



研究与开发

一种抵抗复杂干扰的工业物联网URLLC系统跨层设计方案

王祥¹, 赵佩仪², 曾琦¹, 钟俊¹, 张行¹, 苏静茹³

(1. 四川大学电气工程学院, 四川 成都 610040;

2. 四川大学匹兹堡学院, 四川 成都 610040;

3. 中国电子技术标准化研究院, 北京 100007)

摘要: 现有蜂窝5G/B5G高可靠低时延通信 (ultra-reliable and low latency communications, URLLC) 标准3GPP Release 17-18采用经典正交频分复用 (OFDM) 多载波波形传输, 因其工作在授权频带, 较少考虑URLLC-OFDM多载波传输抗干扰策略。未来工业物联网异构多服务质量 (quality of service, QoS) 业务大部分部署于非授权频带, 其无线通信链路变得复杂, 现有URLLC-OFDM波形无法完全为工业物联网信息传输提供高可靠性、低时延的苛刻要求。首先, 基于子载波可配置的OFDMA, 将鲁棒性更高的子载波跳频 (subcarrier frequency hopping, Sub-FH) 技术应用于OFDMA中 (即Sub-FH/OFDMA), 以提高信号传输可靠性。然后, 设计将Sub-FH/OFDMA波形融合到以微时隙为基本单位的调度策略中。该调度策略采用Hamming编码+微时隙结合的混合自动重传请求 (HARQ) 机制, 有效降低端到端传输的重传次数, 旨在提升节点传输的实时性。并推导了信息误码 (块) 率与重传次数的折中理论关系。仿真结果表明, 在面外部电磁干扰和内部多用户干扰时, 该方案能够保障物联网节点的稳定传输质量, 并在目标误块率为 10^{-5} 时实现毫秒级短数据包传输时延。通过波形设计和MAC时隙调度的跨层级设计, 为未来B5G/6G通信在复杂工业物联网场景中的实际应用提供了可行解决方案。

关键词: B5G/6G; 工业物联网; 高可靠低时延通信; 微时隙; Sub-FH/OFDMA; 混合自动重传请求

中图分类号: TN929.5

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2024219

An industrial Internet-of-things URLLC system via cross-layer design for anti-jamming

WANG Xiang¹, ZHAO Peiyi², ZENG Qi¹, ZHONG Jun¹, ZHANG Xing¹, SU Jingru³

1. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610040, China

2. Sichuan University-Pittsburgh Institute, Chengdu 610040, China

3. China Electronics Standardization Institute, Beijing 100007, China

Abstract: The classical OFDM multicarrier waveforms for transmission are adopted by the existing 5G/B5G URLLC

收稿日期: 2024-07-05; 修回日期: 2024-08-09

通信作者: 曾琦, qzeng1@hotmail.com

基金项目: 工业和信息化部物联网标准与应用重点实验室开放基金资助项目 (No.202303); 四川省科技计划项目 (No.2023NSFSC0480)

Foundation Items: Opening Foundation of Key Laboratory of IoT Standards and Applications, Ministry of Industry and Information Technology, China (No.202303), Sichuan Science and Technology Program (No.2023NSFSC0480)

standard (3GPP R17-18), and less attention is paid to the anti-interference strategy of URLLC-OFDM multicarrier transmission due to its operation in the licensed frequency band. In the future, unlicensed frequency bands will host most heterogeneous multi-QoS services for IIoT, resulting in complex wireless communication links. The stringent requirements of high reliability and low latency for IIoT information transmission can not be fully met by the existing URLLC-OFDM waveforms. Firstly, the more robust Sub-FH technique was applied to OFDMA based on subcarrier-configurable OFDMA (i.e., Sub-FH/OFDMA) to improve the signal transmission reliability. Additionally, the Sub-FH/OFDMA waveforms were incorporated into a scheduling strategy with mini-slots as the basic unit. Hamming coding + mini-slot hopping HARQ were utilized by this scheduling strategy to effectively reduce the amount of retransmissions, which aim to enhance the real-time transmission among IIoT nodes. The theoretical relationship between BER/BLER and transmission delay was derived and compromises were made. Simulation results demonstrate that the scheme can ensure stable transmission quality of IIoT nodes despite external electromagnetic interference and internal multi-user interference, achieving a transmission delay of milliseconds when the target BLER is 10^{-5} . A feasible solution for the future practical application of B5G/6G communication in complex IIoT scenarios is provided through the cross-layer design of waveform design and MAC slot scheduling in this paper.

Key words: B5G/6G, IIoT, URLLC, mini-slot, Sub-FH/OFDMA, HARQ

0 引言

URLLC 作为 5G/B5G 技术的关键特征之一,旨在严格的时延、可靠性要求下提供有效的数据交付,可为工业物联网(industrial Internet of things, IIoT)提供强大的通信支持,使得在 IIoT 场景下更好地实现设备互联、数据交换和智能控制,进而推动工业生产的数字化、自动化和智能化发展^[1-3]。随着未来工业物联网中海量节点、多业务、多服务质量(quality of service, QoS)应用的广泛部署,特别在面向非授权频段条件下,IIoT 通信组网中内部干扰和外在电磁干扰不断涌现,在恶劣条件下仍需保证 IIoT URLLC 的苛刻标准将是现有 URLLC 面临的技术挑战之一。

目前,针对 IIoT 中 URLLC 通信问题的讨论已做了大量研究^[4-9],大致可分为:新型帧结构设计、高效短编码、时频空域分集方案、边缘计算及动态切片等技术。文献[5-7]面向差异化的服务质量需求,采用基于深度学习的网络切片资源分配策略,从网络层角度有效实现时延敏感网络的高可靠传输;文献[8]针对具有时变特性的无线信道,采用物理层全连接(multi-connectivity, MC)技术及有

限块长(finite block length, FBL)传输机制提出新的可靠性度量标准,对可靠性和有效容量进行合理优化;文献[9]针对无小区大规模多输入多输出(cell-free massive MIMO)技术中的预编码方案,提出一种迭代优化的导频功率分配算法,以实现数据速率最大化。然而上述大多侧重于单层/单一技术研究,只能针对特定的问题或情况进行优化;相反,跨层级的联合技术优化方案具有更加全面、高效和灵活的优势,可以为不同应用场景和业务需求提供更好的支持和服务^[10-13]。

本课题组前期围绕 URLLC 信号与帧结构联合设计,获得了一种实现高可靠低时延需求的通信底层方案,但是该方案对上下行时隙调度进行了简化,没有考虑编码重传机制对时延的影响^[14]。受上述文献启发,本文基于存在复杂干扰环境的 IIoT 无线通信场景,通过可靠波形设计、上下行时隙编排、编码重传机制等跨层联合传输方案设计,改进已有 5G URLLC 通信体制,旨在实现 IIoT 复杂工况下节点之间的高可靠低时延通信。

正交频分复用(orthogonal frequency-division multiplexing, OFDM)^[13]是 5G 物理层基本信号传输方案。该技术在高速数据传输的同时,能



保证较高的频谱利用率和较好的抗多径能力。在实际 IIoT 场景下,传统 5G OFDMA 传输方案中部分工作频段会收到网内海量节点干扰和多种网外复杂电磁干扰,导致部分特定 URLLC 业务(节点)无法保证交付,亟须在传统的 OFDMA 传输方案上进行改进,以提高 IIoT 通信的抗干扰能力和可靠性^[14]。跳频(frequency hopping, FH)技术通过随机控制信号传输的工作频点,实现强大的抗干扰性能,在军事和民用通信领域均有广泛应用^[15-17]。因此,在复杂 IIoT 场景下,本文从 5G 标准可配置 OFDMA 波形出发,提出将 FH 融合到 OFDMA 子载波上(Sub-FH/OFDMA),在不改变 5G 体制前提下提升 B5G IIoT 通信网络的传输可靠性。

在已有的 FH/OFDM 系统研究中,仅考虑其抗干扰和传输误码率提升,未考虑该技术与时隙调度/规划的融合,以降低系统的空口时延。针对 URLLC 场景需求,第三代合作伙伴计划(3rd Generation Partnership Project, 3GPP) Release 15 标准提出微时隙(mini-slot)结构^[18]。与 4G-LTE 标准中以子帧为基本调度单元的空口帧结构相比,5G NR 以粒度更小的微时隙为 URLLC 业务的基本调度单元,极大限度缩短传输时间间隔(transmission time interval, TTI)。由于在 IIoT 中传输的信息数据量小、突发强的星零小数据包,使用 mini-slot 帧结构传输可更好地适配该类数据特点,文献[18]在 Sub-FH/OFDMA 信号基础上,设计 mini-slot 帧结构结合的混合自动重传请求(hybrid automatic repeat request, HARQ)机制,以实现点对点通信中低时延的可靠性增强调度方案。为了突出核心指标和简化分析,文献[18]HARQ 机制采用汉明编码和经典的等停式重传方式,但其他编码方式和重传方式同样适用于本文提出的跨层设计方案。总之,本文从波形设计和资源调度跨层角度综合了 Sub-FH/OFDMA 波形、mini-

slot 架构和 HARQ 机制的优势,旨在复杂工况 IIoT 更高可靠性的需求下提供低时延通信。

综上所述,本文主要研究内容如下。首先,基于 5G 可配置 OFDMA 波形构建符号级的 Sub-FH/OFDMA 传输模型,对其信号处理过程进行推导。之后,构建基于微时隙和汉明编码的重传机制,并与 Sub-FH/OFDMA 波形融合形成一种跨层 URLLC 传输方案,保证复杂干扰下 IIoT 通信的传输时延与可靠性性能。基于跨层的信号处理、判决变量推导以及微时隙的 HARQ 机制等,建立数据块成功传输的概率模型,得到传输可靠性(传输成功率)与重传次数(重传时延)之间的折中关系。最后仿真结果表明,相较于传统 5G OFDMA 传输方案,本文提出的 URLLC 方案具有更佳的抗干扰能力,并保证物联网各节点均衡一致的传输质量;通过子载波间隔和微时隙中符号数的灵活配置,可满足毫秒级传输时延需求。验证所提 PHY&MAC 跨层级传输方案在复杂 IIoT 场景下的有效性。

1 系统模型

1.1 Sub-FH/OFDMA 信号传输模型

在工业物联网的无线通信中,常采用 OFDM 信号作为基本的信号调制方案^[13]。OFDM 通过将高速数据流分成多个低速子载波并同时传输,可提供较高的数据传输速率和较好的抗信道衰落能力。然而,IIoT 中大规模节点接入与多 QoS 组网会带来复杂电磁干扰,从而影响 OFDM 信号的部分子频段,降低其传输的鲁棒性和可靠性。为增强复杂工业物联网环境中传输的稳定性,本文将子信道 FH 技术与 OFDM 技术融合,采用 Sub-FH/OFDMA 信号作为物理层的基本信号调制方案,Sub-FH/OFDMA 系统模型如图 1 所示。为方便分析,采用传统的二进制相移键控(binary phase shift keying, BPSK)的符号映射以及加性高斯白噪声(additive white Gaussian noise, AWGN)信道。

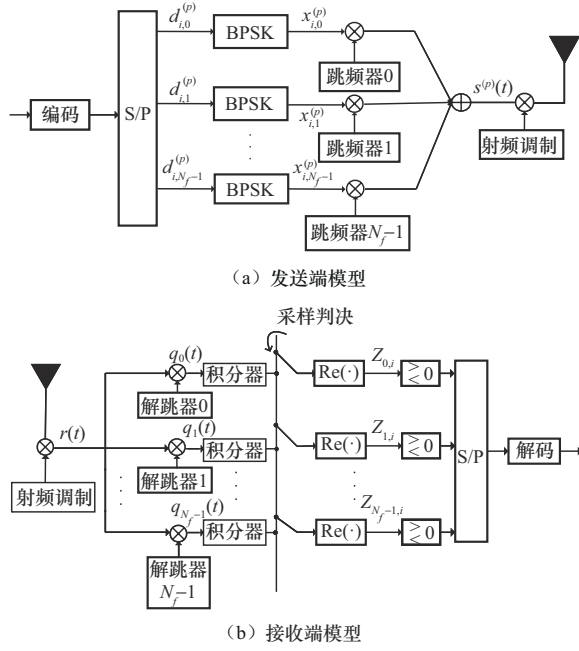


图1 Sub-FH/OFDMA 系统模型

假设该系统拥有 N_f 个子信道，其中每个子信道有 N_h 个跳频图案，即每个子信道对应 N_h 个具备一定频率间隔 f_d 的子载波。其发送端模型如图 1 (a) 所示，将用户 p 产生的高速串行比特流经编码后载入并行子信道中，其中 $\{d_{l,i}^{(p)}\}$ 表示在第 i 个比特间隔内用户 p 的第 l 个子信道上发送的比特序列；各个子信道经过 BPSK 调制后得到调制序列 $\{x_{l,i}^{(p)}\}$ ，其中 $x_{l,i}^{(p)} \in \{-1, 1\}$ ；之后各个子信道跳频等后求和，形成用户 p 的等效发射信号为：

$$s^{(p)}(t) = \sum_i \sum_{l=0}^{N_f-1} \sqrt{2P} d_{l,i}^{(p)} e^{j2\pi(f_i + c_{l,i} f_d)(t - iT_s)} P_{T_s}(t - iT_s) \quad (1)$$

其中， $f_l = lN_h f_d$ 表示第 l 个子信道的第一个子载波工作频率， T_s 为脉冲宽度， $\sqrt{2P}$ 为信号平均功率， $\{d_{l,i}^{(p)}\}$ 和 $\{c_{l,i}^{(p)}\}$ 分别为在第 i 个时间间隔内第 p 个用户在第 l 个子信道上发送的比特序列和用于跳频的伪随机序列，跳频频点序列 $\{c_{l,i}^{(p)}\}$ 中 $c_{l,i}^{(p)} \in \{1, 2, \dots, N_h\}$ 且对于不同的 l, i, p 独立同分布； $P_{T_s}(t)$ 则表示区间为 $[0, T_s]$ 的一个矩形脉冲函数。

经过 AWGN 信道后，在接收端， N_u 个用户复用信号可表示为：

$$r(t) = \sum_{k=1}^{N_u} s^{(p)}(t) + v(t) = \sum_{k=1}^{N_u} \sum_i \sum_{l=0}^{N_f-1} \sqrt{2P} d_{l,i}^{(p)} e^{j2\pi(f_i + c_{l,i} f_d)(t - iT_s)} P_{T_s}(t - iT_s) + v(t) \quad (2)$$

其中， $v(t)$ 为高斯白噪声，双边带功率谱密度为 $N_0/2$ 。以用户 1 在 $i=0$ 时刻的接收数据参考，假设接收端内解跳后与用户 1 发送端同步，则接收端经过解跳器 m 后可得解跳信号为：

$$q_m(t) = r(t) e^{-j2\pi(f_m + c_{m,0}^{(1)} f_d)t} = \sum_{k=1}^{N_u} \sum_{l=0}^{N_f-1} \sqrt{2P} d_{l,i}^{(p)} e^{-j2\pi(f_m + c_{m,0}^{(1)} f_d)t} + v(t) e^{-j2\pi(f_m + c_{m,0}^{(1)} f_d)t} \quad (3)$$

之后，解跳信号 $q_m(t)$ 通过相关解调器后得相关解调信号 Z_m ：

$$Z_m = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} q_m(t) dt = \overbrace{\frac{X_m}{d_m^{(1)} \sqrt{2P}} + \sum_{p=2}^{N_u} \frac{d_m^{(p)} \sqrt{2P}}{T_s} \int_0^{T_s} e^{j2\pi(c_{m,0}^{(p)} - c_{m,0}^{(1)}) f_d t} dt + \frac{v_m}{T_s} \int_0^{T_s} v(t) e^{j2\pi(c_{m,0}^{(p)} - c_{m,0}^{(1)}) f_d t} dt} \quad (4)$$

其中， X_m 为 $x_{l,0}^{(1)}$ 的简写形式，表示 $i=0$ 时刻相关解调得到第 1 个用户的传输比特信号； I_m 则表示多用户干扰部分，其表示在第 m 个子信道上 N_u-1 个用户干扰 $I_m^{(p)}$ 之和； v_m 表示服从均值为 0、方差为 $N_0 N_f / T_s$ 的高斯白噪声。

由式 (4) 可得子信道 m 的相关解调信号 $Z_m = X_m + I_m + v_m$ ，即由传输比特信号部分、多用户干扰部分及噪声部分组成。在 IIoT 场景下存在多个用户同时发送数据情况，多用户干扰 I_m 是导致可靠性降低的主要原因之一，其值由每个子信道的跳频策略决定。因此针对是否碰撞，其分析如下。

(1) 若第 1 个用户与第 p 个干扰用户在第 m 个子信道上未发生频点碰撞，即 $c_{m,0}^{(p)} \neq c_{m,0}^{(1)}$ ，则 $I^{(p)}$



中积分式：

$$\int_0^{T_s} e^{j2\pi(c_{m,0}^{(p)} - c_{m,0}^{(l)})f_d t} dt = 0, \text{ 即 } I_m^{(p)} = 0 \quad (5)$$

(2) 若用户 1 与干扰用户 p 在第 m 个子信道上发生频点碰撞，即 $c_{m,0}^{(p)} = c_{m,0}^{(l)}$ ，则有：

$$I_m^{(p)} = d_m^{(p)} \sqrt{2P} \quad (6)$$

经过子频带相关器 m 后，由于系统采用完全随机的跳频序列，每个干扰节点的跳频点与期望用户频点的碰撞概率可分析为 $p_{\text{hit}} = 1/N_h$ ，则不发生碰撞的概率为 $p_{\text{no-hit}} = 1 - 1/N_h$ ，对于存在 N_u 个用户的 Sub-FH/OFDMA 传输系统，在每个子频带中其主用户的频点发生碰撞的概率为：

$$p_{\text{hit},m} = 1 - \left(1 - \frac{1}{N_h}\right)^{N_u-1} \quad (7)$$

最后将相关解调信号 $\mathbf{Z}_m$ 送入判决器，BPSK 信号的判决规则为：

$$d_m^{(l)} = \begin{cases} 1, & \text{Re}\{\mathbf{Z}_m\} > 0 \\ 0, & \text{Re}\{\mathbf{Z}_m\} \leq 0 \end{cases} \quad (8)$$

1.2 基于微时隙调度的帧结构

在 LTE 中，固定子载波间隔为 15 kHz，一个无线帧可分为 10 个子帧，且每个子帧内固定包含 14 个 OFDM 符号，通常一个子帧又可分为 1 或 2 个时隙。在此结构下，调度周期通常为 1 ms，难以满足 URLLC 业务的时延需求。

因此，为克服帧结构的时延问题 5G NR 引入了一种称为微时隙 (mini-slot) 的更短时隙架构并支持更灵活的子载波间隔 (subcarrier space, SCS) [19]，即 $2^\mu \times 15 \text{ kHz}$, $\mu = 0, 1, 2, 3, 4$ 。一个微

时隙中通常仅有 $a \in \{1, 2, \dots, 7\}$ 个 OFDM 符号，从时间维度上明显缩短了传输粒度，同时 SCS 越大，OFDM 符号持续时间越小，即时间粒度越小，每个资源元素 (resource element, RE) 在微时隙调度结构下，具有更短传输时间，有利于对时延敏感的业务，因此 mini-slot 也作为 5G URLLC 业务的基本调度单位 [20]。5G NR 中时隙与微时隙结构如图 2 所示，微时隙技术为仅使用若干个 OFDM 符号组成的更小传输颗粒进行调度，因此更快实现上下行响应。例如当采用 SCS=30 kHz 且 $a = 2$ 时，基本调度单元持续时间仅为 0.036 ms，远小于 URLLC 业务对时延的约束需求。

同时，5G NR 引入了自包含 (self-contained) [21] 时隙设计，即在空口帧结构中的一个时隙配置周期 (Cycle) 内，可以同时包含上行、下行以及灵活调度符号。基于微时隙调度流程如图 3 所示，其时隙配置周期设置为 2 个微时隙，即负责上行数据传输的微时隙 (uplink mini-slot) 和负责下行的微时隙 (downlink mini-slot)。考虑工业物联网中通信场景的适应性，本文以时分双工 (time division duplexing, TDD) 网络为例研究基于微时隙的调度结构。图 3 所示在一个上行通信模型中，发送端在第 n 个时隙配置周期中发送短包数据 k ，接收端接收后在同一个时隙配置周期中回传 ACK/NACK 反馈。若发送端收到 ACK，则在下一个 Cycle 中立刻发送数据块 $k+1$ ；反之若发送端收到 NACK，即在下一个 Cycle 中再次传输数据块 k ，重复该过程，直到发射机接收到 ACK 信号或重传次数达上限 N 。相比 LTE 中固定空口帧结构，微

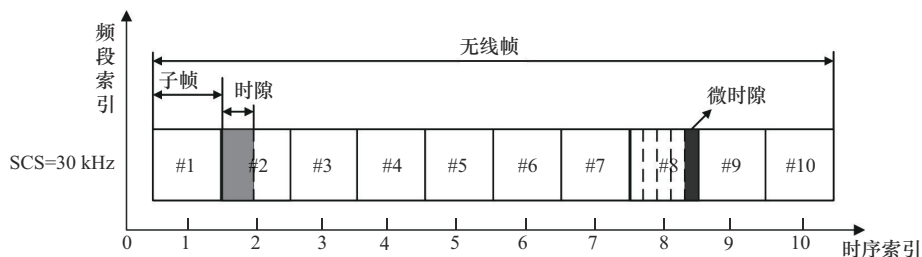


图2 5G NR 中时隙与微时隙结构

时隙架构具备更短的帧结构和灵活的配置, 可实现更快速、更高效的收发响应, 提高传输系统效率。为方便表示, 下文所提及上行 URLLC 传输方案均采用图 3 描述时隙调度结构。

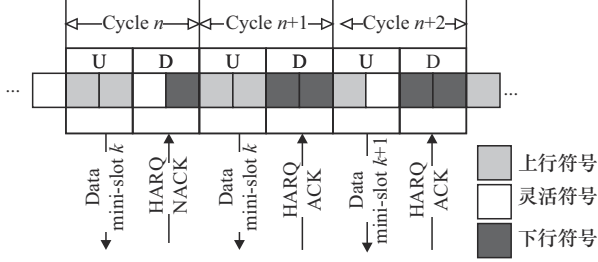


图3 基于微时隙调度流程

2 方案设计

2.1 基于微时隙的 Sub-FH/OFDMA 融合设计

为阐述所提 URLLC 系统中微时隙结构与 Sub-FH/OFDMA 的结合, 本节从该传输方案的时频资源分布描述。基于微时隙的 FH/OFDMA 系统时频资源分布如图 4 所示, 其中微时隙含有 $a=2$ 的 FH/OFDMA 符号, 上行/下行的微时隙调度方

案与图 2 相同。按照第 1.1 节波形设计方案, Sub-FH/OFDMA 通信系统中有 N_f 个子信道对应于 N_f 个不重叠的子频带, 且每个子频带中含有 N_h 个具备一定频率间隔 f_d 的子载波; 若 Cycle n 内时频资源全由用户 p 占用, 用户 p 的跳频序列集合 $\mathcal{C}^{(p)}$ 可表示为:

$$\mathcal{C}^{(p)} = \{c_1, c_2, \dots, c_{N_f}\} \quad (9)$$

$$c_l = [\dots, c_{l,i}^{(p)}, c_{l,i+1}^{(p)}, c_{l,i+2}^{(p)}, \dots] \quad (10)$$

其中, c_l 表示用户 p 的在子信道 l 上的跳频序列; $c_{l,i}^{(p)}$ 表示在 i 时刻, 用户 p 在子信道 l 上的跳频频点, 对于不同的 l, i, p , $c_{l,i}^{(p)}$ 相互独立且在 $[0, N_h-1]$ 内均匀同分布。图 3 中每个子信道的子载波频点按照各自的跳频序列 c_l 进行跳变, 由于每个子信道中含有 N_h 个频率间隔 f_d 的子载波, 则在 i 时刻用户 p 在子信道 l 上的频点的实际工作子载波频率 f_{li}^p 为:

$$f_{li}^p = (lN_h + c_{li}^{(p)})f_d = f_l + \Delta f \quad (11)$$

其中, $f_l = lN_h f_d$ 表示第 l 个子信道的第一个子载波

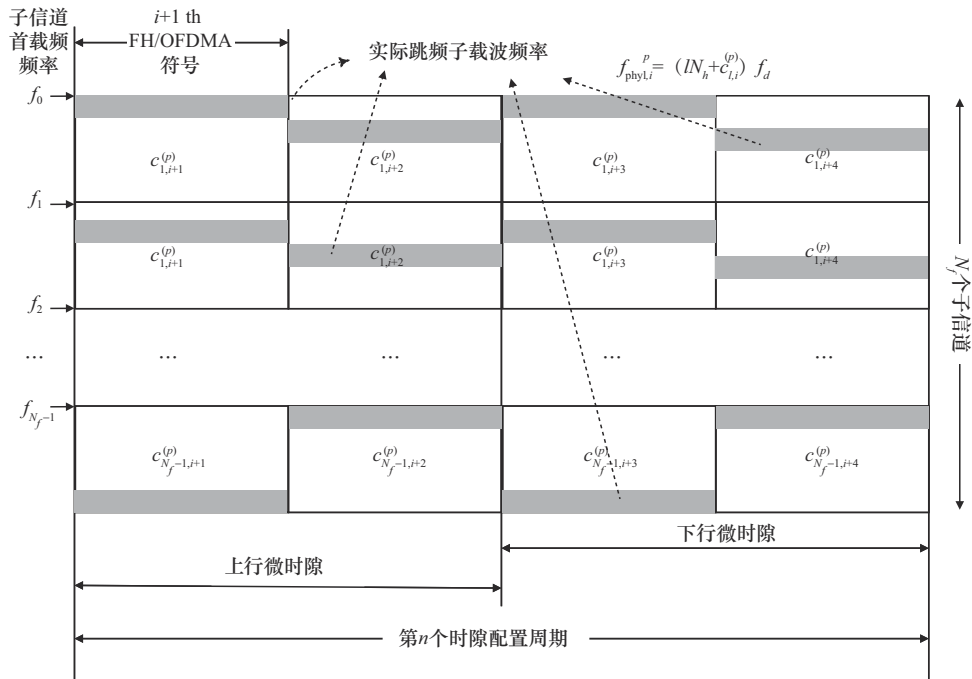


图4 基于微时隙的 Sub-FH/OFDMA 的时频资源分布



工作频率, $\Delta f = c_{li}^{(p)} f_d$ 表示受跳频频点 $c_{li}^{(p)}$ 控制的偏移频率。对于不同用户 p , 跳频序列集合中的每个频点生成方式也满足相互独立且均匀同分布。为方便表示, 本文定义“数据块”为一个微时隙内装载的传输数据, 后续章节均以此描述。

采用微时隙调度结构与 FH/OFDMA 信号的 $C^{(p)}$ 联合设计, 通过频域扩展与复用, 可适应工业物联网中节点数目的海量接入; 通过子载波跳频, 减少多用户干扰以及避开复杂工业环境中部分干扰频段, 有效提升传输系统可靠性; 通过微时隙调度结构, 又从时域角度有效缩短上下行响应速度, 达到更短传输时延, 增加系统时延敏感性。

2.2 基于汉明编码和微时隙调度与混合重传方案

在复杂工况下, 无线通信点对点的重传机制是 IIoT 具有满意传输可靠性的必有保障, 因此, 本节在第 2.1 节基础上, 设计一种基于

mini-slot 和汉明编码的混合重传方案。混合自动重传请求机制是基于前向纠错 (FEC) 和自动重传请求 (ARQ) 结合的错误控制机制^[22]。HARQ 主要依赖于介质访问控制 (medium access control, MAC) 层协议, 通过引入编码和重传策略, 通过编码技术实现校验和纠错步骤, 在发生传输错误时实现数据重传, 从而提高数据传输可靠性。

针对工业物联网短数据包通信场景, 本节建立基于 mini-slot 的混合重传机制中的纠错和重传机制, Sub-FH/OFDMA 信号下基于 mini-slot 和汉明编码的 HARQ 机制与流程 (上行数据传输) 如图 5 所示。为了分析方便, 本文采用汉明编码 (n, k) 和等停式 ARQ 的 HARQ^[23]。发送端将数据流通过 (n, k) 汉明编码 (图 5 中以 $(n, k) = (7, 4)$ 为例) 后, 每个 OFDM 符号包含 n 位比特形式装载数据, 并由 2 个 OFDM 符号 ($a = 2$ 的微时隙) 组成数据块 Data K 进行上行传输, 其中, 子载波颜色

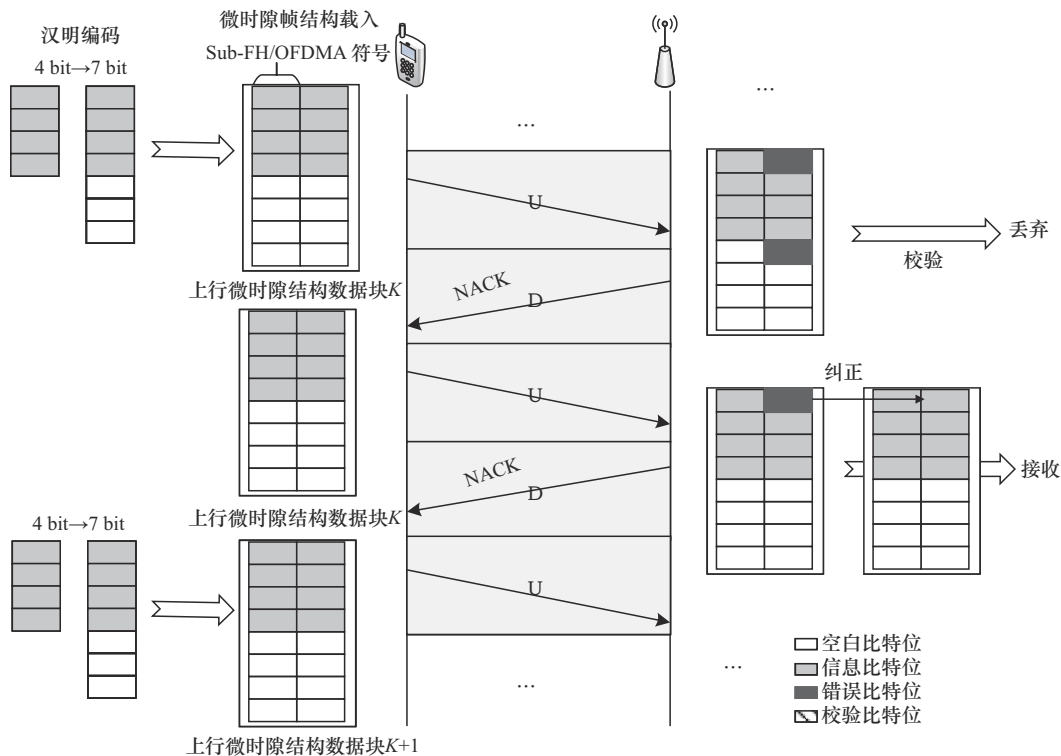


图5 Sub-FH/OFDMA 信号下基于 mini-slot 和汉明编码的 HARQ 机制与流程 (上行数据传输)

变化表示实际物理频点的跳变。忽略接收端和发送端节点的数据处理时延,接收端收到 Data K 后,先进行误码比特位校验,若校验失败,则在同一个时隙内的 D-mini-slot 中放入 NACK,要求发送端重传;当发送端收到 NACK 后,则在下一个时隙的 U-mini-slot 中重新发送 Data i ,重复该过程,直到发送端接收到 ACK 信号或重传次数达到上限 N 。

3 误块率-重传时延性能跨层级分析

误码率 (bit error rate, BER) 是一个衡量通信物理层可靠性的重要指标,而本文所提传输方案涉及 MAC 层的资源调度及时隙分配,采用误块率 (block error rate, BLER) 作为该系统的传输可靠性指标更能反映该系统的传输可靠性。因此本节将采用跨层级可靠性分析方案,从物理层角度分析和仿真该系统单次传输误码率,通过时频资源配置以及重传方式推导 MAC 层可靠性指标——BLER。之后根据最大允许重传次数与误块率的联系,建立重传时延 (重传次数) 与传输

可靠性的关系。

基于式 (4) ~ 式 (8), 可通过蒙特卡罗方法模拟统计出 Sub-FH/OFDMA 传输方案在微时隙架构下单次传输误码率性能 $P_{b_{\text{mini-slot}}}$ 。若采用图 3 和图 5 所示的微时隙帧结构、时隙调度和重传机制, 假设一个 mini-slot 由 $a \in \{1, 2, \dots, 7\}$ 个 OFDM 符号构成, 且一串 k 比特数据通过 (n, k) 汉明编码后, n 比特数据通过串/并变换放入 OFDM 并行的 N_f 个子信道中 ($N_f \geq n$), 则一个数据块内存在 $a(n-k)$ 位比特校验位, 则该数据块成功传输的概率为:

$$P_{\text{suc}} = \left[\left(1 - P_{b_{\text{mini-slot}}} \right)^n + k \left(1 - P_{b_{\text{mini-slot}}} \right)^{n-1} P_{b_{\text{mini-slot}}} \right]^a \quad (12)$$

若该数据块在第 n_{th} 次传输成功, 其概率为:

$$P_{n_{\text{th}}} = (1 - P_{\text{suc}})^{n_{\text{th}}-1} P_{\text{suc}} \quad (13)$$

其中, 一个数据块内传输可传输有效数据 ak 比特且各自 FH/OFDM 符号内可纠正一位错误。由此可得到在 N 次重传下, 该数据块传输成功率可达:

$$P_N = \sum_{m=1}^N P_{n_{\text{th}}} = 1 - (1 - P_{\text{suc}})^N = 1 - \left\{ 1 - \left[\left(1 - P_{b_{\text{mini-slot}}} \right)^n + k \left(1 - P_{b_{\text{mini-slot}}} \right)^{n-1} P_{b_{\text{mini-slot}}} \right]^a \right\}^N \quad (14)$$

则该系统在 N 次重传条件下的误块率可表示为:

$$P_{\text{BLER}} = 1 - P_N \quad (15)$$

若以数据块传输成功率为目标 (可靠性指标), 则所提 URLLC 方案的所需重传次数可以表示为:

$$N = \left\lceil \log_{(1-P_{\text{suc}})} (1 - P_N) \right\rceil \quad (16)$$

其中, $\lceil \cdot \rceil$ 表示向下取整。

对于图 3 所示时频资源结构, 一个 mini-slot 的 TTI 为 $T_{\text{mini-slot}}$, 通过 N 次重传后的传输时延为:

$$T_N = 2NT_{\text{mini-slot}} \quad (17)$$

其中, $T_{\text{mini-slot}}$ 由 SCS 的配置和 mini-slot 内 OFDM 符号个数决定, 如第 1.2 节所述。

由式 (17) 可知, 传输时延随重传次数呈线性关系, 因此本文采用重传次数作为该系统的传输时延指标, 并且采用误块率作为该系统的传输可靠性指标。之后通过式 (15) 和式 (16), 可建立本文所提 URLLC 方案中传输可靠性 (误块率) 与重传时延 (重传次数) 的折中关系。

4 仿真分析

4.1 仿真场景与参数设置

为了更好地体现本文所提 URLLC 方案的技术优势, 本节仿真测试场景与参数设置描述如下。配置 OFDM 符号 SCS 为 120 kHz。本文所提调度策略采用数据资源块内 OFDM 符号数 $a=2$



为例, 其表示一个 mini-slot 结构包含 $a=2$ 个 OFDM 符号, 且时隙调度周期设置为 2 个微时隙, 即一个 D-mini-slot 和一个 U-mini-slot。同理, 采用传统子帧结构为基本调度单元可采用 $a=7$ 表示。HARQ 策略采用 $(n,k)=(7,4)$ 汉明编码与等停式 ARQ 重传方式。为了展示所提系统抵抗恶劣电磁干扰工况的影响, URLLC 网络外设置一个信干比 (signal-jamming ratio, SJR) 为 0 的梳状干扰机, 即固定对每个子信道的首个子载波频段进行干扰。Sub-FH/OFDMA 系统 N_u 个节点的跳频策略 $\{C^p | p=1, 2, \dots, N_u\}$ 中每个频点 $c_{li}^{(p)}$ 生成方式满足相互独立且均匀同分布。值得注意的是, 上述系统参数、HARQ 方式、干扰机参数等可以灵活配置, 本文设计的跨层 URLLC 系统仍然适用, 其具体可靠性-时延性能关系通过本文的分析方法和仿真测试得到, 这里不再赘述。

本节仿真结果均采用 MATLAB 软件及蒙特卡洛方法统计得出。

4.2 仿真结果分析

为更好地评估所提传输方案在复杂 IIoT 背景下的传输性能, 本文将从以下几个方面进行对比。

(1) 传输误码率对比

存在外在干扰时, Sub-FH/OFDMA 与传统 OFDMA 传输方案误码率对比如图 6 所示, 主要针对以下 3 类系统性能进行对比: 传统 OFDMA (无跳频)、无重传 Sub-FH/OFDMA 以及本文所提传输方案。图 6 中可以看出, 传统 OFDMA 传输方案通过子载波固定分配实现不同用户节点接入, 当某个用户的固定子载波正好落入干扰机频段内, 则该用户传输性能“最差”(误码率最高); 反之, 当用户子载波与干扰机频段完全不同, 则该用户传输性能“最好”(误码率最低)。因此, 对于传统的基于固定频段分配的 OFDMA 系统, 多用户节点传输性能表现不均衡。

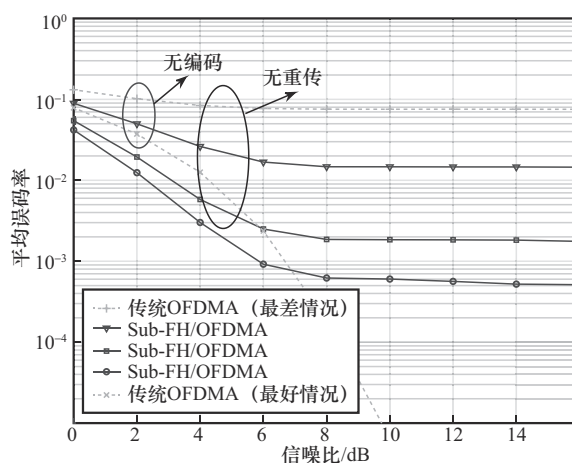


图6 Sub-FH/OFDMA 与传统 OFDMA 传输方案误码率对比

通过无编码且无重传的 3 条曲线对比, 由于 FH 技术将传输系统中条件最恶劣的信道对传输系统稳定性的影响进行随机化, 使所有传输节点的误码率得到均衡, 本文设计的 Sub-FH/OFDMA 传输方案的误码率方案介于“最好”与“最差”之间。同时, 通过无重传的 4 条曲线对比可知, 采用 (n,k) 汉明编码的 Sub-FH/OFDMA 传输方案误码率在低信噪比条件下甚至优于“最好”情况的典型 OFDMA 传输方案。这是由于采用编码后存在编码增益, 使误码率得到进一步下降; 在高信噪比时, 该传输方案受多用户干扰以及频域资源的限制, 随着信噪比增加会出现误码率“平台”现象。综上所述, 本文所提子载波 FH/OFDMA 传输方案保证所有用户具有均衡、可接受的误码率性能; 同时结合编码和 HARQ 的优势, 可进一步提升传输误码率性能。

(2) 传输误块率对比

不同重传次数 N 下误块率对比如图 7 所示。从图 7 中可以发现, 对于采用第 4.1 节的参数设置, 并分别设置该干扰机的信干比 $SJR=0$ 、 -1 、 1 dB 情况下, 其系统误块率均随着重传次数的增加而下降, 当 $SNR \geq 6$ 和重传次数 $N \geq 5$ 时, 所提系统可达 99.999% 的传输可靠性。然而随着传输次数的增加, 其完成数据可靠交付所需的传输时

延也会增加, 因此对于对传输时延有要求的业务而言, 应考虑适当的传输次数以及传输可靠性的关系, 该部分内容由下一小节验证。

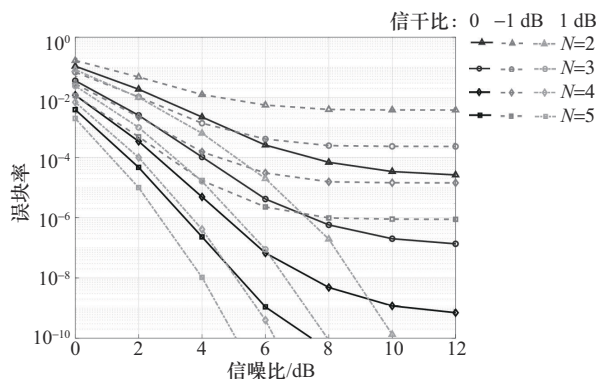


图7 不同重传次数 N 下误块率对比

此外, 由式 (13) ~ 式 (16) 可知, 其误块率与跳频频点数量 (N_h)、系统用户数 (N_u) 有关。不同跳频频点条件下误块率对比如图8所示, 在固定 $\text{SNR}=4$, 重传次数 $N=4$, 用户数 $N_u=4, 10, 20$ 条件下, 给出跳频频点数量与系统误块率的关系。由图8可知, 随着跳频频点增加, Sub-FH/OFDMA 传输方案的传输可靠性可明显提升。这是由于随着频点数增加, 用户受网内频点碰撞带来的多用户干扰和受网外干扰机干扰的概率更小, 可靠性可有效提升。然而IIoT一般具有较大节点数 N_u 和有限的频谱资源 (N_h 有限), 在满足时延需求的条件下, 也可增加重传次数以达到所需的传输可靠性。

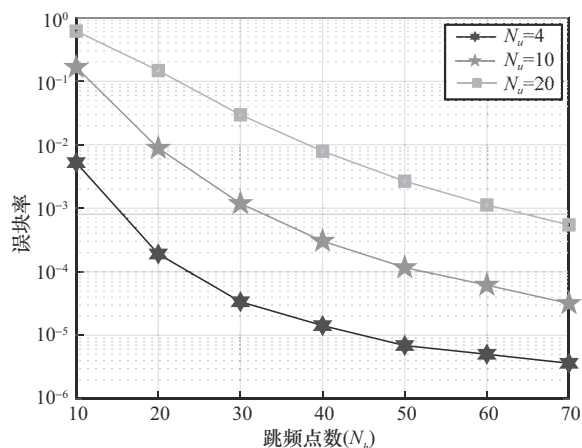


图8 不同跳频频点条件下误块率对比

(3) 重传次数对比

已有的蜂窝通信LTE体制采用子帧为基本调度单元的调度策略, 即一个子帧含有 $a = 7$ OFDM 符号; 在5G/B5G体制下, 基本调度单位 mini-slot 内 OFDM 符号数 a 灵活配置 (本节采用 $a = 2$) [19]。配置 $\text{SCS}=120 \text{ kHz}$ 时, $a=7$ 和 $a=2$ 对应的TTI分别为 0.125 ms 和 0.036 ms 。

本节根据文献[24]对传输时延 (重传次数) 进行仿真, 即传输固定 32 byte 数据量时, 测试本文设计系统是否可达毫秒级时延以及 99.999% 以上的传输可靠性。基于式 (17) 给出的基本调度单元 (mini-slot 或子帧) 重传时延, 可得 32 byte 数据的最大传输时间 (时延) 为:

$$T_{N_total} = 2n_{bl}NT_{\text{mini-slot}} \quad (18)$$

其中, n_{bl} 表示 32 byte 数据被划分为基本调度单元 (mini-slot 或子帧) 的个数。

本文所提调度策略与传统子帧结构调度策略的重传次数对比 (系统用户数 $N_u=4$) 见表1, 本文所提调度策略与传统子帧结构调度策略的重传次数对比 (系统用户数 $N_u=10$) 见表2, 呈现了低信噪比 (即 $\text{SNR} = 0, 4, 8$) 及不同传输可靠性需求 (即 99.9%、99.99%、99.999%) 条件下, 所提 Sub-FH/OFDMA 传输方案在 mini-slot 和子帧调度策略中所需重传次数与传输可靠性之间的关系 (表1中 $N_u=4$, 表2中 $N_u=10$)。同时, 根据式 (18) 给出了最大传输时延 (ms)。

表1和表2所示, 在低信噪比条件下, 增加重传次数也可以完成不同可靠性要求的传输, 且数据块内 OFDMA 符号数量较少时需要更少的重传次数, 这是由于基本调度单元内更少数据量更有利于汉明编码的纠错, 有效减少重传次数和传输时间。与子帧调度策略相比, 本文所提传输方案的最大传输时延平均降低近 50%, 且在低信噪比和多用户数条件下, 更容易达到毫秒级的端到端传输时延以及 99.999% 传输可靠性。

表1 本文所提调度策略与传统子帧结构调度策略的重传次数对比(系统用户数 $N_u=4$)

信噪比/dB	数据块内 OFDM 符号数	99.9%	99.99%	99.999%
		重传次数 N (固定字节数据的最大传输时间/ms)		
0	$a=7$	>10(>15.00)	>10(>15.00)	>10(>15.00)
	$a=2$	5(6.84)	7(9.58)	8(10.95)
4	$a=7$	4(6.00)	6(9.00)	8(12.00)
	$a=2$	2(2.74)	3(4.10)	4(5.47)
8	$a=7$	3(4.50)	5(7.50)	6(9.00)
	$a=2$	2(2.74)	3(4.10)	3(4.10)

表2 本文所提调度策略与传统子帧结构调度策略的重传次数对比(系统用户数 $N_u=10$)

信噪比/dB	数据块内 OFDM 符号数	99.9%	99.99%	99.999%
		重传次数 N (固定字节数据的最大传输时间/ms)		
0	$a=7$	>10(>15.00)	>10(>15.00)	>10(>15.00)
	$a=2$	>10(>15.00)	>10(>15.00)	>10(>15.00)
4	$a=7$	10(15.00)	>10(>15.00)	>10(>15.00)
	$a=2$	4(5.47)	5(6.84)	6(8.21)
8	$a=7$	6(9.00)	8(12.00)	10(15.00)
	$a=2$	3(4.10)	4(5.47)	5(6.84)

综上所述,在存在干扰的IIoT背景下,本文所提跨层联合优化的传输方案,可实现多用户节点同时接入,且满足毫秒级的端到端传输时延以及99.999%传输可靠性的URLLC业务数据交付要求,在传输可靠性和传输时延上有较好性能。相比采用传统子帧调度的FH/OFDM系统,本文所提无线传输方案在保证多节点接入IIoT场景下具备一定的优越性。

5 结束语

未来IIoT通信网络中,传输节点的海量接入以及网络异构化必将导致电磁环境复杂化,对实时交互造成严重影响,传统授权频带5G OFDMA方案难以保证其传输性能。本文通过跳频技术、编码技术以及资源调度等跨物理层及媒体接入层级技术的结合,设计出适应复杂IIoT工况的URLLC业务传输方案。

首先,基于5G在载波可配置OFDMA技术,在OFDMA子载波上使用跳频技术(Sub-FH/OFDMA),提高在多用户及干扰存在背景下数据传输可靠性;其次,针对IIoT中零星短数据包业务,以5G标准中微时隙调度为灵感,提出融合Sub-FH/OFDMA信号与汉明编码的HARQ传输策略,即采用基于微时隙的帧结构作为基本调度单元,降低IIoT端对端传输时延;之后,通过跨层级的信号处理过程,推导出传输误码率/误块率和端到端重传次数之间的制约关系。仿真结果表明,在存在外在干扰机和组网多用户干扰的IIoT场景下,若配置适当跳频频点数量、子载波间隔、微时隙符号数,该URLLC方案可达到99.999%可靠性以及毫秒级时延的传输要求。并且对于复杂工业物联网中不同的业务QoS等级需求,可对上述参数采用灵活配置,满足多种业务的实际传输需求。

为了更好地继承现有 5G 标准以及其在 IIoT 应用, 本文从物理层改进 OFDMA 信号处理和媒体接入层的时隙设计、重传机制设计等方面, 为复杂工业物联网中 URLLC 业务的实现提供了一种有效的、可行的解决方案。在后续工作中, 可在该传输方案中结合性能更优的多载波技术 (FBMC、OTFS)^[25-26]、非正交多址接入技术^[27]、新型重传机制^[28]对该方案传输可靠性、频谱效率、系统容量、传输时延等方面作进一步提升。

参考文献:

- [1] YU D, LI W, XU H, et al. Low reliable and low latency communications for mission critical distributed industrial internet of things[J]. IEEE Communications Letters, 2021, 25(1): 313-317.
- [2] ABDULRAHMAN Y. The internet of things(IoT), intelligent connectivity: AI, IoT, and 5G[M]. Piscataway: IEEE Press, 2022: 41-66.
- [3] 伏玉笋, 唐金辉. 使能未来工厂的 5G 能力综述[J]. 电信科学, 2022, 38(9): 18-35.
FU Y S, TANG J H. A survey on 5G capabilities enabling the factories of the future[J]. Telecommunications Science, 2022, 38(9): 18-35.
- [4] 汪晗, 刁磊, 王梦玲, 等. 工业物联网中 URLLC 的关键问题分析[J]. 电信科学, 2022, 38(S1): 77-92.
WANG H, DIAO L, WANG M L, et al. A survey of key issues of URLLC in industrial internet of things[J]. Telecommunications Science, 2022, 38(S1): 77-92.
- [5] 贾海宇, 陈佳, 王铭鑫. 无线接入网络中网络功能虚拟化研究综述[J]. 电信科学, 2019, 35(1): 97-112.
JIA H Y, CHEN J, WANG M X. Survey on network function virtualization in RAN[J]. Telecommunications Science, 2019, 35(1): 97-112.
- [6] 王再见, 谷慧敏. 基于联合优化的网络切片资源分配策略[J]. 通信学报, 2023, 44(5): 234-245.
WANG Z J, GU H M. Network slicing resource allocation strategy based on joint optimization[J]. Journal on Communications, 2023, 44(5): 234-245.
- [7] 管婉青, 刘诺言, 李卫, 等. 面向工业时敏业务的 5G TSN 融合网络切片资源调度[J]. 电信科学, 2024, 40(3): 53-63.
GUAN W Q, LIU N Y, LI W, et al. Slice scheduling for industrial time-critical services in 5G TSN integration network[J]. Telecommunications Science, 2024, 40(3): 53-63.
- [8] MUHAMMAD I, ALVES H, MAHMOOD N H, et al. Mission effective capacity—a novel dependability metric: a study case of multiconnectivity-enabled URLLC for IIoT[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2022, 18(6): 4180-4188.
- [9] PENG Q, REN H, PAN C, et al. Resource allocation for cell-free massive MIMO-enabled URLLC downlink systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2023, 72(6): 7669-7684.
- [10] JI H, PARK S, YEO J, et al. Ultra-reliable and low-latency communications in 5G downlink: physical layer aspects[J]. IEEE Wireless Communications, 2018, 25(3): 124-130.
- [11] WANG Y, CHEN W, POOR H V. Ultra-reliable and low-latency wireless communications in the high SNR regime: a cross-layer tradeoff[J]. IEEE Transactions on Communications, 2022, 70(1): 149-162.
- [12] WANG M, LIU J, CHEN W, et al. Joint queue-aware and channel-aware delay optimal scheduling of arbitrarily bursty traffic over multi-state time-varying channels[J]. IEEE Transactions on Communications, 2019, 67(1): 503-517.
- [13] YLI-KAAKINEN J, LOULOU A, LEVANEN T, et al. Frequency-domain signal processing for spectrally-enhanced CP-OFDM waveforms in 5G new radio[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2021, 20(10): 6867-6883.
- [14] ZHANG Y, WANG W, XIE H, et al. Wireless multi-node uRLLC B5G/6G networks for critical services in electrical power systems[J]. Energies, 2022, 15(24): 9437.
- [15] MAIER M, EBRAHIMZADEH A. Towards immersive tactile Internet experiences: low-latency FiWi enhanced mobile networks with edge intelligence[Invited] [J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2019, 11(4): B10-B25.
- [16] XIA S, HAN X, YAN X, et al. Uplink control channel design for 5G ultra-low latency communication[C]//Proceedings of the 2016 IEEE 27th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC). Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-6.
- [17] SAPONARA S, GIANNETTI F, NERI B, et al. Exploiting mm-wave communications to boost the performance of industrial wireless networks[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017, 13(3): 1460-1470.
- [18] KUMARI S, SINGH B. 5G standard : the next generation wireless communication system[J]. Journal of Interdisciplinary Mathematics, 2020, 23(1): 275-283.
- [19] MEMISOGLU E, KIHIERO A B, BASAR E, et al. Guard band reduction for 5G and beyond multiple numerologies[J]. IEEE



- Communications Letters, 2020, 24(3): 644-647.
- [20] DURISI G, KOCH T, POPOVSKI P. Toward massive, ultrareliable, and low-latency wireless communication with short packets[J]. Proceedings of the IEEE, 2016, 104(9): 1711-1726.
- [21] 杨一帆, 姚键, 吴祖辉, 等. 面向5G URLLC业务的时延分析与无线超低时延技术研究[J]. 电信工程技术与标准化, 2021, 34(2): 10-15.
- YANG Y F, YAO J, WU Z H, et al. Latency analysis for 5G URLLC service and research on ultra-low latency technology in wireless network[J]. Telecom Engineering Technics and Standardization, 2021, 34(2): 10-15.
- [22] 谢大雄. 移动宽带技术: LTE[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2012.
- XIE D X. Mobile broadband technology: LTE[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2012.
- [23] SEUNGJOO H, JAEWOO S, DAEHYOUNG H. Transmission delay analysis of HARQ-ARQ interaction mechanisms for IEEE 802.16m systems[C]//Proceedings of the 2012 18th Asia-Pacific Conference on Communications (APCC). Piscataway: IEEE Press, 2012: 59-60.
- [24] 3GPP. Study on New Radio (NR) access technology (Release 15), v15.0.0, TR38.912[S]. 2018.
- [25] NISSEL R, SCHWARZ S, RUPP M. Filter bank multicarrier modulation schemes for future mobile communications[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2017, 35(8): 1768-1782.
- [26] RAVITEJA P, PHAN K T, HONG Y, et al. Interference cancellation and iterative detection for orthogonal time frequency space modulation[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2018, 17(10): 6501-6515.
- [27] 曾琦, 钟俊, 刘星. 面向异构多层多小区的多级服务质量跳频稀疏码分多址通信系统[J]. 电子与信息学报, 2022, 44(9): 2977-2985.
- ZENG Q, ZHONG J, LIU X. Sparse code multiple access communication networks based on multi-level quality-of-service frequency-hopping for heterogeneous multi-tier multi-cell[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2022, 44(9): 2977-2985.

- [28] NADEEM F, SHIRVANIMOGHADDAM M, LI Y, et al. Non-orthogonal HARQ for URLLC: design and analysis[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(24): 17596-17610.

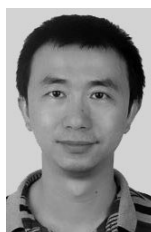
[作者简介]



王祥 (1999-), 男, 四川大学电气工程学院硕士生, 主要研究方向为 URLLC 通信、物联网通信。



赵佩仪 (2004-), 女, 四川大学匹兹堡学院在读, 主要研究方向为计算机网络、物联网信息技术。



曾琦 (1982-), 男, 博士, 四川大学电气工程学院副教授、硕士生导师, 主要研究方向为 B5/6G 技术、物联网通信等。

钟俊 (1972-), 男, 博士, 四川大学电气工程学院副教授、硕士生导师, 主要研究方向为物联网通信与信号处理、电力信号处理。

张行 (1973-), 男, 博士, 四川大学电气工程学院副教授, 主要研究方向为电力物联网、电工电子新技术、嵌入式硬件等。

苏静茹 (1989-), 女, 中国电子技术标准化研究院工程师, 主要研究方向为物联网标准化与检测。