

# 工业无线网络实时传输调度算法研究综述

裘莹<sup>1</sup> 张敬宣<sup>1</sup> 柯杰<sup>1</sup> 方梦园<sup>1</sup> 徐伟强<sup>1</sup>

**摘要** 无线网络是工业物联网中一种具有良好前景的网络互联技术。它的应用为工业现场设备部署提供了极大便利,使设备摆脱了线缆的束缚,从而在空间上选点更为灵活,同时能够节省线材和人力等方面的成本。然而,无线通信易受环境噪声影响,尤其是在复杂电磁干扰的工业环境中,易导致无线传输的时延增大和数据丢失。这些问题对于传输实时性要求较高的工业控制系统是非常不利的因素。为了提高无线网络在工业环境中数据传输的实时性,学者们设计了多种传输调度算法,以提高无线通信的实时性和可靠性,从而满足工业应用的需求。综述了工业无线网络传输调度算法的研究现状,对其发展历程、问题定义、评价指标、分类方法和现有标准等方面进行了全面总结,详细阐述了具有代表性的调度算法的工作原理,并指出了未来的研究方向。

**关键词** 工业无线网络, 传输调度, 实时性, 可靠性

**引用格式** 裘莹, 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 **CSTR** 32138.14.j.aas.c220939

## A Survey of Real-time Transmission Scheduling Algorithms for Industrial Wireless Network

QIU Ying<sup>1</sup> ZHANG Jing-Xuan<sup>1</sup> KE Jie<sup>1</sup> FANG Meng-Yuan<sup>1</sup> XU Wei-Qiang<sup>1</sup>

**Abstract** The wireless network provides great convenience for the deployment of industrial devices, gets rid of the shackles of cables, makes the deployment of devices more flexible, and saves the cost of materials and manpower, which is the development trend of the industrial internet of things. However, since wireless communication is susceptible to interference, especially in the industrial environment with complex electromagnetic interference, it is easy to lead to increased delay and data loss in wireless transmission, which is a disadvantage for industrial control systems that require high real-time transmission. In order to improve the real-time performance of data transmission in wireless networks in industrial environments, researchers have designed a variety of industrial wireless network transmission scheduling algorithms to improve the real-time and reliability of wireless communication to meet the industrial application requirements. This paper reviews the current researches of transmission scheduling algorithms for industrial wireless network, and comprehensively summarizes the development history, problem definitions, evaluation metrics, classification methods and existing standards, and elaborates the working principles of representative scheduling algorithms in detail, and points out the future research direction.

**Key words** Industrial wireless networks, transmission scheduling, real-time, reliability

**Citation** Qiu Ying, Zhang Jing-Xuan, Ke Jie, Fang Meng-Yuan, Xu Wei-Qiang. A survey of real-time transmission scheduling algorithms for industrial wireless network. *Acta Automatica Sinica*, 2024, 50(11): 2102-2127

随着信息化和工业化的深度融合,工业物联网应运而生。它通过综合利用互联网、移动通信、云计

算和大数据等信息技术实现对传统工业的产业升级,完成产品从采购、生产到运输、库存和销售等过程的全面自动化和智能化。工业物联网技术的研发和应用受到高度重视。工业物联网产业作为新兴融合产业的发展重点之一,旨在利用工业物联网技术实现生产过程中人、机、料等要素的全面数字化、网络化和智能化管理与控制。

工业无线网络是一种新兴的工业物联网实现形式,它利用无线通信技术实现工业现场仪表和传感器等设备的组网与数据传输。在典型的工业无线网络应用中,现场设备产生的数据通过无线通信发送

收稿日期 2022-12-04 录用日期 2023-04-14

Manuscript received December 4, 2022; accepted April 14, 2023

国家自然科学基金青年基金(62003307, 61903338), 国家自然科学基金区域创新发展联合基金(U22A2004), 浙江省科技厅重点研发项目(2022C01079)资助

Supported by National Natural Science Foundation of China (62003307, 61903338), Regional Innovation and Development Joint Fund of the National Natural Science Foundation of China (U22A2004), and Key Project of Zhejiang Provincial Department of Science and Technology (2022C01079)

本文责任编辑 杨涛

Recommended by Associate Editor YANG Tao

1. 浙江理工大学信息科学与工程学院 杭州 310000

1. School of Information Science and Engineering, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310000

到控制器, 控制器根据这些数据计算控制命令, 然后将这些控制命令转发给执行器, 从而影响现场设备的工作状态, 达到对物理系统实时控制的目的。

与传统有线网络相比, 工业无线网络施工简单, 减少了现场布线的材料成本和人力成本, 易于安装和维护, 使工业现场设备的部署更加灵活和便利。工业无线网络是一种能够为工业物联网的发展提供强大推动力的新型技术, 它的优点促使它在车辆工程、航空电子、智能楼宇和工业自动化等领域得到了初步应用。

然而在实际应用中, 工业无线网络的物理环境通常较为恶劣, 其通信质量和传输距离易受到电磁干扰、障碍物和天气变化等复杂环境因素的影响, 严重地干扰了工业过程中传感和控制数据传输的实时性和可靠性。因此, 如何使无线网络达到类似于有线网络的实时性, 是该领域极具挑战性的研究目标。现有工作主要从无线网的链路层和网络层入手, 通过改进介质访问控制 (Medium access control, MAC) 协议和路由协议以提高数据传输的实时性。相关行业标准也在不断的形成并改进, 如 Wireless-HART、ISA100.11a、6TiSCH 和 WIA-PA 等。本文收集整理了近几年主要的无线网络实时调度相关标准和算法的发展概况, 在表 1 中按发表时间排列。由表 1 可见, 集中式调度算法是该领域的主流研究方向, 而分布式调度在近几年也成为新的研究热点。

本文结构如下: 第 1 节介绍工业无线网络基础概念, 包括工业无线网络模型、问题定义、问题难点、评价指标和调度算法分类。第 2 节详细阐述现有工业无线网络通信标准。第 3 节梳理近年来出现的集中式实时调度算法, 总结实现过程中使用的方法。第 4 节将分布式实时调度算法分为自治调度和协商调度, 讨论调度算法之间的联系与差异。第 5 节对

比各个工业无线网络实时调度算法。第 6 节讨论现有方法存在的问题并展望未来可能的研究方向。第 7 节对本文进行总结。

## 1 网络模型与传输调度问题概述

### 1.1 工业无线网络模型

网络模型用于描述网络结构、传输模式和数据流等网络抽象特性。工业无线网络模型一般由图  $G = (V, E)$  表示, 其中  $V$  为网络中节点的集合,  $|V|$  表示网络中节点的个数,  $E$  表示节点间的链路。模型中的  $n$  个实时数据流定义为  $F = \{F_1, F_2, \dots, F_n\}$ , 其中第  $i$  个数据流  $F_i$  的周期和截止时间为  $T_i$  和  $D_i$ , 且  $D_i \leq T_i$ <sup>[1-3]</sup>。依据工业无线网络不同网络分层的特点, 可将模型分解为物理层模型、链路层模型和网络层模型。对于工业无线网络, 每个分层的传输调度都需要保证实时性, 从而才能保证最终整体数据传输的实时性。

#### 1.1.1 物理层模型

在工业无线网络数据传输过程中, 物理层不可避免地会受到环境因素的干扰, 从而造成丢包, 影响传输的实时性。因此, 对物理层干扰模型的研究具有积极的理论指导意义。与工业无线网络相关的干扰模型主要包括多径衰落、捕获效应和相长干扰模型。

1) 多径衰落<sup>[4]</sup>是指在通信过程中遇到水面和墙面等环境时, 信号会发生反射和折射造成相位发生偏移, 反射、折射和直射信号叠加在一起导致接收方无法解调出正确的信号。

2) 捕获效应<sup>[5]</sup>是指当接收方同时接收到来自多个发送方的信号时, 较强的信号能够被接收方正

表 1 工业无线网络标准和调度算法发展概况

Table 1 Overview of the development standards and scheduling algorithms for industrial wireless network

年份	标准	集中式	分布式
2008—2010	WirelessHART、WIA-PA	TSMP、Bit	DRAND
2011	ISA-100.11a	C-LLF	Tinka
2012—2013	IEEE 802.15.4e	TASA、RT-WiFi	DeTAS、GCSA
2014	6TiSCH、WIA-FA	SA、PSO、MinMax	—
2015	—	SSEvent、OLS	Orchestra
2016	—	LDF	Wave
2017—2018	LoRaWAN、5G	OBSSA、TDMH	—
2019	—	SM、Autobahn	DIVA、TESLA、DiGs
2020	—	w-SHARP	OST
2021	WiFi 7	RLSchedule	OSCAR、ATRIA、A <sup>3</sup>
2022—2023	—	SmartHART	EDSF

确捕获和解码的现象. 该效应意味着当网络中存在并发数据流时, 接收方处不一定会造成冲突丢包. 因此, 利用捕获效应接收方优先捕获较强信号的特点, 可以减少并发数据流中的冲突, 从而提升实时传输的效率和可靠性.

3) 相长干扰<sup>[6]</sup>是一种对网络信号传输有利的干扰, 是由两个以上节点在相同时刻发送相同信号, 使得信号互相叠加增强, 从而使接收方能较大概率地正确解码该信号, 不易受其他信号干扰. 相长干扰对在工业无线多跳网络中实现低延迟通信或低开销泛洪具有重要意义.

### 1.1.2 链路网层模型: 单信道或多信道网络

信道是通信系统中无线信号传输的通道, 本质上是信号传输过程中使用的频段. 部分节点收发器只使用一条信道频段, 网络中各种信息都在这条单一的信道上传输, 这种网络模型称为单信道网络模型. 而支持多信道的节点收发器可在不同的信道间切换使用, 因此能够在检测到冲突时选择另一空闲信道传输数据. 信道的切换可以按照预定规律进行离散变化, 例如在传输数据过程中使用伪随机数选择信道, 使冲突的概率显著降低, 从而提高了网络资源利用率, 提升了传输速度.

### 1.1.3 网络层模型: 单跳或多跳网络

工业无线网络根据网络结构中节点跳数, 将网络模型分为单跳网络和多跳网络. 若节点  $A$  通过链路与节点  $B$  连接, 表示  $A$  为  $B$  的一跳节点. 在单跳网络中, 每个传感节点均需通过一条与中央控制节点相连的无线链路来访问网络. 节点间相互通信前, 每个节点需要访问一个固定的中央控制节点<sup>[7]</sup>.

在多跳网络中, 底层节点将数据发送到父节点, 并将其逐步存储和转发到中央控制节点, 实现数据包的传输. 多跳网络根据网络节点分布与连接情况可分为树状网络和网状网络两种. 树状网络结构是由节点和链路组成的一个具有层次结构的网络. 根节点在最顶端, 而其他节点在下方. 其他节点都有一个父节点和零个或多个的子节点. 底层节点发送数据到根节点不会造成路由回路. 网状网络中存在部分节点拥有至少两个上层节点. 网状网络中节点之间可以实现互通, 从而形成路由回路.

## 1.2 问题定义

工业无线网络传输调度是将传感节点采集到的数据包封装成数据帧发送到目的节点的过程. 在这个过程中, 由数据链路层为数据包分配时隙和信道资源, 从而实现实时网络的高可靠性. 同时工业无线实时网络需要满足低延迟、低能耗和高吞吐量等

目标. 网络路由、采样周期和网络层功率控制都会对网络性能造成影响, 所以在优化网络性能时, 需要考虑多个影响因素并跨层协同设计. 例如, 通过网络层的重传机制和路由选择来提高网络的可靠性, 或通过调节网络层的功率控制与采样周期来优化网络延迟、能耗与吞吐量.

工业无线网络调度算法为节点或链路分配时隙与信道等网络资源, 使得网络满足可靠性、低延迟性和低功耗性, 并使所有节点或者链路在传输过程中不产生冲突. 工业无线网络资源分配问题主要是对网络进行功率分配、信道分配、吞吐量分配和时隙分配. 工业无线网络传输调度的对象是时隙和信道. 传输调度算法需要进行时隙分配、信道分配和时隙与信道的二维资源分配. 设计算法的根本问题是网络将有限的时隙和信道资源合理分配给节点, 以完成所有通信任务<sup>[8-12]</sup>.

## 1.3 问题难点

工业无线网络传输调度是在时隙和信道资源有限的情况下, 使数据包有序地传输到目的地. 在完成传输调度时, 需要考虑实时性和可靠性, 其中难点包括以下 4 点:

1) 传输调度算法可应对实时动态网络<sup>[13-15]</sup>. 实时动态网络数据流的截止时间和周期会随时变化, 调度算法应满足所有数据包的截止时间要求.

2) 避免节点间的冲突. 传输过程中应避免节点间发生冲突或干扰, 保证每个数据包正常传输.

3) 在处理事件流时, 减少对周期流的影响. 事件流需要紧急处理, 但在传输事件流时也要保证周期流的传输, 尽可能减少对周期流的影响.

4) 保证传输链路的可靠性<sup>[16-18]</sup>. 传输数据包的链路必须可靠, 否则会造成数据需要多次重传, 导致网络资源浪费.

本文总结了近 20 年涌现出的工业无线网络调度算法, 本文第 3 节和第 4 节详细阐述应对不同的问题使用的调度方法, 并对比分析.

## 1.4 评价指标

工业无线网络对数据传输要求严格, 网络的三大性能目标为可靠性、低延迟性和低功耗性<sup>[19-21]</sup>. 网络要保证由传感节点采集的数据成功地发送到目的节点, 并且要保证数据传输所需要的时间尽可能短. 无线网络一般采用电池供能, 但电池的能量存储有限, 所以调度算法应做到能耗的最小化. 为了更准确地评估工业无线网络调度算法的优缺点, 一般采用投递率、延迟与抖动、吞吐量和占空比等评价指标评定算法的有效性.

### 1.4.1 投递率

投递率 (Packet delivery ratio, PDR) 是衡量工业无线网络传输调度算法可靠性的重要指标之一. 调度算法的投递率较高, 说明它能在复杂干扰条件以及动态变化的网络环境中稳定地传输数据. 为了保证数据的成功传输, 可通过合理分配网络资源、增加重传时隙和自适应跳频等方法实现. 投递率表达式如下:

$$PDR = \frac{\text{接收方成功接收到的数据包个数}}{\text{发送方发出的数据包个数}} \quad (1)$$

### 1.4.2 延迟与抖动

延迟指数据包从发送端发出到接收端收到所花费的时间. 一般采用延迟作为指标来衡量网络的实时性. 工业无线网络对实时性要求较高, 若数据包没有在截止时间抵达目的地, 则可能导致系统整体错误, 因此必须保证所有数据包的延迟小于截止时间.

多个数据包延迟的不一致性称为抖动. 造成抖动的原因主要有以下两点: 1) 数据包通过不同路径传输; 2) 节点转发队列拥塞需依次传输数据包. 工业无线网络控制系统对抖动的要求非常严格, 由于控制系统往往依赖于固定周期的采样, 若抖动太大可造成系统不能同步, 严重影响控制算法的性能甚至造成系统瘫痪.

### 1.4.3 吞吐量

吞吐量是评估网络链路容量的指标. 一般是指网络中单位时间内接收并且转发的最大数据量, 即信道上单位时间能成功传递的数据量. 吞吐量的单位一般用 bit/s 表示, 有时也采用数据包每秒或数据包每时隙作为单位. 在工业无线网络中, 一般包含几百甚至上千个传感节点, 因此网络的吞吐量应大于网络需要传输数据包的最大数量.

### 1.4.4 占空比

占空比是评估网络能耗的重要指标, 是节点的无线收发机处于活跃状态 (接收或者发送) 的时间与总时间的比值. 为了避免因个别节点频繁工作使其电池耗尽造成整个网络瘫痪, 调度算法需要合理分配网络节点的能耗. 为了延长工业无线网络中的节点的运行时间, 调度算法应尽可能减少数据的收发和空闲监听以降低占空比.

## 1.5 调度算法分类

工业无线网络为了实现可靠性、实时性和低功耗等要求, 需要设计有效的调度算法. 近年来, 针对各种网络模型和工业网络实际应用场景, 已设计出

多种传输调度算法, 本文对这些调度算法按照不同调度方式归纳出以下分类.

### 1.5.1 集中式与分布式算法

根据网络管理模式, 工业无线网络调度算法可分为集中式调度算法和分布式调度算法. 集中式调度算法包含一个中央控制节点, 负责收集节点拓扑信息, 生成调度表, 并将调度表分发给各个节点执行调度. 网络在执行调度之前需要同步全网节点的时隙边界, 使得节点的调度时隙对齐, 从而保证不同时隙的数据传输不会冲突.

分布式调度算法没有中央控制节点, 所有节点地位平等. 此类算法中的节点一般只需收集邻居节点信息即可生成调度表, 甚至部分算法完全不需要任何邻居信息, 仅根据本节点信息生成调度表, 具有较高的灵活性和可扩展性.

### 1.5.2 单信道、多信道与跳信道

信道是数据传输的通道. 调度算法根据使用信道个数可分为单信道调度和多信道调度. 单信道调度只在固定频率进行数据传输, 算法设计较为简单. 但对于规模较大的网络, 单信道调度易发生传输冲突. 为了减少或避免冲突, 多信道调度可以在不同的时隙中选择不同的传输信道, 从而显著降低了冲突的可能性. 例如, IEEE 802.15.4 的物理层提供了 16 个信道用于调度.

此外, 工业无线网络通信过程通常采用跳信道的方法保障数据的有效传输, 由基于伪随机数的哈希函数选择信道, 让不同时隙的数据包使用不同的信道传输, 提高了传输过程的可靠性和安全性.

### 1.5.3 单跳与多跳

根据网络中节点是否具有存储转发功能, 工业无线网络结构可分为单跳网络和多跳网络. 在单跳网络中, 网关节点负责管理网络中的子节点. 子节点直接与网关节点通信, 不需要转发其他子节点的数据. 所有子节点间的通信都需要通过网关节点中转.

而多跳网络中的所有节点都具备存储转发其他节点数据的能力. 若网络依据子节点和网关节点的距离分层, 那么底层子节点可先将数据包传递给上层子节点, 随后依次逐层转发直至抵达网关节点.

### 1.5.4 周期流与事件流

工业无线网络在传输过程中产生数据包的集合称为数据流<sup>[22-25]</sup>. 数据流根据数据生成模式可以分为周期数据流和事件型数据流. 以固定周期发送数据包所形成的数据流称作周期数据流, 简称周期流. 由突发事件产生的数据包所形成的数据流称作事件

型数据流, 简称事件流. 工业无线网络控制系统在工作过程中需要对连续时间信号进行周期性采样, 因此调度算法通常需要处理周期流数据. 而事件流如果未及时上报或处理, 可能造成系统的崩溃, 甚至影响操作人员的生命安全, 因此事件流调度是工业无线网络中必须解决的问题.

## 2 工业无线网络标准

随着工业应用对工业无线网络需求的逐步增加, 涌现出大量的无线网络协议. 相关国际组织制定了一系列标准以统一协议的需求, 同时满足工业环境下数据通信的实时性. 工业无线网络标准为调度算法提供物理层基础.

目前, 工业无线网络一般采用的底层通信标准是 IEEE 802.15.4<sup>[26]</sup> 和 IEEE 802.11<sup>[27]</sup>. 在此基础上, 衍生了一批添加了若干增强功能的派生标准, 如 IEEE 802.11e 是 IEEE 802.11 的扩展, 增加了对工业无线通信的服务质量保证功能, 以满足实时性要求较高的工业应用需求. IEEE 802.15.4 最初是为低速率、低功耗和低成本的个人局域网而开发, 并没有考虑数据传输的延迟和可靠性问题. 为解决该问题, 衍生出了 WirelessHART<sup>[28]</sup>、ISA-100.11a<sup>[29]</sup> 和 IEEE 802.15.4e<sup>[30]</sup> 标准. 它们都建立在 IEEE 802.15.4 基础上, 并针对工业无线网络的特性, 增加了时分复用、信道跳频和多路径传输功能, 保障数据包传输过程的实时性和可靠性.

### 2.1 WirelessHART

WirelessHART 网络由主机应用程序、网关、接入点 (Access point, AP)、适配器、路由设备、现场设备和手持设备组成<sup>[19]</sup>, 网络结构如图 1 所示. 每个 WirelessHART 现场设备配备一个具有半双工通信能力的 IEEE 802.15.4 收发器, 通过无线自组织网络将数据发送至 AP.

WirelessHART 允许网络中存在多个 AP, 现场设备可以将数据转发给任意一个 AP 完成数据的投递. AP 通过有线网络连接网关, 网关上的网络管理器统一管理现场设备的数据转发路由和传输调度方式. 对于原有的有线 HART 设备, 可通过适配器将其转换为 WirelessHART 设备接入.

WirelessHART 通过时分复用方式调度数据包的收发, 并设计了冗余机制, 以提高传输的可靠性. 它的网络核心设备是网关, 用于集中式地为所有节点计算数据收发调度表, 并指定节点用于发送数据的时隙和信道. 时隙可分为专用时隙和共享时隙 (Common shared slot, CS), 专用时隙是分配给某

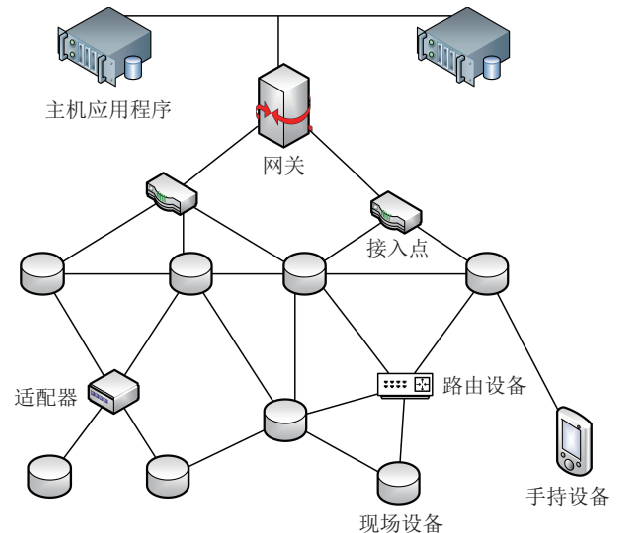


图 1 WirelessHART 网络

Fig.1 WirelessHART Network

个特定节点发送数据. 而在共享时隙中节点需要通过竞争以发送数据. 为了处理传输失败的情况, 网络管理器为每次传输分配了两个专用时隙和一个 CS 用于重传数据.

WirelessHART 采用图路由作为转发数据的基础拓扑, 并为每个设备分配至少两条路径, 以增强数据传输的可靠性. 当设备使用主路径发送数据失败时, 它将切换到备用路径重传数据, 以避免主路径在受外界干扰失效时无法转发数据, 从而提高工业无线网络实际应用场景中端到端的可靠性.

为了增加工业无线网络的鲁棒性, WirelessHART 在直接序列扩频技术中加入了信道跳频和信道黑名单机制. 信道跳频是指在数据传输过程中不断地改变信道来发送各个数据包. 跳频模式在标准中没有明确定义, 需要由网络管理器确定并分发给节点. 信道黑名单机制用于屏蔽干扰度高的信道. 网络管理器基于网络中不同信道的接收质量执行信道黑名单. 这两种机制有效地提高了网络在恶劣工业环境下的抗干扰能力.

AdaptiveHART<sup>[31]</sup> 在 WirelessHART 的基础上设计了自适应 MAC 协议, 能在动态干扰下实现自适应实时通信. AdaptiveHART 是首个在集中式无线多跳网络中提供按网络需求配置的算法. SmartHART<sup>[32]</sup> 是一种基于深度强化学习的 WirelessHART 网络路由调度方案, 可根据数据包的优先级最小化数据包的端到端延迟.

### 2.2 ISA100.11a

为了提高网络的灵活性和适应性, 国际自动化

学会于 2009 年发布了 ISA-100.11a 标准. 它与 WirelessHART 类似, 采用信道跳频和信道黑名单机制以提高通信的鲁棒性. 该标准采用基于时分多址 (Time division multiple access, TDMA) 的时隙信道跳频 (Time slotted channel hopping, TSCH)、基于载波监听多路访问 (Carrier sense multiple access, CSMA) 的慢跳频和混合跳频三种信道跳频机制. 与 WirelessHART 类似, TSCH 在连续时隙中使用同一信道, 该时隙数量是可配置的. 而慢跳频有利于同步精度不高的节点实现基本的通信功能. 慢跳频使用带有冲突避免的载波侦听多路访问 (Carrier sense multiple access with collision avoid, CSMA/CA) 机制, 以减少事件流的延迟. 混合跳频结合了 TSCH 与慢跳频的优势, 在传输周期流时, 使用 TSCH; 在传输事件流时, 使用慢跳频. 此外, ISA100.11a 标准提供了 5 种预定跳频模式, 而 WirelessHART 没有明确定义跳频模式.

### 2.3 WIA-PA 与 WIA-FA

WIA-PA 与 WIA-FA<sup>[33]</sup> 是中国自主研发的工业无线网络标准. WIA-PA 数据链路层支持自适应频率切换、自适应跳频和时隙跳频三种跳频机制, 并支持 TDMA 和 CSMA 等混合信道访问机制. WIA-PA 的超帧包括活跃阶段和休息阶段. 在活跃阶段, 同一信道可存在多个通信任务. 当该信道上出现强干扰时, 将触发自适应频率切换机制, 自动切换到另一信道. 自适应跳频用于非活动期间的簇内通信, 节点根据信道质量在超帧的每个时隙随机切换信道. 在休息阶段, 时隙跳频机制根据中央控制节点分配的跳频序列调整超帧中每个时隙的信道. 此外, WIA-PA 拥有较好的灵活性和可扩展性, 适合于各种复杂的工业环境.

WirelessHART、ISA100.11a 和 WIA-PA 是针对过程自动化而设立的标准, 而 WIA-FA 是首个专门为工厂、高速、自动和控制应用开发的无线技术标准. WIA-FA 采用基于超帧的 TDMA 数据传输机制, 以避免帧间的传输冲突, 并保证传输的可靠性和实时性, 同时支持帧聚合与分解. WIA-FA 在数据链路层提供设备连接、设备离开、时间同步和远程属性获取与设置等功能.

### 2.4 IEEE 802.15.4e 与 TSCH

IEEE 802.15.4e 在 IEEE 802.15.4 的基础上提高了数据传输的可靠性与确定性. 它定义了 TSCH、确定性同步多信道扩展 (Deterministic and synchronous multi-channel extension, DSME) 和低延

迟确定性网络 (Low latency deterministic network, LLDN)<sup>[30]</sup> 三种 MAC 模式.

1) TSCH 将时隙接入、多信道通信和信道跳频相结合. 时隙接入使用 TDMA 提供确定性延迟; 多信道通信允许多个节点在相同时隙中使用不同的信道同时传输数据, 以增加网络容量; 信道跳频和 WirelessHART 类似, 允许节点在通信过程中切换信道, 解决干扰和信道损伤问题, 实现网络的高鲁棒性.

2) DSME 和 IEEE 802.15.4 的信标使能模式相似, 将时间划分为竞争访问时段 (Contention access period, CAP) 和无冲突时段 (Contention free periods, CFP). 在 CAP 期间, 节点使用 CSMA/CA 进行信道访问; 在 CFP 期间, 采用 TDMA 调度方式. 与 IEEE 802.15.4 标准相比, DSME 减少了传输冲突, 从而提高了网络的吞吐量<sup>[34]</sup>.

3) LLDN 专门为工业自动化中极低延迟的应用而设计. LLDN 将时间划分为多个连续的超帧. 节点可以在超帧的专用时隙访问无线介质. 与 TSCH 相比, LLDN 时隙开始使用后, 节点不需要等待可立即启动传输, 从而减少了传输延迟.

### 2.5 IEEE 802.11 及其实时性扩展标准

IEEE 802.15.4 最初是为低速率、低功耗和低成本的个域网而开发的. 初始的 IEEE 802.11 MAC 层标准<sup>[27]</sup> 使用分布式协调功能 (Distributed coordination function, DCF), 采用 CSMA/CA 机制竞争信道的使用权, 并引入请求发送和清除发送机制解决隐藏终端问题. 当节点需要发送数据时, 如果介质是空闲的, 则会发送数据帧; 否则, 将延迟其传输, 直到在随机退避间隔内检测到介质是空闲为止. 使用 DCF 会产生随机且不可预测的退避延迟, 特别是在网络拥塞的情况下, 有实时性要求的数据包可能因随机退避延迟错过截止时间.

为了增强 IEEE 802.11 的实时性, IEEE 802.11 MAC 定义了点协调功能 (Point coordination function, PCF). PCF 兼容并扩展了 DCF 的功能, 进一步将时间划分为竞争周期和无竞争周期交替工作. 在竞争周期中, 采用与 DCF 相同的模式工作. 在无竞争周期中, 节点不能主动发送数据, 而必须由 AP 轮询后才能发送, 从而避免了数据冲突的发生, 保证了数据传输的实时性.

IEEE 802.11e 在 IEEE 802.11 的基础上引入了一系列的实时性增强功能以支持工业无线应用, 通过混合协调功能 (Hybrid coordination function, HCF) 来增强 DCF 和 PCF. 与传统的 IEEE 802.11

标准定义类似, 在 HCF 中有增强型分布式信道访问 (Enhanced distributed channel access, EDCA) 和混合协调功能控制信道访问 (Hybrid coordination function controlled channel access, HCCA) 两种方法. EDCA 和 HCCA 都定义了流量类别, 以支持各种服务质量 (Quality of service, QoS) 要求.

EDCA 在 MAC 层为数据流提供用于差异化访问的访问类别. 具有高优先级访问类别的节点在发送数据前需要等待的时间比低优先级节点短. 考虑到对网络控制系统的实时性要求, 控制系统的数

据流应定义为具有高优先级的访问类别<sup>[35]</sup>, 并且必须避免高优先级访问类别的饱和<sup>[36]</sup>. HCCA 扩展了 PCF, 支持数据流 QoS 的参数化, 使其更适用于实际的传输调度. PCF 和 HCCA 都支持无竞争访问, 以支持无冲突和有时间限制的传输. 与 PCF 不同, 为了支持 QoS 的差异化, HCCA 允许在任意时刻启动 CFP. 协调器根据数据流对 QoS 的需求, 在运行时根据特定的规则驱动数据交换. 虽然 HCCA 在调度性能上有一定的优势, 但在多个 AP 使用相同的 PCF 和 HCCA 访问网络时, 仍然存在发生冲突的可能性. 此外, PCF 和 HCCA 具有较高的实现复杂度, 不利于在实际工程中应用<sup>[37-40]</sup>.

在后续研究中, 基于 IEEE 802.11 标准衍生出多个实际应用协议. RT-WiFi<sup>[38]</sup> 是其中实现实时高采样率数据传输的协议之一. RT-WiFi 基于 IEEE 802.11 标准在实际硬件平台上实现, 支持 1 kHz 或更高采样周期的高速控制系统. 为满足不同控制应用对数据传输的不同通信需求, RT-WiFi 提供了一个可配置的平台, 用于调整设计中可权衡的参数, 包括采样周期和延迟方差等. 为进一步降低 RT-WiFi 的延迟抖动, 文献 [41] 设计了一种基于谐波链的无抖动调度器, 为每个通信任务选择采样周期以消除延迟抖动. 考虑到网络的动态性, 引入 *S*-tree 的数据结构, 用于表示网络中的数据链路层通信调度, 并设计了一种动态分配网络资源的高效算法, 以最小化网络开销.

相比 RT-WiFi 在实时性方面得到显著提升, 文献 [32] 提出的方法则进一步提高了 IEEE 802.11 的可靠性, 综合利用无缝信道冗余和带宽协调机制等多种机制, 提高了数据包的投递率. 其中, 无缝信道冗余是指同时在多个无线信道上发送相同的数据包, 从而在不影响实时性的前提下提高了可靠性; 带宽协调管理机制用于管理数据重传, 将未使用带宽分配给其他数据传输任务, 并在截止时间前进行额外的尝试, 提高了网络的可靠性.

由于 RT-WiFi 使用现有 WiFi 硬件改造而成,

因此并不能对硬件进行灵活的自定义. 针对该问题, w-SHARP<sup>[42]</sup> 基于在软件定义无线电平台上实现对 IEEE 802.11 的实时性扩展, 提供时间同步、有限延迟的时间感知调度和高可靠性等功能, 并引入正交频分多址 (Orthogonal frequency division multiple access, OFDMA) 和帧间隔优化技术, 有效提高了网络吞吐量和时隙利用率. 文献 [43] 综合软件定义无线电和 RT-WiFi 提出 SRT-WiFi, 包含一个集群调度器和一组任务调度器. 集群调度器通过平衡各个信道的网络利用率来为各个集群分配信道, 并在完成分配后使用任务调度器来调度执行各个集群中的任务.

## 2.6 工业 5G 与 WiFi 7

5G 技术<sup>[44]</sup> 提供了高带宽、低时延和高可靠性, 为实现工业无线网络提供了一种新的选择. 5G 新空口 (New radio, NR) 是基于正交频分复用 (Orthogonal frequency division multiplexing, OFDM) 的空口设计的基础, 也是下一代蜂窝移动通信技术的基础. 在下行链路中, NR 只支持正交同步多址方案, 使用 OFDMA 向特定用户分配时隙. 在上行链路中, NR 支持正交、同步、非正交和异步多址方案, 可以使用 OFDMA 来支持上行链路服务, 提供高吞吐量的可靠性.

WiFi 7<sup>[45]</sup> 是下一代 WiFi 标准, 对应的是 IEEE 802.11 发布的新修订标准 IEEE 802.11be. WiFi 7 具有极高的吞吐量, 每个 AP 至少支持 30 Gb/s, 约为 WiFi 6 速度的 4 倍. WiFi 7 可以工作在 2.4 GHz、5.0 GHz 和 6.0 GHz 等免许可频段, 保证与传统 WiFi 设备的兼容性. IEEE 802.11be 标准也实现了降低延迟和提高可靠性的目标, 适用于对带宽和延迟要求较高的工业无线网络应用.

文献 [46] 为 IEEE 802.11ad 提出了一种新颖的调度机制, 利用强化学习成功地找到了每个无竞争访问周期的最佳持续时间, 并根据网络负载动态学习每个无竞争服务期的最佳长度. 该策略提供了相同水平的预期吞吐量和延迟性能, 同时保留更多时隙以发送其他数据, 提高了网络传输效率.

文献 [47] 提出一种用于 WiFi 系统的竞争窗口控制策略. 该策略利用深度学习搜索不同网络条件下竞争窗口的最佳配置. 深度神经网络根据 WiFi 模拟系统生成的数据进行训练, 这些数据具有不同的关键参数, 例如节点数、短帧间隔、分布式帧间隔和数据传输速率等. 文献 [48] 研究了 WiFi 速率适配问题, 弥补了 WiFi 没有联合速率和带宽适配、缺乏可扩展性以及没有在线学习能力的缺陷. 它利用

深度强化学习设计了一种经验驱动的智能速率适配算法, 不仅可以自动识别速率各个因素和性能之间的相关性, 还可以从经验中学习, 得出接近最高吞吐量的低开速率适配方案。

为了更好地区分上述几种工业无线网络标准, 表 2 为各个标准按物理层、多路径、跳频方式和介质访问等特性的对比。表中的“√”表示具备该特性, “×”表示不具备该特性。

### 3 集中式调度算法

集中式调度的控制节点收集网络中所有节点信息, 根据调度规则生成所有节点的调度表, 并分发给各个节点执行传输调度<sup>[49]</sup>。根据集中式调度算法的特点, 可分为周期流优先级调度、事件流调度、非确定性多项式时间 (Non-deterministic polynomial, NP) 问题调度、图染色处理调度和实时数据重传调度五个部分, 集中式调度算法分类如图 2 所示。本节详细分析与总结它们的原理和工作机制。

#### 3.1 数据流调度

数据流根据数据生成模式可分为周期数据流和事件型数据流。在处理数据流调度时, 按照数据流的类型分为周期流优先级调度和事件流调度。

##### 3.1.1 周期流优先级调度

以固定周期生成的数据流为周期流。在处理简单周期流时, 一般选择优先级调度方式。实时调度算法可将网络中每个节点的采样周期<sup>[50]</sup>、截止时间<sup>[51]</sup>和空闲时间<sup>[52]</sup>作为确定优先级的标准, 并根据网络优先级在调度过程中是否发生改变, 进一步将调度算法分为固定优先级调度算法<sup>[53]</sup>和动态优先级调度算法<sup>[54-56]</sup>。

#### 1) 固定优先级调度算法

固定优先级调度算法的中央控制节点依据采样周期等参数确定优先级, 并生成调度表。调度表生成后, 所有节点的优先级不再变化。在处理不同调度问题时, 应先根据不同的需求设定数据流的优先级, 并使用固定优先级调度策略执行调度, 完成工业无线网络的数据传输。图 3 为基于截止时间的固定优先级调度。图 3(a) 为网络拓扑, 其中圆圈内的数字表示节点号,  $D = 8$  表示此节点的截止时间为 8 个时隙; 图 3(b) 中调度表为各个节点占用的时隙编号, 一个调度表包含多个时隙帧, 一个周期内所有节点的调度组成一个时隙帧。每个时隙内的数字表示该时隙由对应的节点使用。

文献 [57] 分析了采用固定优先级调度策略的 WirelessHART 网络周期流传输的延迟, 将周期流的调度问题映射为实时多处理器调度问题, 分析了响应时间, 并计算了各个周期流延迟的上界。当所有信道被分配给较高优先级的数据流时, 若有更高优先级的数据流需要传输, 则将发生传输冲突。为此, 文献 [58] 为 WirelessHART 引入可靠图路由, 通过重传和路由多样性处理传输失败的情况。并根据信道竞争和传输冲突间的关系推导出最坏情况和概率意义上的延迟边界。

文献 [57] 的方法只考虑到了传感节点到中央控制节点数据流的延迟, 但是在某些场景中要考虑广播和下行数据流的调度。顺序可靠的下行链路路由 (Sequential reliable downlink routing, SRDR)<sup>[59]</sup> 针对广播、上行和下行三种不同数据流构建各自的图路由算法, 并使用固定优先级策略调度。根据 WirelessHART 标准, 分别列举了广播图、上行图和下行图的约束条件, 并根据约束条件构建算法。定义  $\delta_v^+$  和  $\delta_v^-$  为从邻居进入节点  $v$  的边和节点

表 2 工业无线标准对比  
Table 2 Comparison of industrial wireless standards

标准	物理层	多路径	TDMA	介质访问
IEEE 802.15.4	IEEE 802.15.4 控制层	×	×	CSMA/CA
WirelessHART	IEEE 802.15.4 物理层	√	基于 TDMA 的时隙信道跳频 时隙信道跳频	IEEE 802.15.4 控制层
ISA100.11a	IEEE 802.15.4 物理层	√	基于 CSMA 的慢跳频 混合跳频 时隙跳频	IEEE 802.15.4 控制层
WIA-PA/FA	IEEE 802.15.4 物理层	√	自适应跳频 自适应频率切换	IEEE 802.15.4 物理层
IEEE 802.15.4e	IEEE 802.15.4 物理层	√	基于 TDMA 的时隙信道跳频	TSCH、DSME、LLDN
工业 5G	5G NR 物理层	√	正交频分多址	5G NR 物理层
WiFi 7	IEEE 802.11 物理层	√	正交频分多址	CSMA/CA



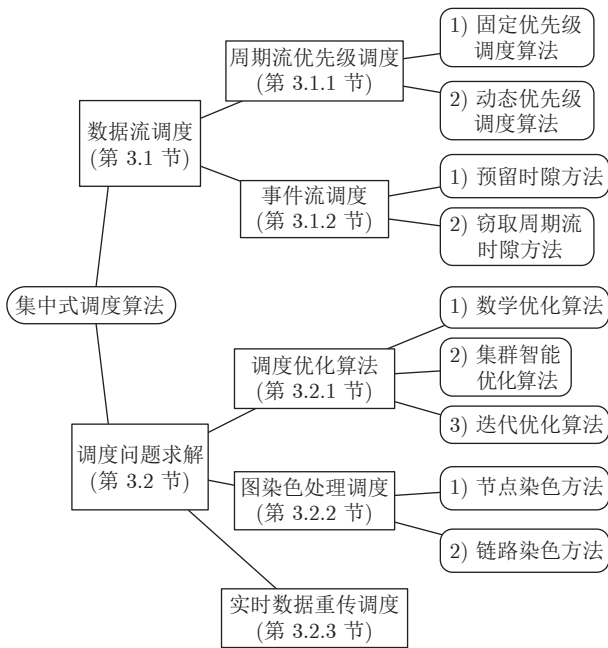


图 2 集中式调度算法的分类

Fig. 2 Classification of centralized scheduling protocols

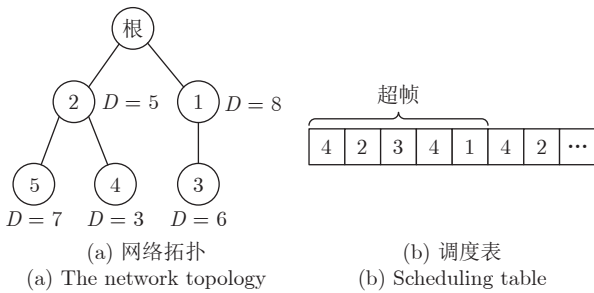


图 3 基于截止时间的固定优先级调度示例

Fig. 3 Example of fixed-priority scheduling based on deadlines

$v$  进入邻居的边的数量. 本地一个节点当且仅当满足  $\delta_v^+ \geq k$  和  $\delta_v^- \geq m$  时, 满足  $(k, m)$  的可靠性, 其中  $k, m$  为设定的重传路径个数. 节点  $i$  到中央控制节点的平均跳数定义为  $\bar{h}_i = \sum_{k \in P_i} \bar{h}_k / |P_i| + 1$ , 其中  $P_i$  为节点  $i$  的父节点. 为添加重传路径以增强可靠性, 广播图的构建尽可能满足最大节点  $k = 2$ , 且选择  $\bar{h}_i$  最小的两条边. 将初始图转置求广播图, 再反转得到上行图. 上行图根据约束条件  $C1$ 、 $C2$ 、 $C3$  得到. 其中  $C1$  为节点必须有两个父节点且与它们形成环路;  $C2$  为其中一个父节点在另外一个父节点的父节点的环路中;  $C3$  为其中一个父节点的父节点在另外一个父节点的环路中. 每个节点必须满足  $C1$  条件, 并且必须满足  $C2$  或  $C3$  中至少一个条件. 此算法采用 16 个信道, 并且根据最短采样周期优先的固定优先级调度. 算法以适度的运算开销为

代价, 在大规模网络中实现了高可靠性的路由, 降低了通信时延, 提高了通信的实时性.

SRDR 和文献 [57] 的网络模型都采用了树状网络, 并未考虑更普遍的网状网络. 时间确定多跳 (Time deterministic multi-hop, TDMH) 协议<sup>[60]</sup> 为网状网络而设计, 按照固定优先级调度, 且可以按需改变超帧的长度. 中央控制节点负责收集链路信息, 利用多条节点之间的链路提升吞吐量, 增加路由冗余度, 并平衡每条链路的能耗. TDMH 的超帧由多个控制帧组成. 控制帧包含上行链路帧和下行链路帧, 帧首部分是上/下行链路时隙, 后继时隙用于数据传输. 通过改变每个帧中传输时隙的个数, 可以改变超帧的长度和时隙利用率. 上行链路负责拓扑的收集和数流的管理, 下行链路负责时钟同步和调度表的分发. 节点间通过泛洪的方式进行时钟同步, 同步结束后, 每个节点便可知自己所处的层次. 节点通过向邻居节点发送信标帧建立拓扑, 按照节点号降序的方式依次地进行拓扑收集. 中央控制节点拥有全网的拓扑信息, 可根据最早截止时间调度 (Earliest deadline first, EDF) 规则安排调度表, 并分发给各个节点. 每个底层节点可通过中央控制节点选择两条链路, 以提高路由冗余度, 从而提高投递率.

在集中式网络中, 仅有一个中央控制节点对网络进行统一管理, 因而存在传感节点到中央控制节点路径过长而造成延迟较大的问题. Bit<sup>[61]</sup> 为了减少端到端的延迟, 增加了网络中的管理节点, 通过三种方法解决网络延迟过高的问题: 1) 增加个别节点的活动位 (节点活跃时间), 使用迭代方法计算出活动位增量最小且满足端到端截止时间增加活动位的方案; 2) 增加中央管理节点, 网络中的节点分为若干个集合, 每个集合添加一个带有额外电源的管理节点, 以满足所有节点的截止时间; 3) 第三种为前两种方法的结合, 增加一个管理节点使集合中节点个数最多, 并比较唤醒此管理节点的能耗与增加活动位的能耗, 选择能耗最小的一方唤醒, 以此类推到所有节点都满足截止时间为止.

上述固定优先级调度方法解决了网络传输过程中的冲突问题, 提高了工业无线网络的可靠性. 文献 [57] 处理的是下行链路数据流, SRDR 与 TDMH 对广播数据流和上行数据流进行了补充. TDMH 考虑了更接近现实的网状网络, 通过提高时隙利用率提高传输的投递率. Bit 通过添加中央控制节点的个数, 减少了传输延迟并降低了能耗.

2) 动态优先级调度算法

动态优先级调度是指网络在调度过程中各个节

点的优先级会发生动态变化. 例如, 截止时间和采样周期有时会随着网络拓扑变化而发生改变. 虽然动态优先级调度算法需要更高的时隙开销, 但相比于固定优先级调度具有更高的灵活性.

为了处理工业无线网络中实时动态数据流, 涌现出大量动态优先级调度算法. RT-Net<sup>[62]</sup> 在 IEEE 802.11 MAC 基础上使用 EDF 实时调度策略, 利用轮询调度与反馈机制调整最大传输尝试次数. 文献 [57] 与 TDMH 综合考虑了采样周期和传输截止时间, 构建用于无线网络数据传输的动态优先级分配和调度算法, 综合采样周期和传输截止时间作为调度算法的输入变量, 以提供能够自适应网络动态变化的可靠传输手段. 部分动态优先级调度算法采用截止时间和采样周期之外的指标来确定优先级. 最大亏损优先 (Largest deficit first, LDF)<sup>[63]</sup> 算法定义了亏损的概念, 即需要传输数据包的最小数量和实际传输数据包数量的差值, 并设定亏损越大的节点优先级越高.

文献 [64] 为 WirelessHART 网络引入了动态优先级调度, 构建了一种最优分支定界的调度方法, 有效地丢弃了搜索空间中不可行的分支. 该方法以传输的紧迫性为依据分配优先级, 设计了一种启发式冲突感知最小松弛优先算法. 若节点在某一时刻传输中发生冲突, 则丢弃该时隙. 冲突感知松弛度指该节点丢弃所有可能冲突的时隙后剩下的可用时隙, 该值越低意味着传输任务的重要性越高.

文献 [52] 将网络调度问题转变为动态优先级处理器调度问题, 在避免传输冲突以满足可调度性前提下, 通过 EDF 或单调截止时间 (Deadline monotonic, DM) 调度策略得到在多信道环境下的最大时隙利用率, 并分析了多信道网络的最坏情况延迟时间. 若定义由传输冲突造成的时隙利用率损失为  $D_i - \Delta_i$ , 其中  $D_i$  为第  $i$  个数据流的截止时间,  $\Delta_i$  为比数据流  $i$  优先级高的数据流调度所需时间, 那么数据流  $i$  的时隙利用率为  $\mu_i = C_i / (D_i - \Delta_i)$ , 其中  $C_i$  为数据流  $i$  最坏情况下调度需要的时间. 该方法通过计算网络由于冲突造成的延迟, 得到数据流  $i$  由于优先级低造成延迟的具体时间, 并验证了计算得到的延迟与实验结果一致.

在易受干扰的环境中, 最短传输路径可能随时发生变化, 为了避免由于路径变化造成的时隙空置, Master<sup>[65]</sup> 构建一种反向最长路径优先调度算法, 调度顺序为从最长流的末尾开始执行反向调度. 首先, 使用基于预期传输次数来构建有向加权图, 计算最短的端到端路由; 随后, 为每个流添加重传时隙, 以处理由于链路动态变化和干扰而导致的传输失败;

最后, 使用反向最长路径优先算法完成调度, 提高网络的可靠性并降低延时.

随着数据流数量的增加, Master 的投递率逐渐下降. 为了解决此问题, Autobahn<sup>[66]</sup> 在保持 Master 调度规则不变的情况下, 结合 TSCH、同步传输和机会路由构建三种选择冗余路径的方法进行并发传输, 分别为基于邻居、基于跳数和基于开销的路由选择方法. 三种方法中, 基于邻居的路由选择方法的 PDR 最高. 随着数据流个数的增加, Master 性能明显下降, 但 Autobahn 的投递率基本保持不变.

为了解决在延迟敏感环境中满足数据包截止时间的问題, RLSchedule<sup>[67]</sup> 采用基于近端策略优化的深度强化学习算法, 通过持续学习和优化以确定发送到中央控制节点的最佳调度策略, 使尽可能少的数据包错过截止时间. 中央控制节点收集当前网络的信息, 并将这些信息发送到服务器. RLSchedule 能够根据最新的动态网络状态, 而不是基于静态标准来做出调度决策. 通过引入奖励函数以尽量减少错过截止时间的数据包数量, 从而降低延迟和丢包率. RECCE<sup>[68]</sup> 遵循与 RLSchedule 相同的原則, 但通过在强化学习方案中添加路由以解决更普遍的问题. RLSchedule 使用最短的路由, 而 RECCE 通过探索使用多条路由, 从而能够在截止时间内传输更多的数据包.

### 3.1.2 事件流调度

在工业无线网络中, 上报突发的事件所形成的数据流称为事件流. 事件流一般是网络的紧急数据流, 网络需要通过调整调度规则及时处理事件流. 然而, 在处理事件流时, 可能会影响原有的周期流调度<sup>[69-71]</sup>. 因此, 如何合理地处理事件流也是目前工业无线网络中重要的研究方向. 下文将介绍两类不同的处理事件流的方法, 分别为预留时隙方法和窃取周期流时隙方法.

#### 1) 预留时隙方法

在处理事件流过程中, 最基本的方法就是预留时隙方法. 处理事件流之前, 为事件流调度过程预留空闲时隙. 当事件流发生时, 数据包在预留时隙调度. 这种方法较为简单, 且不会影响周期流的正常调度.

图 4 为预留时隙的调度示例. 节点按照树状结构分布, 如图 4(a) 所示. 当网络数据只有周期流时, 按照 EDF 调度, 并预留空闲时隙用于调度事件流. 图 4(b) 为周期流按照 EDF 优先级进行调度, 并在每 2 个周期流时隙间预留一个空闲时隙. 图 4(c) 表示当节点 6 产生事件流时, 事件流按照链路 6-3-1 (图中阴影部分) 在预留时隙中进行调度, 而周期流

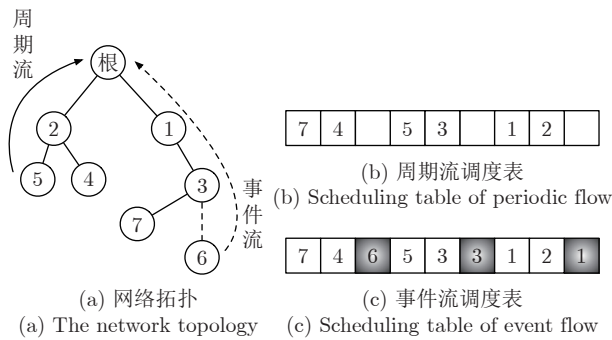


图 4 采用预留时隙的调度示意图

Fig. 4 An example of scheduling with reserved time slots

调度时隙保持不变.

为了同时处理工业无线网络的周期流和事件流, 文献 [72] 构建了事件触发数据包不抢占周期数据包且为事件流预留尽可能少的时隙复用 (Slot-multiplexed, SM) 调度算法, 并提出三种调度方法. 第一种方法认为事件流具有虚拟周期, 虚拟周期小于截止时间的一半, 事件触发包产生后在超帧虚拟周期中进行调度. 采用这种方法形成的超帧最短, 但是预留时隙的利用率较低. 第二种方法采用插时隙的方法, 将预留时隙插进超帧中, 并且固定在预留间隔的第 1、2 个时隙. 这种方法最小化了预留时隙, 但是导致超帧较长. 第三种方法允许周期流的数据包占用预留时隙, 预留时隙变少, 但超帧长度无法预测. 结合以上三种方法的优点, 可将所有事件流看做虚拟周期流, 当资源受限时, 将周期中资源利用最大且不会添加预留时隙的节点采用第二种方法调度, 如果时隙资源仍不能满足, 改为第三种方法, 从而实现高效的事件流调度.

将上述预留时隙方法进行扩展, 文献 [73] 提出在线调度 (On-line scheduling, OLS) 算法, 通过调整周期流时隙长度来解决网络中偶尔发生的外部干扰问题. OLS 算法对周期流进行调整, 引入节奏任务链路模型框架, 尽可能减少对现有流量的影响. OLS 将链路分为正常状态和节奏状态两种状态. 正常状态的链路具有固定的周期和截止时间. 链路进入节奏状态后, 周期  $P_0$  和截止时间  $D_0$  瞬间下降, 并逐步恢复至固定时间. 在外部干扰发生时, 通过调节节奏状态下的  $P_0$  和  $D_0$ , 以满足该状态下的截止时间要求, 保证数据的可靠传输.

## 2) 窃取周期流时隙方法

虽然预留时隙方法不会影响周期流的调度, 但在没有事件流的情况下会固定地消耗一部分网络资源. 为了解决这个问题, 窃取周期流时隙方法作为一种新的解决方案被提出. 窃取周期流时隙方法在

没有事件流发生的情况下正常调度周期流. 当发生突发事件时, 事件流数据包窃取周期流数据包所在的时隙. 该时隙中原有的周期流被抛弃, 转而优先处理事件流.

为了对比预留时隙和窃取时隙两种方法的效果, 文献 [74] 采用预留时隙的方法, 将事件流作为虚拟周期流在预留时隙进行调度. 事件流的优先级高于周期流, 并且按照速率单调策略调度. 该方法允许在专用时隙中调度事件流和周期流. 当事件不存在时, 事件流时隙被常规流占用. 当出现事件时, 由事件流占用时隙, 并退出常规传输. 最后, 采用基于事件窃取 (Event-based slot stealing, SSEvent) 的方法, 允许以事件触发的方式来传递紧急数据, 节点只需要在事件开始和结束时发送对应的通知数据包即可. 该方法牺牲了一部分周期流投递率, 但在降低能耗和系统故障率方面优于预留时隙方法.

为了处理无线网络的紧急任务 (即事件流突发情况), OBSSA<sup>[75]</sup> 构建了另一种窃取机制, 让事件流具有更高的优先级. 当事件流突然发生时, 中央控制节点赋予紧急任务更高的优先级, 并暂时减少对部分周期流的资源分配, 以优先满足紧急任务的资源需求, 并在事件流的截止时间前完成调度. 首先, 采用最优路径调度算法, 对所有数据流进行枚举, 找到一个在截止时间前完成调度且抢占正常周期流数目较少的方案. 然而, 该算法复杂度为  $O(n^2)$ , 导致计算时间过长, 实时性较差. 针对该问题, 引入第一步窃取调度方法, 当事件流发生时, 寻找第一个可以发送的时隙, 并且计算剩余时间, 更新窃取时隙的个数直到超过截止时间, 从而能以较短的计算时间找到可用的调度方案. 另一方面, 由于窃取方法可能导致周期流的投递率降低, 为此提出惰性窃取调度算法, 在窃取调度方法的基础上, 找到抢占正常数据流个数最小的路径, 并在保证满足截止时间要求的前提下, 选取传输路径中交叉点最少的方法作为调度方案, 从而减少了抢占数据流的个数, 并提升了调度的效率.

OBSSA 调度算法处理了树状网络模型中的事件流, 而 Hierarchic<sup>[76]</sup> 构建了一种处理网状网络事件流的调度方案. Hierarchic 将网络节点分成上下层网络模型, 网络的上层为中央控制节点, 网络下层包括多个子网, 且一个子网包括控制节点和外围子节点. 在调度时, 网络上层负责给各个子网络分配固定的信道, 网络下层负责在固定信道处理数据流的分配. 周期流按照速率单调的规则调度, 而事件流通过监听和选择周期流中的空闲时隙进行调度. 子网分配信道时遵循以下原则: 1) 重叠的子网

不能使用相同的信道; 2) 各个子网络尽可能使用更多的信道。

文献 [72] 和 OLS 采用预留时隙方法处理事件流, 这种方法设定简单, 并在事件流发生时, 不会影响周期流的调度. OBSSA、文献 [76] 与 TSMP<sup>[77]</sup> 都采用窃取周期流时隙方法处理事件流, 相较于预留时隙的方法, 提高了时隙利用率. 文献 [74] 对两种方法进行了比较, 虽然窃取时隙事件流会一定程度上影响周期流的可靠性, 但是窃取时隙在事件流投递率、延迟、能耗与故障率等方面优于预留时隙方法。

### 3.2 调度问题求解

在使用调度算法求解调度问题时, 可能出现无法求得最优解与无法解决传输冲突的情况. 处理此类问题的方法可分为调度优化算法、图染色处理调度方法和实时数据重传调度方法。

#### 3.2.1 调度优化算法

在工业无线网络中, 集中式调度需要中央控制节点管理所有传感节点, 保证不同的数据流在有限的时隙和信道资源条件下进行无冲突的调度. 调度方案还需要应对数据流截止时间和周期的动态变化, 同时还应兼顾应用对延迟、能耗和吞吐量的需求. 此时的优化问题往往是 NP 难问题. 文献 [64] 证明了为周期性有截止时间的实时动态优先级调度计算最优解是 NP 难问题. 从实用的角度考虑, 调度算法的目标并不是必须找到最优的调度方案, 近似的最优解一般也可以满足调度的需求, 同时应尽可能保证算法的复杂度较低, 使调度算法具有可行性. 现有 NP 难问题的近似最优算法可分为数学优化算法、集群智能优化算法和迭代优化算法三种。

##### 1) 数学优化算法

在解决工业无线网络实时调度问题时, 选用的数学优化算法一般为非线性规划和凸优化方法. 在求解由一系列未知实函数组成的方程组和不等式(统称为约束)定义的优化问题时, 需要将目标函数的取值最大化或最小化. 若规划问题的目标函数或约束条件中包含非线性函数, 则称为非线性规划<sup>[78]</sup>. 它是最优化处理非线性问题的一个子领域。

文献 [79] 利用非线性规划方法, 对具有 QoS 限制条件的网络构建了债务优先算法 (Debt-based prioritization algorithm, DDPA), 满足了网络对低时延、高投递率和高可靠性的需求. 首先, 求满足 QoS 可行性的必要条件, 即  $\sum_{n \in S} w_n \leq 1 - I_S$ , 其中  $w_n$  为节点  $n$  相对于整个周期占用时隙的比例,  $I_S$  为子集  $S$  空闲状态占用时隙的比例. 然后, 构建两

种调度规则, 两者定义了不同的“债务”, 但都是根据债务的降序进行调度的. 第一种债务定义为时隙  $t \times w_n$  减去节点  $n$  在时隙  $t$  传输的个数. 第二种债务定义为  $(t/\tau \times q_n - c_n(t))/p_n$ , 其中  $q_n$  为被要求的最低投递率,  $p_n$  为链路的可信度,  $c_n(t)$  为节点  $n$  在时隙  $t$  成功传输的个数,  $\tau$  为一个周期时隙帧的长度. 利用这两种调度规则构建了债务优先调度, 并根据可调度的充要条件设计了可行的调度算法。

文献 [80] 同样使用非线性规划方法, 构建了一种无线网络控制系统的动态最优调度算法. 首先, 根据霍尔特氏加性趋势预测方法对链路质量进行预测, 并保持每一步预测错误率在 2% 左右; 其次, 建立多次重传且控制环路采样周期相同的多环路控制模型, 验证了这种最优调度问题是一个 NP 难问题, 找到重传次数总和的限制条件. 最后, 利用非线性规划方法优化模型, 构建了一种动态循环排序算法 (Dynamic loop scheduling algorithm, DLSA). 该算法在链路质量变差的情况下仍具有较高的可靠性, 同时降低了网络的延迟。

凸优化又称为凸函数最优化, 是数学最优化方法的一个子领域, 研究凸集中凸函数的取值最小化或最大化问题. 凸优化较一般数学优化问题要简单, 例如在凸最优化中, 局部最优值必是全局最优值. 凸函数的凸性使凸分析工具在优化问题中得以应用。

为了解决 NP 难问题, 文献 [81] 利用凸优化算法, 针对使用多信道和周期流的 WirelessHART 网络设计了实时调度算法, 解决了动态优先级的调度问题, 并证明在多信道中实现 WirelessHART 实时传输调度问题是个 NP 难问题. 为了优化算法, 推导出调度成功的必要条件, 并采用分支限界法设计了一种最优调度算法. 由于此算法在冲突较多或网络流量较大的情况下, 会出现计算时间过长导致数据包投递率下降的问题, 因此设计了一种冲突感知的 C-LLF 算法, 使用冲突感知松弛度作为变量以计算调度. 冲突感知松弛度通过考虑调度传输时间窗口的长度和在这些窗口传输过程中的冲突数量来确定. 该方法结合了最小松弛和与传输相关的冲突程度, 时间复杂度为  $O(n)$ , 其投递率和计算时间优于分支定界算法。

文献 [82] 研究了无线网络的最优功率控制和调度问题, 旨在提高系统对网络拓扑变化的适应能力. 将数据包生成周期、传输延迟和各个传感器节点的能量收集要求作为约束条件, 验证了该调度问题是一个 NP 难问题, 并提出了相应的周期列表调度算法和周期替代列表调度算法。

## 2) 集群智能优化算法

集群智能优化算法主要是通过模拟动物行为以提高问题求解的速度. 群体中每个成员通过学习自身经验和其他成员的经验来不断调整搜索问题最优解的方向. 常用的集群智能优化算法有粒子群优化算法 (Particle swarm optimization, PSO) 和模拟退火 (Simulated annealing, SA) 算法. PSO 是通过模拟鸟群觅食行为而形成的一种基于群体协作的随机搜索算法. PSO 属于万能启发式算法, 能在没有尽可能充分的问题信息的情况下, 有效地搜索庞大的解空间, 并找到候选解, 但不保证其找到的最优解为真实的最优解. SA 是一种通用概率算法, 常应用于需要在规定时间内从庞大搜索空间中找到近似最优解的情况. 与 PSO 算法不同, SA 算法不属于群优化算法, 不需要初始化种群操作.

为了解决集中式无线网络中存在的延迟问题, 文献 [83] 采用 PSO 和 SA 算法分别对网络进行优化, 并对比了两种方法的优劣. 将节点信息设置为一个向量 (路径号、节点号), 网络总体延迟设置为每条链路延迟的总和, 并且设定总体延迟边界. 为使得网络在传输过程中节点之间不产生冲突, 需要满足三个约束条件: 1) 节点不能与一跳邻居在相同时隙调度 (两个节点有不同父节点除外); 2) 节点不能和两跳邻居占用相同信道 (两个节点有不同父节点除外); 3) 每个节点尽可能地利用多信道和多时隙来传输数据. 为了减小每条链路的延迟, 在上述约束条件的基础上利用 SA 和 PSO 算法进行迭代, 直到达到延迟下界, 得到接近最优的调度方案. 通过在不同节点数量的网络中进行模拟实验, 发现 PSO 算法在端到端时延方面优于 SA 算法.

文献 [50] 使用四种不同的速率选择 (Rate selection, RS) 优化算法, 在多跳网状网络的控制系统中确保了所有数据流都满足其截止时间. 针对网络中延迟边界的约束优化问题, 基于其不可微、非线性、非闭合等特点, 给出了 4 种优化方法: 1) 基于拉格朗日松弛的次梯度算法, 它的能耗最高, 且时间复杂度最高; 2) 贪婪式的启发算法, 它的时间复杂度虽然很低, 但能耗较高; 3) 带有 SA 的惩罚式方法, 它的能耗最小, 但时间复杂度较高; 4) 根据基于多项式时间延迟预测, 采用凸优化方法. 它的能耗比第三种略高, 但时间复杂度较低<sup>[57]</sup>.

## 3) 迭代优化算法

迭代优化算法是一种数学计算过程, 它在给定初始值后通过迭代求得近似解, 其中第  $n+1$  个近似值是从先前求得的第  $n$  个近似值中推导出来的. 对迭代方法需要严格的数学收敛分析, 如果对初始

近似值收敛, 则迭代方法是收敛的.

自适应动态规划 (Adaptive dynamic programming, ADP)<sup>[84]</sup> 是一种利用迭代优化方法寻找能耗与吞吐量最优解的算法, 它利用 MAC 层的机会路由寻找可靠的传输路径, 提高网络的可靠性. ADP 父节点在时隙开启后始终处于监听信道的状态, 收集每个子节点的吞吐量和能耗信息, 并在接收到数据包后发送确认消息. 在收集到完整的网络信息后, 网络调度问题可建模为每个节点的吞吐量最大化和能耗最小化的数学问题, 使用近似动态规划方法来解决, 并经过多次迭代优化, 得到能耗最小和吞吐量最大的调度方案.

针对无线网络的最小长度调度 (Minimum length scheduling, MLS) 问题, 文献 [85] 实现了离散速率传输模型中调度长度的最小化. 它定义了最小长度调度时隙, 并基于 MLS 时隙进行最优分析. 优化时需要考虑能量因果关系、数据周期和最大发射功率约束, 并证明了该调度问题是 NP 难问题. 为了寻找近似解, 提出多项式时间启发式算法, 每次迭代过程中需要重新确定最小长度调度时隙. 文献 [86] 为具有反馈环路的两跳网络建立模型, 优化未满足截止时间的概率, 提出一种动态启发式调度优化策略, 证明了优化过程是一个马尔科夫决策过程, 并利用数值迭代算法解决该问题.

本节最后对上述六种处理 NP 难问题的调度优化算法进行总结, 它们使用的数学方法和算法复杂度如表 3 所示.

表 3 调度优化算法比较  
Table 3 Comparison of scheduling optimization algorithms

算法	方法	算法复杂度
DDPA	非线性规划	$O(N \log N)$
C-LLF	凸优化	$O(N^2)$
RS	凸优化	$O(N \log N)$
SA, PSO	集群智能优化算法	$O(N \log N)$
DLSA	非线性规划	$O(N^3 / \log N)$
MLS	迭代	$O(N \log N)$

### 3.2.2 图染色处理调度

图染色是将一个无向图中的  $N$  个顶点分为  $K$  个颜色组, 每组形成一个独立的集合. 在处理调度问题的方法中, 现有研究工作常利用图染色方法对网络中节点或者链路进行染色, 没有冲突的节点或链路为一个颜色组, 而不同颜色表示不同的时隙和信道. 使用此方法可简单而有效地处理冲突问题, 从而降低算法的复杂度.

### 1) 节点染色方法

节点染色方法是根据节点间的干扰关系, 对网络中的所有节点染色, 并根据染色的结果计算调度方案. 互相干扰的节点不能使用相同颜色, 在分配信道或时隙时, 同颜色的节点可使用同信道或时隙. 图 5 为图染色调度示例, 展示了在网状网络中, 7 个节点通过染色完成信道或时隙分配的过程. 图 5(a) 为 7 个节点组成的网络拓扑结构. 图 5(b) 首先对中央控制节点染色, 然后按照节点号顺序依次染色. 节点间的连线表示互相干扰, 因此不能使用同颜色. 例如, 2 号、3 号节点与 1 号节点互相干扰, 所以不能使用相同颜色. 图 5(c) 展示了节点染色的结果, 同颜色的节点可以使用相同信道或时隙, 而不同颜色不能使用同信道或者时隙.

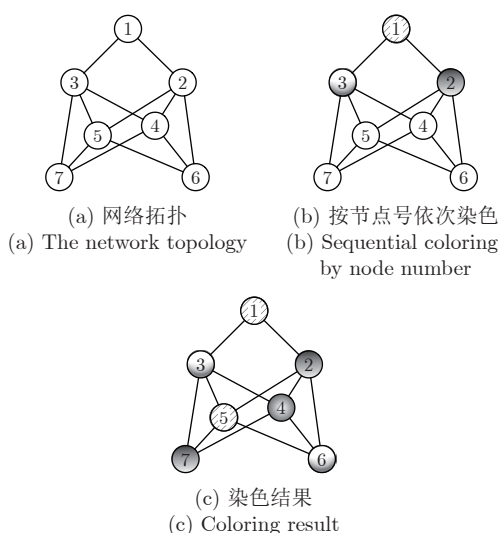


图 5 图染色调度示例

Fig. 5 Example of graph coloring for scheduling

Ergen<sup>[20]</sup> 分别构建了基于节点染色的集中式和分布式调度算法. 根据网络图和节点的干扰范围创建干扰图, 作为染色的依据. 首先采用基于节点的调度方法, 分为染色和调度两个阶段. 在染色阶段, 利用启发式图染色算法, 对干扰图的节点染色. 根据干扰图将同等级的节点看作一个集合, 并对不同等级的集合染色. 在调度阶段, 相同颜色的节点在同一个时隙调度, 而互不干扰的节点也可在同时隙调度. 同等级节点在一个时隙只能选取一个节点进行调度, 只要保证互不冲突, 不同等级节点可在同时隙内调度. 基于节点染色的调度方法适用于中央控制节点周围密度大的网络, 而基于等级染色的调度方法适用于底层节点密度大的网络. 此外, Ergen 也设计了分布式调度算法, 根据图染色算法对节点进行染色, 重复染色直至每个节点没有颜色可

选取为止. 该算法超帧长度是固定的, 且分配的颜色顺序也是固定的, 节点只能在自己颜色集合分配的时隙内调度. 相较于集中式算法, 该算法每个周期占用时隙较多, 导致延迟较高.

虽然 Ergen 适用于节点密度较大的网络, 但是随着网络规模的增加, 有限的网络资源将导致网络的利用率降低. 通过为网络添加流量感知功能, 能够提高时隙利用率, 从而得到较高的可扩展性. 文献 [87] 在节点染色方法的基础上构建了一种流量感知调度算法 (Traffic aware scheduling algorithm, TASA). 它以低功耗及有损网络路由 (Route protocol for low-power and lossy networks, RPL) 协议为基础建立图路由网络. 在该网络中, 父节点知道子节点需要传输的数据包数量, 而控制节点知道网络所有流量信息. TASA 构建了无双向冲突和无干扰冲突的调度算法. 无双向冲突要求节点不能在同一时隙同时传输和接收数据包, 也不能在同一时隙接收多个节点的数据包. 无干扰冲突是指两个节点能在同信道的同时隙内调度. TASA 使用匹配算法分配时隙, 按照节点实时流量降序依次分配时隙, 并保证同一时隙的节点满足双向无冲突. 随后, 使用图染色调度算法分配信道, 为无干扰冲突的链路分配相同颜色, 而为有干扰的链路分配不同的颜色, 完成染色后按照不同的颜色分配信道.

### 2) 链路染色方法

链路染色方法与节点染色方法类似, 由中央控制节点根据干扰关系对链路进行染色, 并根据染色结果对链路分配信道或时隙.

文献 [57] 使用链路染色方法预测固定优先级实时调度的延迟, 根据各个节点间链路的染色情况, 计算因冲突而增加的延迟. 若调度在  $k$  个时隙内完成, 可使用  $k$  个颜色染色. 优先级高的链路优先调度, 同颜色链路可在同时隙内调度. 根据染色情况设定的延迟边界, 与信道争用的延迟相加, 最终得到预测的端到端延迟.

### 3.2.3 实时数据重传调度

由于无线链路易受外部环境的干扰, 数据包在传输过程中存在丢失的现象, 需要引入重传机制以保证通信中数据传输的可靠性<sup>[88]</sup>. 图 6 为一个实时重传调度示例, 在节点 5 丢包后, 中央控制节点会在此周期的超帧中选择空闲的时隙对节点 5 的数据包进行多次重传, 直到数据包传输成功为止.

文献 [89] 分析了重传与调度实时性的最坏情况, 在给定当前任务的截止时间和数据包的延迟边界时, 证明数据包需要重传的次数是有界的. 文献 [90] 通过快速时隙竞争和分段时隙分配方法, 在共享时

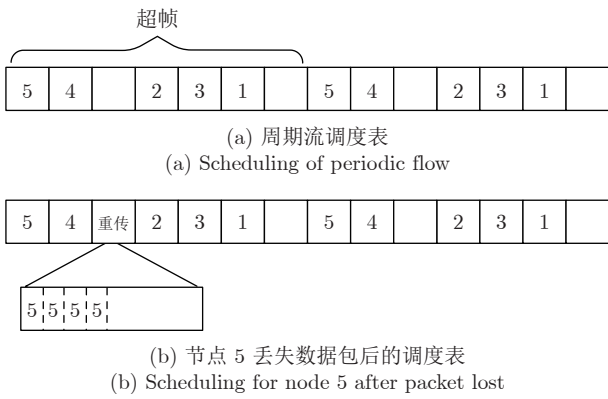


图 6 实时重传调度示例

Fig.6 Example of real-time retransmission scheduling

隙 CS 数量有限情况下提高重传效率. 由于传输结果的不可预测性, 可将 CS 用于重传. 通过在 CS 的起始阶段嵌入多次信道评估操作, 引入快速时隙竞争, 以降低重传数据包的冲突概率. 文献 [91] 进一步研究了链路突发情况和外部干扰对周期流延迟的影响, 并构建一种保证实时性的调度算法. 它通过使用经验数据估计突发传输的最大长度, 并为每个链路分配相应的最大长度时隙, 以保证传输的实时性. 该调度算法与最小突发路由算法结合使用, 能够最小化所有链路的最坏时隙长度总和. 与此类似, 文献 [92] 通过增加实际传输与第一次重传的间隔, 以获得更高的实时性保证.

文献 [90] 为保证集中式网状网络的实时性和可靠性, 构建了一种分段式时隙分配方法. 它规定周期流只在专用时隙传输, 而重传在 CS 内传输, 且调度顺序为节点加入顺序的倒序. 为了在有限时隙资源内提高重传的成功率, 设计了快速时隙争用方法, 在一个共享时隙帧内加入多个空闲信道评估 (Clear channel assessment, CCA), 并在重传时随机选择 CCA 以减少冲突. 为了提高重传效率, 将一跳邻居中没有子节点的节点定义为空闲节点, 同时将时隙帧分为多个段落, 并将空闲节点对应的各个

段落作为重传时隙使用. 另外, 为了解决节点失效和链路失效的问题, 可将重传的时隙与 CS 互换以提高重传效率. 图 7 为实时时隙交换调度示意图. 图 7(a) 为网络拓扑结构, 其中节点 1、2 和 3 为空闲节点; 图 7(b) 表示当节点 6 到节点 4 的链路出现故障时, 节点 6 与节点 7 连接, 并交换空闲节点 3 占用的时隙, 有效地提高了重传的效率, 保障了网络实时性.

文献 [40] 研究了如何提高重传的实时性, 根据数据包的重要程度为每次传输分配最少重传次数, 并确保所有时隙不发生冲突. 利用无缝冗余和带宽管理提高系统性能, 同时保持传输和重传时隙集合是可行的. 若传输过程中发生丢包, 则由中央控制节点分配空闲时隙重传.

WIA-FA 使用否定应答的重传模式, 所有节点采用固定的重传次数和重传时隙个数, 但在实际工业环境中使用时, 会造成时隙的浪费和延迟的增加. 自动按需重传 (Automatic on-demand retransmission, AODR)<sup>[93]</sup> 提出了一种按需分配重传方案, 同时考虑上行链路和下行链路的丢包, 并按需分配重传次数和每次重传所需的时隙数量. 若剩余时隙的数量充足, 则将当前重传时隙的个数设置为上一轮重传失败的节点个数.

### 4 分布式调度算法

集中式调度由中央控制节点管理整个网络. 但网络信息收集和调度结果的分发等过程会产生较大时间成本和控制开销. 分布式调度网络不需要中央控制节点收集网络所有节点信息, 每个节点只需要获取邻居节点的信息或节点本地信息, 就可以根据算法生成调度表. 根据是否需要与邻居节点协商, 分布式调度算法可分为分布式无协商调度算法和分布式协商调度算法两大类. 本节的结构如图 8 所示.

#### 4.1 分布式无协商 (自治) 调度算法

分布式无协商调度又称为自治调度<sup>[94]</sup>. 在自治

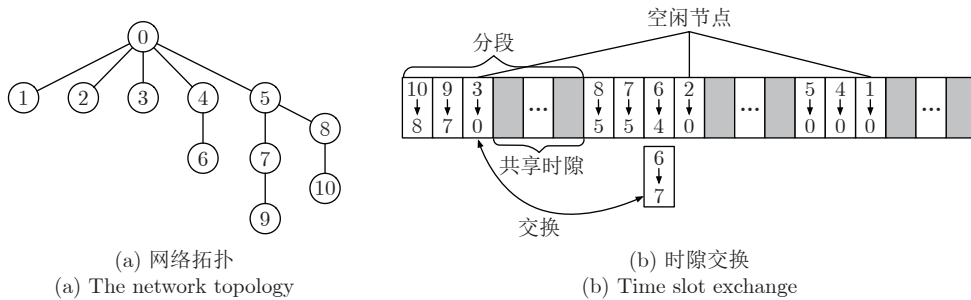


图 7 实时时隙交换调度示意

Fig.7 Illustration of real-time slot exchange scheduling

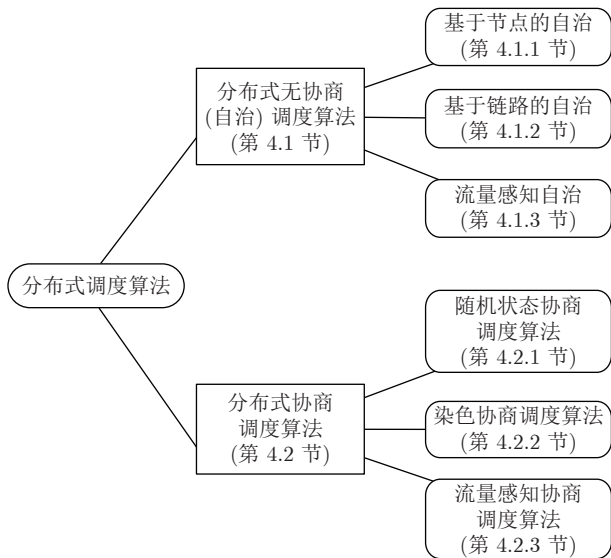


Fig.8 Classification of distributed scheduling algorithms

调度算法中, 节点间不需要协商时隙的调度信息, 其调度模式完全由节点自主设定, 从而消除了协商过程中产生的通信开销, 同时不需要额外处理协商数据包丢失的情况, 降低了算法实现的难度. 在自治调度的过程中, 调度表根据节点或者链路分配时隙, 因此可分为基于节点自治和基于链路自治两类. 若自治调度算法能够根据流量负载变化而改变时隙帧长度, 则可称为流量感知自治调度算法.

### 4.1.1 基于节点的自治

在自治调度过程中, 调度表根据节点分配时隙称为节点自治调度. 节点自治调度是自治调度方法的一种, 调度表按照调度算法为每个节点分配固定时隙.

Orchestra<sup>[21]</sup> 是首个被提出的自治调度算法, 调度表按照节点分配时隙. 它在 TSCH 机制的基础上, 根据 RPL 路由协议由节点利用本地信息自主生成调度表, 实现了分布式无协商传输调度. 图 9(a) 和图 9(b) 展示了 Orchestra 基于发送者的调度表, 负责发送的节点按照节点号在调度表的设定顺序依次发送信息, 接收节点在发送节点所在的右侧时隙进行接收.

Orchestra 将调度时隙分为 CS、基于接收者的时隙 (Receiver-based slot, RBS) 和基于发送者的时隙 (Sender-based slot, SBS) 三种类型. RBS 和 SBS 根据发送节点的部分本地特性 (如 MAC 地址、节点号等) 为传输过程中的两个邻居分配时隙和信道. CS 用于 RPL 路由协议控制报文的传输, 节点通过竞争方式获得信道的使用权. RBS 用于接收其他邻居节点发送的数据, 与 SBS 不同的是 RBS 依据接收方自身的特性来设置.

根据网络中数据流的不同作用, Orchestra 将时隙帧分为增强信标时隙帧 (Enhanced beacon, EB)、广播时隙帧和单播时隙帧三种类型. 其中 EB

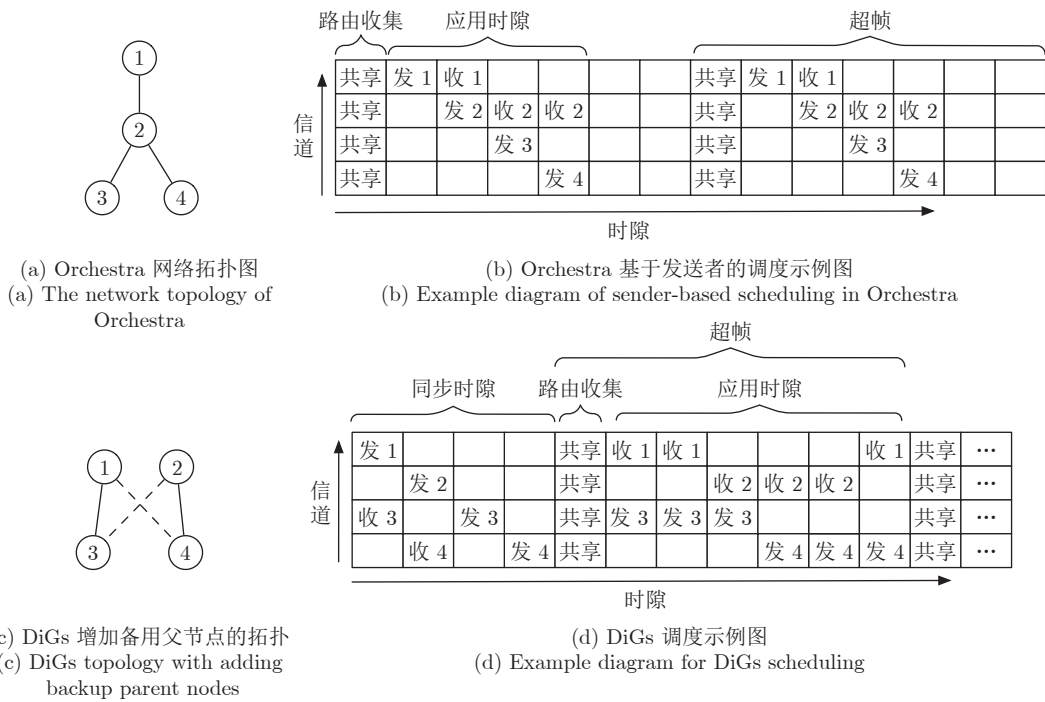


图 9 Orchestra 和 DiGs 的调度示例

Fig.9 Example of scheduling for Orchestra and DiGs



时隙帧用于设备的入网和同步, 广播时隙帧用于传输 RPL 路由信息, 而单播时隙帧用于传输实际用的数据流. 三种时隙帧有各自不同的传输调度优先级, 用于时间同步的时隙具有最高优先级, 而用于应用时隙的优先级最低.

由于 Orchestra 使用 RPL 协议生成的路由作为转发路径, 每个节点仅具有一个父节点作为转发对象, 从而存在单点故障问题<sup>[95]</sup>. 若父节点因故障失效或通往父节点的路径受到干扰, 那么该父节点下属的所有子节点都将无法发送数据至汇聚节点. 这种现象将持续到下属子节点通过 RPL 路由动态切换到另一节点为止, 造成原父节点下属子节点在此段时间内的数据丢失. 为了避免父节点的单点故障问题, DiGs<sup>[96]</sup> 在 RPL 路由的基础上, 为每个节点添加一个备用父节点, 用于在主父节点失效时, 切换到备用父节点以转发数据.

DiGs 与 Orchestra 类似, 是在本地分配节点号和收发时隙的自治调度算法. 与 Orchestra 不同的是, DiGs 为每次传输分配了多个时隙, 用于在发生冲突时重传数据包. 当冲突发生时, DiGs 启用备用父节点作为重传数据包的转发者. 图 9(c) 和图 9(d) 展示了添加备用父节点的调度示例, 节点 3 和 4 的主父节点为节点 1 和节点 2, 备用父节点为节点 2 和节点 1.

### 4.1.2 基于链路的自治

基于链路的自治调度表以链路为调度对象进行时隙分配. 这种方法可以在高节点密度的情况下有效提升投递率.

ALICE<sup>[97]</sup> 是链路自治调度方法, 解决工业无线网络在高流量和高节点密度的环境下严重丢包的问题. Orchestra 根据节点分配时隙, RBS 情况下会导致发生子节点重叠, 节点数量变大时, 投递率降低; 在 SBS 情况下, 会导致延迟和队列溢出. 为解决该问题, ALICE 根据链路分配时隙, 通过将链路的发

送节点和接收节点的信息加入哈希函数来分配时隙和信道, 使每个周期中同链路所在的时隙和信道各不相同. 同时, ALICE 允许多条链路在同时隙调度, 增加了资源利用率. 最后, 在哈希函数中加入了绝对时隙帧数, 防止在特定时隙内多条链路永久重叠导致冲突. 图 10 展示了 ALICE 调度表的一个示例, 由 7 个节点选取 1 到 3 信道和 12 个时隙, 依据链路自治的方式分配不冲突的时隙传输数据.

### 4.1.3 流量感知自治

工业无线网络的网络拓扑和节点产生的流量负载随时会发生变化. 因此, 学者们提出了流量感知自治方法来适应网络的变化, 合理利用网络资源, 提高网络的可扩展性和利用率.

流量感知自治能够根据流量的增加/减少调整超帧时隙长度. 例如, 由于 Orchestra 时隙帧长度固定, 网络不能灵活地处理网络拓扑的变化. 为了解决此问题, TESLA<sup>[98]</sup> 根据网络流量负载调整时隙帧长度, 使调度表能够自适应流量的变化. TESLA 设计了 EB 时隙帧、RPL 共享时隙帧、接收时隙帧和多个与其邻居数量一样的独立发送时隙帧, 并根据节点的总传入负载和冲突程度来增加或减少预留时隙帧的长度, 使网络具备了流量感知功能.

OST<sup>[99]</sup> 是另一种基于 TSCH 的分布式流量感知自治调度算法, 它进一步改进了 TESLA 因突发事件造成丢包的问题. OST 按需处理周期流, 通过二叉资源树分配时隙调度表, 并可处理因排队引起的突发丢包事件.

通过测量一条链路在时间  $T$  内发送者向接收者发送数据包的个数和时隙总数, 得到该链路的周期  $n$ , 对  $n$  求对数并取整得到  $N$ . 在二叉资源树中,  $N$  为第一个坐标, 第二个坐标为时隙偏移量  $t$ ,  $t$  根据节点邻居的二叉资源树的坐标确定. 相邻节点的二叉树资源都不能被占用, 从而避免了冲突, 而信道选择由一个哈希函数计算, 防止时隙冲突. 此外,

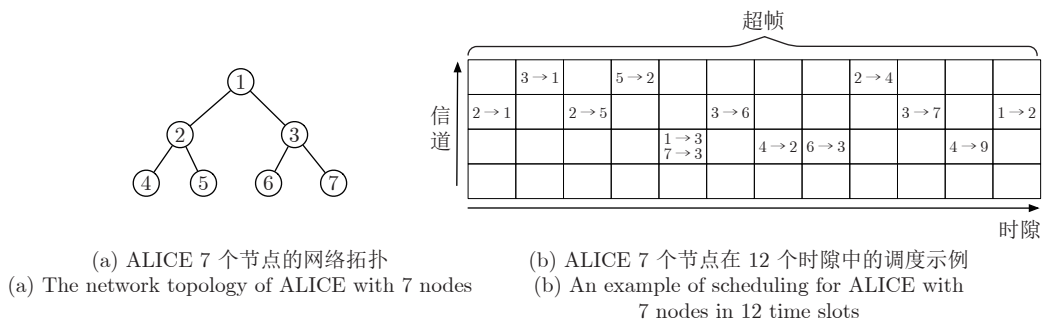


图 10 ALICE 的调度示例

Fig.10 Example of scheduling for ALICE

还需预留部分时隙用于避免数据等待队列丢包。图 11 展示了一个 OST 调度的示例, 例如, 图中节点 4 使用二叉资源树中 (3, 6) 节点进行信道和时隙分配。

ATRIA<sup>[100]</sup> 根据流量负载为每条定向链路分配时隙, 与 OST 不同的是 ATRIA 还考虑了上行链路的流量自适应, 它通过拓扑标识模块、时隙帧选择模块和时隙分配模块实现流量感知功能。在拓扑标识模块中, 每个节点不断更新其路由列表, 并由每个时隙帧中的节点生成拓扑标识符, 以解决网络拓扑更改导致的路由列表更新问题。时隙帧选择模块根据拓扑标识符学习网络拓扑并选择合适的时隙用于传输数据。时隙分配模块利用双时隙框架为每个定向链路分配时隙, 以减少链路间的冲突。双时隙框架中的每个时隙包含两个子时隙, 第 1 个子时隙分配给上行链路, 第 2 个子时隙分配给下行链路, 从而在不引入额外开销的情况下, 同时实现双向链路的流量自适应。

OSCAR<sup>[101]</sup> 在 Orchestra 的基础上优化了汇聚广播的时隙分配。OSCAR 认为越靠近根节点的流量负载越高, 因此不同距离的节点分配的时隙数量应当不同, 且时隙数量随流量负载的改变而改变。如果流量负载减少, 则分配的时隙减少; 如果流量负载增加, 则重新按需分配。

A<sup>3</sup><sup>[102]</sup> 为发送方和接收方根据流量负载独立分配调度时隙。发送方通过计算其队列中剩余的数据

包数量来预测流量负载。若剩余的数据包数量超过阈值, 则增加调度时隙的分配。接收方通过采样信道状态估计传入流量, 无需依赖任何发送方的附加信息。这种按流量负载分配时隙的方案可适用于任何自治调度算法。

近年来, 流量感知成为了工业无线网络比较热门的研究方向, 它使得调度算法能够更好地适应网络流量的变化。然而, 该领域也仍然存在部分未解决的问题。例如, TESLA 需要交换流量负载和调度信息, 导致引入额外的通信开销。OST 中二叉树分配的时隙数量是固定的, 从而可能造成时隙浪费。A<sup>3</sup> 仅支持上行单一数据流, 未考虑下行数据流的问题。OSCAR 中靠近根节点的节点分配到较多的传输机会, 但如果这些节点没有子节点时, 它们无需承担中继流量的任务, 从而导致网络资源的浪费。

### 4.2 分布式协商调度算法

分布式协商调度算法在生成调度表时需要与邻居节点协商, 以确定时隙的分配。根据协商方式的不同, 分布式协商调度算法可分为随机状态协商调度算法、染色协商调度算法和流量感知协商调度算法三类。

#### 4.2.1 随机状态协商调度算法

随机状态协商调度算法是一种为节点赋予多种状态的方法, 节点可以通过随机选择或与邻居协商实现状态的转换。由于节点在不同状态下执行不同

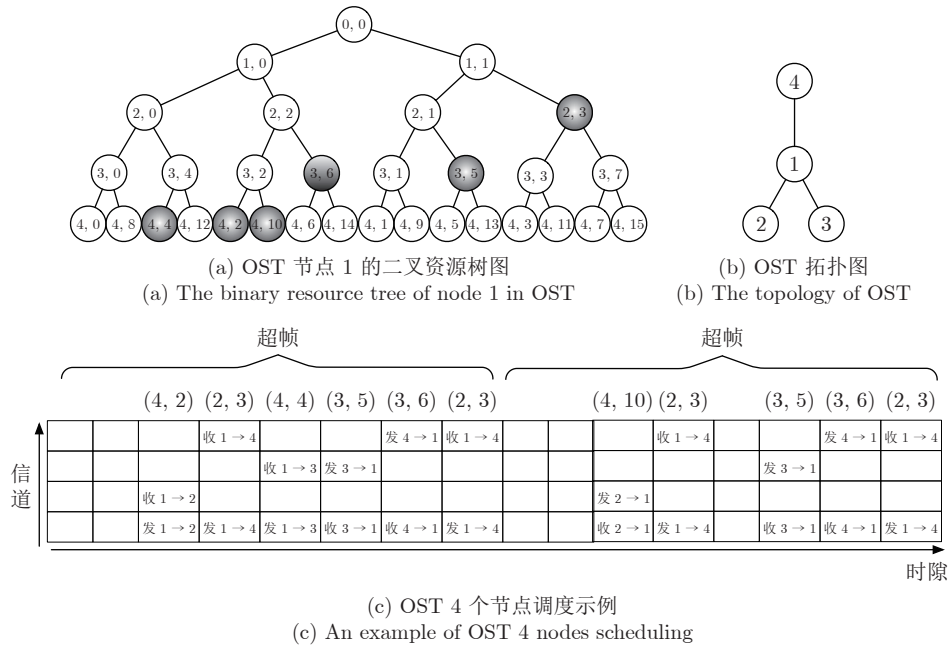


图 11 OST 的调度示例  
Fig.11 Example of scheduling for OST

的任务, 因此节点在完成一次完整的状态转换后可以实现对数据包的传递。

DRAND<sup>[103]</sup> 是一种需要与邻居协商的随机状态调度算法, 包含空闲状态、释放状态、请求状态和同意状态. 节点的初始状态为空闲状态, 随后节点以一定的概率进入请求状态 (成功概率为  $1/k$ ,  $k$  为二跳邻居未分配时隙的个数). 如图 12 所示, 请求状态的节点 A 向一跳邻居广播请求信息. 当邻居 C 为空闲和释放状态时, C 进入同意状态, 并向 A 发送同意信息. A 收到所有一跳邻居的同意信息后, 选取绝对时隙帧号最小且未被两跳邻居占用的时隙作为自己的时隙传输数据, 并进入释放状态. 然后, A 向邻居 C 发送释放信息, 邻居 C 进入空闲状态.

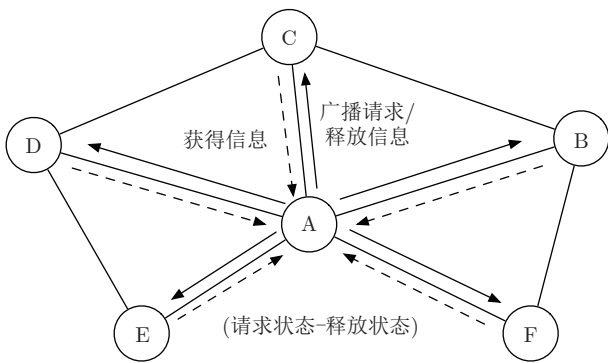


图 12 DRAND 中成功的一轮

Fig. 12 A successful round in DRAND

DRAND 仅实现了单向链路调度, 为了提高全链路的可靠性, Tinka<sup>[104]</sup> 设计了预留时隙的双向链路调度. Tinka 的每个时隙为 Aloha、传输连接请求、接收连接请求、发送数据和接收数据五种状态之一. 时隙的初始状态为 Aloha, 并有十分之一的概率发送广播进入接收连接请求状态. 随后, 找出其邻居中进入相同状态的时隙, 随机选取其中一个时隙进入传输连接请求状态. 然后, 接收者收到数据, 而发送者进入接收数据状态. 时隙 0 作为预留时隙, 所有节点监听时隙 0, 从而获得两跳邻居的广播包, 为各个节点提供建立链路的机会. Tinka 在偶数时隙进入接收数据状态, 奇数时隙进入发送数据状态, 实现了链路成对调度, 提高了双向链路调度的可靠性.

Tinka 算法由于受 IEEE 802.15.4 网络的最大传输单元的限制, 不能支持长度大于 43 的时隙帧, 因此文献 [105] 设计了一种可以支持所有时隙帧大小的算法 DIVA. DIVA 是专门为 IEEE 802.15.4e 中 TSCH 网络设计的一种分叉式广播调度算法. 与 DRAND 类似, 在节点与邻居间协商的过程中引入随机状态选择, 可选的状态包括空闲状态、广播

状态和监听状态. 当节点 A 处于空闲状态时, 以一定的概率广播连接请求, 否则进入监听状态. 节点 B 处于监听状态时, 若收到 A 的连接请求, 则以一定的概率发送请求确认包. 当节点 A 收到请求确认包后, 两个节点建立连接, 节点 A 和 B 分别进入发送数据和接收数据状态. 如果节点连续五个时隙未工作, 则回到空闲状态.

DistributedHART<sup>[106]</sup> 是另一种基于 DRAND 的分布式协商调度算法, 可实现任意数据流的实时调度. 它利用图染色方法分配接收者的信道以避免冲突. 每个节点需要获取自己与邻居占用的信道信息, 并在路由生成后基于 DRAND 实时调度分配. DistributedHART 定义了纪元是长度为  $\gamma \times \omega$  的时间段, 其中  $\gamma$  表示时间窗中的节点数,  $\omega$  表示节点可用的时隙数. 在一个纪元中, 节点的时间窗固定. DistributedHART 运用 EDF 处理冲突并确定数据流的优先级, 接收者选取优先级高的包接收. 如果发送方在前两个专用时隙中发送失败, 则顺延一个时间窗在下一个可用的 CS 中接收.

#### 4.2.2 染色协商调度算法

染色是一种解决冲突的经典方法, 它不仅适用于集中式算法, 在分布式算法中也可以利用染色方法分配信道和时隙. 与集中式染色算法不同的是, 分布式算法中节点或链路不是由中央控制节点统一染色的, 而是在本地完成节点或链路的染色, 消除了对中央控制器的依赖, 提高了网络的可靠性.

为了解决以簇为基础的无线网络调度问题, 文献 [107] 提出 GCSA 算法, 分为染色和调度两部分. 由于 GCSA 算法针对的网络为多跳单信道网络, 因此先根据节点邻居的个数和可染颜色数量对节点染色. GCSA 最大染色色彩个数为  $\delta + 1$ , 其中  $\delta$  为最大邻居个数. 在调度方面, 算法根据簇中节点的个数和等级确定每个簇的优先级, 簇之间独立调度, 保证了数据包较多的簇优先调度. 在同一簇中, 子节点优先于父节点调度, 同颜色节点可使用同一时隙, 并且无冲突的节点也可在相同时隙调度. GCSA 可以解决规模较小的网络中的冲突问题, 但是随着网络规模的不断增大, 由于信道数量不足使得节点染色难以满足大规模网络的调度需求.

针对大型无线网络信道数量不足的问题, 文献 [108] 提出使用链路染色算法, 构建了一种公平的信道分配算法, 最小化传输链路造成的干扰. 该算法根据节点间链路的干扰情况得到干扰图  $G_R$ , 将所有接收节点分配到 1 号信道, 并将自己的节点号和所在信道广播给其他节点. 随后, 节点反复切换信道使自己与邻居在不同信道传输数据, 两个邻居间节点

号小的节点优先切换信道, 并且每切换一次信道, 广播一次自己的信息. 最后, 根据基于链路的干扰图  $G_L$  分配信道, 只需将接收节点改为发送节点即可, 相同父节点的节点使用同一信道. 当网络规模增大时, IEEE 802.15.4 的 16 个信道已不能满足网络的需求. 文献 [108] 提出固定信道个数  $M$  情况下的分配方法 MinMax, 能够将传输链路上最大的干扰造成的影响最小化. 为了重复利用信道, MinMax 定义  $C(u, f)$  为与节点  $u$  共用信道的邻居个数, 将所有发送节点随机分配在  $M$  个信道上. 每个节点广播自己的节点号和信道给邻居, 并计算自己的  $C(u, f)$  发送给邻居. 如果同一信道内存在两个邻居  $u$  和  $v$ , 且  $C(v, f) > C(u, f)$ , 则节点  $u$  不再使用此信道. 节点通过不断切换信道使得  $C(u, f) = 0$ , 随后节点  $u$  固定使用此信道.

### 4.2.3 流量感知协商调度算法

与节点自治调度算法类似, 分布式协商算法在面对不断变化的网络时, 需要提供类似的流量感知功能. 流量感知协商调度算法可处理网络拓扑和周期的变化, 从而提高时隙利用率.

DeTAS<sup>[109]</sup> 使用分布式协商方法, 提供了一种具有队列管理的流量感知算法, 解决了 TASA 的队列拥塞问题. DeTAS 中的父节点需要收集来自子节点的数据包, 并依次转发到中央控制节点. 每个中央控制节点及其子节点占用三个信道, 组成一个信道组. 中央控制节点根据 RPL 获取各个节点的层级  $r$ , 从而用于发送数据包的信道为所在信道组的第  $[(r-2) \bmod 3]$  个信道, 接收数据包的信道为  $[(r-1) \bmod 3]$ . DeTAS 引入了奇调度和偶调度的概念, 其中奇调度为所有偶数层节点在奇数时隙发包, 奇数层的节点在偶数时隙发包; 偶调度则反之. 为避免冲突, 同层节点尽量保持奇调度和偶调度的数据包个数相等. 相较于 TASA, DeTAS 是一种高效的队列管理算法, 其设计能够有效应对网络中所有节点流量负载的动态变化, 使排队延迟显著减少. 在同样的节点数量的网络环境中, DeTAS 的队列大小显著小于 TASA.

Wave<sup>[110]</sup> 与 DeTAS 一样具有流量感知功能, 同时考虑了干扰链路的实际情况, 减少了链路干扰冲突. 在 Wave 中, 每一轮数据传输称为波动. Wave 算法中波动的次数为  $W = \max_{u \neq sink} Trans(u)$ , 其中  $u$  为节点编号,  $Trans(u)$  为超帧中能够传输数据包的时隙个数. 如图 13 所示, 节点最大发包次数为 4, 所以网络需要执行四次波动. 第一次波动中, 当节点收到中央控制节点的启动信息和冲突节点的分配信息后, 即可按  $Trans(u)$  的降序分配时隙和

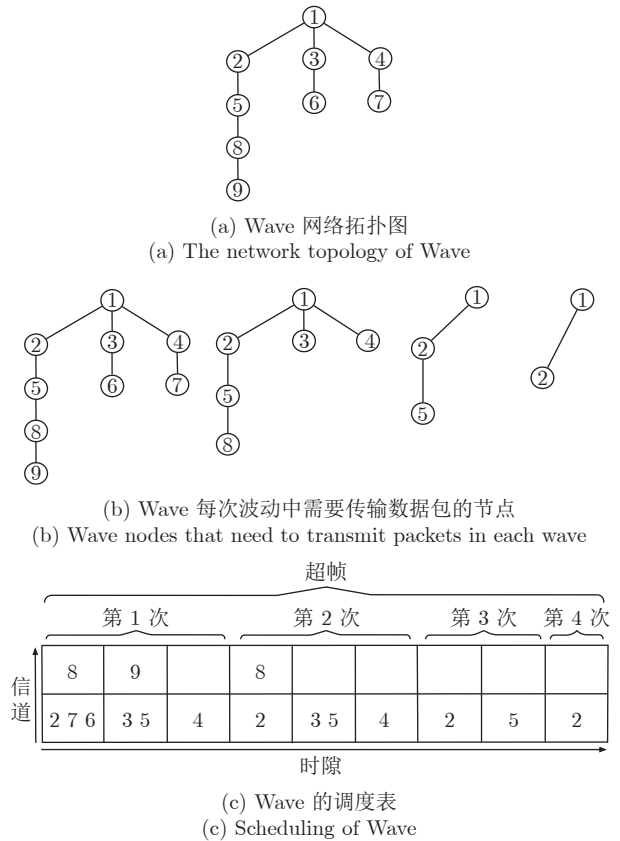


图 13 Wave 一个周期进行四次波动调度的示例

Fig. 13 An example of Wave scheduling with four waves per cycle

信道. 分配过程中, 先选择第一个时隙的第一个信道. 如果该信道被冲突节点占用, 则保持时隙不变, 切换第二个信道; 如果还有冲突, 则选择下一个时隙, 依次选择, 直到不存在冲突为止. 第二次波动不需要考虑  $Trans(u) = 1$  的节点, 如图 13(b) 所示, 删除 6、7 和 9 号节点, 然后依次进行下一轮波动. 如此循环, 直到第  $W$  次波动结束. 该算法能够重复利用时隙资源, 减少了超帧中的时隙个数, 提高了时隙的利用率.

文献 [111] 提出一种适用于 6TiSCH 无线网络, 具有流量感知的高效分布式调度功能 (Efficient distributed scheduling function, EDSF) 算法. EDSF 考虑时隙的使用概率和发送与接收时隙间的距离, 可实现更低的端到端延迟. 它从父节点中选择最合适的发送时隙, 使所有接收时隙的距离之和最短, 从而确保时间延迟最小. EDSF 找到使用率最低的发送时隙并删除, 同时向父节点发送删除请求. 父节点接收到子节点的删除请求后, 首先删除其对应的接收时隙, 然后确认响应. 子节点接收到响应之后, 删除发送时隙, 从而实现按需调整时隙长度的流量感知功能.

## 5 工业无线网络调度方式比较

本节依据不同工业无线网络实时调度算法所采用的网络模型、管理模式、数据流形式、信道使用方式以及网络评价指标等多方面的特点,在表4中对经典调度算法进行比较.表中“√”表示算法对相应的指标进行了评估实验.

## 6 未来研究方向

尽管现有对工业无线网络实时调度算法的研究

已大幅提高了实时数据传输的性能,但在部分特定应用场景下,还存在以下4个值得进行进一步研究的方向:

1) 现有调度算法对网络的规模存在一定的限制,大部分算法仅支持几十个或上百个设备的中小规模的网络.然而,在工业实际应用场景中存在着数千甚至上万的网络接入设备.现有的调度算法对于此类大规模无线网络的扩展性欠佳,易产生严重的数据传输冲突,或依赖于过大的调度超帧结构,从而导致网络的调度效率低.因此,仍需进一步研

表4 经典算法调度方式比较  
Table 4 Comparison of classical algorithm scheduling modes

调度算法	网络模型	管理模式	支持多跳	数据流	信道	投递率	延迟	能耗
DiGs	网状	分布式	是	周期流	多信道	√	√	√
DistributedHART	网状	分布式	是	周期流和事件流	多信道	√	√	√
ALICE	树形	分布式	是	周期流	多信道	√	√	√
OST	树形	分布式	是	周期流	多信道	√	√	√
DIVA	网状	分布式	是	周期流	多信道	√		
Wave	树状	分布式	是	周期流	多信道		√	
OLS	树状	集中式	是	事件流	多信道	√		
DDPA	网状	集中式	是	事件流	多信道	√		
LDF	树状	集中式	否	周期流	多信道	√	√	
SA、PSO	树状	集中式	是	事件流	单信道		√	
GCSA	树状	分布式	是	周期流	单信道		√	
TASA	树状	集中式	是	周期流	多信道		√	√
OBSSA	网状	集中式	是	周期流和事件流	多信道	√		
SM	树状	集中式	是	周期流和事件流	多信道	√		
DRAND	网状	分布式	是	周期流	多信道	√		√
Tinka	网状	分布式	是	周期流	多信道			√
DeTAS	网状	分布式	是	周期流	多信道			√
Orchestra	网状	分布式	是	周期流	多信道	√	√	√
TSMP	网状	集中式	是	周期流和事件流	多信道	√	√	√
C-LLF	树状	集中式	是	周期流	多信道	√		
TDMH	网状	集中式	是	周期流	多信道	√		
Ergen	网状	集中式	是	周期流	多信道		√	
MinMax	树状	集中式	是	周期流	多信道	√		
RS	网状	集中式	是	周期流	多信道			
TESLA	树状	分布式	是	周期流	多信道	√	√	√
JiTS	树状	分布式	是	周期流	单信道	√		
SSEvent	网状	集中式	是	周期流和事件流	多信道	√		
Bit	网状	集中式	是	周期流	多信道	√	√	√
SRDR	网状	集中式	是	周期流	多信道	√	√	√
Hierarchical	树状	集中式	是	周期流和事件流	多信道	√	√	
CCA	网状	集中式	是	周期流和事件流	单信道	√	√	√
RLSchedule	树状	集中式	是	周期流	多信道	√	√	√
OSCAR	网状	分布式	是	周期流	多信道	√	√	√
EDSF	树状	分布式	是	周期流	多信道	√	√	√

究支持规模化接入的工业无线网络协议以及相应的规模化调度算法, 以满足海量工业无线设备的接入。

2) 传统的多跳无线网络采用存储转发的方式对数据进行逐跳传递, 转发节点必须完整地收取数据包之后才能将它转发至下一跳。这种策略增加了数据包的传输延迟, 同时引入了不确定的转发时延和抖动。同步传输方式<sup>[112-114]</sup>可以缓解存储转发策略造成的延迟, 转发节点不必完整地存储整个数据包, 而是以字节流或比特流的形式转发数据, 从而大幅减少多跳传输延迟。同步传输方式对工业无线网络具有重要的意义, 能够极大地改善无线通信的实时性和确定性。因此, 该方法在工业无线网络场景中的应用方式值得作进一步的研究。

3) 部分现有工业无线网络传输调度的研究采用了 IEEE 802.15.4 标准作为物理层和链路层的通信标准。然而, 该标准主要针对低功耗无线通信设计, 存在带宽较小、传输速率较低问题, 无法满足高速实时应用的需求。故而, 研究采用其他底层通信标准 (如蓝牙、WiFi、5G 等) 作为无线通信基础的传输调度机制也具有较强的现实意义。此外, IEEE 802.15.4 物理层的传输距离较短, 不能满足覆盖范围较大的工业应用的部署。近年来兴起的 LoRa 与 LoRaWAN<sup>[115]</sup> 无线通信技术具有较远的通信距离和较强的抗干扰能力, 是一种适用于大范围工业无线应用部署的理想技术。然而, 目前学术界对 LoRa 技术在工业中应用的研究成果仍然较少<sup>[116-118]</sup>, 这方面也值得做更深入的研究。

4) 近年新兴的工业应用中, 出现了以视频为基础进行数据采集、分析和控制的应用场景, 对网络的实时性保证提出了更高的要求。视频流与常规的周期流和事件流不同, 存在流量大、编码率可变的特点, 对它的调度方法也需要做相应的优化。由于工业无线网络中同时存在周期流、事件流和视频流, 因此需要针对节点的流量负载设计相应的流量感知自适应调度算法, 以优先保证周期流和事件流的实时性, 同时不影响视频流的正常传输, 这也是一个亟待解决的问题。

## 7 结束语

虽然无线网络存在传输过程易受电磁干扰等问题, 但是业界并未因此放弃对工业无线网络的改进。近几年涌现出大量实时传输调度相关的工作, 旨在进一步提高其实用性。本文全面综述了这些工作, 梳理和分类相关研究成果。在该研究领域, 主流的研究方法是集中式计算无线网络中需要调度的数据流, 以确保每个数据流能够在截止时间内完成, 同

时辅以信道跳频和丢包重传等手段提高传输的可靠性。集中式调度算法虽然是一种有效的实时调度方法, 但存在网络规模增大时可扩展性不佳的问题, 以及存在单点故障的缺陷。分布式调度是解决单点故障和可扩展性问题的有效方法, 它仅需少量邻居之间的信息收集和协商, 就可以实现无冲突的传输调度。自治调度算法更是完全不依赖于其他节点, 实现了无协商的实时调度。这三类调度算法是目前工业无线网络实时传输调度的主要研究成果, 也是本文重点总结、分类和归纳的内容。在此基础上, 未来有望通过进一步研究和突破, 实现工业现场网络的全面无线化。

## References

- 1 Venkata P M, Abusayeed S, Sanjay M. Distributed graph routing for wireless networks. *Association for Computing Machinery*, 2018, **27**(4): 1669-1682
- 2 Wu C J, Dolvara G, Abusayeed S, Mo S. Maximizing network lifetime of wireless networks under graph routing. In: *Proceedings of the IEEE First International Conference on Internet-of-Things Design and Implementation*. Berlin, Germany: IEEE, 2016. 176-186
- 3 He Y, Guo X Z, Zheng X L, Yu Z H, Zhang J, Jiang H T, et al. Cross-technology communication for the Internet of Things: A survey. *ACM Computing Surveys*, 2022, **55**(5): 1-29
- 4 Daniele P, Martin H. Multipath fading in wireless sensor networks: Measurements and interpretation. In: *Proceedings of the International Wireless Communications and Mobile Computing Conference*. Amman, Jordan: IEEE, 2006. 1039-1044
- 5 Krijni L, Jan H F. The capture effect in fm receivers. *IEEE Transactions on Communications*, 1976, **24**(5): 531-539
- 6 Federico F, Marco Z, Lothar T, Olga S. Efficient network flooding and time synchronization with glossy. In: *Proceedings of the 10th ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks*. Chicago, USA: IEEE, 2011. 73-84
- 7 Luís M B, Fernando J V, António S L. Survey on the characterization and classification of wireless sensor networks applications. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 2014, **16**(4): 1860-1890
- 8 Zhang Xiao-Ling, Liang Wei, Yu Hai-Bin, Feng Xi-Sheng. Survey of transmission scheduling methods in wireless sensor networks. *Journal on Communications*, 2012, **33**(5): 143-156 (张晓玲, 梁炜, 于海斌, 封锡盛. 无线传感器网络传输调度方法综述. *通信学报*, 2012, **33**(5): 143-156)
- 9 Liu K, Nael A G, Kyoung D K. JiTS: Just-in-time scheduling for real-time sensor data dissemination. In: *Proceedings of the Fourth Annual IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications*. Pisa, Italy: IEEE, 2006. 42-46
- 10 Tengfei C, Thomas W, Xavier V, Pedro H G. Constructive interference in 802.15.4: A tutorial. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 2019, **21**(1): 217-237
- 11 Zhang K W, Shi Y, Karnouskos S, Sauter T, Fang H Z, Colombo A W. Advancements in industrial cyber-physical systems: An overview and perspectives. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2022, **19**(1): 716-729
- 12 Brummet R, Hossain M K, Chipara O, Herman T, Goddard S. WARP: On-the-fly program synthesis for agile, real-time, and reliable wireless networks. In: *Proceedings of the 20th International Conference on Information Processing in Sensor Net-*

- works. Nashville, USA: Association for Computing Machinery, 2021. 254–267
- 13 Romain J, Marco Z, Huang P C, Jan B, Lothar T. End-to-end real-time guarantees in wireless cyber-physical systems. In: Proceedings of the IEEE Real-Time Systems Symposium. Porto, Portugal: IEEE, 2016. 167–178
  - 14 Chen Y, Zhang H W, Nathan F, Wang L Y, George Y. Probabilistic per-packet real-time guarantees for wireless networked sensing and control. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2018, **14**(5): 2133–2145
  - 15 Kayan H, Nunes M, Rana O, Burnap P, Perera C. Cybersecurity of industrial cyber-physical systems: A review. *ACM Computing Surveys*, 2022, **54**(11): 1–35
  - 16 Shen W, Zhang T T, Mikael G. Prioritymac: A priority-enhanced mac protocol for critical traffic in industrial wireless sensor and actuator networks. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2014, **10**(1): 824–835
  - 17 Adil M, Menon V G, Balasubramanian V, Alotaibi S R, Song H, Jin Z p, et al. Survey: Self-Empowered wireless sensor networks security taxonomy, challenges and future research directions. *IEEE Sensors Journal*, 2023, **23**(18): 20519–20535
  - 18 Milanez G, Vieira M, Vieira L, Nacif J. VariBan: A variable bandwidth channel allocation algorithm for IEEE 802.15. 4e-based networks. *Computer Networks*, 2023, **231**: Article No. 109774
  - 19 Wang Q, Jiang J. Comparative examination on architecture and protocol of industrial wireless sensor network standards. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 2016, **18**(3): 2179–2219
  - 20 Sinem C E, Pravin V. TDMA scheduling algorithms for wireless sensor networks. *Wireless Networks*, 2010, **16**: 985–997
  - 21 Simon D, Beshr A N, Olaf L, Thomas W. Orchestra: Robust mesh networks through autonomously scheduled TSCH. In: Proceedings of the 13th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems. Seoul, South Korea: Association for Computing Machinery, 2015. 337–350
  - 22 Dominik B, Fabian M, Marco Z, Sebastian T. Control-guided communication: Efficient resource arbitration and allocation in multi-hop wireless control systems. *IEEE Control Systems Letters*, 2020, **4**(1): 127–132
  - 23 Bang A O, Rao U P, Kaliyar P, Conti M. Assessment of routing attacks and mitigation techniques with RPL control messages: A survey. *ACM Computing Surveys*, 2022, **55**(2): 1–36
  - 24 Javan N T, Sabaei M, Hakami V. Adaptive channel hopping for IEEE 802.15. 4 TSCH-based networks: A dynamic bernoulli bandit approach. *IEEE Sensors Journal*, 2021, **21**(20): 23667–23681
  - 25 Diego D, Thomas W, Xavier V, Pascal T. 6TiSCH: Deterministic IP-enabled industrial internet (of things). *IEEE Communications Magazine*, 2014, **25**(12): 1–36
  - 26 Gutierrez J A, Naeve M, Callaway E, Bourgeois M. IEEE 802.15.4: A developing standard for low-power low-cost wireless personal area networks. *ACM Transactions on Internet of Things*, 2001, **15**(5): 12–19
  - 27 Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, IEEE Standard 802.11, Piscataway, NJ, USA, 1997.
  - 28 Foundation H C. WirelessHART Specification 75: TDMA Data-Link Layer, HART Communication Foundation Standard, HART Communication Foundation, Australia, 2008.
  - 29 ISA-100.11 a-2011 Wireless Systems for Industrial Automation: Process Control and Related Applications, Process Control and Related Applications Standard, International Society of Automation, USA, 2011.
  - 30 802.15. 4e-2012—IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks—Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs), IEEE Standard Association, IEEE Standards Association, USA, 2012.
  - 31 Moon S, Park H, Chwa H S, Park K. AdaptiveHART: An adaptive real-time mAC protocol for industrial internet-of-things. *IEEE Systems Journal*, 2022, **16**(3): 4849–4860
  - 32 Chilukuri S, Gupta A, Sai P, Hemanth S. SmartHART: A priority-aware scheduling and routing scheme for IIoT networks using deep reinforcement learning. In: Proceedings of the 15th International Conference on Communication Systems and Networks. Bangalore, India: IEEE, 2023. 452–456
  - 33 Liang W, Zheng M, Zhang J L, Shi H G, Yu H B, Yang Y T, et al. WIA-FA and its applications to digital factory: A wireless network solution for factory automation. *Proceedings of the IEEE*, 2019, **107**(6): 1053–1073
  - 34 Wun C J, Junhee L. Performance evaluation of IEEE 802.15.4e DSME MAC protocol for wireless sensor networks. In: Proceedings of the First IEEE Workshop on Enabling Technologies for Smartphone and Internet of Things. Seoul, South Korea: IEEE, 2012. 452–456
  - 35 Gianluca C, Lucia S, Adriano V, Claudio Z. On the performance of IEEE 802.11e wireless infrastructures for soft-real-time industrial applications. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2010, **6**(3): 425–437
  - 36 Michal S, Martin M, Zdenek H. Experiments for real-time communication contracts in IEEE 802.11e EDCA networks. In: Proceedings of the IEEE International Workshop on Factory Communication Systems. Dresden, Germany: IEEE, 2008. 89–92
  - 37 Junyoung H, Jiman H, Yookun C. Earq: Energy aware routing for real-time and reliable communication in wireless industrial sensor networks. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2009, **5**(1): 3–11
  - 38 Wei Y H, Leng Q, Han S, Aloysius K M, Zhang W L. Rt-WiFi: Real-time high-speed communication protocol for wireless cyber-physical control applications. In: Proceedings of the IEEE 34th Real-Time Systems Symposium. Vancouver, Canada: IEEE, 2013. 140–149
  - 39 Tian G S, Seyit C, Tian Y C. A deadline-constrained 802.11MAC protocol with QoS differentiation for soft real-time control. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2016, **12**(2): 544–554
  - 40 Lucia S, Gianluca C, Stefano S, Adriano V, Claudio Z. Enhancing communication determinism in WiFi networks for soft real-time industrial applications. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2009, **13**(2): 866–876
  - 41 Leng Q, Wei Y H, Han S, Aloysius K, Zhang W L. Improving control performance by minimizing jitter in RT-WiFi networks. In: Proceedings of the IEEE Real-Time Systems Symposium. Rome, Italy: IEEE, 2014. 63–73
  - 42 Seijo O, Val I, Fernandez J L. w-SHARP: Implementation of a high-performance wireless time-sensitive network for low latency and ultra-low cycle time industrial applications. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2020, **17**(5): 3651–3662
  - 43 Yun Z L, Wu P, Zhou S L, Mok A K, Mark N, Han S. RT-WiFi on software-defined radio: Design and implementation. In: Proceedings of the IEEE 28th Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium. Milano, Italy: IEEE, 2022. 254–266
  - 44 Morgado A, Huq K M S, Mumtaz S. A survey of 5G technologies: Regulatory, standardization and industrial perspectives. *Digital Communications and Networks*, 2018, **4**(2): 87–97
  - 45 Garcia-Rodriguez A, Lopez-Perez D, Galati-Giordano L. IEEE 802.11 be: WiFi 7 strikes back. *IEEE Communications Magazine*, 2021, **59**(4): 102–108
  - 46 Azzino T, Ropitault T, Zorzi M. Scheduling the data transmis-

- sion interval in IEEE 802.11 ad: A reinforcement learning approach. In: Proceedings of the International Conference on Computing, Networking and Communications. Big Island, USA: IEEE, 2020. 602–607
- 47 Chen C, Li J C, Balasubramaniam V, Wu Y Q, Zhang Y R, Wan S H. Contention resolution in WiFi 6-enabled Internet of Things based on deep learning. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, **8**(7): 5309–5320
- 48 Cheng C Y, Li C Y, Chiu C H. An experience driven design for IEEE 802.11ac rate adaptation based on reinforcement learning. In: Proceedings of the IEEE INFOCOM 2021-IEEE Conference on Computer Communications. Vancouver, Canada: IEEE, 2021. 1–10
- 49 Sha M, Dolvara G, Wu C J, Lu C Y. Empirical study and enhancements of industrial wireless sensor actuator network protocols. *IEEE Internet of Things Journal*, 2017, **4**(3): 696–704
- 50 Abusayeed S, Chengjie W, Paras B T, Xu Y, Fu Y, Lu C Y. Near optimal rate selection for wireless control systems. *IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium*, 2012, **13**(45): 231–240
- 51 Pablo S, Zhang H B, Johansson M. Deadline-constrained transmission scheduling and data evacuation in wireless network. In: Proceedings of the European Control Conference. Budapest, Hungary: IEEE, 2009. 4320–4325
- 52 Venkata P M, Dali I, Mahbubur R, Abusayeed S. A utilization-based approach for schedulability analysis in wireless control systems. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Internet. Bellevue, USA: IEEE, 2008. 49–58
- 53 Wang Heng, Zhu Yuan-Jie, Yang Hang, Wang Ping. Deterministic scheduling algorithm with priority classification for industrial wireless networks. *Acta Automatica Sinica*, 2020, **46**(2): 373–384  
(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)
- 54 Felix D, Zhang T T, Mikael G. End-to-end reliability-aware scheduling for wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2016, **12**(2): 758–767
- 55 Alharbi N, Mackenzie L, Pezaros D. Enhancing graph routing algorithm of industrial wireless sensor networks using the covariance-matrix adaptation evolution strategy. *Sensors*, 2022, **22**(19): Article No. 7462
- 56 Park M, Paek J. On-demand scheduling of command and responses for low-power multihop wireless networks. *Sensors*, 2021, **21**(3): 738–753
- 57 Abusayeed S, Xu Y, Lu C Y, Chen Y X. End-to-end communication delay analysis in industrial wireless networks. *IEEE Transactions on Computers*, 2015, **64**(5): 1361–1374
- 58 Abusayeed S, Dolvara G, Paras T, Mo S, Lu C Y. Schedulability analysis under graph routing in wireless networks. In: Proceedings of the IEEE Real-Time Systems Symposium. San Antonio, USA: IEEE, 2015. 165–174
- 59 Song H, Zhu X M, Aloysius K M, Chen D J, Nixon M. Reliable and real-time communication in industrial wireless mesh networks. In: Proceedings of the IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium. Chicago, USA: IEEE, 2011. 3–12
- 60 Terraneo F, Polidori P, Leva A, Fornaciari W. TDMA-MAC: Real-time and multi-hop in the same wireless mac. In: Proceedings of the IEEE Real-Time Systems Symposium. Nashville, USA: IEEE, 2018. 277–287
- 61 Yu G, Tian H, Lin M G, Xu J H. Spatiotemporal delay control for low-duty-cycle sensor networks. In: Proceedings of the IEEE Real-Time Systems Symposium. Washington DC, USA: IEEE, 2009. 127–137
- 62 Kiszka J, Wagner B. RT-Net: A flexible hard real-time networking framework. In: Proceedings of the IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation. Prague, Czech Republic: IEEE, 2005. 449–456
- 63 Kang X H, Wang W N, José J, Ying L. On the performance of largest-deficit-first for scheduling real-time traffic in wireless networks. *ACM Transactions on Networking*, 2016, **24**(1): 72–84
- 64 Abusayeed S, You X, Lu C Y, Chen Y X. Real-time scheduling for wireless networks. In: Proceedings of the 31st IEEE Real-Time Systems Symposium. San Diego, USA: IEEE, 2010. 150–159
- 65 Harms O, Landsiedel O. MASTER: Long-term stable routing and scheduling in low-power wireless networks. In: Proceedings of the 16th International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems. Marina del Rey, USA: IEEE, 2020. 86–94
- 66 Harms O, Landsiedel O. Opportunistic routing and synchronous transmissions meet TSCH. In: Proceedings of the IEEE 46th Conference on Local Computer Networks. Edmonton, Canada: IEEE, 2021. 107–114
- 67 Chilukuri S, Piao G, Lugones D. Deadline-aware TDMA scheduling for multihop networks using reinforcement learning. In: Proceedings of the IFIP Networking Conference. Espoo, Finland: IEEE, 2021. 1–9
- 68 Chilukuri S, Pesch D. RECCE: Deep reinforcement learning for joint routing and scheduling in time-constrained wireless networks. *IEEE Access*, 2021, **9**: 32053–32063
- 69 Paulo T. Event-triggered real-time scheduling of stabilizing control tasks. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2007, **52**(9): 1680–1685
- 70 Wang X F, Michael D L. Self-triggered feedback control systems with finite-gain  $l_2$  stability. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2009, **54**(3): 452–467
- 71 Lunze J, Lehmann D. A state-feedback approach to event-based control. *Automatica*, 2010, **46**(1): 211–215
- 72 Jin X, Saifullah A, Lu C Y, Zeng P. Real-time scheduling for event-triggered and time-triggered flows in industrial wireless sensor-actuator networks. In: Proceedings of the IEEE INFOCOM IEEE Conference on Computer Communications. Paris, France: IEEE, 2019. 1684–1692
- 73 Hong S Y, Han X B, Sharon H G. Online data link layer scheduling in wireless networked control systems. In: Proceedings of the 27th Euromicro Conference on Real-Time Systems. Lund, Sweden: IEEE, 2015. 57–65
- 74 Li B, Nie L S, Wu C J, Humberto G, Lu C Y. Incorporating emergency alarms in reliable wireless process control. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Cyber-Physical System. Seattle, USA: Association for Computing Machinery, 2015. 218–227
- 75 Xia C Q, Xi J, Kong L H, Zeng P. Scheduling for emergency tasks in industrial wireless sensor networks. *Sensors*, 2017, **17**(7): Article No. 1674
- 76 Jin X, Kong F X, Kong L H, Wang H H, Xia C Q. A hierarchical data transmission framework for industrial wireless sensor and actuator networks. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2017, **13**(4): 2019–2029
- 77 Kristofer S J P, Lance D. TSMP: Time synchronized mesh protocol. In: Proceedings of the IASTED Distributed Sensor Networks. Crete, Greece: IEEE, 2008. 391–398
- 78 Dimitri B. *Nonlinear Programming: 3rd Edition*. Athena Scientific. Nashua: Athena Scientific, 2016. 97–123
- 79 Hou I H, Borkar V, Kumar P R. A theory of QoS for wireless. In: Proceedings of the IEEE INFOCOM. Rio de Janeiro, Brazil: IEEE, 2009. 486–494
- 80 Ma Y H, Guo J L, Wang Y B, Chakrabarty A, Ahn H J, Lu C Y. Optimal dynamic scheduling of wireless networked control systems. In: Proceedings of the 10th ACM/IEEE International



- Conference on Cyber-Physical Systems. Montreal, Canada: Association for Computing Machinery, 2019. 77–89
- 81 Saifullah A, Xu Y, Lu C Y, Chen Y X. Real-time scheduling for wireless networks. In: Proceedings of the Real-time Systems Symposium. San Diego, USA: IEEE, 2011. 150–159
- 82 Karadag G, Iqbal M S, Coleri S. Optimal power control, scheduling, and energy harvesting for wireless networked control systems. *IEEE Transactions on Communications*, 2021, **69**(3): 1789–1801
- 83 Yang G K, Myung J L. Scheduling multi-channel and multi-timeslot in time constrained wireless sensor networks via simulated annealing and particle swarm optimization. *IEEE Communications Magazine*, 2014, **52**(1): 122–129
- 84 Thong H, Fabrice T, Won J H. On the interest of opportunistic anycast scheduling for wireless low power lossy networks. *Computer Communications*, 2017, **104**: 55–66
- 85 Iqbal M S, Sadi Y, Coleri S. Minimum length scheduling for discrete-rate full-duplex wireless communication networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2022, **21**(1): 135–148
- 86 Zoppi S, Champati J P, Gross J, Kellerer W. Scheduling of wireless edge networks for feedback-based interactive applications. *IEEE Transactions on Communications*, 2022, **70**(5): 3295–3309
- 87 Palattella M, Accettura N, Dohler M, Grieco L, Boggia G. Traffic aware scheduling algorithm for reliable low-power multi-hop IEEE 802.15.4e networks. In: Proceedings of the 23rd IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. Sydney, Australia: IEEE, 2012. 327–332
- 88 Wu C J, Gunatilaka D, Sha M, Lu C Y. Real-time wireless routing for industrial internet of things. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Internet-of-Things Design and Implementation. Orlando, USA: IEEE, 2018. 261–266
- 89 Jonsson M, Kunert K. Towards reliable wireless industrial communication with real-time guarantees. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2009, **5**(4): 429–442
- 90 Yang D, Xu Y Z, Wang H C, Zheng T, Zhang H, Zhang H K, et al. Assignment of segmented slots enabling reliable real-time transmission in industrial wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, **62**(6): 3966–3977
- 91 Munir S, Lin S, Hoque E, Shahriar S M. Addressing burstiness for reliable communication and latency bound generation in wireless sensor networks. In: Proceedings of the International Conference on Information Processing in Sensor Networks. Stockholm, Sweden: Association for Computing Machinery, 2010. 303–314
- 92 Gamba G, Tramarin F, Willigt A. Retransmission strategies for cyclic polling over wireless channels in the presence of interference. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2009, **6**(3): 405–415
- 93 Shi H, Zheng M, Liang W. AODR: An automatic on-demand retransmission scheme for WIA-FA networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, **70**(6): 6094–6107
- 94 Venkata P M, Abusayeed S, Sanjay M. A distributed real-time scheduling system for industrial wireless networks. *ACM Transactions on Embedded Computing Systems*, 2021, **20**(5): 1–28
- 95 Rekić S, Baccour N, Jmaiel M, Drira K, Grieco L. Autonomous and traffic-aware scheduling for tsch networks. *Computer Networks*, 2018, **135**: 201–212
- 96 Shi J Y, Sha M, Yang Z C. Distributed graph routing and scheduling for industrial wireless sensor-actuator networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2019, **27**(4): 1669–1682
- 97 Kim S, Kim H S, Kim C. ALICE: Autonomous link-based cell scheduling for TSCH. In: Proceedings of the 18th ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks. Montreal, Canada: Association for Computing Machinery, 2019. 121–132
- 98 Jeong S, Paek J, Kim H S, Bahk S. TESLA: Traffic-aware elastic slotframe adjustment in TSCH networks. *IEEE Access*, 2019, **7**: 130468–130483
- 99 Jeong S, Kim H S, Paek J, Bahk S. OST: On-demand tsch scheduling with traffic-awareness. In: Proceedings of the IEEE Conference on Computer Communications. Toronto, Canada: IEEE, 2020. 69–78
- 100 Cheng X, Sha M. Autonomous traffic-aware scheduling for industrial wireless sensor-actuator networks. *Association for Computing Machinery*, 2021, **19**(2): 1–25
- 101 Osman M, Nabki F. OSCAR: An optimized scheduling cell allocation algorithm for convergecast in IEEE 802.15. 4e TSCH networks. *Sensors*, 2021, **21**(7): Article No. 2493
- 102 Kim S, Kim H S, Kim C. A<sup>3</sup>: Adaptive autonomous allocation of TSCH slots. In: Proceedings of the 20th International Conference on Information Processing in Sensor Networks. Nashville, USA : Association for Computing Machinery, 2021. 299–314
- 103 Rhee I, Warrier A, Min J, Xu L. DRAND: Distributed randomized tdma scheduling for wireless ad hoc networks. In: Proceedings of the 7th ACM International Symposium On Mobile Ad Hoc Networking And Computing. Florence, Italy: Association for Computing Machinery, 2006. 190–201
- 104 Tinka A, Watteyne T, Kristofer S J, Bayen A M. A decentralized scheduling algorithm for time synchronized channel hopping. In: Proceedings of Ad Hoc Networks Second International Conference. Victoria, Canada: Springer, 2010. 201–216
- 105 Bilgili A K. DIVA: A distributed divergecast scheduling algorithm for IEEE 802.15.4e TSCH networks. *Wireless Networks*, 2019, **25**(2): 625–635
- 106 Modekurthy V P, Saifullah A, Madria S. Distributedhart: A distributed real-time scheduling system for wireless networks. In: Proceedings of the IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium. Montreal, Canada: IEEE, 2019. 216–227
- 107 Kang H, Zhao Y N, Mei F. A graph coloring based tdma scheduling algorithm for wireless sensor networks. *Wireless Personal Communications*, 2013, **72**(2): 1005–1022
- 108 Abusayeed S, Xu Y, Lu C Y, Chen Y X. Distributed channel allocation protocols for wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2014, **25**(9): 2264–2274
- 109 Nicola A, Palattella M R, Gennaro B, Alfredo G, Mischa D. Decentralized traffic aware scheduling for multi-hop low power lossy networks in the internet of things. In: Proceedings of the IEEE 14th International Symposium on “A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks”. Madrid, Spain: IEEE, 2013. 1–6
- 110 Soua R, Minet P, Livolant E. Wave: A distributed scheduling algorithm for convergecast in IEEE 802.15.4e TSCH networks. *European Transactions on Telecommunications*, 2016, **27**(4): 557–575
- 111 Emiliano S, Paolo F, Fernandes C D, Stefano R, Pasetti M, Alessandra F, et al. EDSF: Efficient distributed scheduling function for IETF 6TiSCH-based industrial wireless networks. *Mobile Networks and Applications*, 2022, **27**(6): 2244–2253
- 112 Marco Z, Luca M, Silvia S. Synchronous transmissions in low-power wireless: A survey of communication protocols and network services. *ACM Computing Surveys*, 2020, **53**(6): 1–39
- 113 Jonathan O, Yang F, Sam M, Danny H. Zero-wire: A deterministic and low-latency wireless bus through symbol-synchronous transmission of optical signals. In: Proceedings of the 18th Conference on Embedded Networked Sensor Systems. Virtual Event: Association for Computing Machinery, 2020. 164–178

- 114 Matteo T, Gabriel G, Timofei I, Manuel M J, Pietro P G. The wireless control bus: Enabling efficient multi-hop event-triggered control with concurrent transmissions. *ACM Transactions on Cyber-Physical Systems*, 2022, **6**(1): 1–25
- 115 LoRaWAN 1.1 specification [Online], available: [https://lorawan-alliance.org/resource\\_hub/lorawan-specification-v1-1](https://lorawan-alliance.org/resource_hub/lorawan-specification-v1-1), October 11, 2017
- 116 Luca L, Filippo B, Lucia L B. Rt-LoRa: A medium access strategy to support real-time flows over LoRa-based networks for industrial IoT applications. *IEEE Internet of Things Journal*, 2019, **6**(6): 10812–10823
- 117 Quy L H, Hoon O. A real-time lora protocol using logical frame partitioning for periodic and aperiodic data transmission. *IEEE Internet of Things Journal*, 2022, **9**(16): 15401–15412
- 118 Emiliano S, Paolo F, Fernandes C D, Stefano R, Pasetti M, Alessandra F, et al. LoRaWAN range extender for industrial IoT. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019, **16**(8): 5607–5616



**裘莹** 浙江理工大学信息科学与工程学院讲师。2017 年获得西北工业大学博士学位。主要研究方向为工业物联网, 无线网络通信技术。

E-mail: [qiuying@zstu.edu.cn](mailto:qiuying@zstu.edu.cn)

**(QIU Ying** Lecturer at the School of Information Science and Engineering,

Zhejiang Sci-Tech University. He received his Ph.D. degree from Northwestern Polytechnical University in 2017. His research interest covers industrial internet of things and wireless network communication technology.)



**张敬宣** 浙江理工大学信息科学与工程学院硕士研究生。2019 年获得浙江理工大学学士学位。主要研究方向为工业无线网络实时调度。

E-mail: [15383129121@163.com](mailto:15383129121@163.com)

**(ZHANG Jing-Xuan** Master student at the School of Information

Science and Engineering, Zhejiang Sci-Tech University. He received his bachelor degree from Zhejiang Sci-Tech University in 2019. His main research interest is real-time scheduling of industrial wireless networks.)



**柯杰** 2021 年获得浙江理工大学硕士学位。主要研究方向为工业无线网络实时调度。

E-mail: [kejieken@126.com](mailto:kejieken@126.com)

**(KE Jie** Received his master degree from Zhejiang Sci-Tech University in 2021. His main research

interest is real-time scheduling of industrial wireless networks.)

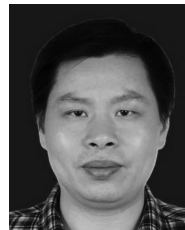


**方梦园** 浙江理工大学信息科学与工程学院讲师。2018 年获得浙江大学博士学位。主要研究方向为工业大数据分析建模, 工业人工智能算法。

E-mail: [myfang@zstu.edu.cn](mailto:myfang@zstu.edu.cn)

**(FANG Meng-Yuan** Lecturer at the School of Information Science

and Engineering, Zhejiang Sci-Tech University. She received her Ph.D. degree from Zhejiang University in 2018. Her research interest covers industrial big data analysis and modeling and industrial artificial intelligence algorithms.)



**徐伟强** 浙江理工大学信息科学与工程学院教授。2006 年获得浙江大学博士学位。主要研究方向为工业互联网, 物联网, 5G/6G 网络, 大数据与人工智能, 纺织智能制造与工业互联网。本文通信作者。

E-mail: [wqxu@zstu.edu.cn](mailto:wqxu@zstu.edu.cn)

**(XU Wei-Qiang** Professor at the School of Information Science and Engineering, Zhejiang Sci-Tech University. He received his Ph.D. degree from Zhejiang University in 2006. His research interest covers industrial internet, internet of things, 5G/6G network, big data and artificial intelligence, textile intelligent manufacturing and industrial internet. Corresponding author of this paper.)