

基于峰值信息年龄违背概率的双模通信计量网络 确定性时延性能优化研究

陈智雄^{1,2,3}, 颜宇豪¹, 周振宇^{2,3}

(1. 华北电力大学电子与通信工程系, 河北保定 071003; 2. 华北电力大学河北省电力物联网技术重点实验室, 河北保定 071003;
3. 华北电力大学电力物联智慧化技术河北省工程研究中心, 河北保定 071003)

摘 要: 基于电力线通信(Power Line Communication, PLC)和无线通信的双模通信技术兼具覆盖广、可靠性高与接入灵活等优势,可显著提升数据传输的可靠性、速率与时延等性能,在计量网络通信等场景中受到广泛关注. 但是实际应用中,双模媒体接入控制(Media Access Control, MAC)算法、突发业务流量以及混合信道衰落等算法及参数都会影响计量网络的时延等性能,使得系统时延边界性能的理论分析和计算面临较大挑战. 为解决双模双媒质多参数条件下确定性时延分析难题,提出了一种基于峰值信息年龄违背概率(Peak Age of information Violation Probability, PAVP)的双模通信网络确定性时延性能计算和优化方法,为计量网络的时效性保障提供新思路. 首先,针对计量网络周期业务与突发业务共存的特点,建立联合突发流量和周期流量的混合到达模型,接着考虑双模信道混合衰落、基于超帧的 MAC 层混合接入算法和业务优先级构建跨层服务模型. 在此基础上,利用随机网络演算(Stochastic Network Calculus, SNC)理论,基于矩生成函数(Moment Generating Function, MGF)和最大加代数推导了双模通信网络 PAVP 的理论上限,实现对随机到达与随机服务系统的时延边界性能的计算和分析. 考虑队列稳定性和功率约束条件,建立连续数据包的功率优化模型,并利用李雅普诺夫算法将时间平均优化问题转换为与当前时隙队列和峰值信息年龄(Peak Age of Information, PAoI)相关的实时优化问题,从而实现节点和信道发射功率的动态优化分配. 最后,通过系统仿真分析采样周期、混合流量强度、设备数量、PAoI 阈值以及 MAC 竞争窗口等关键环节和参数对系统时延边界性能的影响. 结果表明,混合流量条件下存在最优采样周期使系统时延边界性能达到最优;当双模节点数量超过 20 个时,MAC 层接入算法成为时延性能主要影响因素;对比单模通信和双模固定参数条件,基于李雅普诺夫算法的功率优化能够进一步提升系统时延边界性能,提升数据传输实时性. 相关结论为双模通信在智能计量网络的工程应用提供了理论基础和技术参考.

关键词: 双模通信; 中继系统; 信息年龄; 随机网络演算; 李雅普诺夫优化

基金项目: 国家自然科学基金(No.61601182); 中央高校科研业务费专项资金(No.2023MS113)

中图分类号: TN91; TM73 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2025)12-4394-14

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20250501

Research on Deterministic Delay Performance Optimization of Dual-Mode Communication Metering Network Based on Peak AoI Violation Probability

CHEN Zhi-xiong^{1,2,3}, YAN Yu-hao¹, ZHOU Zhen-yu^{2,3}

(1. Department of Electronic and Communication Engineering, North China Electric Power University, Baoding, Hebei 071003, China;

2. Hebei Key Laboratory of Power Internet of Things Technology, North China Electric Power University, Baoding, Hebei 071003, China;

3. Hebei Engineering Research Center of Intelligent Technology for Power Internet of Things, North China Electric Power University,

Baoding, Hebei 071003, China)

Abstract: Dual-mode communication technology, based on both power line communication (PLC) and wireless communication, offers advantages such as extensive coverage, high reliability, and flexible access. It can significantly enhance the reliability, rate, and latency of data transmission, garnering considerable attention in scenarios such as metering network communications. However, in practical applications, factors such as dual-mode media access control (MAC) algorithms,

burst traffic, and hybrid channel fading significantly impact the latency and other performance characteristics of metering networks. This poses considerable challenges for the theoretical analysis and computation of system latency boundary performance. To address the challenge of deterministic delay analysis under dual-mode, dual-medium, multi-parameter conditions, this paper proposes a deterministic delay performance calculation and optimization method for dual-mode communication networks based on peak age of information violation probability (PAVP). This offers a novel approach to ensuring timeliness in metrology networks. First, addressing the coexistence of periodic and burst traffic in metrology networks, a hybrid arrival model combining burst and periodic flows is established. Subsequently, a cross-layer service model is constructed considering dual-mode channel hybrid fading, superframe-based MAC layer hybrid access algorithms, and traffic prioritization. Building upon this foundation, stochastic network calculus (SNC) theory is employed to derive the theoretical upper bound for PAVP in dual-mode communication networks. This is achieved through moment generating functions (MGF) and maximum addition algebra, enabling the calculation and analysis of delay bound performance for systems with random arrivals and random services. Considering queue stability and power constraints, a power optimization model for continuous packets is established. The Lyapunov algorithm transforms the time-averaged optimization problem into a real-time optimization problem related to the current time slot queue and peak age of information (PAoI), thereby achieving dynamic optimization allocation of node and channel transmission power. Finally, system simulations analyze the impact of key parameters—including sampling period, mixed traffic intensity, device count, PAoI threshold, and MAC contention window—on delay bound performance. Results indicate an optimal sampling period exists under mixed traffic conditions to maximize delay bound performance. When dual-mode nodes exceed 20, the MAC layer access algorithm becomes the primary determinant of delay performance. Compared to single-mode communication and dual-mode fixed-parameter conditions, power optimization based on the Lyapunov algorithm further enhances the system's delay boundary performance, improving data transmission real-time capability. These findings provide a theoretical foundation and technical reference for the engineering application of dual-mode communication in smart metering networks.

Key words: dual-mode communication; relay system; age of information; stochastic network calculus; Lyapunov optimal

Foundation Item(s): National Natural Science Foundation of China (No.61601182); Special Fund for Scientific Research Funds of Central Universities (No.2023MS113)

1 引言

新型电力系统具有全面可观、可测、可控的特点,为了满足分布式电源、新型储能以及新能源的大规模接入,需要提升电力系统的接入和感知能力^[1]。计量网络作为新型电力系统的重要组成部分,承担着低压用电信息采集、高效共享、实时监控的重要任务。因此,为了新型电力系统高效运转和快速发展,计量网络需要同步升级。近年来,双模通信被认为是提升计量网络传输能力和增强业务承载能力的有效技术。

计量网络采用双模通信技术增加业务可用带宽,保证业务实时性。双模通信技术将电力线通信与无线通信结合,能够进行双通道自动融合组网,组网更加灵活,实现两种通信方式的优势互补,并且双模通信实现台区设备的可靠接入,支撑对电源、电网、负荷等系统侧设备的全景监测与实时感知。Stiri 等人^[2]针对结合电力线通信与长距离无线电(Long Range radio, LoRa)广域网技术的双模通信计量网络进行了吞吐量分析,并且提出了平衡吞吐量和成本的方案。Samir 等人^[3]分析了双跳双模通信系统的中断概率和遍历容量性能。De 等人^[4]针对电力线与无线混合通信系统分析了中继节

点位置对传输速率的影响。Filomeno 等人^[5]分析了混合电力线无线通信系统的最小化平均误码率。Xu 等人^[6]针对采用高速电力线载波和高速射频的双模通信的电力物联网,在代理协调器(Proxy Co-Ordinator, PCO)和终端载波设备(STA, STA)之间添加备用路径,降低了数据包的传输时延。任毅等人^[7]提出了分钟级采集优化方案,采用数据预存和 1-坚持型载波侦听多路访问(Carrier Sense Multiple Access, CSMA)等技术,降低了各个设备节点间的时延。Chen 等人^[8]设计了电力线无线双连接通信的接入方案,并进行了时延性能分析。Chen 等人^[9]设计了可同时竞争电力线与无线信道的混合通信媒体接入控制(Media Access Control, MAC)协议,并且分析了双模通信系统的传输时延。

然而,传统的时延指标只关注单个数据包的传输时延,并没有充分考虑到数据包更新频率对信息新鲜度的影响。并且随着新型电力系统的发展,传统的时延指标不能很好地反映数据的时效性,为了衡量数据的新鲜度和及时性,信息年龄^[10](Age of Information, AoI)被提出作为一个新的度量标准。AoI 不仅考虑了更新数据的传输时间,还考虑了队列中的等待时间和接收后的停留时间,AoI 的广泛应用有效地解决了数据包传输

中排队时延对信息及时性的影响^[11-13]. AoI的一个变体概念,称为峰值信息年龄(Peak Age of Information, PAoI),在文献[14]中被引入,它提供了每次更新接收之前的最大AoI的信息. Akbari等人^[15]研究了由源、中继和目的地组成的随机接入中继网络中的PAoI. Asvadi等人^[16]研究了基于混合自动重传请求(Automatic Repeat reQuest, ARQ)的无线链路中的PAoI. Liu等人^[17]研究了更新数据包根据随机过程生成的物联网网络的PAoI. Han等人^[18]研究了具有周期性状态更新和状态依赖Aloha算法的物联网的PAoI. 这些关于PAoI的研究对网络系统性能的提升有所帮助,但双模场景面临信道选择、资源分配和业务调度等问题,目前鲜有针对双模信道多维复杂参数下的PAoI理论分析,并且物理层与MAC层跨层因素对PAoI的影响机理研究也较少. 本文基于随机网络演算建立了业务流量模型、跨层服务模型和PAoI违背概率计算模型,通过理论分析与优化有效度量了双模场景下信息时效性问题,为网络实时监测提供新思路.

另外,针对信息年龄的优化问题也受到了广泛关注. Cao等人^[19]针对非凸PAoI优化问题,在满足干扰阈值和可行性约束的条件下,采用一种高效的连续凸逼近迭代算法求解最优解. Feng等人^[20]采用深度确定性策略梯度解决高维变量非凸的问题,降低平均峰值信息年龄. Cao等人^[21]提出了一种低复杂度的JBUO算法来最小化PAoI和时延的加权和. He等人^[22]引入决策后状态与深度强化学习相结合对在线AoI最小化问题进行了求解. 上述文献对优化问题中的队列稳定性等关键细节研究尚不充分. 为此,本文引入Lyapunov优化理论,以更深入地分析该问题. Lyapunov优化将原始的时间平均优化问题转换为与当前时隙中涉及的队列大小和AoI相关的实时优化问题序列.

针对基于双模通信的计量网络场景,本文主要的研究工作如下:

(1)搭建峰值信息年龄违背概率计算框架,求解峰值信息年龄违背概率的上界,基于随机网络演算理论分析峰值信息年龄组成环节,建立突发流量和周期流量混合的业务到达模型,构建考虑双模物理层衰落及噪声和载波侦听多路访问/时分多址(Carrier Sense Multiple Access/ Time Division Multiple Access, CSMA/TDMA)混合接入算法的服务模型.

(2)提出了基于Lyapunov优化算法的峰值信息年龄违背概率优化算法,利用Lyapunov优化将多时隙随机优化问题转化为每个时隙的确定性优化问题.

(3)进行仿真实验验证所提框架的有效性. 本文对所考虑的峰值信息年龄违背概率计算框架进行了仿真,通过对比理论推导上界与仿真数据,验证所提算法

的有效性.

2 系统模型

图1展示了计量通信网络的系统模型架构. 计量网络采用多层级树形拓扑结构,以中央协调器(Central COordinator, CCO)为核心节点,通过PCO作为中继代理,实现与终端载波设备的层级连接. 系统中所有设备均配备电力线-无线双模通信模块,支持异构网络间的混合通信. 其中PCO节点具备双重通信能力:既可直接与单个STA建立点对点连接,也可通过中继机制实现跨区域多STA通信. 如图1所示, S_1, S_2, \dots, S_c 表示接入PCO₁的 c 个区域,区域中包含 m 个STA节点. 本文重点选取PCO₁对应的通信链路进行特性分析.

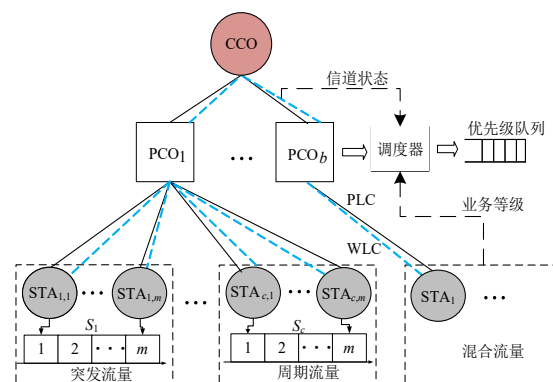


图1 系统模型

各STA节点按预设周期采集数据并上传至所属PCO节点. 当区域发生突发事件时,该区域内STA节点将触发数据增长,形成突发性流量;而其他未受影响区域仍维持周期性数据传输,构成稳定的周期流量. 这种混合型通信场景使PCO节点面临异构流量冲击. 为保障异构流量环境下所有STA节点的数据可靠传输,系统采用基于超帧架构的CSMA/TDMA混合多址接入算法. 该算法将通信时序划分为包含竞争访问阶段和调度传输阶段的超帧周期:在竞争访问时段,设备竞争接入信道,向中继节点发送包含自身业务优先级等信息的预约请求,中继节点根据请求对时分多址(Time Division Multiple Access, TDMA)时隙进行分配;在调度传输时段,根据预约的时隙进行数据包传输.

中继节点PCO内置智能调度器,实现数据包的动态优先级调度. 该调度器通过设备竞争接入状态、目的节点PAoI及第二跳双模信道质量指标,将到达数据包调度存储至优先级缓存队列. 根据实时优化结果,调度器可自主选择以下传输模式:单独采用电力线信道传输、单独采用无线信道传输或采用双模信道同时传输. 这种多维感知的调度机制在保证数据可靠传输的同时最小化系统峰值信息年龄.

2.1 物理层模型

物理层模型如图2所示,源节点S通过双模信道以功率 $P_{S,I}$ 发送源信号 X_S ,中继节点R以功率 $P_{R,I}$ 发送经过转发处理后的中继信号 $X_{R,I}$, $I \in [PLC, WLC]$ 分别表示电力线通信和无线通信.则中继节点和目的节点的接收信号可以表示为

$$Y_{R,I} = \sqrt{P_{S,I}} H_{SR,I} X_S + n_{SR,I} \quad (1)$$

$$Y_{D,I} = \sqrt{P_{R,I}} H_{RD,I} X_R + n_{RD,I} \quad (2)$$

其中, $H_{SR,I}$ 和 $n_{SR,I}$ 分别表示源节点S到中继节点R的双模信道的衰落和加性噪声; $H_{RD,I}$ 和 $n_{RD,I}$ 分别表示中继节点R到目的节点D的衰落和加性噪声.

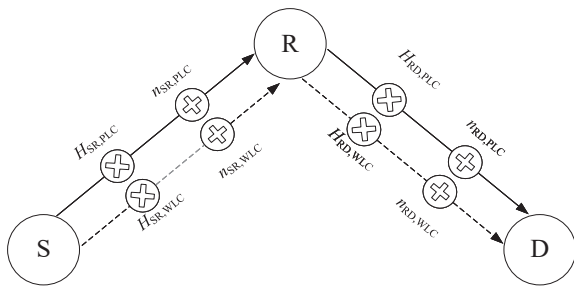


图2 物理层模型示意图

电力线信道采用对数正态衰落和伯努利高斯噪声模型进行建模,无线信道采用瑞利衰落和高斯白噪声进行建模.双模信道采用最大比合并方式进行合并,因此中继节点和目的节点出的信噪比可以分别表示为

$$\gamma_R = \frac{H_{SR,PLC}^2 P_{S,PLC}}{\sigma_{SR,PLC}^2} + \frac{H_{SR,WLC}^2 P_{S,WLC}}{\sigma_{SR,WLC}^2} \quad (3)$$

$$\gamma_D = \frac{H_{RD,PLC}^2 P_{R,PLC}}{\sigma_{RD,PLC}^2} + \frac{H_{RD,WLC}^2 P_{R,WLC}}{\sigma_{RD,WLC}^2} \quad (4)$$

其中, $\sigma_{SR,I}^2$ 、 $\sigma_{RD,I}^2$ 和 $I \in [PLC, WLC]$ 分别表示第一跳、第二跳电力线信道和无线信道的噪声功率.

第一跳和第二跳双模传输时的信道传输速率可以分别表示为

$$C_R = B \log_2(1 + \gamma_R) \quad (5)$$

$$C_D = B \log_2(1 + \gamma_D) \quad (6)$$

2.2 MAC层模型

本文的MAC层接入算法考虑双模通信、超帧结构及业务优先级因素.双模通信采用的双模超帧结构如图3所示.超帧分为信标帧、争用期和非争用期,信标帧用于同步,设备在争用期采用带有冲突避免的载波侦听多路访问(Carrier Sense Multiple access with Collision Avoidance, CSMA/CA)竞争接入,在非争用期内使用分配的TDMA时隙分时传输数据包.设备根据业务优先级等需求分为高优先级和低优先级,并且设备可

以在两个信道同时执行退避过程.为了便于计算,假设两个信道的争用期和非争用期的长度一样.

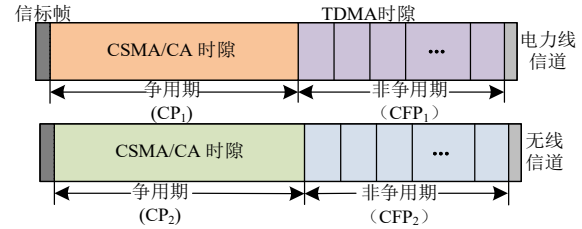


图3 超帧示意图

每个设备随机分配退避计数器,高优先级设备的退避窗口小于低优先级设备的退避窗口.在超帧的争用期,设备会重复检测信道空闲状态,当信道空闲时发送TDMA时隙申请请求,请求包括自身业务等级、业务需求等信息.当两个信道中有一个退避计数器退避为0,设备尝试发送申请,其余设备继续竞争另一信道,当两个信道的退避计数器均退避为0,设备随机选一个信道发送申请,另一个信道被其余设备使用,如果发生碰撞则退避到下一阶段并重新进行信道检测.中继节点向设备发送确认(ACKnowledge character, ACK)信号,并为设备分配TDMA时隙.中继节点为高优先级设备分配两个信道的TDMA时隙,为每个低优先级设备轮流分配两个信道的TDMA时隙.

3 峰值信息年龄违背概率性能计算

本节研究流量和服务过程的随机特性对峰值信息年龄违背概率的影响,由于要进行确定性指标计算,采用随机网络演算构建基于矩生成函数(Moment Generating Function, MGF)的峰值信息年龄违背概率(Peak Age of information Violation Probability, PAVP)计算框架,并将峰值信息年龄分解为数据包生成间隔,传输时延等子项,基于联合界和切诺夫不等式等理论工具推导峰值信息年龄违背概率的上界表达式,为跨层优化提供兼具随机建模与确定性性能保障的理论基准.

3.1 PAVP计算框架

图4展示了信息年龄随着时间的变化趋势,其中 $T_A^1(n)$ 、 $T_A^2(n)$ 和 $T_D^1(n)$ 、 $T_D^2(n)$ 分别为数据包 n 到达源节点、中继节点的时间和离开源节点、中继节点的时间.

不失一般性,假设 $T_A(0) = T_D(0) = 0$.在 t 时刻的AoI可以定义为

$$\Delta(t) = t - \max_{n \geq 1} \{T_A(n): T_D(n) < t\} \quad (7)$$

其中, $\max_{n \geq 1} \{T_A(n): T_D(n) < t\}$ 表示目的节点已成功处理的数据包集合中生成时间最新的数据包的生成时间.因此式(7)表示在任意时刻 t ,系统的信息年龄等于当前时间与目的节点处理的最新的数据包生成时间之差.

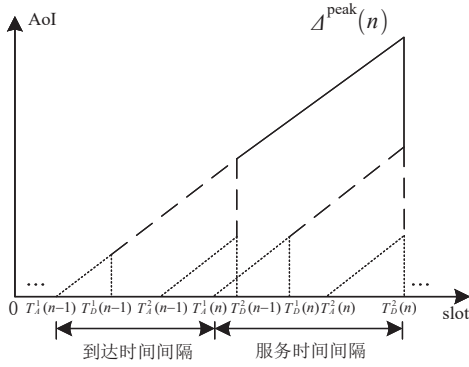


图4 信息年龄随时间变化趋势

根据信息年龄的定义,可以得到存在中继节点时第 n 个数据包的 PAoI 为

$$\Delta^{\text{peak}}(n) = T_D^2(n) - T_A^1(n-1) \quad (8)$$

通过图4横坐标可以看出,PAoI可以表示为数据包的到达时间间隔与数据包的服务时间间隔之和,其中服务时间间隔包括数据包在第一跳和第二跳的接入时延、传输时延以及中继处的缓存调度时延.因此,峰值

$$\Delta^{\text{peak}}(n) = \max_{1 \leq v \leq n} \left\{ \max_{1 \leq u \leq v} \{T_S^1(u, v) - T_A^1(u, v) - T_A^1(v, n)\} + T_A^1(n-1, n) \right\} + T_A^1(n-1, n) \quad (12)$$

具体的计算过程见引理1中的证明.

由于峰值信息年龄违背概率不能直接计算,采用MGF对PAVP进行计算.定义非负随机变量 X 的MGF

$$\Pr \{ \Delta^{\text{peak}}(n) \geq \zeta \} \leq \frac{e^{-\theta \zeta} M_{T_S^1(n)}(\theta) M_{T_A^1(n)}(\theta)}{1 - M_{T_S^1(n)}(\theta) M_{T_A^1(n)}(-\theta)} \cdot \frac{M_{T_S^2(n)}(\theta)}{1 - M_{T_S^2(n)}(\theta) M_{T_A^1(n)}(-\theta) M_{T_B(n)}(\theta)} \quad (13)$$

为了保证引理1中上界的稳定性,需要满足以下条件:

$$\begin{cases} M_{T_S^1(n)}(\theta) M_{T_A^1(n)}(-\theta) < 1 \\ M_{T_S^2(n)}(\theta) M_{T_A^1(n)}(-\theta) M_{T_B(n)}(\theta) < 1 \end{cases} \quad (14)$$

证明 由于中继节点需要对到达的数据包进行缓存调度,因此数据包到达第二跳的时间等于离开第一跳的时间与在中继中的缓存时间之和,即 $T_D^2(n) = T_D^1(n) + T_B(n)$,因此根据式(9)~(11),第 n 个数据包的峰值信息年龄可以通过如下公式计算:

$$\begin{aligned} \Delta^{\text{peak}}(n) &= \max_{1 \leq v \leq n} \left\{ T_A^2(v) + \sum_{i=v}^n T_S^2(i) \right\} - T_A^1(n) + T_A^1(n-1, n) \\ &= \max_{1 \leq v \leq n} \left\{ T_D^1(v) + T_B(v) + \sum_{i=v}^n T_S^2(i) - T_A^1(n) \right\} \\ &\quad + T_A^1(n-1, n) \end{aligned}$$

$$M_{\Delta^{\text{peak}}(n)}(\theta) = \mathbb{E} \left[\exp(\theta \Delta^{\text{peak}}(n)) \right]$$

$$= \mathbb{E} \left[\exp \left(\theta \max_{1 \leq v \leq n} \left\{ \max_{1 \leq u \leq v} \{T_S^1(u, v) - T_A^1(u, v) - T_A^1(v, n)\} + T_B(v) + T_S^2(v, n) \right\} + T_A^1(n-1, n) \right) \right]$$

$$= \mathbb{E} \left[\exp \left(\theta \max_{1 \leq v \leq n} \left\{ \max_{1 \leq u \leq v} \{T_S^1(u, v) - T_A^1(u, v) - T_A^1(v, n)\} + T_B(v) + T_S^2(v, n) \right\} \right) \right] \mathbb{E} \left[\exp(\theta T_A^1(n-1, n)) \right]$$

信息年龄的表达式可以改写为

$$\begin{aligned} \Delta^{\text{peak}}(n) &= T_D^2(n) - T_A^1(n-1) \\ &= T_D^2(n) - T_A^1(n) + T_A^1(n-1, n) \end{aligned} \quad (9)$$

其中, $T_A^1(n-1, n) = T_A^1(n) - T_A^1(n-1)$ 表示两个相邻数据包之间的到达时间间隔.

根据随机网络演算的最大加理论^[22,23],如果 $n \geq 1$,具有到达过程为 $T_A(n)$ 和离开过程为 $T_D(n)$ 的系统被视为精确 $T_S(v, n)$ 服务器.

$$T_D(n) = \max_{1 \leq v \leq n} \{T_A(v) + T_S(v, n)\} \quad (10)$$

对于先到先服务系统,服务过程可以写作精确的

$T_S(v, n)$ 服务器^[24]: $T_S(v, n) = \sum_{a=v}^n T_S(a)$, 其中 $T_S(a)$ 表示第 a 个数据包的服务时间.

因此,离开时间可以表示为

$$T_D(n) = \max_{1 \leq v \leq n} \left\{ T_A(v) + \sum_{a=v}^n T_S(a) \right\} \quad (11)$$

结合式(9)和式(11),PAoI可以表示为

为 $M_X(\theta) = \mathbb{E}[e^{\theta X}]$, 其中 $\theta > 0$ 为自由参数.

引理1 如果 $\theta > 0$, 对于给定的阈值 ζ , PAVP 的上界可以表示为

$$\begin{aligned} &= \max_{1 \leq v \leq n} \left\{ \max_{1 \leq u \leq v} \left\{ T_A^1(u) + \sum_{i=u}^v T_S^1(i) \right\} + T_B(v) \right. \\ &\quad \left. + \sum_{i=v}^n T_S^2(i) - T_A^1(n) \right\} + T_A^1(n-1, n) \\ &= \max_{1 \leq v \leq n} \left\{ \max_{1 \leq u \leq v} \{T_S^1(u, v) - T_A^1(u, v) - T_A^1(v, n)\} \right. \\ &\quad \left. + T_B(v) + T_S^2(v, n) \right\} + T_A^1(n-1, n) \end{aligned} \quad (15)$$

因此,峰值信息年龄的MGF可以表示为式(16).其中, $M_{T_A^1(n)}(-\theta) = \mathbb{E}[\exp(-\theta T_A^1(n))]$, $M_{T_S^1(n)}(\theta)$, $M_{T_S^2(n)}(\theta)$, $M_{T_B(n)}(\theta)$ 分别表示第二跳服务时间、第一跳服务时间、到达时间间隔和缓存时间间隔的MGF表达式,如式(16)所示.

$$\begin{aligned}
 &\leq \sum_{v=1}^n \sum_{u=1}^v \mathbb{E} \left[\exp(\theta T_S^1(u, v)) \right] \mathbb{E} \left[\exp(-\theta T_A^1(u, v)) \right] \mathbb{E} \left[\exp(-\theta T_A^1(v, n)) \right] \\
 &\quad \cdot \mathbb{E} \left[\exp(\theta T_B(v)) \right] \mathbb{E} \left[\exp(\theta T_S^2(v, n)) \right] \mathbb{E} \left[\exp(\theta T_A^1(n-1, n)) \right] \\
 &= \left(\sum_{v=1}^n \left(\sum_{u=1}^v \mathbb{E} \left[\exp(\theta T_S^1(u, v)) \right] \mathbb{E} \left[\exp(-\theta T_A^1(u, v)) \right] \right) \right. \\
 &\quad \left. \cdot \mathbb{E} \left[\exp(-\theta T_A^1(v, n)) \right] \mathbb{E} \left[\exp(\theta T_B(v)) \right] \mathbb{E} \left[\exp(\theta T_S^2(v, n)) \right] \right) \mathbb{E} \left[\exp(\theta T_A^1(n-1, n)) \right] \\
 &= \left(\sum_{v=1}^n \left(\sum_{u=1}^v M_{T_S^1(n)}(\theta)^{v-u+1} M_{T_A^1(n)}(-\theta)^{v-u} \right) M_{T_A^1(n)}(-\theta)^{n-v} M_{T_B(v)}(\theta) M_{T_S^2(n)}(\theta)^{n-v+1} \right) M_{T_A^1(n)}(\theta) \\
 &\leq \left(\sum_{v=1}^{\infty} \left(\sum_{u=1}^{\infty} M_{T_S^1(n)}(\theta)^u M_{T_A^1(n)}(-\theta)^u \right) M_{T_A^1(n)}(-\theta)^v M_{T_B(n)}(\theta)^v M_{T_S^2(n)}(\theta)^v \right) M_{T_S^2(n)}(\theta) M_{T_S^1(n)}(\theta) M_{T_A^1(n)}(\theta) \\
 &\stackrel{b}{=} \frac{M_{T_S^2(n)}(\theta) M_{T_S^1(n)}(\theta) M_{T_A^1(n)}(\theta)}{\left(1 - M_{T_S^1(n)}(\theta) M_{T_A^1(n)}(-\theta) \right) \left(1 - M_{T_A^1(n)}(-\theta) M_{T_B(n)}(\theta) M_{T_S^2(n)}(\theta) \right)}
 \end{aligned} \tag{16}$$

式(16)中,步骤a采用了联合界理论进行运算,步骤b根据无穷级数求和,需要满足以下条件:

$$\begin{cases} M_{T_S^1(n)}(\theta) M_{T_A^1(n)}(-\theta) < 1 \\ M_{T_S^2(n)}(\theta) M_{T_A^1(n)}(-\theta) M_{T_B(n)}(\theta) < 1 \end{cases}$$

非负随机变量 X 的切诺夫不等式可以表示为 $\Pr\{X \geq x\} \leq e^{-\theta x} M_X(\theta)$, 将式(16)带入切诺夫不等式, PAVP 可以表示为

$$\Pr\{\Delta^{\text{peak}}(n) \geq \zeta\} \leq \frac{e^{-\theta \zeta} M_{T_S^1(n)}(\theta) M_{T_A^1(n)}(\theta)}{1 - M_{T_S^1(n)}(\theta) M_{T_A^1(n)}(-\theta)} \cdot \frac{M_{T_S^2(n)}}{1 - M_{T_A^1(n)}(-\theta) M_{T_B(n)}(\theta) M_{T_S^2(n)}(\theta)} \tag{17}$$

引理1得证.

3.2 到达过程

在紧急情况下,传感器产生大量数据包,同时接入 PCO 或 CCO,产生突发流量.数据包的到达时间间隔服从 Beta 分布,即

$$T_{\text{burst}} \sim \text{Be}(\alpha, \beta) \tag{18}$$

但部分节点仍处于非紧急情况,仍然周期地产生正常数据包.假设采样周期为 δ ,即一个时隙进行一次采样,则数据包的到达时间间隔可以表示为

$$T_{\text{periodic}} = \delta \tag{19}$$

此时接入目的节点的流量模型为正常流量和突发流量的混合流量模型,第 n 个数据包的到达时间间隔可以表示为

$$T_A^1(n) = \begin{cases} T_{\text{burst}}, & \rho \\ T_{\text{periodic}}, & 1 - \rho \end{cases} \tag{20}$$

其中, $\rho \in [0, 1]$ 表示随机参数,体现突发流量发生的概率.

因此,包到达时间间隔的矩生成函数可以表示为

$$M_{T_A^1(n)}(\theta) = (1 - \rho) e^{\theta \delta} + \rho \left[1 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\prod_{m=0}^{n-1} \frac{\alpha + m}{\alpha + \beta + m} \right) \frac{\theta^n}{n!} \right] \tag{21}$$

3.3 服务过程

由于本文采用两跳中继模型,所以包在传输过程中的服务时间由两部分组成,即包在第一跳中的服务时间间隔和包在第二跳中的服务时间间隔.数据包在第一跳中的服务时间由接入时延和传输时延组成.数据包在第二跳中的服务时间包括信道质量检测时延和传输时延.

(1) 第一跳服务时间间隔

综合考虑物理层和 MAC 层的跨层模型,通过马尔可夫模型,建立联合方程组,计算不同优先级的设备在两个信道中成功传输的概率、碰撞概率^[9],并在此基础上计算接入时延和传输时延.

优先级为 k 的设备在电力线信道中的传输概率为 $\tau_{1,k}$,碰撞概率为 $p_{1,k}$,其联合方程组可以表示为

$$\begin{cases} \tau_{1,k} = \frac{\sum_{i=0}^{m_i^k-2} t_i^k \prod_{j=0}^{i-1} (1 - s_j^k) + \prod_{i=0}^{m_i^k-2} (1 - s_j^k) \frac{t^{m_i^k-1}}{s^{m_i^k-1}}}{\sum_{i=0}^{m_i^k-2} \text{bc}_i^k \prod_{j=0}^{i-1} (1 - s_j^k) + \prod_{i=0}^{m_i^k-2} (1 - s_j^k) \frac{\text{bc}^{m_i^k-1}}{s^{m_i^k-1}}} \\ p_{1,k} = 1 - (1 - \tau_{1,k})^{N_k-1} \end{cases} \tag{22}$$

其中, x_i^k 表示由于感知到电力线通信 (Power Line Communication, PLC) 信道繁忙 $\text{dc}^k(i) + 1$ 次,设备在退避阶段 i 在 l 或更短的时间内跳转到下一退避阶段的概率; t_i^k 表示设备在 PLC 的退避阶段 i 尝试传输的概率; s_i^k 表示设备 PLC 的退避阶段 i 成功发送的概率; bc_i^k 表示设备在 PLC 的退避阶段 i 所花费的时隙数,具体表达式如式(20)

所示:

$$\begin{cases} x_j^k = \sum_{j=\text{dc}^k(i)+1}^l \binom{l}{j} (p_1^k)^j (1-p_1^k)^{l-j} \\ t_i^k = \frac{\text{dc}^k(i)+1}{\text{CW}_{1i}^k} + \sum_{l=\text{dc}^k(i)+1}^{\text{CW}_{1i}^k-1} \frac{1}{\text{CW}_{1i}^k} (1-x_l^k) \\ s_i^k = (1-p_1^k)t_i^k \end{cases} \quad (23)$$

优先级为 k 的设备在无线信道中的传输概率 $\tau_{2,k}$, 碰撞概率为 $p_{2,k}$, 其联合方程组可以表示为

$$\begin{cases} \tau_{2,k} = \frac{2}{(\text{CW}_{2\min}^k + 1) + \frac{p_{2,k} \text{CW}_{2\min}^k (1 - (2p_{2,k})^{m_2^k})}{(1 - 2p_{2,k})}} \\ p_{2,k} = 1 - (1 - \tau_{2,k})^{N_k - 1} \end{cases} \quad (24)$$

其中, $k \in \{H, L\}$, H 表示高优先级, L 表示低优先级; N_k 表示优先级为 k 的设备数量; $\text{CW}_{2\min}^k$ 表示设备在无线信道传输时的最小竞争窗口值; m_1^k 和 m_2^k 分别表示设备在 PLC 和无线通信 (WireLess Communication, WLC) 信道中的最大退避阶段数.

考虑到同时争用到两个信道的情况, 传输概率计算为

$$\tau_{\text{dual},k} = \sum_{i=0}^{m_1^k} \sum_{j=0}^{m_2^k} p_{ij,k} \tau_{ij,k} \quad (25)$$

其中, $p_{ij,k}$ 表示优先级为 k 的设备在电力线和无线信道中分别处于退避阶段 i 和退避阶段 j 的概率; $\tau_{ij,k}$ 表示优先级为 k 的设备在不同退避阶段同时竞争到无线和电力线信道的概率.

利用 $\tau_{\text{dual},k}$ 对双模信道中两个信道的传输概率进行更新计算, 通过 $\tau'_{1,k}$ 和 $\tau'_{2,k}$ 可以计算出优先级为 k 的设备在双模信道中的平均发送概率 τ'_k , 有

$$\tau'_{1,k} = \tau_{1,k} + \tau_{\text{dual},k}/2 \quad (26)$$

$$\tau'_{2,k} = \tau_{2,k} + \tau_{\text{dual},k}/2 \quad (27)$$

$$\tau'_k = (\tau'_{1,k} + \tau'_{2,k})/2 \quad (28)$$

此外, 信道接入是依赖于独立的伯努利过程, 接入成功所需要的时隙数 J_k 可以表示为服从参数为 τ'_k 的几何分布. 即

$$\Pr(J_k = j) = \tau'_k (1 - \tau'_k)^{j-1} \quad (29)$$

因此, 竞争接入时延可以表示为时隙大小与时隙数的乘积, 即

$$T_{\text{access}}(n) = \delta J_k \quad (30)$$

其中, δ 表示时隙长度.

由于高优先级设备传输时采用双模信道进行传输, 则高优先级设备在第一跳时的传输时延为

$$T_{\text{trans}}^H(n) = \frac{D}{C_R} \quad (31)$$

其中, D 表示数据包长度; C_R 表示采用双模信道时的信道传输速率.

低优先级设备采用电力线信道或无线信道分别传输数据, 则低优先级设备在第一跳时的传输时延为 $T_{\text{trans}}^L(n) = D/C_{S,I}$, $I \in \{\text{PLC}, \text{WLC}\}$, 其中 $C_{S,I} = B \log_2(1 + H_{\text{SR},I}^2 P_{S,I} / \sigma_{\text{SR},I}^2)$, $I \in \{\text{PLC}, \text{WLC}\}$ 分别表示第一跳中单独采用电力线信道或无线信道时的传输速率, 对应的归一化概率分别为 $\hat{\tau}'_{1,L}$ 和 $\hat{\tau}'_{2,L}$.

因此, 第一跳的服务时间可以表示为

$$T_S^1(n) = T_{\text{access}}(n) + \sum_{i=1}^{N_H} T_{\text{trans},i}^H + \sum_{i=1}^{N_L} T_{\text{trans},i}^L \quad (32)$$

对应的 MGF 函数可以表示为

$$\begin{aligned} M_{T_S^1(n)}(\theta) &= \mathbb{E} \left[\exp \left(\theta \left(T_{\text{access}} + \sum_{i=1}^{N_H} T_{\text{trans},i}^H + \sum_{i=1}^{N_L} T_{\text{trans},i}^L \right) \right) \right] \\ &= \frac{e^{\theta \delta} \tau'}{1 - (1 - \tau') e^{\theta \delta}} \cdot \left(\tau'_H \exp \left(\frac{\theta D}{C_R} \right) \right)^{N_H} \\ &\quad \cdot \left(\hat{\tau}'_{1,L} \exp \left(\frac{\theta D}{C_{S,\text{PLC}}} \right) + \hat{\tau}'_{2,L} \exp \left(\frac{\theta D}{C_{S,\text{WLC}}} \right) \right)^{N_L} \end{aligned} \quad (33)$$

(2) 中继缓存时间间隔

由于高优先级的数据包通过两个信道进行传输, 在包到达中继节点后, 存入 PLC 与 WLC 两个临时缓冲区内, 低优先级的数据包传输时采用 PLC 或 WLC 信道传输, 包在到达中继节点后, 存入 PLC 或 WLC 的临时缓冲区内. 中继节点的调度器将不同缓冲区内数据包按照优先级依次存入优先级队列中, 假设优先级队列的长度为 N , 一个数据包在一个时隙内完成调度. 由于本文进行 PAVP 的上界计算, 因此考虑最差调度情况, 即数据包 n 最后一个被存入优先级队列中, 其调度时延可以表示为

$$T_B(n) = N\delta \quad (34)$$

其中, δ 表示一个时隙的长度.

根据 MGF 的定义, 缓存时间的矩生成函数可以表示为

$$M_{T_B(n)}(\theta) = \mathbb{E} [e^{\theta \delta N}] = e^{\theta \delta N} \quad (35)$$

(3) 第二跳服务时间间隔

由于中继节点处的调度器按照优先级需求将数据包存入了队列中, 根据静态优先级调度策略, 高优先级数据包首先进行传输, 直到发完高优先级数据包后, 再传输低优先级数据包. 因此在第二跳服务中不考虑信道竞争接入的问题, 并且为了保证数据包传输成功率, 对第二跳的两个信道进行信道质量检测. 当第二跳信道状态优于设定阈值时即可传输数据包, 此时可以分

为四种情况.

(i) 电力线信道质量好,无线信道质量差,只有电力线信道满足数据包传输速率要求,此时概率为 $q_1 = \Pr\left\{\left(C_{R,PLC} \geq \eta_{R,PLC}\right) \cap \left(C_{R,WLC} < \eta_{R,WLC}\right)\right\}$, 传输时延为 $T_{\text{trans},q_1}^2(n) = D/C_{R,PLC}$.

(ii) 电力线信道与无线信道质量都好,两个信道均满足传输速率要求,此时概率为 $q_2 = \Pr\left\{\left(C_{R,PLC} \geq \eta_{R,PLC}\right) \cap \left(C_{R,WLC} \geq \eta_{R,WLC}\right)\right\}$, 传输时延为 $T_{\text{trans},q_2}^2(n) = D/C_{R,dual}$.

(iii) 电力线信道质量差,无线信道质量好,只有无线信道满足传输速率要求,此时概率为 $q_3 = \Pr\left\{\left(C_{R,PLC} < \eta_{R,PLC}\right) \cap \left(C_{R,WLC} \geq \eta_{R,WLC}\right)\right\}$, 传输时延为 $T_{\text{trans},q_3}^2(n) = D/C_D$.

(iv) 电力线信道和无线信道质量都差,两个信道均不满足传输速率要求,此时概率为 $q_4 = \Pr\left\{\left(C_{R,PLC} < \eta_{R,PLC}\right) \cap \left(C_{R,WLC} < \eta_{R,WLC}\right)\right\}$, 由于信道不满足数据包传输条件,需要重新进行信道质量检测,再传输数据包. 因此,传输时延表示为 $T_{\text{trans},q_4}^2(n) = T_{\text{detect}}(n) + T_{\text{trans,next}}^2(n)$. $T_{\text{detect}}(n)$ 表示进行信道质量检测所需要的时延,具体的

计算如式(37), $T_{\text{trans,next}}^2 \in \left\{T_{\text{trans},q_1}^2, T_{\text{trans},q_2}^2, T_{\text{trans},q_3}^2, T_{\text{trans},q_4}^2\right\}$ 表示四种情况下的传输时延.

上述情况中, $C_{R,I} = B \log_2\left(1 + H_{RD,I}^2 P_{R,I} / \sigma_{RD,I}^2\right)$, $I \in \{PLC, WLC\}$ 分别表示第二跳中单独采用 PLC 或 WLC 时的传输速率, $\eta_{R,PLC}$ 和 $\eta_{R,WLC}$ 分别表示电力线信道和无线信道的传输速率阈值.

针对上述四种情况,只有当信道质量好时,队列中的数据包包才会进行接入并传输,并且高优先级队列中的数据包包先使用信道进行传输. 中继节点缓冲区内的数据包调度结束后,进行第二跳链路信道质量检测,第二跳链路满足数据包传输的概率可以表示为

$$P_{\text{good}} = 1 - q_4 \quad (36)$$

由于需要重复检测信道质量,可以将每个检测过程看作独立的伯努利过程,因此数据包进行信道质量检测时需要的时隙数 K 服从参数为 P_{good} 的几何分布^[25]. 信道质量检测的时延可以表示为

$$T_{\text{detect}}(n) = \delta K \quad (37)$$

因此,中继节点到目的节点的服务时间间隔可以表示为

$$T_S^2(n) = T_{\text{detect}}(n) + T_{\text{trans}}^2(n) \quad (38)$$

考虑到传输时延存在递归关系,经过离散 MGF 计算,式(38)对应的 MGF 可以表示为

$$M_{T_S^2(n)}(\theta) = E\left[\exp\left(T_{\text{detect}}(n) + T_{\text{trans}}^2(n)\right)\right] = \frac{e^{\theta\delta} P_{\text{good}}}{1 - (1 - P_{\text{good}}) e^{\theta\delta}} \cdot \frac{\left[q_1 \exp\left(\frac{\theta D}{C_{R,PLC}}\right) + q_2 \exp\left(\frac{\theta D}{C_D}\right) + q_3 \exp\left(\frac{\theta D}{C_{R,WLC}}\right) \right]}{1 - \frac{e^{\theta\delta} q_4 P_{\text{good}}}{1 - (1 - P_{\text{good}}) e^{\theta\delta}}} \quad (39)$$

式(39)的具体推导如下.

证明 根据式(38),中继节点到目的节点的服务时间间隔表示为信道检测时间与传输时延之和. 服务时间间隔的 MGF 可以表示为

$$M_{T_S^2(n)}(\theta) = E\left[\exp\left(T_{\text{detect}}(n) + T_{\text{trans}}^2(n)\right)\right] = E\left[\exp\left(T_{\text{detect}}(n)\right)\right] E\left[\exp\left(T_{\text{trans}}^2(n)\right)\right] \quad (40)$$

$$\begin{aligned} E\left[\exp\left(T_{\text{trans}}^2(n)\right)\right] &= q_1 \exp\left(T_{\text{trans},q_1}^2(n)\right) + q_2 \exp\left(T_{\text{trans},q_2}^2(n)\right) + q_3 \exp\left(T_{\text{trans},q_3}^2(n)\right) + q_4 E\left[\exp\left(T_{\text{trans},q_4}^2(n)\right)\right] \\ &= q_1 \exp\left(\frac{\theta D}{C_{R,PLC}}\right) + q_2 \exp\left(\frac{\theta D}{C_D}\right) + q_3 \exp\left(\frac{\theta D}{C_{R,WLC}}\right) + q_4 E\left[\exp\left(T_{\text{trans},q_4}^2(n)\right)\right] \end{aligned} \quad (42)$$

由于 $T_{\text{trans},q_4}^2(n) = T_{\text{detect}}(n) + T_{\text{trans,next}}^2(n)$, 且 $T_{\text{trans,next}}^2(n)$ 与 $T_{\text{trans}}^2(n)$ 独立同分布,因此上述公式可以转换为

$$\begin{aligned} E\left[\exp\left(T_{\text{trans}}^2(n)\right)\right] &= q_1 \exp\left(\frac{\theta D}{C_{R,PLC}}\right) + q_2 \exp\left(\frac{\theta D}{C_D}\right) + q_3 \exp\left(\frac{\theta D}{C_{R,WLC}}\right) + q_4 E\left[\exp\left(T_{\text{detect}}(n) + T_{\text{trans,next}}^2(n)\right)\right] \\ &= q_1 \exp\left(\frac{\theta D}{C_{R,PLC}}\right) + q_2 \exp\left(\frac{\theta D}{C_D}\right) + q_3 \exp\left(\frac{\theta D}{C_{R,WLC}}\right) + \frac{e^{\theta\delta} q_4 P_{\text{good}}}{1 - (1 - P_{\text{good}}) e^{\theta\delta}} E\left[\exp\left(T_{\text{trans}}^2(n)\right)\right] \end{aligned} \quad (43)$$

根据式(37),信道检测时间的 MGF 可以表示为

$$E\left[\exp\left(T_{\text{detect}}(n)\right)\right] = \frac{e^{\theta\delta} P_{\text{good}}}{1 - (1 - P_{\text{good}}) e^{\theta\delta}} \quad (41)$$

中继节点到目的节点的传输时延与选择的信道相关,根据传输时延的 4 种情况,结合离散 MGF 计算方式可得:

因此,

$$E\left[\exp\left(T_{\text{trans}}^2(n)\right)\right] = \frac{q_1 \exp\left(\frac{\theta D}{C_{\text{R,PLC}}}\right) + q_2 \exp\left(\frac{\theta D}{C_{\text{D}}}\right) + q_3 \exp\left(\frac{\theta D}{C_{\text{R,WLC}}}\right)}{1 - \frac{e^{\theta\delta} q_4 P_{\text{good}}}{1 - (1 - P_{\text{good}}) e^{\theta\delta}}}$$
(44)

结合式(40)、式(41)与式(44),中继节点与目的节点间的服务时间间隔的矩生成函数为

$$M_{T_s^2(n)}(\theta) = \frac{e^{\theta\delta} P_{\text{good}}}{1 - (1 - P_{\text{good}}) e^{\theta\delta}} \cdot \left[\frac{q_1 \exp\left(\frac{\theta D}{C_{\text{R,PLC}}}\right) + q_2 \exp\left(\frac{\theta D}{C_{\text{D}}}\right) + q_3 \exp\left(\frac{\theta D}{C_{\text{R,WLC}}}\right)}{1 - \frac{e^{\theta\delta} q_4 P_{\text{good}}}{1 - (1 - P_{\text{good}}) e^{\theta\delta}}} \right]$$
(45)

式(39)推导完毕.

4 基于 Lyapunov 的 PAVP 优化算法

在队列稳定性和一定的总功率 P_{total} 的条件下,通过调整节点的传输功率可以减小峰值信息年龄违背,提升网络性能. 假设源节点和中继节点之间的功率分配因子为 ω ,各节点中电力信道与无线信道之间的功率分配因子为 μ ,即 $P_s = \omega P_{\text{total}}$, $P_{\text{S,PLC}} = \mu P_s$. 定义数据包 n 的峰值信息年龄违背概率上界为 $\Upsilon(n, \omega, \mu)$,具体的表达式如式(46)所示:

$$U_{\text{R}}(\omega, \mu) = \exp\left[\frac{\theta D}{B \log_2\left(1 + (1 - \omega) P_{\text{total}} \left(\frac{\mu H_{\text{RD,PLC}}^2}{\sigma_{\text{RD,PLC}}^2} + \frac{(1 - \mu) H_{\text{RD,WLC}}^2}{\sigma_{\text{RD,WLC}}^2} \right)} \right)} \right]$$

在实际情况中,每到一个数据包便进行功率优化调整是浪费资源的行为,因此,将连续的 Z 个数据包的峰值信息年龄违背概率上界之和作为优化目标函数,即为本论文的优化目标函数为

$$\min_{\substack{0 < \omega < 1 \\ 0 < \mu < 1}} \sum_{n=1}^Z \Upsilon(n, \omega, \mu)$$

s.t. C1: $M_{T_s^2(n)}(\theta) M_{T_s^2(n)}(-\theta) < 1$
 C2: $M_{T_s^2(n)}(\theta) M_{T_s^2(n)}(-\theta) M_{T_s(n)}(\theta) < 1$
 C3: $P_{i,l} > 0, i \in \{\text{S, R}\}, l \in \{\text{PLC, WLC}\}$
 C4: $\sum P_{i,l} = P_{\text{total}}$

(47)

其中, C1 和 C2 为队列稳定性条件; $M_{T_s^2(n)}(\theta)$, $M_{T_s^2(n)}(-\theta)$, $M_{T_s^2(n)}(\theta)$ 和 $M_{T_s(n)}(\theta)$ 分别表示第二跳服务时间、第一跳

$$\Upsilon(n, \omega, \mu) = \frac{e^{-\theta\delta} M_{T_s^2(n)}(\theta)}{\left(\frac{U_1(\omega, \mu) e^{\theta\delta} \tau'}{1 - (1 - \tau') e^{\theta\delta}} \right)^{-1} - M_{T_s^2(n)}(-\theta)} \cdot \frac{1}{\left(\frac{U_2(\omega, \mu) e^{\theta\delta} P_{\text{good}}}{1 - (1 - P_{\text{good}}) e^{\theta\delta}} \right)^{-1} - M_{T_s^2(n)}(-\theta) e^{\theta N \delta}}$$
(46)

其中:

$$U_1(\omega, \mu) = (\tau_{11}' U_{\text{S}}(\omega, \mu))^{N_1} \cdot (\hat{\tau}_{1,1}' U_{\text{S,PLC}}(\omega, \mu) + \hat{\tau}_{2,1}' U_{\text{S,WLC}}(\omega, \mu))^{N_1}$$

$$U_2(\omega, \mu) = \frac{q_1 U_{\text{R,PLC}}(\omega, \mu) + q_2 U_{\text{R}}(\omega, \mu) + q_3 U_{\text{R,WLC}}(\omega, \mu)}{1 - e^{\theta\delta} q_4 P_{\text{good}} / 1 - (1 - P_{\text{good}}) e^{\theta\delta}}$$

$$U_{\text{S,PLC}}(\omega, \mu) = \exp\left[\frac{\theta D}{B \log_2\left(1 + \frac{\omega \mu P_{\text{total}} H_{\text{SR,PLC}}^2}{\sigma_{\text{SR,PLC}}^2}\right)} \right]$$

$$U_{\text{R,PLC}}(\omega, \mu) = \exp\left[\frac{\theta D}{B \log_2\left(1 + \frac{(1 - \omega) \mu P_{\text{total}} H_{\text{RD,PLC}}^2}{\sigma_{\text{RD,PLC}}^2}\right)} \right]$$

$$U_{\text{S,WLC}}(\omega, \mu) = \exp\left[\frac{\theta D}{B \log_2\left(1 + \frac{\omega (1 - \mu) P_{\text{total}} H_{\text{SR,WLC}}^2}{\sigma_{\text{SR,WLC}}^2}\right)} \right]$$

$$U_{\text{R,WLC}}(\omega, \mu) = \exp\left[\frac{\theta D}{B \log_2\left(1 + \frac{(1 - \omega) (1 - \mu) P_{\text{total}} H_{\text{RD,WLC}}^2}{\sigma_{\text{RD,WLC}}^2}\right)} \right]$$

$$U_{\text{S}}(\omega, \mu) = \exp\left[\frac{\theta D}{B \log_2\left(1 + \omega P_{\text{total}} \left(\frac{\mu H_{\text{SR,PLC}}^2}{\sigma_{\text{SR,PLC}}^2} + \frac{(1 - \mu) H_{\text{SR,WLC}}^2}{\sigma_{\text{SR,WLC}}^2} \right)} \right)} \right]$$

服务时间、到达时间间隔和缓存时间间隔的 MGF 表达式; C3 和 C4 分别表示每个节点的发射功率约束和总功率约束. 为了保证系统的 PAVP 最小化,需要注意队列的大小,因此采用 Lyapunov 算法进行优化. 并且,经过 Lyapunov 转换后的优化问题不需要随机变量预测信息,可以在每个时隙内优化系统决策.

系统的队列占用 Q 的变化方程为

$$Q(t+1) = \max\{Q(t) - S(t), 0\} + A(t) \quad (48)$$

其中, $S(t)$ 表示系统在 t 时刻的服务能力, $A(t)$ 可以通过系统在 t 时刻到达的累计数据包长度进行表示. Lyapunov 函数可以表示为

$$L(t) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N Q_i(t)^2 \quad (49)$$

Lyapunov 漂移可以表示为

$$\Delta L(t) = L(t+1) - L(t) \quad (50)$$

为了计算 Lyapunov 漂移,对队列占用 Q 进行平方运算,有

$$Q(t+1)^2 = \left\{ \max(Q(t) - S(t), 0) + A(t) \right\}^2 \leq Q(t)^2 + S(t)^2 + A(t)^2 + 2Q(t)A(t) \quad (51)$$

结合式(48)~(51)可以推导出 Lyapunov 漂移为

$$\Delta L(t) \leq \frac{1}{2}S(t)^2 + \frac{1}{2}A(t)^2 + Q(t)A(t) \leq B + Q(t)A(t) \quad (52)$$

其中, $B \geq \frac{1}{2}S(t)^2 + \frac{1}{2}A(t)^2$.

为了权衡队列稳定性与目标函数值,通过在两端同时加上 $V \sum_{n=1}^Z \gamma(n, \omega, \mu)$ 定义 Lyapunov 偏移惩罚方程为

$$\Delta L(t) + V \sum_{n=1}^Z \gamma(n, \omega, \mu) \leq B + Q(t)A(t) + V \sum_{n=1}^Z \gamma(n, \omega, \mu) \quad (53)$$

其中,将优化问题中的目标函数值 $\sum_{n=1}^Z \gamma(n, \omega, \mu)$ 定义为惩罚项,通过控制因子 V 进行平衡.同时,控制因子 V 越大表示目标函数值在权衡关系中越重要,对 PAVP 的优化结果越好.因此,基于 Lyapunov 优化算法将优化目标函数转换为

$$\min_{\substack{0 < \omega < 1 \\ 0 < \mu < 1}} \Delta L(t) + V \sum_{n=1}^Z \gamma(n, \omega, \mu) \quad (54)$$

s.t. C1~C4

问题(54)是一个双变量非线性约束优化问题,其可解性核心在于 $\gamma(n, \omega, \mu)$ 的连续性.如式(46)所示, $\gamma(n, \omega, \mu)$ 是由基本运算和复合函数构成,其中涉及的对数函数、指数函数在定义域内是连续且光滑的,因此整个函数是关于决策变量的连续函数. ω 与 μ 定义了一个有界开集,结合约束条件和实际情况,可行集是开集中的非空紧子集,根据 Weierstrass 定理^[26],即连续函数在紧集上存在最值,优化问题(54)在可行域内存在一个全局最优解.

由于整个函数在可行域内光滑,基于梯度的高效算法可以通过迭代快速逼近并稳定收敛到最优解.本文采用 MATLAB 的 fmincon 优化工具箱来具体实现数值求解过程. fmincon 提供了内点法等成熟的算法,能够有效处理此类具有边界约束的平滑非线性优化问题,为问题(54)提供一个可靠且高效的解决方案.

5 仿真分析

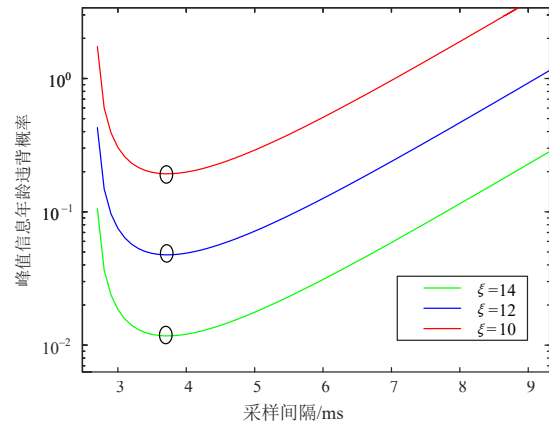
本文采用 MATLAB 仿真软件进行理论和仿真分析.假设设备在电力线信道中最大退避阶段^[9] m_1^k 为 3,

高低优先级设备的竞争窗口分别为 $CW_1^H = [8, 16, 16, 32]$ 和 $CW_1^L = [8, 16, 32, 64]$;无线信道中最大退避阶段 m_2^k 为 3,高低优先级设备的竞争窗口分别为 $CW_2^H = [8, 16, 32, 64]$ 和 $CW_2^L = [32, 64, 128, 256]$;系统总功率^[27] $P_{total} = 2$. 如果无特别说明,其余仿真参数设置^[25]如表 1 所示.

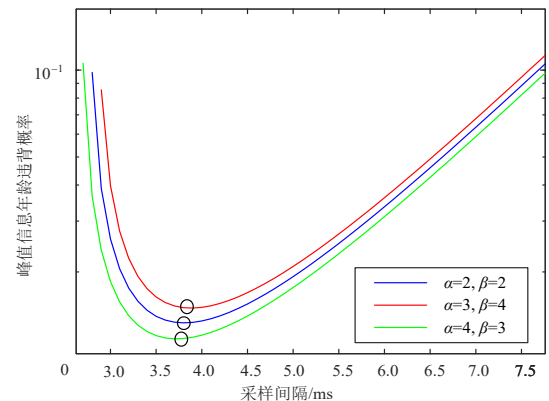
表 1 仿真参数设置

参数	值
设备数量/个	20
信道带宽/MHz	1
数据包长/bit	1 000
时隙大小/ms	1
采样间隔/ms	1

图 5 展示了采样间隔对于 PAVP 的影响,随着采样间隔的增大,PAVP 呈现先减小后增大的趋势,存在最优的采样间隔使得 PAVP 取最小值,即图中用圆圈标注的值.当采样间隔较小时,包的到达时间间隔小,系统无法满足包服务需求,产生较大的排队时延;当采样间隔较大时,包到达时间间隔较大,占信息年龄的主导地位.



(a) 不同阈值条件下 PAVP 与采样间隔的关系



(b) 不同分布参数下 PAVP 与采样间隔的关系

图 5 不同条件下 PAVP 与采样间隔的关系

图 5(a)展示了不同阈值条件下,采样间隔对于峰值信息年龄违背概率的影响.增大峰值信息年龄阈值时,峰值信息年龄违背概率减小,这是因为随着阈值约束的放宽,数据包峰值信息年龄超过阈值的可能性变小.图 5(b)是 $\xi = 14$ ms 时,采用不同的 Beta 分布参数时的 PAVP 变化情况,当分布参数为 $\alpha = 4, \beta = 3$ 时突发流量出现在后期,系统有更充足的调度准备时间来处理流量,从而比流量早期突发的 $\alpha = 3, \beta = 4$ 具有更低的 PAVP.

设置 $N = 10, \alpha = 2, \beta = 2, \xi = 9$, 对本文推导的峰值 AoI 违背概率进行理论与仿真的对比.结果如图 6 所示,理论计算确实为验证仿真的上界,说明本文在建立的模型下推导的峰值 AoI 违背概率是正确的.当采样间隔较小时,流量相对平滑,突发性较弱.此时,实际仿真中出现的流量模式与理论模型所考虑的“最坏情况”相差不大,因此理论边界与仿真结果的差距较小.然而,随着采样间隔的增大,流量的突发性显著增强,我们的理论模型必须为这种增强的突发性预留足够的性能余量.并且,理论值是一种理想状态下的性能边界,仿真值的计算过程更接近平均性能,因此二者之间的差距会扩大.

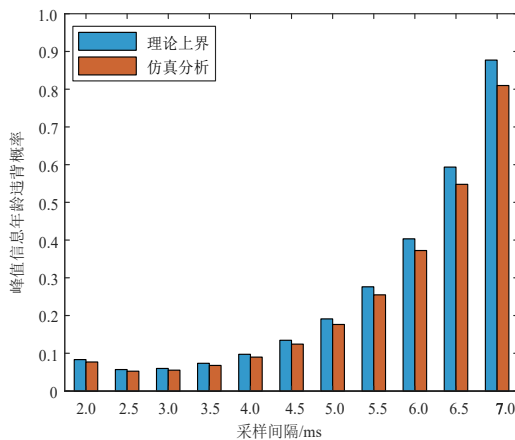


图 6 仿真与理论对比

如图 7 所示,随着阈值的放松,系统的 PAVP 会降低,这是因为阈值放松使得大多数的数据包峰值信息年龄都能满足阈值要求.并且,随着设备数量的增加,PAVP 也会增加,这是因为更多的设备会增加接入时延和调度时延,导致数据包的服务时间间隔增加.

图 8 展示了不同竞争窗口值对 PAVP 的影响,随着竞争窗口的增大,PAVP 会减小.这是因为随着竞争窗口值 CW_1 的增大,吞吐量逐渐提高,碰撞概率减小,数据包在第一跳的接入时延也随之下降低,因此 PAVP 出现减小的情况.

图 9 综合对比了设备数量为 20 个时,MAC 层和物理层参数对 PAVP 的影响,其中 MAC 层参数选取竞争

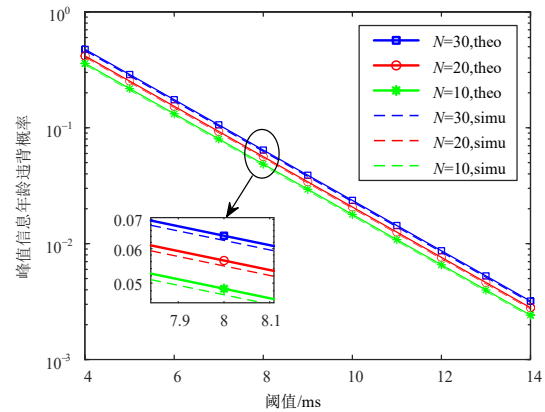


图 7 不同设备数量下 PAVP 与阈值的关系

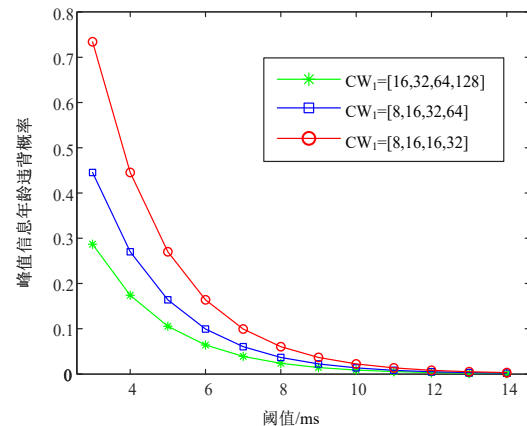


图 8 不同竞争窗口值下 PAVP 与阈值的关系

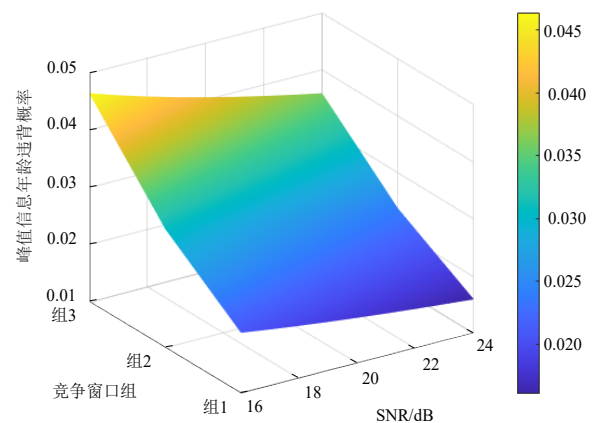


图 9 竞争窗口值和信噪比对 PAVP 的影响

窗口大小,物理层参数选取信噪比.竞争窗口组表示不同的竞争窗口值大小,组 1~组 3 分别为 [16, 32, 64, 128]、[8, 16, 32, 64] 和 [8, 16, 16, 32].如图 9 所示,随着竞争窗口和信噪比的增大,系统的 PAVP 减小,但是竞争窗口大小对 PAVP 的影响更大.这是因为,在设备数量较多时,接入时延在数据包的服务时间间隔中起主导作用.实际时延调控时,需重点关注竞争窗口的优化设置问题.

如图 10 所示,当设备数量增加时,碰撞概率和

PAVP都会增大,这是因为设备数量增加导致竞争接入加剧,产生更多的碰撞,接入时延也随之增加,使得峰值信息年龄增加.当竞争窗口增大时,减小了碰撞概率,因此PAVP也随之减小.

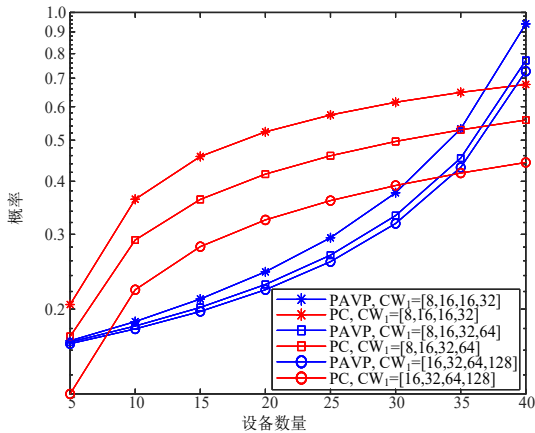


图 10 不同竞争窗口下碰撞概率和违背概率与设备数量的关系

本文中采用 MATLAB 中基于序列二次规划 (Sequence Quadratic Program, SQP) 算法的 fmincon 函数确定最佳功率分配值. 图 11 展示了峰值信息年龄违背概率与功率分配因子之间的关系. 随着功率分配因子的变化, PAVP 也发生了显著的变化. 当源节点和中继节点间的功率分配因子为 0.24, 各个节点电力线信道与无线信道间的功率分配因子为 0.59 时, 系统的 PAVP 性能最优.

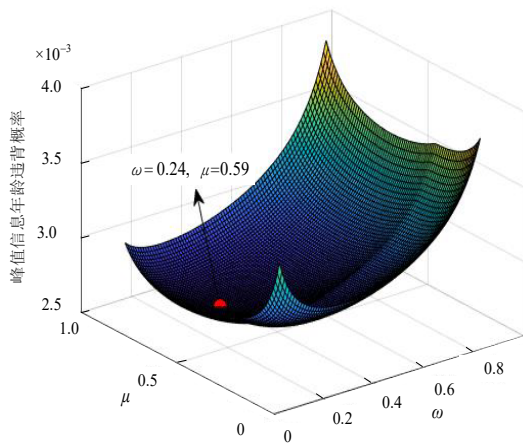


图 11 峰值信息年龄违背概率与功率分配因子的关系

如图 12 所示, 本文采用的基于 Lyapunov 优化的 PAVP 算法性能明显优于文献 [25] 提及的块坐标下降算法和不加 Lyapunov 优化的算法. 这是因为, 本文算法通过 Lyapunov 漂移加惩罚项的理论, 直接将长期随机优化问题转化为可在线求解的瞬时问题, 从而避免了因模型不准确而导致的性能损失和局部最优问题, 并

提供了严格的性能边界保证.

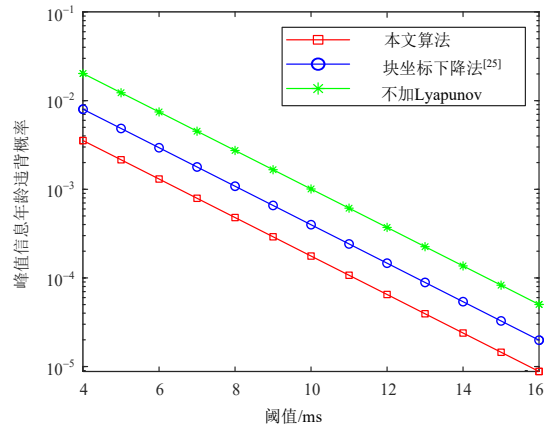


图 12 不同算法下峰值信息年龄违背概率与阈值的关系

如图 13 所示, 双模通信场景下的 PAVP 优于单独使用电力线通信或单独使用无线通信的场景. 这是因为, 当任一信道经历深度衰落或突发干扰时, 智能调度算法可将关键数据包切换至另一相对稳定的信道, 从而有效避免了因单一信道瞬时质量恶化所导致的传输时延激增, 平滑了端到端服务过程. 双模系统将两条独立信道的传输能力融合为一个更大的虚拟服务容量, 从而更快地清空队列积压, 显著缩短数据包的队列等待时间.

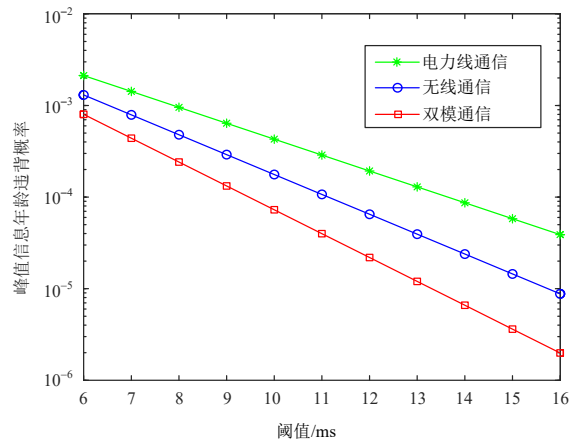


图 13 不同场景下峰值信息年龄违背概率与阈值的关系

6 结论

本文针对双模中继协作系统中的峰值信息年龄违背概率问题展开研究, 通过构建包含接入时延、传输时延与信道检测时延的复合时延模型, 揭示了多设备竞争接入与双模信道对信息时效性的影响机制. 基于随机网络演算的最大加理论, 本文突破传统方法对业务平稳性假设的局限, 推导出基于 MGF 的 PAVP 上界表达式, 为动态异构网络环境下的时效性分析提供了新

思路. 本研究建立的联合建模与分析方法可扩展至高密度物联网、工业无线控制等强时效需求场景, 未来将进一步探索多业务优先级调度与在线信道优化算法的融合设计.

参考文献

- [1] 刘吉臻, 王庆华, 胡阳, 等. 新型电力系统的内涵、特征及关键技术[J]. 新型电力系统, 2023, 1(1): 49-65.
LIU J Z, WANG Q H, HU Y, et al. Connotation, characteristics and key technologies of new power systems[J]. *New Type Power Systems*, 2023, 1(1): 49-65. (in Chinese)
- [2] STIRI S, CHAOUB A, GRILO A, et al. Hybrid PLC and LoRaWAN smart metering networks: Modeling and optimization[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2022, 18(3): 1572-1582.
- [3] SAMIR A, ELSAYED M, EL-BANNA A A A, et al. Performance of NOMA-based dual-hop hybrid powerline-wireless communication systems[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2022, 71(6): 6548-6558.
- [4] DE M B A DIB L, FERNANDES V, DE L FILOMENO M, et al. Hybrid PLC/wireless communication for smart grids and Internet of Things applications[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2018, 5(2): 655-667.
- [5] FILOMENO M L, DE CAMPOS M L R, POOR H V, et al. Hybrid power line/wireless systems: Power allocation for minimizing the average bit error probability[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2022, 70(2): 810-821.
- [6] XU K P, LI Z, YAN Y Y, et al. Adaptive load balancing for dual-mode communication networks in the power Internet of Things[J]. *Electronics*, 2023, 12(20): 4366.
- [7] 任毅, 祝恩国, 张海龙, 等. 双模通信网络分钟采集优化机制[J]. 电力信息与通信技术, 2024, 22(6): 28-34.
REN Y, ZHU E G, ZHANG H L, et al. Minute-level acquisition optimization mechanism in HDC network[J]. *Electric Power Information and Communication Technology*, 2024, 22(6): 28-34. (in Chinese)
- [8] CHEN Z X, ZHI L X, ZHAO X W, et al. Parallel access scheme for wireless and power line dual-connection communication[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2022, 71(7): 7997-8001.
- [9] CHEN Z X, ZHI L X, CHEN P R, et al. An MAC layer algorithm based on power line-wireless dual media channels and multiplexing[J]. *China Communications*, 2022, 19(10): 78-91.
- [10] KAUL S, GRUTESER M, RAI V, et al. Minimizing age of information in vehicular networks[C]//2011 8th Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks. Piscataway: IEEE, 2011: 350-358.
- [11] KAHRAMAN İ, KÖSE A, KOCA M, et al. Age of information in Internet of Things: A survey[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2024, 11(6): 9896-9914.
- [12] COSTA M, CODREANU M, EPHREMIDES A. On the age of information in status update systems with packet management[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2016, 62(4): 1897-1910.
- [13] 林志坚, 侯映, 曹晓晓, 等. 车联网中基于信息年龄价值的边缘缓存策略[J]. 电子学报, 2023, 51(12): 3410-3421.
LIN Z J, HOU Y, CAO X X, et al. Edge caching scheme based on value of information age in the Internet of vehicles[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2023, 51(12): 3410-3421. (in Chinese)
- [14] COSTA M, CODREANU M, EPHREMIDES A. Age of information with packet management[C]//2014 IEEE International Symposium on Information Theory. Piscataway: IEEE, 2014: 1583-1587.
- [15] AKBARI M, ASHTIANI F. Distribution of the peak age of information in a random access relay network[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2024, 73(5): 7262-7275.
- [16] ASVADI S, FARDI S, ASHTIANI F. Analysis of peak age of information in blocking and preemptive queueing policies in a HARQ-based wireless link[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2020, 9(9): 1338-1341.
- [17] LIU L, YANG H H, XU C, et al. On the peak age of information in NOMA IoT networks with stochastic arrivals[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2021, 10(12): 2757-2761.
- [18] HAN B, WOO B. Age of information and throughput in random access-based IoT systems with periodic updating[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2022, 11(4): 821-825.
- [19] CAO S N, JIA X D, GUO Y X. Peak age of information minimization in UAV-assisted cognitive relay networks[C]//2021 IEEE 94th Vehicular Technology Conference. Piscataway: IEEE, 2021: 1-5.
- [20] FENG X, FU S, FANG F, et al. Optimizing age of information in RIS-assisted NOMA networks: A deep reinforcement learning approach[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2022, 11(10): 2100-2104.
- [21] CAO J, ZHU X, JIANG Y F, et al. Information age-delay correlation and optimization with finite block length[J].

IEEE Transactions on Communications, 2021, 69(11): 7236-7250.

- [22] HE X Q, YOU C Q, QUEK T Q S. Age-based scheduling for mobile edge computing: A deep reinforcement learning approach[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2024, 23(10): 9881-9897.
- [23] LIEBEHERR J. Duality of the max-plus and Min-plus network calculus[J]. Foundations and Trends in Networking, 2017, 11(3/4): 139-282.
- [24] ZHANG Y X, MEI M Y, YAN D Q, et al. Age-of-event aware: Sampling period optimization in a three-stage wireless cyber-physical system with diverse parallelisms[J].

IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2024, 35(8): 1360-1372.

- [25] WANG L, FAN R F, HU H, et al. Age of information minimization for opportunistic channel access[J]. IEEE Transactions on Communications, 2024, 72(12): 7449-7465.
- [26] DOUSSELIN J. Zeros of linear combinations of Dirichlet L -functions on the critical line[EB/OL]. (2023-11-30) [2025-10-10]. <https://arxiv.org/abs/2311.10285>.
- [27] CHEN Z X, YU M, ZHANG Z K, et al. Power allocation algorithm based on Q-learning for two-way relaying system with dual-media parallel communication[J]. IET Signal Processing, 2023, 17(2): e12174.

作者简介



陈智雄 男,1983年8月出生于福建省莆田市.现为华北电力大学电子与通信工程系副教授、硕士生导师.主要研究方向为电力系统通信与信息处理、无线通信等.

E-mail: zxchen@ncepu.edu.cn



周振宇 男,1983年出生于河北省张家口市.现为华北电力大学教授、博士生导师.主要研究方向为智能电网信息通信技术、多模态电力物联网技术等.中国电子学会会员编号: E190020832S.

E-mail: zhenyu_zhou@ncepu.edu.cn



颜宇豪 男,2002年7月出生于重庆市.现为华北电力大学电子与通信工程系硕士研究生.主要研究方向为电力系统通信.

E-mail: yyhjadu@163.com