

面向 LQG 控制的 IEEE 802.11ax 网络资源调度方法

郑萌^{1,2,3}, 张雷^{1,2,3,4}, 梁炜^{1,2,3}

1. 中国科学院沈阳自动化研究所机器人学国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110016;
2. 中国科学院网络化控制系统重点实验室, 辽宁 沈阳 110016;
3. 中国科学院机器人与智能制造创新研究院, 辽宁 沈阳 110169;
4. 中国科学院大学计算机科学与技术学院, 北京 100049)

摘要: 由于低成本、易维护和频带免授权等优点, IEEE 802.11ax 网络被广泛用于工业控制应用。针对基于 IEEE 802.11ax 的无线网络化控制系统, 提出一种控制感知的资源调度方法以支持对多个控制系统的无线高速控制。首先, 考虑 IEEE 802.11ax 网络的传感数据丢包问题, 给出控制系统的最优估计器和线性二次高斯 (LQG) 控制。然后, 分析 LQG 指标与 IEEE 802.11ax 传输可靠性的依赖关系, 给出期望 LQG 指标最小化的资源调度问题模型, 进而提出一种面向 LQG 控制的资源调度 (LCARS) 方法。最后, 通过大量仿真验证 LCARS 的有效性。LCARS 可用于自动导引车集群导航、机器人远程控制等智能工厂应用。

关键词: 网络化控制系统; 无线网络; 线性二次高斯控制; 资源调度; 可靠性

中图分类号: TP393

文献标志码: A

DOI: 10.11959/j.issn.1000-436x.2024075

LQG control-aware resource scheduling method for IEEE 802.11ax networks

ZHENG Meng^{1,2,3}, ZHANG Lei^{1,2,3,4}, LIANG Wei^{1,2,3}

1. State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China
2. Key Laboratory of Networked Control Systems, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China
3. Institutes for Robotics and Intelligent Manufacturing, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110169, China
4. School of Computer Science and Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Due to the advantages in low cost, ease of maintenance and license-exempt spectrum, etc, IEEE 802.11ax is widely adopted in industrial control applications. For a wireless networked control system based on IEEE 802.11ax, a control-aware resource scheduling method was proposed to support the wireless high-speed control of multiple control systems. Firstly, considering the packet dropout problem of sensing data in IEEE 802.11ax, the optimal state estimator and the linear quadratic Gaussian (LQG) control of the studied control system were given. Secondly, the dependency between the LQG performance and the transmission reliability of IEEE 802.11ax was analyzed, the expected LQG performance minimization problem of resource scheduling was formulated, and further, an LQG control-aware resource scheduling (LCARS) method was proposed. Finally, the effectiveness of the LCARS method was demonstrated via extensive simulations. LCARS can be applied to smart factory applications including navigation of automated guided vehicles, remote control of robots and so on.

Keywords: networked control system, wireless network, LQG control, resource scheduling, reliability

收稿日期: 2023-10-12; **修回日期:** 2024-02-01

基金项目: 国家重点研发计划基金资助项目 (No.2021YFB3301000); 兴辽英才计划基金资助项目 (No.XLYC2203148); 沈阳市中青年科技创新人才支持计划基金资助项目 (No.RC210482, No.RC210314)

Foundation Items: The National Key Research and Development Program of China (No.2021YFB3301000), Liaoning Revitalization Talents Program (No.XLYC2203148), Young and Middle-aged Science and Technology Innovation Talent Plan of Shenyang City (No.RC210482, No.RC210314)

0 引言

无线网络可使传统制造系统摆脱线缆束缚,有效解决由布线受限、旋转移动等因素造成的在线感知和控制难的问题,对工业控制系统应用领域的拓展具有重要作用^[1-3]。工业制造领域普遍认为,无线网络化控制系统(WNCS, wireless networked control system)将成为智能工厂的重要组成部分,在自动导引车(AGV, automated guided vehicle)物流、多机器人协同制造等关键生产环节中发挥重要作用^[4]。

相比于 LTE 和 5G 等 3GPP 无线网络, Wi-Fi 网络工作在免授权频段,其部署和维护成本大幅降低。然而,传统 Wi-Fi 网络主要采用基于竞争的信道接入方法,无法保证确定性的传输性能。IEEE 802.11ax 作为新一代 Wi-Fi 技术^[5-6],采用基于正交频分多址(OFDMA)的资源调度方法,可保证设备的确定性传输,越来越多地被工业控制应用所采用。然而,由于路径损耗、噪声干扰、多径效应等不利因素^[7],加之通信资源严格受限,IEEE 802.11ax 的实时、可靠传输无法保证,进而导致 WNCS 的控制性能难以得到满足。

资源调度方法决定了网络通信资源的使用效率,对 WNCS 的控制性能提升至关重要^[8]。近年来,国内外已有众多学者投入网络化系统的资源调度方法研究中,相关工作大致可以分为两类。

1) 面向网络性能指标的资源调度。此类工作将 WNCS 的网络设计和控制器设计视为独立的 2 个部分^[5,9-14],其中文献[5,12-14]是 IEEE 802.11ax 网络资源调度的代表性工作。文献[5]提出了一种基于闭环反馈控制的 IEEE 802.11ax 资源调度算法,根据服务质量和队列信息调节反馈增益,从而提高密集网络场景下的吞吐量。文献[12]提出了一种基于分而治之策略的资源分配算法,以最大化 IEEE 802.11ax 网络的吞吐量。文献[13]考虑平均发射功率约束,设计了针对信道和功率的联合优化策略,以最小化 IEEE 802.11ax 网络上行传输的平均时延。文献[14]将 IEEE 802.11ax 的网络资源分配问题建模为预算受限的二分图最大权匹配问题,并提出了一种具有保证近似比的启发式求解算法,可显著提升信道利用率和网络吞吐量。上述工作均是面向吞吐量、传输时延等网络性能指标的,由于网络性能指标一般不等同于控制性能指标,WNCS 的控制性

能通常欠佳。

2) 面向控制性能指标的资源调度。此类工作将不同形式的控制因素融入网络资源调度的性能指标,可使网络更好地为控制服务,从而提升 WNCS 的控制性能。近年来,已经逐渐出现面向控制性能指标的少数网络资源调度工作^[15-19]。其中,文献[19]针对基于 IEEE 802.11ax 网络的 WNCS,提出了面向线性二次型调节器(LQR)控制的低时延调度(CALLS, control-aware low-latency scheduling)方法,该方法根据状态误差和信道状态自适应地调整每个子系统的误包率上界,并以此为约束,联合优化时隙、信道和数据率等变量以最小化总传输时间。CALLS 方法相比于其他方法可以取得更好的控制性能,但其控制过程采用 LQR 控制,未考虑过程噪声的影响;用于资源调度决策的控制性能指标只考虑了状态误差,未考虑控制输入的大小;在当前控制周期仍有剩余资源时,未考虑对传输失败的设备进行重传调度。

受上述讨论启发,本文针对基于 IEEE 802.11ax 的 WNCS,提出了一种面向线性二次高斯(LQG, linear quadratic Gaussian)控制的资源调度(LCARS, LQG control-aware resource scheduling)方法。LCARS 的创新思想在于建立期望 LQG 指标最小化的资源调度问题模型,以此确定每次优先调度的 Wi-Fi 设备,并且在当前控制周期仍有剩余资源时,可以对传输失败的 Wi-Fi 设备进行重传,提高系统的可靠性。具体贡献包括:1)分析了 LQG 指标与 IEEE 802.11ax 传输可靠性的关联模型,为解决网络资源调度问题奠定理论基础;2)建立了期望 LQG 指标最小化的资源调度问题模型,并设计了可在线实施的多项式复杂度调度方法 LCARS;3)通过大量仿真验证了 LCARS 对单个设备和多个设备系统调度控制的有效性,并确定了其在不同控制周期下支持设备的最大数量。

1 系统模型

1.1 WNCS 模型

如图 1 所示,本文考虑的 WNCS 模型由 m 个离散线性子系统组成,其子系统 $i = 1, 2, \dots, m$ 的离散时间状态空间方程和观测方程分别为

$$\mathbf{x}_{i,k+1} = \mathbf{A}_i \mathbf{x}_{i,k} + \mathbf{B}_i \mathbf{u}_{i,k} + \mathbf{w}_{i,k} \quad (1)$$

$$\mathbf{y}_{i,k} = \gamma_{i,k} \mathbf{C}_i \mathbf{x}_{i,k} + \mathbf{v}_{i,k} \quad (2)$$

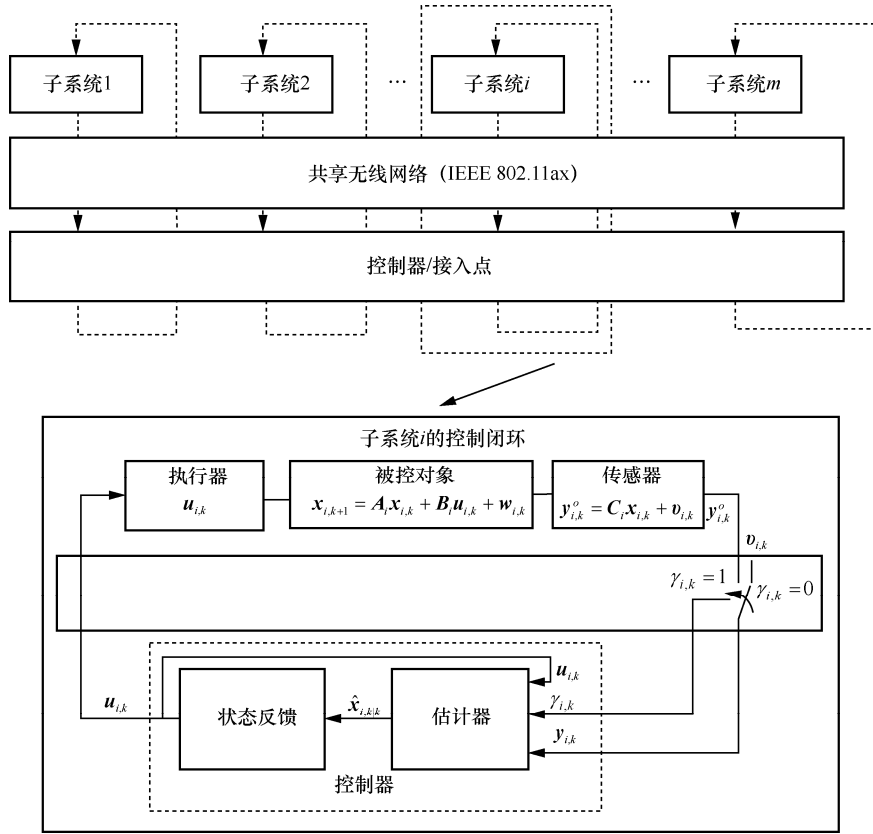


图 1 WNCS 模型

其中, k 为控制周期序号, $\mathbf{x}_{i,k} \in \mathbb{R}^n$ 为状态向量, $\mathbf{u}_{i,k} \in \mathbb{R}^p$ 为控制输入向量, $\mathbf{y}_{i,k} \in \mathbb{R}^q$ 为观测向量, $\mathbf{A}_i \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 为系统矩阵, $\mathbf{B}_i \in \mathbb{R}^{n \times p}$ 为输入矩阵, $\mathbf{C}_i \in \mathbb{R}^{q \times n}$ 为观测矩阵, $\mathbf{w}_{i,k}$ 和 $\mathbf{v}_{i,k}$ 均为高斯白噪声且互不相关, 均值为 $\mathbf{0}$ 、协方差矩阵分别为 \mathbf{Q}_i 和 \mathbf{R}_i 。不失一般性, 假设系统矩阵 \mathbf{A}_i 是不稳定的, 其至少有一个特征值的模大于 1。当 $\mathbf{u}_{i,k} = \mathbf{0}$ 时, 子系统 i 是不稳定的。为保证整个 WNCS 的稳定性, 各个子系统通过共享无线信道进行闭环控制。如图 1 所示, 在第 k 个控制周期, 子系统 i 的传感器将周期性采样所得的传感数据 $\mathbf{y}_{i,k}^o$ ($\mathbf{y}_{i,k}^o = \mathbf{C}_i \mathbf{x}_{i,k} + \mathbf{v}_{i,k}$) 通过无线信道发送给无线接入点 (AP, access point) 处的控制器; 控制器基于收到的信息计算状态估计 $\hat{\mathbf{x}}_{i,k|k}$ 和控制输入向量 $\mathbf{u}_{i,k}$, 并通过 AP 将 $\mathbf{u}_{i,k}$ 发送给子系统 i 的执行器; 最后, 执行器将收到的控制输入向量 $\mathbf{u}_{i,k}$ 作用于子系统 i 。

本文只关注上行传输 (传感器和控制器之间的传感数据传输), 假设控制器与执行器之间的控制指令传输不存在丢包。虽然更一般的系统模型应考虑控制指令包丢失, 但在实际中显著的丢包主要发

生在传感数据的传输过程, 故本文可采用这种简化模型。对于传感数据传输, 每个控制周期都存在失败的可能。本文采用伯努利随机变量 $\gamma_{i,k}$ 对上行传输丢包进行建模, 则 $\bar{\gamma}_i = \Pr(\gamma_{i,k} = 1)$ 为上行传输可靠性。如果数据包正确到达, 则 $\mathbf{y}_{i,k} = \mathbf{C}_i \mathbf{x}_{i,k} + \mathbf{v}_{i,k}$, 否则 $\mathbf{y}_{i,k} = \mathbf{v}_{i,k}$ 。

1.2 IEEE 802.11ax 通信模型

由于低成本、易维护和频带免授权等优点, Wi-Fi 网络被广泛应用于无线网络化控制。但是, 传统的 Wi-Fi 网络依赖于基于竞争的信道接入机制, 在拥塞或密集的部署场景中可能会引入随机大时延。近年来, IEEE 802.11ax 标准允许 AP 集中调度 Wi-Fi 设备的无线接入, 从而实现确定的网络性能。此外, IEEE 802.11ax 还定义了多用户 OFDMA 技术, 即在每个传输机会 (TXOP, transmit opportunity), AP 可以联合使用频分复用和时分复用技术调度多个 Wi-Fi 设备。设备可以利用不同的资源单元 (RU, resource unit) 和不同的物理层协议数据单元 (PPDU, physical protocol data unit) 进行无冲突传输。

图 2 给出了 TXOP 的频率和时间复用。首先 AP 发送一个触发帧 (TF, trigger frame), 指示在当前

TXOP 中传输数据的 Wi-Fi 设备以及它们在传输中使用的调度参数。调度参数包括一个 RU、一个 PPDU 和调制编码方案 (MCS, modulation and coding scheme)。然后被调度的 Wi-Fi 设备根据接收到的调度参数传输数据。最后 AP 根据收到的数据情况向 Wi-Fi 设备发送确认帧 (ACK, acknowledgement)。本文将 IEEE 802.11ax 网络的每个 TXOP 的时长记为 τ_{\max} 。为了便于描述调度参数, 本文令所有 Wi-Fi 设备配备单天线, 发射功率相同且固定。

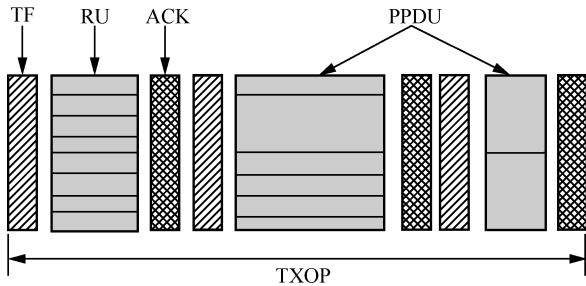


图 2 TXOP 的频率和时间复用

在第 k 个控制周期, 为了刻画不同的 RU, 定义 f^1, f^2, \dots, f^b 为具有相同带宽的 b 个不同子频带。进而, 为每个 Wi-Fi 设备定义一个布尔变量 $\varsigma_{i,k}^j \in \{0,1\}$, 如果 Wi-Fi 设备 i 在频带 f^j 上传输, 则 $\varsigma_{i,k}^j = 1$, 反之 $\varsigma_{i,k}^j = 0$ 。对于 Wi-Fi 设备 i , 其所有频带对应的布尔变量所组成的向量记为 $\varsigma_{i,k} := [\varsigma_{i,k}^1, \dots, \varsigma_{i,k}^b] \in \{0,1\}^b$; 进而, 对于所有 Wi-Fi 设备, 它们的 $\varsigma_{i,k}$ 构成的矩阵记为 $\Sigma_k := [\varsigma_{1,k}, \dots, \varsigma_{m,k}] \in \{0,1\}^{b \times m}$ 。IEEE 802.11ax 标准允许 Wi-Fi 设备一次使用多个相邻频带 (f^j 和 f^{j+1}) 组成的 RU 传输数据。尽管如此, 由于工业控制过程中所传输的数据包通常很小, 本文假设每个 Wi-Fi 设备的数据包大小相同且固定 (记为 L), Wi-Fi 设备发送时只需单子频带 RU, 即 $\|\varsigma_{i,k}\|_1 = 1$ ($i=1, 2, \dots, m$)。因此, 将集合 $\Phi \subset \{0,1\}^b$ 定义为布尔向量 $\varsigma_{i,k}$ 的可行集, 该集合定义了所有可行的 RU 分配。对于 Wi-Fi 设备 i , $\varsigma_{i,k} \in \Phi$ 必须成立。注意, $\mathbf{0} = [0,0, \dots, 0] \in \Phi$ 。若 $\varsigma_{i,k} = \mathbf{0}$, 则表示 Wi-Fi 设备 i 不在当前的控制周期中传输。

令 $\mu_{i,k}$ 表示 Wi-Fi 设备 i 的 MCS 值, $\mu_{i,k}$ 的取值范围为 $M = \{0,1,2, \dots, 10,11\}$ 。MCS 决定了传输的数据速率 $r(\mu_{i,k})$ 。本文假设所有 Wi-Fi 设备在一个

控制周期中采用相同的 MCS, 即 $\mu_{i,k} = \mu_k$ ($i=1, 2, \dots, m$), 那么 Wi-Fi 设备传输一个数据包所需要的 PPDU 时长为

$$\tau(\mu_k) = \frac{L}{r(\mu_k)} \quad (3)$$

如图 3 所示, 每个 TXOP 进一步以时隙为基本单位, 每个时隙由一个 TF (长度为 T_{TF})、一个 PPDU (长度为 $\tau(\mu_k)$)、一个 ACK (长度为 T_{ACK})、一个点协调功能帧间间隔 (PIFS, 长度为 T_{PIFS}) 和 2 个短帧间间隔 (SIFS, 长度为 T_{SIFS}) 组成。于是, 时隙长度 $\hat{\tau}(\mu_k)$ 可表示为

$$\hat{\tau}(\mu_k) = \tau(\mu_k) + T_{TF} + T_{ACK} + T_{PIFS} + 2T_{SIFS} \quad (4)$$

每个 TXOP 所包含的时隙数 $ss(\mu_k)$ 为

$$ss(\mu_k) = \left\lfloor \frac{\tau_{\max}}{\hat{\tau}(\mu_k)} \right\rfloor \quad (5)$$

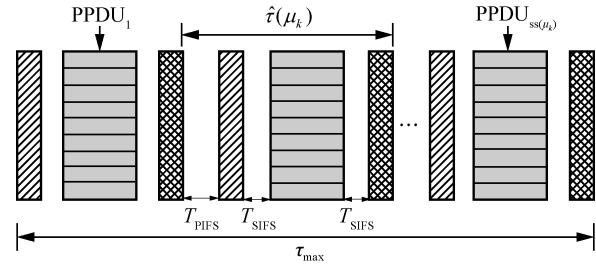


图 3 系统模型的时序

接下来, 继续描述 Wi-Fi 设备所分配到的 PPDU。类似于对 RU 的描述, 为每个 Wi-Fi 设备定义一个布尔变量 $\alpha_{i,k}^s \in \{0,1\}$, 如果在第 k 个控制周期, Wi-Fi 设备 i 在 $PPDU_s$ ($s=1, 2, \dots, ss(\mu_k)$) 上传输, 则 $\alpha_{i,k}^s = 1$, 反之 $\alpha_{i,k}^s = 0$ 。对于 Wi-Fi 设备 i , 其所有 PPDU 对应的布尔变量所组成的向量记为 $\alpha_{i,k} := [\alpha_{i,k}^1, \dots, \alpha_{i,k}^{ss(\mu_k)}] \in \{0,1\}^{ss(\mu_k)}$ 。进而, 对于所有 Wi-Fi 设备, 它们的 $\alpha_{i,k}$ 构成的矩阵记为 $\alpha_k := [\alpha_{1,k}, \dots, \alpha_{m,k}]$ 。将集合 $\Psi \subset \{0,1\}^{ss(\mu_k)}$ 定义为布尔向量 $\alpha_{i,k}$ 的可行集, 该集合定义了所有可行的 PPDU 分配。对于 Wi-Fi 设备 i , $\alpha_{i,k} \in \Psi$ 必须成立。注意, $\mathbf{0} = [0,0, \dots, 0] \in \Psi$ 。若 $\alpha_{i,k} = \mathbf{0}$, 则表示 Wi-Fi 设备 i 不在当前的控制周期中传输。

最后, 定义 Wi-Fi 设备 i 所经历的信道状态集合 $h_{i,k} := [h_{i,k}^1; h_{i,k}^2; \dots; h_{i,k}^b] \in \mathbb{R}_+^b$, 其中 $h_{i,k}^j$ 表示 Wi-Fi

设备 i 在无线衰落频带 f^j 上的信道增益。本文假设 $\mathbf{h}_{i,k}$ 在一个控制周期内保持不变。给定 $\mathbf{h}_{i,k}$ ，Wi-Fi 设备 i 的传输成功率 $q_i(\mu_k, \varsigma_{i,k})$ 由 MCS μ_k 和 RU 分配 $\varsigma_{i,k}$ 共同决定。

不失一般性，本文接下来均以信道带宽为 20 MHz 且采用单子频带 RU (26 个子载波) 的情形为例进行阐述，此时一个 PPDU 可以允许 9 个 Wi-Fi 设备并行传输，一个 TXOP 最多允许 9ss(μ_k) 个 Wi-Fi 设备进行传输。

2 最优反馈控制与分析

定义控制器在第 k 个控制周期的可用信息集为

$$\mathcal{X}_{i,k} := \{y_i^k, \gamma_i^k\}, i=1, 2, \dots, m \quad (6)$$

其中, $y_i^k := [y_{i,k}, y_{i,k-1}, \dots, y_{i,1}]$, $\gamma_i^k := [\gamma_{i,k}, \gamma_{i,k-1}, \dots, \gamma_{i,1}]$ 。

2.1 最优反馈控制推导

对于上行传输存在数据包丢失的情况，可以得到最优估计器^[20]为

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{x}}_{i,k+1|k} &= \mathbf{A}_i \mathbb{E}[\mathbf{x}_{i,k} | \mathcal{X}_{i,k}] + \mathbf{B}_i \mathbf{u}_{i,k} \\ &+ \mathbf{A}_i \hat{\mathbf{x}}_{i,k|k} + \mathbf{B}_i \mathbf{u}_{i,k} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\mathbf{e}_{i,k+1|k} = \mathbf{x}_{i,k+1} - \hat{\mathbf{x}}_{i,k+1|k} \quad (8)$$

$$\mathbf{P}_{i,k+1|k} = \mathbb{E}[\mathbf{e}_{i,k+1|k} \mathbf{e}_{i,k+1|k}^T | \mathcal{X}_{i,k}] = \mathbf{A}_i \mathbf{P}_{i,k|k} \mathbf{A}_i^T + \mathbf{Q}_i \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{x}}_{i,k+1|k+1} &= \hat{\mathbf{x}}_{i,k+1|k} + \\ &+ \gamma_{i,k+1} \mathbf{K}_{i,k+1} (\mathbf{y}_{i,k+1} - \mathbf{C}_i \hat{\mathbf{x}}_{i,k+1|k}) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\mathbf{P}_{i,k+1|k+1} = \mathbf{P}_{i,k+1|k} - \gamma_{i,k+1} \mathbf{K}_{i,k+1} \mathbf{C}_i \mathbf{P}_{i,k+1|k} \quad (11)$$

$$\mathbf{K}_{i,k+1} = \mathbf{P}_{i,k+1|k} \mathbf{C}_i^T (\mathbf{C}_i \mathbf{P}_{i,k+1|k} \mathbf{C}_i^T + \mathbf{R}_i)^{-1} \quad (12)$$

根据有限时域 LQG 控制方法，定义值函数 $V_{i,k}(\mathbf{x}_{i,k})$ 为

$$\begin{aligned} V_{i,N}(\mathbf{x}_{i,N}) &:= \mathbb{E}[\mathbf{x}_{i,N}^T \mathbf{W}_{i,N} \mathbf{x}_{i,N} | \mathcal{X}_{i,N}] \\ V_{i,k}(\mathbf{x}_{i,k}) &:= \min_{\mathbf{u}_{i,k}} \mathbb{E}[\mathbf{x}_{i,k}^T \mathbf{W}_{i,k} \mathbf{x}_{i,k} + \mathbf{u}_{i,k}^T \mathbf{U}_{i,k} \mathbf{u}_{i,k} + \\ &+ V_{i,k+1}(\mathbf{x}_{i,k+1}) | \mathcal{X}_{i,k}] \end{aligned} \quad (13)$$

其中, N 为考虑的时域长度, $\mathbf{W}_{i,k} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 为非负定矩阵, $\mathbf{U}_{i,k} \in \mathbb{R}^{p \times p}$ 为正定矩阵。

根据文献[20], 可得最优反馈控制为

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_{i,k}^* &= -(\mathbf{B}_i^T \mathbf{S}_{i,k+1} \mathbf{B}_i + \mathbf{U}_{i,k})^{-1} \cdot \\ &+ \mathbf{B}_i^T \mathbf{S}_{i,k+1} \mathbf{A}_i \hat{\mathbf{x}}_{i,k|k} = \mathbf{L}_{i,k} \hat{\mathbf{x}}_{i,k|k} \end{aligned} \quad (14)$$

将式(14)代入式(13)中, 可得

$$V_{i,k}(\mathbf{x}_{i,k}) = \mathbb{E}[\mathbf{x}_{i,k}^T \mathbf{S}_{i,k} \mathbf{x}_{i,k} | \mathcal{X}_{i,k}] + c_{i,k} \quad (15)$$

其中, $\mathbf{S}_{i,k}$ 和 $c_{i,k}$ 分别为

$$\begin{aligned} \mathbf{S}_{i,k} &= \mathbf{W}_{i,k} + \mathbf{A}_i^T \mathbf{S}_{i,k+1} \mathbf{A}_i - \mathbf{A}_i^T \mathbf{S}_{i,k+1} \mathbf{B}_i \cdot \\ &+ (\mathbf{U}_{i,k} + \mathbf{B}_i^T \mathbf{S}_{i,k+1} \mathbf{B}_i)^{-1} \mathbf{B}_i^T \mathbf{S}_{i,k+1} \mathbf{A}_i \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} c_{i,k} &= \text{Tr}[(\mathbf{W}_{i,k} + \mathbf{A}_i^T \mathbf{S}_{i,k+1} \mathbf{A}_i - \mathbf{S}_{i,k}) \mathbf{P}_{i,k|k}] + \\ &+ \text{Tr}(\mathbf{S}_{i,k+1} \mathbf{Q}_i) + \mathbb{E}[c_{i,k+1} | \mathcal{X}_{i,k}] \end{aligned} \quad (17)$$

2.2 控制性能评价指标

由于无线传输不稳定, 控制器不总能成功收到传感数据。下面定义子系统 i 的传输计数器 $l_{i,k}$, 当 $l_{i,k} = j$ 时, 表示子系统 i 在第 $k-j$ 个控制周期的传感数据被控制器成功收到, 且之后控制周期的传感数据均未被控制器成功收到。于是, $l_{i,k}$ 在第 k 个控制周期更新为

$$l_{i,k+1} = \begin{cases} 1 & , \gamma_{i,k} = 1 \\ l_{i,k} + 1 & , \gamma_{i,k} = 0 \end{cases} \quad (18)$$

根据式(7)和式(14), 控制器可以得到子系统 i 在第 k 个控制周期的状态预测值为

$$\hat{\mathbf{x}}_{i,k|k-l_{i,k}} = \left[\prod_{j=1}^{l_{i,k}} (\mathbf{A}_i + \mathbf{B}_i \mathbf{L}_{i,k-j}) \right] \hat{\mathbf{x}}_{i,k-l_{i,k}|k-l_{i,k}} \quad (19)$$

定义 $\mathbf{A}_{i,k} = \mathbf{A}_i^T \mathbf{S}_{i,k+1} \mathbf{B}_i (\mathbf{U}_{i,k} + \mathbf{B}_i^T \mathbf{S}_{i,k+1} \mathbf{B}_i)^{-1} \mathbf{B}_i^T \mathbf{S}_{i,k+1} \mathbf{A}_i$, 令 $J_{i,k}(\mathbf{x}_{i,k})$ 表示子系统 i 在第 k 个控制周期的 LQG 成本的数学期望 (即 $J_{i,k}(\mathbf{x}_{i,k}) := \mathbb{E}[V_{i,k}(\mathbf{x}_{i,k}) | \gamma_{i,k}]$)。定理 1 给出了 $J_{i,k}(\mathbf{x}_{i,k})$ 的解析表达式。

定理 1 给定 $\gamma_{i,k}$ 和 $\bar{\gamma}_i$, $J_{i,k}(\mathbf{x}_{i,k})$ 的解析表达式为

$$\begin{aligned} J_{i,k}(\mathbf{x}_{i,k}) &= \hat{\mathbf{x}}_{i,k|k-l_{i,k}}^T \mathbf{S}_{i,k} \hat{\mathbf{x}}_{i,k|k-l_{i,k}} + \\ &+ \text{Tr}(\mathbf{S}_{i,k+1} \mathbf{Q}_i) + \text{Tr}[(\mathbf{W}_{i,k} + \mathbf{A}_i^T \mathbf{S}_{i,k+1} \mathbf{A}_i) \cdot \\ &+ \mathbf{P}_{i,k|k-1}] + c_{i,k+1} - \bar{\gamma}_i \text{Tr}(\mathbf{A}_{i,k} \mathbf{K}_{i,k} \mathbf{C}_i \mathbf{P}_{i,k|k-1}) \end{aligned} \quad (20)$$

证明 将式(8)、式(9)、式(17)与式(19)代入式(15)中, 可得

$$\begin{aligned} V_{i,k}(\mathbf{x}_{i,k}) &= \mathbb{E}[(\hat{\mathbf{x}}_{i,k|k-l_{i,k}} + \mathbf{e}_{i,k|k-l_{i,k}})^T \mathbf{S}_{i,k} \cdot \\ &+ (\hat{\mathbf{x}}_{i,k|k-l_{i,k}} + \mathbf{e}_{i,k|k-l_{i,k}})] + c_{i,k} = \hat{\mathbf{x}}_{i,k|k-l_{i,k}}^T \cdot \\ &+ \mathbf{S}_{i,k} \hat{\mathbf{x}}_{i,k|k-l_{i,k}} + \text{Tr}(\mathbf{S}_{i,k} \mathbf{P}_{i,k|k-1}) + \\ &+ \text{Tr}[(\mathbf{W}_{i,k} + \mathbf{A}_i^T \mathbf{S}_{i,k+1} \mathbf{A}_i - \mathbf{S}_{i,k}) \mathbf{P}_{i,k|k}] + \\ &+ \text{Tr}(\mathbf{S}_{i,k+1} \mathbf{Q}_i) + \mathbb{E}[c_{i,k+1} | \mathcal{X}_{i,k}] \end{aligned} \quad (21)$$

将式(11)和式(16)代入式(21)中, 可得

$$\begin{aligned}
 V_{i,k}(\mathbf{x}_{i,k}) &= \hat{\mathbf{x}}_{i,k|k-l_{i,k}}^T \mathbf{S}_{i,k} \hat{\mathbf{x}}_{i,k|k-l_{i,k}} + \\
 &\text{Tr}(\mathbf{S}_{i,k+1} \mathbf{Q}_i) + \text{Tr}[(\mathbf{W}_{i,k} + \mathbf{A}_i^T \mathbf{S}_{i,k+1} \mathbf{A}_i - \mathbf{A}_{i,k}) \cdot \\
 &\mathbf{P}_{i,k|k-1}] + \text{Tr}[\mathbf{A}_{i,k} (\mathbf{P}_{i,k|k-1} - \gamma_{i,k} \mathbf{K}_{i,k} \mathbf{C}_i \mathbf{P}_{i,k|k-1})] + \\
 &\mathbb{E}[c_{i,k+1} | \mathcal{X}_{i,k}] = \hat{\mathbf{x}}_{i,k|k-l_{i,k}}^T \mathbf{S}_{i,k} \hat{\mathbf{x}}_{i,k|k-l_{i,k}} + \\
 &\mathbb{E}[c_{i,k+1} | \mathcal{X}_{i,k}] + \text{Tr}[(\mathbf{W}_{i,k} + \mathbf{A}_i^T \mathbf{S}_{i,k+1} \mathbf{A}_i) \mathbf{P}_{i,k|k-1}] + \\
 &\text{Tr}(\mathbf{S}_{i,k+1} \mathbf{Q}_i) - \gamma_{i,k} \text{Tr}(\mathbf{A}_{i,k} \mathbf{K}_{i,k} \mathbf{C}_i \mathbf{P}_{i,k|k-1}) \quad (22)
 \end{aligned}$$

最后, 对式(22)取数学期望, 可得子系统 i 在第 k 个控制周期的 LQG 成本的数学期望。证毕。

推论 1 $J_{i,k}(\mathbf{x}_{i,k})$ 随着 $\bar{\gamma}_i$ 单调递减。

证明 根据式(12), 对于 $\text{Tr}(\mathbf{A}_{i,k} \mathbf{K}_{i,k} \mathbf{C}_i \mathbf{P}_{i,k|k-1})$, 有

$$\begin{aligned}
 &\text{Tr}(\mathbf{A}_{i,k} \mathbf{K}_{i,k} \mathbf{C}_i \mathbf{P}_{i,k|k-1}) = \\
 &\text{Tr}[\mathbf{A}_{i,k} \mathbf{P}_{i,k|k-1} \mathbf{C}_i^T (\mathbf{C}_i \mathbf{P}_{i,k|k-1} \mathbf{C}_i^T + \mathbf{R}_i)^{-1} \mathbf{C}_i \mathbf{P}_{i,k|k-1}] \quad (23)
 \end{aligned}$$

定义 $\tilde{\mathbf{P}}_{i,k} := \mathbf{P}_{i,k|k-1} \mathbf{C}_i^T (\mathbf{C}_i \mathbf{P}_{i,k|k-1} \mathbf{C}_i^T + \mathbf{R}_i)^{-1} \mathbf{C}_i \mathbf{P}_{i,k|k-1}$, 根据式(9), 一定存在随机变量 $\tilde{\mathbf{e}}_{i,k} \in \mathbb{R}^n$ 使 $\tilde{\mathbf{P}}_{i,k} = \mathbb{E}[\tilde{\mathbf{e}}_{i,k} \tilde{\mathbf{e}}_{i,k}^T]$, 且 $\mathbf{A}_{i,k} \geq 0$, 故有

$$\text{Tr}(\mathbf{A}_{i,k} \mathbf{K}_{i,k} \mathbf{C}_i \mathbf{P}_{i,k|k-1}) = \mathbb{E}[\tilde{\mathbf{e}}_{i,k}^T \mathbf{A}_{i,k} \tilde{\mathbf{e}}_{i,k}] \geq 0 \quad (24)$$

因此, $J_{i,k}(\mathbf{x}_{i,k})$ 随着 $\bar{\gamma}_i$ 单调递减。证毕。

3 网络资源调度方法

可靠性 $\bar{\gamma}_i$ 与传输成功率 $q_i(\mu_k, \varsigma_{i,k})$ 和 PPDU 分配 $\alpha_{i,k}$ 有关, 则有

$$\bar{\gamma}_i(\mu_k, \varsigma_{i,k}, \alpha_{i,k}) := 1 - [1 - q_i(\mu_k, \varsigma_{i,k})]^{\|\alpha_{i,k}\|} \quad (25)$$

定义所有子系统的信道增益矩阵为 $\mathbf{H}_k := [\mathbf{h}_{1,k}, \dots, \mathbf{h}_{m,k}]$, 则在 \mathbf{H}_k 给定的条件下, 所有 Wi-Fi 设备的可靠性向量为 $\bar{\gamma}(\mu_k, \Sigma_k, \alpha_k) := [\bar{\gamma}_1, \bar{\gamma}_2, \dots, \bar{\gamma}_m]^T$, 状态预测矩阵为 $\hat{\mathbf{X}}_k := [\hat{\mathbf{x}}_{1,k|k-l_{1,k}}, \dots, \hat{\mathbf{x}}_{m,k|k-l_{m,k}}]$, 则 m 个子系统在第 k 个控制周期的 LQG 成本期望值总和为

$$\begin{aligned}
 &J_k(\hat{\mathbf{X}}_k, \bar{\gamma}(\mu_k, \Sigma_k, \alpha_k)) = \\
 &\sum_{i=1}^m J_{i,k}(\hat{\mathbf{x}}_{i,k|k-l_{i,k}}, \bar{\gamma}_i(\mu_k, \varsigma_{i,k}, \alpha_{i,k})) \quad (26)
 \end{aligned}$$

网络资源调度过程的优化目标是使整个系统的 LQG 成本最小, 即

$$[\mu_k^*, \Sigma_k^*, \alpha_k^*] = \arg \min_{\mu_k, \Sigma_k, \alpha_k} J_k(\hat{\mathbf{X}}_k, \bar{\gamma}(\mu_k, \Sigma_k, \alpha_k)) \quad (27)$$

定义 $d_{i,k} := -\text{Tr}(\mathbf{A}_{i,k} \mathbf{K}_{i,k} \mathbf{C}_i \mathbf{P}_{i,k|k-1})$, 由定理 1 和推论 1 可知, 问题式(27)等价于问题式(28)

$$[\mu_k^*, \Sigma_k^*, \alpha_k^*] = \arg \min_{\mu_k, \Sigma_k, \alpha_k} \mathbf{d}_k^T \bar{\gamma}(\mu_k, \Sigma_k, \alpha_k) \quad (28)$$

其中, $\mathbf{d}_k := [d_{1,k}, d_{2,k}, \dots, d_{m,k}]^T$ 。同时, 变量 μ_k 、 Σ_k 、 α_k 需要满足如下约束条件

$$\sum_{i=1}^m \|\alpha_{i,k}\| \leq 9\text{ss}(\mu_k) \quad (29)$$

$$\sum_{i=1}^m \alpha_{i,k}^s \varsigma_{i,k}^j \leq 1, \quad \forall j, s \quad (30)$$

$$\mu_k \in \mathbf{M}, \varsigma_{i,k} \in \Phi, \alpha_{i,k} \in \Psi, \quad \forall i \quad (31)$$

式(29)确保所分配的 RU 数不超过当前控制周期中可用的 RU 总数; 式(30)确保对于每个 PPDU_s, 在频带 j 上最多只有一个 Wi-Fi 设备在传输; 式(31)限定每个变量必须在可行集内取值。由于在一次传输调度中, Wi-Fi 设备 i 最多被分配给一个 PPDU, 则有 $\Psi = \{\mathbf{x} \mid \|\mathbf{x}\| \leq 1, \mathbf{x} \in \{0, 1\}^{\text{ss}(\mu_k)}\}$ 。

经过问题式(28)~式(31)调度优化后, 如果有传输失败的 Wi-Fi 设备且当前控制周期仍有剩余 PPDU, 那么 AP 可以启用重传调度以进一步提升网络可靠性。令问题式(28)~式(31)占用的最大 PPDU 为 ss^* , 需要重传的 Wi-Fi 设备数量为 m_1 , 则重传优化问题本质上与问题式(28)~式(31)相同, 即将 $\text{ss}_1 = \text{ss}(\mu_k) - \text{ss}^*$ 个 PPDU 分配给 m_1 个 Wi-Fi 设备。

对于给定的 Wi-Fi 设备集合 $\mathbf{I}_a = \{1, 2, \dots, m\}$ 和 \mathbf{d}_k , 由于式(28)中 $d_{i,k} \leq 0$, 若想使整个系统的 LQG 成本最小, 则应优先调度对应于系统 $d_{i,k}$ 更小的 Wi-Fi 设备。故将集合 \mathbf{I}_a 中的 Wi-Fi 设备按照 $d_{i,k}$ 升序排列 (记为 $\mathbf{I}_a = \text{sort}(\mathbf{I}_a; d_{i,k})$), 选择前 $\min\{9\text{ss}(\mu_k), m\}$ 个 Wi-Fi 设备进行调度, 设备集合记为 $\tilde{\mathbf{I}}_k \subseteq \mathbf{I}_a$ 。为避免资源浪费, Wi-Fi 设备所分配的 RU 应紧密排列且优先分配小序号的 PPDU, 根据式(28)~式(31), 为 $\tilde{\mathbf{I}}_k$ 中的 Wi-Fi 设备选择 Σ_k 和 α_k , 并计算最优值 $\text{Op}_k = \mathbf{d}_k^T \bar{\gamma}(\mu_k, \Sigma_k, \alpha_k)$ 。针对不同的 $\mu_k \in \mathbf{M}$, 重复上述过程, 取最小的 Op_k 所对应的调度结果 (记为 $[\mu_k^*, \tilde{\Sigma}_k, \tilde{\alpha}_k]$) 进行首次传输调度。

首次传输调度后, 如果有传输失败的 Wi-Fi 设备且当前控制周期仍有剩余 PPDU, 那么可以进行重传调度。根据传输结果确定未成功传输的 Wi-Fi 设备集合 $\mathbf{I}_r \subseteq \mathbf{I}_a$, 此时 $m_1 = |\mathbf{I}_r|$, $\text{ss}_1 = \text{ss}(\mu_k^*) - \text{ss}^*$ 。与首次传输调度类似, 将集合 \mathbf{I}_r 中的 Wi-Fi 设备按照 $d_{i,k}$ 升序排列 (记为 $\mathbf{I}_r = \text{sort}(\mathbf{I}_r; d_{i,k})$), 选择前

$\min\{9ss_1, m_1\}$ 个 Wi-Fi 设备进行调度, 设备集合记为 $\hat{I}_k \subseteq I_r$ 。由于重传过程仍采用 μ_k^* , 此时的问题本质是将 ss_1 个 PPDU 分配给 $|\hat{I}_k|$ 个 Wi-Fi 设备, 然后根据得到的可行调度结果 $\hat{\Sigma}_k$ 和 $\hat{\alpha}_k$, 对 \hat{I}_k 中的 Wi-Fi 设备进行重传调度。上述重传过程持续至所有 Wi-Fi 设备传输成功或当前控制周期结束。

基于上述讨论, 本节给出第 k 个控制周期中的 LCARS 方法, 其流程如图 4 所示。

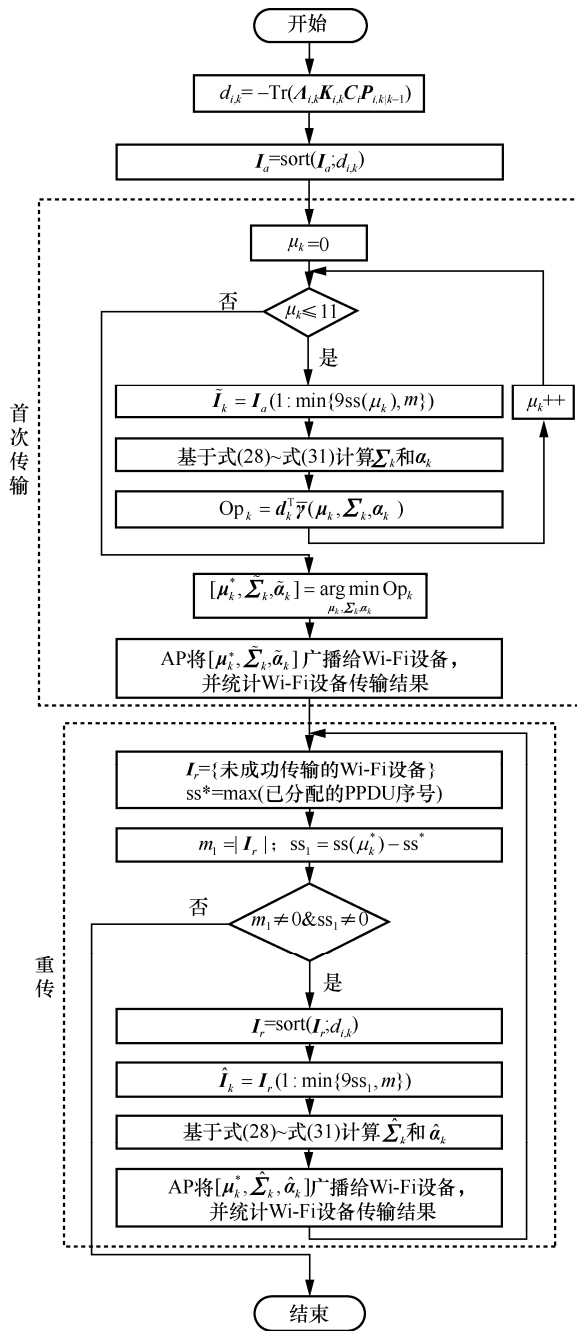


图4 LCARS 的流程

需要进行如下讨论。1) LCARS 的复杂度由 RU 和 PPDU 的分配问题式(28)决定。本文采用冒泡排序法可以在多项式时间内对式(28)求解, 算法复杂度为 $O(m^2)$ 。AP 计算能力通常足够强大, 本文中 AP 可负责 LCARS 的实现, 即由 AP 执行 RU 和 PPDU 分配的冒泡排序法、MCS 参数选择等计算任务。因此, LCARS 是一种可在线实施的多项式复杂度方法。2) LCARS 遵循 IEEE 802.11ax 标准的传输调度框架, 且所选的参数也符合 IEEE 802.11ax 标准。因此, IEEE 802.11ax 网络支持本文提出的 LCARS。

4 仿真

4.1 仿真系统

本节将通过倒立摆仿真验证 LCARS 方法的有效性。虽然倒立摆模型简单, 但其高度不稳定的动力学特性使其成为一个典型的被控对象^[21]。考虑 m 个相同的单级倒立摆, 如图 5 所示, 每个倒立摆的摆杆一端被固定在小车上, 小车可以沿着单一的水平轴移动。

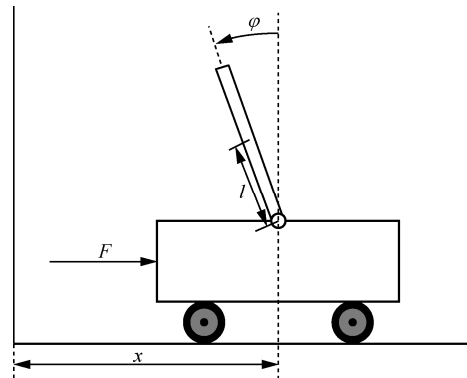


图5 单级倒立摆系统

由于重力和施加在小车上的作用力的影响, 摆杆的位置会发生变化。设小车质量为 m_v , 摆杆质量为 m_b , 摆杆转动轴心到质心的长度为 l , 摆杆绕质心的转动惯量为 I_b , 摆杆与竖直方向之间的夹角为 φ , 小车在水平方向的位移为 x , 施加在小车上的作用力为 F , 重力加速度为 g , 小车与导轨之间的摩擦系数为 b_v ; 取单级倒立摆系统的状态向量为 $x = [x \ \dot{x} \ \varphi \ \dot{\varphi}]^T$, $m_v = 0.4 \text{ kg}$, $m_b = 0.3 \text{ kg}$, $l = 0.2 \text{ m}$, $g = 10 \text{ m/s}^2$, $b_v = 0.1 \text{ N/(m}\cdot\text{s}^{-1})$ 。当控制周期 $T_0 = 0.01 \text{ s}$ 时, 采用零阶保持并线性化^[22], 可得单级倒立摆系统的离散线性动态矩阵为

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0.01 & 0.0002 & 0 \\ 0 & 0.9979 & 0.0474 & 0.0002 \\ 0 & 0 & 1.0028 & 0.01 \\ 0 & -0.0079 & 0.553 & 1.0028 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0.0001 \\ 0.0210 \\ 0.0004 \\ 0.0789 \end{bmatrix} \quad (32)$$

不难验证 $\text{rank}[B \ AB \ A^2B \ A^3B] = 4$ ，故单级倒立摆系统的离散系统模型是状态完全能控的。

4.2 数据包传输成功率仿真

对于数据包传输成功率 $q_i(\mu_k, \varsigma_{i,k})$ ，本文通过仿真得到不同 MCS 的传输成功率曲线。

仿真中采用的信道模型为 IEEE Model E^[23]，数据包大小为 32 B，发射功率为 23 dBm，AP 与 Wi-Fi 设备天线数为 1×1，AP 与 Wi-Fi 设备之间的距离为 10 m，传输频带为单子频带 RU（26 个子载波），保护间隔 $GI = 0.8 \mu\text{s}$ 。表 1 给出了 $GI = 0.8 \mu\text{s}$ 时 IEEE 802.11ax 所允许的 MCS 设置^[24]。

表 1 $GI = 0.8 \mu\text{s}$ 时 IEEE 802.11ax 所允许的 MCS 设置

μ_i	调制方案	编码率	数据速率/(Mbit·s ⁻¹)
0	BPSK	$\frac{1}{2}$	0.9
1	QPSK	$\frac{1}{2}$	1.8
2	QPSK	$\frac{3}{4}$	2.6
3	16QAM	$\frac{1}{2}$	3.5
4	16QAM	$\frac{3}{4}$	5.3
5	64QAM	$\frac{2}{3}$	7.1
6	64QAM	$\frac{3}{4}$	7.9
7	64QAM	$\frac{5}{6}$	8.8
8	256QAM	$\frac{3}{4}$	10.6
9	256QAM	$\frac{5}{6}$	11.8
10	1024QAM	$\frac{3}{4}$	13.2
11	1024QAM	$\frac{5}{6}$	14.7

对于每个给定的 SNR 和 MCS，Wi-Fi 设备都向 AP 发送 10 000 个数据包，传输成功率可通过成功传输的数据包数量与总共发送的数据包数量的比值进行估计，最终所得的传输成功率对比结果如图 6 所示。

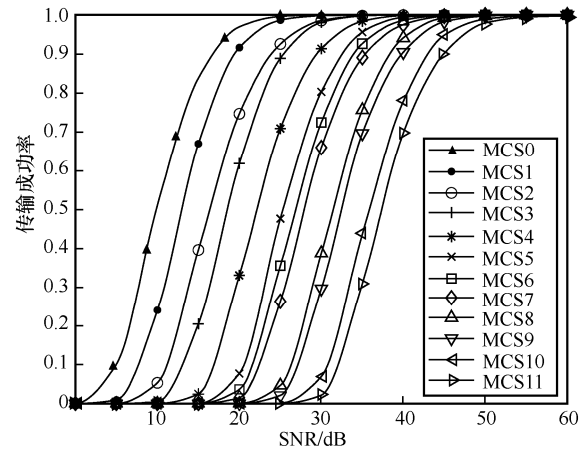


图 6 不同 SNR 和 MCS 条件下的传输成功率

4.3 对比仿真

本节对单个倒立摆系统与多个倒立摆系统进行调度与控制仿真，并确定 τ_{\max} 取不同值时不同方法支持设备的最大数量。仿真所用参数为 $T_{TF} = 100 \mu\text{s}$ 、 $T_{ACK} = 32 \mu\text{s}$ 、 $T_{PIFS} = 25 \mu\text{s}$ 、 $T_{SIFS} = 16 \mu\text{s}$ ^[25]； $C_i = I_4$ ； $R_i = 0$ ； $U_{i,k} = 0.1$ ； $W_{i,k} = \text{diag}(1,1,10,1)$ ； $Q_i = 10^{-6} \times I_4$ ；SNR=30 dB。为了保证仿真结果的可信性，本文进行了 100 组独立仿真，每次仿真进行 10 000 个控制周期，最后取 100 组仿真结果的统计值进行对比。

4.3.1 单被控对象

首先，采用 LCARS 和 CALLS^[19]对单个倒立摆系统进行调度与控制仿真。图 7 给出了 $\tau_{\max} = 0.5 \text{ ms}$ 时 LCARS 与 CALLS 的实时转角 ($|\varphi_{LCARS}|$ 与 $|\varphi_{CALLS}|$) 对比。显然从图 7 可以看出，对于单个倒立摆系统的调度与控制，LCARS 相比于 CALLS 可以保持更小的实时转角。

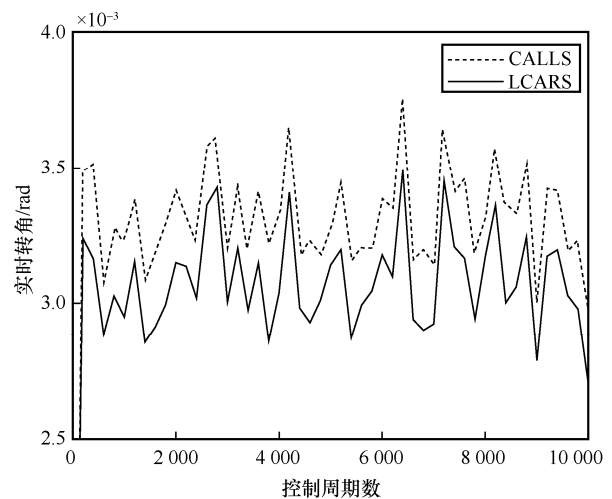


图 7 $\tau_{\max} = 0.5 \text{ ms}$ 时 LCARS 与 CALLS 的实时转角对比

4.3.2 多被控对象

本节分别采用 LCARS、CALLS^[19]与轮询 (Round-robin) 对 30 个倒立摆系统进行调度与控制仿真。图 8 和图 9 给出了当 $\tau_{\max} = 0.5 \text{ ms}$ 时，LCARS、CALLS 与 Round-robin 对 30 个倒立摆系统进行调度与控制的仿真结果。从图 8 和图 9 中可以看出，相比于 CALLS 和 Round-robin，LCARS 在所有设备的平均转角以及最大转角方面均取得更优的结果。其中，平均转角表示对 30 个倒立摆系统的转角取平均，最大转角表示仿真过程中 30 个倒立摆系统出现的最大转角。

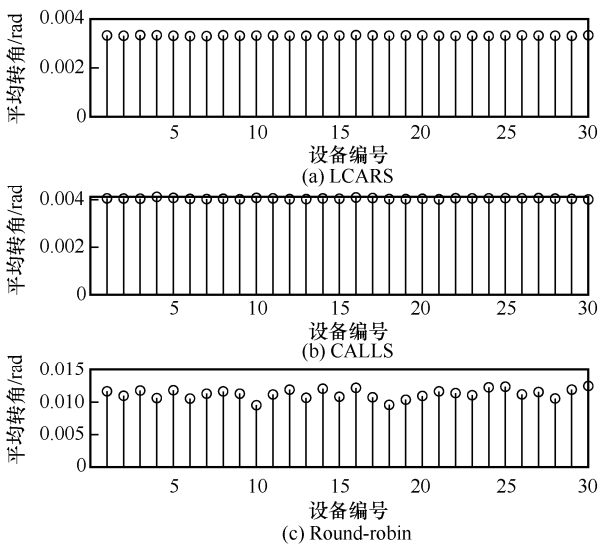


图 8 30 个倒立摆系统的平均转角

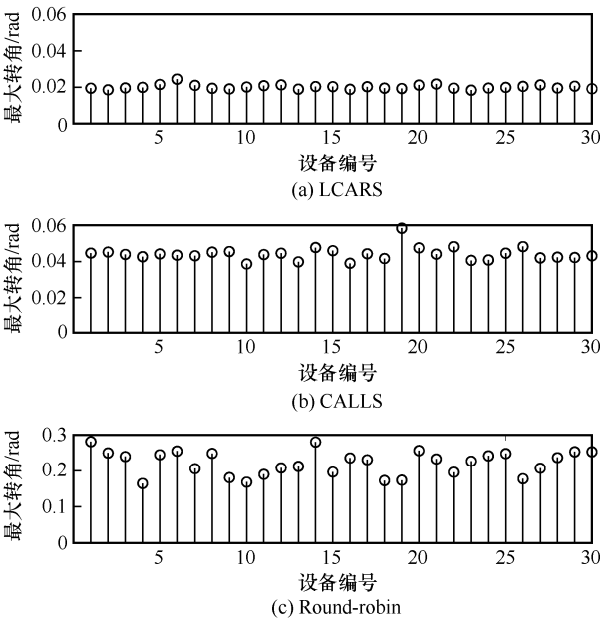


图 9 30 个倒立摆系统的最大转角

4.3.3 过程噪声对控制性能的影响

本节在 $\tau_{\max} = 0.5 \text{ ms}$ 情况下，分别选取不同的过程噪声强度 (Q_i)，然后采用 LCARS、CALLS^[19]与 Round-robin 对 30 个倒立摆系统进行调度与控制仿真。图 10 和图 11 给出了不同 Q_i 下 30 个倒立摆系统的平均转角与最大转角。从图 10 和图 11 中可以看出，随着 Q_i 增大，LCARS、CALLS 与 Round-robin 的平均转角与最大转角均增大，但 LCARS 相比于 CALLS 和 Round-robin 始终保持更优的控制性能。

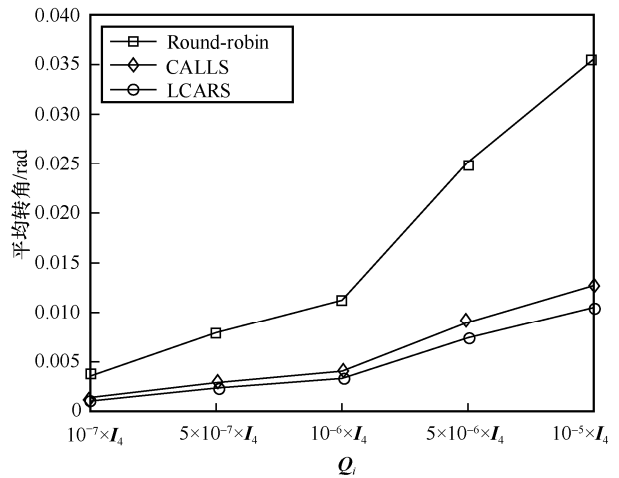


图 10 不同 Q_i 下的平均转角

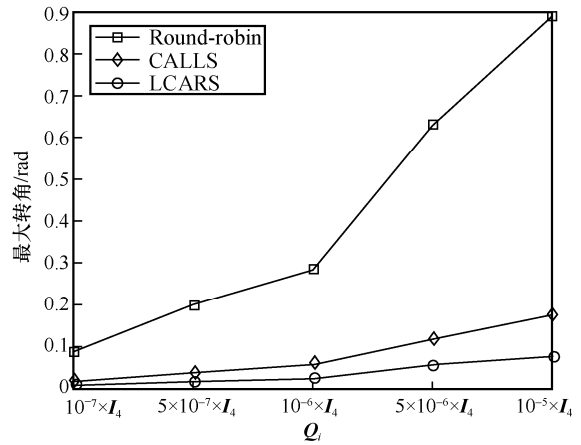


图 11 不同 Q_i 下的最大转角

4.3.4 支持设备的最大数量

本节分别在 $\tau_{\max} = 0.5 \text{ ms}$ 、 1.0 ms 与 1.5 ms 情况下，给出不同方法支持设备的最大数量。对于给定设备数量，如果在整个过程中所有设备均满足 $|\varphi_i| \leq 0.05 \text{ rad}$ ， $|x_i| \leq 0.5 \text{ m}$ ，则认为该方法支持当前设备数量。图 12 展示了当 τ_{\max} 取不同值时不同方法

支持设备的最大数量对比。显然,随着 τ_{\max} 的增加,LCARS、CALLS 与 Round-robin 支持设备的最大数量显著增加。此外,对于任意给定的 τ_{\max} ,LCARS 相比于 CALLS 和 Round-robin 均可以支持更多的设备。

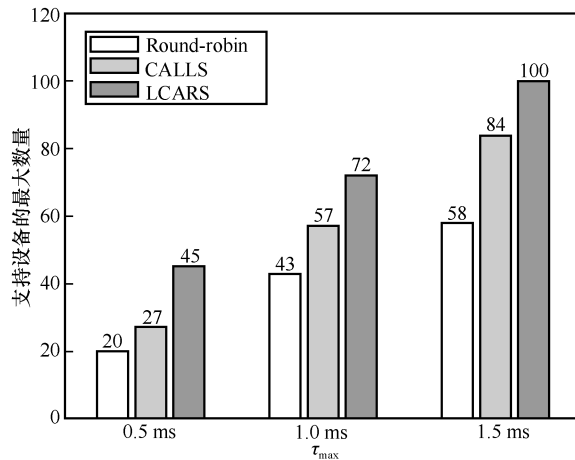


图 12 τ_{\max} 取不同值时不同方法支持设备的最大数量对比

5 结束语

本文提出一种面向 LQG 控制的 IEEE 802.11ax 网络资源调度方法 LCARS。根据 LQG 指标与 IEEE 802.11ax 传输可靠性的依赖关系,得到期望 LQG 指标最小化的资源调度问题模型,据此确定每次优先调度的 Wi-Fi 设备,并且在当前控制周期仍有剩余资源时,对传输失败的 Wi-Fi 设备进行重传,进而提高系统的可靠性。经过对于单级倒立摆系统的调度与控制仿真验证,LCARS 相比于现有方法在平均转角、最大转角以及支持设备的最大数量方面均取得更好的效果。LCARS 可应用于智能工厂中的自动导向车集群导航、机器人远程控制等典型 WNCs 应用,是保障 WNCs 控制性能的关键技术。

参考文献:

- [1] WOLLSCHLAEGER M, SAUTER T, JASPERNEITE J. The future of industrial communication: automation networks in the era of the Internet of things and industry 4.0[J]. IEEE Industrial Electronics Magazine, 2017, 11(1): 17-27.
- [2] LUVISOTTO M, PANG Z B, DZUNG D. High-performance wireless networks for industrial control applications: new targets and feasibility[J]. Proceedings of the IEEE, 2019, 107(6): 1074-1093.
- [3] ZHENG M, ZHAO Y H, SHI H G, et al. A flexible retransmission scheme for reliable and real-time transmissions in industrial wireless networks for factory automation[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2023, 72(8): 10867-10878.
- [4] BAUMANN D, MAGER F, WETZKER U, et al. Wireless control for smart manufacturing: recent approaches and open challenges[J]. Proceedings of the IEEE, 2021, 109(4): 441-467.
- [5] FILOSO D G, KUBO R, HARA K, et al. Proportional-based resource allocation control with QoS adaptation for IEEE 802.11ax [C]// Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC). Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-6.
- [6] TRAMARIN F, MOK A K, HAN S. Real-time and reliable industrial control over wireless LANs: algorithms, protocols, and future directions[J]. Proceedings of the IEEE, 2019, 107(6): 1027-1052.
- [7] CHEFFENA M. Propagation channel characteristics of industrial wireless sensor networks[wireless corner][J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2016, 58(1): 66-73.
- [8] LU C Y, SAIFULLAH A, LI B, et al. Real-time wireless sensor-actuator networks for industrial cyber-physical systems[J]. Proceedings of the IEEE, 2016, 104(5): 1013-1024.
- [9] 徐伟强, 胡四平, 汪亚明, 等. IEEE802.11 中多速率多节点公平的数据分组长度调整策略[J]. 通信学报, 2011, 32(2): 120-129.
- [10] XU W Q, HU S P, WANG Y M, et al. Packet size adjustment strategy for fairness in multi-rate and multi-node IEEE 802.11[J]. Journal on Communications, 2011, 32(2): 120-129.
- [11] LEI L, KUANG Y R, SHEN X S, et al. Optimal reliability in energy harvesting industrial wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(8): 5399-5413.
- [12] SHI H G, ZHENG M, LIANG W, et al. AODR: an automatic on-demand retransmission scheme for WIA-FA networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 70(6): 6094-6107.
- [13] WANG K D, PSOUNIS K. Efficient scheduling and resource allocation in 802.11ax multi-user transmissions[J]. Computer Communications, 2020, 152: 171-186.
- [14] BINOY B, VINEETH B S. Minimum delay scheduling under average power constraint for 802.11ax uplink[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Advanced Networks and Telecommunications Systems (ANTS). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-5.
- [15] GUPTA N, DAS S, MAITY M. FairSplit - an efficient near-optimal bandwidth splitting strategy for OFDMA in IEEE 802.11ax[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Communications. Piscataway: IEEE Press, 2022: 285-290.
- [16] SHI L, CHENG P, CHEN J M. Optimal periodic sensor scheduling with limited resources[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2011, 56(9): 2190-2195.
- [17] MAMDUHI M H, TOLIĆ D, MOLIN A, et al. Event-triggered scheduling for stochastic multi-loop networked control systems with packet dropouts[C]//Proceedings of the 53rd IEEE Conference on Decision and Control. Piscataway: IEEE Press, 2014: 2776-2782.
- [18] GATSIS K, PAJIC M, RIBEIRO A, et al. Opportunistic control over shared wireless channels[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2015, 60(12): 3140-3155.

- [18] MA Y H, GUO J L, WANG Y B, et al. Optimal dynamic transmission scheduling for wireless networked control systems[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2022, 30(6): 2360-2376.
- [19] EISEN M, RASHID M M, GATSIS K, et al. Control aware radio resource allocation in low latency wireless control systems[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(5): 7878-7890.
- [20] SCHENATO L, SINOPOLI B, FRANCESCHETTI M, et al. Foundations of control and estimation over lossy networks[J]. Proceedings of the IEEE, 2007, 95(1): 163-187.
- [21] WONGSATHAN C, SIRIMA C. Application of GA to design LQR controller for an inverted pendulum system[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Piscataway: IEEE Press, 2009: 951-954.
- [22] SHUANG L, JIAN F. Linear quadratic optimal controller design an inverted pendulum[C]//Proceedings of the International Symposium on Computer, Consumer and Control. Piscataway: IEEE Press, 2014: 416-418.
- [23] LIU J H, PORAT R, JINDAL N, et al. IEEE 802.11 ax channel model document[S]. 2014.
- [24] IEEE Computer Society LAN/MAN Standards Committee. IEEE standard for information technology-telecommunications and information exchange between systems-local and metropolitan area networks - specific requirements Part 11: wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications amendment 5: enhancements for higher throughput: IEEE 802.11n-2009[S]. 2009.
- [25] WILHELMI F, BARRACHINA-MUÑOZ S, BELLALTA B. On the performance of the spatial reuse operation in IEEE 802.11ax

WLANS[C]//Proceedings of the IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-6.

[作者简介]



郑萌（1983- ），男，辽宁鞍山人，博士，中国科学院沈阳自动化研究所研究员、博士生导师，主要研究方向为工业物联网、网络化控制系统等。



张雷（2000- ），男，辽宁朝阳人，中国科学院大学硕士生，主要研究方向为无线网络化控制系统、无线网络资源调度等。



梁炜（1974- ），女，内蒙古赤峰人，博士，中国科学院沈阳自动化研究所研究员、博士生导师，主要研究方向为工业物联网、网络信息安全等。