

时间触发的机载无线通信网络确定性调度理论^{*}

文 秦¹, 李士宁¹, 许江伟^{1,2}, 纪 源¹, 肖林杰¹, 李一鸣¹, 程 涛¹

¹(西北工业大学 计算机学院, 陕西 西安 710072)

²(中国商飞上海飞机制造有限公司, 上海 201324)

通信作者: 李士宁, E-mail: lishining@nwpu.edu.cn



摘 要: 为了满足航空器经济性的制造需求,降低航空器内部的有效载荷,使用无线代替有线已经成为机载网络转型升级的重要方向,然而传统无线技术难以满足机载网络中时间敏感业务的实时性传输需求.因此,通过明确机载无线通信网络 (airborne wireless communication network, AWCN) 的应用特点,设计了 AWCN 结合机载骨干交换网络的混合拓扑架构;综合考虑了节点无冲突、信道无干扰、路径依赖与端到端时延需求,构建了时间触发的 AWCN 确定性调度应该满足的一阶逻辑形式;理论分析了不同信道数量下完成调度所需要的最少时隙数量与制约端到端时延的主要因素,并证明了稳态时数据流在网关处的信息年龄期望值;设计了基于整数规划的调度方法,并针对大规模网络中决策变量多、约束之间耦合性高而导致的求解效率低的缺陷,提出了一种增量式求解策略.最后,通过实验验证了确定性调度模型与理论分析的有效性,并讨论了不同调度影响因子对数据流总时延与调度规模的影响.

关键词: 机载无线通信网络; 时间触发; 确定性调度; 约束求解器

中图法分类号: TP393

中文引用格式: 文秦, 李士宁, 许江伟, 纪源, 肖林杰, 李一鸣, 程涛. 时间触发的机载无线通信网络确定性调度理论. 软件学报, 2025, 36(11): 5334–5355. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/7384.htm>

英文引用格式: Wen Q, Li SN, Xu JW, Ji Y, Xiao LJ, Li YM, Cheng T. Deterministic Scheduling Theory for Time-triggered Airborne Wireless Communication Network. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2025, 36(11): 5334–5355 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/7384.htm>

Deterministic Scheduling Theory for Time-triggered Airborne Wireless Communication Network

WEN Qin¹, LI Shi-Ning¹, XU Jiang-Wei^{1,2}, JI Yuan¹, XIAO Lin-Jie¹, LI Yi-Ming¹, CHENG Tao¹

¹(School of Computer Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

²(COMAC Shanghai Aircraft Manufacturing Co. Ltd., Shanghai 201324, China)

Abstract: To meet the economic design requirements of aircraft and reduce internal payload, the transition from wired to wireless networks has emerged as a key direction in the upgrade of airborne networks. However, traditional wireless technologies are unable to satisfy the real-time transmission requirements of time-triggered services in airborne networks. In this study, the application characteristics of the airborne wireless communication network (AWCN) are defined, and a hybrid topology is designed by integrating the AWCN with the airborne backbone switching network. By considering conflict-free nodes, interference-free channels, path dependencies, and end-to-end delay requirements, a first-order logic formulation for the deterministic scheduling of time-triggered AWCN is developed. The minimum number of time slots required for scheduling and the primary factors affecting end-to-end delay are theoretically analyzed under different channel configurations. In addition, the expected value of the information age for data flows at the gateway in a steady state is established. A scheduling method based on integer programming is designed, and an incremental solution strategy is proposed to address the low computational efficiency caused by the large number of decision variables and the high coupling of constraints in large-scale networks.

* 收稿时间: 2024-05-06; 修改时间: 2024-08-23; 采用时间: 2024-12-23; jos 在线出版时间: 2025-07-02
CNKI 网络首发时间: 2025-07-03

The effectiveness of the deterministic scheduling model and theoretical analysis is validated through experiments, and the impact of various scheduling factors on total flow delay and scheduling scale is examined.

Key words: airborne wireless communication network (AWCN); time-triggered; deterministic scheduling; constraint solver

作为机载设备互联的关键技术,近年来机载网络实现了中低速总线向高速交换式网络的发展,其中航空电子全双工交换式以太网(avionics full duplex switched ethernet, AFDX)在传统以太网的基础上引入了虚拟链路、冗余路径和完整性检验等机制,克服了传统交换式网络传输的不确定性^[1],成为A380、C919等主流民用客机的骨干网络.时间触发以太网(time-triggered Ethernet, TTE)与时间敏感网络(time sensitive network, TSN)在全网时间同步的基础上使用时间触发代替事件触发,并通过可满足线性求解器如Z3或者整数规划求解器调度时间资源,保证了数据流传输的确定性^[2],逐渐成为下一代机载网络设计的关键技术.减重设计是每一型飞机制造的关注重点,直接影响飞机的制造成本以及性能指标的实现.然而,当前机载网络均以线缆作为唯一传输媒介,例如波音B747全机线缆及其连接装置质量约1587 kg,长度约228 km,不仅给飞机布线设计和运营维护带来了额外成本,并且多线缆容易导致短路、断路和共因故障等问题^[3].随着民用无线技术(如WiFi、LoRa等)的快速发展,机载无线通信网络(airborne wireless communication network, AWCN)已经成为当前飞机升级换代以及下一代飞机研制的重要考虑因素^[4].

近年来,国际民航组织与国际电信联盟(International Telecommunication Union, ITU)联合空客、波音、霍尼韦尔等企业制定了面向民用客机的无线航空电子内部通信网络(wireless avionics intracommunication network, WAIC)标准.ITU通过协调各国的机载电磁资源需求并分析当前机载设备的工作频段,确定在民用客机内部使用4.2–4.4 GHz不会产生信道干扰,并根据民用客机应用需求以及节点天线部署位置的差异,将机载无线传输划分为高速外部、高速内部、低速外部和低速内部这4种模式^[5].WAIC标准的提出引起了国内外研究机构的广泛关注.西北工业大学联合中国航空工业集团西安航空计算技术研究所^[6]提出了基于WAIC标准的网络应用模型、拓扑架构和通信协议,并对各层协议的技术难点进行讨论.Park等人^[3,7]讨论并分析了IEEE 802.15.4、工业无线网络等协议与WAIC标准的兼容性及其在航空电子时间关键系统中应用的可行性.此外,许多学者探索了5G^[8]、WiFi^[9]、UWB^[10]等主流无线技术在航空器中的应用,这些工作均对机载无线技术的发展与应用提供了可选思路.然而,AWCN的研究与应用依然存在如下挑战:一方面,考虑到航空电子业务严格的实时性需求,如何设计面向AWCN时间触发流多周期特性的基准约束模型,完成信道与时隙资源的联合调度,并优化端到端传输时延成为AWCN设计面临的关键挑战.另一方面,考虑到机载网络具有面向确定应用以及静态规划等特点,因此若能进一步分析网络资源与数据流相关参数对AWCN实时性以及可调度性的影响,将有助于相关人员在系统开发早期就可以获知网络性能对应用需求的满足程度,从而指导AWCN的设计与部署.针对上述问题,本文的主要贡献总结如下.

(1) 本文综合考虑节点冲突、信道干扰、路径依赖以及端到端时延约束等因素,建立了AWCN确定性调度问题应该满足的一阶逻辑形式,设计了基于整数规划的调度方法;针对大规模网络中决策变量多、约束之间耦合性高而导致的求解效率低等问题,提出了一种增量式求解策略,并揭示了不同调度影响因子对调度规模与数据流总时延的影响.

(2) 本文构建了AWCN确定性调度问题的理论分析模型,推导了不同信道数量下完成调度所需要的最少时隙数量,证明了稳态时数据流在网关处的信息年龄(age of information, AOI)期望值.研究中发现:当信道数量为1时,该调度问题的决策变量参数是制约时延的主要因素;当信道数量充足时,网关数量是制约时延的主要因素;而AWCN中最大传输跳数与链路的传输成功概率是影响AOI的主要因素.

本文第1节对AWCN确定调度问题相关的技术现状进行总结,并分析其贡献与待改善之处.第2节设计AWCN结合机载骨干交换网络的混合拓扑模型,并对AWCN调度问题进行阐述.第3节从模型建立、理论分析以及方法设计等方面形成AWCN确定性调度理论.第4节在不同的网络规模中验证上述模型设计与理论分析的有效性.第5节对本文研究进行总结,并对未来工作进行展望.

1 相关工作

作为严格的时间敏感性场景, 本文旨在解决 AWCN 中时间触发数据流的确定性调度问题. 近年来, 以 TTE 与 TSN 为代表的确定性网络采用时间触发的通信机制, 实现了数据流的确定性传输. 此外, 在与 AWCN 密切相关的工业无线网络 (industrial wireless network, IWN) 领域, 众多学者通过改进介质访问控制 (medium access control, MAC) 层协议, 以保证无线数据传输的实时性. 上述研究工作均对 AWCN 确定性调度问题的模型设计、求解方法、理论分析以及性能评测等方面提供了一定的参考价值, 因此本文将从时间触发的确定性调度技术与工业无线网络资源调度技术两方面介绍并分析相关研究工作.

1.1 时间触发的确定性调度技术

2010 年, TTTech 公司综合考虑多周期数据流冲突、交换机缓存占用以及端到端时延等因素, 建立了一个时间触发调度应该满足的线性约束模型, 该模型一直沿用至今并成为了 TTE 与 TSN 实现确定性调度的基准模型^[11]. TTE 通常采用基于帧的调度模式, 即对上述约束直接求解, 或在上述约束的基础上添加满足应用需求的其他约束并进行求解, 具有强实时特征. 鉴于上述模型的求解具有 NP 复杂度, 因此可满足性模理论 (satisfiability modulo theories, SMT) 求解器 (如 Yices 与 Z3) 成为了 TTE 实施通信调度的重要手段. 对于 TTE 的调度问题, 文献 [11] 利用 SMT 求解器逐一对线性约束回溯求解, 并在小规模星型、树型与雪花型拓扑中实现了时间触发数据流的无冲突传输. 为了优化 SMT 求解器的调度时间并减少求解复杂度, Pozo 等人^[12]将业务流划分为多个子集合以实现计算解耦, 并对 SMT 求解器的配置参数进行优化, 最后在雪花型拓扑中验证了该方法的求解优势. Finzi 等人^[13]在通过 SMT 求解器获得初始调度计划的基础上, 利用网络微积分分析速率受限数据流的端到端最坏时延, 并重新调整 TT 流的发送间隔, 完成了两类流量的联合调度. 在文献 [14] 中, Zheng 等人首先通过遗传算法实现了路径均衡, 其次基于 SMT 求解器获得了一个可行的调度结果, 最后通过自适应搜索优化了速率受限数据流的时延. 相比较于 SMT 求解器通常以得到可行解为目标, 混合整数规划 (mixed integer programming, MIP) 求解器 (如 Gurobi 与 CPLEX) 则更支持带目标函数的优化问题, 然而其难点在于引入中间变量对部分约束进行线性转化. Craciunas 等人^[15]在上述基准约束的基础上增添了任务执行时间约束与任务优先级约束, 并引入二进制中间变量将其转化为 MIP 形式, 实验验证了 Gurobi 能在中小规模找到较优解. Zhou 等人^[16]在分布式综合模块化航空电子系统架构下研究了机载应用分区以及时间触发数据流的联合调度问题, 建立了基于 MIP 的调度约束模型, 并通过 Gurobi 实现了分区级的端到端时延优化. 文献 [17] 首先结合贪婪搜索与随机搜索获得了初始调度表, 其次利用强化学习对调度表进行探索以调整数据流发送时间的偏移量, 最后实验证明该方法在端到端时延方面的性能显著优于 SMT 求解器. 何锋等人^[18]综述了时间触发通信技术在航电系统中的应用, 分别验证了 SMT、MIP、启发式算法以及强化学习等方法的可行性, 指出 SMT 求解器通常能对小规模网络提供可行的调度方案, MIP 方法则能够显著优化时间触发数据流的端到端时延, 而启发式算法和强化学习方法在获得时间触发流初始调度解的基础上, 通过调整其发送时间的偏移量, 能够有效减少速率受限流的端到端时延.

相比较于 TTE 基于帧的调度模式, TSN 则继承了传统以太网基于队列的调度模式, 主要包括 TSN 802.1Qbv 标准中提出的时间感知整形 (time aware shaper, TAS) 模型和 TSN 802.1 Qch 标准中提出的循环队列转发 (cyclic queue forwarding, CQF) 模型. TAS 基于数据流的优先级字段分配其在交换机的入队队列, 在输出端通过门控状态控制业务流的离开时间^[19]. 对于 TAS 模型而言, 确定性调度设计的准则是在满足约束条件的前提下调整每个队列传输开关的时间门控表, Craciunas 等人^[20]综合考虑了终端节点的调度能力以及交换机节点的队列数量, 在时间触发基准约束模型的基础上增加了流隔离约束与帧隔离约束, 并通过优化模理论求解器 Z3 实现了端到端时延优化. 文献 [21] 通过 SMT 求解器数值仿真了不同数据流规模与队列窗口数量对调度质量的影响, 说明了尽管门控窗口数量较少时调度速度更快, 然而其会导致更高的时延和时延抖动. Zhao 等人^[22]基于网络演算理论刻画了时间触发数据流在每个交换机节点的到达曲线和服务曲线, 并理论推导了其端到端最坏时延. 文献 [23] 则定量分析了多节点组网下的端到端时延上界, 并评估了 TAS 模型中门控窗口开启时长对时间敏感业务服务质量的影响. 为了降低交换机的设计复杂度, CQF 通过循环切换乒乓队列实现流量整形, 约束奇数/偶数周期收到的数据流必须在下一个

偶数/奇数周期完成传输,使数据流交替地占用输入输出端口^[24]。为了保证重负载条件下 CQF 模型具有更高的调度成功率与资源利用率, Yan 等人^[25]首先通过设计 CQF 交换组件、注入时间控制组件、提交时间控制组件以及流转换组件,形成了一种灵活 CQF 确定性交换模型,其次建立了注入时间偏移约束、时间槽大小约束、接收窗口约束、截至时间约束与队列资源约束,最后在贪心策略/随机搜索获得初始解的基础上,通过禁忌搜索算法更新边缘注入时间,避免了多条流在交换机队列溢出,实现了队列资源利用率以及可调度数量的优化。对时间触发数据流进行排序,并依次确定各条流的发送时间是 CQF 模型完成调度的重要手段,文献[26]基于数据流所占用时隙位置的多样性,提出了一种并行增量式调度算法,有效降低了调度复杂度。Guo 等人^[27]综合考虑了队列负载率与数据流长度,提出了匹配分数的概念用于设置数据流的调度优先级,提高了调度成功率。文献[28,29]分别分析了 TSN 技术在航空电子与载人航天场景中工程应用所面临的挑战,同时指出在 TSN 与无线技术相结合是下一步的研究重点。文献[30]则综述分析了 TSN 相关标准及其关键技术的最新进展,并指出无线 TSN 将是未来工业互联网的重要组成,而提供确定性低时延流调度能力是其面临的重要挑战。文献[31]分析了 5G、移动自组网和无线传感网这 3 种无线技术的时间敏感特性,指出如何克服链路干扰、通信冲突等因素,以保障无线传输的确定性是无线 TSN 技术发展的关键。

综上所述,相比较于传统以太网尽力而为的传输理念, TTE/TSN 通过建立确定性调度应该满足的线性约束模型,消除了数据流量竞争交换机内部资源与共享冲突的缺陷,从而保证了终端设备之间信息交互的确定性。然而,不同于有线网络,节点冲突与信道竞争亦是影响无线网络实现确定性传输的关键因素,因此如何建立面向 AWCN 时间触发数据流无冲突传输的约束模型,并通过整数规划等方法完成信道与时隙资源的联合调度是 AWCN 确定性调度理论研究的关键。

1.2 工业无线网络资源调度技术

当前国际上形成若干关于 IWN 的行业标准,如 WirelessHART、WIA-PA、6TiSCH 以及 RT-WiFi 等,上述标准均指出数据链路层采用时分多址接入(time division multiple access, TDMA)机制对网络资源进行调度,能够有效减少通信冲突以提高数据传输的实时性^[32]。Saifullah 等人^[33]基于 TDMA 机制分析了 WirelessHART 中链路冲突与信道竞争对数据流端到端时延的影响,推导了固定优先级约束下数据流的时延上界,并在不同的拓扑结构中验证了该理论的可行性。文献[34]在此基础上考虑了同优先级数据流的竞争问题,通过各链路的比例冲突空余时间贪心式地为各数据流分配时隙和信道资源,形成了一种基于比例冲突空余时间的调度方案,不同网络规模的仿真实验证明了该方案可以取得较高的调度成功率。文献[35]研究了时隙与频率的双重调度问题,理论分析了信道数量受限和不限两种情况下完成数据流传输所需要的最小时隙数量,并提出了基于多约束条件的时延优化资源调度机制,仿真证明数据流能够在截止日期前传输至终端节点。王恒等人^[36]围绕 WIA-PA 的分簇结构,分析了端到端数据流的可调度性,对于小规模网络,采用回溯法进行遍历调度,对于大规模网络,则通过计算数据流的链路调度时间裕度值以确定调度优先级,并依次完成调度。回溯法在小规模网络中拥有更高的调度成功率,而最小裕度调度策略则降低了调度复杂度。Jin 等人^[37]研究了包含多个子网的 IWN 调度问题,一方面为各子网分配不同的信道资源以避免子网之间的信道干扰,另一方面采用速率单调算法贪心式地调度子网内的周期数据,证明了非周期数据在截止日期前完成传输的必要条件,并约束其与周期数据不冲突的前提下完成传输,实验表明,相比于集中式网络架构,多子网架构中数据流的端到端时延更小。文献[38]对实时无线网络资源进行虚拟化表征,建立了关于信道容量限制与节点接入限制的约束模型,提出了基于 SMT 求解器的调度策略,并通过部署 6TiSCH 实验床验证了该方法的有效性。近年来, AOI 作为一种衡量数据新鲜度的新兴指标,能够更加精确地刻画宿节点接收到源节点信息的时效性,引起了众多学者的广泛关注。Kadota 等人^[39]考虑了一个单基站通过不可靠信道向多个终端节点发送时间敏感型数据的单跳实时无线网络,并以最小化 AOI 为目标,分别设计了贪婪、随机、最大权重以及 Whittle Index 策略,并数值分析了终端数量、发送成功概率等因素对于 AOI 期望的影响。Xie 等人^[40]面向时变信道下的单跳实时 IWN,建立了由系统平均 AOI 和时间敏感型数据逾期概率组成的联合优化目标函数,并在信道先验状态未知时,提出了一种基于深度 Q 网络的资源调度框架,实现了 AOI 和逾期概率的均衡化。赵国峰等人^[41]设计了一

种基于 TDMA 的航天器有线无线混合场景的流调度机制, 并通过粒子群算法进行时隙分配, 在大规模单跳网络中实现了端到端时延的优化. 裴莹等人^[42]综述了 IWN 调度问题定义、评价指标与策略设计等方面的研究现状, 并指出对于集中式网络而言, 随着网络规模的增加, 现有技术存在可扩展性不佳的缺陷.

综上所述, 以 WirelessHART 为代表的工业无线网络采用多信道 TDMA 技术以减少通信冲突. 然而现有研究中调度策略的设计本质上采取了贪心式的分配思想, 调度过程中不可避免地陷入局部最优, 影响数据流的端到端时延与调度规模. 此外, 现有研究对制约时间触发数据流端到端时延与 AOI 的主要因素缺少形式化的分析与证明. 因此, 本文在建立 AWCN 确定性调度模型的基础上, 理论分析并实验讨论了不同规模网络资源对时延、AOI 与可调度规模的影响.

2 系统设计与问题陈述

本节首先探讨了 AWCN 在机载中的应用场景, 并由此构建了 AWCN 结合骨干交换网的混合网络拓扑架构. 随后, 通过介绍 AWCN 子网内时间触发的流量模型, 对 AWCN 调度问题进行阐述.

2.1 AWCN 应用模型

鉴于机载复合材料良好的电磁屏蔽性能, 目前主流无线技术难以同时兼顾传输距离、时延和丢包率等指标, 因此 AWCN 以子网的形式存在于机载环境中^[6]. 基于射频收发器部署位置的不同, 将 AWCN 划分为内部网络与外部网络. 如图 1 所示, 以民用客机为例, 内部网络按照舱段划分为不同子网, 典型应用包括部署于驾驶舱、客舱的视频、烟雾传感器, 位于中央与机翼油箱的液位、压力传感器等. 外部网络综合考虑飞机结构、射频信号辐射范围等因素划分为不同子网, 典型应用包括机身的结冰与速度探测, 以及起落架的防滑检测与位置反馈等. 在物理位置上为每个子网配备至少一个边缘网关, 保证子网之间不存在通信干扰. 值得强调的是: AWCN 的应用环境不仅局限于民用客机, 许多大型无人机、军用飞机依然具有与图 1 相似的架构, 通过合理划分子网有利于 AWCN 的高效部署.

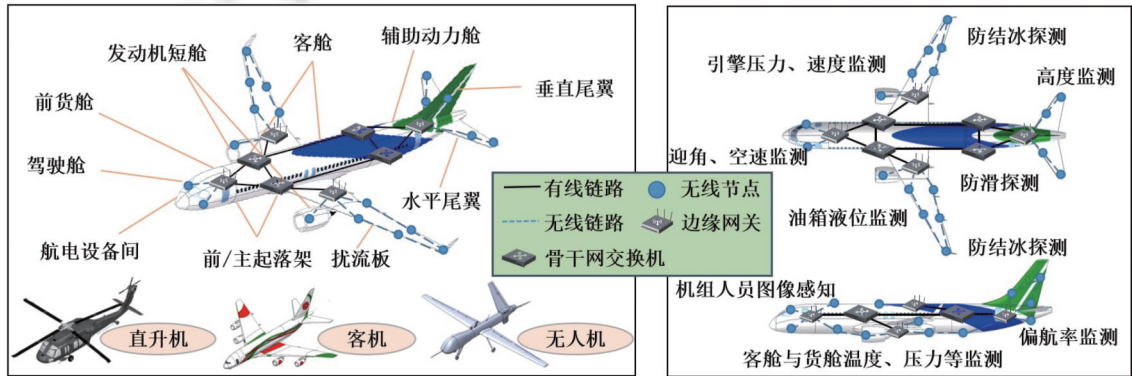


图 1 AWCN 应用环境与传感器分布示例

无线技术的引入旨在解决机载总线成本高与故障频发等缺陷, 本文进一步明确了 AWCN 在机载中的 3 个典型应用: (1) 机载子系统内部通常采用传感器冗余配置技术, 并结合表决监测算法提高信号的可用性和完整性, 然而有线连接构成的相似冗余容易受到共因故障的影响^[43], 因此引入 AWCN 能够为有线技术提供非相似冗余, 实现传感器信号的一致性监测. (2) 鉴于飞机起落架、发动机转子轴承等部件的移动性或旋转性导致线缆难以部署并且容易受损, 因此引入 AWCN 能够对物理限制环境下飞机部件的参数进行监测. (3) 飞机服役期间长期遭受恶劣环境引发的结构腐蚀与疲劳损坏, 不可避免地需要根据航空电子业务需求更换或增添设备. 然而线缆重新布局、连接器维护带来了巨大的时间和资金成本, 因此引入 AWCN 能够显著提高网络的可重构性.

结合上述应用需求分析, 本节以民用客机为例构建了 AWCN 结合骨干交换网的混合网络拓扑架构, 如图 2 所

示. 根据分布式综合模块化航电系统设计准则, 机载计算资源以物理上分散的形式部署于机身各处, 并依托骨干交换网协作完成飞控、显控等系统功能. AWCN 以子网的形式存在于边缘接入网, 包括终端节点与边缘网关. 其中, 终端节点为同时具备信息采集和子网路由功能的半双工设备. 边缘网关靠近终端节点部署, 一方面建立 AWCN 边缘认知平面, 虚拟化管控子网频谱、天线和时隙等资源, 完成组网配置、时间同步和资源调度功能; 另一方面运行多个协议栈, 依托骨干交换网与其挂载设备完成跨协议通信. 物理位置上每个 AWCN 子网至少配备一个或多个网关节点. 图 2 边缘接入网 I 中 AWCN 终端节点依托边缘网关完成独立组网与资源调度, 并接入骨干交换网与子网实现信息交互. 图 2 边缘接入网 II 中 AWCN 终端节点无线接入边缘网关, 同有线接入组成冗余度技术备份.

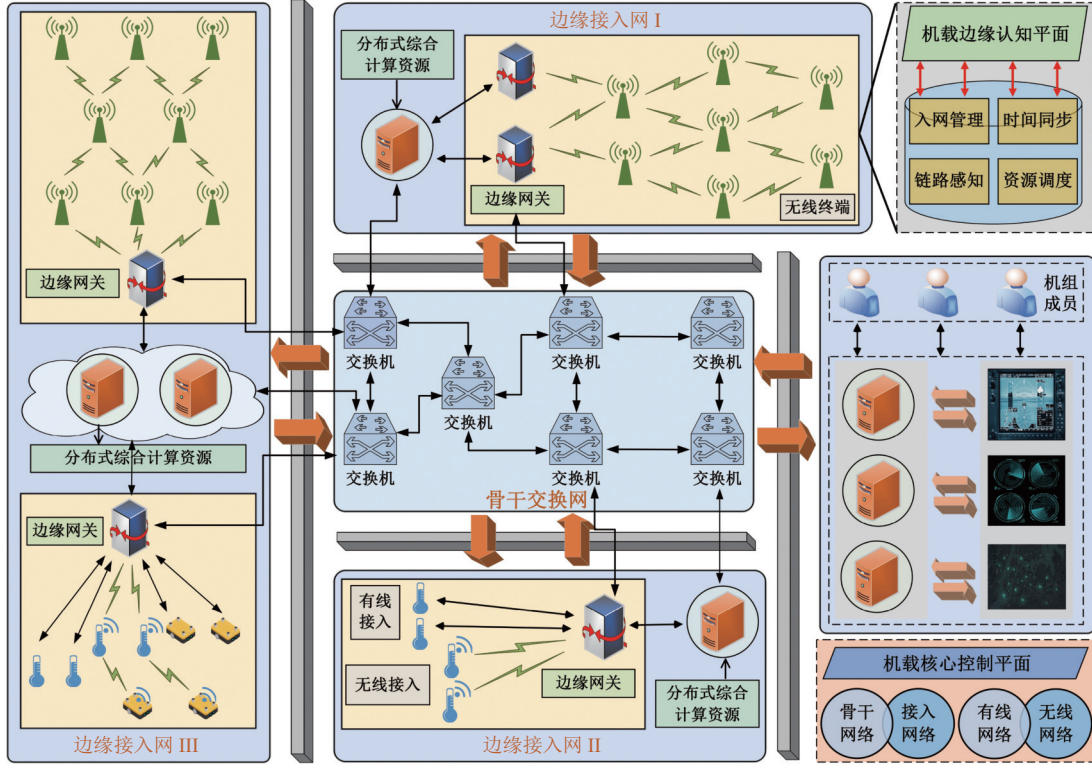


图 2 机载混合网络架构

机载混合网络架构涵盖有线网络与无线网络, TTE/TSN 因其支持时间触发数据流的实时性传输, 逐渐被骨干交换网与子系统内部的总线连接所采用. 然而 AWCN 不同于传统的无线传感网, 因其面向的航空电子应用具有严格的时间触发特征, 因此如何调度子网内的信道和时隙资源, 满足数据流的端到端时延需求, 成为航空电子应用的挑战. 鉴于此, 本文将重点关注于 AWCN 子网内时间触发数据流的资源调度问题.

2.2 AWCN 确定性调度问题分析

ITU 在 M.2197 报告中综合考虑机载区域面积与节点的发射功率范围, 确定机载内无线节点传输跳数不超过 3 跳^[44]. 基于此, 考虑如图 3 所示的 AWCN 子网, 多个终端节点以单跳/多跳的方式传输数据至边缘网关. 形式化定义该子网的拓扑为无向图 $G=(V,E)$, 其中 $V=[V_{GW}, V_{Node}]$, V_{GW} 和 V_{Node} 分别表示网关节点和终端节点集合; 如果两个节点可以通过无线链路直接建立连接并完成数据的收发, 则两个节点互为邻居节点, 其物理链接表示为边 E . 一个物理链接定义了两个方向的数据链路, 本文用 DL 表示数据链路构成的集合, 即:

$$\forall v_k, v_l \in V: \{v_k, v_l\} \in E \Rightarrow v_k \in v_l.\text{neighbor}, v_l \in v_k.\text{neighbor}, [v_k, v_l] \in DL, [v_l, v_k] \in DL \quad (1)$$

其中, $v_l.neighbor$ 表示 v_l 的邻居节点集合, $[v_k, v_l]$ 表示 v_k 指向 v_l 的数据链路.

定义 AWCN 子网内所有数据流的集合为 $F = \{f_1, f_2, \dots, f_N\}$, 任意数据流 f_i 形式化表示为:

$$f_i = \{f_i.period, f_i.birth, f_i.length, f_i.route\} \quad (2)$$

其中, $f_i.period$ 表示 f_i 的发送周期, 即每条数据流都以帧 (消息) 的形式周期性传输; 定义 $f_{i,j}.birth$ 为数据流 f_i 周期性产生的第 j 条消息注入 AWCN 子网的时间, 可得 $f_{i,j}.birth = f_{i,1}.birth + (j-1) \times f_i.period$; $f_i.length$ 表示 f_i 的发送时延 (占用的时隙数量), 通常取决于报文长度与网络带宽; $f_i.route$ 表示 f_i 自源节点至边缘网关的传输路径, 如图 3 中 f_i 的路由表示为:

$$f_i.route = [[v_i, v_f], [v_f, v_b], [v_b, v_{GW}]] \quad (3)$$

用 hop_{f_i} 表示 f_i 自发送终端至边缘网关的跳数, 则 $hop_{f_i} = 3$.

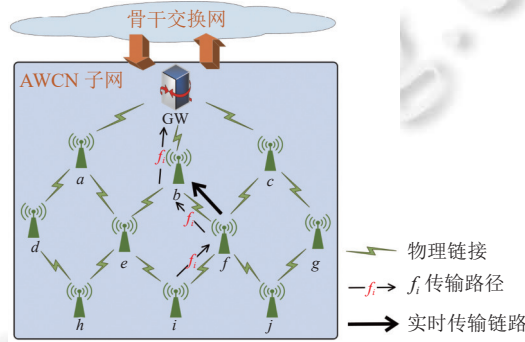


图3 AWCN子网调度问题模型

考虑到数据流的周期特性, TTE 中确定性调度问题的本质是精确地指定多周期数据流第 1 条消息在每条数据链路的发送时间点以满足端到端时延需求, 然而对于 AWCN 而言, 考虑到终端节点竞争信道资源导致的时延不确定性, 如何进一步指定 AWCN 子网内多周期数据流在每条数据链路所占用的信道资源成为亟需解决的问题, 即决策变量为公式 (4) 所示的集合, 该集合维度为 $2 \times \sum_{i=1}^N hop_i = 2 \times D$, 其中前 D 维度表示各数据流第 1 条消息在每条数据链路的发送时间点, 后 D 维度表示相应所占用的信道资源.

$$\begin{aligned} Var = & \left\{ \left(f_{1,1}^{[v_k, v_l]} .offset \mid [v_k, v_l] \in f_1.route \right), \dots, \left(f_{N,1}^{[v_m, v_n]} .offset \mid [v_m, v_n] \in f_N.route \right) \right\} \\ & \cup \left\{ \left(f_{1,1}^{[v_k, v_l]} .channel \mid [v_k, v_l] \in f_1.route \right), \dots, \left(f_{N,1}^{[v_m, v_n]} .channel \mid [v_m, v_n] \in f_N.route \right) \right\} \end{aligned} \quad (4)$$

其中, $f_{i,1}^{[v_k, v_l]} .offset$ 和 $f_{i,1}^{[v_k, v_l]} .channel$ 分别表示 f_i 第 1 条消息从节点 v_k 到 v_l 的发送时间点, 以及发送过程中所占用的信道索引. 此外, 通信冲突与信道干扰亦是影响无线网络实现调度的主要原因, 因此如何建立面向 AWCN 的调度约束模型, 设计相应的求解策略, 并分析影响时延与 AOI 的关键因素是建立 AWCN 确定性调度理论的关键.

3 AWCN 确定性调度技术

本节首先从 4 个方面提出了 AWCN 子网调度应该满足的约束模型, 随后推导了不同信道完成调度所需要的最少时隙, 以及稳态时数据流的 AOI 期望值, 最后设计了基于 MIP 的求解方法, 并针对大规模网络中约束耦合度高而导致的求解效率低的缺陷, 提出了增量式调度框架.

3.1 约束模型

TTTech 公司所建立的一阶逻辑约束模型是当前 TTE 与 TSN 等有线网络实现确定性传输的基准模型. 该模型考虑到时间触发业务的严格周期性, 构建了多周期数据流的无冲突约束, 如公式 (5) 所示:

$$\left. \begin{aligned} & \forall f_i, f_j \in F, \forall m \in \left[0, \dots, \left(\frac{LCM(F.period)}{f_i.period} - 1\right)\right], \forall n \in \left[0, \dots, \left(\frac{LCM(F.period)}{f_j.period} - 1\right)\right] : \\ & \left((f_i \neq f_j) \wedge (f_i^{[v_k, v_l]} \in f_i.route) \wedge (f_j^{[v_k, v_l]} \in f_j.route) \right) \Rightarrow \\ & \left((m \times f_i.period) + f_{i,1}^{[v_k, v_l]}.offset \geq (n \times f_j.period) + f_{j,1}^{[v_k, v_l]}.offset + f_j.length \right) \vee \\ & \left((n \times f_j.period) + f_{j,1}^{[v_k, v_l]}.offset \geq (m \times f_i.period) + f_{i,1}^{[v_k, v_l]}.offset + f_i.length \right) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

其中, $LCM(F.period)$ 表示所有数据流周期的最小公倍数, 即宏周期. 该公式意义在于: 一方面, 对于经过同一条数据链路 $[v_k, v_l]$ 的任意两条数据流 f_i 和 f_j 而言, 其在 $[v_k, v_l]$ 的传输时间不能相互重叠; 另一方面, f_i 周期性产生的连续两条消息在每条数据链路的发送时间间隔严格等于 $f_i.period$. 该方式通过全局调度计算周期性数据流在每个设备 (包括交换机和终端) 的发送时间点, 并将调度结果转化为设备的配置, 这样的传输方式可以定制每条数据流的传输周期和端到端时延, 从而满足不同工业应用对时间触发业务的时延需求^[2].

然而考虑到时间触发流是周期性产生消息, 随着网络内数据流数量的增加, $LCM(F.period)$ 内多周期数据流无冲突的约束数量将呈指数型增长, 直接影响求解效率. 本文借鉴了严格周期任务可调度性的判定条件^[45], 并将其推广到面向 AWCN 时间触发流的无冲突约束.

严格周期任务可调度性判定: 任意两个严格周期性任务 a_i 与 a_j 是可调度的, 当且仅当:

$$a_i.execution \leq (a_{j,1}.offset - a_{i,1}.offset) \bmod (GCD(a_i, a_j)) \leq GCD(a_i, a_j) - a_j.execution \quad (6)$$

其中, $a_{i,1}.offset$ 表示 a_i 周期性产生的第 1 个任务的开始执行时间, $a_i.execution$ 表示完成任务所花费的时间, $GCD(a_i, a_j)$ 表示 a_i 和 a_j 产生周期 $a_i.period$ 和 $a_j.period$ 的最大公约数. 对应于多周期数据流在链路 $[v_k, v_l]$ 的无冲突约束问题, 若将严格周期性任务 a_i 视为时间触发流 f_i , $a_{i,1}.offset$ 视为 $f_{i,1}^{[v_k, v_l]}.offset$, 产生周期 $a_i.period$ 视为 $f_i.period$, 执行时间 $a_i.execution$ 视为发送时延 $f_i.length$, 则公式 (5) 中的约束限制转化为:

$$f_i.length \leq (f_{i,1}^{[v_k, v_l]}.offset - f_{i,1}^{[v_k, v_l]}.offset) \bmod GCD(f_i, f_j) \leq (GCD(f_i, f_j) - f_j.length) \quad (7)$$

同理 $GCD(f_i, f_j)$ 表示 $f_i.period$ 与 $f_j.period$ 的最大公约数. 公式 (7) 的意义在于: 在无线网络中, 受到节点冲突与信道干扰的影响, 在不同数据链路传输的数据流亦可能产生多周期冲突, 因此该过程能够进一步有效缩减约束数量并提高求解效率. 结合公式 (7), 本节分别定义了节点无冲突约束与信道无干扰约束.

(1) 节点无冲突约束

在 AWCN 子网内, 同一时间节点只能与一个邻居节点建立连接, 并完成一条消息的收发. 这个约束建模形式化表示为:

$$\left. \begin{aligned} & \forall v_k \in V, \forall f_i, f_j \in F, \forall link(v_k) \in f_i.route, f_j.route : f_i \neq f_j \Rightarrow \\ & \left(f_i.length \leq (f_{i,1}^{link(v_k)}.offset - f_{i,1}^{link(v_k)}.offset) \bmod GCD(f_i, f_j) \right) \wedge \\ & \left((f_{j,1}^{link(v_k)}.offset - f_{j,1}^{link(v_k)}.offset) \bmod GCD(f_i, f_j) \leq (GCD(f_i, f_j) - f_j.length) \right) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

其中, $link(v_k)$ 表示链接 v_k 的数据链路 (包括以 v_k 为发送终端和接收终端的链路), $f_{i,1}^{link(v_k)}.offset$ 表示 f_i 第 1 条消息在该链路的发送时间点. 节点无冲突约束旨在避免无线传输共用节点导致的通信冲突. 如图 4(a) 所示, AWCN 子网内 v_c 与 v_h 均存在节点冲突.

(2) 信道无干扰约束

若任意两条数据流 f_i 和 f_j 传输过程中复用同样的信道资源, 则其传输时间不能相互重叠. 这个约束形式化表示为:

$$\left. \begin{aligned} & \forall f_i, f_j \in F, \forall [v_k, v_l] \in f_i.route, \forall [v_m, v_n] \in f_j.route : (f_i \neq f_j) \wedge \\ & ([v_k, v_l] \cap [v_m, v_n] = \emptyset) \wedge (f_i^{[v_k, v_l]}.channel = f_j^{[v_m, v_n]}.channel) \Rightarrow \\ & \left(f_i.length \leq (f_{i,1}^{[v_k, v_l]}.offset - f_{i,1}^{[v_k, v_l]}.offset) \bmod GCD(f_i, f_j) \right) \wedge \\ & \left((f_{j,1}^{[v_m, v_n]}.offset - f_{j,1}^{[v_m, v_n]}.offset) \bmod GCD(f_i, f_j) \leq (GCD(f_i, f_j) - f_j.length) \right) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

网关节点所需要的最少时隙数量如公式 (14) 所示:

$$T_{\min} = \sum_{i=1}^N G_i \times f_i.length \times hop_i \quad (14)$$

证明: 根据公式 (9) 可知, 当信道数量为 1 时, 单位时隙内仅允许一条数据链路存在数据传输, 该条件同时满足了节点无冲突约束. 假设 AWCN 子网内 N 个终端节点产生的数据流表示为 $F = \{f_1, f_2, \dots, f_N\}$, 对于任意数据流 f_i 而言, 其在宏周期 $LCM(F.period)$ 内产生的消息数量表示为 $G_i = LCM(F.period) / f_i.period$, 则所有消息传输至网关节点所需要的时隙数量如公式 (14) 所示, 证毕.

定理 2 表明了当信道数量为 1 时, AWCN 子网完成调度所需要的时隙数量仅取决于数据流的发送时延与决策变量数量, 与网关数量无关.

定理 2. 对于包含 N 个无线终端节点与 N_{GW} 个网关节点的 3 跳 AWCN 子网而言, 当信道数量充足时, 宏周期内所有消息传输至网关节点所需要的最少时隙数量如公式 (15) 所示:

$$T_{\min} = \max \left[\begin{array}{l} \sum_{i=1}^N (G_i \times f_i.length) / N_{GW}, \\ \left\{ \begin{array}{ll} T_{\text{all}}(v_{\max T}), & \text{when } v_{\max T} \in V_{\text{Node-I}} \\ T_{\text{all}}(v_{\max T}) + \min_{v_k \in V_{\text{Node}}} (G_k \times f_k.length), & \text{when } v_{\max T} \in V_{\text{Node-II}} \end{array} \right. \end{array} \right] \quad (15)$$

证明: 鉴于所有数据流均以网关作为接收终端, 当网络负载足够均衡并且信道资源充足时, 网关接收 AWCN 子网内所有消息所需要的最少时隙数量如公式 (16) 所示:

$$T_{\text{rece}}(V_{\text{GW}}) = \sum_{i=1}^N G_i / N_{\text{GW}} \quad (16)$$

进一步分析 AWCN 子网内终端节点传输数据流至网关所需要的最少时隙. 基于节点距离网关的跳数, 将节点集合表示为 $V_{\text{Node}} = \{V_{\text{Node-I}}, V_{\text{Node-II}}, V_{\text{Node-III}}\}$, 其中 $V_{\text{Node-I}}$ 表示第 1 层节点集合 (即距离网关 1 跳的节点), 同理 $V_{\text{Node-II}}$ 与 $V_{\text{Node-III}}$. 对于第 3 层的任意节点 $v_{i-III} \in V_{\text{Node-III}}$ 而言, 鉴于其仅发送数据, 因此宏周期内所占用的最少时隙数量如公式 (17) 所示:

$$T_{\text{all}}(v_{i-III}) = T_{\text{send}}(v_{i-III}) = G_{i-III} \times f_{i-III}.length \quad (17)$$

对于第 2 层的任意节点 $v_{i-II} \in V_{\text{Node-II}}$ 而言, 其宏周期内接收所有消息占用的最少时隙数量如公式 (18) 所示:

$$T_{\text{rece}}(v_{i-II}) = \sum_{([v_{i-III}, v_{i-II}] \in f_{i-III}.route)} (G_{i-III} \times f_{i-III}.length) \quad (18)$$

其中, $[v_{i-III}, v_{i-II}] \in f_{i-III}.route$ 表示第 3 层节点 v_{i-III} 产生的数据流 f_{i-III} 需要经过 v_{i-II} 转发至第 1 层节点, 因此宏周期内 v_{i-II} 所占用的时隙数量如公式 (19) 所示:

$$T_{\text{all}}(v_{i-II}) = 2 \times T_{\text{rece}}(v_{i-II}) + G_{i-II} \times f_{i-II}.length \quad (19)$$

结合公式 (17) 与公式 (19), 鉴于第 2 层节点需要转发第 3 层节点产生的数据流, 因此 $V_{\text{Node-II}}$ 中负载最高的节点一定大于等于 $V_{\text{Node-III}}$ 中负载最高的节点, 如公式 (20) 所示:

$$\max_{v_{i-II} \in V_{\text{Node-II}}} (T_{\text{all}}(v_{i-II})) \geq \max_{v_{i-III} \in V_{\text{Node-III}}} (T_{\text{all}}(v_{i-III})) \quad (20)$$

对于第 1 层节点 $v_{i-I} \in V_{\text{Node-I}}$ 而言, 其需要转发来自第 2 层与第 3 层节点产生的数据流, 其宏周期内接收所有消息占用的最少时隙数量如公式 (21) 所示:

$$T_{\text{rece}}(v_{i-I}) = \sum_{(v_k \in (V_{\text{Node}} / V_{\text{Node-I}})) \wedge ([v_k, v_{i-I}] \in f_k.route)} (G_k \times f_k.length) \quad (21)$$

其中, $(v_k \in (V_{\text{Node}} / V_{\text{Node-I}})) \wedge ([v_k, v_{i-I}] \in f_k.route)$ 表示来自第 2 层或第 3 层的节点 v_k 产生的数据流 f_k 经过 v_{i-I} 转发至网关节点, 则宏周期内 v_{i-I} 所占用的时隙数量如公式 (22) 所示:

$$T_{\text{all}}(v_{i-I}) = 2 \times T_{\text{rece}}(v_{i-I}) + G_{i-I} \quad (22)$$

进一步分析 $V_{\text{Node-I}}$ 与 $V_{\text{Node-II}}$ 中负载最高的节点 (表示为 $v_{\max T}$, 即 $\arg \max_{v_i \in V_{\text{Node}}} (T_{\text{all}}(v_i)) = v_{\max T}$), 若 $v_{\max T}$ 属于第 1 层节点, 则宏周期内 AWCN 子网内终端节点传输消息至网关所需要的最少时隙数量如公式 (23) 所示:

$$T_{\text{send}}(V_{\text{Node}}) = T_{\text{all}}(v_{\text{max}T}), \text{ when } v_{\text{max}T} \in V_{\text{Node-I}} \quad (23)$$

若 $v_{\text{max}T}$ 属于第 2 层节点, 则第 1 层节点需要等待 $v_{\text{max}T}$ 中部分消息传输完成后, 再转发至网关节点. 则宏周期内终端节点传输消息至网关所需要的最少时隙数量如公式 (24) 所示:

$$T_{\text{send}}(V_{\text{Node}}) = T_{\text{all}}(v_{\text{max}T}) + \min_{v_k \in V_{\text{Node}}} (G_k \times f_k.\text{length}), \text{ when } v_{\text{max}T} \in V_{\text{Node-II}} \quad (24)$$

结合公式 (16) 可知, AWCN 子网完成调度所需要的最少时隙数量为 $T_{\text{min}} = \max(T_{\text{rece}}(v_{\text{GW}}), T_{\text{send}}(V_{\text{Node}}))$, 即公式 (15). 证毕.

考虑到 AWCN 子网内网关数量通常远小于终端节点数量, 因此根据公式 (15) 可知, 当信道数量充足时, 网关数量是制约时延的主要因素.

上述定理从时隙的角度推导了 AWCN 完成调度的充分条件, 然而考虑到机载环境中信道噪声导致的干扰, 即使在独立的时频资源, 依然难以保证各条消息实现可靠传输, 因此本文将进一步通过 AOI 度量边缘网关所掌握各终端状态信息的新鲜度. 对于任意数据流 f_i 而言, 若其周期性产生的第 j 条消息被边缘网关成功接收时, 将该消息表示为 $f_{i,j}^{\text{GW}}$, 则 t 时刻数据流 f_i 在边缘网关处的 AOI 定义为:

$$A_i(t) = t - \max(f_{i,j}^{\text{GW}}.\text{birth} | f_{i,j}^{\text{GW}}.\text{birth} + \text{delay}_i \leq t) \quad (25)$$

考虑到机载业务具有面向特定应用、节点静态部署等特点, 定义任意一条链路 $[v_k, v_l]$ 进行数据传输的成功率为 ε , 则数据流 f_i 成功传输至网关的概率为 $P_i = \varepsilon^{\text{hop}_i}$. 图 5 为存在信道噪声时, 数据流 f_i 的 AOI 演化曲线, 令 $o_{i,j} = f_{i,j}.\text{birth} + \text{delay}_i$ 可以直观地看出, 当调度结果给定时, 数据流 f_i 在 $o_{i,j}$ 时刻的 AOI 是否更新取决于第 j 条消息是否被成功接收. 如图中在 $f_{i,2}.\text{birth}$ 时刻产生的消息在 $o_{i,2}$ 时刻被成功接收, 则 $o_{i,2}$ 时刻的 AOI 从 $o_{i,2}$ 下降为 delay_i ; 由于 $o_{i,3}$ 时刻第 3 条消息接收失败, 因此 $o_{i,3}$ 时刻的 AOI 持续增加, 直到 $o_{i,4}$ 时刻成功接收到 $f_{i,4}.\text{birth}$ 时刻产生的消息.

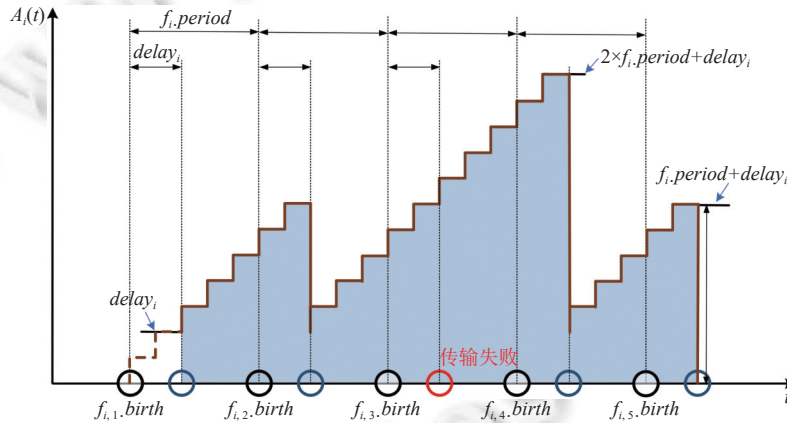


图 5 信息年龄演化曲线

综上所述可知 $o_{i,j}$ 时刻的 AOI 是决定数据流 f_i 在第 j 个周期 AOI 的关键, 本文进一步推导了当 $j \rightarrow \infty$ 时, $o_{i,j}$ 时刻数据流 f_i 在边缘网关处的 AOI 期望值, 得到定理 3.

定理 3. 当 $j \rightarrow \infty$ 时, $o_{i,j}$ 时刻数据流 f_i 在边缘网关处的 AOI 期望值为:

$$\Lambda_i = \lim_{j \rightarrow \infty} E(A_i(o_{i,j})) = \frac{1 - P_i}{P_i} \cdot f_i.\text{period} + \text{delay}_i \quad (26)$$

证明: 基于公式 (25) 可知, $o_{i,j}$ 时刻数据流 f_i 在边缘网关处的 AOI 取决于边缘网关最后一次成功接收到数据流 f_i 消息的时刻, 假设该时刻为 $o_{i,\alpha}$ ($\alpha \leq j$), 则后续 $(j - \alpha)$ 次消息的传输均失败, 并且 $o_{i,j}$ 时刻的 AOI 为 $(j - \alpha) \times f_i.\text{period} + \text{delay}_i$. 综合考虑 $1 \leq \alpha \leq j$ 的所有情况, 得到公式 (27):

$$\Lambda_i = \lim_{j \rightarrow \infty} E(A_i(o_{i,j})) = \lim_{j \rightarrow \infty} \sum_{\alpha=1}^j P_i \cdot (1 - P_i)^{j-\alpha} \cdot [(j-\alpha) \cdot f_i \cdot \text{period} + \text{delay}_i] \quad (27)$$

令 $j - \alpha = \beta$, 并对等比级数求和公式两侧求导, 代入公式 (27) 可进一步化简如下:

$$\begin{aligned} & \lim_{j \rightarrow \infty} \sum_{\beta=0}^{j-1} P_i \cdot (1 - P_i)^\beta \cdot [\beta \cdot f_i \cdot \text{period} + \text{delay}_i] \\ &= \lim_{j \rightarrow \infty} \sum_{\beta=0}^{j-1} P_i \cdot (1 - P_i)^\beta \cdot \beta \cdot f_i \cdot \text{period} + \lim_{j \rightarrow \infty} \sum_{\beta=0}^{j-1} P_i \cdot (1 - P_i)^\beta \cdot \text{delay}_i \\ &= P_i \cdot f_i \cdot \text{period} \cdot \frac{1 - P_i}{(P_i)^2} + P_i \cdot \text{delay}_i \cdot \frac{1}{P_i} \\ &= \frac{1 - P_i}{P_i} \cdot f_i \cdot \text{period} + \text{delay}_i \end{aligned} \quad (28)$$

故原命题得证.

根据公式 (28) 可知, 对于同周期的两条数据流而言, 即使调度完成后端到端时延相同, 其 AOI 期望值依然会因传输成功概率的不同而存在差异.

3.3 基于整数规划的调度方法

基于上述问题模型与约束限制, 本节分析了 AWCN 调度问题的求解复杂度, 设计了基于线性整数规划的求解方法. 此外, 为了满足 AWCN 的升级换代需求, 并解决大规模网络中约束耦合度高而导致的求解效率低的缺陷, 提出了增量式调度框架.

定理 4. 对于时间触发的 AWCN 调度问题而言, 搜索最优的调度方案是一个 NP-hard 问题.

证明: 为了能够证明定理 4, 本文首先引入了多处理机任务调度问题^[46], 并证明该问题是 AWCN 确定性调度问题的特殊情形, 鉴于多处理机任务调度问题是 NP-hard 问题^[47], 因此寻找 AWCN 最优的调度方案亦是 NP-hard 问题.

定义 1 (多处理机任务调度问题). 多处理机任务调度问题是给定一组具有相互依赖关系的任务和一组处理机, 将每个任务指派到一个固定的处理机子集上不可剥夺地执行, 以满足优化指标, 如最小化最大完工时间等性能指标. 该问题可以用标准的三段式记为 $P_m | fix | C_{\max}$, 其中 P_m 表示 m 个处理机系统, fix 表示执行每个任务需要拥有的一组固定的处理机, $C_{\max}$ 表示调度问题的优化目标.

对于 AWCN 调度问题而言, 其本质为寻找一组具有相互依赖关系的数据流在每条数据链路的发送时间以及占用的信道资源. 考虑一个 AWCN 调度问题的子问题: 假设所有数据流具有相同的产生周期, 并且信道资源足够充足, 若将子网内节点集合视为一组处理机, 数据流在每条链路的发送时间视为任务在处理机子集上的开始执行时间, 则该子问题等价于多处理机任务调度问题. 鉴于该子问题能够归约为 AWCN 调度问题, 并且多处理机任务调度问题是 NP-hard 的, 因此定理 1 成立. 证毕.

对于上述 NP-hard 问题的求解, 目前 Gurobi 以及 CPLEX 等优化求解器均致力于实现整数变量约束的快速规划, 已被众多学者用来实施 TTE 与 TSN 的调度设计研究, 因此本文将通过 PyCharm 平台将时间触发的 AWCN 一阶逻辑形式导入求解器 Gurobi MIP Solver 进行求解. 鉴于节点无冲突与信道无干扰约束中的取模运算, 以及公式 (9) 中将两个决策变量的比较作为条件语句, 均属于非线性约束, 因此本文首先对其进行线性转化. 对于公式 (8) 而言, 引入中间变量 e_1 与 e_2 对取模运算进行线性转化, 具体如公式 (29) 所示:

$$\left. \begin{aligned} & \forall v_k \in V, \forall f_i, f_j \in F, \forall \text{link}(v_k) \in f_i \cdot \text{route}, f_j \cdot \text{route} : f_i \neq f_j \Rightarrow \\ & \left(f_{j,1}^{\text{link}(v_k)} \cdot \text{offset} - f_{i,1}^{\text{link}(v_k)} \cdot \text{offset} \right) = e_1 \cdot \text{GCD}(f_i, f_j) + e_2 \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

其中, 约束 $e_1 \in N$, $e_2 \in [f_i \cdot \text{length}, \text{GCD}(f_i, f_j) - f_i \cdot \text{length}]$.

对于公式 (9) 而言, 在公式 (8) 的基础上进一步引入二进制中间变量 e_3 、 e_4 与 e_5 对其进行线性转化, 具体如公式 (30) 所示:

$$\left. \begin{aligned} & \forall f_i, f_j \in F, \forall [v_k, v_l] \in f_i.route, \forall [v_m, v_n] \in f_j.route : (f_i \neq f_j) \wedge ([v_k, v_l] \wedge [v_m, v_n] = \emptyset) \Rightarrow \\ & \left(f_{i,1}^{[v_k, v_l]}.channel \geq f_{j,1}^{[v_m, v_n]}.channel + \varepsilon - \theta \cdot (1 - e_3) \right) \wedge \left(f_{i,1}^{[v_k, v_l]}.channel \leq f_{j,1}^{[v_m, v_n]}.channel + \theta \cdot e_3 \right) \wedge \\ & \left(f_{j,1}^{[v_m, v_n]}.channel \geq f_{i,1}^{[v_k, v_l]}.channel + \varepsilon - \theta \cdot (1 - e_4) \right) \wedge \left(f_{j,1}^{[v_m, v_n]}.channel \leq f_{i,1}^{[v_k, v_l]}.channel + \theta \cdot e_4 \right) \wedge \\ & (e_5 = e_3 + e_4) \wedge [e_5 = 0 \Rightarrow ((f_{j,1}^{[v_m, v_n]}.offset - f_{i,1}^{[v_k, v_l]}.offset) = e_1 \cdot GCD(f_i, f_j) + e_2)] \end{aligned} \right\} \quad (30)$$

其中, $0 < \varepsilon < 1$, θ 取值足够大用于保证 $f_{i,1}^{[v_k, v_l]}.channel \leq f_{j,1}^{[v_m, v_n]}.channel$ 时, 前两个约束成立的条件是 $e_3 = 0$; 以及 $f_{j,1}^{[v_m, v_n]}.channel \leq f_{i,1}^{[v_k, v_l]}.channel$ 时, 第 3 个和第 4 个约束成立的条件是 $e_4 = 0$; 当且仅当 $e_3 + e_4 = e_5 = 0$ 时 $f_{j,1}^{[v_m, v_n]}.channel = f_{i,1}^{[v_k, v_l]}.channel$, 即需要满足信道无干扰约束。

基于整数规划的 AWCN 确定性调度方法的伪代码如算法 1 所示, 具体而言: 对于任意一个表示发送时间点的决策变量 var_i 而言, 若定义其所属的数据流与数据链路分别为 f_p 和 $[v_k, v_l]$, 则 $v_l = v_{GW}$ 时 var_i 必须满足路径依赖约束, 对应于伪代码第 3–5 行. 若定义 var_j 所属的数据流与数据链路分别为 f_q 和 $[v_m, v_n]$, 当 $f_p = f_q$ 时, 则意味着 var_i 与 var_j 属于同一条数据流, 即二者之间必须存在正确的时间逻辑顺序, 对应于第 8、9 行; 否则当 $[v_k, v_l] \cap [v_m, v_n] \neq \emptyset$ 时, 意味着调度 var_i 与 var_j 时二者至少占用同一个节点, 即存在节点无冲突约束, 对应于第 10、11 行. 对于不存在路径依赖与节点无冲突约束的两个决策变量 var_i 与 var_j 而言, 即 var_i 与 var_j 必须满足信道无干扰约束, 对应于第 12、13 行. 第 17、18 行即导入目标函数并进行求解。

算法 1. 基于整数规划的 AWCN 确定性调度方法伪代码。

Input: 数据流 $F = \{f_1, f_2, \dots, f_N\}$; 决策变量 $Var(2 \times D \text{ 维度})$; 二进制中间变量 $\{e_1, e_2, e_3, e_4, e_5\}$;

Output: 最终决策变量取值 Var .

```

1. for  $i = 1, 2, \dots, D$  do
2.    $f_p^{[v_k, v_l]} = \text{Determine Related Flow and Link}(var_i)$  //确定变量  $var_i$  对应的数据流与数据链路
3.   if  $v_l = v_{GW}$  then //判定是否存在端到端时延约束
4.     Add Constraint in Equation (12):  $Constraints \leftarrow m.addConstr(var_i)$ 
5.   end if
6.   for  $j = i + 1, \dots, D$  ( $i \neq D$ ) do
7.      $f_q^{[v_m, v_n]} = \text{Determine Related Flow and Link}(var_j)$  //确定变量  $var_j$  对应的数据流与数据链路
8.     if  $f_p = f_q$  then //判定是否存在路径依赖
9.       Add Constraints in Equation (10):  $Constraints \leftarrow m.addConstr(var_i, var_j)$ 
10.    else if  $[v_k, v_l] \cap [v_m, v_n] \neq \emptyset$  then //判定是否存在节点冲突
11.      Add Constraints in Equation (29):  $Constraints \leftarrow m.addConstr(var_i, var_j, e_1, e_2)$ 
12.    else // 满足信道无干扰约束
13.      Add Constraints in Equation (30):  $Constraints \leftarrow m.addConstrs(var_i, var_j, var_{i+D}, var_{j+D}, e_1, e_2, e_3, e_4, e_5)$ 
14.    end if
15.  end for
16. end for
17. Add Objective Function in Equation (13):  $m.setObjective()$ 
18.  $Var \leftarrow m.optimize(Var, Constraints)$ 

```

3.4 增量式求解策略

上述基于整数规划的调度方法能够有效避免通信冲突与信道干扰等因素, 并且在小规模网络中能收敛于最优解. 然而一方面, 受限于 Gurobi 求解器搜索策略以及运算速度等因素的影响, 在大规模网络中, 调度过程中可能存在长时间运算而难以得到封闭解的情况, 无法满足应用需求^[15,18]; 另一方面, 对于不可调度的一组约束 (如不满足

定理 1 与定理 2), 如何合理利用网络资源, 实现调度规模与 TDF 的优化是亟需解决的问题. 因此, 本节进一步提出了一种增量式调度框架, 目的在于: 一方面, 对于难以得到封闭解的一组约束, 通过增量式调度减少每次求解过程中的决策变量与约束条件数量, 从而提高求解效率; 另一方面, 对于不可调度的一组约束, 综合考虑每条数据流调度优先级, 以优化调度规模或关键数据的确定性传输. 此外, 增量式调度更加适应于 AWCN 的升级换代需求. 增量式调度框架的伪代码如算法 2 所示.

算法 2. 增量式调度方法伪代码.

Input: 数据流集合 F ; 数据流数量 N ; 调度步长 Δ ; 已调度数据流集合 F_{Sch} ; 禁忌列表集合 L ;

Output: AWCN 子网资源调度方案 Res_{AWCN} .

```

1.  $F_{\text{Sch}} = \emptyset, L = \emptyset$ 
2. for  $i = 1, 2, \dots, N$  do
3.    $SF_i = \text{Calculate Scheduling Priority}(f_i)$  // 计算数据流  $f_i$  的调度影响因子
4. end for
5.  $F = \text{Ascending Sort}(SF_i)$  // 对调度影响因子升序排序
6. for  $iter = 1, 2, \dots, \lceil N/\Delta \rceil$  do
7.    $Constraints = \emptyset, F_{iter} = \{f_{(i-1)\times\Delta+1}, \dots, f_{\min(i\times\Delta, N)}\}$  // 基于调度步长确定本轮所调度的数据流集合
8.    $Var_{iter} = \text{Update Set of Variable}(F_{iter})$  // 基于  $F_{iter}$  更新本轮调度的决策变量集合
9.    $Constraints \leftarrow \text{Add Constraints between variables in } Var_{iter}$  // 生成  $Var_{iter}$  变量之间的约束
10.  if  $iter > 1$  do
11.    $Constraints \leftarrow \text{Add Constraints between variables in } Var_{iter} \text{ and constants in } L$  // 生成  $Var_{iter}$  变量与  $L$  中常量的约束
12. end if
13.   $\text{Add Objective Function in Equation (13): } m.setObjective()$ 
14.   $Var_{iter} \leftarrow m.optimize(Var_{iter}, Constraints)$ 
15.  if  $Var_{iter} \neq \emptyset$  do
16.    $L = L \cup Var_{iter}$ 
17. end if
16. end for

```

主要步骤如下.

(1) 参数初始化. 初始化数据流集合 $F = \{f_1, f_2, \dots, f_N\}$ 、调度步长 Δ 、已调度数据流集合 $F_{\text{Sch}} = \emptyset$ 以及禁忌列表 $L = \emptyset$, 其中调度步长用于控制每轮调度的数据流数量, 禁忌列表用于存储已调度数据流的时隙与信道分配方案, 便于下一轮调度约束条件的添加.

(2) 计算各条数据流的调度影响因子, 并进行升序排序以确定调度优先级. 对于任意数据流 f_i 而言, 本文共考虑了如下两种调度影响因子计算方式.

$$SF_i\text{-I} = \maxlatency_i - hop_i \times f_i.length \quad (31)$$

$$SF_i\text{-II} = hop_i \times f_i.length \times LCM(F.period) / f_i.period \quad (32)$$

其中, 公式 (31) 根据调度截止时间设置调度优先级, 而公式 (32) 则根据其在宏周期内所占用的时隙资源设置调度优先级. 此步骤对应于伪代码第 2–5 行.

(3) 约束与目标函数生成. 基于调度步长确定本轮调度的数据流集合与决策变量集合 Var_{iter} , 并通过算法 1 添加 Var_{iter} 中各决策变量之间的约束条件, 以及 Var_{iter} 中决策变量与禁忌列表 L 中常量的约束条件, 后者用于避免和已调度的数据流产生资源冲突, 基于公式 (13) 导入目标函数. 此步骤对应于伪代码第 7–13 行.

(4) 更新禁忌列表. 将决策变量 Var_{iter} 与约束条件导入求解器求解, 若调度结果不为空集, 则调度成功, 并将本轮的调度结果添加至禁忌列表 L . 此步骤对应于伪代码第 14–17 行.

(5) 若完成所有数据流的调度, 则 L 存储了成功完成调度的数据流所对应的决策变量集合, 调度结束; 否则返回第 (3) 步.

4 实验设计与结果分析

基于上述约束建模与理论分析, 本节首先验证了所提时间触发的 AWCN 调度约束模型的可行性, 其次分析了网络资源对 TDF 与 AOI 的影响, 最后面向增量式调度框架, 讨论了调度步长、调度优先级对 TDF 与调度规模的影响.

4.1 AWCN 确定性调度模型验证

本节以图 6(a) 所示拓扑 I 为例, 数值分析并验证了 AWCN 调度问题的可行性. 拓扑 I 包含 1 个网关节点与 10 个终端节点, 每一层终端节点的数量分别为 $N(V_{Node-I}) = 3$, $N(V_{Node-II}) = 4$, $N(V_{Node-III}) = 3$, 每个终端节点分别产生一条数据流并传输至网关节点, 因此决策变量集合的维度为 $2 \times \sum_{i=1}^{10} hop_i = 40$. 为了更加直观地展示数据流、节点所占用的时隙与信道资源, 以时隙为单位并不失一般性地假设任意一条数据流 f_i 帧长的取值范围为集合 $f_i.length \in \{1, 2, 3\}$, 注入时间 $f_i.birth = 1$, f_1, f_2, f_5, f_6 与 f_{10} 的产生周期为 40, f_3, f_4, f_7, f_8 与 f_9 的产生周期为 20.

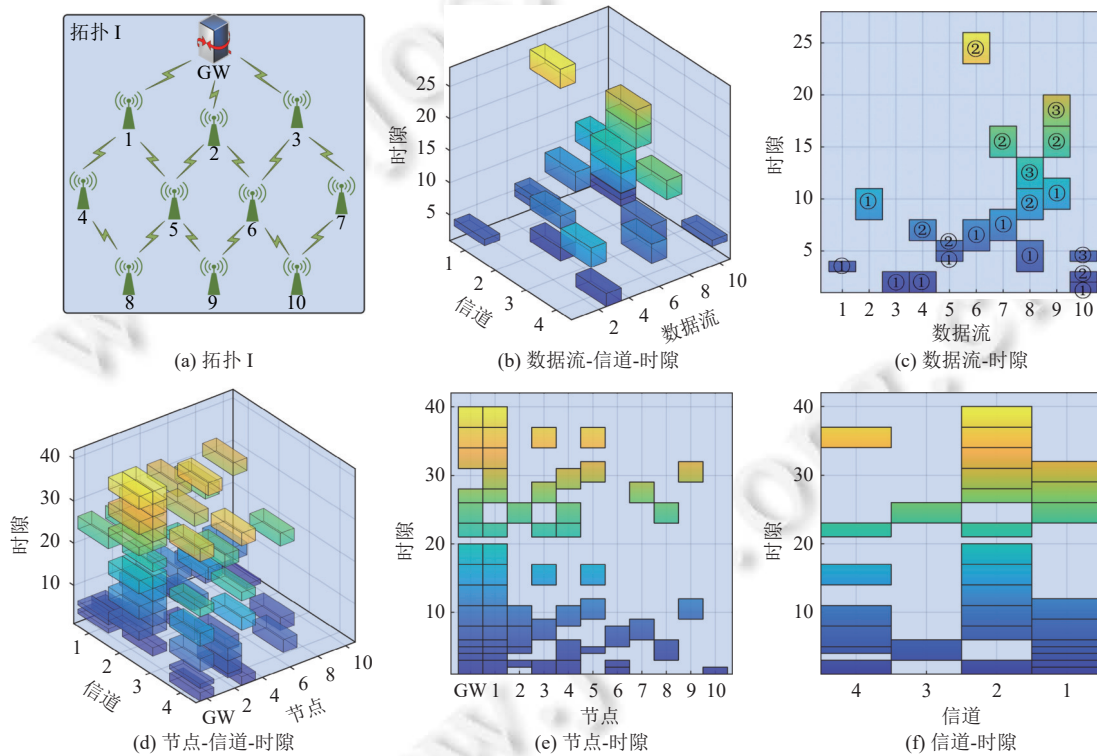


图 6 调度可行性分析

图 6(b) 可视化展示了当信道数量为 4 时, 10 条数据流完成一条消息传输所占用的信道与时隙资源, 其中每个时隙资源块的高度表示该数据流的帧长. 图 6(c) 从数据流-时隙视角展示了每条数据流所占用的时隙资源块, 时隙资源块上的数字表示每个决策变量所对应的路由跳数, 可以直观地看出对于任意一条数据流而言, 每个决策变量所占用的时隙资源互不重叠, 并且相邻两跳之间具有正确的时间逻辑, 满足路径依赖约束; 图 6(d) 为 1 个网关节

点与 10 个终端节点在宏周期内占用的时隙与信道资源, 图 6(e) 从节点-时隙视角展示了每个节点所占用的时隙资源, 易知宏周期内 10 条数据流产生的消息数量为 $\sum_{i=1}^{10} LCM(F_i.period)/f_i.period \times hop_i = 31$, 鉴于每条消息的收发需要占用两个节点, 因此图 6(e) 中时隙资源块的数量为 62. 此外基于公式 (17) 可知, 对于包含 1 个网关节点的 AWCN 子网而言, 网关节点在宏周期内接收的消息数量及占用的时隙数量分别为 $\sum_{i=1}^{10} LCM(F_i.period)/f_i.period = 15$ 、 $\sum_{i=1}^{10} LCM(F_i.period)/f_i.period \times f_i.length = 35$, 满足图 6(e) 中的调度结果; 图 6(f) 从信道-时隙视角展示了每个时隙所使用的信道资源, 可以看出 4 条信道在宏周期内被使用的频次严格等于 10 条数据流所产生的消息数量, 因此满足信道无干扰约束. 综上实验验证了 AWCN 调度约束模型的可行性.

4.2 AWCN 网络资源与拓扑结构对时延与 AOI 的影响

ITU 在标准 M.2283 中根据机载应用对数据传输速率的不同, 以 10 Kb/s 为界限将其分为低速率应用与高速率应用^[48], 文献 [3] 中提出将 WiFi 与 ZigBee 分别作为高速率与低速率应用的传输方案. 本文的目的在于验证并实现所提时间触发的 AWCN 调度策略, 因此以 ZigBee 为例设定实验参数并展开后续实验. 综合考虑 ZigBee 的数据包长度 (不超过 4.256 ms)^[49]、时间同步误差以及节点的采样速率, 后续实验设定时隙长度为 5 ms, 并且每个时隙长度为任意一条消息传输所需要的时间^[40]. 本文共考虑两种类型的时间敏感型业务, 即 $F = F_I \cup F_{II}$, F_I 表征以结构应力、轮速位置为代表的快变物理参量, 设置其周期为 100 ms; F_{II} 表征以机舱温度、烟雾为代表的慢变物理参量, 设置其周期为 500 ms, 任意数据流注入 AWCN 的时间 $f_i.birth \in [1, f_i.period)$. 本节考虑了如图 7 所示的 3 种拓扑结构, 拓扑 III 在拓扑 II 的基础上增加了 1 个网关节点, 拓扑 IV 则控制 AWCN 内最大传输跳数为 2 跳, 3 种拓扑均包含 22 个终端节点, 其中节点 $v_3 - v_6$ 、 $v_{11} - v_{14}$ 产生 F_I 类型数据流, 其余节点产生 F_{II} 类型数据流.

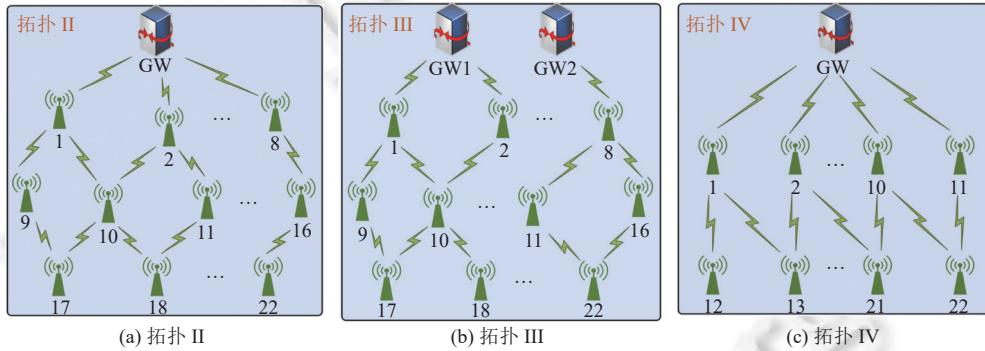


图 7 3 种拓扑模型

本节评估了信道数量、网关数量以及拓扑结构对于时延与 AOI 的影响, 任意数据流 f_i 端到端时延的计算方式如公式 (11) 所示, TDF 的计算方式如公式 (13) 所示; 对于 AOI 而言, 本文基于定理 3 评估了 $\alpha_{i,j}(j \rightarrow \infty)$ 时刻 f_i 在边缘网关处的期望值 Λ_i , 如公式 (26) 所示. 图 8(a) 为 3 种拓扑在不同信道数量时的 TDF 比较, 综合得出如下结论.

- 当信道数量等于 1 时, 拓扑 II 与拓扑 III 的 TDF 相等, 而拓扑 IV 中 TDF 最低. 受限于信道无干扰约束, 当信道数量为 1 时, 单位时隙仅允许存在一组数据传输, 考虑到拓扑 II 与拓扑 III 中各条数据流的帧长以及传输跳数相等, 仅部分数据流的接收网关不同, 并不影响所有数据流完成传输所需要的时隙数量, 因此二者在 TDF 方面的性能一致. 对于拓扑 IV 而言, 鉴于其最大传输跳数为 2 跳, 相比较于拓扑 II 与拓扑 III, 其在保持数据流参数一致的同时减少了决策变量的数量, 因此在 TDF 方面表现最优. 上述实验结果与定理 1 理论分析结果相吻合, 即当信道数量为 1 并且数据流参数保持一致时, 决定 TDF 性能的关键因素为决策变量集合所对应的时隙数量.

- 随着信道数量的增加, 3 种拓扑中 TDF 均呈现先递减后趋于稳定的趋势. 这是由于当可用信道较少时, 信道

数量是制约时延的主要因素. 当信道数量充足时, 鉴于 AWCN 子网内所有节点均采用半双工通信, 此时制约时延的主要因素成为了节点冲突约束、路径依赖约束以及网络的拓扑结构, 即单位时隙内能够存在的数据传输数量小于可使用的信道数量, 因此 TDF 趋于稳定.

• 当信道数量充足时, 拓扑 III 的 TDF 显著低于拓扑 II. 这是因为拓扑 II 中的瓶颈节点为接收网关, 当任意数据流到达第 1 层节点时, 即使信道数量充足, 依然受限节点无冲突约束, 单位时隙仅能存在一条消息传输至网关节点; 拓扑 III 本质上减少了数据流之间最后一跳传输的节点冲突约束. 参考公式 (16), 当网关数量大于 1 时, AWCN 子网完成调度所需要的最少时隙数量将显著降低, 因此拓扑 III 在 TDF 方面的性能优于拓扑 II. 上述实验结果与定理 2 理论分析结果相吻合, 即当信道数量充足时, 网关数量是影响时延的主要因素. 此外, 拓扑 III 的 TDF 略高于拓扑 IV 的原因在于本文设置数据流注入 AWCN 的时间 $f_i.birth \in [1, f_i.period]$, 即在网络初始化阶段就一定程度规避了数据流之间的冲突, 因此拓扑 IV 中部分数据流最后一跳的传输并不会受到网关数量的制约, 鉴于拓扑 IV 减少了数据流的最大传输跳数, 因此 TDF 优于拓扑 III 是可以接受的.

• 图 8(b) 为信道数量等于 5 时, 这 3 种拓扑中各数据流的时延对比, 可以直观地看出, 拓扑 II 与拓扑 IV 的最大时延均为 25 ms, 分别对应于节点 v_{13} 和 v_{15} , 而拓扑 III 中的最大时延为 20 ms, 对应于节点 v_{18} . 根本原因在于当可用信道资源充足, 并且数据流到达第 1 层节点的时间相近时, 拓扑 II 与拓扑 IV 中数据流均被网关无冲突约束所制约, 而拓扑 III 则有效避免了该问题. 图 8(c) 比较了上述 3 个节点在不同拓扑中的 AOI 期望值, 一方面, 当链路传输成功概率较小时, 拓扑 II 中节点 v_{13} 的 AOI 期望值最小, 原因在于 v_{13} 节点的周期更小, 即传输次数更多, 因此 AOI 期望值更小. 尽管拓扑 III 中节点 v_{18} 与拓扑 IV 中节点 v_{15} 的周期相等, 并且节点 v_{18} 的端到端时延更小, 然而其 AOI 依然较大, 根本原因在于拓扑 III 中节点 v_{18} 需要经过 3 跳传输至网关节点, 而拓扑 IV 中节点 v_{15} 仅需要 2 跳, 节点 v_{18} 的丢包率更高, 因此其 AOI 更大. 另一方面, 当链路传输成功概率为 1 时, 则意味着每一轮传输均能成功, 因此 AOI 期望值对应于各条数据流的端到端时延.

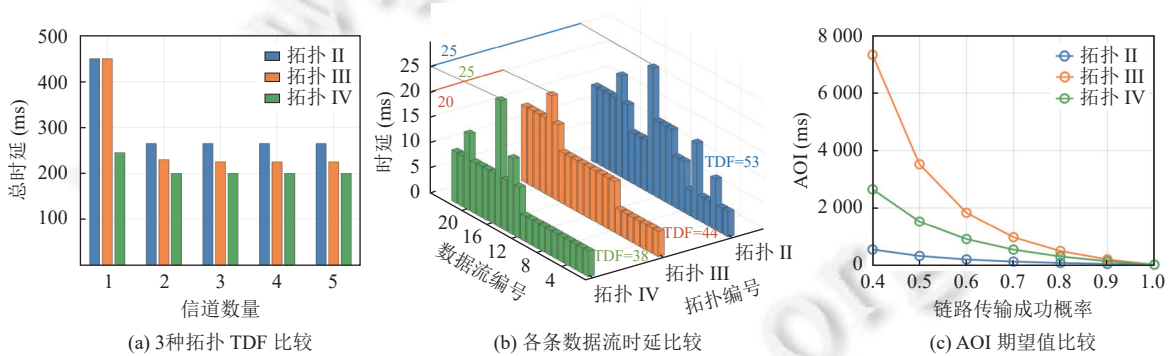


图 8 网络资源对时延与 AOI 的影响

4.3 增量式求解策略对 TDF 与调度规模的影响

本节面向图 9(a) 所示拓扑 V 评估了两种增量式调度方案对 TDF 与调度规模的影响, 拓扑 V 中节点 $v_{11} - v_{14}$ 、 $v_{31} - v_{34}$ 产生 F_I 类型数据流, 其余节点产生 F_{II} 类型数据流, 方案 I 与方案 II 分别采用公式 (31) 与 (32) 所述的调度影响因子.

图 9(b) 为信道数量等于 1 时, 两种方案的调度结果比较, 可以直观地看出, 方案 II 所调度的数据流规模优于方案 I, 原因在于方案 I 根据调度截止时间设置调度优先级, 即优先调度 F_I 类型数据流, 鉴于 F_I 类型数据流在宏周期内所占用的时隙资源更多, 当可用信道资源较少时容易导致剩余 TT 流无法调度, 因此调度规模较少; 而方案 II 优先调度宏周期内占用时隙资源较少的数据流, 即 F_{II} 类型数据流, 在增量式调度前期迭代过程中, 可用时隙资源较多并且待调度流量的所占时隙资源更少, 因此调度规模更大, 然而该策略往往导致后期无法调度周期较小的数据流. 此外, 随着调度步长的增加, 方案 II 所调度的数据流规模呈现下降趋势, 主要原因在于当信道与时隙资源

无法应对 70 条数据流的传输时, 若调度步长较大, 则在迭代后期容易导致不存在松弛解或难以寻找到可行解的情况, 因此调度规模随着调度步长的增加而减少。

图 9(c) 为信道数量等于 2 时两种方案的调度结果比较。一方面, 方案 I 可完成所有 70 条数据流的调度, 而方案 II 所调度的数据流相比图 9(b) 增加较少, 原因在于, 尽管方案 I 优先调度 F_I 类型数据流占用了更多的时隙资源, 然而随着信道数量增加为 2, F_{II} 类型数据流依然能够在避免节点冲突的基础上选择另一个信道资源; 对于方案 II 而言, 优先调度 F_{II} 类型数据流导致其在前期迭代过程中贪心地选择了时延更少的调度方案, 由于 F_I 类型数据流的调度截止时间更短, 因此后期迭代往往无法找到可行调度方案。此外, 方案 I 在不同调度步长时均完成了 70 条数据流的调度, 然而其 TDF 在调度步长为 10 时呈现出上升趋势, 这是由于调度步长较大导致后期约束数量更多, 求解过程中难以逼近 TDF 的理论最优解。

图 9(d) 为信道数量等于 4 时两种方案的调度结果比较, 一方面, 方案 I 所调度规模与 TDF 不受调度步长的影响, 而方案 II 成功调度的数据流依然保持在 60 条左右。根据定理 2 可知, 当信道资源充足时, 网关数量通常是决定能否完成调度的关键因素, 信道数量的增加本质上减少了各条数据流传输至第 1 层节点的时间, 而网关处的节点冲突依然存在, 因此对于方案 I 而言, 信道资源充足时, TDF 仅取决于各条数据流的注入时间, 与调度步长无关; 而方案 II 则依然难以避免 F_{II} 类型数据流优先调度导致 F_I 类型数据流无法调度的缺陷。

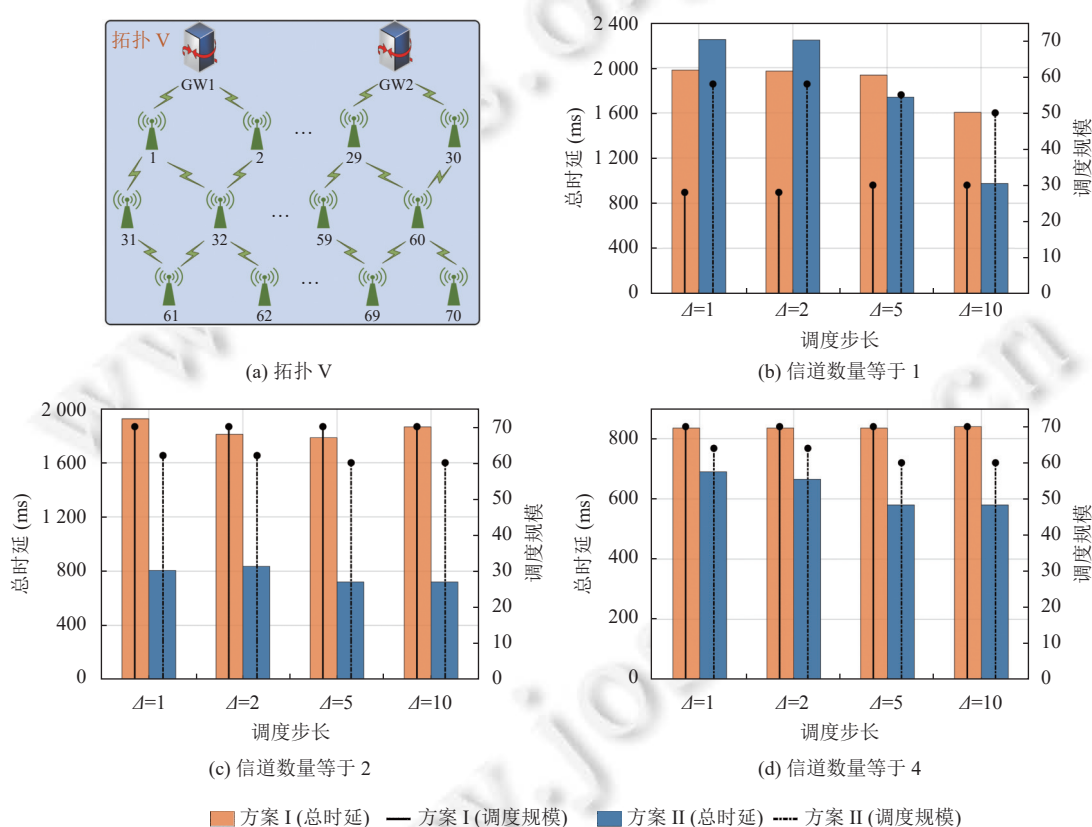


图 9 不同调度影响因子对 TDF 与调度规模的影响

5 总结与展望

本文以实现 AWCN 中时间触发数据流的无冲突传输为目标, 建立了 AWCN 确定性调度问题应该满足的约束模型, 设计了基于整数规划的调度方法, 并理论探讨了 AWCN 确定性调度问题中影响时延、AOI 以及可调度规模

的主要因素. 本文确定性调度理论的研究将有助于 AWCN 开发人员在设计阶段就获知网络性能能否满足应用需求, 然而依然存在一些问题值得进一步探讨: 例如如何实现 AWCN 中时间触发数据流与突发性数据流的混合传输, 并实现其端到端时延的确定性分析. 鉴于时间触发数据流集中式的调度机制保证了其在传输过程中独享时隙与信道资源, 因此为了避免通信冲突, 突发性数据流应该在空闲时隙内基于分布式竞争机制 (如时隙 ALOHA 和 CSMA/CA) 完成数据传输, 并通过马尔科夫理论分析稳态时节点的队列长度以实现端到端时延的确定性分析, 未来将围绕上述思路展开进一步研究.

References:

- [1] Li M, Zhu GC, Savaria Y, Lauer M. Reliability enhancement of redundancy management in AFDX networks. *IEEE Trans. on Industrial Informatics*, 2017, 13(5): 2118–2129. [doi: [10.1109/TII.2017.2732345](https://doi.org/10.1109/TII.2017.2732345)]
- [2] 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)]
- [3] Park P, Di Marco P, Nah J, Fischione C. Wireless avionics intracommunications: A survey of benefits, challenges, and solutions. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 8(10): 7745–7767. [doi: [10.1109/JIOT.2020.3038848](https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.3038848)]
- [4] Tavana M, Ozger M, Baltaci A, Schleicher B, Schupke D, Cavdar C. Wireless power transfer for aircraft IoT applications: System design and measurements. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 8(15): 11834–11846. [doi: [10.1109/JIOT.2021.3072505](https://doi.org/10.1109/JIOT.2021.3072505)]
- [5] Baltaci A, Zoppi S, Kellerer W, Schupke D. Evaluation of cellular technologies for high data rate WAIC applications. In: *Proc. of the 2019 IEEE Int'l Conf. on Communications (ICC 2019)*. Shanghai: IEEE, 2019. 1–6. [doi: [10.1109/ICC.2019.8761400](https://doi.org/10.1109/ICC.2019.8761400)]
- [6] Li SN, Fan XH, Liu ZZ, Chen CS, Cheng T. Status and analysis of wireless avionics intra-communications network protocol. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*, 2021, 44(3): 1–8 (in Chinese with English abstract). [doi: [10.13190/j.bupt.2020-151](https://doi.org/10.13190/j.bupt.2020-151)]
- [7] Park P, Chang W. Performance comparison of industrial wireless networks for wireless avionics intra-communications. *IEEE Communications Letters*, 2017, 21(1): 116–119. [doi: [10.1109/LCOMM.2016.2612188](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2016.2612188)]
- [8] Feng YL, He F, Li Z, Zhou X, Yu SF, Xiong HG. Performance evaluation of 5G wireless hybrid airborne network architecture for airliner. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2023, 44(12): 327681 (in Chinese with English abstract). [doi: [10.7527/S1000-6893.2022.27681](https://doi.org/10.7527/S1000-6893.2022.27681)]
- [9] Codau C, Buta RC, Kirei BS, Pastrav A, Simedroni R, Dolea P, Palade T, Hedesiu H, Puschita E. Design and validation of a wireless bridge for intra-spacecraft. In: *Proc. of the 44th Int'l Conf. on Telecommunications and Signal Processing (TSP)*. Brno: IEEE, 2021. 386–389. [doi: [10.1109/TSP52935.2021.9522609](https://doi.org/10.1109/TSP52935.2021.9522609)]
- [10] Nwadiugwu WP, Kim DS. Ultrawideband network channel models for next-generation wireless avionic system. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 2020, 56(1): 113–129. [doi: [10.1109/TAES.2019.2914538](https://doi.org/10.1109/TAES.2019.2914538)]
- [11] Steiner W. An evaluation of SMT-based schedule synthesis for time-triggered multi-hop networks. In: *Proc. of the 31st IEEE Real-time Systems Symp. (RTSS)*. San Diego: IEEE, 2010. 375–384. [doi: [10.1109/RTSS.2010.25](https://doi.org/10.1109/RTSS.2010.25)]
- [12] Pozo F, Rodriguez-Navas G, Hansson H, Steiner W. SMT-based synthesis of TTEthernet schedules: A performance study. In: *Proc. of the 10th IEEE Int'l Symp. on Industrial Embedded Systems (SIES)*. Siegen: IEEE, 2015. 1–4. [doi: [10.1109/SIES.2015.7185055](https://doi.org/10.1109/SIES.2015.7185055)]
- [13] Finzi A, Craciunas SS. Integration of SMT-based scheduling with RC network calculus analysis in TTEthernet networks. In: *Proc. of the 24th IEEE Int'l Conf. on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*. Zaragoza: IEEE, 2019. 192–199. [doi: [10.1109/ETFA.2019.8869365](https://doi.org/10.1109/ETFA.2019.8869365)]
- [14] Zheng Z, He F, Li HR, Lu J. Design optimization of time-triggered Ethernet based on routing and scheduling strategy. In: *Proc. of the 38th Digital Avionics Systems Conf. (DASC)*. San Diego: IEEE, 2019. 1–7. [doi: [10.1109/DASC43569.2019.9081772](https://doi.org/10.1109/DASC43569.2019.9081772)]
- [15] Craciunas SS, Oliver RS. Combined task- and network-level scheduling for distributed time-triggered systems. *Real-time Systems*, 2016, 52(2): 161–200. [doi: [10.1007/s11241-015-9244-x](https://doi.org/10.1007/s11241-015-9244-x)]
- [16] Zhou X, Xiong HG, He F. Hybrid partition- and network-level scheduling design for distributed integrated modular avionics systems. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2020, 33(1): 308–323. [doi: [10.1016/j.cja.2019.08.027](https://doi.org/10.1016/j.cja.2019.08.027)]
- [17] Li HR, He F, Zheng Z, Li ES, Xiong HG. Time-triggered communication scheduling method based on reinforcement learning. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2019, 45(9): 1894–1901 (in Chinese with English abstract). [doi: [10.13700/j.bh.1001-5965.2018.0789](https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2018.0789)]
- [18] He F, Li ES, Zhou X, Li HR, Gong ZJ. Design optimization and evaluation method for time-triggered communication scheduling in

- airborne networks. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2021, 42(7): 324258 (in Chinese with English abstract). [doi: [10.7527/S1000-6893.2020.24258](https://doi.org/10.7527/S1000-6893.2020.24258)]
- [19] IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks—Bridges and Bridged Networks—Amendment 25: Enhancements for Scheduled Traffic. IEEE Computer Society, 2016. [doi: [10.1109/IEEESTD2016.8613095](https://doi.org/10.1109/IEEESTD2016.8613095)]
 - [20] Craciunas SS, Oliver RS, Chmelik M, Steiner W. Scheduling real-time communication in IEEE 802.1Qbv time sensitive networks. In: *Proc. of the 24th Int'l Conf. on Real-time Networks & Systems*. Brest: ACM, 2016. 183–192. [doi: [10.1145/2997465.2997470](https://doi.org/10.1145/2997465.2997470)]
 - [21] Steiner W, Craciunas SS, Oliver RS. Traffic planning for time-sensitive communication. *IEEE Communications Standards Magazine*, 2018, 2(2): 42–47. [doi: [10.1109/MCOMSTD.2018.1700055](https://doi.org/10.1109/MCOMSTD.2018.1700055)]
 - [22] Zhao LX, Pop P, Gong ZJ, Fang BW. Improving latency analysis for flexible window-based GCL scheduling in TSN networks by integration of consecutive nodes offset. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 8(7): 5574–5584. [doi: [10.1109/JIOT.2020.3031932](https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.3031932)]
 - [23] Hu WX, Sun L, Wang JQ, Zhu Y, Bi ZH. Research on a latency upper-bound analysis model based on network calculus in time-sensitive networking. *Acta Automatica Sinica*, 2023, 49(11): 2297–2310 (in Chinese with English abstract). [doi: [10.16383/j.aas.c220577](https://doi.org/10.16383/j.aas.c220577)]
 - [24] IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks—Bridges and Bridged Networks—Amendment 29: Cyclic Queuing and Forwarding. IEEE Computer Society, 2017. <http://standards.ieee.org/ieee/802.1Qch/6072>
 - [25] Yan JL, Quan W, Jiang XY, Sun ZG. Injection time planning: Making CQF practical in time-sensitive networking. In: *Proc. of the 2020 IEEE Conf. on Computer Communications*. Toronto: IEEE, 2020. 616–625. [doi: [10.1109/INFOCOM41043.2020.9155434](https://doi.org/10.1109/INFOCOM41043.2020.9155434)]
 - [26] Zhang YZ, Xu QM, Xu L, Chen CL, Guan XP. Efficient flow scheduling for industrial time-sensitive networking: A divisibility theory-based method. *IEEE Trans. on Industrial Informatics*, 2022, 18(12): 9312–9323. [doi: [10.1109/TII.2022.3151810](https://doi.org/10.1109/TII.2022.3151810)]
 - [27] Guo M, Gu CJ, He SB, Shi ZG, Chen JM. MSS: Exploiting mapping score for CQF Start time planning in time-sensitive networking. *IEEE Trans. on Industrial Informatics*, 2023, 19(2): 2140–2150. [doi: [10.1109/TII.2022.3206815](https://doi.org/10.1109/TII.2022.3206815)]
 - [28] He F, Li ES, Zhou X, Zhao LX. A review of airborne time sensitive networking. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2023, 44(17): 028165 (in Chinese with English abstract). [doi: [10.7527/S1000-6893.2023.28165](https://doi.org/10.7527/S1000-6893.2023.28165)]
 - [29] Chen CJ, Sun YH, Sun ZG, Wang D, He XW, Cheng BW, Liu Y, Yin YB. Research on the deterministic Ethernet application for manned lunar exploration. *Journal of Astronautics*, 2024, 45(1): 142–153 (in Chinese with English abstract). [doi: [10.3873/j.issn.1000-1328.2024.01.015](https://doi.org/10.3873/j.issn.1000-1328.2024.01.015)]
 - [30] 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)]
 - [31] 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 with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/7148.htm> [doi: [10.13328/j.cnki.jos.007148](https://doi.org/10.13328/j.cnki.jos.007148)]
 - [32] Wang Q, Jiang J. Comparative examination on architecture and protocol of industrial wireless sensor network standards. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2016, 18(3): 2197–2219. [doi: [10.1109/COMST.2016.2548360](https://doi.org/10.1109/COMST.2016.2548360)]
 - [33] Saifullah A, Xu Y, Lu CY, Chen YX. End-to-end communication delay analysis in industrial wireless networks. *IEEE Trans. on Computers*, 2015, 64(5): 1361–1374. [doi: [10.1109/TC.2014.2322609](https://doi.org/10.1109/TC.2014.2322609)]
 - [34] Wang H, Zhu YJ, Yang H, Wang P. Deterministic scheduling algorithm with priority classification for industrial wireless networks. *Acta Automatica Sinica*, 2020, 46(2): 373–384 (in Chinese with English abstract). [doi: [10.16383/j.aas.c170722](https://doi.org/10.16383/j.aas.c170722)]
 - [35] Zhao J, Qin YJ, Yang D, Rao Y. A source aware scheduling algorithm for time-optimal convergecast. *Int'l Journal of Distributed Sensor Networks*, 2014, 10(6): 251218. [doi: [10.1155/2014/251218](https://doi.org/10.1155/2014/251218)]
 - [36] Wang H, Chen PF, Wang P. Deterministic scheduling algorithms for WIA-PA industrial wireless sensor networks. *Acta Electronica Sinica*, 2018, 46(1): 68–74 (in Chinese with English abstract). [doi: [10.3969/j.issn.0372-2112.2018.01.010](https://doi.org/10.3969/j.issn.0372-2112.2018.01.010)]
 - [37] Jin X, Kong FX, Kong LH, Wang HH, Xia CQ, Zeng P, Deng QX. A hierarchical data transmission framework for industrial wireless sensor and actuator networks. *IEEE Trans. on Industrial Informatics*, 2017, 13(4): 2019–2029. [doi: [10.1109/TII.2017.2685689](https://doi.org/10.1109/TII.2017.2685689)]
 - [38] Wang JC, Zhang TY, Hu XB, Han S. Resource virtualization with end-to-end timing guarantees for multi-hop multi-channel real-time wireless networks. In: *Proc. of the 2023 IEEE Real-time Systems Symp. (RTSS)*. Taipei: IEEE, 2023. 385–396. [doi: [10.1109/RTSS59052.2023.00040](https://doi.org/10.1109/RTSS59052.2023.00040)]
 - [39] Kadota I, Sinha A, Uysal-Biyikoglu E, Singh R, Modiano E. Scheduling policies for minimizing age of information in broadcast wireless networks. *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 2018, 26(6): 2637–2650. [doi: [10.1109/TNET.2018.2873606](https://doi.org/10.1109/TNET.2018.2873606)]
 - [40] Xie X, Gao SZ, Wang H. Scheduling approaches for joint optimization of age and delay in industrial wireless networks. *IEEE Trans. on Industrial Informatics*, 2024, 20(5): 7183–7193. [doi: [10.1109/TII.2024.3353854](https://doi.org/10.1109/TII.2024.3353854)]
 - [41] Zhao GF, Lu YS, Xu C, Xing Y, He XW, Cui ZJ. Research on flow scheduling mechanism for spacecraft wired wireless hybrid scenario.

- Journal of Electronics & Information Technology, 2023, 45(2): 464–471 (in Chinese with English abstract). [doi: 10.11999/JEIT211391]
- [42] Qiu Y, Zhang JX, Ke J, Fang MY, Xu WQ. A survey of real-time transmission scheduling algorithms for industrial wireless network. Acta Automatica Sinica, 2024, 50(11): 2102–2127 (in Chinese with English abstract). [doi: 10.16383/j.aas.c220939]
- [43] Yuan LY. Research on information fusion and fault-tolerant method of sensors in flight control system [Ph.D. Thesis]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2015 (in Chinese with English abstract).
- [44] International Telecommunication Union. Technical characteristics and operational objectives for wireless avionics intra-communications (WAIC). Technical Report, 2010. <https://www.itu.int/pub/R-REP-M.2197>
- [45] Korst J, Aarts E, Lenstra JK, Wessels J. Periodic multiprocessor scheduling. In: Proc. of the Parallel Architectures and Languages Europe (PARLE). Eindhoven: Springer, 1991. 166–178. [doi: 10.1007/BFb0035103]
- [46] Huang JG, Li RH. Approximation algorithm for scheduling independent multiprocessor jobs. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2010, 21(12): 3211–3219 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3764.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2010.03764]
- [47] Hoogeveen JA, Van de Velde SL, Veltman B. Complexity of scheduling multiprocessor tasks with prespecified processor allocations. Discrete Applied Mathematics, 1994, 55(3): 259–272. [doi: 10.1016/0166-218X(94)90012-4]
- [48] International Telecommunication Union. Technical characteristics and spectrum requirements of wireless avionics intra-communications systems to support their safe operation. Technical Report, 2013. <http://www.itu.int/pub/R-REP-M.2283>
- [49] Cheng T, Li SN, Jiao F, Pan Y. WibZig: Reliable and commodity-device compatible PHY-CTC via chip emulation in phase. In: Proc. of the 22nd Int'l Conf. on Information Processing in Sensor Networks. San Antonio: ACM: 2023. 191–204. [doi: 10.1145/3583120.3587046]

附中文参考文献:

- [2] 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]
- [6] 李士宁, 范祥辉, 刘洲洲, 陈长胜, 程涛. 无线航空电子内部通信网络协议现状与分析. 北京邮电大学学报, 2021, 44(3): 1–8. [doi: 10.13190/j.jbupt.2020-151]
- [8] 冯友林, 何锋, 李铮, 周璇, 于思凡, 熊华钢. 民机机内 5G 无线混合组网架构性能评估. 航空学报, 2023, 44(12): 327681. [doi: 10.7527/S1000-6893.2022.27681]
- [17] 李浩若, 何锋, 郑重, 李二帅, 熊华钢. 基于强化学习的时间触发通信调度方法. 北京航空航天大学学报, 2019, 45(9): 1894–1901. [doi: 10.13700/j.bh.1001-5965.2018.0789]
- [18] 何锋, 李二帅, 周璇, 李浩若, 龚子杰. 机载网络时间触发通信调度设计优化与评价方法. 航空学报, 2021, 42(7): 324258. [doi: 10.7527/S1000-6893.2020.24258]
- [23] 胡文学, 孙雷, 王健全, 朱渊, 毕紫航. 基于网络演算的时间敏感网络时延上界分析模型研究. 自动化学报, 2023, 49(11): 2297–2310. [doi: 10.16383/j.aas.c220577]
- [28] 何锋, 李二帅, 周璇, 赵露茜. 机载时间敏感组网分析综述. 航空学报, 2023, 44(17): 028165. [doi: 10.7527/S1000-6893.2023.28165]
- [29] 陈朝基, 孙寅涵, 孙志刚, 王丹, 何熊文, 程博文, 刘岩, 阎耀保. 面向载人月球探测的确定性以太网应用研究. 宇航学报, 2024, 45(1): 142–153. [doi: 10.3873/j.issn.1000-1328.2024.01.015]
- [30] 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]
- [31] 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> [doi: 10.13328/j.cnki.jos.007148]
- [34] 王恒, 朱元杰, 杨杭, 王平. 基于优先级分类的工业无线网络确定性调度算法. 自动化学报, 2020, 46(2): 373–384. [doi: 10.16383/j.aas.c170722]
- [36] 王恒, 陈鹏飞, 王平. 面向 WIA-PA 工业无线传感器网络的确定性调度算法. 电子学报, 2018, 46(1): 68–74. [doi: 10.3969/j.issn.0372-2112.2018.01.010]
- [41] 赵国锋, 卢奕杉, 徐川, 邢媛, 何熊文, 崔钊婧. 面向航天器有线无线混合场景的流调度机制研究. 电子与信息学报, 2023, 45(2): 464–471. [doi: 10.11999/JEIT211391]
- [42] 袁莹, 张敬宣, 柯杰, 方梦园, 徐伟强. 工业无线网络实时传输调度算法研究综述. 自动化学报, 2024, 50(11): 2102–2127. [doi: 10.16383/j.aas.c220939]
- [43] 袁燎原. 飞行控制系统传感器信息融合与容错方法研究 [博士学位论文]. 西安: 西北工业大学, 2015.
- [46] 黄金贵, 李荣珩. 独立多处理机任务静态调度问题的近似算法. 软件学报, 2010, 21(12): 3211–3219. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3764.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2010.03764]



文秦(1998—), 男, 博士生, 主要研究领域为无线通信与网络, 机载网络.



肖林杰(2001—), 男, 硕士生, 主要研究领域为工业物联网, 数字孪生.



李士宁(1967—), 男, 博士, 教授, CCF 高级会员, 主要研究领域为工业物联网, 机载网络, 普适计算.



李一鸣(2000—), 男, 硕士生, 主要研究领域为工业物联网, 机载网络.



许江伟(1980—), 男, 正高级工程师, 主要研究领域为飞机数字化制造, 工业网络, 数字孪生.



程涛(1995—), 男, 博士生, 主要研究领域为无线通信与网络, 移动计算.



纪源(1999—), 男, 硕士生, 主要研究领域为工业物联网, 机载网络.