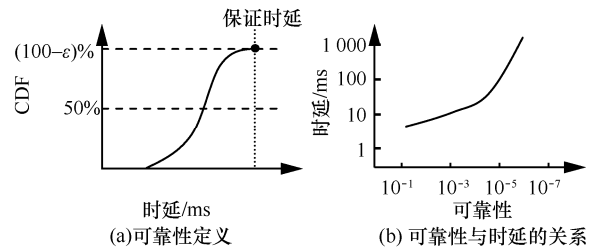


图 2 可靠性定义及与时延的关系

表 1 给出了典型低时延高可靠场景的性能需求^[4-5]。

表 1 典型低时延高可靠场景性能需求

高可靠场景	时延/ms	可用性	可靠性	体验速率/(Mbit·s ⁻¹)
离散自动化-运动控制	1	99.999 9%	99.999 9%	1~10
离散自动化	10	99.99%	99.99%	10
过程自动化-远程控制	50	99.999 9%	99.999 9%	1~100
过程自动化-监控	50	99.9%	99.9%	1
配电-中压	25	99.9%	99.9%	10
配电-高压	5	99.999 9%	99.999 9%	10
智能交通系统-回程设施	10	99.999 9%	99.999 9%	10
触觉互动	0.5	99.999%	99.999%	低
远程控制	5	99.999%	99.999%	≤10

3 URLLC 协议框架、关键技术和解决方案

时延是端到端的时延，可靠性是端到端的可靠性，因此架构很重要。为支持差异化的应用场景和云化部署方式，5G 采用全新的基于服务化的架构（SBA, service based architecture），如图 3 所示^[11]，具体介绍如下。

1) 借鉴信息技术（IT, information technology）系统服务化/微服务化架构的成功经验，通过模块化实现网络功能间的解耦和整合，各解耦后的网络功能独立扩容、独立演进、按需部署。

2) 控制面所有网络功能（NF, network function）之间的交互采用服务化接口，同一种服务可以被多种 NF 调用，降低 NF 之间接口定义的耦合度，最终实现整网功能的按需定制，灵活支持不同的业务场景和需求。

图 3 中的 AUSF、AMF、SMF、NSSF、NEF、NRF、PCF、UDM、AF、UPF、(R)AN、DN、UE 等是模块化的网络功能，Nausf、Namf、Nsmf、Nnssf、Nnef、Nnrf、Npcf、Nudm、Naf 等是对应模块基于服务化的接口。以 NSSF 为例，网络切片本质上是将物理网络划分为多个虚拟专网，每个虚拟专网根据不同的服务需求灵活地支撑不同网络应用场景，实现公网专用。5G 提供网络切片的功能，基于同客户签订的服务级协议（SLA, service level agreement），为不同垂直行业、不同客户、不同业务提供相互隔离、功能可定制的网络服务。比如 eMBB、mMTC、URLLC 就可属于 3 个不同切片。

QoS 机制主要负责从网络的角度进行业务管理和提供业务的差异性，网络实体根据不同的质量需求来处理不同业务。5G 网络的 QoS 模型如图 4 所示^[12]，其主要特点如下。

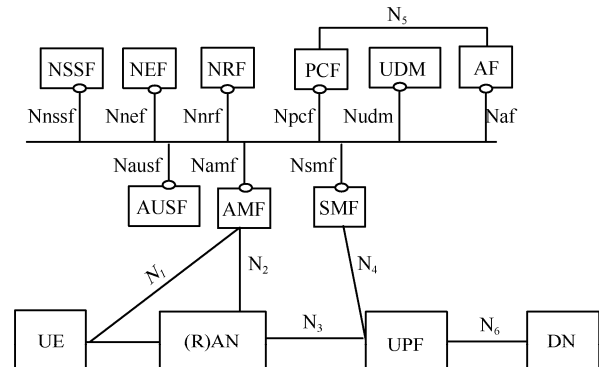
1) 控制粒度为适配多样化的业务需求，基于 QoS 流（QoS flow）执行 QoS 控制。

2) 同一 PDU（power distribution unit）会话（session）的服务流采用同一隧道（tunnel），减少隧道管理开销。

3) 5G QoS 包括保证比特速率（GBR, guaranteed bit rate）QoS 流和非保证比特速率（Non-GBR）QoS 流。

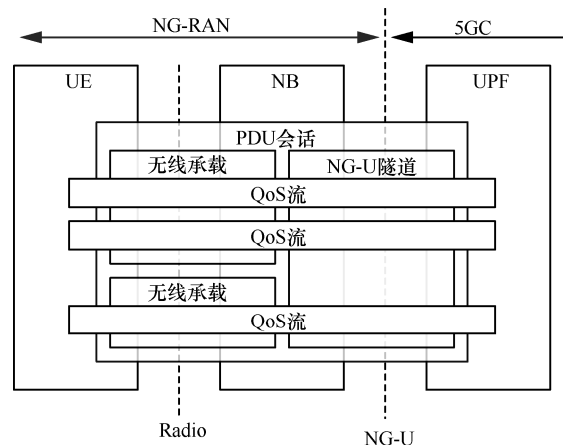
4) 5G QoS 流与数据无线承载（DRB, data radio bearer）支持多对一映射。

5) QoS 建立机制，支持信令控制 QoS 机制和反射 QoS（reflective QoS）机制（仅用 Non-GBR QoS 流），后者可减少信令开销。



AUSF (authentication server function) : 鉴权网络功能
AMF (access and mobility management function) : 接入和移动性管理网络功能
SMF (session management network function) : 会话管理网络功能
NSSF (network slice selection function) : 网络切片选择功能
NEF (network exposure function) : 能力开放网络功能
NRF (network repository function) : 服务注册、发现、授权等功能
UDM (unified data management) : 统一数据库, 存放用户的签约数据等
PCF (policy control function) : 策略控制功能
AF (application function) : 应用功能
UPF (user plane function) : 用户面功能, 执行用户面数据的转发等功能
(R)AN ((radio) access network) : (无线) 接入网
DN (data network) : 运营业务、互联网接入或第三方业务等
UE (user equipment) : 用户设备

图 3 基于服务化的 5G 网络架构



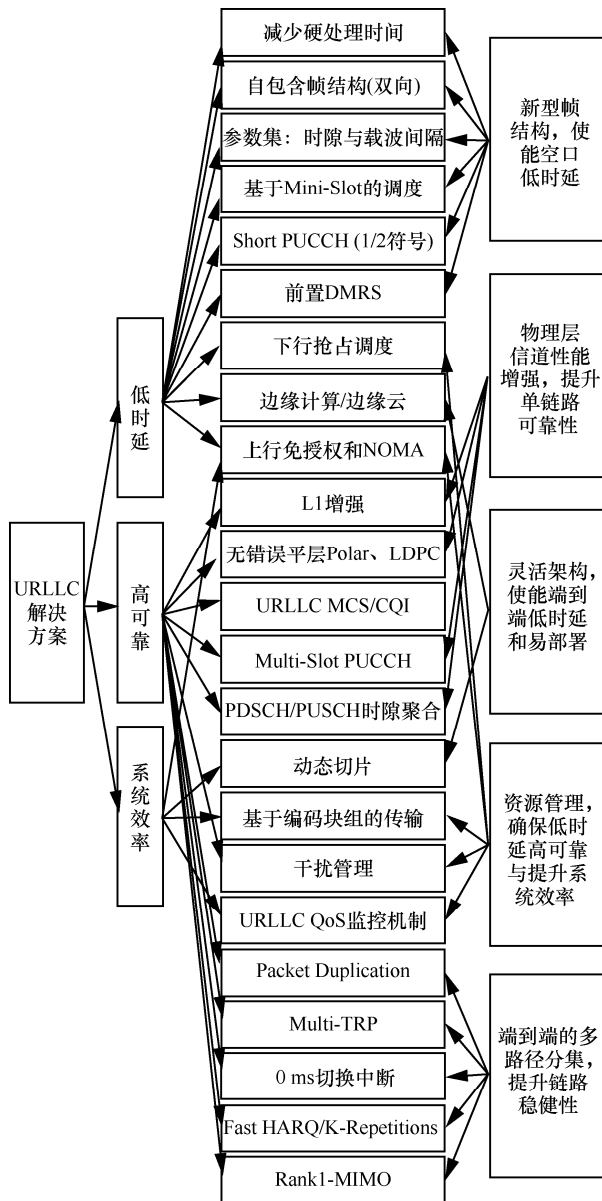
5GC (5G core network) : 5G 核心网络

图 4 5G 网络的 QoS 模型

涉及 QoS 的主要参数有资源类型（GBR、delay critical GBR 和 Non-GBR）、优先级、分组时延、分组错误率、平滑窗大小、最大数据量等。和 URLLC 密切相关的是参数时延临界 GBR（delay critical GBR）等。

URLLC 解决方案是端到端的、全系统的，可以分为低时延、高可靠，以及系统效率这三部分约束下，如何最大化系统效率。所涉及的关键技术主

要是新型帧结构、物理层信道性能增强、灵活架构、资源管理、端到端的多路径分集等，具体如图 5 所示。



PUCCH (physical uplink control channel) : 物理上行控制信道
 PUSCH (physical uplink shared channel) : 物理上行共享信道
 PDSCH (physical downlink shared channel) : 物理下行共享信道
 DMRS (demodulation reference signal) : 解调参考信道
 LDPC (low density parity check code) : 低密度奇偶校验码
 MCS (modulation and coding scheme) : 调制编码方案
 CQI (channel quality indicator) : 信道质量指示
 Multi-TRP (multi-transmission point) : 多点传输
 NOMA (non-orthogonal multiple access) : 非正交多址
 MIMO (multiple-input multiple-output) : 多输入多输出

图 5 URLLC 解决方案

4 URLLC 物理层检测性能需求分析

以下行空口传输过程为例，通常一个空口发

送，再反馈重传的过程如图 6 所示。设 p_c 表示下行控制信道的成功检测概率， $p_{DTX} = P\{\text{DTX或NACK|DTX}\}$ 表示 UE 发送 DTX 被检测为 DTX 或 NACK 的概率， $p_N = P\{\text{DTX或NACK|NACK}\}$ 表示 UE 发送 NACK 但被检测为 DTX 或 NACK 的概率， p_{d1} 、 p_{d2} 分别表示数据信道第一次和第二次成功检查的概率。那么两次传输后的成功概率为

$$p = p_c p_{d1} + (1 - p_c) p_{DTX} p_c p_{d1} + p_c (1 - p_{d1}) p_N p_c p_{d2} \quad (1)$$

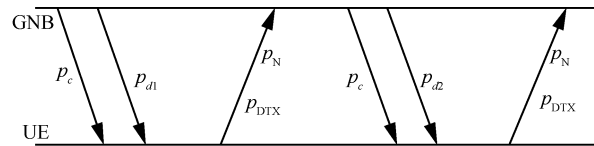


图 6 下行空口传输过程

设 $p_{\text{URLLC}}=99.999\%$ ，为达成这一最终目标，由式(1)可以看出，控制信道和反馈信道的可靠性与数据信道的可靠性之间存在相互制约的关系，任何一方的可靠性降低，都影响着最终结果。假设只有一次数据发送，则成功的概率 $p_{\text{URLLC}}=p_c p_{d1}$ 。当 $p_c = p_{d1}$ 时，则 $p_c = p_{d1} = 99.9995\%$ ，那么下行数据信道的误块率 $\text{BLER}_{d1} = 1 - p_{d1} = 5 \times 10^{-6}$ 。这表明无论是对控制信道还是数据信道的检测性能要求都是非常高的。对于数据信道，可以通过混合自动重复请求 (HARQ, hybrid automatic repeat request) 机制进一步提升可靠性，而对于控制信道，只能通过“重复”提高，当情况最差时，无线链路控制 (RLC, radio link control) 层的自动重传请求 (ARQ, automatic repeat request) 也是对数据信道和控制信道都受益的纠错机制，只不过时延进一步拉长。当然，信道编码和接收机的性能也无疑是非常关键的。

综上可知，可以从最大传输次数为 2 的情况推广到最大传输次数为 N 的情况^[12]，如式(2)所示。

$$p = \sum_{j=1}^N R(j) \quad (2)$$

其中，

$$R(j) = \sum_{k=0}^{j-1} C_{j-1}^k [(1 - p_c) p_{DTX}]^{j-1-k} p_c^{k+1} p_{d(k+1)} \prod_{i=1}^k [p_N (1 - p_{d(i)})] \quad (3)$$

5 URLLC 的链路自适应分析

链路自适应指系统根据无线环境和链路状态等信息对调制方式、传输块 (TBS, transport block

size) 大小及码率进行动态选择的过程。在 5G 系统中, 上下行方向的链路自适应都是由基站来进行控制的。基站根据 UE 上报的 CQI 来选择当前信道状况下最合适的 MCS, 以满足特定比特错误率和分组误块率 (BLER, block error rate) 的频谱效率, 确保数据速率最大化。例如, 当无线条件较好时, 则在物理层上使用较高的 MCS 和码率, 以增加系统吞吐量; 当无线环境较差时, 则需要使用较低的 MCS 和码率, 以增加传输可靠性。

5.1 URLLC 的 MCS 工作点

传统 CQI 表对应的误块率目标值为 10%, 因此无法达到 URLLC 的可靠性要求。HARQ 虽然可以提高可靠性, 但是会增加时延。在 CQI 表增加较低码率虽然可以满足可靠性和时延要求, 但是会增加 UE 上报 CQI 表所需要的比特数。因此考虑 URLLC 采用独立的 CQI 表^[13-14], 并使用不同的 BLER 目标值。另外, 由于 URLLC 对峰值速率的要求不高^[15], 因此没有必要采用较高的调制阶数。图 7 以 6 bit 的 CQI 表^[13]、基于 QPSK/16QAM/64QAM 为例来显示不同业务在不同工作点所对应的频谱效率, 其中, CQI 越大, 意味着信干比或信噪比越高。由图 7 可以看出, 提升可靠性的代价是牺牲了频谱效率, 即频谱效率越高, 意味着单位时间和带宽内传输的比特数越多。

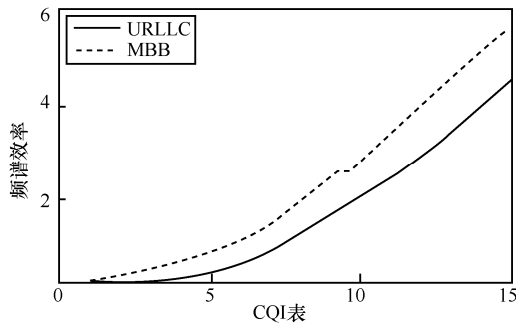


图 7 URLLC 和 MBB 业务不同工作点对应的频谱效率

5.2 HARQ 的影响分析及其最优设计

HARQ 是一种时间分集, 对提升数据在无线信道下的可靠性有着非常重要的意义。然而, 只有当超可靠业务的时延要求为 HARQ (或 ARQ) 重传留下足够的时间时, 才能使用 HARQ。从表 1 可以看出, 不同应用场景对时延的要求不同。对于有适度时延要求的超可靠业务 (明显超过 HARQ 重传时间), HARQ 是提供足够可靠性的选项之一。对于 HARQ 而言, 也需要考虑 HARQ 反馈信息的可靠性

来进行总体可靠性评估, 前面对此已经分析, 故本节不再赘述。当不考虑 HARQ 时, 可以通过捆绑多个子帧重复发送的方式来增加传输的可靠性。因此, 基于 HARQ 的传输和基于非 HARQ 的传输应该根据时延、可靠性和频谱效率之间的权衡来考虑。

下面首先对时延进行分析。需要说明的是, 本文忽略固定时延, 只考虑由 HARQ/ARQ 引起的相对时延。

没有 HARQ, 只考虑 ARQ, 由 BLER 导致的时延可以表示为

$$D_{\text{UE-RAN(ARQ)}}(M) = (1 - \text{BLER}) \sum_{i=0}^{M-1} [(j+1)\text{TTI} + jD_{\text{ARQ}}] \text{BLER}^j \quad (4)$$

其中, TTI 表示传输间隔, $D_{\text{UE-RAN(ARQ)}}$ 表示 UE 和 RAN 之间存在的 ARQ 时延, D_{ARQ} 表示 ARQ 机制导致的时延, M 表示最大传输次数。当 M 趋向于无穷时, 有

$$D_{\text{UE-RAN(ARQ)}} = \lim_{M \rightarrow \infty} D_{\text{UE-RAN(ARQ)}}(M) = \frac{\text{TTI} + D_{\text{ARQ}} \text{BLER}}{1 - \text{BLER}} \quad (5)$$

考虑 HARQ, 但没有软合并, 在 HARQ 之后再 ARQ, 可得式(6)和式(7)所示结果。

$$D_{\text{UE-RAN(HARQ\&ARQ)}}(N) = \frac{\text{BLER}^N [N\text{TTI} + (N-1)D_{\text{HARQ}} + D_{\text{ARQ}}] + D_{\text{UE-RAN(HARQ)}}}{1 - \text{BLER}^N} \quad (6)$$

$$D_{\text{UE-RAN(HARQ)}} = (1 - \text{BLER}) \sum_{j=0}^{N-1} [(j+1)\text{TTI} + jD_{\text{HARQ}}] \text{BLER}^j \quad (7)$$

其中, $D_{\text{UE-RAN(HARQ)}}$ 表示 UE 和 RAN 之间存在 HARQ 的时延, D_{HARQ} 表示 HARQ 导致的时延, N 表示最大传输次数, $D_{\text{UE-RAN(HARQ\&ARQ)}}$ 表示 UE 和 RAN 间存在 HARQ 和 ARQ 的时延。

考虑 HARQ, 但有软合并, 在 HARQ 之后再 ARQ, 有式(8)和式(9)所示结果。

$$\text{BLER}_0 = 1 \quad (8)$$

$$\text{BLER}_j = \text{BLER}(\text{SINR}_{c,j}) \quad (9)$$

$$D_{\text{UE-RAN(HARQ)}} = (1 - \text{BLER}_N) \sum_{j=0}^{N-1} [(j+1)\text{TTI} + jD_{\text{HARQ}}] \prod_{i=0}^j \text{BLER}_i \quad (10)$$

$$D_{\text{UE-RAN(HARQ\&ARQ)}}(N) = \frac{P(N) \prod_{i=1}^N \text{BLER}_i [N\text{TTI} + (N-1)D_{\text{HARQ}} + D_{\text{ARQ}}] + F(N)}{\left(1 - \prod_{i=1}^N \text{BLER}_i\right)^2} \quad (11)$$

其中,

$$P(N) = \sum_{j=0}^{N-1} \left(\prod_{i=0}^j \text{BLER}_i \right) (1 - \text{BLER}_{j+1}) \quad (12)$$

$$F(N) = \sum_{j=0}^{N-1} \left(\prod_{i=0}^j \text{BLER}_i \right) (1 - \text{BLER}_{j+1}) \cdot [(j+1)\text{TTI} + jD_{\text{HARQ}}] \left(1 - \prod_{i=1}^N \text{BLER}_i \right) \quad (13)$$

$\text{SINR}_{c,j}$ 表示 HARQ 软合并, 如式(14)和式(15)所示^[43]。

$$\text{SINR}_{c,n} = \varepsilon^{n-1} \eta(\text{ECR}, M)_n \sum_{k=1}^n \text{SINR}_k \quad (14)$$

$$\eta(\text{ECR}, M)_n = \begin{cases} \eta(\text{ECR}, M), & n \geq 2 \\ 1, & \text{其他} \end{cases} \quad (15)$$

以上述时延分析为基础, 可以得到如式(16)~式(18)所示基于吞吐量最大化的 MCS 选择。

$$\arg \max_n R_n \sum_{i=0}^{N_{\max}} \frac{1}{i+1} (1 - \text{BLER}_{n,i}) \prod_{j=0}^{i-1} \text{BLER}_{n,j} \quad (16)$$

$$\text{s.t.} \quad \prod_{j=0}^{N_{\max}} \text{BLER}_{n,j} < \text{BLER}_{\text{target}} \quad (17)$$

$$D_{\text{UE-RAN(HARQ)}} < D_{\text{target}} \quad (18)$$

其中, $\text{BLER}_{\text{target}}$ 和 D_{target} 分别表示错误率和时延上界。BLER 可以通过式(19)计算得到。

$$\text{BLER}(n, \gamma_{\text{AWGN}}) = \frac{1}{2} \left[1 - \text{erf} \left(\frac{\gamma_{\text{AWGN}} - b_n}{\sqrt{2}c_n} \right) \right] \quad (19)$$

其中, γ_{AWGN} 表示信干比; b_n 和 c_n 表示有关参数, 可以通过链路级仿真直接获得。

这里也可以把“平均时延”转换成“绝对时延”, 比如由时延约束反推求允许的最大重传次数 $N \leq N_{\max}$, 其中 N_{\max} 表示不考虑时延的最大允许的重传次数。

基于吞吐量最大化的 MCS 和 MIMO 模式选择如式(20)~式(22)所示。

$$\arg \max_{n,m} \rho_n R_n \sum_{i=0}^{N_{\max}} \frac{1}{i+1} (1 - \text{BLER}_{n,m,i}) \prod_{j=0}^{i-1} \text{BLER}_{n,m,j} \quad (20)$$

$$\text{s.t.} \quad \prod_{j=0}^{N_{\max}} \text{BLER}_{n,m,j} < \text{BLER}_{\text{target}} \quad (21)$$

$$D_{\text{UE-RAN(HARQ)}} < \text{Delay}_{\text{target}} \quad (22)$$

其中,

$$D_{\text{UE-RAN(HARQ)}} = (1 - \text{BLER}_{n,m,N_{\max}}) \cdot \sum_{j=0}^{N_{\max}-1} [(j+1)\text{TTI} + jD_{\text{HARQ}}] \left(\prod_{i=0}^j \text{BLER}_{n,m,i} \right) \quad (23)$$

本文对上述几种机制的平均传输时延进行实验仿真, 实验参数与式(14)及式(15)对应文献的链路级参数如表 2 所示, 实验结果如表 3 所示。

表 2 实验参数设置

参数	值
TTI/ms	1
D_{ARQ} /ms	15
D_{HARQ} /ms	4
N /次	5

表 3 平均传输时延结果

BLER 初始值	1%	10%	20%	30%
时延(只有 ARQ)/ms	1.2	2.8	5	7.9
时延(既有 HARQ 也有 ARQ) /ms	1.1	1.5	2	2.6

由表 3 可以看出, 当 BLER 比较小时, 对时延的影响比较小; 随着 BLER 的增大, 时延也增加。有了时延和 BLER 的对应结果, 再根据 BLER 和 SINR 的解调曲线, 就很容易基于时延和错误率的约束来选择基于吞吐量最大化的 MCS。

6 URLLC 的无线资源管理

资源管理首先要满足用户 QoS 的要求, 在此基础上, 要最大化系统的效率。5G 系统的 QoS 特征如表 4 所示^[10]。需要说明的是, 由于表格太大, 本文省略了 GBR 和 Non-GBR 的部分描述, 对应 URLLC 的主要是 delay critical GBR 所对应的行。

必须强调的是, QoS 是端到端的 QoS, 因此需要端到端、端到全系统的每个节点/环节及功能模块联合起来共同努力。表 5 说明了用户面处理和表 4 的 QoS 功能和参数是如何分配给网络中不同节点与功能模块的。

表 4 5G 系统的 QoS 特征

5G QI*	资源类型	缺省优先级	分组时延预算/ms	分组错误率	缺省数据突发量	缺省平均窗/ms	应用举例
1	GBR	20	100	10^{-2}	N/A	2 000	会话语音
∴		∴	∴	∴	∴	∴	∴
76		56	500	10^{-4}	N/A	2 000	“实时”上行流媒体
5	Non-GBR	10	100	10^{-6}	N/A	N/A	IMS 信令
∴		∴	∴	∴	∴	∴	∴
80		68	10	10^{-6}	N/A	N/A	低时延 eMBB 应用 (AR)
82	delay critical	19	10	10^{-4}	255	2 000	离散自动化
83		22	10	10^{-4}	1 354	2 000	离散自动化
84		24	30	10^{-5}	1 354	2 000	智能交通系统
85	21	5	10^{-5}	255	2 000	配电-高压	

注：*5G QI (5G QoS identifier) :5G 质量服务标识。

表 5 用户面 QoS 功能总体

类别	用户面 QoS 管理功能	UE	gNode B	传输网络	UPF
QoS 流承载的功能操作	分组过滤	√ (上行)	—	—	√ (下行)
	GBR/ARP 准入	—	√	—	√
	ARP*优先	—	√	—	√
	速度策略	—	√	—	√
	队列管理	√	√	—	—
	上行/下行调度	—	√	—	—
	配置层 1、层 2 协议	—	√	—	—
	将 5GQI 映射到 DSCP	—	√	—	√
传输层, 以 DSCP**为基础的 功能操作	队列管理	—	—	√	—
	上行/下行调度	—	—	√	—

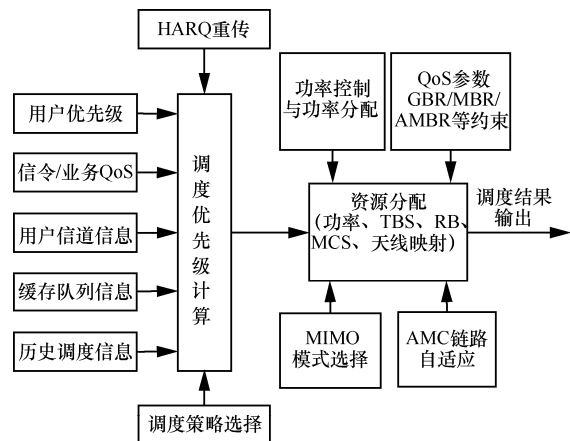
注：*ARP (allocation and retention priority) : 分配与预留优先级
**DSCP (differentiated services code point) : 差分服务代码点

本节重点讨论与无线资源管理的上下行调度密切相关的部分。调度涉及的资源分配总体框架如图 8 所示。其中，HARQ 重传与链路自适应部分在前面已涉及，功率控制与分配与下文的干扰管理有关。

6.1 优先级计算

不同的业务有不同的 QoS 要求，时延不敏感业务和时延敏感业务常用的优先级计算方法^[45-46]如表 6 所示。可以用表 6 中类似方法或者其他方法来推广 URLLC 业务，但在有关变量的统计上，采用适合 URLLC 业务的方案。具体说明如下。

设分组 i 的大小为 s_i ，剩余时间为 $d_i (d_i \geq 1)$ 个 TTI。如果分组 i 在 TTI $\tilde{t}_i = t - 1 + d_i$ ，那么该分组



MBR (maximum bit rate) : 最大比特速率
AMBR (aggregate maximum bit rate) : 聚合最大比特速率
AMC (adaptive modulation and coding) : 自适应调制编码
RB (resource block) : 资源块

图 8 MAC 层资源分配总体框架

表 6 常用的调度优先级计算方法

业务	调度器	调度策略	备注
	FIFO	$i^*(t) = \arg \max_{i \in K} (t - D_i)$	
	RR	$i^*(t) = 1, 2, \dots, N, \dots, i$	
	MR	$i^*(t) = \arg \max_{i \in K} R_i(t)$	
时延不敏感业务		$i^*(t) = \arg \max_{i \in K} \frac{r_i(t)}{R_i(t)}$	
		更一般的为	
	PF	$i^*(t) = \arg \max_{i \in K} \frac{[r_i(t)]^\xi}{[R_i(t)]^\psi}$	
		$R_i(t+1) = \left(1 - \frac{1}{T}\right)R_i(t) + \frac{1}{T}r_i(t)$	K : 总用户数 $i^*(t)$: 时刻 t 的调度用户 $R_i(t)$: 时刻 t 用户 i 的可达速率 $r_i(t)$: 时刻 t 用户 i 的瞬时速率 ξ, ψ : 公平性有关的参数 T : 时间窗口参数
	PFMR	$i^*(t) = \arg \max_{i \in K} \frac{r_i(t)}{R_i(t)} e^{a_i T_i(t)}$ $T_i(t+1) = \begin{cases} T_i(t) + R_i^{\text{token}} - r_i(t), & \text{被调度} \\ T_i(t) + R_i^{\text{token}}, & \text{其他} \end{cases}$ 如果 $T_i(t) \geq 0$, $R_i^{\text{token}} = R_i^{\text{max}}$ 如果 $T_i(t) < 0$, $R_i^{\text{token}} = R_i^{\text{min}}$ $R_i^{\text{min}} \leq R_i \leq R_i^{\text{max}}$	$R_i^{\text{max}}, R_i^{\text{min}}$: 用户 i 的速率范围要求 D_i^{QoS} : 用户 i 的 QoS 时延要求 $D_i(t-1)$: 用户 i 在 $t-1$ 时刻的时延 $\text{PLR}_i^{\text{QoS}}$: 用户 i 的 QoS 分组丢失率要求
	EDF	$i^*(t) = \arg \min_{i \in K} [D_i^{\text{QoS}} - D_i(t-1)]$	
时延敏感业务	M-LWDF	$i^*(t) = \arg \max_{i \in K} \delta_i D_i(t-1) \frac{r_i(t)}{R_i(t)}$ $\delta_i = \frac{\text{lb}(\text{PLR}_i^{\text{QoS}})}{D_i^{\text{QoS}}}$	
	EXP/PF	$i^*(t) = \arg \max_{i \in K} \left[\exp \frac{\delta_i D_i(t-1) - \overline{\delta D}}{1 + \sqrt{\delta D}} \frac{r_i(t)}{R_i(t)} \right]$ $\overline{\delta D} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \delta_i D_i(t-1)$	

FIFO (first in first out): 先进先出
 RR (round robin): 轮询
 MR (maximum rate): 最大速率
 PF (proportional fair): 比例公平
 PFMR (proportional fair with minimum/maximum rate constraint): 最小最大速率约束的比例公平
 EDF (earliest deadline first): 最早截止时间优先
 M-LWDF (modified-largest weighted delay first): 最大加权时延优先
 EXP/PF (exponential/PF): 指数 PF

将被丢弃, 因为剩余时间结束。因为一个分组可以被分段在不同 TTI 的不同的 RB 上发送, 所以设 $\tilde{s}_i(t)$ 是 TTI t 结束时发送的总的数据量的大小, 那么如果 $\tilde{s}_i(t) \geq s_i$ 且 $t \leq \tilde{t}_i$ (表示数据分组 i 的剩余时

间还未结束), 则这个数据分组成功发送给了 UE。反之, 如果 $\tilde{s}_i(t) < s_i$ (表示数据分组 i 没有全部发送) 且 $t < \tilde{t}_i$ (表示剩余时间结束), 则这个数据分组没有被成功发送, 将被丢弃。 $R_i(t)$ 可按如式(24)进行更新。

$$R_i(t) = (1 - \alpha)R_i(t - 1) + \alpha\delta_i(t)s_i \quad (24)$$

其中,

$$\delta_i(t) = \begin{cases} 1, & \tilde{s}_i(t) \geq s_i \text{ 且 } t \leq \tilde{t}_i \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (25)$$

可以看出, URLLC 业务的方案不仅考虑了当前 TTI 时刻 t , 而且考虑到了 $t_{\max} = \max_i \tilde{t}_i$, 也就是说, 直到完成最后一个分组的传输, 整个分组才能传输成功, $R_i(t)$ 才变化, 这和表 6 中的表述不同。

如果采用式(26)或式(27)所示效用函数, 那么基于动态规划求最优解也是候选方案^[47]。

$$U_{\text{URLLC}}(t) = \sum_{i=1}^N R_i(t) \quad (26)$$

$$U_{\text{URLLC}}(t) = \sum_{i=1}^N \log R_i(t) \quad (27)$$

除了上面所述动态调度, 对于 URLLC 业务, 也可以采用持续调度 (persistent scheduling) 或者半持续调度 (semi-persistent scheduling), 类似于基于 IP 语音 (VoIP, voice over IP) 传输业务的调度处理方式^[46]。所谓持续调度就是通过高层信令预先分配好资源和调制编码方式, 用户在分配有效期内不再监听物理层控制信道而是直接发送和接收数据。这种方法的好处是节省信令开销、简单, 同时可降低对控制信道可靠性的要求; 不足之处是可能浪费数据信道资源。

6.2 干扰管理

在无线通信网络中, 当多对通信链路共享相同资源域时, 所产生的相互干扰将导致网络资源浪费并使网络性能恶化, 因此干扰管理是改善网络性能的重要手段。图 9 给出了干扰管理的各种技术及潜在的增益空间和实现代价 (图中符号说明: S 表示信号; I 表示干扰; N_0 表示噪声; 分母上的 i 表示部分干扰, 分子上的 i 表示干扰转换为信号的部分)。需要说明的是, 这里的代价不仅仅指接收机的处理能力, 更多的是指为了实现小区间的联合设计, 不同的技术所需要满足的条件, 包括基站间是否需要同步、基站间回传的时延和带宽需求等。此外, 涉及物理层的特有干扰抑制技术, 包括干扰抑制合并 (IRC, interference rejection combining)。即当存在个别主要干扰时, 可以选择加权系数在干扰的方向形成大的衰落, 抑制特定的干扰, 以及非线性接收机最大似然检测 (MLD, maximum likelihood detector) 等, 本节不涉及, 故不赘述。

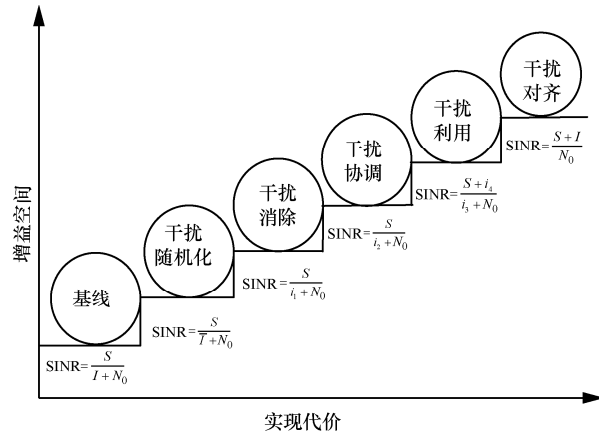


图 9 干扰管理

1) 干扰随机化 (IR, interference randomization) 的目标是在接收端得到接近白噪声的干扰信号, 即随机化的干扰信号, 从而获得抑制干扰的处理增益。跳频、交织、伪随机信号都有干扰随机化的功能, 但交织和伪随机信号由协议物理层标准确定, 跳频通常可作为资源管理的范畴。

2) 干扰消除 (IC, interference cancellation) 的主要思想是对干扰信号进行译码, 然后重构干扰信号, 并从接收信号中删除。按照译码干扰信号方式的不同, 可分为串行干扰消除 (SIC, successive interference cancellation) 和并行干扰消除 (PIC, parallel interference cancellation)^[48]。这些是物理层技术, 也会涉及和 MAC 层的跨层优化设计。此外, 为了更好地发挥干扰消除的作用, 在下行网络中辅助的干扰消除 (NAIC, network-assisted interference cancellation and suppression) 也是候选的技术手段^[49]。

3) 干扰协调 (IC, interference coordination) 的主要思想是通过小区间进行时间域、功率域、频率域、波束域的相互协作降低干扰, 如时域/功率域/频率域 eICIC (enhanced inter-cell interference coordination) 与 DPB (dynamic point blanking)、CS/CB (coordinated scheduling/coordinated beamforming)、DPS/DCS (dynamic point selection/dynamic cell selection)、小区间功率控制等都属于此类^[50-54]。

4) 干扰利用 (IU, interference utilization), 本文指小区间联合发送 (JT, joint transmission) 或者联合接收 (JR, joint reception)^[52,56-57]。

5) 干扰对齐 (IA, interference alignment) 的基本思想是将来自不同干扰源的干扰信号在接收端对齐压缩至较小的信号维度, 从而减小干扰信号所

占用的维度^[48]。不过实现上挑战太大，实际网络中难以兑现。

总之，不同的方法需要从应用场景、效果、效率和实现代价等方面，综合考虑选择什么样的具体方案。对于 URLLC 来说，可靠性是最重要的，因此，对空口来说，则最大程度改善信干比是首选，干扰利用中的联合发送和接收、干扰协调通常是最好的手段^[56,58]。

6.3 URLLC 和 eMBB 混合

当 URLLC 业务和 eMBB 业务混合时，URLLC 业务的 QoS 是必须要保证的，也就是说，URLLC 优先级更高，因此命题就转化为在保证 URLLC 业务质量的前提下，使 eMBB 容量最大化。目前在这方面已做了大量研究^[59-64]，类似的思想可用式(28)~式(30)来表示^[61]。

$$\max_{B_{\text{URLLC}}} \sum_{i=1}^n (B_{\text{eMBB},i} - B_{\text{URLLC},i}) \text{lb} \left(1 + \beta \frac{P_{\text{eMBB},i} h_{\text{eMBB},i}}{B_{\text{eMBB},i} N_0} \right) \quad (28)$$

$$P \left[\sum_{j=1}^m B_{\text{URLLC},j} \text{lb} \left(1 + \beta \frac{P_{\text{URLLC},j} h_{\text{URLLC},j}}{B_{\text{URLLC},j} N_0} \right) < 0 \right] \leq \epsilon \quad (29)$$

$$B_{\text{URLLC},i} \leq B_{\text{eMBB},i} \quad \forall i \quad (30)$$

其中， $B_{\text{eMBB},i}$ 和 $B_{\text{URLLC},j}$ 分别表示 eMBB 业务和 URLLC 业务所占用的带宽； $P_{\text{eMBB},i}$ 和 $P_{\text{URLLC},j}$ 分别表示 eMBB 业务和 URLLC 业务所分配的功率； β 表示对香农公式的矫正； N_0 表示噪声； $h_{\text{eMBB},i}$ 和 $h_{\text{URLLC},j}$ 分别表示 eMBB 业务和 URLLC 业务的信道增益； ϵ 表示可靠性要求。假设 D 服从 Pareto 分布，则该分布为

$$F(x) = P(X \leq x) = 1 - \left(\frac{xm}{x} \right)^\alpha, \quad \forall x \geq x_m \quad (31)$$

需要说明的是，目前这类方法最大的挑战是符合实际网络的精准建模困难、具体求解困难。

对于 URLLC 和 eMBB 混合场景，最简单的方法就是抢占或者受限性抢占^[65]，其思想是将传输队列分组为几个优先级类，在具有更高优先级的所有队列都为空之前，其他类的队列不能被服务，如图 10 所示。当然，在 URLLC 或者 eMBB 内部，也可以采用前面如表 6 所述方法，但在 URLLC 和 eMBB 间采用严格的抢占。

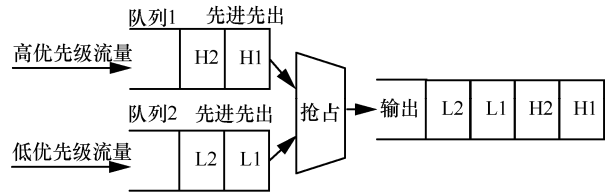


图 10 抢占示例

下面分析说明一下和 eMBB 与 URLLC 混合时，HARQ 重传的处理机制，即码块分组。

如果传输块 (TB, transport block) 太大，一个 TB 进行一次 (比如 1 bit) ACK/NACK 反馈，一旦该 TB 译码出错，会造成整个 TB 重传。由于该 TB 比较大，重传整个 TB 将使资源利用率比较低。

由于一个 TB 中包含多个编码块 (CB, code block)，译码时可以知道每个 CB 是否正确，但若针对每个 CB 均进行 ACK/NACK 反馈，如果某个 TB 译码失败，只需要对传输错误的那个 CB 进行重传即可，没有必要重传整个 TB，从而提高了资源利用率，但是需要反馈很多的上行 ACK/NACK，这会导致上行信令非常大，同样也会造成资源浪费。

为此，本文采用一种基于 TB 反馈和 CB 反馈的折中方案，即将 TB 中的多个 CB 分组，分组后的 CB 组称之为编码块组 (CBG, code block group)，然后针对每个 CBG 反馈对应的 ACK/NACK，并且基于 CBG 进行重传^[66-68]，如图 11 所示。

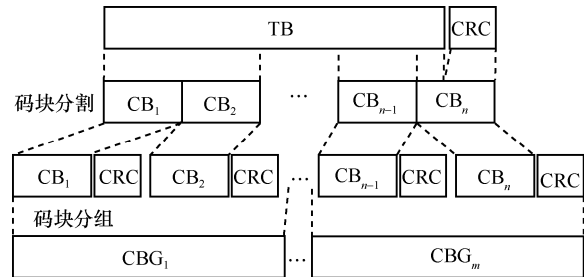


图 11 码块分组

传输块 TB 由多个 (比如 N 个) CB 组成，设每个传输块的目标误块率 BLER 为 BLER_{TB} ，则每个 CB 的目标 BLER 为 BLER_{CB} 应该满足式(32)所示条件。

$$1 - (1 - \text{BLER}_{\text{CB}})^n = \text{BLER}_{\text{TB}} \quad (32)$$

其中， n 表示 TB 中包含的 CB 个数。

通过对式(32)进行泰勒级数展开，可得

$$\text{BLER}_{\text{CB}} = 1 - (1 - \text{BLER}_{\text{TB}})^{\frac{1}{n}} \approx \frac{\text{BLER}_{\text{TB}}}{n} \quad (33)$$

令 CB_{error} 表示 CB 没有被成功解码的个数，则概率 $\Pr(CB_{error} = k)$ 为

$$\Pr(CB_{error} = k) = \binom{n}{k} BLER_{CB}^k (1 - BLER_{CB})^{n-k} \quad (34)$$

假设 CBG 包含的 CB 个数为 i ，则 $m = \frac{n}{i}$ 。

CBG_{error} 表示 CBG 没有被成功解码的个数，则概率 $\Pr(CBG_{error} = j)$ 为

$$\Pr(CBG_{error} = j) = \binom{m}{j} [1 - (1 - BLER_{CB})^i]^j \quad (35)$$

遇到差的信道或者和 URLLC 冲突的情况时，基于 CBG 的重发如图 12 所示。eMBB 业务基于码块分组的重传机制，也可以提高 eMBB 和 URLLC 混合时系统的传输效率。

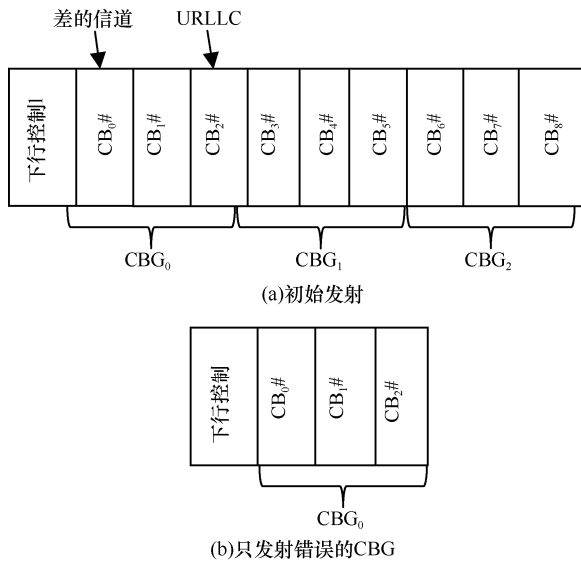


图 12 基于 CBG 的重发

上述资源分配还是基于正交多址的机制，但在 5G 中，非正交多址作为物理层的关键基础技术^[69-71]，弥补了正交多址的不足，更加有效地支持 5G 丰富的部署场景：eMBB、URLLC、mMTC。在有助于 URLLC 业务低时延的同时，增加下行调度系统的频谱效率，还能大大提升上行免调度场景下的用户连接数和系统吞吐量^[72-75]，不过挑战在于接收机的复杂度、信道估计的非理想等导致的性能损失等^[76]。

7 URLLC 端到端分集解决方案

对于无线连接来说，最大的挑战是无线衰落信道。为了在无线衰落信道上实现超可靠传输，必须有大的信噪比余量。在多个独立信道上不同分集阶

数与衰落余量的关系^[109]如图 13 所示，这充分说明了分集对于 URLLC 的重要性。

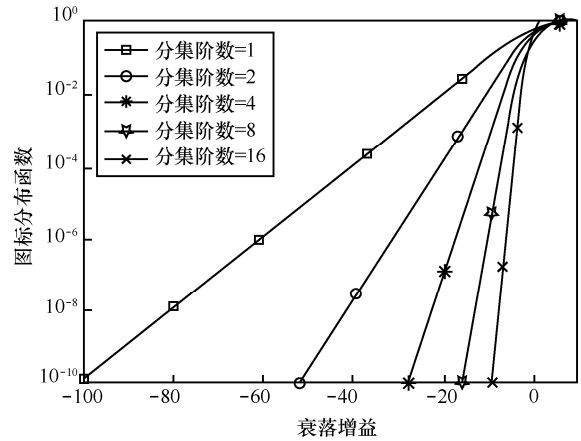


图 13 不同分集阶数与衰落余量的关系

为了应对用户面单路径对支持高可靠的挑战，5G 系统支持冗余的传输，即在网络和 UE 间建立多条路径的传输^[10,110-115]。从式(36)~式(38)可以看出多路径的价值。

$$p_{LLUR} = 1 - \prod_{i=1}^L (1 - p_{LLUR,i}) \quad (36)$$

$$p_{LLUR,i} = \Pr(BLER_i < BLER_{target,i}) \Pr(\tau_i < \tau_{target,i}) \quad (37)$$

$$p_{LLUR} = \Pr(BLER < BLER_{target}) \Pr(\tau < \tau_{target}) \quad (38)$$

其中， $p_{LLUR,i}$ 表示第 i 条链路的成功概率， L 表示冗余链路条数， p_{LLUR} 表示满足低时延高可靠要求的概率，BLER 表示误块率， $BLER_{target}$ 表示目标误块率， τ 表示时延， τ_{target} 表示目标时延。可以看出， n 越大，则 p_{LLUR} 越大，意味着越可靠，当然，也意味着系统越复杂，成本越高。显然，基于每条链路的可靠性和时延能力以及总目标的要求，可以反推出需要几条冗余链路。

分集包括时间集、频率分集和空间分集。当超可靠业务需要非常低的时延时，就无法利用时域上的多样性，因此，只能使用频率域的分集和空间域的分集。信道编码需要扩散编码的比特到不同的分集信道上，以便利用更高的分集水平。

事实上，从应用层到核心网，再到接入网，有不同的多路径分集技术可以利用，比如 TCP 层的 MP-TCP^[116-117]、UPF 的复制、双链接、载波聚合、MIMO 和协调多点 (CoMP, coordinated multi-point)，如图 14 和图 15 中标识为“5G 低时延高可靠性系统”

部分所示。就 5G 系统侧而言，主要问题如下。

- 1) 针对某一 QoS 流，如何决策是否冗余传输。
- 2) 如何在 UE/RAN/UPF 复制数据。
- 3) 如何建立、修改和释放隔离的隧道。
- 4) 如何支持切换过程。

具体方案依赖于部署场景。比如为了利用发射端和接收端的空间分集，需要利用多个天线。但应该注意的是，具有 URLLC 能力的 UE 可能嵌入各种类型的设备中，例如工业传感器和执行器，不过这种设备的形状因素可能会限制设备上可用天线的数量。因此，在提供 URLLC 解决方案时，要考虑 UE 天线配置的限制。

本文以最小化占用资源为目标，给出如何选择链路路径的例子。具体如式(39)~式(42)所示目标函数和约束条件^[110]。

$$\arg \min_{(\alpha_i, PBR_i, MCS_i)} \sum_{i=1}^n \alpha_i PBR_i \quad (39)$$

$$PBR_i \leq B_i, \forall i \quad (40)$$

$$f_i(MCS_i, \alpha_i PBR_i) \geq TBS_{LLUR}, \forall i \quad (41)$$

$$\prod_{i=1}^n \alpha_i (1 - p_{LLUR,i}) \leq 1 - p_{LLUR} \quad (42)$$

其中， $\alpha_i \in \{0,1\}$ 表示该链路是否被激活； PBR_i 表示在链路 i 上分配的物理资源块 (PRB, physical resource block)； B_i 表示链路 i 上最大可用的 PRB； MCS_i 是链路 i 上选择的调制编码格式； TBS_{LLUR} 表示低时延高可靠业务对应的传输块的大小。

通过这个最优化的求解，就可获得满足低时延高

可靠业务传输的链路及其所对应的调制编码格式。

8 URLLC 与 TSN 的集成

许多网络应用 (例如工业互联网中的数据上传和控制指令下发、远程机器人手术、无人驾驶、VR 游戏等) 需要将端到端时延控制在 1~10 ms，将时延抖动控制在微秒级，但传统的网络只能将端到端的时延减少到几十毫秒。面对时延敏感性业务的迫切需求，如何从“尽力而为”到“准时、准确”地控制端到端的时延对 IP 网络提出了新的挑战。及时、安全地传输数据是工业通信技术的关键要求之一。时间敏感网络是满足该要求的、有发展前景的一项技术。TSN 的主要目标是通过 IEEE 802 (以太网) 有线网络提供确定性服务，这意味着低时延、小抖动、低分组丢失率、有保证的数据分组传输。TSN 的关键点总结为如下几个方面^[118-120]。

- 1) 时间同步。定时机制和同步机制是关键。
- 2) 超可靠。帧复制和帧消除、路径控制、流过滤策略、时间同步可靠性是关键。
- 3) 有界低时延。帧抢占、流量整形与调度是关键。
- 4) 资源管理。资源预留、TSN 配置是关键。

5G 系统可以降低与布线基础设施相关的成本，支持自动推车或移动无人搬运车 (AGV, automated guided vehicle) 等移动设备，并提高工业应用的灵活性。为了将工业设备 (工业传感器/执行器) 以无

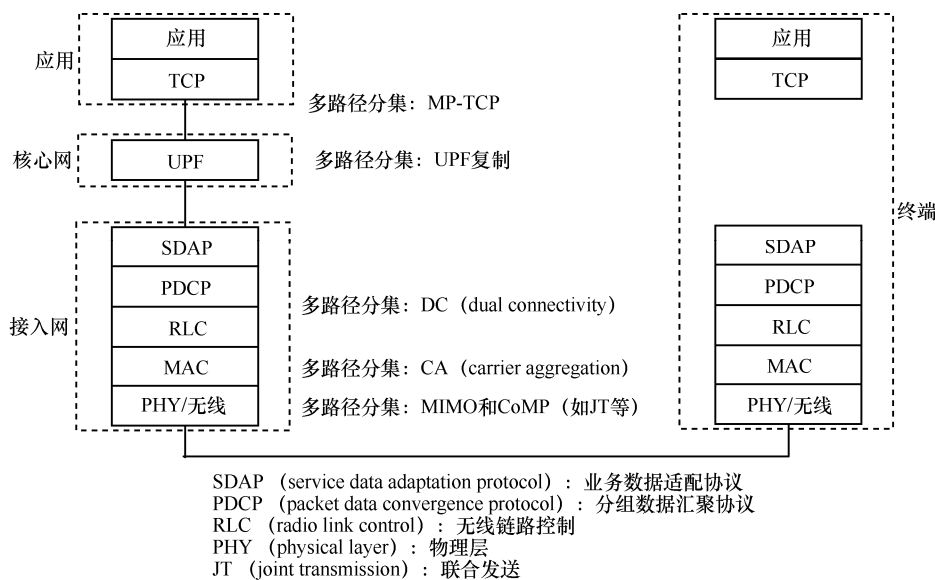


图 14 多路径分集

线方式连接到 TSN，5G 系统是非常合适的解决方案。5G 系统提供了更好的可靠性和传输时延，而且，其架构允许被灵活地部署。因此，5G 可以实现不受电缆限制的 TSN。由于 5G 系统和 TSN 都有自己的网络管理机制，为了在 5G 系统上支持 TSN 服务，需要进一步增强无线接入网和核心网，主要挑战是实现 TSN 和 5G 网络的互通。

5G 系统可以看作“时间感知系统”“具有绝对时限的时间感知调度”^[10]，其提供了和外部业务/网络的多个接口，可以用于 TSN 的集成。5G 系统在外网中显示为 TSN 桥。这种“逻辑”TSN 桥包括自适应功能 (AF, adaptation function)，用于将 5G 系统协议和信息对象转换为 TSN 协议和信息对象，反之亦然。核心网和 RAN 中的 5G 系统特定过程、无线通信链路等对 TSN 保持隐藏。为了实现对 TSN 的这种透明性并显示为任何其他 TSN 桥，5G 系统网桥通过 UE 侧的 TSN 转换器 (TT, TSN translator) 设备和核心网侧的 DN 的“TSN 转换器” (包括控制面和用户面) 提供 TSN 入口和出口端口。5G 系统网桥需要支持不同的 TSN 配置模型，这要求在控制面和用户面上，向 TSN 终端站、TSN 桥、集中网络配置 (CNC, centralized network configuration) 和

集中用户配置 (CUC, centralized user configuration) 提供多个符合 TSN 协议的接口。TSN 网桥自我管理 (对于全分布式模型) 和与 CNC 交互所需的功能位于转换器处。图 15 给出了 URLLC 分集方案与 TSN 的集成表示。

具体来说，图 15 中的 RAN_{11} 和 RAN_{12} 、 UPE_{11} 和 UPE_{12} 是对应 UE_1 的用户面多路径分集， RAN_2 和 UPE_2 是对应 UE_2 的用户面路径分集。必须说明的是，这是一个一般化的表示，具体如何选择多路径分集的方案，由第 7 节中的描述决定，比如类似式(39)~式(42)所示最优化思想。但是，无论图 15 中的“5G 低时延高可靠性系统”部分如何设计，对 TSN 来说，都是黑盒子，仅仅是 TSN 中的一个 TSN 桥，通过 AF 接口对接。

从 TSN 的观点来看，将 5G 系统视为一个黑盒子更便利，因为它采用 5G 系统的指定 QoS 框架，并且不需要任何网络节点来支持作为外部 TSN 系统一部分的 TSN 协议和过程。5G 系统作为 TSN 桥出现，5G 系统使用完善的 5G QoS 框架接收与 TSN 相关的预订请求。然后，5G 系统使用 5G 内部信令来满足 TSN 预约请求，比如 5G 系统使用 QoS 流类型 (GBR、时延关键 GBR)、5QI、ARP 等 5G 框

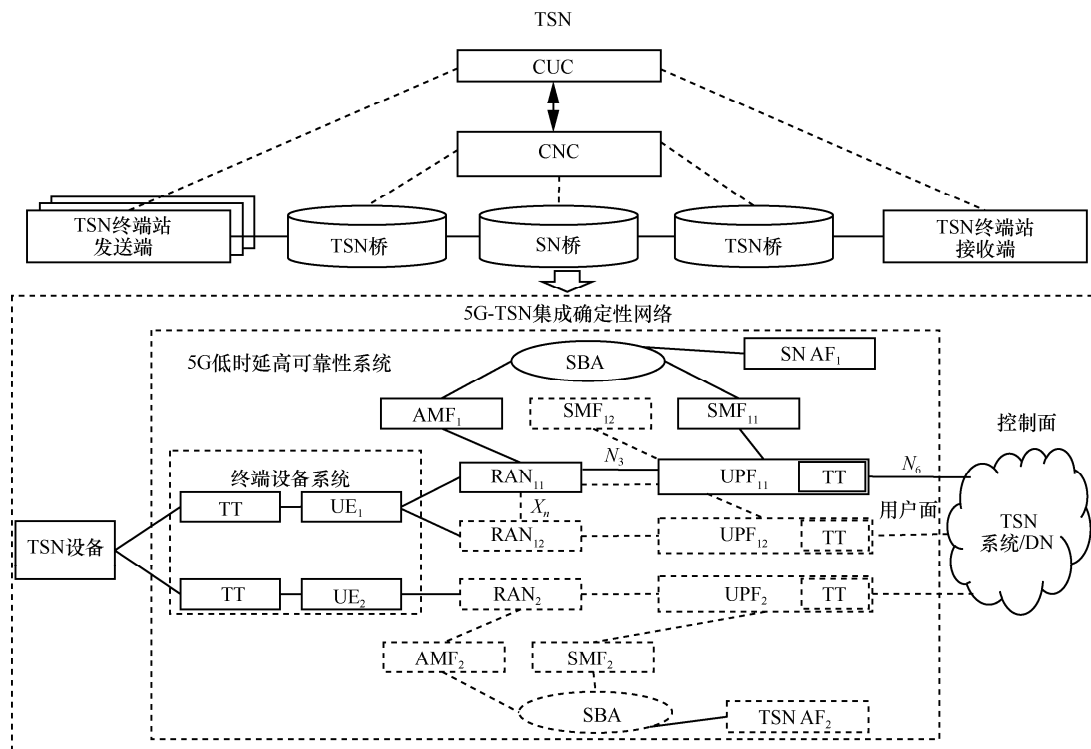


图 15 URLLC 分集方案和 TSN 的集成方案

架来满足请求 QoS 属性，如图 16 所示。

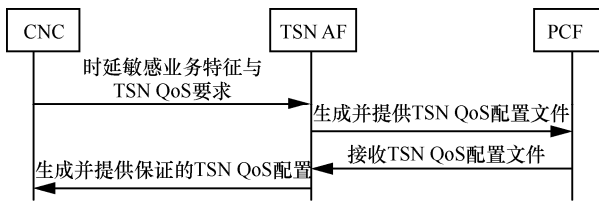


图 16 TSN 识别 QoS 配置文件生成过程

TSN 转换器作为 5G 和 TSN 的互联接口，除了映射 TSN 配置到 5G QoS 管理架构，还提供以太网功能（如环路检测）、头压缩，以及支持调度和去抖动缓冲区等功能。

具体来说，图 16 中 TSN 的 CNC 把时延敏感业务特征和其 QoS 要求发送给 TSN 和 5G 系统的接口模块，即 TSN 自适应功能模块 AF，然后该模块生成 QoS 配置文件给 5G 系统的 PCF 模块，如果 5G 系统能满足其 QoS 要求，则回复确认信息。

9 结束语

URLLC 在未来 5G 垂直行业的应用中扮演着非常重要的角色，已得到学术界和产业界的充分重视。本文以全景式视角，从应用场景和需求开始，分析介绍了 URLLC 有关的系统架构、关键技术和解决方案总体，然后分别对物理层检测性能需求、链路自适应、无线资源管理、端到端分集解决方案及如何与 TSN 集成进行了深入的分析和可能的候选方案的探讨，从广度到深度对 URLLC 的理论研究到如何应用，有一个透彻全面的介绍分析，对其挑战有一个清晰的认识，从而为相关研究和工程技术人员提供借鉴和参考。必须说明的是，这是一个庞大的领域，限于篇幅，无法一一深入细节且面面俱到，未来需要庖丁解牛式地展开进一步研究工作。

参考文献:

[1] SCHULZ P, MATTHE M, KLESSIG H, et al. Latency critical IoT applications in 5G: perspective on the design of radio interface and network architecture[J]. IEEE Communications Magazine, 2017, 55(2): 70-78.

[2] POPOVSKI P, STEFANOVIC C, NIELSEN J J, et al. Wireless access in ultra-reliable low-latency communication (URLLC) [J]. IEEE Transactions on Communications, 2019, 67(8):5783-5801.

[3] PEISA J. 5G techniques for ultra reliable low latency communication[R]. Ericsson Research. (2017-08)[2020-06-08].

[4] 3GPP. Service requirements for the 5G system: TS 22.261[S]. (2018-03)[2020-06-08].

[5] 3GPP. Study on communication for automation in vertical domains:

TR22.804[S]. (2018-12)[2020-06-08].

[6] 3GPP. Feasibility study on new services and markets technology enablers for critical communications: TR 22.862[S]. (2016-09) [2020-06-08].

[7] POLYANSKIY Y, POOR H V, VERDU S. Channel coding rate in the finite blocklength regime[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2010, 56(5): 2307-2359.

[8] OHMANN D, SIMSEK M, FETTWEIS G P. Achieving high availability in wireless networks by an optimal number of Rayleigh-fading links[C]//2014 IEEE Globecom Workshops. Piscataway: IEEE Press, 2014: 1402-1407.

[9] 3GPP. Feasibility study on LAN support in 5G: TR 22.821[S]. (2018-06) [2020-06-08].

[10] 3GPP. System architecture for the 5G system: TS 23.501[S]. (2019-06) [2020-06-08].

[11] 3GPP. NR and NG-RAN overall description: TS 38.300[S]. (2019-06) [2020-06-08].

[12] 3GPP. Analysis of URLLC reliability for HARQ: R1-1701595[S]. 3GPP. (2017-02)[2020-06-08].

[13] 3GPP. Physical layer procedures for data:TS38.214[S]. (2019-06) [2020-06-08].

[14] 3GPP. CQI reporting for URLLC: R1-1718748[S]. (2017-10) [2020-06-08].

[15] 3GPP. Evaluation scenarios for URLLC: R1-1717452[S]. (2017-10) [2020-06-08].

[16] 3GPP. Study on physical layer enhancements for NR ultra-reliable and low latency case (URLLC): TR38.824[S]. (2019-03) [2020-06-08].

[17] 3GPP. Study on NR industrial internet of things (IIoT): TR38.825[S]. (2019-03)[2020-06-08].

[18] 3GPP. Study on NR vehicle-to-everything (V2X): TR38.885[S]. (2019-03)[2020-06-08].

[19] 3GPP. Study on enhancement of 5G system (5GS) for vertical and local area network (LAN) services: TR 23.734[S]. (2019-06) [2020-06-08].

[20] 3GPP. Study on enhancement of ultra-reliable low-latency communication (URLLC) support in the 5G core network (5GC): TR 23.725[S]. (2019-06)[2020-06-08].

[21] DURISI G, KOCH T, POPOVSKI P. Towards massive, ultra-reliable, and low-latency wireless communication with short packets[J]. Proceedings of the IEEE, 2016, 104(9): 1711-1726.

[22] AVRANAS A, KOUNTOURIS M, CIBLAT P. Throughput maximization and IR-HARQ optimization for URLLC traffic in 5G systems[C]// 2019 IEEE International Conference on Communications. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-6.

[23] HOBLER T, SIMSEK M, FETTWEIS G P. Mission reliability for URLLC in wireless networks[J]. IEEE Communication Letters, 2018, 22(11): 2350-2353.

[24] 3GPP. On URLLC characteristics: R1-167062[S]. (2016-08) [2020-06-08].

[25] 3GPP. Use cases and target requirements in LTE: R1-1717451[S]. (2017-10) [2020-06-08].

[26] 3GPP. On diversity and HARQ support for URLLC: R1-1702746[S]. (2017-02) [2020-06-08].

[27] 3GPP. On link adaptation enhancements to support URLLC: R1-1712602[S]. (2017-08)[2020-06-08].

- [28] BUCCHERI L, MANDELLI S, SAUR S, et al. Hybrid retransmission scheme for QoS-defined 5G ultra-reliable low-latency communications[C]// 2018 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-6.
- [29] 3GPP. Link adaptation for URLLC transmission: R1-1712210[S]. (2017-08)[2020-06-08].
- [30] 3GPP. CQI reporting for multiple services in NR: R1-1719584[S]. (2017-12)[2020-06-08].
- [31] 3GPP. Analysis of URLLC reliability for uplink control channel: R1-1710120[S]. (2017-06)[2020-06-08].
- [32] 3GPP. On high reliability: R1-1701872[S]. (2017-02) [2020-06-08].
- [33] 3GPP. UP latency in NR: R1-1718729[S]. (2017-10) [2020-06-08].
- [34] 3GPP. CP latency in NR: R1-1718728[S]. (2017-10) [2020-06-08].
- [35] 3GPP. Techniques for low latency: R1-1717455[S]. (2017-10) [2020-06-08].
- [36] 3GPP. Techniques for reliability: R1-1717453[S]. (2017-10) [2020-06-08].
- [37] 3GPP. Channel coding for URLLC: R1-1707007[S]. (2017-05) [2020-06-08].
- [38] 3GPP. Ultra-reliable part of URLLC for scheduling and HARQ procedure: R1-1712461[S]. (2017-08)[2020-06-08].
- [39] STROTHOFF N, GOKTEPE B, ISCHIER T, et al. Enhanced machine learning techniques for early HARQ feedback prediction in 5G[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2019, 37(11): 2573-2587.
- [40] KIM K S, KIM D K, CHAE C B, et al. Ultrareliable and low-latency communication techniques for tactile internet services[J]. Proceedings of the IEEE, 2019, 107(2): 376-393.
- [41] BELOGAEV A, KHOROV E, KRASILOV A, et al. Conservative link adaptation for ultra reliable low latency communications[C]// 2019 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-5.
- [42] EGGERS P C F, ANGJELICHINOSKI M, POPOVSKI P. Wireless channel modeling perspectives for ultra-reliable communications[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2019, 18(4): 2229-2243.
- [43] FREDERIKSEN F, KOLDING T E. Performance and modelling of WCDMA/HSDPA transmission/H-ARQ schemes[C]// Proceedings IEEE 56th Vehicular Technology Conference IEEE VTC. Piscataway: IEEE Press, 2002: 472-476.
- [44] ROSA C, OUTES J, DIMOU K, et al. Performance of fast node B scheduling and L1 HARQ schemes in WCDMA uplink packet access[C]// 2004 IEEE 59th Vehicular Technology Conference. Piscataway: IEEE Press, 2004: 1635-1639.
- [45] ABU-ALI N, TAHA A M, SALAH M, et al. Uplink scheduling in LTE and LTE-advanced: tutorial, survey and evaluation framework[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2014, 16(3): 1239-1265.
- [46] CAPOZZI F, PIRO G, GRIECO L A, et al. Downlink packet scheduling in LTE cellular networks: key design issues and a survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2013, 15(2): 678-700.
- [47] KHOROV E, KRASILOV A, MALYSHEV A. Radio resource scheduling for low-latency communications in LTE and beyond[C]// 2017 IEEE/ACM 25th International Symposium on Quality of Service. Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-6.
- [48] 李建东, 刘磊, 盛敏, 等. 面向 5G 无线网络的智能干扰管理技术[J]. 电信科学, 2016, 32(6): 3-14.
- LI J D, LIU L, SHENG M, et al. Intelligent interference management in 5G wireless networks[J]. Telecommunication Science, 2016, 32(6): 3-14.
- [49] 3GPP. Study on network-assisted interference cancellation and suppression (NAIC) for LTE: TR 36.866[S]. (2014-03)[2020-06-08].
- [50] MALIK H, ALAM M M, MOULLEC Y, et al. Interference-aware radio resource allocation for 5G ultra-reliable low-latency communication[C]// 2018 IEEE Globecom Workshops. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-6.
- [51] SORET B, DOMENICO A D, BAZZI S, et al. Interference coordination for 5G new radio[J]. IEEE Wireless Communications, 2018, 25(3): 131-137.
- [52] BASSOY S, FAROOQ H, IMRAN M A, et al. Coordinated multi-point clustering schemes: a survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 19(2): 743-764.
- [53] 3GPP. Interference management in NR: R1-1702719[S]. (2017-02) [2020-06-08].
- [54] 3GPP. Discussion on interference coordination for NR: R1-166793[S]. (2016-08)[2020-06-08].
- [55] 3GPP. Discussion on interference management based on advanced transceivers for NR: R1-166791[S]. (2016-08)[2020-06-08].
- [56] 3GPP. Discussion on Multi-TRP cooperation for URLLC: R1-1712219[S]. (2017-08)[2020-06-08].
- [57] BALACHANDRAN K, KANG J H, KARAKAYALI K, et al. NICE: a network interference cancellation engine for opportunistic uplink cooperation in wireless networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2011, 10(2): 540-549.
- [58] KARIMI A, PEDERSEN K, MAHMOOD N H, et al. 5G centralized multi-cell scheduling for URLLC: algorithms and system-level performance[J]. IEEE Access, 2018(6): 72253-72262.
- [59] ALSENWI M, PANDEY S R, TUN Y K, et al. A chance constrained based formulation for dynamic multiplexing of eMBB-URLLC traffics in 5G new radio[C]// 2019 International Conference on Information Networking. Piscataway: IEEE Press, 2019: 108-113.
- [60] ESSWIE A A, PEDERSEN K I. Opportunistic spatial preemptive scheduling for URLLC and eMBB coexistence in multi-user 5G networks[J]. IEEE Access, 2018(6): 38451-38463.
- [61] ALSENWI M, HONG C S. Resource scheduling of URLLC eMBB traffics in 5G new radio: a punctured scheduling approach[EB]. ResearchGate. (2018-06)[2020-06-08].
- [62] ANAND A, VECIANA G, SHAKKOTTAI S. Joint scheduling of URLLC and eMBB traffic in 5G wireless networks[C]// IEEE INFOCOM 2018 - IEEE Conference on Computer Communications. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1970-1978.
- [63] POPOVSKI P, TRILLINGSGAARD K F, SIMEONE O, et al. 5G wireless network slicing for eMBB, URLLC, and mMTC: a communication-theoretic view[J]. IEEE Access, 2018(6): 55765-55779.
- [64] 3GPP R1-166395. URLLC system capacity and URLLC eMBB multiplexing efficiency analysis[S]. (2016-08)[2020-06-08].
- [65] BUTTAZZO G C, BERTOIGNA M, YAO G. Limited preemptive scheduling for real-time systems: a survey[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2013, 9(1): 3-15.
- [66] 3GPP. CBG-based retransmission for eMBB: R1-1702990[S]. (2017-02) [2020-06-08].
- [67] KHOSRAVIRAD S R, MUDOLO L, PEDERSEN K I. Flexible multi-bit feedback design for HARQ operation of large-size data packets in 5G[C]// 2017 IEEE 85th Vehicular Technology Conference.

- Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-5.
- [68] YEO J, PARK S, OH J, et al. Partial retransmission scheme for HARQ enhancement in 5G wireless communications[C]// 2017 IEEE Globecom Workshops. Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-5.
- [69] 董园园, 张钰婕, 李华, 等. 面向 5G 的非正交多址接入技术[J]. 电信科学, 2019, 35(7): 27-36.
- DONG Y Y, ZHANG Y J, LI H, et al. Key technologies of non-orthogonal multiple access for 5G systems[J]. Telecommunications Science, 2019, 35(7): 27-36.
- [70] 王正强, 成冀, 樊自甫, 等. 非正交多址系统资源分配研究综述[J]. 电信科学, 2018, 34(8): 136-146.
- WANG Z Q, CHENG Q, FAN Z F, et al. A survey of resource allocation in non-orthogonal multiple access systems[J]. Telecommunications Science, 2018, 34(8): 136-146.
- [71] WANG Y, REN B, SUN S, et al. Analysis of non-orthogonal multiple access for 5G[J]. China Communications, 2016, 13(2): 52-66.
- [72] 徐彦卿. 面向超可靠无线通信的非正交多址技术研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
- XU Y Q. Non-orthogonal multiple access technology for ultra reliable wireless communications[D]. Beijing: Beijing Jiao Tong University, 2019.
- [73] DAI L, WANG B, DING Z, et al. A survey of non-orthogonal multiple access for 5G[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2018, 20(3): 2294-2323.
- [74] DING Z, LEI X, KARAGIANNIDIS G K, et al. A survey on non-orthogonal multiple access for 5G networks: research challenges and future trends[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2017, 35(10): 2181-2195.
- [75] SHAHAB M B, ABBAS R, SHIRVANIMOGHADDAM M, et al. Grant-free non-orthogonal multiple access for IoT: a survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials (Early Access), (2020-05-20)[2020-06-08]. doi: 10.1109/COMST.2020.2996032.
- [76] 3GPP. Multiuser superposition performance upper bound: R1-151918[S]. (2015-04)[2020-06-08].
- [77] HYTONEN V, LI Z, SORET B, et al. Coordinated multi-cell resource allocation for 5G ultra-reliable low latency communications[C]// 2017 European Conference on Networks and Communications (EuCNC). Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-5.
- [78] NIELSEN J, LIU R, POPOVSKI P. Ultra-reliable low latency communication (URLLC) using interface diversity[J]. IEEE Transactions on Communications, 2018, 66(3): 1322-1334.
- [79] PEDERSEN K I, POCOVI G, STEINER J, et al. Punctured scheduling for critical low latency data on a shared channel with mobile broadband[C]// 2017 IEEE 86th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall). Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-6.
- [80] REN H, PAN C, DENG Y, et al. Joint power and blocklength optimization for URLLC in a factory automation scenario[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2020, 19(3): 1786-1801.
- [81] POCOVI G, PEDERSEN K I, MOGENSEN P. Joint link adaptation and scheduling for 5G ultra-reliable low-latency communications[J]. IEEE Access, 2018(6): 28912-28922.
- [82] SAMARAKOON S, BENNIS M, SAAD W, et al. Distributed federated learning for ultra-reliable low-latency vehicular communications[J]. IEEE Transactions on Communications, 2020, 68(2): 1146-1159.
- [83] ESSWIE A A, PEDERSEN K I. Multi-user preemptive scheduling for critical low latency communications in 5G networks[C]// 2018 IEEE Symposium on Computers and Communications. Piscataway: IEEE Press, 2018: 136-141.
- [84] ESSWIE A A, PEDERSEN K I, MOGENSEN P E. Preemption-aware rank offloading scheduling for latency critical communications in 5G networks[C]// 2019 IEEE 89th Vehicular Technology Conference. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-6.
- [85] HOU Z, SHE C, LI Y, et al. Prediction and communication co-design for ultra-reliable and low-latency communications[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2020, 19(2): 1196-1209.
- [86] SHARIATMADARI H, IRAJI S, JANTTI R, et al. 5G control channel design for ultra-reliable low-latency communications[J]. arXiv Preprint, arXiv: 1803.04139, 2018.
- [87] MAHMOOD N H, KARIMI A, BERARDINELLI G, et al. On the resource utilization of multi-connectivity transmission for URLLC services in 5G new radio[C]// 2019 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshop. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-6.
- [88] SHE C, YANG C, QUEK T Q. Cross-layer optimization for ultra-reliable and low-latency radio access networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2018, 17(1): 127-141.
- [89] LI Z, UUSITALO M A, SHARIATMADARI H, et al. 5G URLLC: design challenges and system concepts[C]// 2018 International Symposium on Wireless Communication Systems. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-6.
- [90] SUN C, SHE C, YANG C. Exploiting multi-user diversity for ultra-reliable and low-latency communications[C]// 2017 IEEE Globecom Workshops. Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-6.
- [91] ELGABLI A, KHAN H, KROUKA M, et al. Reinforcement learning based scheduling algorithm for optimizing age of information in ultra-reliable low latency networks[C]// 2019 IEEE Symposium on Computers and Communications. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-6.
- [92] FEHRENBACH T, DATTAY R, GOKTEPE B, et al. URLLC services in 5G low latency enhancements for LTE[C]// IEEE 88th Vehicular Technology Conference. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-6.
- [93] ANAND A, VECIANA G. Resource allocation and HARQ optimization for URLLC traffic in 5G wireless networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2018, 36(11): 2411-2421.
- [94] LI C P, JIANG J, CHEN W, et al. 5G ultra-reliable and low-latency systems design[C]// 2017 European Conference on Networks and Communications. Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-5.
- [95] YOU L, LIAO Q, PAPPAS N, et al. Resource optimization with flexible numerology and frame structure for heterogeneous services[J]. IEEE Communications Letters, 2018, 22(12): 2579-2582.
- [96] DESTOUNIS A, PASCHOS G S, ARNAU J, et al. Scheduling URLLC users with reliable latency guarantees[C]// 2018 International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-8.
- [97] VU T K, LIU C F, BENNIS M, et al. Ultra-reliable and low latency communication in mmWave-enabled massive MIMO networks[J]. IEEE Communications Letters, 2017, 21(9): 2041-2044.
- [98] SORET B, MOGENSEN P, PEDERSEN K I, et al. Fundamental tradeoffs among reliability, latency and throughput in cellular networks[C]// 2014 IEEE Globecom Workshops. Piscataway: IEEE Press, 2014: 1391-1396.
- [99] BUCCHERI L, MANDELLI S, SAUR S, et al. Hybrid retransmission scheme for QoS-defined 5G ultra-reliable low-latency communica-

- tions[C]// 2018 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-6.
- [100] DEGHEL M, ELAYOUBI S E, GALINDO-SERRANO A, et al. Joint optimization of link adaptation and HARQ retransmissions for URLLC services[C]// 2018 International Conference on Telecommunications. Piscataway: IEEE Press, 2018: 21-26.
- [101] SHARIATMADARI H, LI Z, UUSITALO M A, et al. Link adaptation design for ultra-reliable communications[C]// 2016 IEEE International Conference on Communications. Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-5.
- [102] FAN J, YIN Q, LI G Y, et al. MCS selection for throughput improvement in downlink LTE systems[C]// 2011 Proceedings of 20th International Conference on Computer Communications and Networks. Piscataway: IEEE Press, 2011: 1-5.
- [103] SUN C, SHE C, YANG C, et al. Optimizing resource allocation in the short blocklength regime for ultra-reliable and low-latency communications[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2019, 18(1): 402-415.
- [104] SHE C, YANG C, QUEK T Q. Radio resource management for Ultra-reliable and low-latency communications[J]. IEEE Communications Magazine, 2017, 55(6): 72-78.
- [105] GURSOY M C. Throughput analysis of buffer-constrained wireless systems in the finite blocklength regime[C]// 2011 IEEE International Conference on Communications. Piscataway: IEEE Press, 2011: 1-5.
- [106] BENNIS M, DEBBAH M, POOR H V. Ultra-reliable and low-latency wireless communication: tail, risk and scale[J]. arXiv Preprint, arXiv: 1801.01270v2, 2018.
- [107] EKSTROM H. QoS control in the 3GPP evolved packet system[J]. IEEE Communications Magazine, 2009, 47(2): 76-83.
- [108] 廖媛媛. 面向低延时高可靠通信的无线资源预分配技术[D]. 成都: 电子科技大学, 2019.
- LIAO Y Y. Wireless resource pre-allocation technology for low delay and high reliability communication[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2019.
- [109] 3GPP. On URLLC design principles: R1-167061[S]. (2016-08) [2020-06-08].
- [110] RAO J, VRZIC S. Packet duplication for URLLC in 5G dual connectivity architecture[C]// 2018 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-6.
- [111] 3GPP. Multi-connectivity: TR 37.340[S]. (2019-06) [2020-06-08].
- [112] 3GPP. Evaluation on packet duplication in multi-connectivity: R2-1700172[S]. (2017-01-)[2020-06-08].
- [113] 3GPP. Data duplication in lower layers (HARQ): R2-1702032[S]. (2017-02)[2020-06-08].
- [114] AJAZ A. Packet duplication in dual connectivity enabled 5G wireless networks: overview and challenges[J]. IEEE Communications Standards Magazine, 2019, 3(3): 20-28.
- [115] RAO J, VRZIC S. Packet duplication for URLLC in 5G: architectural enhancements and performance analysis[J]. IEEE Network, 2018, 32(2): 32-40.
- [116] FERLIN S, KUCERAY S, GLAUSSENY H, et al. MPTCP meets FEC: supporting latency-sensitive applications over heterogeneous networks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2018, 26(5): 2005-2018.
- [117] 王毅, 廖晓菊, 潘泽友. 多路径传输控制协议技术综述[J]. 信息与电子工程, 2011, 9(1): 7-11.
- WANG Y, LIAO X J, PAN Z Y. An overview of multi-path transmission control protocol technology[J]. Information and Electronic Engineering, 2011, 9(1): 7-11.
- [118] 黄韬, 汪硕, 黄玉栋, 等. 确定性网络研究综述[J]. 通信学报, 2019, 40(6): 160-176.
- HUANG T, WANG S, HUANG Y D, et al. Survey of the deterministic network[J]. Journal on Communications, 2019, 40(6): 160-176.
- [119] KHOSHNEVISAN M, JOSEPH V, GUPTA P, et al. 5G industrial networks with CoMP for URLLC and time sensitive network architecture[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2019, 37(4): 947-959.
- [120] 左旭彤, 王莫为, 崔勇. 低时延网络: 架构、关键场景与研究展望[J]. 通信学报, 2019, 40(8): 22-35.
- ZUO X T, WANG M W, CUI Y. Low-latency networking: architecture, key scenarios and research prospect [J]. Journal on Communications, 2019, 40(8): 22-35.

[作者简介]



伏玉笋(1972-), 男, 甘肃天水人, 博士, 上海交通大学助理研究员, 主要研究方向为无线通信与系统、无线网联智能系统、工业互联网与安全、智能制造等。



杨根科(1963-), 男, 山西原平人, 博士, 上海交通大学教授, 主要研究方向为离散事件系统和混杂系统的建模、优化与控制。