

# 基于状态反馈的无人机通信接入 拥塞动态控制研究

苏彩玉<sup>1</sup>, 万海斌<sup>2</sup>, 韦金日<sup>3</sup>

(1. 广西工业职业技术学院 电子信息学院, 南宁 530001;

2. 广西大学 计算机与电子信息学院, 南宁 530004;

3. 广西工业职业技术学院 继续教育学院, 南宁 530001)

**摘要:** 为解决复用信道内的通信接入拥塞问题, 需要控制无人机通信链路中数据信息样本的实时累积量, 故基于状态反馈研究无人机通信接入拥塞动态控制方法; 建立信道复用模型, 并借助 MAC 连接协议, 定义通信数据包, 实现对无人机集群通信节点接入行为的处理; 按照状态反馈模型完善状态观测器结构, 求解通信数据的离散化反馈表达式, 在划分通信优先级条件的同时, 确定无人机队列的实时调度关系, 完成无人机通信行为控制; 根据动态阈值窗口定义条件, 确定通信链路长度, 再联合相关通信数据样本, 计算链路时延的具体数值, 完成动态控制方法的设计; 实验结果表明, 应用设计方法可将通信链路中数据信息样本实时累积量控制在  $5.7 \times 10^{13}$  MB 之下, 能够较好解决复用信道内的通信接入拥塞问题, 符合实际应用需求。

**关键词:** 状态反馈; 无人机复用信道; 通信拥塞; 动态控制; MAC 连接协议; 队列调度; 阈值窗口; 链路时延

## Research on Dynamic Control of UAV Communication Access Congestion Based on State Feedback

SU Caiyu<sup>1</sup>, WAN Haibin<sup>2</sup>, WEI Jinri<sup>3</sup>

(1. School of Electronic Information, Guangxi Vocational & Technical Institute of Industry, Nanning 530001, China;

2. School of Computer, Electronic and Information, Guangxi University, Nanning 530004, China;

3. Continuous Education College, Guangxi Industrial Vocational and Technical College, Nanning 530001, China)

**Abstract:** To address the issue of communication access congestion in the channel reuse, it is necessary to control the real-time cumulative amount of data samples in the communication links of drones. Therefore, a dynamic control method based on state feedback is studied for drone communication access congestion. A channel reuse model is established, and with the assistance of MAC connection protocol, communication data packets are defined to achieve the access behaviors of communication nodes in a drone cluster. Based on the state feedback model, the structure of a state observer is improved to solve the discrete feedback expression of communication data. At the same time, the communication priority conditions are divided to determine the real-time scheduling relationship of drone queues and complete the control of drone communication behaviors. By defining conditions based on a dynamic threshold window, the length of the communication link is determined, and in conjunction with the relevant communication data samples, the specific value of the link delay is calculated to design the dynamic control method. Experimental results demonstrate that this design method can control the real-time cumulative amount of data samples in the communication link below  $5.7 \times 10^{13}$  Mb, it effectively solves the problem of communication access congestion in the channel reuse and meets practical application requirements.

**Keywords:** state feedback; UAV multiplexing channel; communication congestion; dynamic control; MAC connection protocol; queue scheduling; threshold window; link delay

## 0 引言

由于基站设备与飞行器之间距离远, 无人机通信必须借助多个完全开放的信道组织进行数据传输<sup>[1]</sup>。最常见的信道组织为复用信道, 但在通信数据传输过程中, 由于其对数据信息参量的负载能力有限, 导致数据信息样本在通

信链路中容易过度累积, 从而引起复用信道内通信接入拥塞问题<sup>[2]</sup>。

为了解决这一问题, 已有多位学者针对这一问题展开了研究, 并取得了一定的研究成果。王博文等人<sup>[3]</sup>基于联盟图博弈提出了无人机通信控制算法, 根据关键信息简化结果, 确定远程传输链路的拓扑连通特性, 再通过权衡优

收稿日期: 2023-05-11; 修回日期: 2023-06-15。

基金项目: 广西高校中青年骨干教师科研基础能力提升项目(2022KY1296)。

作者简介: 苏彩玉(1985-), 女, 大学本科, 工程师。

万海斌(1979-), 男, 博士, 副教授。

引用格式: 苏彩玉, 万海斌, 韦金日. 基于状态反馈的无人机通信接入拥塞动态控制研究[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(6): 104-110.

化处理的方式, 确定通信链路内数据信息样本的实时拥塞程度。王浩同等人<sup>[4]</sup>基于区块链构建了通信控制模型, 通过定义无人机个体及集群之间数据共享关系的方式, 制定通信动作协同指令, 再按照去中心化处理原则, 对已累积数据信息样本进行按需分配。上述两种方法均取得了一定的成效, 但对于通信链路中数据信息样本实时累积量的控制能力仍然有限, 不足以完全解决复用信道内的通信接入拥塞问题。为了进一步解决这一问题, 提出基于状态反馈的无人机通信接入拥塞动态控制方法。

状态反馈模型可以实时地获取通信链路中的反馈信号与状态信息, 并对其进行线性处理, 从而快速调节控制参数, 保证通信链路的稳定性和可靠性<sup>[5]</sup>。此外, 状态反馈模型还可以根据通信链路的实际状况对带宽进行动态分配, 根据实际需求合理利用通信资源, 同时避免通信链路的过度拥塞<sup>[6]</sup>。这些优势可以提高通信链路的性能, 减少通信故障的发生, 从而提升无人机飞行的安全性和可靠性。

## 1 无人机集群通信节点接入

在对无人机集群通信节点接入行为进行控制前, 应首先研究无人机集群通信节点接入问题。在信道复用模型的基础上, 设置 MAC 协议连接文件, 再联合相关数据样本参量, 求解通信数据包表达式, 以下将对上述内容展开深入研究。

### 1.1 信道复用模型设计

信道复用是一种利用有限频谱资源同时传输多个用户数据的技术。通过在通信链路终端保持开放连接状态, 实现双向传输能力的通信端口可以进行正向和逆向传输。信道复用不仅可以将远距离的无人机与地面通信基站连接起来, 还能实现快速传输数据样本, 避免信息样本在通信链路中累积过多<sup>[7]</sup>。信道复用模型由无人机飞行器与信道链路终端之间的信号互传行为网络和信道链路终端与地面通信基站之间的通信数据反馈行为网络组成。在信道复用模型中, 飞行器设备同时控制多个下级链路终端, 这些终端节点只能将其存储的通信数据样本反馈给原始飞行器。另一方面, 各级终端节点将信息参量反馈至地面通信基站, 实现数据的传输与调度, 同时也可以进行信道互传行为<sup>[8]</sup>。具体的信道复用模型结构如图 1 所示。

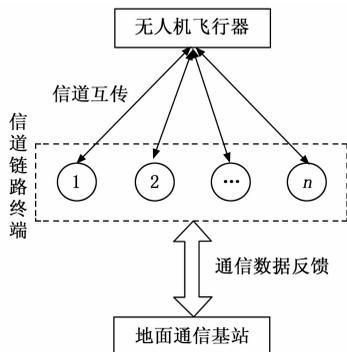


图 1 无人通信信道的复用模型结构

信道链路终端在复用模型作用下进行双向通信时, 必须经历一定的等待时间, 这就表示链路终端节点必须具有一定的数据存储能力, 在无人机飞行器、地面通信基站未进入相应状态时, 待传输信息在终端体系中暂时存储, 但为避免通信接入拥塞行为的出现, 数据信息样本的瞬时存储量不宜过大。

### 1.2 MAC 连接协议设置

MAC 连接协议是完善信道复用模型所遵循的协议文件, 同时作用于信号互传行为与通信数据反馈行为。由于通信数据信息无法在无人机飞行器与地面通信基站之间直接传输, 所以在定义 MAC 连接协议时, 还需考虑信道链路终端内节点对象对于信息参量的实时传输能力。CSMA/CA 是一种常见的 MAC 连接协议, 适用于无线网络中节点共享无线信道的场景。它使用载波监听机制来减少冲突并提供较好的信道复用性能。此外, CSMA/CA 还具备传输数据前进行 RTS/CTS (请求发送/清除发送) 帧传输的机制, 可以处理信号互传行为和通信数据反馈行为, 也能适应实时传输需求, 并在竞争期间动态地调整竞争窗口大小来优化传输效率。基于以上优势, 本文选择 CSMA/CA 进行 MAC 连接协议的设置。则信道链路终端内节点对象的实时传输能力表达式可定义为:

$$p = \frac{\chi \bar{\mathbf{i}}(O)}{\delta_1 \cdot \delta_2 \cdot \dots \cdot \delta_n} \quad (1)$$

式中,  $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n$  分别为  $n$  个信道链路终端节点的定义参数, 且  $\delta_1 \neq 0, \delta_2 \neq 0, \dots, \delta_n \neq 0$  的不等式取值条件同时成立,  $\bar{o}$  表示无人机通信数据的单位传输均值,  $\bar{\alpha}$  表示信道链路内数据样本共享参数均值,  $\mathbf{i}$  为信道互传行为向量,  $\chi$  为通信数据反馈行为向量。在已知信道链路终端内节点对象实时传输能力的情况下, 对于 MAC 连接协议的设置, 还要求通信数据样本传输行为必须保持统一性原则。通信数据样本传输方向同时为正向时, 表示信道复用模型开放状态为由无人机飞行器方向指向地面通信基站方向; 通信数据样本传输方向同时为逆向时, 表示信道复用模型开放状态为由地面通信基站方向指向无人机飞行器方向。

在公式 (1) 的基础上, 可将 MAC 连接协议连接条件  $O$  表示为:

$$O = \frac{\beta p}{(i+1) \frac{u'}{u}} \quad (2)$$

式中,  $\beta$  为信道复用模型中无人机通信数据的编码系数,  $i$  为 MAC 协议文本的瞬时连接参数,  $u$  为基于 MAC 原则的通信数据编码参数,  $u'$  为参数  $u$  的一次求导结果。为避免无人机通信数据在信道复用模型中出现传输受限的情况, 信道链路终端节点的开放数量必须完全负载飞行器设备与地面通信基站之间的数据传输需求, 至此完成了对于 MAC 连接协议的设置。

### 1.3 数据包表达式求解

通信数据包是包含所有无人机通信样本的信息参量集

由于无人机飞行器与地面通信基站之间的距离较远,

合, 由于数据参量的传输完全符合信道复用模型的定义原则, 所以严格遵照 MAC 连接协议文件选取信息参量。包状集合在存储通信数据文本时, 对于所涉及参量的排列, 遵循“由小及大”的原则, 即前端数据样本所携带通信文件的数量水平明显大于后端数据样本<sup>[9]</sup>。对于地面通信基站而言, 在检索数据样本时, 如果已完成通信文件获取任务, 则不会再提取新的信息参量, 这就使得通信数据包的完整性得到了较好的保障。无人机通信数据在复用信道组织内的传输特征  $\bar{I}$  的定义式如下:

$$\bar{I} = (\gamma - 1) \cdot \frac{U}{\varphi \cdot |\Delta T|} \quad (3)$$

式中,  $\gamma$  为基于状态反馈条件所选择的通信数据样本整合参数,  $U$  为复用信道内无人机通信数据排列向量,  $\Delta T$  为无人机通信数据的单位传输时长,  $\varphi$  为复用信道组织内的通信数据编码参数。

联立式 (2) (3), 可将无人机通信数据包定义式  $Q$  表示为:

$$Q = \left\{ y \mid y = \frac{O \cdot R^{1/\epsilon}}{|I|} \right\} \quad (4)$$

式中,  $y$  为无人机通信数据包集合中的一个随机物理量, 且  $y \neq 0$  的不等式取值条件恒成立,  $R$  为通信数据样本的实时存储参量,  $\epsilon$  为复用信道组织内的数据样本检索参数。在无人机通信链路中, 通信数据包集合的定义, 要求  $R$  参数的取值应属于  $[1, +\infty)$  的数值区间, 且为满足复用信道组织对于数据样本参量的实时传输需求, 单位时间内, 必须有大量通信数据响应 MAC 连接协议的调度, 由此实现对无人机通信数据包的求解<sup>[10]</sup>。

## 2 基于状态反馈模型的无人机通信行为控制

地面基站对于无人机通信行为的控制, 应联合已接入的无人机集群通信节点, 定义通信数据的离散化反馈条件, 再根据优先级划分条件, 确定无人机队列之间的实时调度关系。

### 2.1 状态反馈模型设计

#### 2.1.1 状态观测器连接结构完善

状态观测器是无人机通信接入行为控制元件, 遵循状态反馈模型搭建。结合信号转换设备、通信状态跟踪器和通信状态观测器等连接部件, 可调节复用信道组织对数据信息参量的负载能力, 从而在促进通信数据快速传输的同时, 借助 MAC 连接协议, 调取数据包集合中的信息参量并以此实现按需分配无人机通信链路组织<sup>[11]</sup>。通信状态观测器负载于无人机通信平台与复用传输回路之间, 既可以感知通信数据样本所处的实时传输位置, 也能够调节信息参量的实时输出行为。从功能上看, 其结构对已接入无人机通信数据样本的调节具有双向反馈的特征<sup>[12]</sup>。完整的状态观测器连接结构如图 2 所示。

规定  $q_1, q_2, \dots, q_n$  表示  $n$  个不相等的无人机通信数据传输状态定义参量, 其取值满足如公式 (5) 所示的表达式:

$$q_1, q_2, \dots, q_n \in Q \quad (5)$$

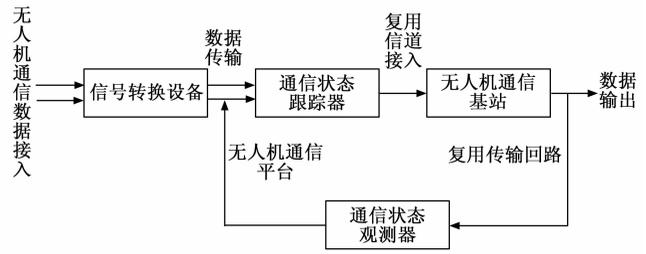


图 2 状态观测器主要连接结构

设  $w_1, w_2, \dots, w_n$  分别表示与  $q_1, q_2, \dots, q_n$  匹配的数据样本观测向量, 且  $q_1 \neq q_2 \neq \dots \neq q_n \neq 0, w_1 \neq w_2 \neq \dots \neq w_n \neq 0$  的不等式条件同时成立,  $\Delta Q$  表示无人机通信数据传输状态观测参数的单位累积量。在上述物理量的支持下, 联立公式 (5), 可将状态观测器的调节作用表达式  $W$  定义为:

$$W = \left( \frac{w_1}{q_1} \cdot \frac{w_2}{q_2} \cdot \dots \cdot \frac{w_n}{q_n} \right) \cdot |\Delta Q| \quad (6)$$

状态反馈模型对无人机通信数据样本的定义条件较为宽泛, 故在设计接入拥塞动态控制方法时, 需要求解通信数据的离散化反馈表达式, 并以此为基础, 限制状态观测器结构对通信数据参量的约束。

#### 2.1.2 通信数据离散化反馈处理

离散化反馈条件是基于状态反馈模型推导的数据样本整合标准, 在无人机通信链路中, 由于信道复用模型为信息参量提供了双向传输环境, 所以在定义离散化反馈条件时, 应选择双向性参量指标进行计算, 如方向性参数与离散反馈向量<sup>[13]</sup>。方向性参数就是指无人机通信数据在通信链路内的传输方向参数, 常表示为  $r'$ , 当其取值大于零时, 表示无人机通信数据在信道复用模型中存在正向传输行为; 当其取值小于零时, 表示无人机通信数据在信道复用模型中存在逆向传输行为。离散反馈向量常表示为  $\phi$ , 状态反馈模型规定, 在单位通信周期内, 无人机飞行器、地面通信基站之间不可能存在数据样本传输量为零的情况, 所以该项物理量的取值恒大于自然数零<sup>[14]</sup>。设  $\tau$  表示信道复用模型中的数据样本实时反馈系数,  $\hat{E}$  表示基于状态反馈模型所选择的无人机通信数据标记特征,  $E'$  表示数据样本在无人机通信链路中的离散化分别参量, 联立公式 (6), 推导通信数据离散化反馈条件计算式  $Y$  如下:

$$Y = W \frac{(\tau^2 - 1)\hat{E}}{\phi} \cdot r'(E') \quad (7)$$

在无人机通信链路中, 如果同时存在数据样本参量的顺序、逆序传输行为, 表示复用信道组织保持双向开放状态。在当前情况下, 通信数据样本的离散化分布密度较小, 地面通信基站在单位时间内所能提取到的信息参量相对较少, 通信接入拥塞问题的发生概率也就相对较低。

### 2.2 优先级划分

通信数据包集合中的信息参量已按“由小及大”的原则排列, 符合状态反馈模型的定义标准。因此, 在当前情况下, 地面通信基站对于数据样本的提取已遵循了优先级

条件。所谓优先级, 可以理解为无人机通信数据在接入复用信道组织时的实时排列顺序, 由于信息参量的接入已经满足状态反馈模型的定义标准, 因此在通信状态跟踪器和通信状态观测器元件保持稳定连接状态时, 输出的通信数据样本也一定符合状态反馈模型的定义条件<sup>[15]</sup>。规定  $\iota$  表示无人机通信数据样本的优先级排序向量, 其取值在  $(0, +\infty)$  的数值区间内,  $e_i$  表示基于参数  $\iota$  的无人机通信数据优先级判别条件, 其求解过程如下:

$$e_i = P_i + \left| \frac{r_i}{Y} \right|^2 \Big|_{\iota \neq 0} \quad (8)$$

式中,  $P_i$  表示基于参数  $\iota$  的数据样本排序定义参量,  $r_i$  表示数据样本排序过程中的标准优先级权重值。

在式 (8) 的基础上, 推导基于状态反馈无人机通信优先级划分标准表达式  $A$  如式 (9) 所示:

$$A = (1 - e_i)^\kappa \times \frac{a_i}{(\iota + 1)^2} \quad (9)$$

式中,  $\kappa$  表示通信状态观测器元件的实时联通参数,  $a_i$  表示基于参数  $\iota$  的通信拥塞行为为划分向量。在无人机通信链路中接入大量数据样本, 会改变复用信道组织的连接状态。此时, 一部分信息参量经由状态观测器传输至地面通信基站, 并在其中生成长期存储记忆, 另一部分则进入原始信道组织。在该过程中, 信道组织对通信数据样本的选取完全遵循状态反馈模型的优先级划分标准<sup>[16]</sup>。

### 2.3 无人机队列调度关系推导

无人机队列调度关系决定了无人机通信复用信道组织之间的数据互传状态, 当无人机通信体系内明显存在接入拥塞行为时, 为实现对数据传输行为的动态化控制, 应按照状态反馈模型, 定义相关队列之间的实时调度关系<sup>[17]</sup>。满足状态反馈模型的无人机队列调度关系表达形式如图 3 所示。

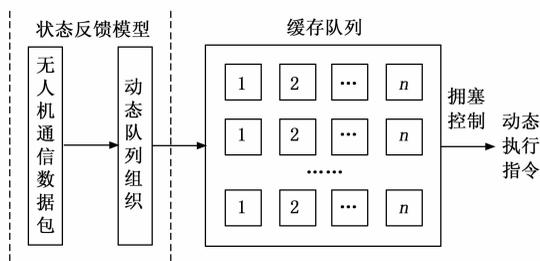


图 3 无人机队列调度关系表达

为满足地面通信基站对于数据样本参量的提取需求, 数据包集合与动态队列组织之间必须保持单向传输关系, 且数据信息参量的传输方向只能由数据包集合指向动态队列组织<sup>[18]</sup>。缓存队列内同时包含多个数据样本链路结构, 在复用信道保持持续连通状态时, 这些链路节点将同时对已接入的无人机通信数据进行转存处理。为了避免通信拥塞问题的出现, 地面通信基站要求信息参量在缓存队列中必须保持较快的传输速率, 以确保顺畅地通信。

设  $s_{\max}$  为无人机通信数据实时转存参量的最大取值结果,  $s_{\min}$  为实时转存参量的最小取值结果,  $f$  为基于状态反馈

模型选择的通信数据调度参数, 联立公式 (9), 可将无人机队列调度关系表达式  $S$  定义为:

$$S = A \times \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{(s_{\max} - s_{\min})^2}{f}} \right) \quad (10)$$

在同一优先级划分条件下, 无人机队列调度关系不会发生变化, 因此通信接入拥塞行为的表现程度也就始终保持恒定, 在对其进行控制处理时, 也就不需要频繁改变动态阈值窗口对于数据信息样本的取值长度。这也是在状态反馈模型控制方法作用下, 通信链路中数据信息样本实时累积量能够得到有效控制的主要原因。

## 3 拥塞动态控制方法设计

以前述构建的状态反馈模型为基础, 为更好地完善本文提出的无人机通信接入拥塞动态控制方法, 还应根据动态阈值窗口对于数据信息样本的取值能力, 确定通信链路的长度水平, 再联合相关信息参量, 求解链路时延量指标的具体数值。

### 3.1 动态阈值窗口设置

动态阈值窗口设置是控制无人机通信接入拥塞行为的必要环节, 阈值窗口对于数据信息样本的取值能力取决于无人机通信网络的具体拥塞程度。由于数据信息参量的传输具有一定的不确定性, 所以窗口组织需要始终保持动态变化状态<sup>[19]</sup>。为防止因动态阈值窗口存储能力过大导致通信接入拥塞问题加重, 应根据无人机队列的实时调度关系, 设置具体的阈值判定标准。状态反馈模型规定: 当无人机通信数据输出量不满足阈值判定标准时, 动态阈值窗口在单位时间内所能取得的数据信息样本参量相对较少; 反之, 则可得到大量的数据信息样本参量<sup>[20]</sup>。

对于动态阈值窗口取样能力  $D$  的判定满足公式 (11) 所示的表达式条件:

$$D = G^2 - \frac{(\lambda \times \tilde{d})}{S} \quad (11)$$

式中,  $G$  为基于状态反馈模型的初始阈值设定结果,  $\lambda$  为无人机通信数据的动态化接入参量,  $\tilde{d}$  为阈值窗口组织中的无人机通信数据的动态取样特征。动态阈值窗口在提取无人机通信数据的过程中, 如果地面通信基站输出新的信息参量, 复用信道组织对于通信数据样本的传输行为也不会暂停。此时, 动态阈值窗口进入极限运行状态, 无人机通信数据在窗口组织中快速传输, 但为避免引发接入拥塞问题, 可通过适当增大初始设定阈值的方式, 提升窗口组织对于信息参量的实时取样能力。

### 3.2 通信链路长度计算

通信链路长度与复用信道组织对无人机通信数据样本的承载能力成正比, 在动态阈值窗口取样能力保持稳定的情况下, 通信链路越长, 则地面通信基站在单位时间内所能输出的数据信息样本量越大<sup>[21]</sup>。设计无人机通信接入拥塞动态控制算法时, 通信链路长度的定义必须参考动态阈值窗口对于数据信息参量的实时取样能力, 由于无人机飞行器、地面通信基站对于数据信息参量的选取完全遵循状

态反馈模型的定义条件，所以复用信道组织必须具有完全负载信息接入节点的能力<sup>[22]</sup>。在发生无人机通信接入拥塞问题时，选择  $n$  个负载于同一信道组织内的信息接入节点  $g_1, g_2, \dots, g_n$ ，且这些节点之间不存在相互覆盖关系，联立公式 (11)，可将通信链路长度求解结果  $H$  表示为：

$$H = \eta \times \frac{\sqrt{\frac{\mu_1^2}{g_1^2} + \frac{\mu_2^2}{g_2^2} + \dots + \frac{\mu_n^2}{g_n^2}}}{D} \quad (12)$$

式中， $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n$  分别表示与信息接入节点匹配的数据样本拥塞传输参量，且  $\mu_1 \neq \mu_2 \neq \dots \neq \mu_n$  的不等式取样条件恒成立， $\eta$  表示无人机通信链路内接入拥塞事件的发生概率，其取值同时满足  $\eta > 0, \eta \leq 1$  的数值约束条件。 $\eta = 1$  时，表示无人机通信链路内一定存在接入拥塞问题，虽然通信链路组织的长度水平已经达到了极大值状态，却依然难以满足数据信息样本的实时传输需求，特别是在复用信道内已经累计大量数据样本的情况下。故为实现对通信拥塞程度的有效控制，必须再次调整链路组织的长度水平。

### 3.3 链路时延量计算

链路时延量表示接入拥塞时，无人机通信链路响应周期的延后程度，该项物理量的取值越大，则接入拥塞事件的行为能力越强，对于该类事件进行动态控制时，所需占用的动态阈值窗口也就越多<sup>[23-24]</sup>。在无人机通信数据动态输出能力保持不变的情况下，对于链路时延量  $t$  的求解满足如下表达式：

$$t = \frac{(H)^2}{\sum_{j=1}^{+\infty} j_c} \cdot c \neq v \quad (13)$$

式中， $\hat{k}$  为接入拥塞情况下的通信数据样本响应特征， $v$  为拥塞行为强度的实时取值， $c$  为实时控制向量， $j_c$  为基于参数  $c$  的动态控制指令执行指征。如果链路时延量取值不能保持稳定状态，在控制无人机通信接入拥塞行为过程中，则易得到精准性较差的结果，因此为满足状态反馈模型的唯一性条件，要求链路时延量求解结果必须保持数值稳定状态。

## 4 实例分析

为验证本文所提方法的有效性，对比本文方法、基于联盟图博弈的无人机通信控制算法以及基于区块链的通信控制模型的实用差异性，设计如下实验。

### 4.1 原理与流程

数据信息样本在无人机通信链路中的实时累积量，能够反映复用信道内通信接入拥塞行为的表现能力，在不考虑其他干扰条件的情况下，无人机通信链路中数据信息样本的实时累积量越大，则其对复用信道内通信接入拥塞行为的表现能力越强。而拥塞控制方法的实用性程度，在其对于数据信息样本累积行为的控制能力上能够有所体现，应用能力越强的方法，越能使无人机通信链路中数据信息样本的实时累积量得到减少。在本次实验中，采集并记录了无人机通信链路中的特定通信数据，以评估不同拥塞控制方法的效果。无人机的信号传输频率在无人机通信链路

中每秒传输的数据量，平均信号传输频率为 10 Mbps。信号强度反映无人机节点之间的信号接收强度，在本次实验中，无人机与通信基站之间的信号强度为 -70 dBm。数据传输延迟测量了数据从发送到接收所经历的时间，在本次实验中，无人机与通信基站之间的数据传输延迟为 20 ms。通信带宽利用率用来衡量无人机通信链路中正在使用的通信带宽比例，在本次实验中，无人机与通信基站之间的通信带宽利用率为 30%。

本次实验的具体实施流程如下：

1) 建立图 4 所示的无人机通信网络，以此作为拥塞控制方法的实施环境。

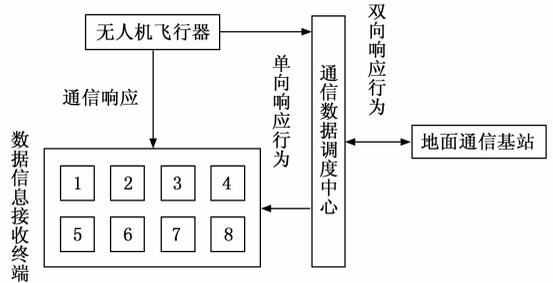


图 4 无人机通信网络

2) 在通信数据调度中心中，输入本文所提方法的执行程序，记录在该方法作用下，无人机通信链路中数据信息样本的实时累积数值，所得结果为实验组变量。

3) 在通信数据调度中心中，输入基于联盟图博弈的无人机通信控制算法的执行程序，记录在该方法作用下，无人机通信链路中数据信息样本的实时累积数值，所得结果为 (A) 对照组变量。

4) 在通信数据调度中心中，输入基于区块链的通信控制模型的执行程序，记录在该方法作用下，无人机通信链路中数据信息样本的实时累积数值，所得结果为 (B) 对照组变量。

5) 将所得实验结果与标准拥塞条件进行对比，根据差值情况，总结实验规律。

标准拥塞条件规定：当无人机通信链路中数据信息样本的实时累积量小于  $6.0 \times 10^{13}$  MB 时，复用信道组织内不存在接入拥塞问题。

### 4.2 数据处理

开始实验之前，相关参与人员应对无人机通信链路进行预先调试，在确保数据传输行为趋于稳定后，正式开始实验。调试过程中，无人机只能在图 5 所示的既定通信区域内完成飞行任务，且在数据传输行为趋于稳定后，实验人员手中仪表内的信号传输频率应保持稳定状态，如图 6 所示。

在本实验中，使用了一个由 15 架无人机组成的集群，每架无人机都配备有通信设备和传感器。在室外场地进行了实验，该场地长宽约为 100 m × 100 m，没有显著的遮挡物，温度保持在 20~25 °C 之间。在该场地中设置 8 个接收终端，分别编号为 1~8，这些接收终端被放置在不同的位



图 5 无人机通信调试



图 6 信号稳定波动

置和角度,以模拟真实环境中的多个接收器。通过这些设置,收集和分析来自不同接收终端的数据,以评估信道复用系统的效果和性能。在实验过程中,需要记录无人机的位置、速度、加速度等传感器数据,还应记录通信延迟、吞吐量和网络拥塞程度等通信数据,通过 Matlab 进行数据分析,通过计算各项指标来评估控制策略的性能。

### 4.3 实验过程及结论

实验组、对照组无人机通信数据样本的实时累积数值如图 7 所示。

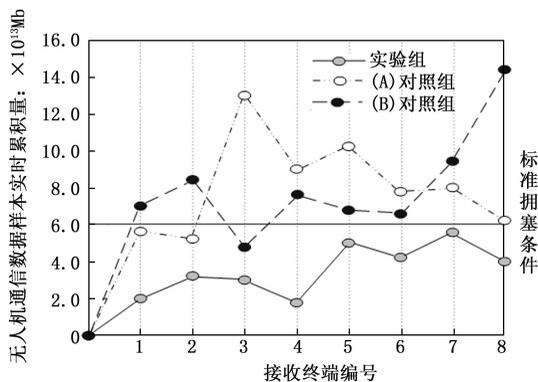


图 7 无人机通信链路中数据信息样本的实时累积量

分析图 7 可知,7 号接收终端节点处的实验组无人机通信数据样本实时累积量最大,为  $5.7 \times 10^{13}$  MB;3 号接收终端节点处的 (A) 对照组无人机通信数据样本实时累积量最大,为  $12.9 \times 10^{13}$  MB,与实验组最大值相比,增大了  $7.2 \times 10^{13}$  MB;8 号接收终端节点处的 (B) 对照组无人机通信数据样本实时累积量最大,为  $14.4 \times 10^{13}$  MB,与实验组最

大值相比,增大了  $8.7 \times 10^{13}$  MB。

分别取实验组、(A) 对照组、(B) 对照组无人机通信数据样本实时累积量最大值,并按照公式 (14),计算实验结果与标准拥塞条件之间的差值水平  $M$  计算如下:

$$M = M' - M_0 \tag{14}$$

式中,  $M'$  为无人机通信数据样本实时累积量的实验数值,  $M_0$  为标准拥塞条件下的通信数据样本累积量。

公式 (15) 为实验组、(A) 对照组、(B) 对照组实验结果与标准拥塞条件之间数值差的计算结果:

$$\begin{cases} M_1 = -(0.3) \\ M_2 = +(6.9) \\ M_3 = +(8.4) \end{cases} \times 10^{13} \text{ MB} \tag{15}$$

式中,“-”表示实验结果小于标准拥塞条件下的通信数据样本累积量,“+”表示实验结果大于标准拥塞条件下的通信数据样本累积量。

根据公式 (15) 可知,实验组方法作用下,无人机通信数据样本实时累积量最大值明显小于标准拥塞条件,表示该方法能够较好地解决无人机通信的接入拥塞问题;在 (A) 对照组、(B) 对照组方法作用下,无人机通信数据样本实时累积量最大值均大于标准拥塞条件,这就表示在实验过程中,这两种方法的应用存在无法解决无人机通信接入拥塞问题的可能。

综上可知,本次实验结论为:

1) 基于联盟图博弈的无人机通信控制算法、基于区块链的通信控制模型的应用,难以有效解决无人机通信链路中数据信息样本实时累积量过大的问题,因此其对于复用信道内通信接入拥塞行为的控制能力也就相对有限。

2) 基于状态反馈的无人机通信接入拥塞动态控制方法的应用,能够有效控制无人机通信链路中数据信息样本的实时累积量,在解决复用信道内通信接入拥塞问题方面具有较强的实用性及可行性。

## 5 结束语

为了解决复用信道内的通信接入拥塞问题,本文基于状态反馈研究无人机通信接入拥塞动态控制方法。相较于基于联盟图博弈的无人机通信控制算法和基于区块链的通信控制模型,本文方法定义了通信数据包集合,又根据优先级划分标准,确定无人机队列之间的调度关系。控制算法设计过程中,动态阈值窗口设置条件、通信链路长度水平始终保持数值匹配关系,实现了对链路时延量参数的有效控制。实验分析表明,本文所提方法能够较好地控制无人机通信链路中数据信息样本的实时累积量,在复用信道组织内通信接入拥塞的问题也得到了较好的解决。

### 参考文献:

[1] 兰梓冉,郝瑞祥,角宏林,等. 基于重复控制和状态反馈的三相逆变器最优预见控制 [J]. 电工技术学报, 2022, 37 (6): 1473 - 1481.

[2] 付 媛,李 浩,张祥宇. 基于振荡状态反馈的直流微网储能

- 换流器的有源阻尼控制技术 [J]. 高电压技术, 2021, 47 (3): 927-937.
- [3] 王博文, 孙彦景. 基于联盟图博弈的地下空间无人机应急通信网络拓扑控制算法 [J]. 电子与信息学报, 2022, 44 (3): 996-1005.
- [4] 王浩同, 刘白林, 刘智平, 等. 基于区块链的无人机集群抗干扰通信模型 [J]. 火力与指挥控制, 2022, 47 (1): 72-79.
- [5] 赵子坤, 毛通宝, 吴 挺, 等. 基于贪婪CORDIC算法的非平稳信道衰落孪生技术研究 [J]. 数据采集与处理, 2021, 36 (6): 1176-1185.
- [6] 曹若琳, 彭清轩, 王金东, 等. 基于单光子计数反馈的低噪声光纤信道波分复用实时偏振补偿系统 [J]. 物理学报, 2022, 71 (13): 50-58.
- [7] 周 逊, 霍 兵, 任 智. 降低控制开销的太赫兹无线个域网双信道 MAC 协议 [J]. 小型微型计算机系统, 2023, 44 (1): 163-167.
- [8] 刘冰艺, 秦 静, 熊盛武, 等. 一种结合雾计算的车辆通信网络碰撞避免 TDMA MAC 协议 [J]. 电子学报, 2021, 49 (5): 843-850.
- [9] 方如举, 葛 瑜, 孙 伟, 等. 基于 WSNs 的智能配电网通信数据传输带宽的优化分配策略 [J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49 (23): 88-95.
- [10] 黄 瑞, 肖 宇, 曾伟杰, 等. Docker 容器下高速总线通信数据实时交互方法 [J]. 沈阳工业大学学报, 2022, 44 (6): 667-671.
- [11] 付 媛, 王耀铎, 张祥宇. 含恒功率负荷直流微电网的状态反馈电压振荡控制技术 [J]. 电力自动化设备, 2021, 41 (5): 167-174.
- [12] 任乘乘, 宋 军, 何舒平. 基于扩展状态观测器的随机隐 Markov 正跳变系统有限时间异步控制 [J]. 控制理论与应用, 2021, 38 (11): 1891-1900.
- [13] 郭 楠, 陆益民. 基于 Filippov 方法的双向 DC-DC 变换器在状态反馈下的动力学特性分析 [J]. 太阳能学报, 2022, 43 (上接第 90 页)
- [15] LI C C, LI Y F, WANG G L, H. output tracking control of electric-motor-driven aerodynamic load simulator with external active motion disturbance and nonlinearity [J]. Aerospace Science and Technology, 2018, 82: 334-349.
- [16] 缪仲翠, 余现飞, 张文宾, 等. 三相六开关容错逆变器驱动异步电机 FCS-MPTC [J]. 控制与决策, 2020, 35 (6): 1377-1383.
- [17] 于 杰, 王志胜. 双电机舵机负载模拟器设计与研究 [J]. 机械与电子, 2017, 35 (2): 28-31.
- [18] 蔡星全, 黎 英, 冯 号. 矩阵变换器驱动的永磁同步电机模糊直接转矩控制 [J]. 控制工程, 2022, 29 (3): 564-570.
- [19] 梁俊龙, 呼延霄, 张贵田, 等. 基于 PWM 作动器的运载火箭伺服系统建模与仿真 [J]. 导弹与航天运载技术, 2021, 5: 78-84.
- [20] 刘晓琳, 韩 婷, 袁 昆. 橡胶缓冲弹簧在飞机舵机电液加载系统中的应用 [J]. 机床与液压, 2015, 43 (23): 39-41.
- [21] 陈国迎, 何 磊, 宗长富, 等. 基于电动伺服系统的转向试验台阻力加载策略的研究 [J]. 汽车工程, 2018, 40 (2): 226 (1): 300-306.
- [14] 王逸超, 欧名勇, 陈仲伟, 等. 基于 LC 串联型储能变换器的状态反馈控制策略研究 [J]. 湖南大学学报 (自然科学版), 2021, 48 (2): 96-102.
- [15] 何雷锋, 刘关俊. 模拟实时系统的点区间优先级时间 Petri 网与 TCTL 验证 [J]. 软件学报, 2022, 33 (8): 2947-2963.
- [16] 徐广通, 王 祝, 曹 严, 等. 动态优先级解耦的无人机集群轨迹分布式序列凸规划 [J]. 航空学报, 2022, 43 (2): 420-431.
- [17] 周博文, 黄海军, 徐 怡, 等. 无人机配送系统中端边协同的并行任务调度算法 [J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27 (9): 2575-2582.
- [18] 王 新, 王 征, 徐 伟. 面向多个无人机站点的车辆与无人机联合配送路径问题研究 [J]. 运筹与管理, 2021, 30 (5): 31-37.
- [19] 方 宇, 吕 娜, 陈 坤. 联合功率域 SPMA 协议的动态阈值算法 [J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43 (8): 2332-2340.
- [20] 孙 涛, 蔡江涛, 郭政杰, 等. SDN 环境下基于动态阈值的 DDos 攻击检测方法研究 [J]. 内蒙古大学学报 (自然科学版), 2022, 53 (1): 98-104.
- [21] 刘文亚, 王 翔, 赵尚弘, 等. 基于解码转发中继的三跳 RF/FSO/RF 航空通信链路性能分析 [J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58 (3): 154-161.
- [22] 邱寅祺, 付文龙, 潘 聪, 等. 基于文件交换的点对点有序可靠通信链路设计方法 [J]. 上海交通大学学报, 2021, 55 (s2): 82-85.
- [23] 薛 花, 张晓雯, 凌 晨, 等. 考虑通信时延的直流微电网多电力弹簧电压平穩控制方法 [J]. 中国电机工程学报, 2021, 41 (16): 5434-5452.
- [24] 李永福, 邬昌强, 朱 浩, 等. 考虑车辆跟驰作用和通信时延的网联车辆队列轨迹跟踪控制 [J]. 自动化学报, 2021, 47 (9): 2264-2275.
- [22] 代明光, 齐 蓉. 基于扩展状态观测器的电动负载模拟器反演滑模控制 [J]. 航空学报, 2020, 41 (5): 280-290.
- [23] 曹晓明, 姚 静. 负载口独立控制负载模拟系统多余力解耦补偿抑制控制 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (7): 157-165.
- [24] 王修岩, 刘艳敏, 李宗帅. 基于 RBF 神经网络和重复控制 PID 的电动负载模拟器复合控制 [J]. 电力科学与技术学报, 2017, 32 (1): 84-89.
- [25] 杨亮亮, 王 杰, 王 飞, 等. 基于最优控制迭代学习的直线伺服系统振动抑制研究 [J]. 机械工程学报, 2019, 55 (15): 217-225.
- [26] 魏晓晗, 张 庆. 伺服系统瞬态优化的模糊自适应深度强化学习方法 [J]. 西安交通大学学报, 2021, 55 (8): 68-77.
- [27] SHAMISA A, KIANI Z. Robust fault-tolerant controller design for aerodynamic load simulator [J]. Aerospace Science and Technology, 2018, 78: 332-341.
- [28] 刘晓琳, 谢孟岑. 飞机舵机电液伺服系统的摩擦补偿控制策略 [J]. 组合机床与自动化, 2022, 5: 45-50.