

6G时代信息新鲜度优先的无线网络设计

熊轲^{1,2}, 胡慧敏^{1,2}, 艾渤², 张煜³, 裴丽⁴

(1. 北京交通大学计算机与信息技术学院, 北京 100044; 2. 轨道交通控制与安全国家重点实验室, 北京 100044;
3. 国网能源研究院有限公司, 北京 102209; 4. 北京交通大学全光网与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044)

摘要: 物联网的发展催生了各类实时监测系统(如智能驾驶)和状态更新系统(如工业控制)的部署与应用。对于上述系统而言,信息新鲜度至关重要。若目的端接收的是过时信息,可能会降低系统决策的准确性和可靠性,并造成巨大的安全隐患。在未来6G网络中,信息新鲜度对信息更新应用将越来越重要。为了有效地刻画信息新鲜度,学术界提出了信息年龄(AoI, age of information)的概念。目前,AoI已迅速成为无线系统新的性能指标和研究热点。首先概述了AoI的研究历程,然后分析了在不同网络模型(如单用户网络、单跳网络和多用户网络等)中引入AoI的关键问题,最后对未来的研究趋势进行了展望。

关键词: 6G; 物联网; 信息新鲜度; 信息年龄

中图分类号: TN92

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.2020.00150

Information freshness orientated wireless network design for 6G

XIONG Ke^{1,2}, HU Huimin^{1,2}, AI Bo², ZHANG Yu³, PEI Li⁴

1. School of Computer and Information Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

2. State Key Laboratory of Rail Transit Control and Safety, Beijing 100044, China

3. State Grid Energy Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China

4. Key Laboratory of All Optical Network and Modern Communication Network of Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

Abstract: The development of the Internet of things has led to the deployment and application of various real-time monitoring systems (such as intelligent driving) and status update systems (such as industrial control). For the above systems, the freshness of information is particularly important. If the destination receives outdated information, it may reduce the accuracy and reliability of the system's decision-making and cause severe security risks. In the future 6G network, the freshness of information will become increasingly important for information update applications. In order to characterize the freshness of information effectively, the academic world has proposed the concept of age of information (AoI). Recently, AoI has quickly become a new performance index and research hotspot of wireless systems. Firstly the research history of information age was reviewed. Then, the key issues of AoI introduced in different network models (such as single-user networks, single-hop networks, and multi-user networks) were analyzed. Finally the future research trend was prospected.

Key words: 6G, Internet of things, information freshness, age of information

收稿日期: 2020-02-02; 修回日期: 2020-03-02

通信作者: 艾渤, Boai@bjtu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61725101, No.61671051, No.U1834210, No.61961130391); 英国皇家学会牛顿高级学者基金资助项目 (No.NA191006)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China under Grant (No.61725101, No.61671051, No.U1834210, No.61961130391), The Royal Society Newton Advanced Fellowship under Grant (No.NA191006)

1 引言

随着 5G 技术的发展与部署，越来越多的新兴物联网应用出现在人们的日常生活中，如智能家居、智慧交通、智慧健康等^[1-3]。在面向实时应用的物联网系统中，设备需要实时感知周围物理环境并监测系统状态，从而为智能决策和控制提供及时、有效的信息。与传统宽带业务承载的信息不同，大部分物联网应用传输的是携带传感器更新信息的短数据分组。这些信息可能是车辆瞬时加速度和位置，也可能是环境温度、土壤湿度、网络控制或决策系统的状态。对于此类时间敏感信息，若目的端获取的是过时信息，将会导致无效决策和错误控制，甚至带来系统性灾难^[4]。

根据 2019 年 9 月芬兰奥卢大学发布的全球首部 6G 白皮书^[5]的描述，6G 技术的关键指标包括：误差 10 cm 以内的室内定位精度和 1 m 以内的室外定位精度，100 Gbit/s~1 Tbit/s 的峰值传输速度，不超过 0.1 ms 的通信时延，超高可靠性和超高密度，太赫兹 (THz) 频段通信，超大网络容量等。5G 和 6G 典型应用场景如图 1 所示，5G 三大应用分别为：增强型移动宽带 (eMBB, enhanced mobile broadband)、低时延高可靠通信 (uRLLC, ultra reliable low latency communication)、海量物联网通信 (mMTC, massive machine type of communication)；6G 三大应用包括：超越“尽力而为”(BBE) 与高精度通信 (HPC)、融合多类网络 (ManyNets)、甚大容量 (VLC) 与极小距离通信 (TIC)。对照 5G 和 6G 三大应用场景^[6]可以看出，6G 网络涵盖 5G 网络所有可支持的应用，应用范围更广泛，涉及场景也更丰富。

6G 打造的万联网 (Internet of everything) 模式将会被广泛应用于智能交互、触觉互联、多感官混合现实、虚拟助理、身体域网络、机器间协同、全自动交通等场景。在这些场景及应用中，信息新鲜度 (freshness) 对系统极其重要，因此，信息新鲜度

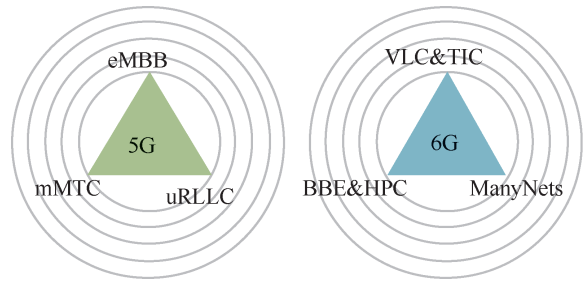


图 1 5G 和 6G 典型应用场景

在未来 6G 系统的设计和应用中将扮演重要的角色^[7-8]。如在自动驾驶汽车中将配备多种传感器，包括激光雷达、全景摄像头、实时定位仪、移动监测和惯性测量模块等，系统需要快速融合来自多个传感器的新鲜数据，判断行车环境，从而进行实时决策和控制，避免碰撞，从而保证安全行驶。

2 信息新鲜度的度量——信息年龄

数据通信示意图如图 2 所示，传统的数据通信更多关注的是信息传输的时延，即数据从发送时刻到被接收时刻之间的时间间隔；而实时更新应用则更关注信息的时效性，即数据从产生时刻到被使用时刻之间的时间间隔。与人类年龄相似，数据产生后，随着时间的单向流逝，数据信息的陈旧程度也随之单向增大，不断“老化”。为了使用户有良好的感知体验，信息产生后应尽可能及时地被使用，确保使用的信息尽可能新鲜。

网络传统的性能度量指标，如吞吐量和时延，并不能有效地刻画系统中的信息新鲜度，故不再适用于面向实时状态更新类应用的网络设计^[9]。

为了有效地刻画信息新鲜度，2011 年法国阿维尼翁大学的 Altman 等^[10]提出了信息老化的概念，用于定量研究互联网用户基于较小信息更新成本获取信息服务费的问题。同年，为了刻画车联网中远程系统获取的状态信息在更新过程中的新鲜程度，美国罗格斯大学的 Kaul 等^[11]正式提出了信息年龄 (AoI, age of information) 的概念。系统任意

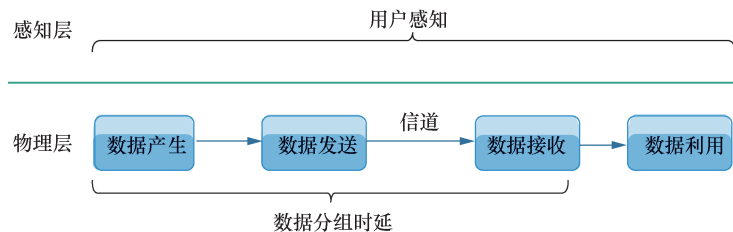


图 2 数据通信示意图

时刻的 AoI 为目的端接收的最新更新信息自产生后所经过的时间。

考虑由一对源一目的节点对构成的通信系统, 假定更新分组在 $t_1, t_2, \dots, t_i, \dots$ 时刻生成, 相应地, 在 $t'_1, t'_2, \dots, t'_i, \dots$ 时刻到达目的端, 在任意 t 时刻, 目的端接收最新更新的索引为

$$k = \max \{i \mid t'_i \leq t\} \tag{1}$$

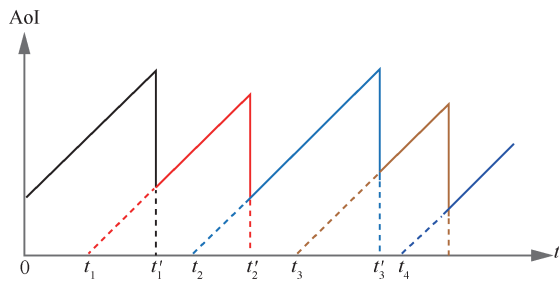
最新更新产生的时间戳为

$$U(t) = t_k \tag{2}$$

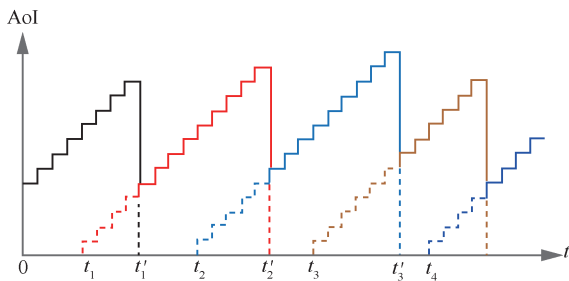
在任意 t 时刻, AoI 的数学表示为^[12]

$$\Delta(t) = t - U(t) \tag{3}$$

年龄变化如图 3 所示, 给出了系统 AoI 随时间变化的一组示例, 其中, 图 3(a) 为 AoI 随时间连续变化的示例, 图 3(b) 为 AoI 随时间离散变化的示例, 实线表示相应时刻系统的 AoI。



(a) 连续 AoI



(b) 离散 AoI

图 3 年龄变化

需要说明的是, 传统的分组时延是以分组为中心的度量, 即分组时延仅考虑了系统中每个分组所经历的时延。从图 3 可以看出, 第 2 个数据分组的时延为 $D_2 = t'_2 - t_2$, 而系统的 AoI 为纵轴的值, 除数据分组被接收时刻外明显大于 D_2 , 因此, 数据分组的时延小并不表示系统的 AoI 也小。因此, AoI 已成为继吞吐量、时延等传统网络性能指标外一个新的网络性能指标, 并且逐渐受到广泛重视。

3 基于 AoI 的网络性能分析

作为衡量系统性能新的重要指标, AoI 近年来引起了国内外学者越来越多的关注^[5-20], AoI 相关研究分类如图 4 所示。目前, 关于 AoI 的研究主要集中在 7 个方面, 如图 4 所示。

3.1 不同排队系统的 AoI

为了适配链路传输速率和终端信息处理能力, 通信网络的源端和传输链路上的节点一般会部署一定的缓存队列对数据分组进行排队。不同的服务准则、分组到达率、服务速率以及服务器数量都会影响数据的新鲜度, 因此, 需要对不同排队网络中的 AoI 进行分析。

为了研究分组到达率、服务速率以及服务器数量对系统 AoI 的影响, 文献[13-19]对各种排队网络中的平均 AoI 及其性能变化规律进行了探讨。文献[13]研究了具有混合自动重发请求 (HARQ, hybrid automatic repeat request) 功能的随机更新传输系统在 M/G/1/1 队列 (即系统的输入流满足泊松分布, 服务时间满足一般分布, 系统中只有一个服务器且排队的队长最大容量为 1) 模型下的平均 AoI 和最优状态更新到达率, 研究发现, 无限增量冗余 HARQ 系统优于固定冗余 HARQ 系统; 文献[14]研究了信息更新网络在先到先服务 GI/GI/1 队列 (即系统的输入流满足任意分布, 服务时间满足任意分布, 系统中只有一个服务器)、M/GI/1 队列 (即系统的输入流满足泊松分布, 服务时间满足任意分布, 系统

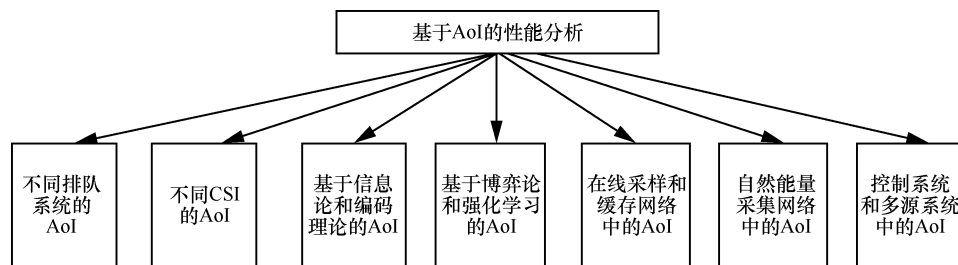


图 4 AoI 相关研究分类

中只有一个服务器)和 GI/M/1 队列(即系统的输入流满足任意分布,服务时间满足指数分布,系统中只有一个服务器)模型下的平均 AoI 和峰值 AoI,并给出了显式表达式;文献[15]研究了离散时间 G/G/1 队列(即系统的输入流满足一般分布,服务时间满足一般分布,系统中只有一个服务器)的平均 AoI 和峰值 AoI,并推导出了相应的显式表达式;文献[16]研究了具有多流更新源的 M/G/1/1 抢占队列(即系统的输入流满足泊松分布,服务时间满足一般分布,系统中只有一个服务器,排队的队长最大容量为 1 且服从后到先服务规则)中的平均 AoI 和峰值 AoI,结果表明,为了减小 AoI,源节点需要以相同速率生成所有流;文献[17]研究了 Tandem 队列的平均 AoI,结果表明,网络跳数和数据到达率对系统 AoI 有重要影响;文献[18]采用 ARQ 协议、无限增量冗余和固定冗余的 HARQ 协议,研究了 M/G/1 队列系统中信道编码块长度对数据新鲜度的影响,结果表明,在 ARQ 和固定冗余 HARQ 方案中存在一个最优编码速率,使得信息的平均 AoI 和峰值 AoI 最小;文献[19]研究了异构用户在先到先服务排队网络中的 AoI,结果表明,零等待策略和最大采样策略都不是最优策略。

针对不同排队系统中 AoI 的讨论,主要体现在状态更新的到达模型、服务模型以及服务器数量上。研究表明,与先到先服务调度策略相比,后到先服务调度策略的使用时间更短,但哪种调度策略可获得最小的 AoI 以及在何种条件下可以确定年龄最优性结果尚不明确。

3.2 不同 CSI 的 AoI

在无线通信系统中,无线链路性能、编码调制方式、参数调整结果和策略优化结果都与信道状态信息(CSI, channel state information)密切相关。获取的 CSI 实时性越高,则越能准确反映信道的真实物理特性,从而提高系统建模、分析的准确性。因此,需要对信道不同 CSI 情况下的 AoI 进行分析。

为了探究无线通信系统中实时 CSI 对无线链路性能的影响,文献[20-25]对 CSI 的 AoI 进行了研究。文献[20]基于有限状态马尔可夫信道信息的 AoI,研究分析了信道估计误差的概率,结果表明,信道信息的 AoI 越小,则信道估计错误概率越小。文献[21-25]基于不同信道假设研究了 CSI 的 AoI 对不同无线链路性能的影响。文献[21]采用 Gilbert-Elliot 信道模型,得到了使用周期性 CSI 反馈的分析结果,并研

究了将多个正交资源块分配给通信链路时,CSI 的 AoI 对信道的影响。文献[22]研究了具有时变互反信道的全连通时隙无线网络中全局 CSI 的平均时效性,通过建立过时性框架,推导出了平均过时性的封闭表达式。文献[23]提出了一种分析 CSI 陈旧性的新框架,包括陈旧性下界、可达上界以及在具有分组传输的全连接无线网络中用于全局信道状态估计和分发的有效协议。文献[24-25]针对不同的时变信道,分析得到 CSI 的最大和平均陈旧度的下界。

6G 网络中,新兴信息及应用对无线链路状态信息新鲜度和信息传输提出了更高的要求,链路 CSI 的 AoI 越高,即 CSI 越陈旧,则信道估计误差率越大,无线链路的性能也越差。因此,需要在与信息传输资源折中的前提下,尽力降低 CSI 的 AoI。

3.3 基于信息论和编码理论的 AoI

AoI 作为信息系统的性能指标之一,为网络设计提供了新方向,同时也为信息理论的研究提供了新演进思路。如何基于信息论和编码理论对 AoI 相关理论进行拓展是基础性研究问题,因此,基于信息论和编码理论的 AoI 相关研究受到了学术界的广泛关注。

文献[26-27]基于信息论研究 AoI。其中,文献[26]提出了一个源节点更新策略,并得到了在该策略下可达信息率与可达平均 AoI 之间的折中;文献[27]从互信息角度提出了一种新的信息新鲜度的度量,发现了信息的老化速率随着互信息增加而减少的规律。文献[28-35]考虑了信道编码对系统 AoI 的影响。其中,文献[28]比较了无限增量冗余系统和固定冗余系统的平均 AoI;文献[29]通过比较有反馈和无反馈的差分编码与真实状态编码的时效性,推断出反馈对差分编码减小 AoI 至关重要;文献[30]研究了冗余编码和长码字带来的解码时延对 AoI 的影响规律;文献[31]表明了与传统固定编码块长度的编码方法相比,基于信道状态自适应调整编码块长度可获得更低的平均 AoI;文献[32]研究了资源约束下基于混合 ARQ 的擦除信道的平均 AoI;文献[33-34]基于 AoI 分别获得信道编码方案和信源编码方案;文献[35]研究了通信系统中信息的时延和峰值 AoI 的分布问题,当数据分组未被正确解码时,会被重新发送,该文献通过采用加性高斯白噪声通道的有限编码块长度结果来描述时延违规和峰值违规概率,发现存在最优的编码块长度可最大限度地减小时延和峰值 AoI。

在无线通信网络中,信道的不可靠性会导致数据丢失,降低系统整体传输性能,因此,在源端对当前状态进行编码是一种常用的有效方案。研究表明,编码方案对系统 AoI 有重要的影响。

3.4 基于博弈论和强化学习的 AoI

对于大规模复杂网络系统,需要采用分布式控制和基于统计学习的优化设计方法。因此,近年来博弈论和人工智能方法在网络优化设计中不断得到应用,学者们也开始基于博弈论和人工智能方法优化不同系统的 AoI 性能。

文献[36]通过构建非零和双人博弈讨论了干扰对 AoI 的影响,结果表明,在纳什均衡下,双方的能量消耗是相同的,且 Stackelberg 策略优于纳什策略;文献[37]研究了基于动态干扰博弈的实时更新系统的最小 AoI;文献[38]基于博弈论研究了专用短程通信 DSRC 与 Wi-Fi 共存系统的最小 AoI;文献[39]通过构造二人“干扰”博弈模型,解决了干扰对信息新鲜度的影响。为了应对大规模复杂网络系统对高性能的要求,文献[40-42]基于强化学习方法研究了无线网络的 AoI。其中,文献[40]基于强化学习设计了对网络条件和分组到达过程具有弹性的调度决策,以便最小化系统 AoI。文献[41]在网络拓扑结构未知的情况下,利用深度强化学习的方法来最小化 AoI,通过对仿真网络学习模型的评估,证明了该方法可以推广到具有未知时延分布的任何实际网络中;文献[42]研究了机器学习在解决网络资源分配/调度问题中的应用方法,提出了一种基于强化学习算法来解决 uRLLC 网络的 AoI 最小化问题,结果表明,所提出的算法优于最早接近 deadline 优先策略(假设信息的年龄有 deadline 约束)和最优平稳随机策略^[72]。

特别地,当网络中存在恶意竞争者时,可利用博弈论解决系统 AoI 最小化问题,研究表明,Stackelberg 策略优于纳什策略。另外,强化学习方法可以有效解决网络参数在未知情况下的 AoI 最小化问题。

3.5 在线采样和缓存网络中的 AoI

源端数据的采样模式、频率与信道质量间的匹配度,对接收端数据的新鲜度有重要影响。发送端何时采样、以何种方式采样与接收端接收的样本的新鲜度密切相关。

文献[43-44]基于 AoI 研究了在随机时延信道对一个 Wiener 过程进行采样的问题,目的端对随机

接收样本信号进行实时估计。研究表明,最小均方估计误差(MMSE, minimum mean squared error)的最优采样策略的估计误差远小于年龄最优采样、零等待采样和经典均匀采样;文献[45]在文献[43-44]的基础上研究了平稳高斯—马尔可夫过程(也称为 Ornstein-Uhlenbeck 过程)的采样问题,将最优抽样问题转化为具有不可数状态空间的约束连续时间马尔可夫决策过程,得到了使 Ornstein-Uhlenbeck 过程的估计误差最小的最优采样策略。

随着边缘计算、雾计算技术的兴起,未来 6G 网络边缘将部署具有缓存和计算功能的节点,缓存将对 AoI 有重要影响。文献[46]提出了 AoI 最优的缓存更新机制,指出缓存更新与内容流行度平方根成比例;文献[47]基于缓存网络架构提出了一种在车载网络中,实现低 AoI 和低时延的内容交付方案;文献[48]研究了移动缓存系统中内容流行度与 AoI 之间的相互影响关系,指出在移动缓存模型中,内容请求的速率取决于信息的流行度和新鲜度。

综上所述,系统设计目标不同对应的最优采样策略也不同。边缘计算、雾计算的部署有助于在满足系统不同的计算、通信和缓存设计需求的前提下,减小系统 AoI,提高网络性能。

3.6 自然能量采集网络中的 AoI

当前,5G 网络的能耗问题日益受到更多人的关注。在未来 6G 网络中,系统能耗将仍然是通信网络设计关注的主要指标。基于自然能量采集的网络设计是实现绿色无线通信系统的重要途径,近年来,大量工作研究了基于 AoI 的自然能量采集无线网络。

文献[49]研究了能量采集传感器网络最小化 AoI 的问题,其中,网络中的传感器配备一个容量有限的电池,在考虑随机电池充电模型和增量电池充电模型的情况下,结果表明,最优更新策略是与能量有关的阈值结构(当 AoI 不小于阈值时选择更新,否则不更新),且最佳阈值随电池中的可用能量单调减小;文献[50-51]以最小化系统 AoI 为目标,研究了能量采集传感器通过擦除信道发送状态更新到目的端的更新策略,结果表明,最优更新策略具有阈值结构,当 AoI 不小于阈值时选择更新,否则不更新;文献[52]研究了两跳能量采集无线网络中,离线和在线两种传输机制下最小化系统 AoI 的传输方案;文献[53]研究了无线能量采集实时更新

传输系统误码最小条件下的 AoI 性能；文献[54]研究了电池容量受限的能量采集网络中 AoI 与能量的折中，指出最小化平均 AoI 和求解最高能量状态的最佳阈值问题等价；文献[55]研究了电池只有随机充电功能的能量采集网络中最小化 AoI 的在线传输调度策略，结果表明，最优传输调度策略是多阈值结构，且阈值取决于可用能量；文献[56]研究了能量采集通信系统中，电池容量分别为无限、有限和一个单位情况下最小化 AoI 的最优状态在线更新策略；文献[57]在能量源受能量因果关系约束的情况下，研究了使系统的 AoI 最小的更新策略；文献[58]研究了受时变能量限制和电池限制的传感器网络中的 AoI，结果表明，对于任何有限的能量到达率，都有一个正的传输年龄阈值，且信息传输速率低于能量到达率。

能量采集网络中的设备一般配备有电池，且能量的采集与使用存在因果关系，研究发现，能量采集网络中的 AoI 受能量到达率、电池大小、用电模式等因素的影响。

3.7 控制系统和多源系统中的 AoI

在多源系统中，源之间的调度顺序也会影响接

收端接收数据的新鲜度，因此，基于 AoI 的多源调度策略也得到了广泛研究。文献[59]研究了无线网络中基于 AoI 的多用户调度问题，研究表明，基于 Head-of-Line-age 的调度算法在多个动态流的网络中可实现吞吐量最优；文献[60]研究了请求—响应系统中有效 AoI 最小化的调度问题，分别针对静态和动态请求模型提出了请求感知调度策略，结果表明，在两种情况下，主动服务用户请求可以减少平均有效 AoI。

此外，有部分学者分析了控制系统中的 AoI 性能。文献[61]研究了高斯线性控制系统的因果率失真函数，研究发现，信息老化导致失真更高；文献[62-63]指出，在产生控制系统状态需求的采样时间与状态过程无关的情况下，系统状态估计误差是 AoI 的一个非递减函数。

在多源系统中，调度策略对最小化系统平均 AoI 尤为重要，利用传统的动态规划寻找 AoI 最优策略时，计算复杂度随源节点数目呈指数级增长，故传统方法仅适用于规模较小的网络。因此，针对大规模网络，需要研究低复杂度的调度策略。

表 1 基于 AoI 的网络设计对比

现有研究	网络结构					研究内容及其他设置		
	源节点数目		网络跳数			排队管理	调度策略	采样模型
	单源	多源	单跳	两跳	多跳			
文献[12-13]	√	—	√	—	—	—	—	√
文献[64-65,70]	—	√	√	—	—	—	√	√
文献[66]	√	—	√	—	—	—	√	—
文献[67-68,71-72]	—	√	√	—	—	—	√	—
文献[69,92]	—	√	√	—	—	√	—	—
文献[73-78]	√	—	√	—	—	√	—	√
文献[79-80,86]	√	—	—	√	—	—	—	√
文献[81,90]	√	—	—	—	√	√	—	√
文献[82,84,91]	—	√	—	—	√	—	√	—
文献[59,83]	—	√	√	—	—	—	√	—
文献[85]	√	—	—	—	√	√	—	—
文献[87-89]	—	√	—	√	—	—	√	—

4 基于 AoI 的网络优化设计

综上所述，未来基于信息新鲜度的信息更新系统应用广泛，且 AoI 已成为非常重要的网络性能度量指标。因此，随着 5G 网络和 6G 网络的发展，基于 AoI 的网络设计将变得越来越重要。本节从网络结构角度出发，介绍基于 AoI 的网络设计研究，以期为未来的网络研究提供有价值的参考，基于 AoI 的网络设计对比如表 1 所示。

基于 AoI 的多源网络系统的简单模型如图 5 所示，为了避免在数据传输过程中发生碰撞导致 AoI 性能下降，多个用户不能同时发送数据分组到目的端，即在任何给定的时刻最多只有一个链接可以被激活，因此，需要研究有效的调度策略^[67-68,71-72]来控制信道资源如何分配给网络中的不同用户。

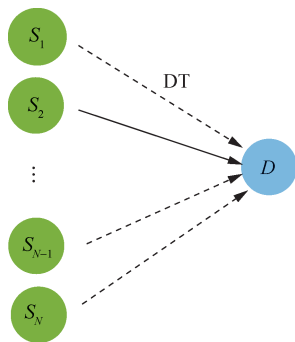


图 5 基于 AoI 的多源网络系统的简单模型

文献[72]尝试在满足最小吞吐量要求的情况下最小化系统 AoI 的加权和期望。假设时间离散，且在每个时隙最多选择一个用户进行数据传输（传输不一定成功），由于合理分配信道资源能够提高系统的 AoI 性能，提出了 3 个低复杂度调度策略，分别为平稳随机策略、惠特尔指数策略和最大权重策略，并计算得到 AoI 下界作为基准。调度策略对比如图 6 所示^[72]，结果表明，在 3 种调度策略中，最大权重策略在 AoI 和吞吐量方面都优于其他策略，且在仿真的每个网络配置中都能获得接近最优的性能。这是因为平稳随机策略根据固定的调度概率随机选择节点，惠特尔指数策略根据阈值结构选择节点，而最大权重策略使用来自网络的反馈指导调度决策。

基于 AoI 的单源、单跳网络系统模型如图 7 所示，源节点需要将产生或监测的数据发送到目的端。

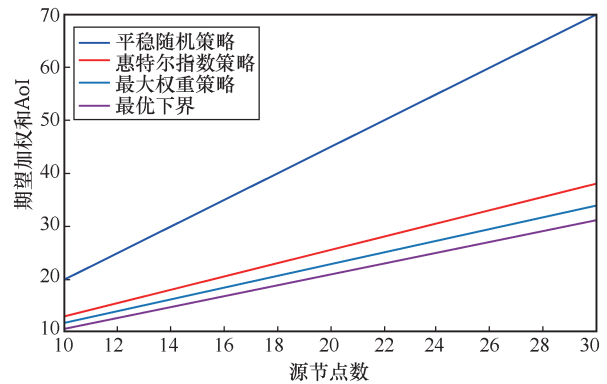


图 6 调度策略对比

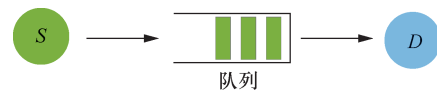


图 7 基于 AoI 的单源、单跳网络系统模型

当源端和传输链路节点上存在信息排队的时候，不同排队系统的到达率、服务率以及服务器数量等会极大地影响数据新鲜度。为了最小化系统平均 AoI 或峰值 AoI，研究不同排队系统的 AoI^[74-78,81,90]是基础性问题。

文献[78]研究了单源、单跳网络中的 AoI，源节点将观察到的随机进程样本以分组的形式通过无线信道传输到目标节点。假设数据分组按照泊松过程到达，服务时间服从指数分布，为最小化系统的 AoI 提出 3 种分组管理机制。1) 假设在传输数据分组的过程中，到达的样本被源节点丢弃，否则，到达源节点的样本被立即发送到目的地。该方案建模为 M/M/1/1 队列。2) 假设单个数据分组可以保留在队列中，如果服务器正忙于传输另一个数据分组，则等待传输；如果服务器空闲，则立即传输下一个数据分组，该数据分组管理模型作为 M/M/1/2 队列。3) 假设单个分组可以被缓存在缓冲区中等待传输，且在新数据分组到达时替换等待传输的数据分组。该数据分组管理模型作为 M/M/1/2* 队列。分组队列管理如图 8 所示^[78]，在缓冲区中进行分组替换的管理机制与不进行替换且服务器数量相同的机制相比，传输数据分组所花费的平均时间更短。与此同时，随着状态更新消息到达率的增加，系统峰值 AoI 逐渐减小，最终趋于平稳。

根据表 1 所列出的基于 AoI 的网络设计对比如可以看出，多源网络主要研究最优调度策略，实际上采样与排队对多源系统也有重要影响，目前尚无明确研究结论。

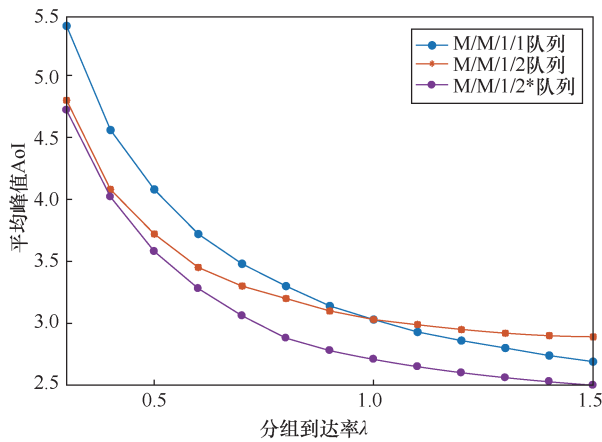


图 8 分组队列管理

5 未来可能的研究方向

5.1 无线射频能量采集网络中的 AoI

AoI 作为重要的性能指标之一, 在能量采集网络中得到了广泛关注, 包括第 3.6 节所介绍的基于传统自然能源的能量采集网络。由于与传统自然能量采集相比, 射频 (RF, radio frequency) 能量采集受天气和地理位置等外部自然条件的影响小, 其信息和能量的发射、传输和采集皆可为人工控制, 且部署成本低, 适合安装在移动设备终端和传感器节点。

随着 6G 网络的发展, 越来越多的物联网设备 (如传感器) 将被用于监测状态更新, 这些设备可能被部署在人迹罕至的险恶环境或嵌入建筑物墙体等, 难以实现有线供电或人工定期电池更换, 采用 RF 能量采集能够很好地满足这些场景的部署需求。尽管如此, 无线 RF 能量采集网络中 AoI 的研究存在很多挑战, 具体如下。

1) RF 能量传输与信息传输之间存在折中。RF 能量传输与信息传输都需要占用无线网络资源, 由于信息与能量的物理表征和度量指标不一致, 两者不能同时达到最优值, 存在性能的折中, 如何准确揭示并充分利用这种折中是 RF 能量采集网络中 AoI 研究面临的挑战之一。

2) RF 能量采集节点的能量采集与使用之间存在因果关系。在 RF 能量采集网络中, 节点需要先采集能量, 等收集足够的能量后才开始传输信息。而能量的采集与无线链路的质量有关。无线链路质量的随机性为能量采集数量的估计和使用带来了困难。因此, 如何在满足这种因果关系的制约下设计出有效的传输策略是研究 RF 能量采集网络中 AoI 需要面临的又一挑战。

3) RF 信号的干扰利用和抑制同时存在。RF 信号携带能量的同时可以传输信息, 在多用户系统中, 网络节点接收到强的 RF 信号, 对能量用户来说可以采集更多的能量, 但对信息用户来说会产生强干扰。即 RF 信号对能量用户是有利的, 对信息用户是有害的。如何在同一系统同时处理好干扰抑制和干扰利用的问题, 是研究 RF 能量采集网络中 AoI 面临的第 3 个挑战。因此, 研究无线 RF 能量采集网络中的 AoI^[80,86]有巨大的探索空间。

5.2 无人机网络中的 AoI

为了满足未来无所不在的全覆盖网络需求, 除了地面通信网络以外, 6G 网络还需要基于卫星和无人飞行器来满足覆盖和容量需求, 从而形成空地一体网络。由于无人机具有很好的灵活性和机动性, 学术界和工业界广泛认为可以利用无人机辅助户外信息更新系统来收集数据。如在源节点离目标节点较远的情况下, 无人机可以作为中继节点, 首先给传感器节点发送能量, 然后从传感器节点收集数据, 从而大幅度减小了数据的陈旧程度。因此, 研究无人机网络中的 AoI^[87-89]具有重要意义。然而, 研究无人机网络中的 AoI 面临着如下挑战。

1) 无人机的部署和飞行轨迹的优化问题。无人机作为空中基站/中继, 在大规模网络中, 无人机初始部署和飞行轨迹都对系统 AoI 的影响很大。与此同时, 无人机飞行轨迹的规划还需要满足无人机完成任务的需求和自身资源的约束, 如何实现对目标和多约束条件下无人机的高效部署以及飞行轨迹的动态规划, 是研究无人机网络中 AoI 面临的挑战之一。

2) 无人机的能耗问题。目前, 大部分无人机采用电池供电, 续航时间有限, 在实际操作中, 无法长时间持续工作。对于大跨度作业, 无人机功耗问题就更为明显。如何同时考虑无人机的机械能耗、通信能耗、信息处理能耗, 设计有效的低功耗和能量有效性系统运行方案是研究无人机网络中 AoI 面临的又一挑战。

3) 无人机的通信安全问题。在无人机系统中, 无人机之间、无人机与地面设备之间暴露的无线通信链路都很容易遭受信号干扰和窃听等攻击, 致使数据丢失或被窃取, 且目的端难以收到预想的新鲜数据, 从而恶化系统的 AoI 性能。如何在确保无人机通信安全的前提下, 提升无人机网络的 AoI 性能是面临的第 3 个挑战。

5.3 太赫兹通信中的 AoI

随着用户数量和智能设备数量的增加,海量终端需要由有限的频谱带宽提供服务,导致终端的服务质量下降。开放新的通信频段是解决这一问题的可行方法,因此,太赫兹通信技术将是未来 6G 通信技术发展的一个重要方向^[5]。太赫兹占据了 300 GHz~3 THz 频段的超宽频谱,且具有波束窄、方向性好、抗干扰能力强、能量效率高、传输容量大、安全性高、穿透性强以及频率高等优势。太赫兹频段用于移动通信具有不可替代的优势,也拥有极大的发展潜力和应用前景,然而,也面临着多方面的挑战。

1) 太赫兹通信具有高度定向性。太赫兹通信是高度定向的波束信号传输,针对这种高度定向传输的信号特征。定向性具有能量汇聚的作用,但覆盖性和对移动的支持性相对于微波通信都有极大的降低,如何重新设计和优化相关机制是研究太赫兹网络面临的挑战之一。

2) 大尺度衰落特性。太赫兹信号是阴影敏感信号,墙面、人体对太赫兹通信的影响较大,相比较而言,湿度/降雨衰落对太赫兹通信影响较小。因此,如何选择对太赫兹通信影响小的频段是研究太赫兹网络面临的又一挑战。

3) 太赫兹通信系统的信道波动速度快、连接间歇性高。太赫兹频段具有较小的相干时间以及较大的多普勒扩展,与蜂窝系统所采用的频段相比,有很强的波动性,这意味着太赫兹通信系统的连接不稳定,出现高度间歇性。如何解决太赫兹通信系统信道波动速度快、连接间歇性高的问题,是研究太赫兹网络面临的第 3 个挑战。

4) 太赫兹频段处理功耗大。太赫兹频段巨量天线和大带宽的量化需要极高的分辨率,如何设计并实现低成本、低功耗的设备是研究太赫兹网络面临的第 4 个挑战。

6G 网络对时延和数据新鲜度的要求极高。太赫兹通信技术是未来 6G 通信技术发展的一个重要方向,因此,研究太赫兹网络通信中的 AoI 有极大的探索空间和创新机遇。

5.4 基于 AoI 的专用系统的设计

在未来 6G 网络中,虚拟现实、智能辅助驾驶、智能工业控制将进一步发展。不同应用的具体业务场景的可用资源和系统限制不同,如虚拟现实需要带宽大,智能辅助驾驶需要实时在线计算能力强,智能工业控制并发性高、调度复杂,因此,对应的

网络系统设计也大不相同。针对具体的应用,需要具体分析和研究。针对不同的应用进行具体分析和研究存在一定挑战。

1) 基于 AoI 的专用系统的通信安全问题。专用系统的网络需求与通用网络不同,网络安全性要求也不同,一般专用系统的通信安全性要求更高。因此,如何设计并实现满足专用系统高通信安全需求的方案是研究基于 AoI 的专用系统设计面临的挑战之一。

2) 基于 AoI 的专用系统的通信效率问题。专用系统对通信效率的要求极高,如何设计并实现满足专用系统高通信效率需求的方案是研究基于 AoI 的专用系统设计面临的又一挑战。

6 结束语

本文基于 6G 的需求和 AoI 的概念,首先从理论和方法层面介绍了相关研究,然后从网络设计层面分析总结了现有研究主要关注的系统模型和研究内容,最后结合 6G 网络的特点对未来研究趋势进行了展望,为下一步研究提供了参考思路。

参考文献:

- [1] HU Y Y, CHEN C L, HE J P, et al. IoT based proactive energy supply control for connected electric vehicles[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(5): 7395-7405.
- [2] PHILIP B V, ALPCAN T, JIN J, et al. Distributed real-time IoT for autonomous vehicles[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(2): 1131-1140.
- [3] ALABDULATIF A, KHALIL I, FORKAN A R M, et al. Real-time secure health surveillance for smarter health communities[J]. IEEE Communications Magazine, 2019, 57(1): 122-129.
- [4] MÖSTL M, SCHLATOW J, ERNST R. Synthesis of monitors for networked systems with heterogeneous safety requirements[J]. IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, 2018, 37(11): 2824-2834.
- [5] 奥卢大学. 6G 无线智能无处不在的关键驱动与研究挑战[S]. 6G 白皮书, 2019. Oulu University. Key drivers and research challenges of 6G wireless intelligence everywhere[S]. 6G White Paper, 2019.
- [6] 赵亚军, 郁光辉, 徐汉青. 6G 移动通信网络: 愿景、挑战与关键技术[J]. 中国科学: 信息科学, 2019, 49: 963-987. ZHAO Y J, YU G H, XU H Q. 6G mobile communication networks: vision, challenges, and key technologies[J]. Scientia Sinica (Informationis), 2019, 49: 963-987.
- [7] BARBIERATO L, ESTEBSARI A, PONS E, et al. A distributed IoT infrastructure to test and deploy real-time demand response in smart grids[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(1): 1136-1146.
- [8] SHAO S H, KHREISHAH A, KHALIL I. Enabling real-time indoor

- tracking of IoT devices through visible light retroreflection[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2020, 19(4): 836-851.
- [9] KAM C, KOMPELLA S, EPHREMIDES A. Experimental evaluation of the age of information via emulation[C]//MILCOM 2015 IEEE Military Communications Conference. IEEE, 2015: 1070-1075.
- [10] ALTMAN E, EL-AZOUZI R, MENASCHE D S, et al. Forever young: aging control for smartphones in hybrid networks[J]. *ACM Sigmetrics Performance Evaluation Review*, 2010, 39(2): 68.
- [11] 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. IEEE, 2011: 350-358.
- [12] KAUL S, YATES R, GRUTESER M. Real-time status: how often should one update?[C]//2012 Proceedings IEEE INFOCOM. IEEE, 2012: 2731-2735.
- [13] NAJM E, YATES R D, SOLJANIN E. Status update through M/G/1 queues with HARQ[C]//2017 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT). IEEE, 2017: 131-135.
- [14] INOUE Y, MASUYAMA H, TAKINE T, et al. The stationary distribution of the age of information in FCFS single-server queues[C]//2017 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT). IEEE, 2017: 571-575.
- [15] TRIPATHI V, TALAK R, MODIANO E. Age of information for discrete time queues[J]. arXiv: 1901.10463v1, 2019.
- [16] NAJM E, TELATAR E. Status updates in a multi-stream M/G/1 preemptive queue[C]//IEEE INFOCOM 2018-IEEE Conference on Computer Communications Workshops. IEEE, 2018: 124-129.
- [17] KAM C, MOLNAR J P, KOMPELLA S. Age of information for queues in tandem[C]//IEEE Military Communications Conference (MILCOM). IEEE, 2018: 1-6.
- [18] SAC H, BACINOGLU T, UYSAL-BIYIKOGLU E, et al. Age-optimal channel coding blocklength for an M/G/1 Queue with HARQ[C]//2018 IEEE 19th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC). IEEE, 2018: 1-5.
- [19] STAMATAKIS G, PAPPAS N, TRAGANITIS A. Optimal policies for status update generation in a wireless system with heterogeneous traffic[J]. arXiv: 1810.03201v1, 2018.
- [20] COSTA M, VALENTIN S, EPHREMIDES A. On the age of channel information for a finite-state Markov model[C]//2015 IEEE International Conference on Communications (ICC). IEEE, 2015: 4101-4106.
- [21] COSTA M, VALENTIN S, EPHREMIDES A. On the age of channel state information for non-reciprocal wireless links[C]//2015 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT). IEEE, 2015: 2356-2360.
- [22] FARAZI S, KLEIN A G, BROWN D R. On the average staleness of global channel state information in wireless networks with random transmit node selection[C]//2016 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). IEEE, 2016: 3621-3625.
- [23] KLEIN A G, FARAZI S, HE W, et al. Staleness bounds and efficient protocols for dissemination of global channel state information[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2017, 16(9): 5732-5746.
- [24] FARAZI S, KLEIN A G, BROWN D R. Bounds on the age of information for global channel state dissemination in fully-connected networks[C]//2017 26th International Conference on Computer Communication and Networks (ICCCN). IEEE, 2017: 1-7.
- [25] FARAZI S, BROWN D R, KLEIN A G. On global channel state estimation and dissemination in ring networks[C]//2016 50th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers. IEEE, 2016: 1122-1127.
- [26] BAKNINA A, OZEL O, YANG J, et al. Sending information through status updates[C]//2018 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT). IEEE, 2018: 2271-2275.
- [27] SUN Y, CYR B. Information aging through queues: a mutual information perspective[C]//2018 IEEE 19th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC). IEEE, 2018: 1-5.
- [28] YATES R D, NAJM E, SOLJANIN E, et al. Timely updates over an erasure channel[C]//2017 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT). IEEE, 2017: 316-320.
- [29] BHAMBAY S, POOJARY S, PARAG P. Differential encoding for real-time status updates[C]//2017 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). IEEE, 2017: 1-6.
- [30] PARAG P, TAGHAVI A, CHAMBERLAND J F. On real-time status updates over symbol erasure channels[C]//2017 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). IEEE, 2017: 1-6.
- [31] ZHONG J, YATES R, SOLJANIN E. Backlog-adaptive compression: age of information[C]//2017 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT). IEEE, 2017: 566-570.
- [32] CERAN E T, GUNDUZ D, GYORGY A. Average age of information with hybrid ARQ under a resource constraint[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2019, 18(3): 1900-1913.
- [33] ARAFA A, BANAWAN K, SEDDIK K G, et al. On timely channel coding with hybrid ARQ[J]. arXiv: 1905.03238, 2019.
- [34] MAYEKAR P, PARAG P, TYAGI H. Optimal lossless source codes for timely updates[C]//2018 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT). IEEE, 2018: 1-5.
- [35] DEVASSY R, DURISI G, FERRANTE G C, et al. Delay and peak-age violation probability in short-packet transmissions[C]//2018 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT). IEEE, 2018: 2471-2475.
- [36] NGUYEN G D, KOMPELLA S, KAM C, et al. Impact of hostile interference on information freshness: a game approach[C]//2017 15th International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks (WiOpt). IEEE, 2017: 1-7.
- [37] XIAO Y Z, SUN Y. A dynamic jamming game for real-time status updates[C]//IEEE INFOCOM 2018-IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS). IEEE, 2018: 354-360.
- [38] GOPAL S, KAUL S K. A game theoretic approach to DSRC and Wi-Fi coexistence[C]//IEEE INFOCOM 2018-IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS). IEEE, 2018: 565-570.
- [39] NGUYEN G D, KOMPELLA S, KAM C, et al. Information freshness over an interference channel: a game theoretic view[C]//IEEE INFOCOM 2018-IEEE Conference on Computer Communications. IEEE, 2018: 908-916.
- [40] BEYTUR H B, UYSAL E. Age minimization of multiple flows using reinforcement learning[C]//2019 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC). IEEE, 2019:

- 339-343.
- [41] SERT E, SONMEZ C, BAGHAEE S, et al. Optimizing age of information on real-life TCP/IP connections through reinforcement learning[C]//2018 26th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU). IEEE, 2018: 1-4.
- [42] ELGABLI A, KHAN H, KROUKA M, et al. Reinforcement learning based scheduling algorithm for optimizing age of information in ultra reliable low latency networks[J]. arXiv: 1811.06776v2, 2018.
- [43] SUN Y, POLYANSKIY Y, BIYIKOGLU E U. Remote estimation of the wiener process over a channel with random delay[C]//2017 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT). IEEE, 2017: 321-325.
- [44] SUN Y, POLYANSKIY Y, BIYIKOGLU E U. Sampling of the wiener process for remote estimation over a channel with random delay[C]//2017 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT). IEEE, 2019.
- [45] ORNEE T Z, SUN Y. Sampling for remote estimation through queues: age of information and beyond[C]//2019 International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks (WiOpt). IEEE, 2019.
- [46] YATES R D, CIBLAT P, YENER A, et al. Age-optimal constrained cache updating[C]//2017 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT). IEEE, 2017: 141-145.
- [47] ZHANG S, LI J, LUO H, et al. Towards fresh and low-latency content delivery in vehicular networks: an edge caching aspect[C]//2018 10th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP). IEEE, 2018: 1-6.
- [48] KAM C, KOMPELLA S, NGUYEN G, et al. Information freshness and popularity in mobile caching[C]//2017 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT). IEEE, 2017: 136-140.
- [49] ARAFA A, YANG J, ULUKUS S, et al. Age-minimal transmission for energy harvesting sensor with finite batteries: online policies[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2019, 66(1): 534-556.
- [50] ARAFA A, YANG J, ULUKUS S, et al. Using erasure feedback for online timely updating with an energy harvesting sensor[C]//2019 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT). IEEE, 2019: 607-611.
- [51] ARAFA A, YANG J, ULUKUS S, et al. Online timely status updates with erasures for energy harvesting sensors[C]//2018 56th Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing (Allerton). 2019.
- [52] ARAFA A, ULUKUS S. Timely updates in energy harvesting two-hop networks: offline and online policies[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2019, 18(8): 4017-4030.
- [53] FENG S, YANG J. Minimizing age of information for an energy harvesting source with updating failures[C]//2018 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT). IEEE, 2018: 1-6.
- [54] BACINOGLU B T, SUN Y, BIYIKOGLU E U, et al. Achieving the age-energy tradeoff with a finite-battery energy harvesting source[C]//2018 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT). IEEE, 2018: 876-880.
- [55] ARAFA A, YANG J, ULUKUS S. Age-minimal online policies for energy harvesting sensors with random battery recharges[C]//2018 IEEE International Conference on Communications (ICC). IEEE, 2018: 1-6.
- [56] WU X, YANG J, WU J. Optimal status update for age of information minimization with an energy harvesting source[J]. IEEE Transactions on Green Communications and Networking, 2018, 2(1): 193-204.
- [57] ARAFA A, ULUKUS S. Age minimization in energy harvesting communications: energy-controlled delays[C]//2017 51st Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers. 2017: 1801-1805.
- [58] BACINOGLU B T, BIYIKOGLU E U. Scheduling status updates to minimize age of information with an energy harvesting sensor[C]//2017 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT). IEEE, 2017: 1122-1126.
- [59] LI B, ERYILMAZ A, SRIKANT R. On the universality of age-based scheduling in wireless networks[C]//2015 IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM). IEEE, 2015.
- [60] YIN B, ZHANG S, CHENG Y, et al. Only those requested count: proactive scheduling policies for minimizing effective age-of-information[C]//2019 IEEE Conference on Computer Communications. IEEE, 2019: 109-117.
- [61] ZHANG J, WANG C. On the rate-cost of Gaussian linear control systems with random communication delays[C]//2018 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT). IEEE, 2018: 2441-2445.
- [62] CHAMPATI J P, MAMDUHI M H, JOHANSSON K H, et al. Performance characterization using AoI in a single-loop networked control system[C]//2019 IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS). IEEE, 2019.
- [63] KLÜGEL M, MAMDUHI M H, HIRCHE S, et al. AoI-penalty minimization for networked control systems with packet loss[C]//2019 IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS). IEEE, 2019.
- [64] JIANG Z, KRISHNAMACHARI B, ZHENG X, et al. Decentralized status update for age-of-information optimization in wireless multiaccess channels[C]//2018 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT). IEEE, 2018: 2276-2280.
- [65] JIANG Z, KRISHNAMACHARI B, ZHENG X, et al. Timely status update in wireless uplinks: analytical solutions with asymptotic optimality[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(2): 3885-3898.
- [66] NATH S, WU J, YANG J. Optimum energy efficiency and age-of-information tradeoff in multicast scheduling[C]//2018 IEEE International Conference on Communications (ICC). IEEE, 2018: 1-6.
- [67] TRIPATHI V, MOHARIR S. Age of information in multi-source systems[C]//2017 IEEE Global Telecommunications Conference. IEEE, 2017: 1-6.
- [68] JHUNJHUNWALA P R, MOHARIR S. Age-of-information aware scheduling[C]//2018 International Conference on Signal Processing and Communications (SPCOM). IEEE, 2018: 222-226.
- [69] PAPPAS N, GUNNARSSON J, KRATZ L, et al. Age of information of multiple sources with queue management[C]//2015 IEEE International Conference on Communications (ICC). IEEE, 2015: 5935-5940.
- [70] KOSTA A, PAPPAS N, EPHREMIDES A, et al. Age of information performance of multiaccess strategies with packet management[J]. Journal of Communications and Networks, 2019, 21(3): 244-255.
- [71] TRIPATHI V, MODIANO E. A whittle index approach to minimizing functions of age of information[C]//2019 57th Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing (Allerton). 2019: 1160-1167.
- [72] KADOTA I, SINHA A, MODIANO E. Optimizing age of information in wireless networks with throughput constraints[C]//2018 IEEE Conference on Computer Communications. IEEE, 2018.
- [73] KOSTA A, PAPPAS N, EPHREMIDES A, et al. Age and value of information: non-linear age case[C]//2017 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT). IEEE, 2017: 326-330.

- [74] CHEN K, HUANG L. Age-of-information in the presence of error[C]//2016 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT). IEEE, 2016: 2579-2583.
- [75] DONG Y, CHEN Z, LIU S, et al. Age of information upon decisions[C]//2018 IEEE 39th Sarnoff Symposium. IEEE, 2018: 1-5.
- [76] DONG Y, FAN P. Age upon decisions with general arrivals[C]//2018 IEEE UEMCON. IEEE, 2018: 825-829.
- [77] NAJM E, NASSER R. Age of information: the gamma awakening[C]//2016 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT). IEEE, 2016: 2574-2578.
- [78] 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.
- [79] ARAFA A, ULUKUS S. Age-minimal transmission in energy harvesting two-hop networks[C]//GLOBECOM 2017 IEEE Global Communications Conference. IEEE, 2017: 1-6.
- [80] HU H, XIONG K, ZHANG Y. Age of information in wireless powered networks in low SNR region for future 5G[J]. Entropy, 2018, 20(12): 948.
- [81] BEDEWY A M, SUN Y, SHROFF N B. The age of information in multihop networks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2019, 27(3): 1248-1257.
- [82] FARAZI S, KLEIN A G, BROWN D R. Fundamental bounds on the age of information in multi-hop global status update networks[J]. Journal of Communications and Networks, 2019, 21(3): 268-279.
- [83] BEYTUR H B, UYSAL-BIYIKOGLU E. Minimizing age of information for multiple flows[C]//2018 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom). IEEE, 2018: 1-5.
- [84] FARAZI S, KLEIN A G, MCNEILL J A, et al. On the age of information in multi-source multi-hop wireless status update networks[C]//2018 IEEE 19th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC). IEEE, 2018: 1-5.
- [85] YATES R D. Age of information in a network of preemptive servers[C]//IEEE INFOCOM 2018 IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPs). IEEE, 2018: 118-123.
- [86] LU Y, XIONG K, FAN P, et al. Optimal online transmission policy in wireless powered networks with urgency-aware age of information[C]//2019 15th International Wireless Communications & Mobile Computing Conference (IWCMC). IEEE, 2019: 1096-1101.
- [87] LIU J, WANG X, BAI B, et al. Age-optimal trajectory planning for UAV-assisted data collection[C]//IEEE INFOCOM 2018 IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPs). IEEE, 2018: 553-558.
- [88] TONG P, LIU J, WANG X, et al. UAV-enabled age-optimal data collection in wireless sensor networks[C]//2019 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops). IEEE, 2019: 1-6.
- [89] JIA Z K, QIN X Q, WANG Z J, et al. Age-based path planning and data acquisition in UAV-assisted IoT networks[C]//2019 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops). IEEE, 2019: 1-6.
- [90] SORET B, RAVIKANTI S, POPOVSKI P. Latency and timeliness in multi-hop satellite networks[J]. arXiv: 1910.12767, 2019.

- [91] TALAK R, KARAMAN S, MODIANO E. Minimizing age-of-information in multi-hop wireless networks[C]// 2017 55th Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing. IEEE, 2017: 486-493.
- [92] MOLTAFAFET M, LEINONEN M, CODREANU M. On the age of information in multi-source queuing models[J]. arXiv: 1911.07029, 2019.

[作者简介]



熊轲 (1981-), 男, 陕西汉中, 博士, 北京交通大学计算机与信息技术学院教授、计算机工程系主任, 主要研究方向为无线协作网络、无线移动网络和网络信息理论等。



胡慧敏 (1993-), 女, 甘肃天水人, 北京交通大学计算机与信息技术学院博士生, 主要研究方向为信息年龄、无线传感器网络和能量收集等。



艾渤 (1974-), 男, 陕西西安人, 博士, 北京交通大学轨道交通控制与安全国家重点实验室教授、常务副主任, 主要研究方向为宽带移动通信和轨道交通专用移动通信。



张煜 (1983-), 男, 广西桂林人, 博士, 国网能源研究院有限公司研究员, 主要研究方向为边缘计算、无线协作网络和泛在电力物联网等。



裴丽 (1970-), 女, 山西运城人, 北京交通大学全光网与现代通信网教育部重点实验室教授、博士生导师, 主要研究方向为全光交换、特种光纤、光电器件和基于智能光纤传感的物联网。