

无线时间敏感网络技术综述*

乔 萱¹, 李宗辉¹, 刘 强¹, 艾 涌², 万 海³, 邓仰东³



¹(北京交通大学 计算机与信息技术学院, 北京 100044)

²(北京交通大学 电子信息工程学院, 北京 100044)

³(清华大学 软件学院, 北京 100084)

通信作者: 李宗辉, E-mail: lizonghui@bjtu.edu.cn

摘要: 由 IEEE 802.1 任务组开发的时间敏感网络标准可以用来构建高可靠、低延迟、低抖动的以太网, 将时间敏感网络扩展到无线领域也是目前许多工作的研究重点。与传统的有线通信相比, 无线的时间敏感网络不仅可以实现高可靠和低时延通信, 还具有更高的灵活性、更强的移动性以及更低的布线和维护成本等优点。因此, 在面对未来无人驾驶、协作机器人、远程医疗控制等新兴应用时, 无线时间敏感网络被认为是一种十分有前景的技术。无线网络一般可以分为基于基础设施的无线网络和无基础设施的无线网络, 而后者基于移动性还可以分为两类: 移动自组织网络和无线传感网络, 因此主要从这 3 种网络类型出发, 对其应用场景、相关技术、路由协议以及高可靠低时延传输进行了调研与综述。

关键词: 时间敏感网络; 5G; 移动自组织网络; 无线传感网络

中图法分类号: TP393

中文引用格式: 乔萱, 李宗辉, 刘强, 艾渤, 万海, 邓仰东. 无线时间敏感网络技术综述. 软件学报, 2025, 36(1): 184–202. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/7148.htm>

英文引用格式: Qiao X, Li ZH, Liu Q, Ai B, Wan H, Deng YD. Review on Wireless Time-sensitive Networking Technology. *Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software*, 2025, 36(1): 184–202 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/7148.htm>

Review on Wireless Time-sensitive Networking Technology

QIAO Xuan¹, LI Zong-Hui¹, LIU Qiang¹, AI Bo², WAN Hai³, DENG Yang-Dong³

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

²(School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

³(School of Software, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The time-sensitive networking standard developed by IEEE 802.1 Task Group can be applied to build highly reliable, low latency, low jitter Ethernet, and the extension of time-sensitive networking to the wireless field is also a hot topic. Compared with traditional wired communication, wireless time-sensitive networking can not only achieve high reliability and low delay communication but also has the advantages of higher flexibility, stronger mobility, and lower wiring and maintenance costs. Therefore, wireless time-sensitive networking is considered a promising technology in the face of emerging applications such as autonomous driving, collaborative robotics, and remote medical control in the future. Generally, wireless networks can be divided into infrastructure-based wireless networks and non-infrastructure-based wireless networks. The latter can be divided into two categories based on mobility: mobile ad hoc networks and wireless sensor networks. Therefore, this paper mainly studies and summarizes the application scenarios, related technologies, routing protocols, and high-reliability and low-delay transmission of the three types of networks.

Key words: time-sensitive networking (TSN); 5G; mobile ad hoc network (MANET); wireless sensor network (WSN)

* 基金项目: 国家重点研发计划(2022YFB3303702); 国家自然科学基金(62002013, 62272034)

收稿时间: 2023-06-27; 修改时间: 2023-10-09; 采用时间: 2023-12-21; jos 在线出版时间: 2024-04-29

CNKI 网络首发时间: 2024-05-06

1 引言

1.1 研究背景

近年来,由于新兴技术的不断出现,如无人驾驶、虚拟现实、智慧城市等,我们逐步进入了万物互联,即物联网时代。这些越来越多的时间相关、安全相关的实时应用程序的出现,在改变人们生活的同时,也对通信技术提出了更高的要求^[1]。在传统的工业网络,比如分布式控制系统中,大多依赖于现场总线,例如 CAN、FlexRay 和 PROFIBUS,但是随着未来网络中节点移动更加灵活、布线维护成本更高等因素,这些现场总线的方式难以满足各类应用的服务质量(quality of service, QoS)需求^[2],尤其无法应对工业物联网应用中的实时性、确定性要求。基于时间敏感网络(time-sensitive networking, TSN)的以太网虽然可以提供满足确定性和实时性要求的超可靠通信,但是其设计出发点仍是针对有线通信中高带宽、低时延需求,难以保证未来工厂所需要的灵活性需求,无法很好地支持具有移动性的工业应用,也就是说,传统时间敏感网络尚不足以支撑无线通信需求^[3]。因此,集灵活性、移动性以及低维护成本等特点于一身的无线时间敏感网络应运而生,并将逐步成为工业物联网应用发展的必然选择^[4]。

1.2 时间敏感网络

所谓时间敏感网络,是由 IEEE 802.1 任务组开发的一套数据链路层协议规范,可以用来构建更可靠的、低延迟、低抖动的以太网。它为以太网添加了确定性,主要特征有时间同步、流量整形、增强调度等方面^[5],其中,时钟同步和流量整形通常被认为是时间敏感网络的核心功能。

但是,随着新一代信息通信技术的发展,出现了越来越多的新兴行业。比如未来会逐渐普及的自动驾驶汽车,它不仅需要处理由其自身的车载传感器产生的许多重要数据,同时还需要利用道路上行驶的其他车辆或者路边环境设施产生的数据来进行决策,并且决策时间需要控制在极短的时间之内^[6]。显然,传统以太网的线缆限制了其高速移动性,已经无法满足这种需求。相反,无线时间敏感网络,即在无线网络中,实现高可靠、低时延和确定性通信网络的技术统称,能够很好地支持这些需要低时延和高可靠通信的实时应用。无线网络虽然具有更强的灵活性、移动性以及更低的布线成本等特点,但它和有线网络一样,依旧需要时钟同步、流量整形技术实现时间敏感通信。

(1) 时钟同步

能够协调实时任务的一个重要前提就是时间精确的时钟同步,工业自动化以及现代机器人等领域的重要技术之一就是实现传感器、执行器和控制设备之间相互同步,作为工业领域中两种主流的高精度时间同步协议^[7],即 IEEE 1588 和由其发展而来的 IEEE 802.1AS^[8],它们的主要功能是通过设置本地时钟来实现整个系统的时钟统一。

IEEE 1588 定义了精确的时钟同步协议(precision time protocol, PTP),该协议中将所有处理时间的设备都当作“时钟”,并设置了“主时钟”的概念,用最佳主时钟算法来构建同步体系,然后再使用本地时钟同步算法(如透明时钟传输机制)同步本地时钟。

IEEE 802.1AS 由 IEEE 802.1 TSN 工作组在 IEEE 1588 基础上定义并标准化,作为时间敏感网络的时间同步标准出现,与 PTP 相比,此标准有更强的应对延迟变化的抵抗能力^[9],并且对于相距 6 跳以内的两个时间感知系统,它可以实现同步精度 1 μs 以下的时间同步^[10]。

在无线网络,尤其是工业无线传感器和执行器网络中,由于每个传感器和执行器节点都需要精确的时间采样,所以节点间也需要高精度的时钟同步。比如在移动机器人中,由于它们之间进行协作需要高精度时间同步的无线通信系统,Wobschall 等人提出了一种改进的 IEEE 1588 协议用于无线传感网络中的时间同步^[11],Gundall 等人将 IEEE 802.1AS 直接应用于移动无线网络的时间同步^[12],实验结果表明,对于那些需要满足时间同步精度小于 1 ms 的场景,是完全足够的。

除此之外,在无线领域的时钟同步方法还有很多,如无线传感器中的基于泛洪的时间同步协议^[13]、递归时间同步协议^[14]、车载自组网中的参考广播同步^[15]和非对称分区同步协议^[16]等等。然而,这些方法虽然可以在某类无线网络中实现时间同步,但是依旧存在一些缺点,主要包括主节点的故障会导致整体性能下降、一些算法在单跳环境中适用但是随着跳数增加误差会快速增加、只适用静态拓扑而不考虑拓扑动态变化^[17]等。因此,对于无线网

络,想要实现高精度时钟同步依旧面临如下挑战^[18]:

- 动态同步:一些无线应用场景涉及较强的合作性和安全性,因此时钟同步方案需要在即使信道质量不断变化的情况下,也满足动态同步要求.
- 健壮性:由于在无线网络特别是移动自组织网络中,节点会不断地离开或者加入网络,所以无线网络中的时钟同步算法需要考虑到即使有些节点出现故障,时钟同步也不会发生中断.
- 低成本低能耗:与有线网络相比,无线网络中的节点能量通常非常有限,因此在进行时钟同步时,应该使各个节点能量消耗较低,以此延长工作时间.

(2) 流量整形

流量整形的主要功能是可以对突发流量的最大速率进行限制,或者当超过最大速率时可以把该流缓存,最终达到用比较均匀的速率平稳传输突发流量的效果,也因此能够减少分组丢包率以及缓解网络拥塞现象.

未来的无线工控场景主要是由一些有着严苛时延要求的实时应用组成,并且多数情况下需要进行多种类型流量混合传输,而由于不同类型的流量对于时延要求也不同,比如有硬实时、软实时等,所以,可以提供有界延迟的流量整形机制在无线网络中是极为重要的.但是目前 TSN 中的一些整形技术主要用于有线网络,无线网络中的流量整形技术主要是基于这些技术的一些改进.所以,首先介绍 TSN 中的流量整形与调度机制,主要包括 IEEE 802.1Qav 标准下的基于信用的整形器 (credit-based shaper, CBS)、IEEE 802.1Qbv 标准下的时间感知整形器 (time-aware shaper, TAS)、IEEE 802.1Qcr 标准下的异步流量整形器 (asynchronous traffic shaper, ATS) 以及 IEEE 802.1Qch 标准下的周期性排队与转发机制整形器 (cyclic queuing and forwarding, CQF).

TAS 的运行方式与时间触发以太网^[19]类似,都是时间触发调度,它使用门控制列表 (gate control list, GCL),通过门驱动机制来决定某个时刻哪些队列可以进行传输. TAS 考虑了计划流量 (scheduled traffic, ST) 以及尽力而为的流量 (best effort, BE) 两种主要的类型,其中, ST 属于高优先级类型流量, BE 属于低优先级的流量,为了防止低优先级流量对高优先级流量传输产生干扰,还设置了一个保护带机制.

CQF 简化了 TAS 的传输机制,从 8 个传输队列减少到 2 个,主要是以循环 (或者乒乓) 的方式来进行报文传输,通过利用偶数时间槽和奇数时间槽,让不同队列的接收或者发送数据操作交替进行,形成周期性排队与转发,于是数据帧在一个节点的延迟时间就被限定在 2 个时间槽的长度内^[20],以此获得确定性的网络时延,但实时性和确定性相对于 TAS 有所削弱.

TAS 和 CQF 都是通过时间触发传输方式来支持流的确定性传输,需要高精度的时间同步,然而这并非易事,比如时间信号帧的漂移或因网络拥塞引发的抖动都会使得 TSN 中同步时钟下游不准确^[21].

CBS 和 ATS 是两种不需要时间同步的流量整形器. CBS 作为一种基于信用的整形器,主要用于 AVB (audio/video bridging) 流,通过信用值的阈值大小来控制 AV 突发流的大小.在整个传输过程中单个数据包的优先级是固定的、不会改变的^[22],但信用值作为一个主要参数,是需要根据状态进行改变的,即当流在等待传输时,对应流量的信用值会以 idleSlope 的速率增加;而当流正在传输时,对应的信用值也会以 sendSlope 的速率降低.

ATS 是一种基于事件紧急性的调度器^[23],它会根据令牌桶整形算法为每个流量计算合格时间,合格时间越小越紧急,在当前时间大于等于合格时间时,发送该报文. ATS 相比于 CBS 有更好的端到端时延性能.但是 CBS、ATS 相比于 TAS、CQF,仅能通过网络演算给出端到端的最坏时延,无法保障传输时延的确定性,也无法根据业务的需求为每条流设置不同的时延.

上述这些流量整形技术近年来逐渐被拓展到无线网络中,支持无线时间敏感业务的传输.比如随着越来越多的音视频流的传输是在无线局域网上进行的,Kosek-Szott 等人^[24]提出了无线的基于信用的整形算法 (wireless credit-based shaper, WCBS),在其中引入了“调整周期”这一新概念来补偿高优先级帧遇到的退避和确认过程.Schneider 等人^[25]提出了一种可以与 TSN 中的 TAS 兼容的基于目标唤醒时间的 WiFi 6 时间感知调度机制,可以有效地把关键类型流量与其他类型的流量进行隔离.但是由于无线网络中的链路质量不断变化,所以在未来关于无线通信有界延迟的研究工作中,需要一个复杂的解决方案来对无线链路的质量进行测量和监控,方便实现资源管理^[26],进一步优化端到端的时延性能.

1.3 论文组织结构

无线网络一般可以分为基于基础设施的无线网络和无基础设施的无线网络或者无线自组织网络, 而后者基于移动性还可以分为两类: 移动自组织网络和无线传感网络^[27]. 本文主要聚焦于无线时间敏感网络. 第 2 节主要介绍移动通信网络中的 5G 时间敏感网络技术及其应用. 第 3 节主要介绍无线自组网中节点具有移动性的移动自组网时间敏感技术及其应用. 第 4 节主要介绍无线自组网中节点不具有移动性的无线传感网时间敏感技术及其应用. 第 5 节总结全文.

2 移动通信网络

在过去 10 年, 4G 作为一种可靠的通信技术被广泛普及. 但是, 预计到 2025 年, 每个物体都有可能成为互联网的一个节点^[28], 这种情况下会导致接入到互联网的设备数量大幅度上涨. 在工业物联网中, 连接程度的提高会对高可靠、低延迟、高速度和安全通信提出更高的要求^[29,30], 5G 作为新一代移动通信技术, 逐渐成为一种能够满足这些要求的有前景的代替方案.

2.1 5G 应用场景

作为新一代移动通信技术, 5G 可以在任何地点、任何时间向任何人提供固定和移动宽带服务^[31]. 它主要划分了 3 大应用场景——增强移动宽带 (enhanced mobile broadband, eMBB)、大规模机器类型通信 (massive machine-type communications, mMTC)、超可靠低时延通信 (ultra-reliable low-latency communications, URLLC)^[29], 如图 1 所示.

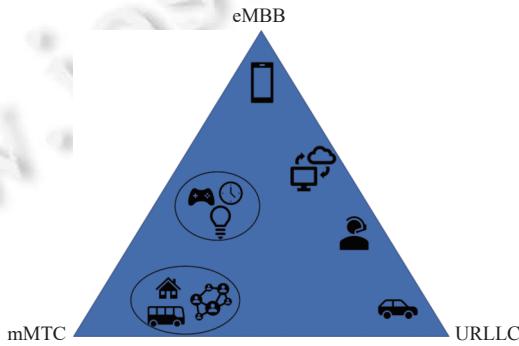


图 1 5G 的 3 大场景

eMBB 服务的重点是更高的数据速率, 它对于数据速率的要求为 Gb/s, 解决了包括访问多媒体内容、服务和数据等以人为中心的业务传输^[32], 可以服务于一些带宽有限但有着高数据速率要求的一些都市地区或者一些大型活动. eMBB 的常见用例包括虚拟现实、8K/4K 视频流、云应用等^[33].

mMTC 的特点是在一个广阔的区域来部署大量的机器类型的设备^[34], 这些设备在没有确定的时延要求和可靠性保证的前提下进行偶尔通信, 比如智慧城市、工业自动化^[35].

与 eMBB 关注数据速率不同, URLLC 更关注低延时和高可靠. 它要求延时小于 1 ms 且可靠性需要达到 99.999%. 常见应用包括自动驾驶、无人机、远程医疗控制等^[36].

2.2 5G 关键技术

在技术方面, 5G 主要技术有毫米波、Massive MIMO (multiple-input multiple-output) 和波束赋形等, 这些技术除了可以解决频谱短缺的问题外, 还带来了更高的数据速率、更大的容量以及更小的来自其他用户的干扰等优点, 有助于实现实时通信中低时延高可靠的通信目标.

(1) 毫米波

随着无线技术的不断发展, 智能手机、平板电脑以及各种的新兴可穿戴设备也在不断增加. 虽然这些无线技术和设备在迅速地向前发展, 但是频谱方面却未能跟上技术的步伐, 也就是没有足够的频谱资源来供这些设备使

用, 频谱短缺是一个愈来愈明显的问题. 而利用毫米波频率上大量可用的未占用带宽是解决频谱危机并满足 5G 以上通信需求的一个潜在方案^[37]. 5G 中的毫米波频段在 30–300 GHz 之间^[38], 由于频率越高, 波长越短, 因此这种情况下波长可以达到毫米级. 作为 5G 的主要技术之一, 毫米波频谱为增加容量提供了一个很好的机会, 未使用的毫米波频谱可提供更高的数据速率^[39]. 比如在地下采矿环境中, 像连接来自采矿作业现场的实时信息、视频监控等业务都需要高带宽的数据传输速率, Ghaddar 等人^[40]使用 5G 毫米波通信技术在煤矿地下隧道中进行了确定性实时传输模型的构建. 在高铁场景中, 由于铁路在不断刷新最高速度的记录, 高铁通信系统在数据速率的无缝连接方面也提出了更高的要求, He 等人^[41]针对农村、城市以及隧道等特殊的高铁场景研究了 5G 毫米波的传输特性.

毫米波技术虽然可以使得数据速率得到很大提升, 但是它也存在一些缺点, 比如容易受到树叶、建筑物等障碍物的干扰, 即阻塞敏感性, 这将会使毫米波系统的性能受到严重影响. 针对这种情况, Sim 等人^[42]分析了毫米波该性质在车联网中的影响, 并提出了一种基于上下文感知的在线学习算法, 使毫米波基站能够自主地从上下文学习来了解周围环境. Gapeyenko 等人^[43]选择在 5G 毫米波系统中使用无人机作为空中继节点, 以便在其辅助下进行更可靠的毫米波回程, 减少了遮挡障碍对地面链路的影响.

(2) Massive MIMO

大规模 MIMO 是指多根天线发送, 多根天线接收. 它将频谱、天线和无线电结合在一起进行协同优化, 为 5G 带来了更高的速度和容量^[44]. 它可以在把容量提升至少 10 倍的同时, 把辐射能量效率提升 100 倍左右^[45]. 大规模 MIMO 这种提升频谱效率和吞吐量的能力使得它成为新兴无线标准的关键技术^[46]. Lienard 等人^[47]首次研究了 MIMO 900 MHz 系统在地铁隧道中的性能, 并针对隧道的尺寸大小及天线陈列的配置对 MIMO 信道性能的影响进行了分析. 在车联网中, 因为车辆需要在不同的场景下和各式各样的事物进行通信, 因此需要具备 360°覆盖区域的天线, 基于这种需求, Ikram 等人^[48]设计并完成了一种 MIMO 天线, 实现了 360°方位的平面覆盖. 在日常生活中, 可穿戴设备以及高清视频分辨率等的发展也对带宽和数据速率提出了更高的要求, Shoaib 等人^[49]设计了一种用于 5G 可穿戴设备(如智能手表)的 MIMO 天线, 可以实现更高的数据速率和更宽的带宽, 同时还具有较低的回波损耗和辐射性能. 除此之外, 在 5G 毫米波技术中, 传播损耗的存在也使其需要高增益天线. 尽管很多方法都具有高增益的优点, 比如堆叠多个贴片基板、介电谐振器天线和超态贴片天线等^[50–54], 但是它们存在大尺寸和高轮廓等缺点. 因此, 最近很多研究工作将毫米波和 MIMO 两种技术结合, 转向了具有高增益和 MIMO 的毫米波天线, 比如, Bilal 等人^[55]提出了一种具备高增益和紧凑设计的毫米波 MIMO 天线, 不仅结构简单, 还具备很好的 MIMO 性能和较低的信道容量损失, 保证了在 5G MIMO 应用中的适用性.

(3) 波束赋形

由于毫米波高频传输导致的全向路径损耗增加的问题可以由合适的波束赋形和定向传输进行补偿^[56]. 波束赋形指的是基站适应天线辐射模式的能力^[57]. 基站在波束赋形的作用下, 如图 2 所示, 可以寻找到恰当的路由来把数据传递给终端, 同时还可以降低在路由过程中对沿线附近的其他终端用户的干扰^[58].

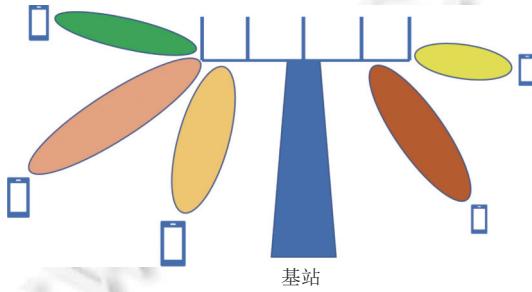


图 2 波束赋形

波束赋形的应用场景大多与 MIMO 有关. 比如, 随着雷达和通信共享一个平台的应用越来越多, 它们之间频谱共享的需求也越来越大, 这种情况下, Liu 等人^[59]提出了一种 MIMO 雷达和多用户 MIMO 通信的联合发射波束

形成模型, 在这种多波束的情况下, 实现了分别向雷达目标和通信接收机发送独立雷达波形和通信符号的目标。在多天线阵列的下行传输场景中, 考虑到由于在总功率约束下, 使用经典加权最小均方误差算法来计算 MIMO 广播信道加权和速率最大化问题会导致算法复杂性太大且得到的是次优解, Huang 等人^[60]提出了一种基于无监督学习的快速波束形成设计方法, 使得计算速度显著提高, 即使只能容忍几毫秒延迟的车辆通信, 也可满足其低延迟和低功耗需求。在 MIMO 通信系统中, 不仅需要关注数据传输质量, 还需要关注波束形成在提高定位质量方面的潜力。比如, Zhou 等人^[61]提出了一种连续定位和波束形成方案, 该方案不仅估计终端设备的长期位置, 还估计了终端设备的瞬时信道状态, 最终通过联合估计结果来优化波束形成矢量, 提高了终端定位的性能。

2.3 5G 中的时间敏感网络

传统网络采用的基于“一刀切”的方法不具有很好的灵活性和可扩展性^[62], 不能满足 5G 中各式各样的服务需求。但是, 网络切片技术可以用来支持 5G 中各种垂直领域的服务。所谓切片技术, 如图 3 所示, 是指把一个物理网络切割成多个逻辑上的网络, 每个网络都可以给不同的应用场景提供适合它们的服务^[63]。通过采用切片技术虽然可以实现隔离地给不同的业务提供它们所需要的资源, 但是依旧无法保证网络延迟的界限, 即不能保证数据的确定性传输。5G 要想实现超低延迟通信服务, 在很大程度上需要依赖 TSN 的一些相关标准及研究成果。

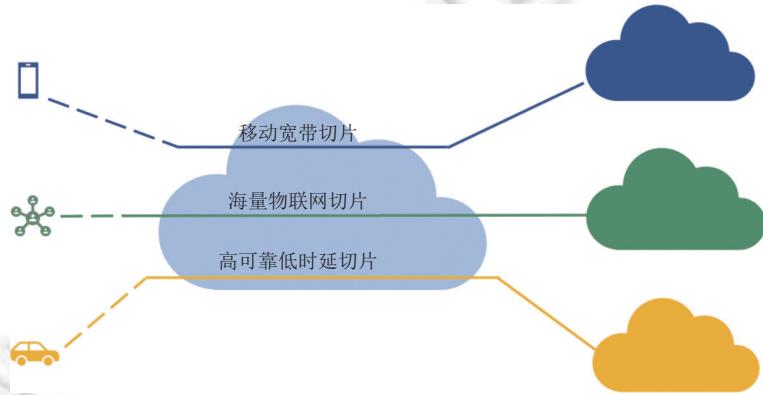


图 3 5G 网络切片示例

2.3.1 5G+TSN 架构

国际标准组织 3GPP (3rd generation partnership project), 如图 4 所示, 用 5G 网络和 TSN 网桥实现 5G+TSN 的跨域通信^[64]。其基本思想是建立一个黑盒模型, 在 5G 系统内部依旧是使用 5G 的通信框架进行 TSN 帧的传输, 然后在边缘侧使用 TSN 桥接将 5G 系统接入到外部 TSN 网络^[65]。

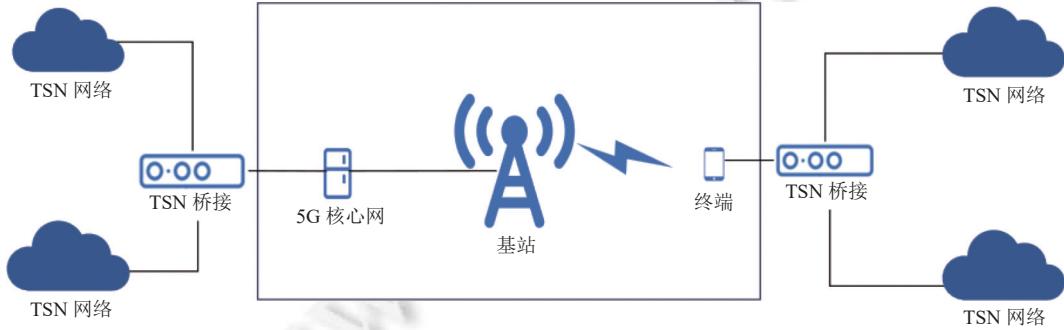


图 4 5G+TSN 架构

但是, 3GPP 规范并没有关于 5G 和 TSN 之间 QoS 属性映射的定义。Satka 等人^[66]提出了一种在 TSN 和 5G 通信技术之间转换流量的技术, 包括 5G 到 TSN 和 TSN 到 5G 两个方向的转换。主要思想是一旦帧到达转换器,

就要检查数据的业务属性以便确定需要进行哪种类型的转换。他们对车载业务进行了转化，并对 5G+TSN 的端到端时延进行了评估。除此之外，Satka 等人还在 [67] 中提出了一种高效的 QoS 映射算法 QoS-MAN，把所有事先定义的 5G QoS 参数集纳入考虑范围后，算法主要通过 5G 资源类型映射和 5G QoS 标识符映射两个步骤就可以有效地将以太网流量映射到 5G QoS 流。最终通过使用具有随机性的场景进行实验评估，结果表明，该算法能够满足的应用约束达到 90% 以上。遗憾的是，他们没有与 TSN 帧的优先级建立映射关系。

2.3.2 5G 中的超可靠低时延通信

URLLC 能力作为 5G 网络的关键服务之一，有助于实现超可靠和低延迟的端到端通信。5G NR (new radio) 在时域上有着新颖、灵活的帧结构，如图 5 所示。

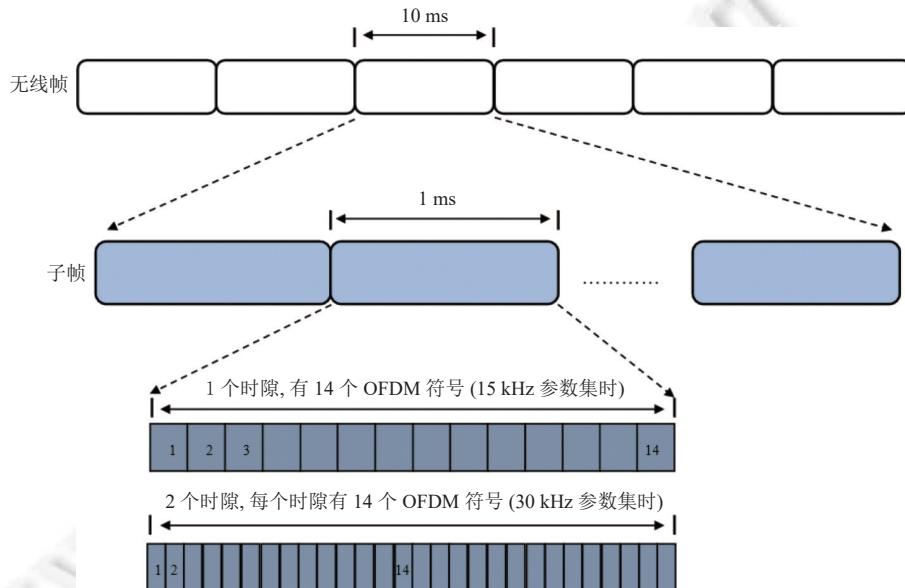


图 5 NR 帧结构

无线传输是通过无线帧、子帧、时隙和微时隙进行的，一个微时隙理论上可以短到 1 个 OFDM 符号，但是 3GPP Release 15 将微时隙的长度限制为 2、4 或者 7 个 OFDM 符号。5G NR 通过把 OFDM 子载波间距从 15 kHz 扩大到 120 kHz，可以把 14 个符号的传输槽的持续时间从 1 ms 减少到 125 μ s^[68]，持续时间则更短，也因此微时隙可以用来支持 URLLC 类型流量传输。比如在有 eMBB 和 URLLC 两种类型流量进行混合传输时，由于 URLLC 关注时延和可靠性而 eMBB 关注最大数据速率，如何进行流量协同调度是一个具有挑战性的问题。在文献 [69, 70] 中，研究者使用刺穿功能来实现两种类型的流量的联合调度，即把 eMBB 流量在微时隙中的传输功率设置为 0，以实现对每个微时隙中的资源进行分配。但是这种使 URLLC 流量刺穿正在进行传输的 eMBB 流量的方法会导致 eMBB 流量的数据速率下降。Pradhan 等人^[71]提出了一种基于联合偏好度量的 eMBB 和 URLLC 共存的有效资源分配策略，第 1 个度量是针对 eMBB 用户提出的，该度量会考虑前一个时隙中期望实现的 eMBB 速率；第 2 个度量是针对 URLLC 用户提出的，该度量会依赖当前微时隙之前的 URLLC 流量的放置策略。通过联合考虑这两个度量，可以避免上述直接将 eMBB 传输功率设置为 0 的弊端，从而不仅可以完成将资源最优地分配给 URLLC 用户，还可以使 eMBB 数据速率的最小可到达最大值得到保证。Bairagi 等人^[72]则利用时域上的不同时隙，将 eMBB 终端之间的数据流按照时隙安排，而 URLLC 终端的数据流则按照微时隙安排，以完成在满足 URLLC 流的 QoS 的同时，最大化 eMBB 终端的最小期望实现率。You 等人^[73]则从时、频两方面出发，提出了一种基于线性规划和拉格朗日对偶的可扩展算法，利用频域上灵活的可选参数集和时域上可变的时隙长度来服务不同服务质量的 eMBB 和 URLLC 数据流。

除了微时隙之外, 在降低延迟方面, 5G 还在 MAC 级引入无授权调度技术来降低传输延迟, 所谓无授权调度, 是指在 5G 网络中, 基站会定期事先给终端分配资源, 当终端需要进行数据传输时就可以直接使用, 而不需要再向基站进行请求访问, 以此减少请求调度的时延。但是由于终端进行上行传输数据是不定时的, 因此这种预先进行资源分配的方式存在着效率不高的弊端, 如何兼顾无线资源的利用率和偶发性及周期性流量的延迟和可靠性需求, 也是当前面临的关键技术问题所在。针对这种情况, Lucas-Estañ 等人^[74]提出了一种使用基于优先级的争用解决方法和基于业务感知的免授权调度策略。实验结果表明, 它们能够满足垂直方向的所有偶发性和周期性流量的需求。Weerasinghe 等人^[75]将无授权、优先级、动态时隙结合在一起, 提出了一种基于优先级的无授权接入方案, 并对具有不同优先级的设备进行动态时隙分配, 即先分配高优先级流量, 然后把同一个子帧中的剩余时隙分配给低优先级。Mahmood 等人^[76]为了同时获得高资源效率、高可靠性和低延迟的性能, 提出了一种将无授权传输与非正交多址接入结合在一起的可靠性增强解决方案。

5G 时间敏感网络有很多应用场景。比如在汽车领域中, 当车辆的绝对速度达到 250 km/h 时, 车辆与远程应用服务器之间的信息交换时延需要小于 5 ms 且可靠性需要高于 99.999% 的远程驾驶场景^[77]。针对这些场景, Wang 等人^[77]以 3GPP 提出的 5G+TSN 桥接技术为基础, 把整个 5G 系统当作一个 IEEE 802.1AS 时间感知系统以实现 TSN 的跨域时间同步, 保障 V2X 中数据流的确定性传输。在移动机器人领域中, Kehl 等人^[78]使用了 5G URLLC 特性并将其集成到 TSN 网络中, 然后使用 PPS (pulse-per-second) 信号对每个设备的系统时间进行比较, 以此测量时钟之间的偏移, 进行高精度的时间同步; 在流量设置方面, 按优先级对流量进行分类并使用 TSN 中的流量整形器进行调度, 最终实现机器人之间信息的低抖动、低时延和高可靠传输。

3 移动自组织网络

移动自组织网络 (mobile ad hoc network, MANET) 是无线网络的一种。它允许用户在没有任何物理基础设施的情况下进行通信且不用关注他们所处的地理位置^[79]。

3.1 MANET 应用场景

由于 MANET 的灵活性和可扩展性等特点, 它已经被运用到了各种领域和场景, 如军事、教育和各种应急场景。特别是在灾后救灾工作中, 由于基础设施和通信系统的瘫痪崩溃, 使用 MANET 来解决临时用户终端之间的通信是当前最常用的一种应急通信技术。除此之外, 由于现有的蜂窝网络不能做到在没有集中基础设施的情况下连接所有的智能设备, Alam 等人^[80]提出了一种用于智能设备之间通信的 Cloud-MANET-IOT 框架。该框架能够保障各种智能设备间的通信, 还可以向 MANET 用户提供云服务, 并且可以在 5G 物联网的框架中实施。

常见的 MANET 类型有车载自组网 (vehicular ad hoc network, VANET)、飞行自组网 (flying ad hoc network, FANET), 基于因特网的移动自组网 (Internet-based mobile ad hoc network, IMANET) 以及智能车载自组网 (intelligent vehicular ad hoc network, INVANET)^[81]。在 VANET 中, 网络中的移动节点是由车辆充当, 这种网络可以在智能交通系统中用来解决道路运输问题^[82]。FANET 是由一些小型无人机自组织连接成的网络, 这种网络由于没有中心控制器而具有机动性强的特点, 可以灵活、快速地部署在运营费用较低的网络^[83]。IMANET 主要是由一些接入互联网的终端设备组成, 可以支持 IPv4、IPv6 以及 TCP/UDP 协议。INVANET 主要使用 WiFi 和 WiMAX 来解决车辆之间快速且高效的动态移动通信。

3.2 MANET 中的时间敏感网络

MANET 虽然是无通信基础设施区域中最常见的通信技术, 但是由于节点不停地移动导致了拓扑以及信道质量的不断变化, 在传输时延、抖动等方面很难保证各种服务所需要的 QoS。借鉴时间敏感网络为了实现数据包的时间可预测和可靠性传输采取的传输机制, 下面从两个角度介绍 MANET 的时间敏感传输技术^[84], 一是调度, 解决每条流在什么时候传输; 二是路由, 解决每条流在哪条路径上传输。

3.2.1 MANET 中的 MAC 协议及对应的调度算法

在 MANET 中, 如果节点传输数据是在相同的公共无线电传输范围内进行, 当有两个节点同时进行发送数据

的时候,就会发生碰撞.为了减少这种情况,通常可以从 MAC 协议出发,设计一种时间触发式调度协议.与基于争用的载波监听多点接入碰撞避免 (carrier sense multiple access with collision avoidance) 协议不同,时分多址接入 (time division multiple access, TDMA) 这种非争用的、通过把时间划分成固定的时隙后使不同的节点在不同的时隙传输数据的协议,更有助于在 MANET,特别是战术场景中实现可靠的传输.比如, Kim 等人^[85]提出了一种用于战术无人车辆系统的双向 TDMA,在端到端时延和抖动方面表现出很好的性能,但是他们只考虑了时隙容量充足的情况,不具有普遍适用性. Cao 等人^[86]针对 VANET 中节点密度比较高的情况提出了主动的时隙预留策略,当新的节点加入网络时,由于时隙预留从而实现快速调度,但是他们没有考虑到端到端时延问题. Wi 等人^[87]提出了基于深度强化学习的战术 MANET 时延感知 TDMA 调度,虽然仿真结果可以满足 QoS 要求,但是他们仅在一种树形拓扑网络上进行了测试,并且设置了中心节点,而中心节点一旦出现故障,就会使整个网络受到严重影响. Asgharian 等人^[88]提出了一种移动自组织网络的自适应分布式 TDMA 调度协议.该协议在降低端到端延迟的同时,还通过设置 sleep 和 wake 两种状态为节点节省能量.除此之外,这种分布式算法比集中式算法具有更好的扩展性.

除了时间触发式调度,基于优先级的调度也是 MANET 中的常见调度方法.在 MANET 的应用场景中,各个节点是在网络资源有限的情况下以分布式多跳协同传输的方式实现信息交互的^[89].为了提高整个网络的服务质量,需要合理地对网络资源进行分配和使用,来保证关键型业务流的传输质量.TSN 作为一种为时间敏感应用提供可靠数据传输保障的标准化技术^[90],它的一个重要原理是可以给不同的流量分配不同的优先级,从而可以给对于时延有不同要求的报文提供业务保障.MANET 在优先级机制方面也有大量的研究工作.比如, Yuan 等人^[91]提出了一种混合优先级调度算法,在更新报文优先级时以最早截止时间作为参考,但是这种方式只考虑了过去而没考虑未来.Gao 等人^[90]提出了动态优先级数据包调度方案,在进行动态优先级分配时,不仅考虑了已经发生的数据包延迟对优先级的影响,还考虑了未来传输过程中受到的影响.Nallayam Perumal 等人^[92]综合移动节点的可操作性、带宽需求和优先级这 3 个方面进行考虑,提出了一种改进的优先级感知 (AODV) 方案,主要包括设置节点速度阈值、设置数据速率阈值、分配优先级和分配带宽这 4 个部分内容,实现了吞吐量更加稳定和延迟显著降低的效果.

两种调度方法相比,时间触发式调度能够保证确定性传输,而基于优先级的调度往往会以牺牲低优先级业务流为代价,保证高优先级业务流的传输,因此不能保证低优先级业务流传输时延的界限,无法实现确定性传输.除此之外,时间触发式调度由于采用资源预留的方式,可能会存在资源利用率不高的问题,相比之下,基于优先级的调度在资源利用率方面效果要好一些.

3.2.2 MANET 中的路由协议

MANET 节点是可以不断移动的,它们能够以任意的方式自我组织在一起,直接或间接地进行通信^[93]:如果两个节点位于无线电范围内,那么它们可以直接通信;如果它们不在无线电范围内,就可以使用多跳路由进行间接通信,即每个节点会根据路由算法把数据包从源路由到最终希望到达的目的地.因此,路由协议在 MANET 中扮演着十分重要的角色.常见的路由协议分为反应式路由协议、主动式路由协议和混合式路由协议这 3 种^[94],主要特征以及典型路由协议如表 1 所示.

对于主动式和被动式两种路由,它们有着各自不同的特点^[95].在延迟方面,由于主动式路由协议会提前发现路由,并且随着网络拓扑结构的变化定期更新,所以路由引起的延迟一般很小,而反应式路由则在传输数据时才按需生成路由,因此延迟方面要比主动式路由大;在可扩展性方面,主动式路由由于需要对路由表中的每个节点条目进行维护,所以不太适合动态变化的大型网络,通常不超过 100 个节点的规模,而反应式路由特别是源路由协议 (DSR) 可以扩展到几百个节点,点对点时甚至更高;除此之外,主动式路由中由于每个节点都需要维护一个路由表,所以控制开销和存储需求都会比反应式路由高.

除了上述典型的路由协议,为了在 MANET 中实现可靠性传输,许多研究工作也从设计可靠的路由协议出发.比如,考虑到无线链路的信道质量可能会由于多普勒扩散和多路径传播导致短期衰落,不仅会引起链路质量的频繁变化^[96],而且可能还会因为不准确的链路信息导致错误路由^[97], Kang 等人^[98]设计了 ORGMA 路由协议.该协议

在计算路由成本方面, 基于瞬时信噪比, 使用梯度转发, 让发送节点广播一个探测报文, 接收方做出路由决定。实验结果表明, 这种方法的性能要明显优于 AODV、OLSR 等一些确定性路由协议。除了信道质量会影响通信外, 由于节点是不断移动的, 它们之间的距离也会不断改变, 所以路由的可靠持续时间也是需要考虑的。为此, Ilango 等人^[99]度量节点的可用性, 提出了一种基于确定性多播链路的可用性优化路由机制, 在全部可以使用的路径中选择一个剩余可用性最大的最优路由路径, 这种方法提高了网络寿命和分组交付比, 是一种有效的数据传输方法。

表 1 MANET 中典型路由协议

协议类型	基本原理	典型路由协议	优点	缺点
反应式 路由协议	不会事先生成路由, 只有当节点需要发送数据时才会计算路由	AODV ^[100] (ad hoc on-demand vector routing)	控制消息相对较少、支持多路径路由	产生路由延迟; 路由表维护开销大、黑洞攻击威胁
		DSR ^[101] (dynamic source routing)	带宽开销小、节点能量消耗小, 可扩展性强	报文长度大, 存在路由响应竞争
		TORA ^[102] (temporally ordered routing algorithm)	自适应、分布式路由, 可以更好地适应高速移动网络	路由维护开销大; 网络可用性低
主动式 路由协议	提前发现路由, 每个节点都会试图保持整个网络的最新拓扑图, 并且不断地评估路由	DSDV ^[103] (destination sequence distance vector routing)	确定性路由, 路由无环路、快速收敛	带宽消耗大, 可扩展性差
		OLSR ^[104] (optimized link state routing)	控制开销小; 反应灵活	大规模、高密度网络中网络性能差
混合式 路由协议	主动式路由协议和反应式路由协议的结合	ZRP ^[105] (zone routing protocol)	高效	电源管理不合理, 寻找边缘节点时增加带宽利用率

对于 MANET 这种无线网络, 特别是对于一些时延敏感的应用, 在通信开始阶段就找到一条可靠的、合适的路由是非常关键的, 主要是 3 个方面原因: 一是在传输过程中由于路由中断而重新计算路由是非常耗时的; 二是不适当的路由策略可能会增加传输操作的数量, 从而产生额外的延迟; 三是如果太多的流尝试同一时间通过同一路径, 可能会增加网络中流的阻塞时间。因此, 在 MANET 中设计路由协议, 不仅需要考虑应用程序对于时延的要求, 还需要将其与不断变化的动态拓扑、可变的带宽需求、复杂的基础设施以及多跳通信、网络规模等特点综合考虑。

4 无线传感网络

无线传感网络 (wireless sensor network, WSN) 是由传感器节点构成的一种自配置网络, 在每一个节点之间用无线电信号来进行相关操作, 比如通信、监控、感知和理解物理背景^[106]。每个传感器节点都会含有一些像无线电收发器、微控制器、与传感器接口的电子电路以及类似电池的能源供应等这样的功能部件^[107]。与传统的有线工业监控系统相比, WSN 具备比如低成本高效益的运营维护、安装简单快速、网络覆盖范围可扩展性强以及单节点故障的恢复能力强等很多优势^[108]。近些年来, 无线传感网络已经被应用到各种各样的领域, 比如地震监测、环境工程、饲料和栖息地以及军事等等, 尤其在比较偏僻遥远的地区, 网络基础设施较差, WSN 被认为是一种可靠的网络解决方案, 逐渐改变着人们的生活。WSN 和移动自组网、普适计算以及人工智能一起建构了环境智能的跨学科概念^[109]。由于无线技术的快速发展, 实时无线通信也成为 WSN 的一个重要研究应用领域, 传感器即时地感知和记录数据, 并实时反馈给最终用户, 这种能够保证网络有界延迟的无线传感网络又被称为实时无线传感网络 (real time wireless sensor network, RTWSN)^[110]。

4.1 WSN 应用场景

一方面, 随着半导体和嵌入式软件技术的不断发展, WSN 已经应用到了各种不同的领域。比如, 在自然灾害发生后, 能够迅速且高效地对损失进行评估并及时恢复生产是必要的, Erdelj 等人^[111]描述了如何利用无线传感网技

术和无人机来增强灾害预测、评估和响应, 提出了一种能够对灾害进行分类的方法和用于有效灾害管理的网络架构。在农业中, 由于靠近森林的农田地区容易被野生动物闯入破坏, Bapat 等人^[112]提出了一种用于农作物保护的无线传感网应用程序来驱逐田间作物的动物入侵; Nam 等人^[113]提出了一种基于射频识别和快速响应码的灌溉设施管理 WSN 应用, 通过将无线传感网与农业灌溉结合的方式为用户节省资金, 同时还有助于环境的可持续监测。在环境监测中, Othman 等人^[114]对 WSN 在环境监测中的应用进行了总结, 包括农业监测、栖息地监测、室内生活监测、温室监测、气候监测和森林检测等。在军事活动中, 高效的作战行动是必不可少的, 但是在像城市这种具有不透明性质的环境中进行作战又是很困难的, Diamond 等人^[115]通过无线技术和可互操作网关在空中部署了无线传感网络, 为上述传感器在城市作战中的缺陷提供了很好的支持。在交通环境智能化进程中, 仅仅靠有相关能力的交通专家对车辆检测系统的性能进行评估是不太可行的, 除了评估时间长的缺点之外, 带有主观色彩的评价体系会导致性能评价缺乏客观性, Yoo 等人^[116]提出了一种应用无线传感网络评估部署车辆检测系统的智能和安全交通系统, 来生成准确、客观的交通信息。在智慧城市场景中, Nasser 等人^[117]提出了一种用 WSN 来收集、聚合和调度数据包的网络体系结构以减少云中数据处理时间。

另一方面, 由于信息过期会对系统的监控产生一些不相关的影响, RTWSN 在监测、跟踪等方面也发挥着重要作用。比如, 在农业领域, 考虑将 WSN 与移动通信控制技术结合, Li 等人^[118]设计了一个可以实时采集数据、自动传输数据并通过移动设备进行远程控制的实时移动智能监控系统, 可以实现随时随地监测大棚; Shylaja 等人^[119]开发了一种用于土壤分析的 RTWSN, 方便用户随时随地通过移动应用程序查看无线传感器测量并传输到云端的数据; 为了在农田或者花园中实现可持续灌溉, Gloria 等人^[120]提出了一种基于 WSN 的实时环境数据检索系统来跟踪环境状态, 以检测是否真正需要灌溉。在医疗领域, Wu 等人^[121]提出了一种具有太阳能收集功能的可穿戴传感器节点, 可以通过测量心跳等物理信号实现医疗监测。可以看到, 在 RTWSN 的应用中, 主要是通过某种手段将具体环境与人连接起来, 随时随地地实现对实物的监测与控制。

4.2 WSN 中的时间敏感网络

在工业环境中, 实时性和可靠性对于数据传输来说是非常重要的两个性能指标, 比如在对地下施工环境进行安全监测时, 如果不能保证以上两个因素, 那么数据将会失去测量的意义。因此, 保障数据从传感器采集、传输到终端接收的端到端低时延、高可靠是十分关键的, 同时也是极具挑战性的。很多研究工作从 MAC 协议、路由协议设计出发, 寻求解决方案。

4.2.1 WSN 中的 MAC 协议及对应的调度算法

常见的 WSN 应用程序在向接收器报告被监测的事件时, 不仅需要考虑时延, 还需要考虑能量消耗。在无线传感网络中, MAC 是决定信道接入时延、利用率和能耗的关键因素^[122]。因此, 为了实现低时延和低能耗的数据传输, 常见的解决方案通常从 MAC 层入手。在当前的无线传感网中, MAC 协议设计可分为基于争用、无争用和混合这 3 种类型, 其中混合 MAC 协议主要是将前两者结合起来使用。

在基于争用的 MAC 协议中, Singh 等人^[123]提出了一种基于争用占空比的低延时路由集成 MAC 协议, 主要思想是, 如果不相交集里的节点可以成功地竞争信道, 那么该集合中的所有节点都能够进行数据传输, 这种方法不仅可以降低信道接入竞争, 还能够降低由于偷听及空闲监听而产生的能量消耗。在低占空比的无线传感网中, 该方法能够提供更低的延迟和更高的包交付率。但是, 这种基于争用的 MAC 协议缓解了报文的碰撞问题, 却无法完全避免, 而且只适合流量密度比较低的场景, 因为高流量网络可能会因为大量冲突而无法确定最大传输延迟。

无争用的 MAC 协议主要是进行专属信道的分配, 比如在基于 TDMA 的 MAC 协议中, 可以通过时隙调度来解决不同节点发送数据的碰撞问题, 同时使节点在非通信时隙进入休眠状态可以节省能量。Bekmezci 等人^[124]提出了一种用于军事监测的基于时分多址的新型无线传感网络系统。他们不仅考虑了能源消耗和延迟, 还考虑到了可伸缩性和容错性, 设计的系统主要包括 3 个方面, 即新的时间同步方案、数据指示槽以及分布式时间触发调度机制, 其中, 前两者可以有效降低能耗, 后者可以用来处理延迟和容错。除了时间触发调度以外, Singh 等人^[125]还提出了一种事件驱动的低延迟跨层 MAC 协议, 通过识别发送数据传输请求的节点, 即调度窗口中发送了数据传输

请求的节点或者接收到数据传输请求的即将作为下一跳接收节点的节点, 将数据接收时隙直接分配给这些节点, 从而增多了同一周期内可以发转发数据包的节点数量, 减少了端到端延迟。因此, 设计一个好的 MAC 协议, 不仅需要考虑时延和能量消耗, 还需要考虑负载均衡、网络规模、容错性和公平性等因素。

总的来看, 基于争用的 MAC 协议允许很多个节点通过竞争的方式来访问介质并传输数据, 因此, 与无争用的 MAC 协议进行专属信道分配不同, 它不需要复杂的时间同步或者集中控制调度算法, 具有更好的灵活性, 但是随着网络负载的增加, 会存在性能下降的问题。无争用的 MAC 协议虽然通过专属信道分配解决了碰撞问题, 但是也存在资源利用率低等问题。

4.2.2 WSN 中的路由协议

虽然 MAC 层可以提供实时保证, 但是如果数据包在转发传输过程中没有一个传输延迟界限, 那么, 其截止时间依旧无法被满足。因此, 一个好的路由协议也是必需的。作为自组织网络中的一种, WSN 中的路由协议与 MANET 中的相同, 也分为主动路由和被动路由。通常的 WSN 数据包需要通过两个步骤来进行转发, 一是利用链路评估和路由度量, 由路由协议确定下一跳, 二是等待目的节点被唤醒并向其发送数据包。Landsiedel 等人^[126]脱离了这种经典转发范式, 提出了一种机会路由方法, 在数据包进行转发时, 存在一个潜在接收节点集合, 然后将第 1 个醒来收到数据包的节点作为下一跳接收节点并向其转发报文, 以此方式来减少延迟和能量消耗。Zhang 等人^[127]考虑了 WSN 的特点和实时传输问题, 针对工业物联网在井下开采中的应用提出了一种基于 TSN 的路由调度方法, 并在 WSN+TSN 混合拓扑中对算法进行了分析比较, 结果表明, 该方法在时延抖动方面表现出了良好的性能。

与上述单纯考虑延迟和能量消耗不同, Xian 等人^[128]将该问题与具体环境结合, 提出了一种用于海上搜救无线传感网的低延迟和低能耗的机会路由协议, 在进行数据包转发时, 他们主要从两个方面进行了设计, 一个是海洋节点之间的连通性, 另一个是分组进度阈值, 利用最优的分组进度期望和最小的等待时间来优化转发时延, 最终增加了超过 21.4% 的数据包传递率, 降低了超过 39.2% 的时延, 并且当平均节点的速度达到 20 m/s 时, 能耗减少了超过 18.1%。

5 总 结

本文从无线时间敏感网络技术及其应用出发, 对基于基础设施的 5G 移动通信网络、无固定基础设施的移动自组织网络和无线传感网这 3 种网络的低时延高可靠传输技术以及相关应用进行了调研。无线时间敏感网络技术是工业物联网应用发展的必然选择, 当前仍面临诸多挑战。

总的来说, 对于无线网络, 由于它没有具体的有线传输介质, 所以链路质量、通信范围、环境等因素都会对吞吐量、时间同步精度、通信稳定性等产生影响。因此, 如何克服这些因素, 保障无线通信网络的高可靠、低时延传输是无线时间敏感网络技术的本质问题。具体而言:

(1) 对于移动通信网络, 在进行混合流量传输时, 当前的工作为了满足 URLLC 类型流量的服务质量, 通常以牺牲 eMBB 和 mMTC 两种类型流量为代价, 如何在保障 URLLC 业务流服务质量前提下, 协同传输 eMBB 和 mMTC, 最大化 eMBB 和 mMTC 的服务质量亟待解决。

(2) 以 5G 来说, 虽然相比于前几代移动通信网络, 其速率得到了很大提升, 但是当其用于高密度网络, 比如大型车联网时, 如何在提供超快通信的同时, 保证超快定位的问题亟待解决。波束赋形技术也许会提供很好的支持。

(3) 在 5G 毫米波技术中, 由于随着发射机和接收机之间距离的增加, 路径损耗也会增加。因此, 传播损失和堵塞影响这两个问题, 是使用毫米波技术面临的主要挑战。

(4) 对于移动自组织网络和无线传感网络这种自组织网络, 当前的时间同步方案大多是在静态拓扑中进行的, 考虑节点移动性后的高精度时间同步协议仍有待提出。尽管当前两种网络有很多关于低时延调度和可靠路由设计方面的研究工作, 但它们大多考虑单一方面的因素, 比如移动自组织网络中的动态拓扑、无线传感器节点的能量开销等, 忽略了网络中节点的其他特点, 如较低的无线电范围、潜在的高密度、不断变化的环境等, 因此, 挖掘这

些因素的关联关系,设计高可靠、低时延,甚至确定性的无线自组网传输技术亟待突破。

References:

- [1] Adame T, Carrascosa-Zamacois M, Bellalta B. Time-sensitive networking in IEEE 802.11be: On the way to low-latency WiFi 7. *Sensors*, 2021, 21(15): 4954. [doi: [10.3390/s21154954](https://doi.org/10.3390/s21154954)]
- [2] Jacob R, Zhang LC, Zimmerling M, Beutel J, Chakraborty S, Thiele L. TTW: A time-triggered wireless design for CPS. In: Proc. of the 2018 Design, Automation & Test in Europe Conf. & Exhibition. Dresden: IEEE, 2018. 865–868. [doi: [10.23919/DATE.2018.8342127](https://doi.org/10.23919/DATE.2018.8342127)]
- [3] Cavalcanti D, Perez-Ramirez J, Rashid MM, Fang J, Galeev M, Stanton KB. Extending accurate time distribution and timeliness capabilities over the air to enable future wireless industrial automation systems. *Proc. of the IEEE*, 2019, 107(6): 1132–1152. [doi: [10.1109/JPROC.2019.2903414](https://doi.org/10.1109/JPROC.2019.2903414)]
- [4] Zhang LTY, Gu YF, Wang R, Yu K, Pang ZB, Li YH, Vucetic B. Enabling real-time quality-of-service and fine-grained aggregation for wireless TSN. *Sensors*, 2022, 22(10): 3901. [doi: [10.3390/s22103901](https://doi.org/10.3390/s22103901)]
- [5] Lo Bello L, Patti G, Vasta G. Assessments of real-time communications over TSN automotive networks. *Electronics*, 2021, 10(5): 556. [doi: [10.3390/electronics10050556](https://doi.org/10.3390/electronics10050556)]
- [6] Syed AA, Ayaz S, Leinmüller T, Chandra M. Dynamic scheduling and routing for TSN based in-vehicle networks. In: Proc. of the 2021 IEEE Int'l Conf. on Communications Workshops. Montreal: IEEE, 2021. 1–6. [doi: [10.1109/ICCWorkshops50388.2021.9473810](https://doi.org/10.1109/ICCWorkshops50388.2021.9473810)]
- [7] Romanov AM, Gringoli F, Sikora A. A precise synchronization method for future wireless TSN networks. *IEEE Trans. on Industrial Informatics*, 2021, 17(5): 3682–3692. [doi: [10.1109/TII.2020.3017016](https://doi.org/10.1109/TII.2020.3017016)]
- [8] Cai YP, Yao ZC, Li TC. A survey on time-sensitive networking: Standards and state-of-the-art. *Chinese Journal of Computers*, 2021, 44(7): 1378–1397 (in Chinese with English abstract). [doi: [10.11897/SP.J.1016.2021.01378](https://doi.org/10.11897/SP.J.1016.2021.01378)]
- [9] Lim HT, Herrscher D, Völker L, Waltl MJ. IEEE 802.1AS time synchronization in a switched Ethernet based in-car network. In: Proc. of the 2011 IEEE Vehicular Networking Conf. Amsterdam: IEEE, 2011. 147–154. [doi: [10.1109/VNC.2011.6117136](https://doi.org/10.1109/VNC.2011.6117136)]
- [10] Gutiérrez M, Steiner W, Dobrin R, Punnekkat S. Synchronization quality of IEEE 802.1AS in large-scale industrial automation networks. In: Proc. of the 2017 IEEE Real-time and Embedded Technology and Applications Symp. Pittsburgh: IEEE, 2017. 273–282. [doi: [10.1109/RTAS.2017.10](https://doi.org/10.1109/RTAS.2017.10)]
- [11] Wobschall D, Ma Y. Synchronization of wireless sensor networks using a modified IEEE 1588 protocol. In: Proc. of the 2010 IEEE Int'l Symp. on Precision Clock Synchronization for Measurement, Control and Communication. Portsmouth: IEEE, 2010. 67–70. [doi: [10.1109/ISPCS.2010.5609778](https://doi.org/10.1109/ISPCS.2010.5609778)]
- [12] Gundall M, Huber C, Rost P, Halfmann R, Schotten HD. Integration of 5G with TSN as prerequisite for a highly flexible future industrial automation: Time synchronization based on IEEE 802.1AS. In: Proc. of the 46th Annual Conf. of the IEEE Industrial Electronics Society. Singapore: IEEE, 2020. 3823–3830. [doi: [10.1109/IECON43393.2020.9254296](https://doi.org/10.1109/IECON43393.2020.9254296)]
- [13] Yildirim KS, Kantarci A. Drift estimation using pairwise slope with minimum variance in wireless sensor networks. *Ad Hoc Networks*, 2013, 11(3): 765–777. [doi: [10.1016/j.adhoc.2012.09.003](https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2012.09.003)]
- [14] Akhlaq M, Sheltami TR. The recursive time synchronization protocol for wireless sensor networks. In: Proc. of the 2012 IEEE Sensors Applications Symp. Brescia: IEEE, 2012. 1–6. [doi: [10.1109/SAS.2012.6166318](https://doi.org/10.1109/SAS.2012.6166318)]
- [15] Verma K, Hasbullah H, Saini HK. Reference broadcast synchronization-based prevention to DoS attacks in VANET. In: Proc. of the 7th Int'l Conf. on Contemporary Computing. Noida: IEEE, 2014. 270–275. [doi: [10.1109/IC3.2014.6897185](https://doi.org/10.1109/IC3.2014.6897185)]
- [16] Wolf BJ, Russell HB, Wang KC. Synchronizing transmission schedules of partitioned ad hoc networks. In: Proc. of the 2007 IEEE Military Communications Conf. Orlando: IEEE, 2007. 1–7. [doi: [10.1109/MILCOM.2007.4455105](https://doi.org/10.1109/MILCOM.2007.4455105)]
- [17] Chen W, Sun JH, Zhang L, Liu X, Hong L. An implementation of IEEE 1588 protocol for IEEE 802.11 WLAN. *Wireless Networks*, 2015, 21(6): 2069–2085. [doi: [10.1007/s11276-015-0898-z](https://doi.org/10.1007/s11276-015-0898-z)]
- [18] Seijo O, Val I, Lopez-Fernandez JA, Velez M. IEEE 1588 clock synchronization performance over time-varying wireless channels. In: Proc. of the 2018 IEEE Int'l Symp. on Precision Clock Synchronization for Measurement, Control, and Communication. Geneva: IEEE, 2018. 1–6. [doi: [10.1109/ISPCS.2018.8543078](https://doi.org/10.1109/ISPCS.2018.8543078)]
- [19] Kopetz H, Ademaj A, Grillinger P, Steinhammer K. The time-triggered Ethernet (TTE) design. In: Proc. of the 8th IEEE Int'l Symp. on Object-oriented Real-time Distributed Computing. Seattle: IEEE, 2005. 22–33. [doi: [10.1109/ISORC.2005.56](https://doi.org/10.1109/ISORC.2005.56)]
- [20] Zhang L, Wang PP. Survey of traffic shaping and scheduling in time-sensitive network. *Microelectronics & Computer*, 2022, 39(1): 46–53 (in Chinese with English abstract). [doi: [10.19304/J.ISSN1000-7180.2021.0629](https://doi.org/10.19304/J.ISSN1000-7180.2021.0629)]
- [21] Nasrallah A, Thyagatru AS, Alharbi Z, Wang CX, Shao X, Reisslein M, Elbakoury H. Performance comparison of IEEE 802.1 TSN

- time aware shaper (TAS) and asynchronous traffic shaper (ATS). IEEE Access, 2019, 7: 44165–44181. [doi: [10.1109/ACCESS.2019.2908613](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2908613)]
- [22] Fang BW, Li Q, Gong ZJ, Xiong HG. Simulative assessments of credit-based shaping and asynchronous traffic shaping in time-sensitive networking. In: Proc. of the 12th Int'l Conf. on Advanced Infocomm Technology. Macao: IEEE, 2020. 111–118. [doi: [10.1109/ICAITS151223.2020.9315374](https://doi.org/10.1109/ICAITS151223.2020.9315374)]
- [23] Specht J, Samii S. Synthesis of queue and priority assignment for asynchronous traffic shaping in switched Ethernet. In: Proc. of the 2017 IEEE Real-time Systems Symp. Paris: IEEE, 2017. 178–187. [doi: [10.1109/RTSS.2017.00024](https://doi.org/10.1109/RTSS.2017.00024)]
- [24] Kosek-Szott K, Natkaniec M, Prasnal L. IEEE 802.11aa intra-AC prioritization—A new method of increasing the granularity of traffic prioritization in WLANs. In: Proc. of the 2014 IEEE Symp. on Computers and Communications. Funchal: IEEE, 2014. 1–6. [doi: [10.1109/ISCC.2014.6912499](https://doi.org/10.1109/ISCC.2014.6912499)]
- [25] Schneider B, Sofia RC, Kovatsch M. A proposal for time-aware scheduling in wireless industrial IoT environments. In: Proc. of the 2022 IEEE/IFIP Network Operations and Management Symp. Budapest: IEEE, 2022. 1–6. [doi: [10.1109/NOMS54207.2022.9789864](https://doi.org/10.1109/NOMS54207.2022.9789864)]
- [26] Mildner A. Time sensitive networking for wireless networks—A state of the art analysis. Network, 2019, 33: 33–37. [doi: [10.2313/NET-2019-06-1_07](https://doi.org/10.2313/NET-2019-06-1_07)]
- [27] Khan K, Mehmood A, Khan S, Khan MA, Iqbal Z, Mashwani WK. A survey on intrusion detection and prevention in wireless ad-hoc networks. Journal of Systems Architecture, 2020, 105: 101701. [doi: [10.1016/j.sysarc.2019.101701](https://doi.org/10.1016/j.sysarc.2019.101701)]
- [28] Shafique K, Khawaja BA, Sabir F, Qazi S, Mustaqim M. Internet of Things (IoT) for next-generation smart systems: A review of current challenges, future trends and prospects for emerging 5G-IoT scenarios. IEEE Access, 2020, 8: 23022–23040. [doi: [10.1109/ACCESS.2020.2970118](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2970118)]
- [29] Shafi M, Molisch AF, Smith PJ, Haustein T, Zhu PY, De Silva P, Tufvesson F, Benjebbour A, Wunder G. 5G: A tutorial overview of standards, trials, challenges, deployment, and practice. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2017, 35(6): 1201–1221. [doi: [10.1109/JSAC.2017.2692307](https://doi.org/10.1109/JSAC.2017.2692307)]
- [30] Akpaku GA, Silva BJ, Hancke GP, Abu-Mahfouz AM. A survey on 5G networks for the Internet of Things: Communication technologies and challenges. IEEE Access, 2018, 6: 3619–3647. [doi: [10.1109/ACCESS.2017.2779844](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2779844)]
- [31] Dogra A, Jha RK, Jain S. A survey on beyond 5G network with the advent of 6G: Architecture and emerging technologies. IEEE Access, 2021, 9: 67512–67547. [doi: [10.1109/ACCESS.2020.3031234](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3031234)]
- [32] Li ZX, Uusitalo MA, Shariatmadari H, Singh B. 5G URLLC: Design challenges and system concepts. In: Proc. of the 15th Int'l Symp. on Wireless Communication Systems. Lisbon: IEEE, 2018. 1–6. [doi: [10.1109/ISWCS.2018.8491078](https://doi.org/10.1109/ISWCS.2018.8491078)]
- [33] Khan BS, Jangsher S, Ahmed A, Al-Dweik A. URLLC and eMBB in 5G industrial IoT: A survey. IEEE Open Journal of the Communications Society, 2022, 3: 1134–1163. [doi: [10.1109/OJCOMS.2022.3189013](https://doi.org/10.1109/OJCOMS.2022.3189013)]
- [34] Poursafar N, Alahi EE, Mukhopadhyay S. Long-range wireless technologies for IoT applications: A review. In: Proc. of the 11th Int'l Conf. on Sensing Technology. Sydney: IEEE, 2017. 1–6. [doi: [10.1109/ICSENS.T.2017.8304507](https://doi.org/10.1109/ICSENS.T.2017.8304507)]
- [35] Pokhrel SR, Ding J, Park J, Park OS, Choi J. Towards enabling critical mMTC: A review of URLLC within mMTC. IEEE Access, 2020, 8: 131796–131813. [doi: [10.1109/ACCESS.2020.3010271](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3010271)]
- [36] Ji H, Park S, Yeo J, Kim Y, Lee J, Shim B. Ultra-reliable and low-latency communications in 5G downlink: Physical layer aspects. IEEE Wireless Communications, 2018, 25(3): 124–130. [doi: [10.1109/MWC.2018.1700294](https://doi.org/10.1109/MWC.2018.1700294)]
- [37] Zhang L, Zhao H, Hou S, Zhao Z, Xu HT, Wu XB, Wu QW, Zhang RH. A survey on 5G millimeter wave communications for UAV-assisted wireless networks. IEEE Access, 2019, 7: 117460–117504. [doi: [10.1109/ACCESS.2019.2929241](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2929241)]
- [38] Rangan S, Rappaport TS, Erkip E. Millimeter-wave cellular wireless networks: Potentials and challenges. Proc. of the IEEE, 2014, 102(3): 366–385. [doi: [10.1109/JPROC.2014.2299397](https://doi.org/10.1109/JPROC.2014.2299397)]
- [39] Rappaport TS, MacCartney GR, Samimi MK, Sun S. Wideband millimeter-wave propagation measurements and channel models for future wireless communication system design. IEEE Trans. on Communications, 2015, 63(9): 3029–3056. [doi: [10.1109/TCOMM.2015.2434384](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2015.2434384)]
- [40] Ghaddar M, Ben Mabrouk I, Nedil M, Hettak K, Talbi L. Deterministic modeling of 5G millimeter-wave communication in an underground mine tunnel. IEEE Access, 2019, 7: 116519–116528. [doi: [10.1109/ACCESS.2019.2933775](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2933775)]
- [41] He DP, Ai B, Guan K, Zhong ZD, Hui B, Kim J, Chung H, Kim I. Channel measurement, simulation, and analysis for high-speed railway communications in 5G millimeter-wave band. IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems, 2018, 19(10): 3144–3158. [doi: [10.1109/TITS.2017.2771559](https://doi.org/10.1109/TITS.2017.2771559)]
- [42] Sim GH, Klos S, Asadi A, Klein A, Hollick M. An online context-aware machine learning algorithm for 5G mmWave vehicular

- communications. IEEE/ACM Trans. on Networking, 2018, 26(6): 2487–2500. [doi: [10.1109/TNET.2018.2869244](https://doi.org/10.1109/TNET.2018.2869244)]
- [43] Gapeyenko M, Petrov V, Molchanov D, Andreev S, Himayat N, Koucheryavy Y. Flexible and reliable UAV-assisted backhaul operation in 5G mmWave cellular networks. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2018, 36(11): 2486–2496. [doi: [10.1109/JSAC.2018.2874145](https://doi.org/10.1109/JSAC.2018.2874145)]
- [44] Rusek F, Persson D, Lau BK, Larsson EG, Marzetta TL, Edfors O, Tufvesson F. Scaling up MIMO: Opportunities and challenges with very large arrays. IEEE Signal Processing Magazine, 2013, 30(1): 40–60. [doi: [10.1109/MSP.2011.2178495](https://doi.org/10.1109/MSP.2011.2178495)]
- [45] Larsson EG, Edfors O, Tufvesson F, Marzetta TL. Massive MIMO for next generation wireless systems. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(2): 186–195. [doi: [10.1109/MCOM.2014.6736761](https://doi.org/10.1109/MCOM.2014.6736761)]
- [46] Marzetta TL. Massive MIMO: An introduction. Bell Labs Technical Journal, 2015, 20: 11–22. [doi: [10.15325/BLTJ.2015.2407793](https://doi.org/10.15325/BLTJ.2015.2407793)]
- [47] Lienard M, Degauque P, Baudet J, Degardin D. Investigation on MIMO channels in subway tunnels. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2003, 21(3): 332–339. [doi: [10.1109/JSAC.2003.809627](https://doi.org/10.1109/JSAC.2003.809627)]
- [48] Ikram M, Sultan KS, Abbosh AM, Nguyen-Trong N. Sub-6 GHz and mm-Wave 5G vehicle-to-everything (5G-V2X) MIMO antenna array. IEEE Access, 2022, 10: 49688–49695. [doi: [10.1109/ACCESS.2022.3172931](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3172931)]
- [49] Shoaib N, Shoaib S, Khattak RY, Shoaib I, Chen XD, Perwaiz A. MIMO antennas for smart 5G devices. IEEE Access, 2018, 6: 77014–77021. [doi: [10.1109/ACCESS.2018.2876763](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2876763)]
- [50] Hussain N, Jeong MJ, Park J, Kim N. A broadband circularly polarized fabry-perot resonant antenna using a single-layered PRS for 5G MIMO applications. IEEE Access, 2019, 7: 42897–42907. [doi: [10.1109/ACCESS.2019.2908441](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2908441)]
- [51] Nguyen-Trong N, Tran HH, Nguyen TK, Abbosh AM. A compact wideband circular polarized fabry-perot antenna using resonance structure of thin dielectric slabs. IEEE Access, 2018, 6: 56333–56339. [doi: [10.1109/ACCESS.2018.2872571](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2872571)]
- [52] Lin QW, Wong H, Zhang XY, Lai HW. Printed meandering probe-fed circularly polarized patch antenna with wide bandwidth. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2014, 13: 654–657. [doi: [10.1109/LAWP.2014.2314141](https://doi.org/10.1109/LAWP.2014.2314141)]
- [53] Wong H, Lin QW, Lai HW, Zhang XY. Substrate integrated meandering probe-fed patch antennas for wideband wireless devices. IEEE Trans. on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2015, 5(3): 381–388. [doi: [10.1109/TCPMT.2015.2398846](https://doi.org/10.1109/TCPMT.2015.2398846)]
- [54] Song ZW, Zheng HX, Wang MJ, Li EP, Li YJ. Design of one-eighth spherical dielectric resonator antenna for 5G applications. IEEE Access, 2020, 8: 9480–9487. [doi: [10.1109/ACCESS.2019.2962227](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2962227)]
- [55] Bilal M, Naqvi SI, Hussain N, Amin Y, Kim N. High-isolation MIMO antenna for 5G millimeter-wave communication systems. Electronics, 2022, 11(6): 962. [doi: [10.3390/electronics11060962](https://doi.org/10.3390/electronics11060962)]
- [56] Hong W, Jiang ZH, Yu C, et al. The role of millimeter-wave technologies in 5G/6G wireless communications. IEEE Journal of Microwaves, 2021, 1(1): 101–122. [doi: [10.1109/JMW.2020.3035541](https://doi.org/10.1109/JMW.2020.3035541)]
- [57] Molisch AF, Ratnam VV, Han SQ, Li ZD, Nguyen SLH, Li LS, Haneda K. Hybrid beamforming for massive MIMO: A survey. IEEE Communications Magazine, 2017, 55(9): 134–141. [doi: [10.1109/MCOM.2017.1600400](https://doi.org/10.1109/MCOM.2017.1600400)]
- [58] Yang BQ, Yu ZQ, Lan J, Zhang RQ, Zhou JY, Hong W. Digital beamforming-based massive MIMO transceiver for 5G millimeter-wave communications. IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, 2018, 66(7): 3403–3418. [doi: [10.1109/TMTT.2018.2829702](https://doi.org/10.1109/TMTT.2018.2829702)]
- [59] Liu X, Huang TY, Shlezinger N, Liu YM, Zhou J, Eldar YC. Joint transmit beamforming for multiuser MIMO communications and MIMO radar. IEEE Trans. on Signal Processing, 2020, 68: 3929–3944. [doi: [10.1109/TSP.2020.3004739](https://doi.org/10.1109/TSP.2020.3004739)]
- [60] Huang H, Xia WC, Xiong J, Yang J, Zheng G, Zhu XM. Unsupervised learning-based fast beamforming design for downlink MIMO. IEEE Access, 2019, 7: 7599–7605. [doi: [10.1109/ACCESS.2018.2887308](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2887308)]
- [61] Zhou BP, Liu A, Lau V. Successive localization and beamforming in 5G mmWave MIMO communication systems. IEEE Trans. on Signal Processing, 2019, 67(6): 1620–1635. [doi: [10.1109/TSP.2019.2894789](https://doi.org/10.1109/TSP.2019.2894789)]
- [62] Zhang SL. An overview of network slicing for 5G. IEEE Wireless Communications, 2019, 26(3): 111–117. [doi: [10.1109/MWC.2019.1800234](https://doi.org/10.1109/MWC.2019.1800234)]
- [63] Wijethilaka S, Liyanage M. Survey on network slicing for Internet of Things realization in 5G networks. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2021, 23(2): 957–994. [doi: [10.1109/COMST.2021.3067807](https://doi.org/10.1109/COMST.2021.3067807)]
- [64] Ginthör D, von Hoyningen-Huene J, Guillaume R, Schotten H. Analysis of multi-user scheduling in a TSN-enabled 5G system for industrial applications. In: Proc. of the 2019 IEEE Int'l Conf. on Industrial Internet. Orlando: IEEE, 2019. 190–199. [doi: [10.1109/ICII.2019.900044](https://doi.org/10.1109/ICII.2019.900044)]
- [65] Li ZH, Yang SQ, Yu JH, Deng YD, Wan H. State-of-the-art survey on deterministic transmission technologies in time-sensitive networking. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2022, 33(11): 4334–4355 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/6524.htm> [doi: [10.13328/j.cnki.jos.006524](https://doi.org/10.13328/j.cnki.jos.006524)]

- [66] Satka Z, Pantzar D, Magnusson A, Ashjaei M, Fotouhi H, Sjödin M, Daneshtalab M, Mubeen S. Developing a translation technique for converged TSN-5G communication. In: Proc. of the 18th IEEE Int'l Conf. on Factory Communication Systems. Pavia: IEEE, 2022. 1–8. [doi: [10.1109/WFCS53837.2022.9779191](https://doi.org/10.1109/WFCS53837.2022.9779191)]
- [67] Satka Z, Ashjaei M, Fotouhi H, Daneshtalab M, Sjödin M, Mubeen S. QoS-MAN: A novel QoS mapping algorithm for TSN-5G flows. In: Proc. of the 28th IEEE Int'l Conf. on Embedded and Real-time Computing Systems and Applications. Taipei: IEEE, 2022. 220–227. [doi: [10.1109/RTCSA55878.2022.00030](https://doi.org/10.1109/RTCSA55878.2022.00030)]
- [68] Ali R, Zikria YB, Bashir AK, Garg S, Kim HS. URLLC for 5G and beyond: Requirements, enabling incumbent technologies and network intelligence. *IEEE Access*, 2021, 9: 67064–67095. [doi: [10.1109/ACCESS.2021.3073806](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3073806)]
- [69] Yin H, Zhang LTY, Roy S. Multiplexing URLLC traffic within eMBB services in 5G NR: Fair scheduling. *IEEE Trans. on Communications*, 2021, 69(2): 1080–1093. [doi: [10.1109/TCOMM.2020.3035582](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2020.3035582)]
- [70] Anand A, de Veciana G, Shakkottai S. Joint scheduling of URLLC and eMBB traffic in 5G wireless networks. *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 2020, 28(2): 477–490. [doi: [10.1109/TNET.2020.2968373](https://doi.org/10.1109/TNET.2020.2968373)]
- [71] Pradhan A, Das S. Joint preference metric for efficient resource allocation in co-existence of eMBB and URLLC. In: Proc. of the 12th Int'l Conf. on Communication Systems & Networks. Bengaluru: IEEE, 2020. 897–899. [doi: [10.1109/COMSNETS48256.2020.9027365](https://doi.org/10.1109/COMSNETS48256.2020.9027365)]
- [72] Bairagi AK, Munir S, Alsenwi M, Tran NH, Alshamrani SS, Masud M, Han Z, Hong CS. Coexistence mechanism between eMBB and uRLLC in 5G wireless networks. *IEEE Trans. on Communications*, 2021, 69(3): 1736–1749. [doi: [10.1109/TCOMM.2020.3040307](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2020.3040307)]
- [73] You L, Liao Q, Pappas N, Yuan D. Resource optimization with flexible numerology and frame structure for heterogeneous services. *IEEE Communications Letters*, 2018, 22(12): 2579–2582. [doi: [10.1109/LCOMM.2018.2865314](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2018.2865314)]
- [74] Lucas-Estañ MC, Gozalvez J. Sensing-based grant-free scheduling for ultra reliable low latency and deterministic beyond 5G networks. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 2022, 71(4): 4171–4183. [doi: [10.1109/TVT.2021.3136725](https://doi.org/10.1109/TVT.2021.3136725)]
- [75] Weerasinghe TN, Casares-Giner V, Balapuwaduge IAM, Li FY. Priority enabled grant-free access with dynamic slot allocation for heterogeneous mMTC traffic in 5G NR networks. *IEEE Trans. on Communications*, 2021, 69(5): 3192–3206. [doi: [10.1109/TCOMM.2021.3053990](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2021.3053990)]
- [76] Mahmood NH, Abreu R, Böhnke R, Schubert M, Berardinelli G, Jacobsen TH. Uplink grant-free access solutions for URLLC services in 5G new radio. In: Proc. of the 16th Int'l Symp. on Wireless Communication Systems. Oulu: IEEE, 2019. 607–612. [doi: [10.1109/ISWCS.2019.8877253](https://doi.org/10.1109/ISWCS.2019.8877253)]
- [77] Wang D, Sun T. Leveraging 5G TSN in V2X communication for cloud vehicle. In: Proc. of the 2020 IEEE Int'l Conf. on Edge Computing. Beijing: IEEE, 2020. 106–110. [doi: [10.1109/EDGE50951.2020.00023](https://doi.org/10.1109/EDGE50951.2020.00023)]
- [78] Kehl P, Ansari J, Jafari MH, Becker P, Sachs J, König N, Göppert A, Schmitt RH. Prototype of 5G integrated with TSN for edge-controlled mobile robotics. *Electronics*, 2022, 11(11): 1666. [doi: [10.3390/electronics1111666](https://doi.org/10.3390/electronics1111666)]
- [79] Bang AO, Ramteke PL. MANET: History, challenges and applications. *Int'l Journal of Application or Innovation in Engineering & Management (IJAIE)*, 2013, 2(9): 249–251.
- [80] Panda KG, Das S, Sen D, Arif W. Design and deployment of UAV-aided post-disaster emergency network. *IEEE Access*, 2019, 7: 102985–102999. [doi: [10.1109/ACCESS.2019.2931539](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2931539)]
- [81] Ramphull D, Mungur A, Armoogum S, Pudaruth S. A review of mobile Ad hoc NETwork (MANET) protocols and their applications. In: Proc. of the 5th Int'l Conf. on Intelligent Computing and Control Systems. Madurai: IEEE, 2021. 204–211. [doi: [10.1109/ICICCS51141.2021.9432258](https://doi.org/10.1109/ICICCS51141.2021.9432258)]
- [82] Agarwal P. Technical review on different applications, challenges and security in VANET. *Journal of Multimedia Technology & Recent Advancements*, 2017, 4(3): 21–30.
- [83] Khan MA, Safi A, Qureshi IM, Khan IU. Flying ad-hoc networks (FANETs): A review of communication architectures, and routing protocols. In: Proc. of the 1st Int'l Conf. on Latest trends in Electrical Engineering and Computing Technologies. Karachi: IEEE, 2017. 1–9. [doi: [10.1109/INTELLECT.2017.8277614](https://doi.org/10.1109/INTELLECT.2017.8277614)]
- [84] Ojewale MA, Yomsi PM. Routing heuristics for load-balanced transmission in TSN-based networks. *ACM SIGBED Review*, 2020, 16(4): 20–25. [doi: [10.1145/3378408.3378411](https://doi.org/10.1145/3378408.3378411)]
- [85] Kim D, Kim J, Ko YB. BiPi-TMAC: A bidirectional-pipelined TDMA for reliability and QoS support in tactical unmanned vehicle systems. *IEEE Access*, 2018, 6: 26469–26482. [doi: [10.1109/ACCESS.2018.2834152](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2834152)]
- [86] Cao Y, Zhang HX, Zhou XT, Yuan DF. A scalable and cooperative MAC protocol for control channel access in VANETs. *IEEE Access*, 2017, 5: 9682–9690. [doi: [10.1109/ACCESS.2017.2706020](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2706020)]

- [87] Wi G, Son S, Park KJ. Delay-aware TDMA scheduling with deep reinforcement learning in tactical MANET. In: Proc. of the 2020 Int'l Conf. on Information and Communication Technology Convergence. Jeju: IEEE, 2020. 370–372. [doi: [10.1109/ICTC49870.2020.9289080](https://doi.org/10.1109/ICTC49870.2020.9289080)]
- [88] Asgharian H, Amirshahi B. Adaptive and distributed TDMA scheduling protocol for mobile ad hoc networks (MANET). In: Proc. of the 2nd Int'l Conf. on Knowledge-based Engineering and Innovation. Tehran: IEEE, 2015. 938–942. [doi: [10.1109/KBEI.2015.7436170](https://doi.org/10.1109/KBEI.2015.7436170)]
- [89] Ye YF, Zhang XY, Xie LF, Qin KY. A dynamic TDMA scheduling strategy for MANETs based on service priority. Sensors, 2020, 20(24): 7218. [doi: [10.3390/s20247218](https://doi.org/10.3390/s20247218)]
- [90] Gao MD, Zhang BL, Wang L. A dynamic priority packet scheduling scheme for post-disaster UAV-assisted mobile ad hoc network. In: Proc. of the 2021 IEEE Wireless Communications and Networking Conf. Nanjing: IEEE, 2021. 1–6. [doi: [10.1109/WCNC49053.2021.9417537](https://doi.org/10.1109/WCNC49053.2021.9417537)]
- [91] Yuan XM, Li CL, Ye Q, Zhang K, Cheng N, Zhang N, Shen XM. Performance analysis of IEEE 802.15.6-based coexisting mobile WBANs with prioritized traffic and dynamic interference. IEEE Trans. on Wireless Communications, 2018, 17(8): 5637–5652. [doi: [10.1109/TWC.2018.2848223](https://doi.org/10.1109/TWC.2018.2848223)]
- [92] Nallayam Perumal MP, Selvi CSK. Improved priority aware mechanism for enhancing QoS in MANET. Wireless Personal Communications, 2022, 122(1): 277–292. [doi: [10.1007/s11277-021-08898-y](https://doi.org/10.1007/s11277-021-08898-y)]
- [93] Sheikh R, Chande MS, Mishra DK. Security issues in MANET: A review. In: Proc. of the 7th Int'l Conf. on Wireless and Optical Communications Networks. Colombo: IEEE, 2010. 1–4. [doi: [10.1109/WOCN.2010.5587317](https://doi.org/10.1109/WOCN.2010.5587317)]
- [94] Mishra A, Singh S, Tripathi AK. Comparison of MANET routing protocols. Int'l Journal of Computer Science and Mobile Computing, 2019, 8(2): 67–74.
- [95] Mohseni S, Hassan R, Patel A, Razali R. Comparative review study of reactive and proactive routing protocols in MANETs. In: Proc. of the 4th IEEE Int'l Conf. on Digital Ecosystems and Technologies. Dubai: IEEE, 2010. 304–309. [doi: [10.1109/DEST.2010.5610631](https://doi.org/10.1109/DEST.2010.5610631)]
- [96] Draves R, Padhye J, Zill B. Comparison of routing metrics for static multi-hop wireless networks. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2004, 34(4): 133–144. [doi: [10.1145/1030194.1015483](https://doi.org/10.1145/1030194.1015483)]
- [97] Sadagopan N, Bai F, Krishnamachari B, Helmy A. PATHS: analysis of PATH duration statistics and their impact on reactive MANET routing protocols. In: Proc. of the 4th ACM Int'l Symp. on Mobile Ad Hoc Networking & Computing. Annapolis: ACM, 2003. 245–256. [doi: [10.1145/778415.778444](https://doi.org/10.1145/778415.778444)]
- [98] Kang D, Kim HS, Joo C, Bahk S. ORGMA: Reliable opportunistic routing with gradient forwarding for MANETs. Computer Networks, 2018, 131: 52–64. [doi: [10.1016/j.comnet.2017.12.001](https://doi.org/10.1016/j.comnet.2017.12.001)]
- [99] Ilango M, Kumar AVS. Deterministic multicast link based energy optimized routing in MANET. In: Proc. of the 2nd Int'l Conf. on Electrical, Computer and Communication Technologies. Coimbatore: IEEE, 2017. 1–10. [doi: [10.1109/ICECCT.2017.8117854](https://doi.org/10.1109/ICECCT.2017.8117854)]
- [100] Gupta N, Vaisla KS, Jain A, Kumar A, Kumar R. Performance analysis of AODV routing for wireless sensor network in FPGA hardware. Computer Systems Science and Engineering, 2022, 40(3): 1073–1084. [doi: [10.32604/csse.2022.019911](https://doi.org/10.32604/csse.2022.019911)]
- [101] Arega KL, Raga G, Bareto R. Survey on performance analysis of AODV, DSR and DSDV in MANET. Computer Engineering and Intelligent Systems, 2020, 11(3): 23–32. [doi: [10.7176/CEIS/11-3-03](https://doi.org/10.7176/CEIS/11-3-03)]
- [102] Liu S, Zhang DG, Liu XH, Zhang T, Wu H. Adaptive repair algorithm for TORA routing protocol based on flood control strategy. Computer Communications, 2020, 151: 437–448. [doi: [10.1016/j.comcom.2020.01.024](https://doi.org/10.1016/j.comcom.2020.01.024)]
- [103] Sinwar D, Sharma N, Maakar SK, Kumar S. Analysis and comparison of ant colony optimization algorithm with DSDV, AODV, and AOMDV based on shortest path in MANET. Journal of Information and Optimization Sciences, 2020, 41(2): 621–632. [doi: [10.1080/02522667.2020.1733193](https://doi.org/10.1080/02522667.2020.1733193)]
- [104] Gangopadhyay S, Jain VK. A position-based modified OLSR routing protocol for flying ad hoc networks. IEEE Trans. on Vehicular Technology, 2023, 72(9): 12087–12098. [doi: [10.1109/TVT.2023.3265704](https://doi.org/10.1109/TVT.2023.3265704)]
- [105] Pushpalatha M, Srinivasan M, Ramadevi P. Evaluation of power efficient hybrid multicast routing protocol for MANET in wireless communications. In: Bhateja V, Satapathy SC, Travieso-Gonzalez CM, eds. Computer Communication, Networking and IoT. Singapore: Springer, 2021. 375–389. [doi: [10.1007/978-981-16-0980-0_35](https://doi.org/10.1007/978-981-16-0980-0_35)]
- [106] Belsis P, Pantziou G. A k -anonymity privacy-preserving approach in wireless medical monitoring environments. Personal and Ubiquitous Computing, 2014, 18(1): 61–74. [doi: [10.1007/s00779-012-0618-y](https://doi.org/10.1007/s00779-012-0618-y)]
- [107] Yi X, Bouguettaya A, Georgakopoulos D, Song A, Willemson J. Privacy protection for wireless medical sensor data. IEEE Trans. on Dependable and Secure Computing, 2016, 13(3): 369–380. [doi: [10.1109/TDSC.2015.2406699](https://doi.org/10.1109/TDSC.2015.2406699)]
- [108] Cheng L, Niu JW, Luo CW, Shu L, Kong LH, Zhao ZW, Gu Y. Towards minimum-delay and energy-efficient flooding in low-duty-

- cycle wireless sensor networks. *Computer Networks*, 2018, 134: 66–77. [doi: [10.1016/j.comnet.2018.01.012](https://doi.org/10.1016/j.comnet.2018.01.012)]
- [109] Cook DJ, Augusto JC, Jakkula VR. Ambient intelligence: Technologies, applications, and opportunities. *Pervasive and Mobile Computing*, 2009, 5(4): 277–298. [doi: [10.1016/j.pmcj.2009.04.001](https://doi.org/10.1016/j.pmcj.2009.04.001)]
- [110] Zhou Y, Fang YG, Zhang YC. Securing wireless sensor networks: A survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2008, 10(3): 6–28. [doi: [10.1109/COMST.2008.4625802](https://doi.org/10.1109/COMST.2008.4625802)]
- [111] Erdelj M, Natalizio E, Chowdhury KR, Akyildiz IF. Help from the sky: Leveraging UAVs for disaster management. *IEEE Pervasive Computing*, 2017, 16(1): 24–32. [doi: [10.1109/MPRV.2017.11](https://doi.org/10.1109/MPRV.2017.11)]
- [112] Bapat V, Kale P, Shinde V, Deshpande N, Shaligram A. WSN application for crop protection to divert animal intrusions in the agricultural land. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2017, 133: 88–96. [doi: [10.1016/j.compag.2016.12.007](https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.12.007)]
- [113] Nam WH, Kim T, Hong EM, Choi JY, Kim JT. A wireless sensor network (WSN) application for irrigation facilities management based on Information and Communication Technologies (ICTs). *Computers and Electronics in Agriculture*, 2017, 143: 185–192. [doi: [10.1016/j.compag.2017.10.007](https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.10.007)]
- [114] Othman MF, Shazali K. Wireless sensor network applications: A study in environment monitoring system. *Procedia Engineering*, 2012, 41: 1204–1210. [doi: [10.1016/j.proeng.2012.07.302](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.302)]
- [115] Diamond SM, Ceruti MG. Application of wireless sensor network to military information integration. In: Proc. of the 5th IEEE Int'l Conf. on Industrial Informatics. Vienna: IEEE, 2007. 317–322. [doi: [10.1109/INDIN.2007.4384776](https://doi.org/10.1109/INDIN.2007.4384776)]
- [116] Yoo SE. A wireless sensor network-based portable vehicle detector evaluation system. *Sensors*, 2013, 13(1): 1160–1182. [doi: [10.3390/s130101160](https://doi.org/10.3390/s130101160)]
- [117] Nasser N, Khan N, Karim L, ElAttar M, Saleh K. An efficient time-sensitive data scheduling approach for wireless sensor networks in smart cities. *Computer Communications*, 2021, 175: 112–122. [doi: [10.1016/j.comcom.2021.05.006](https://doi.org/10.1016/j.comcom.2021.05.006)]
- [118] Li RA, Sha XF, Lin K. Smart greenhouse: A real-time mobile intelligent monitoring system based on WSN. In: Proc. of the 2014 Int'l Wireless Communications and Mobile Computing Conference. Nicosia: IEEE, 2014. 1152–1156. [doi: [10.1109/IWCWC.2014.6906517](https://doi.org/10.1109/IWCWC.2014.6906517)]
- [119] Shylaja SN, Veena MB. Real-time monitoring of soil nutrient analysis using WSN. In: Proc. of the 2017 Int'l Conf. on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing. Chennai: IEEE, 2017. 3059–3062. [doi: [10.1109/ICECDS.2017.8390018](https://doi.org/10.1109/ICECDS.2017.8390018)]
- [120] Gloria A, Dionisio C, Simões G, Sebastião P, Souto N. WSN application for sustainable water management in irrigation systems. In: Proc. of the 5th IEEE World Forum on Internet of Things. Limerick: IEEE, 2019. 833–836. [doi: [10.1109/WF-IoT.2019.8767278](https://doi.org/10.1109/WF-IoT.2019.8767278)]
- [121] Wu TY, Wu F, Redouté JM, Yuce MR. An autonomous wireless body area network implementation towards IoT connected healthcare applications. *IEEE Access*, 2017, 5: 11413–11422. [doi: [10.1109/ACCESS.2017.2716344](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2716344)]
- [122] Li YJ, Chen CS, Song YQ, Wang Z. Real-time QoS support in wireless sensor networks: A survey. *IFAC Proc. Volumes*, 2007, 40(22): 373–380. [doi: [10.3182/20071107-3-FR-3907.00052](https://doi.org/10.3182/20071107-3-FR-3907.00052)]
- [123] Singh R, Sikdar B. A low-delay routing-integrated MAC protocol for wireless sensor networks. *IEEE Internet of Things Journal*, 2022, 9(20): 20561–20576. [doi: [10.1109/JIOT.2022.3175913](https://doi.org/10.1109/JIOT.2022.3175913)]
- [124] Bekmezci I, Alagoz F. Energy efficient, delay sensitive, fault tolerant wireless sensor network for military monitoring. *Int'l Journal of Distributed Sensor Networks*, 2009, 5(6): 729–747. [doi: [10.1080/15501320902768625](https://doi.org/10.1080/15501320902768625)]
- [125] Singh R, Rai BK, Bose SK. A low delay cross-layer MAC protocol for k -covered event driven wireless sensor networks. *IEEE Sensors Letters*, 2017, 1(6): 1–4. [doi: [10.1109/LSENS.2017.2776303](https://doi.org/10.1109/LSENS.2017.2776303)]
- [126] Landsiedel O, Ghadimi E, Duquennoy S, Johansson M. Low power, low delay: Opportunistic routing meets duty cycling. In: Proc. of the 11th Int'l Conf. on Information Processing in Sensor Networks. New York: Association for Computing Machinery, 2012. 185–196. [doi: [10.1145/2185677.2185731](https://doi.org/10.1145/2185677.2185731)]
- [127] Zhang YH, Wu JM, Liu ML, Tan AP. TSN-based routing and scheduling scheme for industrial Internet of Things in underground mining. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2022, 115: 105314. [doi: [10.1016/j.engappai.2022.105314](https://doi.org/10.1016/j.engappai.2022.105314)]
- [128] Xian JF, Wu HF, Mei XJ, Chen XQ, Yang YS. Low-delay and energy-efficient opportunistic routing for maritime search and rescue wireless sensor networks. *Remote Sensing*, 2022, 14(20): 5178. [doi: [10.3390/rs14205178](https://doi.org/10.3390/rs14205178)]

附中文参考文献:

- [8] 蔡岳平, 姚宗辰, 李天驰. 时间敏感网络标准与研究综述. *计算机学报*, 2021, 44(7): 1378–1397. [doi: [10.11897/SP.J.1016.2021.01378](https://doi.org/10.11897/SP.J.1016.2021.01378)]
- [20] 张磊, 王盼盼. 时间敏感网络流量整形技术综述. *微电子学与计算机*, 2022, 39(1): 46–53. [doi: [10.19304/J.ISSN1000-7180.2021.0629](https://doi.org/10.19304/J.ISSN1000-7180.2021.0629)]
- [65] 李宗辉, 杨思琪, 喻敬海, 邓仰东, 万海. 时间敏感网络中确定性传输技术综述. *软件学报*, 2022, 33(11): 4334–4355. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/6524.htm> [doi: [10.13328/j.cnki.jos.006524](https://doi.org/10.13328/j.cnki.jos.006524)]



乔萱(1999—),女,硕士生,主要研究领域为无线
时间敏感网络.



艾渤(1974—),男,博士,教授,博士生导师,主要
研究领域为宽带移动通信系统与专用移动通信,
通信工程,人工智能.



李宗辉(1986—),男,博士,讲师,主要研究领域
为实时网络,软硬件协同设计与体系结构.



万海(1981—),男,博士,副研究员,CCF专业会
员,主要研究领域为实时系统,实时网络,网络安全,
异常检测,机器学习.



刘强(1980—),男,博士,副教授,博士生导师,主
要研究领域为无人机网络,无人系统人工智能,
网络协议设计与性能仿真.



邓仰东(1972—),男,博士,副研究员,博士生导
师,主要研究领域为计算机体系结构,工业数据
分析,并行计算.