

基于非完美信道信息的无线控制系统随机接入方法

姜正莽, 王子宁, 马彪, 刘笑宇, 林敏

(南京邮电大学通信与信息工程学院, 南京 210003)

摘要: 针对具有多个控制回路共享频谱资源的无线控制系统, 提出了基于非完美信道状态信息的随机接入方法, 以实现系统的控制稳定性。首先, 在多个控制回路以固定概率接入远程控制器的场景下, 通过二次李雅普诺夫函数推导得到控制稳定性条件。其次, 建立以接入概率和发射功率为优化变量, 以系统总能耗最小为准则, 同时满足控制稳定性和发射功率限制为约束的优化问题。针对此非凸优化问题, 在仅能获得非完美信道状态信息的条件下, 提出将李雅普诺夫稳定性定理和伯恩斯坦不等式、连续凸逼近等数学方法相结合, 设计接入策略。仿真结果表明, 相比于现有典型的接入方案, 所提方案能够在保证控制性能的同时, 显著降低系统的能耗。

关键词: 无线控制系统; 李雅普诺夫函数; 随机接入; 非完美信道状态信息; 控制稳定性

中图分类号: TN92 **文献标志码:** A

Random Access Scheme Based on Imperfect Channel Information in Wireless Control Systems

JIANG Zhengmang, WANG Zining, MA Biao, LIU Xiaoyu, LIN Min

(School of Communications and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract: This paper addresses a wireless control system where multiple control loops share spectrum resources and proposes a random access scheme based on imperfect channel state information to achieve control stability. Firstly, in the scenario where multiple control loops access the remote controller with a fixed probability, control stability conditions are derived through the Lyapunov function. Secondly, an optimization problem is formulated with access probability and transmission power as variables, aiming to minimize the total energy consumption of the system while satisfying control stability and transmission power constraints. Since this optimization problem is non-convex and only imperfect channel state information (CSI) can be obtained, a design approach for the access strategy is proposed by combining the Lyapunov stability theorem with mathematical methods such as Bernstein inequality and continuous convex approximation. Simulation results demonstrate that the proposed scheme, compared to existing typical access solutions, can significantly reduce system energy consumption while ensuring control performance.

Key words: wireless control system; Lyapunov function; random access; imperfect channel state information; control stability

基金项目: 国家自然科学基金(62471255); 南京邮电大学引进人才自然科学研究启动基金(NY224068)。

收稿日期: 2024-02-26; **修订日期:** 2024-08-21

引言

第四次工业革命,即工业 4.0,着重关注工业环境的数字化转型,以实现定制化和灵活的生产^[1-2]。作为实现这一转型的关键框架,新兴的无线控制系统(Wireless control system, WCS)有潜力将传统的控制系统从物理电缆的限制中解放出来,为降低控制成本提供一种新的解决方案^[3-5]。一般而言,WCS由多个控制回路组成,在每个控制回路中常包含传感器、执行器和控制器^[6]。传感器感知环境信息,通过无线信道传递感知信息给控制器,而控制器则根据接收到的感知信息,计算控制命令,并传输给执行器以控制设备达到预定的稳定状态^[7-8]。WCS通过无线网络,将这些设备组合成一个有机的整体,从而建立一个高效灵活的控制网络,在物联网、传感器网络和工业自动化等多个领域具备广泛的应用前景^[9]。

由于无线信道的脆弱性和开放特性,WCS的控制性能极易受到环境因素干扰^[10-12]。较差的链接质量以及不同控制回路间的同频干扰,会导致数据包的大量丢失,显著降低数据包的传输成功率,从而降低 WCS 控制性能^[13-14]。针对此问题,现有的许多文献尝试通过资源分配,接入策略等方法,来提高 WCS 的控制性能。例如,文献[15]针对数据包碰撞问题,提出一种基于马尔可夫过程和状态感知的资源分配方案,给每个控制回路分配相互正交的频谱资源,以避免不同控制回路间的强干扰。在每个传感器采用固定功率随机发送感知信号给控制器的场景下,文献[16]提出一种基于信道感知的随机接入来保证系统的稳定性。文献[17]针对使用能量收集供电的无线网络化控制系统展开研究,提出了一种随机接入通信策略,根据信道和电池条件自适应调整接入机制以确保控制系统的稳定性。文献[18]提出了一种线性二次代价偏移量来评估非理想通信所引起的性能差距,建立了线性二次偏移指标与信息年龄(Age of information, AoI)之间的关系。基于该偏移指标,提出了一种基于 AoI 的调度策略。虽然上述工作对于无线控制系统的接入方案做出了较为深入的研究,但都假设可以准确知道信道状态信息,而由于估计误差和量化误差的存在,在现实场景中准确获取信道状态信息较为困难。此外,文献[15]给每个控制回路分配正交的频谱资源,频谱效率较低,而文献[16-17]以恒定功率发送信号,不涉及到功率的联合优化,会造成系统控制性能的损失。

针对上述问题,本文面向多个控制回路共享频谱资源的无线控制系统,提出了一种基于非完美信道状态信息的随机接入方案,以实现系统的控制稳定性。具体而言,在多个控制回路通过共享的无线信道上行接入远程控制器,且只能获取非完美信道状态信息(Channel state information, CSI)的条件下,建立了以控制回路接入概率和发射功率为优化变量,以系统总期望能耗最小为优化目标,以满足控制稳定性和发射功率限制为约束的优化问题。针对此问题,提出了一种基于伯恩斯坦不等式、连续凸逼近和李雅普诺夫稳定性定理的接入算法。最后,仿真结果验证所提方案相比于现有的接入方案[15-17]能够在保证控制性能的同时,显著降低系统能耗。

1 系统模型

针对图 1 所示的无线控制系统, M 个控制回路通过共享的无线信道发送传感信息给远程控制器,远程控制器则根据接收到的传感信息计算控制命令,并通过下行链路传输给每个执行器,实现

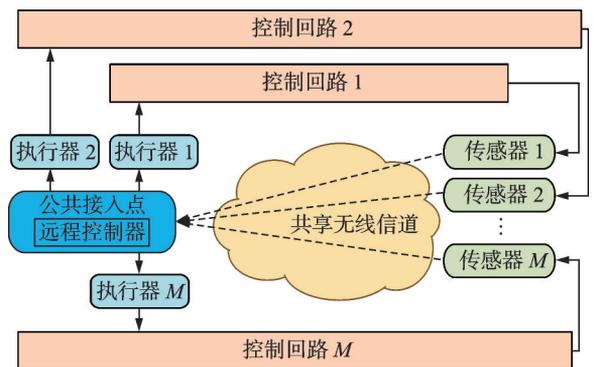


图 1 共享无线信道的多控制回路无线控制系统
Fig.1 Multi-loop wireless control system with shared wireless channel

每个控制回路的稳定。与文献[16]类似,假设控制命令的下行传输是理想的,而传感信息的上行传输是非理想的。此外,当同时存在2个以上控制回路接入无线信道时,会存在一定的概率发生碰撞,导致传输失败。不失一般性,假设碰撞概率为一固定常数。为了减轻数据包冲突,每个控制回路都采取一定的概率接入到远程控制器。此外,相比于现有文献[15-16],考虑到实际应用时系统通常只能获得从传感器到控制器的非完美CSI,因此研究更具实用性。

1.1 通信模型

在时隙 k ,第 i 个传感器独立且随机地以某个恒定概率 $\alpha_i \in [0, 1]$ 以及某个功率 $p_i \in [p_{\min}, p_{\max}]$ 发送传感信号。假设其发送的信号为 s_i ,满足 $E\{|s_i|^2\} = 1$,经过无线信道传播后,远程控制器端接收到的信号为

$$y_i = \underbrace{\beta_i h_i \sqrt{p_i} s_i}_{\text{期望信号}} + \underbrace{\sum_{j \neq i} \beta_j h_j \sqrt{p_j} s_j}_{\text{干扰信号}} + \underbrace{n_i}_{\text{噪声}} \quad (1)$$

式中: β_i 为一个概率为 α_i 的伯努利变量,当 $\beta_i = 1$ 时,表示传感器 i 发送信号; h_i 表示复信道增益,可以表示为

$$h_i = r \rho e^{-j \frac{2\pi f_c}{c} d_i} \quad (2)$$

式中: $r \sim CN(0, \delta^2)$ 服从瑞利分布, δ^2 为对应的方差, ρ 为自由空间损耗, c 为光速, f_c 为载波频率, d_i 为传感器到远程控制器的距离。在实际应用中,由于各种限制和环境因素,获取完美CSI是一项极具挑战性的任务。因此,本文旨在分析和推导在非完美CSI条件下的控制性能。与文献[19]类似,假设估计得到的信道状态随机存在随机高斯误差,则信道状态信息可以进一步表示为

$$h_i = \bar{h}_i + \Delta h_i \quad (3)$$

式中: \bar{h}_i 为估计信道, $\Delta h_i \sim N_C(0, \Delta R_i)$ 为信道误差,满足 $\Delta R_i > 0$,其中“ > 0 ”表示矩阵正定。

定义伯努利变量 $\eta_{i,k} \in \{0, 1\}$ 表示在时刻 k 控制回路 i 是否成功传输信号, $\eta_{i,k} = 1$ 表示信号成功传输,其主要会受到两个因素的影响。

(1)数据包是否正确解码。若传感器 i 的发射功率为 p_i ,噪声功率为 N_0 ,信道衰落系数为 h_i ,则第 i 个传感信号在控制器端的输出信噪比为

$$\text{SNR}_i = \frac{p_i |h_i|^2}{N_0} \quad (4)$$

当接收信号信噪比大于阈值 γ_{th} 时,则表示解码成功。然而,由于信道误差的影响,不能保证解码会成功,而是以一定概率发生。定义伯努利变量 $\varphi_{ii} \in \{0, 1\}$ 表示数据包是否正确解码,则第 i 个传感器传输数据包成功解码概率为

$$\Pr\{\varphi_{ii} = 1\} = \Pr\left\{\frac{p_i |h_i|^2}{N_0} \geq \gamma_{\text{th}}\right\} = q_{ii} \in (0, 1] \quad (5)$$

(2)当多个传感器同时通过共享的无线信道传输信息时,可能会发生碰撞。定义伯努利变量 $\varphi_{ij} \in \{0, 1\}$ 表示数据包是否发生碰撞,与文献[12]类似,设定当传感器同时传输时,数据包碰撞会以固定的概率 $q_{ij} \in (0, 1]$ 发生,则 $\Pr\{\varphi_{ij} = 1\} = q_{ij}$,传感器 i 没有与其他传感器同时传输产生碰撞的概率即为 $\prod_{j \neq i} [1 - \alpha_j q_{ji}]$ 。

综合数据包成功解码概率和数据包碰撞概率,信号成功传输与否的事件可用 $\eta_{i,k} =$

$\beta_i \varphi_{ii} \prod_{j \neq i} [1 - \beta_j \varphi_{jj}]$ 描述, 据此可以得到数据包传输成功概率为

$$\Pr(\eta_{i,k} = 1) = \alpha_i q_{ii} \prod_{j \neq i} [1 - \alpha_j q_{jj}] \quad (6)$$

1.2 控制模型

假设第 i 个传感器的离散状态转移过程为

$$\mathbf{x}_{i,k+1} = \mathbf{A}_i \mathbf{x}_{i,k} + \mathbf{B}_i \mathbf{u}_{i,k} + \mathbf{w}_{i,k} \quad (7)$$

式中: $\mathbf{x}_{i,k}$ 为系统状态变量, $\mathbf{u}_{i,k}$ 为系统控制输入, $\mathbf{w}_{i,k}$ 为状态抖动误差, 其不同控制回路、不同时刻之间均为独立同分布, 且服从均值为零、协方差为 $\mathbf{W}_i \geq 0$ 的高斯分布。其中“ ≥ 0 ”表示半正定。无线传感器将设备状态测量值 $x_{i,k}$ 通过无线信道发送给控制器/执行器, 当传输成功时 ($\eta_{i,k} = 1$), 控制器应用线性反馈 $\mathbf{u}_{i,k} = \mathbf{K}_i \mathbf{x}_{i,k}$; 当未接收到测量值时 ($\eta_{i,k} = 0$), 应用线性反馈 $\mathbf{u}_{i,k} = 0$ 。由此式(7)的线性切换模型可以进一步表示为

$$\mathbf{x}_{i,k+1} = \begin{cases} (\mathbf{A}_i + \mathbf{B}_i \mathbf{K}_i) \mathbf{x}_{i,k} + \mathbf{w}_{i,k} & \eta_{i,k} = 1 \\ \mathbf{A}_i \mathbf{x}_{i,k} + \mathbf{w}_{i,k} & \eta_{i,k} = 0 \end{cases} \quad (8)$$

不失一般性, 令 $\mathbf{A}_i + \mathbf{B}_i \mathbf{K}_i = \mathbf{A}_{c,i}$, $\mathbf{A}_i = \mathbf{A}_{o,i}$, 式(8)可以等价于

$$\mathbf{x}_{i,k+1} = \begin{cases} \mathbf{A}_{c,i} \mathbf{x}_{i,k} + \mathbf{w}_{i,k} & \eta_{i,k} = 1 \\ \mathbf{A}_{o,i} \mathbf{x}_{i,k} + \mathbf{w}_{i,k} & \eta_{i,k} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

与文献[17]类似, 系统矩阵 $\mathbf{A}_{c,i}$ 和 $\mathbf{A}_{o,i}$ 已知。并且, 当控制回路成功传输时, 系统动态由渐进稳定的闭环矩阵 $\mathbf{A}_{c,i}$ 描述, 传输失败时, 开环矩阵 $\mathbf{A}_{o,i}$ 则可能不稳定。

2 基于非完美 CSI 的随机接入方案

不失一般性采用二次李雅普诺夫函数在数学上描述系统控制性能的要求, 即^[16]

$$V_i(\mathbf{x}) = \mathbf{x}^T \mathbf{P}_i \mathbf{x} \quad \mathbf{x} \in \mathbf{R}^n \quad (10)$$

式中 \mathbf{P}_i 为正定矩阵。希望该非负函数 $V_i(\mathbf{x})$ 能够以一定的速率 $\rho_i \in (0, 1)$ 减小, 即 $V_i(\mathbf{x}_{i,k+1}) \leq \rho_i V_i(\mathbf{x}_{i,k})$ 。但是由于噪声的影响以及无线信道的随机性, 无法保证李雅普诺夫函数在每一个时间步上都以该速率减小, 因此, 希望 $V_i(\mathbf{x})$ 能以期望的形式减小, 即可得到如下稳定性条件

$$E[V_i(\mathbf{x}_{i,k+1}) | \mathbf{x}_{i,k}] \leq \rho_i V_i(\mathbf{x}_{i,k}) + \text{Tr}(\mathbf{P}_i \mathbf{W}_i) \quad (11)$$

若该表达式在每一时间步上都成立, 则可以得到

$$E[V_i(\mathbf{x}_{i,N}) | \mathbf{x}_{i,0}] \leq \rho_i^N V_i(\mathbf{x}_{i,0}) + \frac{1 - \rho_i^N}{1 - \rho_i} \text{Tr}(\mathbf{P}_i \mathbf{W}_i) \quad (12)$$

由此可以观察到, 当系统运行总时隙 N 趋于无穷时, 李雅普诺夫函数具有 $\text{Tr}(\mathbf{P}_i \mathbf{W}_i) / (1 - \rho_i)$ 的上界。

根据上述稳定性条件, 通过优化接入策略 $\alpha \in A$ 和功率控制 $p \in P$, 在保证控制稳定性的前提下, 最小化系统的总功率消耗。该问题在数学上可以表示为

$$\begin{aligned} & \min_{\alpha \in A, p \in P} \sum_{i=1}^m \alpha_i p_i \\ \text{(P1)} \quad & \text{s.t.} \quad \text{C1: } E[V_i(\mathbf{x}_{i,k+1}) | \mathbf{x}_{i,k}] \leq \rho_i V_i(\mathbf{x}_{i,k}) + \text{Tr}(\mathbf{P}_i \mathbf{W}_i) \quad i \in \{1, 2, \dots, M\} \\ & \quad \text{C2: } 0 \leq \alpha_i \leq 1 \quad i \in \{1, 2, \dots, M\} \\ & \quad \text{C3: } p_{\min} \leq p_i \leq p_{\max} \quad i \in \{1, 2, \dots, M\} \end{aligned} \quad (13)$$

式中:C1约束表示系统的控制要求,C2约束表示传感器接入概率限制,C3约束表示传感器功率限制。由于复杂的稳定性约束以及目标函数中的变量耦合,导致该问题是非凸的,难以直接求解。针对此问题,提出一种基于伯恩斯坦不等式,连续凸逼近的随机接入方案。首先,针对约束C1,将式(9)代入,有

$$E[V_i(\mathbf{x}_{i,k+1})|\mathbf{x}_{i,k}] = \Pr(\eta_{i,k}=1)\mathbf{x}_{i,k}^T \mathbf{A}_{c,i}^T \mathbf{P}_i \mathbf{A}_{c,i} \mathbf{x}_{i,k} + \Pr(\eta_{i,k}=0)\mathbf{x}_{i,k}^T \mathbf{A}_{o,i}^T \mathbf{P}_i \mathbf{A}_{o,i} \mathbf{x}_{i,k} + \text{Tr}(\mathbf{P}_i \mathbf{W}_i) \quad (14)$$

将式(11)代入式(14)中,可得

$$\begin{aligned} & \Pr(\eta_{i,k}=1)\mathbf{x}_{i,k}^T \mathbf{A}_{c,i}^T \mathbf{P}_i \mathbf{A}_{c,i} \mathbf{x}_{i,k} + \Pr(\eta_{i,k}=0)\mathbf{x}_{i,k}^T \mathbf{A}_{o,i}^T \mathbf{P}_i \mathbf{A}_{o,i} \mathbf{x}_{i,k} + \text{Tr}(\mathbf{P}_i \mathbf{W}_i) = \\ & \Pr(\eta_{i,k}=1)\mathbf{x}_{i,k}^T \mathbf{A}_{c,i}^T \mathbf{P}_i \mathbf{A}_{c,i} \mathbf{x}_{i,k} + [1 - \Pr(\eta_{i,k}=1)]\mathbf{x}_{i,k}^T \mathbf{A}_{o,i}^T \mathbf{P}_i \mathbf{A}_{o,i} \mathbf{x}_{i,k} + \\ & \text{Tr}(\mathbf{P}_i \mathbf{W}_i) \leq \rho_i V_i(\mathbf{x}_{i,k}) + \text{Tr}(\mathbf{P}_i \mathbf{W}_i) = \rho_i \mathbf{x}_{i,k}^T \mathbf{P}_i \mathbf{x}_{i,k} + \text{Tr}(\mathbf{P}_i \mathbf{W}_i) \end{aligned} \quad (15)$$

即

$$\Pr(\eta_{i,k}=1) \geq \frac{\mathbf{x}_{i,k}^T (\mathbf{A}_{o,i}^T \mathbf{P}_i \mathbf{A}_{o,i} - \rho_i \mathbf{P}_i) \mathbf{x}_{i,k}}{\mathbf{x}_{i,k}^T (\mathbf{A}_{o,i}^T \mathbf{P}_i \mathbf{A}_{o,i} - \mathbf{A}_{c,i}^T \mathbf{P}_i \mathbf{A}_{c,i}) \mathbf{x}_{i,k}} \quad (16)$$

该约束需对任何设备状态均成立,故而定义

$$c_i = \sup_{\mathbf{y} \neq \mathbf{0}} \frac{\mathbf{y}^T (\mathbf{A}_{o,i}^T \mathbf{P}_i \mathbf{A}_{o,i} - \rho_i \mathbf{P}_i) \mathbf{y}}{\mathbf{y}^T (\mathbf{A}_{o,i}^T \mathbf{P}_i \mathbf{A}_{o,i} - \mathbf{A}_{c,i}^T \mathbf{P}_i \mathbf{A}_{c,i}) \mathbf{y}} \quad (17)$$

实际上, c_i 表示每个系统*i*能够保证期望李雅普诺夫收敛速率 ρ_i 的最小数据包成功传输概率,它也可以被视为对共享无线信道的最低利用要求。因此,可以将约束C1重写为

$$c_i \leq \Pr(\eta_i=1) = \alpha_i q_{ii} \prod_{j \neq i} [1 - \alpha_j q_{ji}] \quad (18)$$

由于式(18)右侧函数中的变量耦合,导致其并不是一个凹函数,使得这成为一个非凸约束。然而,对式(18)两边取对数可以通过单调性保持变量的可行集。取对数后,式(18)右侧的乘积变为对数之和,即

$$\ln c_i \leq \ln \alpha_i + \ln q_{ii} + \sum_{j \neq i} \ln(1 - \alpha_j q_{ji}) \quad (19)$$

将式(19)代入约束C1中,则优化问题P1可以重新描述成

$$\begin{aligned} & \min_{\alpha \in A, \rho \in P} \sum_{i=1}^m \alpha_i p_i \\ & \text{s.t. C1: } \ln c_i \leq \ln \alpha_i + \ln q_{ii} + \sum_{j \neq i} \ln(1 - \alpha_j q_{ji}) \quad i \in \{1, 2, \dots, M\} \\ & \text{(P2) C2: } 0 \leq \alpha_i \leq 1 \quad i \in \{1, 2, \dots, M\} \\ & \text{C3: } p_{\min} \leq p_i \leq p_{\max} \quad i \in \{1, 2, \dots, M\} \\ & \text{C4: } \Pr \left\{ \frac{p_i |h_i|^2}{N_0} \geq \gamma_{\text{th}} \right\} \geq q_{ii} \quad i \in \{1, 2, \dots, M\} \end{aligned} \quad (20)$$

针对上述问题C4约束,将信道误差代入概率不等式,可以得到

$$\begin{aligned} & \Pr \left\{ \frac{p_i |h_i|^2}{N_0} \leq \gamma_{\text{th}} \right\} = \Pr \left\{ \left| (\bar{h}_i + \Delta h_i) \right|^2 \leq \frac{N_0 \gamma_{\text{th}}}{p_i} \right\} = \\ & \Pr \left\{ \Delta h_i^H \Delta h_i + 2\text{Re} \{ \Delta h_i^H \bar{h}_i \} \leq \frac{N_0 \gamma_{\text{th}}}{p_i} - \bar{h}_i^H \bar{h}_i \right\} \leq 1 - q_{ii} \end{aligned} \quad (21)$$

将估计误差 $\Delta \mathbf{h}_i$ 重写为 $\Delta \mathbf{h}_i = \Delta \mathbf{R}_i^{\frac{1}{2}} \mathbf{x}_i, \mathbf{x}_i \sim N_{\mathbb{C}}(0, \mathbf{I})$, 则解码失败概率可以被重新表示成

$$\Pr \left\{ \Delta \mathbf{h}_i^H \Delta \mathbf{h}_i + 2 \operatorname{Re} \{ \Delta \mathbf{h}_i^H \bar{\mathbf{h}}_i \} \leq \frac{N_0 \gamma_{\text{th}}}{p_i} - \bar{\mathbf{h}}_i^H \bar{\mathbf{h}}_i \right\} = \Pr \left\{ \mathbf{x}_i^H \Delta \mathbf{R}_i \mathbf{x}_i + 2 \operatorname{Re} \left\{ \mathbf{x}_i^H \Delta \mathbf{R}_i^{\frac{1}{2}} \bar{\mathbf{h}}_i \right\} \leq \frac{N_0 \gamma_{\text{th}}}{p_i} - \bar{\mathbf{h}}_i^H \bar{\mathbf{h}}_i \right\} \leq 1 - q_{ii} \quad (22)$$

约束式(22)仍然是一个困难的机会约束,下面考虑采用以下所述的 Bernstein II 型不等式^[19]将这种机会约束转换成确定性形式。

引理 1(Bernstein II 型不等式):定义 $G = \mathbf{x}^H \mathbf{A} \mathbf{x} + 2 \operatorname{Re} \{ \mathbf{x}^H \mathbf{a} \}$, 其中 $\mathbf{A} \in \mathbb{C}^{N \times N}$ 是一个复共轭埃尔米特矩阵, $\mathbf{a} \in \mathbb{C}^N, \mathbf{x} \sim N_{\mathbb{C}}(0, \mathbf{I})$ 。那么,对任意的 $\sigma \geq 0$, 有

$$\Pr \left\{ G \leq \operatorname{Tr}(\mathbf{A}) - \sqrt{2\sigma} \sqrt{\|\operatorname{vec}(\mathbf{A})\|^2 + 2\|\mathbf{a}\|^2} - \sigma s^-(\mathbf{A}) \right\} \leq \exp(-\sigma) \quad (23)$$

式中: $s^-(\mathbf{A}) = \max\{\lambda_{\max}(-\mathbf{A}), 0\}$, $\lambda_{\max}(\mathbf{A})$ 为 \mathbf{A} 的最大特征值。将 Bernstein II 型不等式应用至式(22),可以得到如下结论。

$$\Pr \left\{ \Delta \mathbf{h}_i^H \Delta \mathbf{h}_i + 2 \operatorname{Re} \{ \Delta \mathbf{h}_i^H \bar{\mathbf{h}}_i \} \leq \Delta \mathbf{R}_i - \sqrt{2\sigma_i} \sqrt{\|\Delta \mathbf{R}_i\|^2 + 2\|\Delta \mathbf{R}_i^{\frac{1}{2}} \bar{\mathbf{h}}_i\|^2} - \sigma_i s^-(\Delta \mathbf{R}_i) \right\} \leq \exp(-\sigma_i) \quad (24)$$

令

$$\Delta \mathbf{R}_i - \sqrt{2\sigma_i} \sqrt{\|\Delta \mathbf{R}_i\|^2 + 2\|\Delta \mathbf{R}_i^{\frac{1}{2}} \bar{\mathbf{h}}_i\|^2} - \sigma_i s^-(\Delta \mathbf{R}_i) - \frac{N_0 \gamma_{\text{th}}}{p_i} + \bar{\mathbf{h}}_i^H \bar{\mathbf{h}}_i \geq 0 \quad (25)$$

则 $1 - q_{ii} \leq \exp(-\sigma_i)$, 即 $q_{ii} \geq 1 - \exp(-\sigma_i)$ 。由于 $s^-(\Delta \mathbf{R}) = \max\{\lambda_{\max}(-\Delta \mathbf{R}), 0\} = 0$, 将其代入, 可将上述 C1、C4 约束分别修改为

$$\text{C1: } \ln c_i \leq \ln \alpha_i + \ln(1 - e^{-\sigma_i}) + \sum_{j \neq i} \ln(1 - \alpha_j q_{ji}) \quad (26)$$

$$\text{C4: } \Delta \mathbf{R}_i - \sqrt{2\sigma_i} \sqrt{\|\Delta \mathbf{R}_i\|^2 + 2\|\Delta \mathbf{R}_i^{\frac{1}{2}} \bar{\mathbf{h}}_i\|^2} - \frac{N_0 \gamma_{\text{th}}}{p_i} + \bar{\mathbf{h}}_i^H \bar{\mathbf{h}}_i \geq 0 \quad (27)$$

最后,为了解决目标函数以及约束 C4 的非凸性,对其进行一阶泰勒展开,将其转化为线性形式,将优化问题转化成凸形式,得最终优化问题 P3,可以采用凸优化工具包对其进行有效求解。

$$\begin{aligned} & \min_{\alpha \in A, p \in P} \sum_{i=1}^m (\alpha_i^{(n)} p_i + \alpha_i p_i^{(n)} - \alpha_i^{(n)} p_i^{(n)}) \\ & \text{s.t. C1: } \ln c_i \leq \ln \alpha_i + \ln(1 - e^{-\sigma_i}) + \sum_{j \neq i} \ln(1 - \alpha_j q_{ji}) \quad i \in \{1, 2, \dots, M\} \\ & \text{C2: } 0 \leq \alpha_i \leq 1 \quad i \in \{1, 2, \dots, M\} \\ & \text{(P3) C3: } p_{\min} \leq p_i \leq p_{\max} \quad i \in \{1, 2, \dots, M\} \\ & \text{C4: } \Delta \mathbf{R}_i - \left(\frac{\sigma_i}{\sqrt{2\sigma_i^{(n)}}} + \sqrt{\frac{\sigma_i^{(n)}}{2}} \right) \sqrt{\|\Delta \mathbf{R}_i\|^2 + 2\|\Delta \mathbf{R}_i^{\frac{1}{2}} \bar{\mathbf{h}}_i\|^2} + \frac{N_0 \gamma_{\text{th}}}{(p_i^{(n)})^2} p_i - \\ & \quad \frac{2N_0 \gamma_{\text{th}}}{p_i^{(n)}} + \bar{\mathbf{h}}_i^H \bar{\mathbf{h}}_i \geq 0 \quad i \in \{1, 2, \dots, M\} \end{aligned} \quad (28)$$

详细步骤见算法1。此外,根据文献[20],可计算得到所提算法的复杂度为 $O\left[24M^{\frac{5}{2}}(1+3M)\right]$ 。

算法1:最优接入概率、功率分配

Algorithm 1: Optimal access probability and power allocation

输入:随机取一个可行点 $\{\alpha_i^{(0)}, p_i^{(0)}, \sigma_i^{(0)}\}$,精度容忍度 ϵ ,迭代次数 $n=0$,最大迭代次数为 n_{\max} ;

(1) $n := n + 1$;

(2)解优化问题P3;

(3)更新 $\{\alpha_i^{(n)}, p_i^{(n)}, \sigma_i^{(n)}\}$;

(4)计算 $\eta = \sum_{i=1}^m |\alpha_i^{(n)} - \alpha_i^{(n-1)}| + \sum_{i=1}^m |p_i^{(n)} - p_i^{(n-1)}| + \sum_{i=1}^m |\sigma_i^{(n)} - \sigma_i^{(n-1)}|$;

(5)判断是否满足 $\eta \leq \epsilon$ 或 $n = n_{\max}$,若不满足,回到步骤(1)。

输出:最优接入概率以及功率分配 α_i, p_i 。

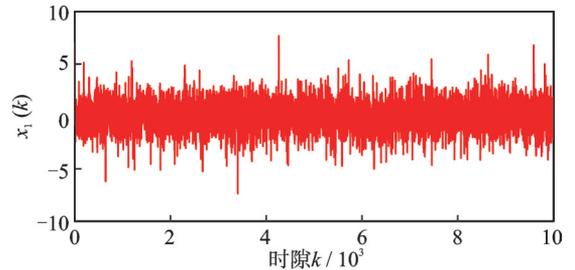
3 计算机仿真与分析

本节通过计算机仿真来验证所提出的随机接入方案的有效性和优越性。考虑一个标量的控制系统,其中有 $m=2$ 个传感器设备。与文献[17]类似,设定闭环系统参数为 $A_{c,1} = A_{c,2} = 0.4$,开环系统参数为 $A'_{o,1} = A'_{o,2} = 1.1$ 。此外,两个系统均受到均值为0, $W'_i = 1$ 的高斯噪声干扰。李雅普诺夫函数为 $V_i(x) = x_i^2$,信道估计 $\bar{h} = 3.53$, $\Delta R = 1$,成功解码阈值 $\gamma_{\text{th}} = 1$,传感器功率 $0.8 \leq p_i \leq 1.2$,最大迭代次数 $n_{\max} = 20$,精度容忍度 $\epsilon = 0.001$ 。当两个传感器同时传输时,数据包碰撞的概率为 $q_{12} = q_{21} = 0.6$ 。

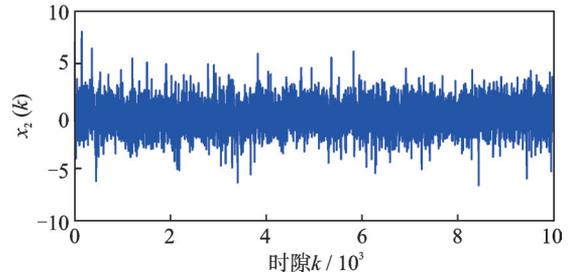
首先研究设备的状态转移过程,假设两个系统具有不同的控制性能要求,其中,系统1要求李雅普诺夫函数按 $\rho_1 = 0.95$ 的收敛速率期望减小,系统2则要求收敛速率为 $\rho_2 = 0.96$,即系统1的控制要求比系统2略高。图2绘制了每个设备状态转移过程。从图2可以看出,由于抖动误差的存在,系统状态在零值周围振荡。但每个控制回路的状态值不超过 ± 5 ,说明本文所提算法能够有效保证设备的状态收敛到预期值的附近,验证了本文所提方案具有较好的控制性能。

随后,为了研究本文所提算法的控制成本,图3绘制了在不同收敛速率的要求下,系统的平均控制成本的变化。考虑系统1和系统2收敛速率 ρ_i 相同, ρ_i 分别取 $[0.80, 0.85, 0.90, 0.95]$ 的情况下,观察系统的平均控制成本 $\frac{1}{T} \sum_{k=1}^T x_{i,k}^2$ 的变化。由式(12)可知,

系统的控制性能在长期的极限受到 $\text{Tr}(P_i W_i)/(1 - \rho_i)$ 的上界限制,将参数代入到该表达式,可以得到在 ρ_i 分别取 $[0.8, 0.85, 0.9, 0.95]$ 的情况下,期望的极限控制性能分别要低于 $[5, 6.67, 10, 20]$ 。在图3中,不同收敛速率下的控制成本在一段时间后都能达到一个稳定值,说明本文所提算法具有良好的控



(a) State transition diagram of device 1



(b) State transition diagram of device 2

图2 设备状态转移图

Fig.2 Plant state transition diagrams

制性能。此外,与理论推导相符合,各个系统在经过长时间的演变后,接近理论期望成本,说明了本文所提算法的优越性。

为了分析收敛速率对系统能耗的影响,图4绘制不同收敛速率要求下,系统平均总成本 $\frac{1}{T} \sum_{k=1}^T (\|x_{i,k}\|^2 + \tilde{\omega} p_{i,k})$ 的变化。如图4所示,可以观察到系统的平均总成本随着收敛速率 ρ_i 的减小而减小,这是因为更小的 ρ_i 意味着更高的控制要求,也就需要更高的传输成功概率,故而系统传输所需要的功率也随之增加,但更高的控制要求也导致系统状态收敛得更快,使系统的控制成本减小,两种因素的共同影响导致了该结果。此外,从图4可以观察到,针对具有不同收敛速率控制要求的系统,所提方案能够自适应不同的情况,通过对接入概率以及功率的联合优化,在保证系统控制稳定性的同时,使系统总成本降低。而固定功率方案只能以固定的功率传输信号,无法有效根据当前系统状态动态调整传输功率,导致了系统总成本的升高。

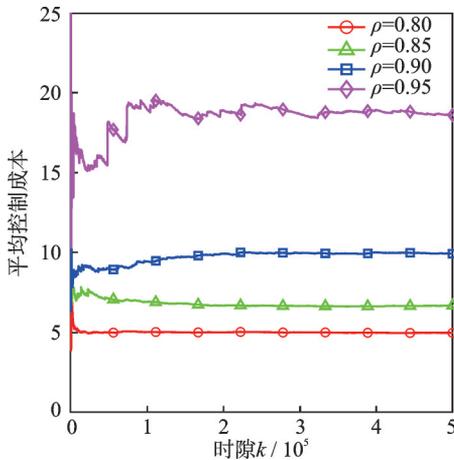


图3 不同收敛速率下平均控制成本对比

Fig.3 Comparison of average control cost under different convergence rates

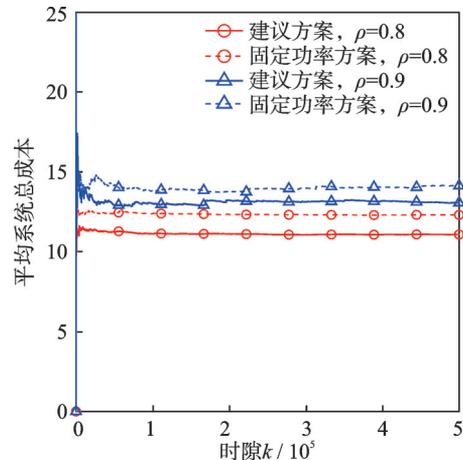


图4 不同收敛速率下平均系统总成本方案对比

Fig.4 Comparison of average total system cost under different convergence rates

进一步,图5绘制了不同解码阈值条件下,系统平均功率的变化。可以观察到,系统的平均功率随着成功解码阈值 γ_{th} 的增加而增加,这是因为随着 γ_{th} 值的增加,数据包解码成功的概率 $\Pr\left\{\frac{p_i |h_i|^2}{N_0} \geq \gamma_{th}\right\} = q_i \in (0, 1]$ 也会随之降低,在控制要求不变的情况下,就需要系统以更高的功率来保证数据包能够被正确解码以确保系统的控制稳定性。

最后,为了说明所提算法的优越性,图6绘制了不同方案下平均功率对比图。将所提方案与文献[15-18]中所提方案进行对比。文献[15]提出了一种基于马尔可夫过程和状态感知的资源分配方案,每个控制回路分配相互正交的频谱资源,且传感器采用固定功率随机发送感知信号。文献[16]提出一种基于信道感知的随机接入方案来保证系统的稳定性。文献[17]提出了一种随机接入通信策略,根据信道和电池条件自适应调整接入机制以确保控制系统的稳定性。文献[18]则提出一种基于AoI的动态感知资源分配方案,传感器根据由通信中断引起的成本偏移量决定调度策略。从图6可知,所提方案系统所需的平均功率显著低于其他几种方案,这是由于其他几种方案中的传感器总是以固定的功率传输信号,并未考虑到传输功率 p_i 与传感器接入概率 α_i 之间的关系,所提方案通过联合优化这两者,获取了总期望功耗最小的最优接入策略。

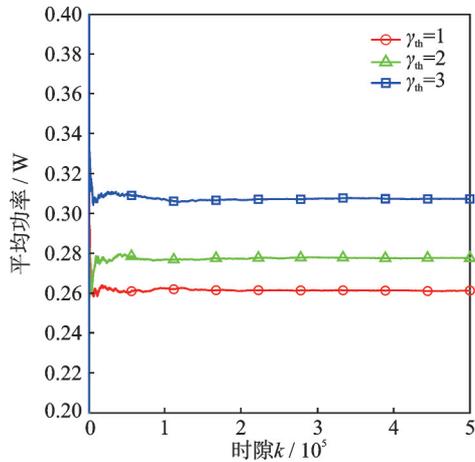


图5 不同解码阈值下平均功率对比

Fig.5 Comparison of average power under different decoding thresholds

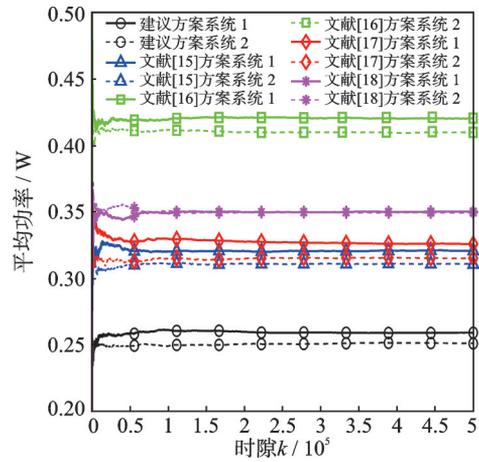


图6 不同方案下平均功率对比

Fig.6 Comparison of average power under different schemes

4 结束语

本文在仅已知非完美CSI的条件下,提出一种随机接入方案,在满足一定控制收敛速率条件下,最小化系统功耗。具体而言,通过研究通信系统与控制系统的关系,利用李雅普诺夫定理对控制约束进行等价,并采用分式规划和伯恩斯坦不等式求解了实现控制稳定性的最小解码成功概率。接下来,为了求解该非凸问题,利用泰勒展开将问题转化成凸优化形式,并提出一种迭代算法,求解得到发送功率和接入概率。最后,计算机仿真结果验证了该方法,在保证控制性能要求的前提下,能够显著降低功耗。

需要指出的是,本文仅研究了单天线系统,而单天线不能有效地减轻信道衰落的影响,将导致信道质量较差,因此需要增加发射功率来保证可靠控制。此外,本文只研究了通信传输功率这一单一的性能指标。因此,如何将多天线应用到无线控制系统来提高控制性能,以及研究控制系统的多个性能指标将会是未来的研究重点。

参考文献:

- [1] 于海斌,曾鹏,梁炜,等.无线化工业控制系统:架构、关键技术及应用[J].自动化学报,2023,49(3):540-549.
YU Haibin, ZENG Peng, LIANG Wei, et al. Wireless industrial control system: Architecture, key technologies and applications[J]. ACTA Automatica Sinica, 2023, 49(3): 540-549.
- [2] 杨婷,张嘉元,黄在起,等.工业控制系统安全综述[J].计算机研究与发展,2022,59(5):1035-1053.
YANG Ting, ZHANG Jiayuan, HUANG Zaiqi, et al. Survey of industrial control systems security[J]. Journal of Computer Research and Development, 2022, 59(5): 1035-1053.
- [3] 许方敏,伍丽娇,王翔,等.5G上行链路中基于预测的紧急资源分配方法研究[J].电子与信息学报,2022,44(2):611-619.
XU Fangmin, WU Lijiao, WANG Xiang, et al. Research on prediction based emergency resource allocation in 5G uplink[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2022, 44(2): 611-619.
- [4] WU Y, YANG Q, LI H, et al. Control-aware energy-efficient transmissions for wireless control systems with short packets[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(19): 14920-14933.
- [5] PILLAJO C, Hincapié R, Stochastic control for a wireless network control system (WNCS)[C]//Proceedings of 2020 IEEE ANDESCON. [S. l.]: IEEE, 2020: 1-6.
- [6] LIMA V, EISEN M, GATSIS K, et al. Resource allocation in wireless control systems via deep policy gradient[C]//

- Proceedings of the 21st International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC). [S. 1.]: IEEE, 2020: 1-5.
- [7] WANG Y, WU S, LEI C, et al. A review on wireless networked control system: The communication perspective[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2024, 11(5): 7499-7524.
- [8] HUANG K, LIU W, LI Y, et al. To sense or to control: Wireless networked control using a half-duplex controller for IIoT [C]//Proceedings of IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). [S. 1.]: IEEE, 2019: 1-6.
- [9] LIMA V, EISEN M, RIBEIRO A, Learning constrained resource allocation policies in wireless control systems[C]//Proceedings of 2020 59th IEEE Conference on Decision and Control (CDC). [S. 1.]: IEEE, 2020: 2615-2621.
- [10] CAO J, KURNIAWAN E, BOONKAJAY A, et al. Goal-oriented scheduling and control co-design in wireless networked control systems[C]//Proceedings of IEEE Global Communications Conference. [S. 1.]: IEEE, 2023: 1090-1095.
- [11] MA H, ZHOU S, Noisy sensor scheduling in wireless networked control systems: Freshness or precision[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2022, 11(5): 1107-1111.
- [12] LU X Z, XU Q M, WANG X L, et al. Full-loop AOI-based joint design of control and deterministic transmission for industrial CPS[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2023, 19(11): 10727-10738.
- [13] THONGSAKUL B, NUMSOMRAN A, TIPSUWANPORN V, et al. Event-based LQR control for rotary inverted pendulum using wireless networked control system[C]//Proceedings of the 23rd International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS). [S. 1.]: IEEE, 2023: 573-578.
- [14] QIAO Y, FU Y, YUAN M, Communication-control co-design in wireless networks: A cloud control AGV example[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2023, 10(3): 2346-2359.
- [15] SCHEUVENS L, HÖBLER T, SCHULZ P, et al. State-aware resource allocation for wireless closed-loop control systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 2021, 69(10): 6604-6619.
- [16] GATSIS K, RIBEIRO A, PAPPAS J G. Random access design for wireless control systems[J]. Automatica, 2018, 91: 1-9.
- [17] CALVO-FULLANA M, ANTÓN-HARO C, MATAMOROS J, et al. Random access communication for wireless control systems with energy harvesting sensors[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2020, 68: 3961-3975.
- [18] MA H, ZHOU S, ZHANG X, et al. Transmission scheduling for multi-loop wireless networked control based on LQ cost offset[C]//Proceedings of IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS). [S. 1.]: IEEE, 2020: 19-25.
- [19] MA S, HONG M, SONG E, et al. Outage constrained robust secure transmission for MISO wiretap channels[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(10): 5558-5570.
- [20] LI B, FEI Z, CHU Z, et al. Robust chance-constrained secure transmission for cognitive satellite-terrestrial networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(5): 4208-4219.

作者简介:



姜正莽(2001-),男,硕士研究生,研究方向:无线通信、通信信号处理,E-mail: jzm1319976982@gmail.com。



王子宁(1997-),男,博士研究生,研究方向:智能信号处理、无线通信。



马彪(2002-),男,硕士研究生,研究方向:智能反射面、凸优化算法。



刘笑宇(1996-),男,博士,讲师,研究方向:空天地一体化网络中的优化设计与性能分析。



林敏(1972-),通信作者,男,研究员,博士生导师,研究方向:无线通信、阵列信号处理,E-mail: linmin@njupt.edu.cn。

(编辑:陈珺)