

基于动态信道切换的无线网络化控制系统的资源调度策略^①

郝小梅^② 赵云波^③

(浙江工业大学信息工程学院 杭州 310023)

摘要 本文针对通信网络中存在竞争和非竞争信道的无线网络化控制系统,提出了一种基于估计器的信道选择策略,在保证控制系统稳定性的同时尽可能地节约了宝贵的非竞争信道资源。在无线网络化控制系统中,控制信号通过竞争信道传输时可能发生数据包丢失,导致执行器无法收到实时的控制信号。而传感器端未知控制信号的实际传输情况,因而也无法得知每个时刻执行器所使用的控制信号。针对这种情况,本文首先设计了估计器来估计执行器端上一时刻实际使用的控制信号,再通过信道选择策略来约束执行器端使用控制信号的误差。然后,在所提信道选择策略下设计控制器来保证控制系统稳定。最后,通过数值仿真验证了所提算法的有效性。

关键词 无线网络化控制,网络资源,动态信道切换,估计器,控制信号误差

0 引言

无线网络化控制系统(wireless networked control systems, WNCs)是一类利用无线网络实现传感器、控制器以及执行器之间数据传输的网络化控制系统^[1-3]。具有布线少、通信灵活、维护简单等优点。随着嵌入式系统、计算机控制、无线通信技术的快速发展,无线网络化控制系统在智能家居^[4]、智能电网^[5]、工业机器人遥控^[6]、车联网^[7, 8]等领域得到了更加广泛的应用。

相较于传统的点对点控制系统,无线网络化控制系统中的网络信道资源是有限的,多用户共享的无线通信网络更是加剧了这一问题。网络的信道资源指网络中的竞争信道和非竞争信道资源。其中,竞争信道指各个用户之间通过竞争的方式来抢占信道资源,“竞争”的方式更容易产生数据包传输的延时和丢失。非竞争信道指在某一段时隙中,信道提供给控制系统或其他用户专用^[9, 10],相较于竞争信道,非竞争信道的资源更加有限,例如在 IEEE 802.15.4 中每个周期内最多有 7 个用户使用非竞争信道传输数据^[11, 12]。并且在无线通信网络中,用户的加入和退出更加便捷,用户对数据传输的需求是随机的、突变的。所以根据时隙分配信道的非竞争信道接入相比于根据数据包的实际大小分配信道的竞争信道接入更容易造成信道资源浪费。

然而,在无线网络化控制系统中,不能仅仅考虑信道资源节省。由于控制系统实时性要求比较高,使用非竞争信道传输数据比使用竞争信道传输数据更能满足控制系统高实时性的要求。因为竞争信道传输数据产生的时延和丢包,会影响控制系统的性能,严重的甚至会导致控制系统失稳^[13, 14]。因此,设计一种控制算法在保证控制系统性能的同时减少网络资源的占用引起了广泛的关注^[15-17]。

很多现有的研究考虑的是单一信道下的信道资源占用率。文献[6]研究了在竞争信道中存在延迟和丢包下的控制问题,提出了一种事件触发动态输出反馈 H_∞ 控制方法。文献[18]针对竞争信道下存在丢包和量化误差的无线网络化控制系统提出了一种基于事件触发的控制算法,保证了系统在均方意义下稳定。文献[19]提出了采用非竞争信道传输数据下的一种自触发机制,通过比较上一次事件触发时刻和当前时刻的状态误差来决定是否发送当前状态信息。以上提及文献都是使用竞争或者非竞争中的一种信道进行数据传输,并通过事件触发机制来减少数据的传输,以此节省网络通信资源。值得注意的是,仅使用竞争信道的系统性能是不如仅使用非竞争信道下的系统性能,而仅使用非竞争信道又会过多的占用信道资源。然而有些协议例如 IEEE802.15.4,一个周期内同时存在竞争信道和非竞争信道,因此,通过合理利用竞争信道与非竞争

^①科技创新 2030—“新一代人工智能”重大项目(2018AAA0100801)、国家自然科学基金面上项目(62173317)、安徽省重点研发计划(202104a05020064)资助。

^②女,1996年生,硕士生;研究方向:网络化控制;E-mail:haoxiaomei_0920@qq.com

^③通信作者,E-mail:ybzhao@ustc.edu.cn

信道可以在保证系统性能的同时有效提高资源利用率。文献[20]首先提出了非竞争信道传输下的自触发采样，其次提出在每个使用非竞争信道传输之前尝试使用竞争信道传输，如果传输成功则可以节省一次非竞争信道传输。但该方法仅考虑了传感器到控制器这一段回路，且需要假设存在控制器到传感器的回传通道。一个更加合适的策略是根据控制系统性能动态选择合适的信道进行数据传输，控制系统性能在期望范围内时选择传输质量差但成本低的竞争信道，控制系统性能在期望范围之外时选择传输质量好但成本高的非竞争信道。然而控制系统的性能如何动态并定量地评估，以及如何根据评估结果进行信道切换，这对于提高资源利用率具有重大的意义。

基于以上分析，本文提出了基于估计器的信道选择(estimator based channel selection, EBCS)策略，使 WNCSSs 在保证系统稳定的同时尽可能节省非竞争信道的使用。EBCS 策略由控制信号估计器、信道选择器和控制器三个部分组成。首先，所提方法针对采用竞争信道传输数据后，传感器无法得知执行器所采用的控制信号这一问题，设计了估计器来实时估计执行器上一时刻采用的控制信号。然后，通过比较待传输的控制信号与估计出的控制信号的误差来选择信道，并在所建立的约束下设计控制器保证系统渐进稳定。最后，通过数值仿真验证了所提出方法的有效性。本文组织如下：第 1 节描述研究问题，第 2 节详细说明了 EBCS 策略，第 3 节给出了闭环系统渐进稳定的充分条件和控制器的求解方法，第 4 节通过仿真验证了 EBCS 策略的有效性，第 5 节总结全文。

1 问题描述

本文考虑的 WNCSSs 如图 1 所示。被控对象用如下线性离散系统描述

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \quad (1)$$

其中 $x \in \mathbb{R}^n$ ， $u \in \mathbb{R}^m$ 分别为控制系统的状态和控制输入， $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ， $B \in \mathbb{R}^{n \times m}$ 为系统矩阵。

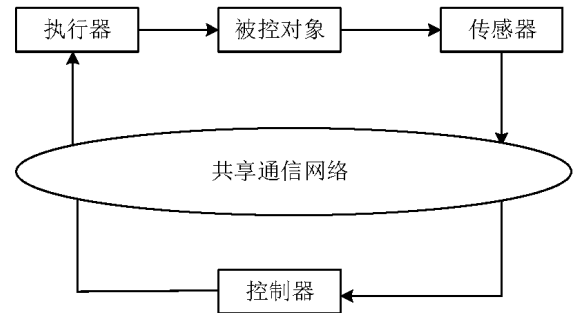


图 1 WNCSSs 控制框图

图 1 中的无线网络与其他用户共享，传感器、控制器、执行器是时间同步的。无线网络包含竞争信道和非竞争信道，可以通过协调器进行信道调度，选择合适的信道进行数据传输。例如 IEEE 802.15.4 协议中包括竞争访问阶段和非竞争访问阶段，设备向协调器申请非竞争访问阶段，由协调器分配非竞争阶段时隙^[21]。使用非竞争信道时，可以认为是完美传输。

本文主要考虑无线网络造成的数据包丢失的影响。这是由于无线通信下的网络化控制系统一般规模较小，因而时延在其中往往并不起决定性作用，并且由于控制系统实时性的要求，超过一个采样周期未抵达的数据包一般会主动丢弃。

当控制系统闭环回路使用非竞争信道时，可以认为无丢包发生，而使用竞争信道时，闭环系统存在随机丢包。定义 $r(k)$ 表示闭环系统数据传输是否成功，即

$$r(k) = \begin{cases} 1, & x(k), u(k) \text{ 均传输成功} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

本文要解决的问题是：多用户共享通信网络的 WNCSSs 中，设计合适的信道选择策略和控制器，使得系统在保持稳定的前提下尽可能减少非竞争信道的使用次数，节省信道资源。

2 EBCS 策略设计

在本节中，针对共享通信网络中存在竞争和非竞争信道的 WNCSSs 设计了 EBCS 策略。该策略的主要思想如下：1)为了应对传感器无法确定执行器实际使用的控制信号的问题，设计控制信号估计器来估计上一个时刻执行器使用的控制信号。2)利用

估计器得到的控制信号和最新状态信号设计合适的信道切换规则，动态约束执行器端所使用的控制信号与实际控制信号的误差。3)在上述基础上，设计合适的状态反馈控制器保证控制系统渐进稳定。根据上述思想，设计了控制信号估计器、信道选择器和控制器三个部分，控制框图如图 2 所示。接下来将分别对这三个部分做详细说明。

2.1 控制信号估计器设计

传感器在 $k+1$ 时刻，可以得到被控对象 $k+1$ 时刻以前的所有状态数据，但由于无线网络通信中存在数据包的丢失，传感器无法得到控制器实际使

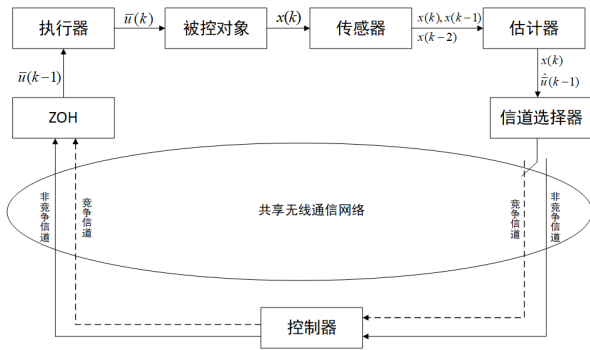


图 2 EBCS 策略控制流程图

用的控制信号 $\bar{u}(k)$ 。为了帮助信道选择，约束执行器使用的控制信号误差在给定阈值内。在传感器端设计控制信号估计器来实时估计 $\bar{u}(k)$ ，由于引入了 $\bar{u}(k)$ ，(1)式被重写为

$$x(k+1) = Ax(k) + B\bar{u}(k) \quad (3)$$

通过代数运算可得到

$$B\bar{u}(k) = x(k+1) - A^2x(k-1) - AB\bar{u}(k-1) \quad (4)$$

为了得到 $\bar{u}(k)$ 的表达式，设计矩阵 G 使得 GB 为非奇异矩阵，(4)式左右两边同乘以 $(GB)^{-1}G$ 可得

$$\bar{u}(k) = \tilde{A}\bar{u}(k-1) + \tilde{B}\eta(k-1) \quad (5)$$

其中 $\tilde{A} = -(GB)^{-1}GAB$ ， $\tilde{B} = (GB)^{-1}G$ ， $\eta(k-1) = x(k+1) - A^2x(k-1)$ ，结合(3)式和(5)式可得

$$\begin{cases} \bar{u}(k) = \tilde{A}\bar{u}(k-1) + \tilde{B}\eta(k-1) \\ \tilde{y}(k) = \tilde{C}\bar{u}(k) \end{cases} \quad (6)$$

其中 $\tilde{y}(k) = x(k+1) - Ax(k)$ ， $\tilde{C} = B$ 。对(6)式构建如下估计器

$$\begin{aligned} \hat{u}(k) &= \tilde{A}\hat{u}(k-1) + \tilde{B}\eta(k-1) \\ &\quad + L(\tilde{y}(k-1) - \tilde{C}\hat{u}(k-1)) \end{aligned} \quad (7)$$

其中 $L \in \mathbb{R}^{m \times n}$ 且满足 $\tilde{A} - L\tilde{C}$ 赫尔维兹稳定。

定义估计误差 $\hat{e}(k) = \hat{u}(k) - \bar{u}(k)$ ，将(7)式代入计算有

$$\begin{aligned} \hat{e}(k) &= (\tilde{A} - L\tilde{C})(\hat{u}(k-1) - \bar{u}(k-1)) \\ &= (\tilde{A} - L\tilde{C})^k (\hat{u}(0) - \bar{u}(0)) \end{aligned} \quad (8)$$

由此，可得当 $k \rightarrow \infty$ 时， $\hat{u}(k) \rightarrow \bar{u}(k)$ 。

注 1: 传感器无法得到控制器实际使用的控制信号，原因主要有两点：其一，并不是所有执行器都具有发送数据的能力，比如水箱的阀门，这种情况下，同在被控对象一侧的传感器和执行器之间无法通信；其二，执行器具有发送数据的能力时，传感器和执行器之间可以实现通信，主要有有线和无线两种通信方式，有线传输会增加一定的成本，并且实施难度依赖被控对象所处的环境，无线传输可能会出现数据包丢失，因此传感器无法保证能一直获取到执行器实际收到的控制信号。

2.2 信道选择器设计

注意到，控制系统不同时刻对于传输的需求并不是相同的。当控制系统性能较差时，控制系统急需新的控制数据来防止系统性能进一步恶化。因此，反馈信道和前向信道同时选择非竞争信道以加快数据的传输。而当控制系统性能在可接受的范围时，系统对传输的需求相对较低。因此，反馈信道和前向信道同时选择竞争信道以节省更多的通信资源。本文在传感器和控制器之间设计一个信道选择器(如图 2 所示)来评估控制系统对数据传输的急迫性，从而实时选择传输信道。

定义

$$\theta(k) = \begin{cases} 1 & \text{闭环系统使用竞争信道} \\ 0 & \text{闭环系统使用非竞争信道} \end{cases} \quad (9)$$

在信道选择器构建如下规则，

$$\begin{cases} e_s^T(k)\Phi e_s(k) < \frac{1}{2}x^T(k)\Omega x(k) - \hat{e}^T(k-1)\Phi\hat{e}(k-1) & \theta(k)=1 \\ e_s^T(k)\Phi e_s(k) \geq \frac{1}{2}x^T(k)\Omega x(k) - \hat{e}^T(k-1)\Phi\hat{e}(k-1) & \theta(k)=0 \end{cases} \quad (10)$$

其中 $e_s(k) = u(k) - \hat{u}(k-1)$ ， $\Phi = B^T P B$ ， P 和 Ω 为待求的参数，具体计算方法将在第 3 节中做详细说明。 $\hat{e}(k) = (\tilde{A} - L\tilde{C})^k \hat{e}(0)$ 为估计误差。

注 2: 一般情况下估计误差是未知的，但对于初值已知的情况下，即 $\hat{e}(0)$ 上界已知，估计误差也能够通过 $(\tilde{A} - L\tilde{C})^k \hat{e}(0)$ 来表示和计算。

引理 1: 对于任意的正定矩阵 P 和矩阵 E ， F ，存在如下不等式关系^[22]

$$E^T P F + F^T P E \leq E^T P E + F^T P F \quad (11)$$

引理 2: 根据(10)式构建的信道切换规则，可以得到，

$$\begin{cases} \bar{e}^T(k)\Phi\bar{e}(k) < x^T(k)\Omega x(k) & \theta(k)=1 \\ \bar{e}^T(k)\Phi\bar{e}(k) \geq x^T(k)\Omega x(k) & \theta(k)=0 \end{cases} \quad (12)$$

其中 $\Phi = B^T P B$ ， P 和 Ω 为(10)式信道切换规则中待求的参数， $\bar{e}(k) = u(k) - \bar{u}(k)$ 。

证明: 根据(10)式，当闭环系统采用竞争信道传输数据时有，

$$e_s^T(k)\Phi e_s(k) < \frac{1}{2}x^T(k)\Omega x(k) - \hat{e}^T(k-1)\Phi\hat{e}(k-1) \quad (13)$$

通过简单的代数运算可得

$$2e_s^T(k)\Phi e_s(k) + 2\hat{e}^T(k-1)\Phi\hat{e}(k-1) < x^T(k)\Omega x(k) \quad (14)$$

通过引理 1 可得如下不等式

$$\begin{aligned} \hat{e}^T(k-1)\Phi e_s(k) + e_s^T(k)\Phi\hat{e}(k-1) \\ < e_s^T(k)\Phi e_s(k) + \hat{e}^T(k-1)\Phi\hat{e}(k-1) \end{aligned} \quad (15)$$

因此，联立(14)式和(15)式可得

$$(e_s(k) + \hat{e}(k-1))^T \Phi (e_s(k) + \hat{e}(k-1)) < x^T(k)\Omega x(k) \quad (16)$$

而 $e_s(k) + \hat{e}(k-1) = u(k) - \bar{u}(k-1)$ ，根据控制器设计部分可知，执行器端采用零阶保持，所以有

$$\bar{e}^T(k)\Phi\bar{e}(k) < x^T(k)\Omega x(k) \quad (17)$$

综上，所以引理 2 成立，证毕。

注 3: 信道选择器使用 $u(k)$ 计算信道切换的判断规则，是由于所提方法采用状态反馈控制器，其反馈增益矩阵 K 是提前求解出来的，因此信道选择器可以通过已知的状态计算得到所对应的 $u(k)$ 。

2.3 控制器设计

闭环系统选择竞争信道传输数据时会出现随机丢包，在这种情况下执行器无法接收到当前时刻的控制数据。在大多数无线网络化系统的研究中，当执行器未接收到数据包时，主要采取零输入或者零阶保持的方法。本文假设执行器在未接收到数据包的时刻选择零阶保持。

设计状态反馈控制器 K 对系统进行控制

$$u(k) = Kx(k) \quad (18)$$

执行器实际使用的控制数据 $\bar{u}(k)$ 为

$$\bar{u}(k) = r(k)u(k) + (1-r(k))\bar{u}(k-1) \quad (19)$$

因此闭环系统可以写为

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + B\bar{u}(k) \\ &= Ax(k) + B\bar{u}(k) - Bu(k) + Bu(k) \\ &= (A + BK)x(k) - B\bar{e}(k) \end{aligned} \quad (20)$$

3 稳定性分析和控制增益设计

接下来将在(10)式的切换规则下，得到闭环系统(20)渐进稳定的充分条件。

定理 1 若存在正定矩阵 P ， Ω 和反馈控制增益 K ，在 $\bar{e}^T(k)B^T P B\bar{e}(k) < x^T(k)\Omega x(k)$ 的信道切换规则的约束下，其中 $\bar{e}(k) = u(k) - \bar{u}(k)$ ，使得如下矩阵不等式成立，则闭环系统(20)渐近稳定。

$$\begin{pmatrix} -\frac{1}{2}P^{-1} & 0 & A+BK \\ * & -\frac{1}{2}\Omega^{-1} & I \\ * & * & -P^{-1} \end{pmatrix} < 0 \quad (21)$$

证明: 定义李雅普诺夫函数如下

$$V(x(k)) = x^T(k)Px(k) \quad (22)$$

其中 P 为正定对称矩阵, 可以得到

$$\begin{aligned} \Delta V(x(k)) &= V(x(k+1)) - V(x(k)) \\ &= x^T(k+1)Px(k+1) - x^T(k)Px(k) \end{aligned} \quad (23)$$

将闭环系统(20)式代入到(23)式有

$$\begin{aligned} \Delta V(x(k)) &= ((A+BK)x(k) - B\bar{e}(k))^T P((A+BK)x(k) \\ &\quad - B\bar{e}(k)) - x^T(k)Px(k) \\ &= x^T(k)((A+BK)^T P(A+BK) - P)x(k) \\ &\quad - \bar{e}^T(k)B^T P(A+BK)x(k) \\ &\quad + \bar{e}^T(k)B^T PB\bar{e}(k) \\ &\quad - x^T(k)(A+BK)^T PB\bar{e}(k) \end{aligned} \quad (24)$$

通过引理 1 有以下不等式成立

$$\begin{aligned} &-x^T(k)(A+BK)^T PB\bar{e}(k) \\ &- \bar{e}^T(k)B^T P(A+BK)x(k) \\ &\leq x^T(k)(A+BK)^T P(A+BK)x(k) \\ &\quad + \bar{e}^T(k)B^T PB\bar{e}(k) \end{aligned} \quad (25)$$

将(25)式代入到(24)式可得

$$\begin{aligned} \Delta V(x(k)) &\leq x^T(k)(2(A+BK)^T P(A+BK) - P)x(k) \\ &\quad + 2\bar{e}^T(k)B^T PB\bar{e}(k) \\ &< 0 \end{aligned} \quad (26)$$

通过信道切换规则的约束, 可以将(26)式重写为

$$\begin{aligned} \Delta V(x(k)) &\leq x^T(k)(2(A+BK)^T P(A+BK) - P)x(k) \\ &\quad + 2x^T(k)\Omega x(k) \\ &< 0 \end{aligned} \quad (27)$$

通过 Schur 补引理可以得到(21)式, 定理 1 得证。

注 4: 所提方法通过在传感器端建立约束, 确保执行器所使用的控制信号与控制产生的控制信号之间的误差始终小于给定阈值, 然后在该条件下求解稳定控制器。

定理 2: 若存在正定矩阵 X , $\tilde{\Omega}$ 和矩阵 Y , 在 $\bar{e}^T(k)B^T PB\bar{e}(k) < x^T(k)\Omega x(k)$ 的信道切换规则约束下, 其中 $\bar{e}(k) = u(k) - \bar{u}(k)$, 使得以下不等式成立, 则闭环系统(20)渐近稳定。

$$\begin{pmatrix} -\frac{1}{2}X & 0 & AX + BY \\ * & -\frac{1}{2}\tilde{\Omega} & X \\ * & * & -X \end{pmatrix} < 0 \quad (28)$$

其中 $X = P^{-1}$, $\tilde{\Omega} = \Omega^{-1}$, $Y = KX$ 。

证明: 通过对(21)式分别左乘和右乘对角矩阵可以得到(28)式。

上述 EBCS 策略可以总结为算法 1。

算法 1: EBCS 策略

- 1 通过(28)式求解矩阵 P , Ω , K 。
 - 2 设计估计器的增益 L , 构建估计器。
 - 3 初始化系统状态 $x(0)$, 估计器初值 $\hat{u}(0)$ 。
 - 4 在 0, 1 时刻采用非竞争信道传输数据。
 - 5 通过(7)式估计器得到 $\hat{u}(k-1)$ 。
 - 6 通过(18)式得到 $u(k)$, 从而计算出 $e_s(k)$ 。
 - 7 通过(8)式计算得到 $\hat{e}(k-1)$ 。
 - 8 信道选择器根据(10)式的切换规则来选择合适的信道进行数据传输。
 - 9 重复步骤 5, 6, 7, 8。
-

注 5: 所提算法在初始 0, 1 时刻需要采用非竞争信道传输, 这是由于设计的控制信号估计器使用了 $k-2$ 时刻的系统状态数据, 为了不失一般性, 所以本算法在初始时刻选用非竞争信道传输保证数据的准确性。

注 6: 文献[23]考虑有界丢包和马尔可夫丢包下的网络化控制问题。然而, 很多情况下我们无法

得知通信网络的丢包上界，也无法对丢包率进行精确建模，本文所提方法并未对丢包进行假设，通过采用竞争和非竞争信道切换的方式来保证控制系统稳定。

4 数值仿真

在本节中将用两个数值仿真的例子来验证所提 EBCS 策略的有效性。

例 1 考虑一个四阶倒立摆模型^[22]：

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \quad (29)$$

其中系统矩阵为

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0.0991 & 0.0136 & 0.0004 \\ 0 & 0.9818 & 0.2789 & 0.0136 \\ 0 & -0.0023 & 1.1598 & 0.1053 \\ 0 & -0.0474 & 3.2764 & 1.1598 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0.0091 \\ 0.1822 \\ 0.0232 \\ 0.4743 \end{bmatrix}$$

系统的初始状态为： $x(0) = [0.98, 0, 0.2, 0]^T$ 。根

据定理 2，可以求得

$$\Omega = \begin{bmatrix} 0.0162 & 0.0004 & -0.0000 & 0.0002 \\ 0.0004 & 0.0121 & -0.0011 & -0.0013 \\ -0.0000 & -0.0011 & 0.0155 & 0.0019 \\ 0.0002 & -0.0013 & 0.0019 & 0.0055 \end{bmatrix}$$

$$K = [43.9715 \quad 21.1309 \quad -63.8711 \quad -12.5582]$$

$$P = \begin{bmatrix} 206.01 & 68.75 & -156.19 & -30.38 \\ 68.75 & 25.02 & -56.49 & -11.17 \\ -156.19 & -56.49 & 129.72 & 25.36 \\ -30.38 & -11.17 & 25.36 & 5.02 \end{bmatrix}$$

给定 $G = [1 \quad 2 \quad 3 \quad 4]$ 使得 GB 可逆。设计估计器增益如下

$$L = [-0.0258 \quad -0.5170 \quad -0.0658 \quad -1.3460] \quad (30)$$

再根据(7)式构建估计器。

当网络的闭环丢包率为 0.2 时，使用所提算法的仿真结果如图 3-图 5 所示。图 3 为系统在当前网络环境下，通过采用所提的 EBCS 策略的系统状态轨迹图。可以看出，所提算法能保证系统渐进稳定。图 4 给出了控制信号估计器的估计效果。由图可知，所采用的估计器能够渐进收敛到执行器真实使用的控制信号。图 5 为丢包率 0.2 时每个时刻信道

的使用情况。通过图 5 可知，本文所提的 EBCS 策略通过利用竞争信道一定程度上缓解了非竞争信道的压力，提高了信道资源利用率。

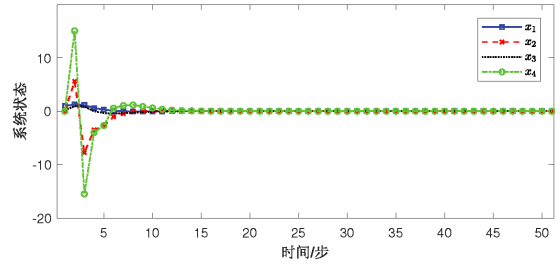


图 3 EBCS 策略下的系统状态轨迹图

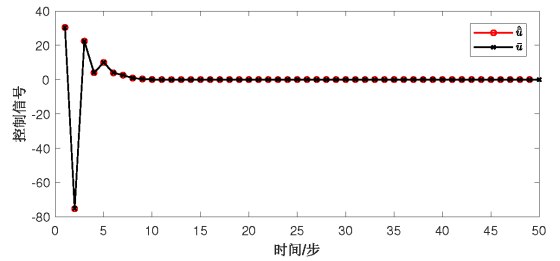


图 4 EBCS 策略下的控制信号图

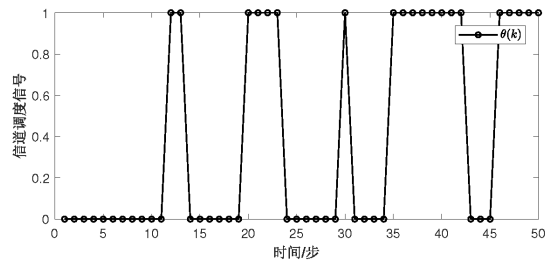


图 5 EBCS 策略下的信道调度情况

例 2 继续考虑四阶倒立摆系统模型(29)，当网络丢包率为 0.4 时，所提 EBCS 算法和 LQR 算法的仿真结果如图 6-图 8 所示。图 6 为系统在当前网络环境下，采用所提的 EBCS 策略下的系统状态轨迹图。可以看出，所提算法在不同丢包率下都能保证系统渐进稳定。图 7 为丢包率为 0.4 时所提的 EBCS 策略在每个时刻信道的使用情况。图 8 为当前网络环境下采用竞争信道加 LQR 控制器的控制效果，由图可知，仅仅依靠竞争信道无法保证系统在较大的丢包率下保持稳定。而所提算法通过合理切换竞争和非竞争信道在保证系统性能的同时提高了资源利用率。

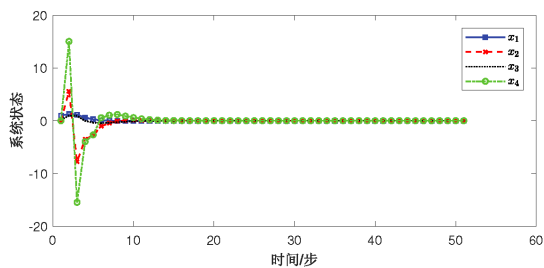


图 6 EBCS 策略下的系统状态轨迹图

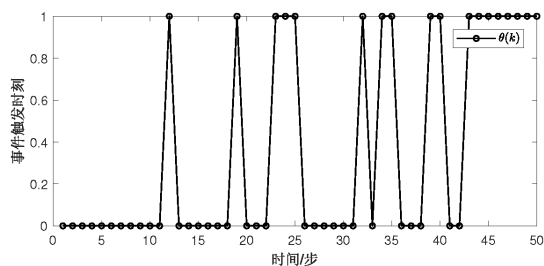


图 7 EBCS 策略下的信道调度情况

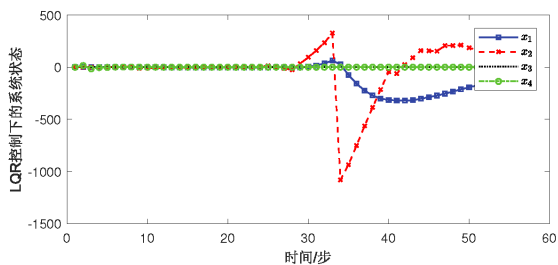


图 8 LQR 控制下的系统状态轨迹图

5 结论

本文针对通信网络中存在竞争信道和非竞争信道的 WNCSSs 设计了 EBCS 策略。通过证明和仿真说明了 EBCS 策略在保证控制系统稳定性的同时，通过充分利用网络中存在的竞争信道来尽可能地节省宝贵的非竞争信道资源。EBCS 策略能广泛的应用于通过动态信道切换，平衡控制系统性能和网络资源以及网络丢包特性无法建模的无线网络化控制系统中。在未来的工作中将进一步考虑系统状态方程存在不确定的情况，以更贴近工程实际情况。

参考文献

[1] Zhang X M, Han Q L, Ge X, et al. Networked control systems: A survey of trends and techniques [J]. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2019, 7(1): 1-17.
 [2] 张奇, 刘斌. 具有时延和丢包的非线性网络控制系统的切换稳定性研究 [J]. *高技术通讯*, 2020, 30(10): 1068-1077.

[3] 佟世文, 钱殿伟, 于庆林, et al. 基于简化模型预测的网络化控制系统设计 [J]. *控制工程*, 2021.
 [4] Chhetri C, Motti V. Identifying Vulnerabilities in Security and Privacy of Smart Home Devices; proceedings of the National Cyber Summit, F, 2020 [C]. Springer.
 [5] Sivaranjani S. A networked control systems framework for smart grids with integrated communication [D], 2018.
 [6] Bai J, Wang Y, Zhao L Y. Event-triggered H ∞ control for NCS with time-delay and packet losses [J]. *IMA Journal of Mathematical Control and Information*, 2020, 37(3): 918-934.
 [7] 董超, 陶婷, 冯斯梦, et al. 面向无人机自组网和车联网的媒体接入控制协议研究综述 [J]. *电子与信息学报*, 2022, 44: 1-13.
 [8] Wei Y, Ge G. Control of autonomous platoon under networked communication effect [J]. *Control Theory & Applications*, 2011.
 [9] Johari S, Krishna M B. TDMA based contention-free MAC protocols for vehicular ad hoc networks: A survey [J]. *Vehicular Communications*, 2021, 28: 100308.
 [10] Ajmi N, Helali A, Lorenz P, et al. SPEECH-MAC: Special purpose energy-efficient contention-based hybrid MAC protocol for WSN and Zigbee network [J]. *International Journal of Communication Systems*, 2021, 34(1): e4637.
 [11] Gupta R, Biswas S. Priority based IEEE 802.15. 4 MAC by varying GTS to satisfy heterogeneous traffic in healthcare application [J]. *Wireless Networks*, 2020, 26(3): 2287-2304.
 [12] Tolani M, Sunny A, Singh R K. Energy-efficient adaptive GTS allocation algorithm for IEEE 802.15. 4 MAC protocol [J]. *Telecommunication Systems*, 2021, 76(3): 329-344.
 [13] Wang Z, Fukushima S. Control strategy for networked control systems with time delay and packet dropout using linear matrix inequalities [J]. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2020, 2020(1): 1-11.
 [14] Elahi A, Alfi A, Modares H. H ∞ Consensus of Homogeneous Vehicular Platooning Systems With Packet Dropout and Communication Delay [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2021.
 [15] Sun L, Wu J. Schedule and control co-design for networked control systems with bandwidth constraints [J]. *Journal of the Franklin Institute*, 2014, 351(2): 1042-1056.
 [16] Sadi Y, Ergen S C. Energy and delay constrained maximum adaptive schedule for wireless networked control systems

-
- [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2015, 14(7): 3738-3751.
- [17] Deng L, Tan C, Zhang F, et al. Joint design of control policy and network scheduling policy for wireless networked control systems: Theory and application [J]. *Information Sciences*, 2021, 575: 563-586.
- [18] Xi Z. Mean-square stability of networked control systems with event driven state quantisation and packet loss [J]. *IET Control Theory & Applications*, 2018, 12(7): 980-984.
- [19] Eqtami A, Dimarogonas D V, Kyriakopoulos K J. Event-triggered control for discrete-time systems; proceedings of the Proceedings of the 2010 american control conference, F, 2010 [C]. IEEE.
- [20] Zhao Y, Xu D, He J, et al. Model-Based Network Scheduling and Control for Systems over the IEEE 802.15.4 Network [J]. *Journal of Systems Science and Complexity*, 2021, 34(1): 281-297.
- [21] Araújo J, Mazo M, Anta A, et al. System architectures, protocols and algorithms for aperiodic wireless control systems [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2013, 10(1): 175-184.
- [22] Yang H, Xu Y, Zhang J. Event-driven control for networked control systems with quantization and Markov packet losses [J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2016, 47(8): 2235-2243.
- [23] Xiong J, Lam J. Stabilization of linear systems over networks with bounded packet loss [J]. *Automatica*, 2007, 43(1): 80-87.

Dynamic channel switching based resource scheduling strategy for wireless networked control systems

Hao Xiaomei Zhao Yunbo

(College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023)

Abstract

This paper proposes a channel selection strategy based on estimator for the wireless networked control system with contention and non-contention channels in the communication network, which saves the precious non-contention channel resources as much as possible while ensuring the stability of the control system. In a wireless networked control system, data packet loss may occur when the control signal is transmitted through the contention channel, so that the actuator cannot receive the real-time control signal. However, the sensor terminal does not know the actual transmission of the control signal, so it is impossible to know the control signal used by the actuator at each moment. In view of this situation, this paper first designs an estimator to estimate the control signal actually used by the actuator at the last moment, and then uses the channel selection strategy to constrain the error of the control signal used by the actuator. Then, a controller is designed under the proposed channel selection strategy to ensure the stability of the control system. Finally, the effectiveness of the proposed algorithm is verified by numerical simulation.

Key words: Wireless networked control systems, network resources, dynamic channel switching, estimator, control signal error