



专题: 5G+6G

面向 6G 网络的信息时效性度量及研究进展

孙径舟, 王乐涵, 孙宇璇, 周盛, 牛志升
(清华大学电子工程系, 北京 100084)

摘要: 在未来的 6G 网络中, 机器型通信将成为网络承载的主要业务, 并催生大量垂直行业应用, 如网联自动驾驶、工业物联网等, 从而使这些应用成为新的经济增长点。此类应用往往涉及状态信息的收集、处理与分发, 对网络的时延具有极高的要求。而现有的低时延指标在节点数多、通信资源有限的场景下难以满足此要求。针对这一问题, 指出在状态更新系统中应考虑信息时效性而非仅考虑时延。在此基础上, 按照利用状态信息内容程度的不同, 梳理了相关代表性工作, 分别介绍并比较了多种信息时效性度量。最后, 讨论了信息时效性的未来研究方向与亟须解决的关键问题。

关键词: 状态更新系统; 信息时效性; 低时延; 通信网络

中图分类号: TN915

文献标识码: A

doi:10.11959/j.issn.1000-0801.2021127

Information timeliness metrics and research progress for 6G network

SUN Jingzhou, WANG Lehan, SUN Yuxuan, ZHOU Sheng, NIU Zhisheng
Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract: In the future 6G network, machine-type communication will dominate the network traffic. Many vertical applications, such as networked autonomous driving and industrial internet of things, will become new growth points. Such applications usually consist of the collection of status information and distribution of control signals, requiring ultra-low latency. However, this requirement is hard to meet with a large number of end nodes and limited communication resources. In view of this confliction, it was pointed out that the freshness of information should be considered in the status update system instead of just latency. Furthermore, according to the degree of utilization of status information, various measures of information freshness were introduced, and related representative work was summarized. Finally, the future research directions of information freshness and key questions that need to be answered were discussed.

Key words: status update system, information freshness, low latency, communication network

收稿日期: 2021-05-10; 修回日期: 2021-06-10

基金项目: 国家重点研发计划项目 (No.2020YFB1806605); 国家自然科学基金资助项目 (No.62022049)

Foundation Items: The National Key Research and Development Program of China (No.2020YFB1806605), The National Natural Science Foundation of China (No.62022049)



1 引言

过去几十年, 音/视频业务以其大带宽需求成为无线网络发展的主要推动力。而随着通信技术的发展, 机器型通信、低时延高可靠通信成为新的焦点, 通信网络承载的主要内容将从人与人之间的通信扩展至人与物、物与物之间的通信。这一转变催生了大量的垂直行业应用: 借助 V2X (vehicle-to-everything) 通信, 车与车之间可以通过交互信息增强感知能力^[1-2]; 工业物联网中, 机器通过无线连接降低部署成本^[3]; 虚拟现实及增强现实应用中, 头戴式设备可以通过无线网络与服务器连接^[4]。但由于机器感知速度远高于人类反应速度, 对此类垂直行业应用通常也有着较高的时延要求, 如车联网、工业物联网中时延通常要求在 10 ms。尽管 5G 相关研究已经达到了 1 ms 的用户面时延和少于 20 ms 的控制面时延^[5], 但这些实验通常是在轻负载的情况下完成的。事实上, 在通信资源非常宽裕情况下, 通过分配专用的通信资源以实现超可靠低时延通信 (ultra reliable low latency communication, uRLLC) 并不困难。因此, 对于大量机器类型业务, 仅提供低时延服务并不够。在 B5G 及 6G 中, 应联合考虑信息产生、传输以及信道状态进行系统设计。

针对这一问题, 近年来兴起了对信息时效性的研究。为了解释信息时效性概念, 考虑如图 1 所示的状态更新系统: 发送端对某个过程进行采

样, 通过无线信道发送给接收方, 由接收方做出决策并返回。在这个系统中, 接收方做出决策时所利用的信息与真实信息之间的差距将影响决策质量。信息偏差越小, 决策质量越好, 信息时效性越高。可以看出, 信息时效性与时延有着明显的差别。时延是基于单一数据包所定义的度量, 而信息时效性则针对信息流。提高信息时效性需要低时延通信, 但低时延并不意味着高信息时效性。仍以图 1 中的系统为例, 为了提高信息时效性, 发送端希望提高自己的采样频率, 但通信信道会因为需要传输大量数据包而拥塞, 反而导致接收端信息时效性降低。因此提高信息时效性需要综合考虑信息的产生、传输以及处理的全过程。

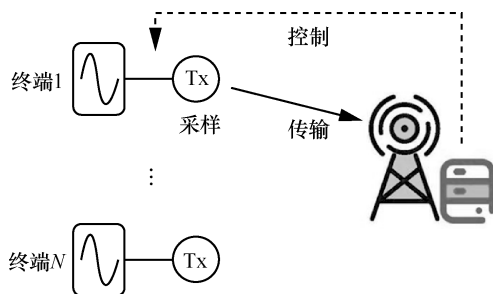


图1 状态更新系统示意图

基于信息时效性的研究需要定义信息时效性的度量。按照对于发送端过程具体状态不同的利用程度, 研究者们提出了不同的度量指标, 见表 1。本文将对这些信息时效性度量进行介绍、比较, 并讨论相关研究工作。

表 1 信息时效性度量对比

度量名称	定义	考虑因素	适用场景
信息年龄	$t - \max(S_i D_i < t)$	信息产生之后所经过时间	获取发送端状态存在代价或不便于定义状态偏差
同步信息年龄	$t - U_s(t)$	状态信息异步时间	部分利用状态信息内容, 如缓存等场景
错误信息年龄	$f(t) \times g(X(t), \widehat{X}(t))$	状态信息内容偏差; 状态信息异步时间	状态偏差可定义
信息紧迫度	$\omega(t)\delta(Q(t))$	状态信息内容偏差; 状态信息异步时间; 情境信息	状态偏差可定义, 且不同情境下对信息时效性有差异化需求

2 信息年龄

2.1 信息年龄定义

信息年龄 (age of information) 最早由参考文献[6]提出, 接收端 Rx 在 t 时刻的信息年龄 $h(t)$ 定义为 Rx 所接收的最新数据包的产生时刻与当前时刻的偏差值, 即:

$$h(t) = t - \max(S_i | D_i < t) \quad (1)$$

其中, S_i 为第 i 个成功接收到的数据的产生时间, 而 D_i 为该数据的接收时间。信息年龄演化曲线如图 2 所示, S_1 时刻采样产生的数据在 D_1 时刻被成功接收, 那么 D_1 的信息年龄从 D_1 下降为 $D_1 - S_1$ 。现有研究大多关注两个性能指标: 平均信息年龄和峰值信息年龄。平均信息年龄指在一段时间内的信息年龄累加并除以时长, 即图 2 中着色区域面积比上时间长度。而峰值信息年龄, 即在接收端收到新的数据包之前时刻的信息年龄, 即图 2 中圈出的区域, 如 D_2 时刻的峰值信息年龄为 $D_2 - S_1$ 。

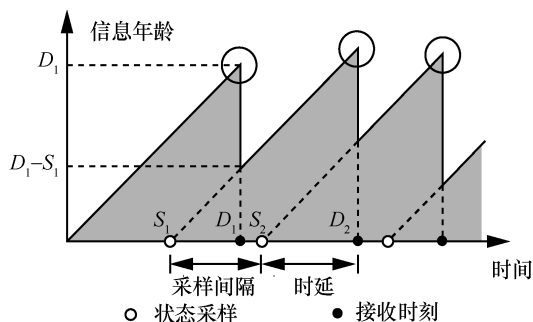


图 2 信息年龄演化曲线

以车联网的典型场景编队驾驶 (platooning) 和路口调度为例, 进一步说明信息年龄的物理意义。在编队驾驶中, 头车 (leader) 需要将自身状态信息 (包括但不限于车辆的速度、加速度、位置等) 频繁地发送给编队中的跟随车辆 (follower), 从而保证整个编队系统的稳定性和安全。在编队驾驶中, 跟随车辆收到的来自头车的状态信息的信息年龄越大, 说明跟随车辆对头车

当前状态的认知越不及时, 信息时效性越低。信息年龄较大时, 跟随车辆仅能根据来自头车的过时信息控制自身的运动, 无法对突发的紧急情况做出及时的应对, 从而产生危险。同理, 在路口调度中, 路侧单元 (road side unit) 也需要尽可能地基于路口附近车辆最新的、信息年龄最小的状态信息实时地得出调度策略, 从而保证车辆安全高效地通过路口。

可见, 信息年龄的定义有着明确的物理意义, 但并未涉及信息的内容。信息年龄本身随着时间线性增长, 但有研究工作指出, 所关心的系统性能有时可表示为信息年龄的函数形式, 如参考文献[7]中, 对于高斯-马尔可夫块衰落信道, 信道容量表达可以被表示成信道状态信息 (channel state information, CSI) 的信息年龄的函数。

2.2 无线网络中信息年龄优化

在典型的状态更新系统中, 将有多个传感器分别向控制中心上传状态信息。IEEE 802.11 协议、LTE 以及 5G NR 的随机接入信道均采用 CSMA (carrier-sense multiple access)、ALOHA 等经典的 MAC (medium access control) 层接入机制, 但此类机制主要以吞吐量最优为目标, 并未考虑信息年龄的需求。因此, 有大量工作研究如何设计调度与接入机制以优化信息年龄。笔者将从调度机制、网络拓扑、优化目标等几个角度分别介绍相关进展。

在参考文献[8-11]中, 研究者们考虑集中式调度机制, 即假设存在一个掌握全局信息的中心控制节点, 并由其选择当前时刻应该由哪些终端接入信道上报状态信息, 且均考虑优化长时平均信息年龄。参考文献[8]考虑节点被调度时会进行采样并产生包含最新状态信息的数据包。同时在参考文献[8]中, 信道状态被抽象为服从伯努利分布的随机过程, 即传输成功和失败概率固定。其中分别研究了贪心调度策略、基于虚拟队列的调度策略以及基于怀特指数 (Whittle's index) 的调度



策略, 仿真结果显示, 在不同的网络参数下, 后两种调度策略性能均接近最优值。参考文献[9]同样采用了怀特指数来设计调度策略, 与参考文献[8]不同的是, 参考文献[9]中假设状态采样过程不可控, 而是在每个时隙以一定概率产生新的数据包。同时, 为了简化分析, 参考文献[9]中假设每个发送端仅在采样时刻进行传输, 也就是零缓冲假设。由于之前时刻采样的数据包即使未在采样时刻发送, 仍然能够带来信息年龄增益, 因此零缓冲将带来一定的性能损失。在参考文献[10]中, 研究者们假设每个信源能够保留最近一次采样的数据包, 而不是直接丢弃, 并计算得到信道理想情况下的怀特指数。参考文献[11]进一步扩展到采样随机且信道非理想场景, 提出了近似调度指标。

大多数状态更新系统中并不存在一个掌握全局信息的中心调度节点, 因此, 考虑分布式接入机制尤为重要。表 2 给出了相关代表性工作的总结。

在参考文献[12]中, 作者考虑非理想信道以及调度时刻采样, 分别研究了集中式调度与基于 ALOHA 接入两种策略下的平均信息年龄性能。对于集中式调度, 调度中心依次调度各个节点上传状态信息, 传输失败时不考虑 HARQ 机制, 而是重新采样上传, 直到传输成功或达到最大重传次数 S 。而基于 ALOHA 的接入机制中, 各个节点以一定概率接入信道进行状态信息传输。其中给出

了两种情况下平均信息年龄的闭式表达式。当要求各个用户的平均信息年龄相同时, 基于 ALOHA 的接入机制下的平均信息年龄为带有重传机制的集中式调度的 $2e$ 倍。这显示了集中式调度与单纯的 ALOHA 协议相比的优势。前述工作均考虑离散时间系统, 而参考文献[13]考虑连续时间系统: 假设传输与退避时间均服从负指数分布, 研究调度采样和随机采样两种情况下 CSMA 协议的平均信息年龄, 并分别给出了闭式表达式和性能上界。基于性能表达式, 可以通过调节退避时长(back-off time)以优化协议性能。该研究指出, 最优退避时长与采样过程无关。参考文献[12-13]主要对现有协议性能进行分析, 并没有做出改进。

在参考文献[13]的基础上, 参考文献[14]针对现有协议与最优值之间的差距进行分析。这里的最优值是假设存在掌握全局状态信息的调度节点时, 调度算法所能达到的最小平均信息年龄性能。参考文献[14]中指出, 通过调整退避时长, 随着系统中用户数增长, 使用 CSMA 协议在渐进意义下的平均信息年龄为最小平均信息年龄的 2 倍。研究者们同时提出基于简单的轮询策略(round-robin)进行调度, 即每个时隙依次调度用户接入信道。其中证明了随着用户数增长, 轮询策略下平均信息年龄接近最优值。需要指出的是, 由于轮询策略的最优性是渐近最优, 在用户数较少或者随机采样频率低的情况下性能并不理想。

现有分布式接入协议的目标是尽可能减少冲

表 2 分布式接入研究总结

参考文献	MAC 协议	采样过程	信道假设
参考文献[12]	ALOHA	调度采样	非理想信道
参考文献[13]	CSMA	调度采样/随机采样	/
参考文献[14]	轮询	随机采样	理想信道
参考文献[15]	CSMA	随机采样	理想信道
参考文献[16]	ALOHA/CSMA	调度采样	非理想信道

突,提高吞吐量。而基于信息年龄设计的接入协议则需要实现两个目标:减少冲突和传输能够带来较高时效性增益的数据。一个直观的设计思路可以同步达成这两个目标,即只让具有高时效增益的用户接入信道。此时由于接入信道的用户数减少,冲突概率也随之下降。因此,问题转化为如何使得用户自行判断是否应该接入信道。在参考文献[15]中,作者采用怀特指数作为判断数据时效性增益高低的指标,怀特指数越大,意味着用户进行传输的时效性增益越高。通过设置怀特指数阈值,只有怀特指数大于该阈值的用户被允许进行传输,这样就减少了竞争信道的用户数。同时为了减少冲突,这部分用户采用 CSMA 的方式竞争信道。仿真结果证明该带有优先级的 CSMA 协议下平均信息年龄接近最优值。但参考文献[15]并没有详细分析如何进行阈值设置,而是通过一维搜索进行选择。在参考文献[16]中,作者分析了如何设置阈值,并基于平均场理论(mean-field theory)给出了各个用户的阈值表达式。对于集中式调度,只需从信息年龄大于各自阈值的用户中随机挑选接入信道即可,可以证明,这种调度方法的性能在用户数趋于无穷的条件下是渐近最优的。同时,由于该策略只需要用户将自身信息年龄与阈值比较,因此也可以设计基于 ALOHA 或者 CSMA 的分布式接入机制。

上述工作主要考虑平均信息年龄,还有一部分工作考虑平均峰值信息年龄性能。在参考文献[17]中,作者考虑用户可以划分为多个可行集的场景。同一可行集中的用户可以同时接入信道,而不同可行集之间存在干扰,不能同时接入。其中指出对于峰值年龄,存在一个最优策略是随机策略,即每个时隙按照相同的概率分布选择一个可行集接入信道,此时平均峰值信息年龄最优。这主要是由于平均峰值信息年龄可以表示为调度频率的倒数。而对于平均信息年龄,可以证明这种随机策略所达到的平均信息年龄不超过最优值两倍。

除了平均性能之外,部分应用更关心信息年龄不超过一定阈值。参考文献[18]分析了当信息年龄具有阈值约束时的调度策略设计。考虑理想信道,寻找满足阈值约束的调度算法被转化为在有向图上寻找环路问题。由于寻找环路问题复杂度过高,因此作者首先对一组具有特殊结构的阈值约束进行分析,即不同用户阈值具有倍数关系。针对这种特殊结构阈值,其中提出了一种低复杂度调度算法。而对于一般阈值约束要求,作者提出了一个映射算法,将一般阈值约束映射为具有特殊结构的阈值约束,并证明了大部分阈值约束都可以被映射成具有特殊结构的类型。当信道存在非理想因素时,参考文献[19]将硬阈值约束松弛为超过阈值的概率约束,与参考文献[18]提出一种周期性调度算法类似,并证明该算法满足约束条件。

3 同步信息年龄

信息年龄定义简洁,物理意义明确,但信息年龄并不能准确地反映接收端对发送端状态信息的认知情况。根据信息年龄的定义,即便接收端已经获知发送端的真实状态信息,只要没有收到来自发送端的新的状态更新,信息年龄便会不断增大。因此,对于状态变化快速的发送端,较小的信息年龄并不意味着接收端准确获得状态信息,对于状态变化缓慢的发送端,较大信息年龄也可能意味着准确的状态信息认知。考虑发送端状态未发生改变时,没有必要进行状态信息传输,参考文献[20]引入同步信息年龄(age of synchronization)这一新指标来刻画发送端与接收端状态信息不同的影响, t 时刻的同步信息年龄 $h_s(t)$ 定义为:

$$h_s(t) = t - U_s(t) \quad (2)$$

其中, $U_s(t)$ 为最近一次接收端发送端状态不同步的时间(若当前时刻已同步,则 $U_s(t)$ 等于 t)。同步信息年龄定义与信息年龄不同,只有当发送端状态信息发生改变时才会开始增长,即发送端与



接收端状态存在差异将触发同步信息年龄增加, 这就是“同步”概念的由来。图3中的实线展示了同步信息年龄的演化曲线。同时为了便于与信息年龄区分, 图3中使用虚线标出了信息年龄的演化曲线。可以看到, 在 S_1 时刻产生状态更新后, 接收端和发送端状态存在差异, 因此同步信息年龄开始增长, 直到 D_1 时刻传输完成后, 二者再次同步。

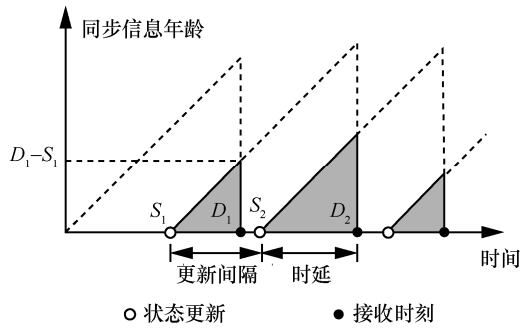


图3 同步信息年龄演化曲线

在参考文献[20]中, 作者考虑一个缓存更新系统, 多个远程节点向中心服务器备份各自所缓存的信息。考虑离散时间系统, 每个时隙中远程节点所缓存的内容更新 s 事件服从伯努利分布。中心服务器周期性地提取远程节点缓存内容。其中计算了周期性提取策略下的平均同步信息年龄。由于网络带宽有限, 假设存在最大的总提取频率约束, 计算得到此时各个远程节点的提取频率。当总提取频率远大于节点缓存内容更新频率时, 各个节点提取频率为缓存内容更新频率的立方根形式。而当总提取频率小于节点缓存内容更新频率时, 各节点提取频率为缓存内容更新频率平方根形式。

虽然周期性调度便于实现, 但通常并不一定是最优的。因此参考文献[21]对此展开了进一步的分析, 研究在信道不理想时的调度策略。参考文献[21]将原问题建模为马尔可夫决策问题, 并证明最优策略具有阈值结构。基于这一性质, 进一步设计了基于怀特指数的调度算法。在该算法下, 当同步信息年龄相同时, 信道传输成功概率越高,

或状态更新概率越小的节点, 调度优先级越高。

4 错误信息年龄

从信息年龄和同步信息年龄的定义可知, 两种度量都会在收到下个更新前始终随着时间线性增长, 因此它们不能很好地度量信息时效性对系统性能造成的非线性影响。以远程估计 (remote estimation) 问题为例, 参考文献[22]考虑远程观测一个维纳过程, 当采样策略考虑发送端实际状态时, 远程估计的均方误差并不能表示为信息年龄的函数形式。为了解决上述问题, 参考文献[23]提出了错误信息年龄 (age of incorrect information), 将错误信息年龄 $\Delta_{\text{AoiI}}(t)$ 定义为一个关于时间的非减效用函数 $f(t)$ 和函数 $g(X(t), \hat{X}(t))$ 的乘积, 即:

$$\Delta_{\text{AoiI}}(t) = f(t) \times g(X(t), \hat{X}(t)) \quad (3)$$

其中, $\hat{X}(t)$ 为接收端估计的发送端状态信息, $X(t)$ 为发送端真实状态信息。在这个定义中, $f(t)$ 表示接收端一段时间内没有准确获知状态信息导致的系统性能下降, 而函数 $g(X(t), \hat{X}(t))$ 则表示接收端对发送端准确状态信息的认知程度的影响。函数 f 和 g 的乘积形式表示接收端不能准确认知发送端的时间持续得越久, 认知的不准确程度越大, 系统性能下降得越多。错误信息年龄是一个非常普适的信息时效性指标, 上述定义中的函数 f 和 g 存在多种选择^[23]。函数 $g(X(t), \hat{X}(t))$ 可以定义为示性函数, 即当发送端真实状态信息 $X(t)$ 与接收端估计状态 $\hat{X}(t)$ 不相等或二者之差超过某个阈值时置 1, 否则取值为 0。函数 $g(X(t), \hat{X}(t))$ 也可以定义为平方误差方程, 即 $g(X(t), \hat{X}(t)) = (X(t) - \hat{X}(t))^2$ 。在这种定义下, 函数 g 是接收端对状态的估计和发送端真实状态之差, 即估计误差的函数。估计误差越大, 则接收端对发送端状态信息的认知越不准确, 对系统性能造成的影响越大, 所得的错误信息年龄也越大。为了解决信息年龄线性定义带来的问题, 函数 f

的选择并不局限于线性函数。指数形式的函数 f 定义为 $f_{\text{exp}}(t) = \exp(a(t - V(t)))$ 。其中, a 是大于 0 的正常数, 时间点 $V(t)$ 定义为最近一次接收端准确认知发送端状态信息, 即函数 $g(X(t), \hat{X}(t))=0$ 的时间。指数形式的 $f_{\text{exp}}(t)$ 适用于对准确的状态信息的需求随着时间迅速增长的系统。

尽管错误信息年龄能解决信息年龄存在的问题并准确反映接收端对发送端的认知情况, 但在实现中却更加复杂。接收端在计算信息年龄时只需观察收到的状态更新数据包上的时间戳, 但无法通过上述方法计算得到错误信息年龄。为了得出错误信息年龄, 接收端必须在成功收到状态更新数据包的时候发送 ACK 通知发送端, 此外, 收发双端也必须约定状态估计算法, 这样发送端才能实时地准确获知接收端的状态估计, 并进一步得出错误信息年龄。

参考文献[24]在远程监控单一对称二值马尔可夫信息源的离散时间场景下对错误信息年龄进行了研究。在该场景中, 存在一个二值马尔可夫数据源作为发送端和一个接收端, 发送端发出的状态信息需要经历一个服从几何分布的随机时延才能到达接收端。当接收端收到状态信息后将立刻发送 ACK 告知发送端信道资源已经被释放, 此时发送端可以选择是否进行采样, 并发送一个新的状态信息。参考文献[24]基于 3 种不同度量: 平均实时错误 (real-time error)、平均信息年龄和平均错误信息年龄分别给出了最优采样策略。其中, 平均实时错误是指 $\int_0^{\infty} \mathbb{I}\{\hat{X}(t) \neq X(t)\} dt$, 符号 $\mathbb{I}$ 表征

示性函数。其中发现在 3 种策略中平均信息年龄最优策略与平均实时错误最优策略一致, 都是在马尔可夫数据源状态变化时进行更新, 这说明最小化错误信息年龄等同于最小化系统的实时错误性能, 而最小化信息年龄则并不能保证接收端对发送端的准确认知。参考文献[25-26]则分别研究了上述场景中传输能量受限和平均传输频率受限

时的平均错误信息年龄最小的策略。

参考文献[27]进一步考虑了多发送端的远程监控问题, 假设离散时间系统中存在多个发送端通过块衰落信道向调度中心传输状态信息, 每个时隙同时传输状态信息的发送端不能超过 M 个, 调度中心实时将资源分配给部分发送端传输数据。由于调度中心不能实时获知估计误差, 上述优化问题被建模为部分可观察的马尔可夫决策过程问题, 该文进一步基于怀特指数得出了调度策略, 即每时隙调度 M 个怀特指数最大的发送端传输更新。

5 信息紧迫度

5.1 信息紧迫度的定义

除了不能衡量过时信息的非线性效应外, 信息年龄忽视了发送端所处的情境对信息时效性的影响。例如在编队驾驶中, 头车与跟随车辆之间的信息交互扮演着重要的角色。一方面, 车辆移动性较强, 编队所处情境变化迅速, 在某些情境下, 例如车辆编队经过路口时, 或车辆编队经历超车等突发的紧急事件时, 头车的状态信息应当更加频繁地向跟随车辆进行更新, 以保证交通安全。因此, 受限的无线通信资源应当主要分配给处于紧急状态中的车辆。为了联合反映发送端对接收端的认知情况以及发送端的情境信息, 笔者在参考文献[28-29]基于情境信息和状态信息可知的系统, 提出了度量信息时效性的新指标: 信息紧迫度 (urgency of information)。 t 时刻的信息紧迫度定义为情境感知权重 $\omega(t)$ 和状态估计误差 $Q(t)$ 的函数 $\delta(Q(t))$ 的乘积, 即:

$$F(t) = \omega(t)\delta(Q(t)) \quad (4)$$

其中, $Q(t) = X(t) - \hat{X}(t)$, 函数 δ 表示接收端状态估计不准确带来的系统性能下降, 定义为一个非负偶函数。情境感知权重 $\omega(t)$ 的大小表示发送端是否处于紧急情况; $\omega(t)$ 的值较大则表示发送端此时需要更高的状态信息更新频率来保证紧急情况中的系统安全, 反之表示发送端处于普通情境中, 此时无须较高的更新频率。信息紧迫度作



为情境感知权重和估计误差的函数的乘积, 表示系统调度一次新的状态更新的紧迫程度。对于离散时间系统, 信息紧迫度定义为:

$$F(t) = \omega(t) \delta \left(\sum_{\tau=g_t}^t A(\tau) \right) \quad (5)$$

状态估计误差 $Q(t)$ 的变化为:

$$Q(t+1) = (1 - D(t))Q(t) + A(t) + D(t) \sum_{\tau=g_t+1}^{t-1} A(\tau) \quad (6)$$

其中, g_t 是 t 时刻之前收到的最新状态信息更新的产生时间, $A(t)$ 是 t 时隙内估计误差的增量。 $D(t)$ 表示接收端是否收到发送端发送的状态更新, $D(t)=1$ 表示接收端收到状态信息。可以看出, 信息紧迫度同样是一个普适的信息时效性度量:

(1) 当函数 δ 是线性函数、情境权重不随时间改变、估计误差的增量 $A(t)$ 是 1 时, 信息紧迫度等同于信息年龄;

(2) 当函数 δ 是非线性函数、情境权重不随时间改变、估计误差的增量 $A(t)$ 是 1 时, 信息紧迫度等同于基于信息年龄的非线性效用函数;

(3) 当函数 $\delta(Q(t)) = Q(t)^2$ 、情境权重随时间发生改变时, 信息紧迫度等同于均方误差。

根据上述定义, 可以看出, 在编队驾驶中, 跟随车辆收到的来自头车的状态信息的信息紧迫度表示头车不及时或不准确的状态信息对跟随车辆造成的影响。车辆编队所处的情况越紧急, 跟随车辆对头车的状态信息认知越不及时, 或越不准确, 信息紧迫度越大, 此时, 跟随车辆不得不在紧急情况下根据头车的过时信息或不准确信息来控制自身运动, 给编队系统带来巨大风险。

5.2 基于信息紧迫度的优化

基于信息紧迫度的优化主要包括两个方面, 即平均更新频率受限时的单发送端状态信息更新调度策略^[29-30]和接入受限时的多发送端状态更新调度策略^[31]。

对于单发送端离散时间系统, 参考文献[29]假

设发送端通过一个块衰落无线信道向控制中心发送状态更新信息, 即该发送端状态信息传输成功率为 p 。记第 t 个时隙的更新策略和传输结构分别为 $U(t)$ 和 $S(t)$ 。发送端选择更新则 $U(t)=1$, 否则为 0。状态信息成功传输则 $S(t)=1$, 否则为 0。当接收端收到状态更新后, 会向发送端发送反馈信息, 否则不发送。对于状态估计方法, 接收端会将收到的最新状态信息直接视作当前状态信息的估计。另一方面, 由于无线资源受限, 发送端不能时时占用信道, 因此平均更新频率应当受限, 假设最大更新频率为 ρ 。优化目标是最小化系统的平均信息年龄。

由于上述优化问题存在平均更新频率应当小于给定值的限制条件, 首先引入虚拟队列 $H(t)$, 并将满足该限制条件转化为保证该虚拟队列平均速率稳定 (mean rate stable)。该虚拟队列遵从:

$$H(t+1) = [H(t) - \rho + U(t)]^+, \quad \text{其中 } \rho \text{ 为平均更新频率。}$$

进一步定义李雅普诺夫函数和效用函数, 并证明李雅普诺夫漂移和效用函数的和的上界就是平均信息紧迫度上界, 再代入每个时隙更新概率为 ρ 的随机更新策略, 即可求出平均信息紧迫度的上界。通过最小化该上界, 可以得出动态门限更新策略。在该策略中, 动态门限为李雅普诺夫优化方法中的收敛系数和虚拟队列长度的乘积。每个时隙开始时, 发送端首先基于估计误差和下一时隙的情境权重求出更新指数, 仅当更新指数大于动态门限时, 发送端向接收端发送更新信息。信息紧迫度最优的更新策略、动态门限更新策略和信息年龄最优的更新策略性能对比如图 4 所示, 仿真结果显示基于信息紧迫度的更新策略相较基于信息年龄的更新策略, 能够达到更低的平均信息紧迫度。这说明基于信息紧迫度的更新策略倾向于将通信资源分配给紧急情况下的状态更新, 从而保证系统安全。

参考文献[29]中的策略虽然简洁易于实现, 但需要知道下个时隙准确的情境权重 (即 $\omega(t+1)$)

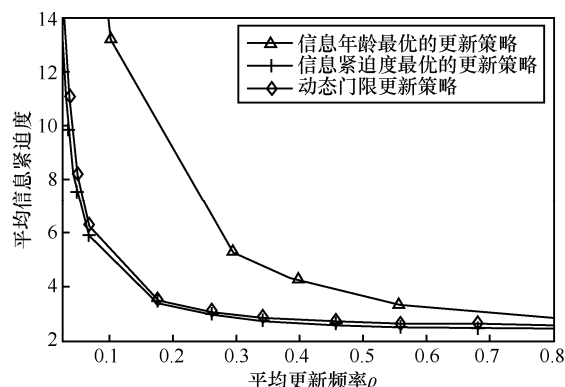


图4 信息紧迫度最优的更新策略、动态门限更新策略和信息年龄最优的更新策略性能对比

来计算更新指数,而 $\omega(t+1)$ 在实际系统中往往难以获知。为了解决这一问题,参考文献[30]提出的动态门限更新策略仅需用到下个时隙情境权重的条件期望,即 $E[\omega(t+1)|\omega(t)]$ 。但该方法需要获知情境权重的完整状态转移概率,而在实际系统中转移概率往往不能获知或随着时间发生变化,因此参考文献[30]进一步采用在线强化学习算法SARSA学习出发送端情境权重的变化和相应的更新策略。仿真显示,动态门限更新策略和基于SARSA的更新策略在更新频率较大时都能达到近似最优的性能,而在更新频率较小时,基于SARSA的更新策略显著优于动态门限更新策略。仿真结果显示,动态门限更新策略和基于SARSA的更新策略在更新频率较大时性能均接近最优,而在更新频率较小时,基于SARSA的更新策略显著优于动态门限更新策略。

参考文献[31]则考虑接入受限的多发送端场景。离散时间系统中存在 N 个发送端和一个控制中心,每个发送端都通过一个块衰落信道向控制中心发送状态信息,第 i 个发送端的传输成功概率为 p_i 。系统中每个时隙仅允许 K 个发送端同时向控制中心传输状态更新信息。优化目标是在上述系统中最小化平均信息紧迫度。该文首先通过李雅普诺夫优化方法得出了集中式的调度策略,每个时隙开始时控制中心基于发送端的下一时隙情境权重和估计误差计算每个发送端对应的更新

指数,并调度更新指数最大的 K 个发送端向控制中心传输状态更新信息。

集中式调度虽然性能优越,但在实际系统控制中心往往难以获得所有发送端的估计误差和情境权重。因此参考文献[31]进一步提出了基于CSMA/CA的动态门限分布式调度算法。该策略中的动态门限由每个发送端在本地维护,但所有发送端的动态门限是一致的。仅有更新指数大于动态门限的发送端才能在每个时隙的竞争阶段参与信道竞争,竞争成功的 K 个发送端进入此后的传输阶段。在长度为 W 个微时隙(mini-slot)的竞争阶段中,所有竞争者随机获得一个避让时间。若竞争者避让时间结束,仍有剩余的传输机会,则该竞争者竞争成功。若竞争结束后可用信道未能被完全占用,则降低动态门限,增加发送端竞争机会,而动态门限较低时则会导致剧烈竞争,此时应当增加门限。仿真显示,所提动态门限分布式调度算法性能对于发送端数目的鲁棒性较强,能很好地适应海量接入场景。

6 结束语

本文从状态更新系统中的信息时效性出发,阐述了在通信资源受限情况下现有的低时延高可靠概念并不足以全面刻画信息时效性;进而介绍了当前领域关于信息时效性度量的定义,以及在无线网络中基于这些度量的相关优化工作。

面向状态信息时效性的通信系统设计不同于现有以时延和吞吐量为优化目标的系统,主要区别有两点:状态信息时效性不仅涉及通信时延,还包括调度时延、网络拥塞情况等因素;状态信息时效性与发送端本身状态变化过程有关,因此要考虑状态信息对于系统性能的影响。这意味着基于状态信息时效性的网络优化应综合考虑上述因素的影响。

可以看到,信息年龄、同步信息年龄、错误信息年龄、信息紧迫度这些度量对于实际状态信



息的利用程度依次提升。但这并不意味着现有的度量就足以满足状态更新系统的需求,而更应该被视为在这一领域的尝试。现有的工作往往对于信道条件、发送端状态变化过程等有不同程度的抽象,而针对实际场景的考虑不足,未能充分刻画状态变化、信道条件等因素的影响。研究者们需要回答:(1)如何刻画信息时效性与对应物理系统性能之间的关系?(2)如何适应变化复杂的信道环境以及刻画发送端状态变化过程?(3)如何设计具有面向大量接入场景的可扩展性机制?回答第一个问题需要理解控制系统在不同时延情况下的系统性能;而第二个问题可以借助人工智能技术的强大表征能力,适应环境和状态的变化;针对第三个问题,需要对现有的系统做出调整,设计支持新业务的网络架构。综上,推进状态信息时效性研究有赖于通信、控制、人工智能等多个学科领域的交叉融合,这也展示了该方向广阔的研究前景。

参考文献:

- [1] LU N, CHENG N, ZHANG N, et al. Connected vehicles: solutions and challenges[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2014, 1(4): 289-299.
- [2] 杨荣悦, 张鹏洲, 宋卿. 基于5G技术的智能车联网研究与展望[J]. *电信科学*, 2020, 36(5): 106-114.
YANG R Y, ZHANG P Z, SONG Q. Research and prospect of intelligent Internet of vehicles based on 5G technology[J]. *Telecommunications Science*, 2020, 36(5): 106-114.
- [3] 范平志, 李里, 陈欢, 等. 面向大规模物联网的随机接入: 现状、挑战与机遇[J]. *通信学报*, 2021, 42(4): 1-21.
FAN P Z, LI L, CHEN H, et al. Random access for massive Internet of things: current status, challenges and opportunities [J]. *Journal on Communications*, 2021, 42(4): 1-21.
- [4] MAIER M, CHOWDHURY M, RIMAL B P, et al. The tactile Internet: vision, recent progress, and open challenges[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2016, 54(5): 138-145.
- [5] SHAFI M, MOLISCH A F, SMITH P J, et al. 5G: a tutorial overview of standards, trials, challenges, deployment, and practice[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2017, 35(6): 1201-1221.
- [6] KAUL S K, GRUTESER M, RAI V, et al. Minimizing age of information in vehicular networks[C]//*Proceedings of 2011 8th Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks*. Piscataway: IEEE Press, 2011: 350-358.
- [7] TRUONG K T, HEATH R W. Effects of channel aging in massive MIMO systems[J]. *Journal of Communications and Networks*, 2013, 15(4): 338-351.
- [8] KADOTA I, SINHA A, UYSAL-BIYIKOGLU E, et al. Scheduling policies for minimizing age of information in broadcast wireless networks[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2018, 26(6): 2637-2650.
- [9] HSU Y P. Age of information: whittle index for scheduling stochastic arrivals[C]//*Proceedings of 2018 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT)*. Piscataway: IEEE Press, 2018: 2634-2638.[LinkOut]
- [10] SUN J Z, JIANG Z Y, KRISHNAMACHARI B, et al. Closed-form whittle's index-enabled random access for timely status update[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2020, 68(3): 1538-1551.
- [11] SUN J Z, JIANG Z Y, ZHOU S, et al. Optimizing information freshness in broadcast network with unreliable links and random arrivals: an approximate index policy[C]//*Proceedings of IEEE INFOCOM 2019 - IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*. Piscataway: IEEE Press, 2019: 115-120.
- [12] YATES R D, KAUL S K. Status updates over unreliable multiaccess channels[C]//*Proceedings of 2017 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT)*. Piscataway: IEEE Press, 2017: 331-335.
- [13] MAATOUK A, ASSAAD M, EPHREMIDES A. On the age of information in a CSMA environment[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2020, 28(2): 818-831.
- [14] JIANG Z Y, 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.
- [15] JIANG Z Y, KRISHNAMACHARI B, ZHOU S, et al. Can decentralized status update achieve universally near-optimal age-of-information in wireless multiaccess channels?[C]//*Proceedings of 2018 30th International Teletraffic Congress (ITC 30)*. Piscataway: IEEE Press, 2018: 144-152.
- [16] JIANG Z. Analyzing Age of Information in Multiaccess Networks by Fluid Limits[C]//*Proceedings of IEEE INFOCOM 2020 - IEEE Conference on Computer Communications*. Piscataway: IEEE Press, 2020.
- [17] TALAK R, KARAMAN S, MODIANO E. Optimizing information freshness in wireless networks under general interference constraints[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2020, 28(1): 15-28.
- [18] LI C Z, LI S R, CHEN Y C, et al. AoI scheduling with maximum thresholds[C]//*Proceedings of IEEE COM 2020 - IEEE*

- Conference on Computer Communications. Piscataway: IEEE Press, 2020: 436-445.
- [19] LI C, LIU Q, LI S, et al. On scheduling with AoI violation tolerance[C]//Proceedings of IEEE INFOCOM 2021-IEEE Conference on Computer Communications. Piscataway: IEEE Press, 2021.
- [20] ZHONG J, YATES R, SOLJANIN E. Two freshness metrics for local cache refresh[C]//Proceedings of 2018 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT). Piscataway: IEEE Press, 2018.
- [21] TANG H Y, WANG J T, TANG Z H, et al. Scheduling to minimize age of synchronization in wireless broadcast networks with random updates[J]. 2019 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT), 2019: 1027-1031.
- [22] SUN Y, POLYANSKIY Y, UYSAL E. Sampling of the Wiener process for remote estimation over a channel with random delay[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2020, 66(2): 1118-1135.
- [23] MAATOUK A, KRIOULE S, ASSAAD M, et al. The age of incorrect information: a new performance metric for status updates[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2020, 28(5): 2215-2228.
- [24] KAM C, KOMPELLA S, EPHREMIDES A. Age of incorrect information for remote estimation of a binary Markov source[C]//Proceedings of IEEE INFOCOM 2020-IEEE Conference on Computer Communications Workshops (COM WKSHPs). Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-6.
- [25] CHEN Y, EPHREMIDES A. Minimizing age of incorrect information for unreliable channel with power constraint[J]. arXiv:2101.08908v1, 2021.
- [26] MAATOUK A, ASSAAD M, EPHREMIDES A. The age of incorrect information: an enabler of semantics-empowered communication[J]. arXiv:2012.13214v1, 2020.
- [27] KRIOULE S, ASSAAD M. Minimizing the age of incorrect information for real-time tracking of markov remote sources[J]. arXiv:2102.03245v1, 2021.
- [28] ZHENG X, ZHOU S, NIU Z S. Context-aware information lapse for timely status updates in remote control systems[C]//Proceedings of 2019 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-6.
- [29] ZHENG X, ZHOU S, NIU Z. Beyond age: urgency of information for freshness guarantee in status update systems[C]//Proceedings of 2020 2nd 6G Wireless Summit (6G SUMMIT). Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-5.
- [30] WANG L H, SUN J Z, ZHOU S, et al. Timely status update based on urgency of information with statistical context[C]//Proceedings of 2020 32nd International Teletraffic

Congress (ITC 32). Piscataway: IEEE Press, 2020: 90-96.

- [31] ZHENG X, ZHOU S, NIU Z S. Urgency of information for context-aware timely status updates in remote control systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2020, 19(11): 7237-7250.

[作者简介]



孙径舟 (1996-), 男, 清华大学博士生, 主要研究方向为无线网络中的智能资源分配、低时延无线通信和海量接入技术。



王乐涵 (1996-), 女, 清华大学博士生, 主要研究方向为低时延无线通信、车联网等。



孙宇璇 (1993-), 女, 博士, 清华大学电子工程系在站博士后, 主要研究方向为边缘智能、移动边缘计算、车联网等。



周盛 (1983-), 男, 博士, 清华大学电子工程系副教授, 主要研究方向为多天线系统的跨层设计、移动边缘计算、车联网和绿色无线通信。



牛志升 (1964-), 男, 博士, 清华大学电子工程系教授, 主要研究方向为排队论、流量工程、移动互联网、无线网络资源管理、绿色通信与网络。