

# 基于鲸鱼优化算法的无人机通信网络 链路拥塞控制研究

吴珊云<sup>1</sup>, 李玉<sup>2</sup>

(1. 广西工业职业技术学院, 南宁 530000;

2. 湖北工业大学, 武汉 430068)

**摘要:** 为了提高无人机通信网络的安全性, 解决由于链路拥塞而导致的通信数据误码与丢失问题, 提出基于鲸鱼优化算法的无人机通信网络链路拥塞控制方法; 采用 NetFlow 技术获取无人机通信链路实时运行数据, 度量链路利用率等指标, 识别当前网络链路的拥塞状态; 模拟无人机通信与链路拥塞过程, 综合考虑无人机通信直视径、反射径和散射径 3 个分量, 构建网络链路模型; 在无人机通信网络链路拥塞控制协议的约束下, 均衡调度无人机通信数据, 利用鲸鱼优化算法选择通信链路的最优解, 完成通信链路切换工作, 实现无人机通信网络链路的拥塞控制任务; 实验结果表明: 在设计方法控制下, 无人机通信网络链路的时延减小了 61 s, 吞吐量提升 135 kbit/s, 证明优化方法能够有效缓解链路的拥塞程度, 通过对通信网络误码率和溢出丢包率的分析, 证明优化控制方法不会对网络的通信任务产生明显影响。

**关键词:** 鲸鱼优化算法; 无人机通信; 网络链路拥塞; 拥塞控制

## Research on Link Congestion Control of UAV Communication Networks Based on Whale Optimization Algorithm

WU Shanyun<sup>1</sup>, LI Yu<sup>2</sup>

(1. Guangxi Vocational &amp; Technical Institute of Industry, Nanning 530000, China;

2. Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

**Abstract:** In order to improve the security of unmanned aerial vehicle (UAV) communication networks and solve the problems of communication data error and loss caused by link congestion, a link congestion control method for UAV communication networks based on whale optimization algorithm is proposed. The NetFlow technology was used to obtain the real-time operation data of UAV communication link, measure the link utilization rate and other indicators, and identify the congestion status of the current network link. The process of UAV communication and link congestion is simulated, and the network link model is constructed by considering the direct vision path, reflection path and scattering path of UAV communication. Under the constraints of the congestion control protocol of the UAV communication network link, the UAV communication data is balanced and scheduled. The whale optimization algorithm is used to select the optimal solution of the communication link, complete the switching of the communication link, and achieve the congestion control task of the UAV communication network link. The experimental results show that under the control of the optimization method, the delay of the UAV communication network link is reduced by 61 s, and the throughput is increased by 135 kbit/s. This proves that the optimization method can effectively alleviate the congestion degree of the link. Through the analysis of the communication network error rate and overflow packet loss rate, it is proved that the optimization control method does not have a significant impact on the communication task of the network.

**Keywords:** whale optimization algorithm; UAV communication; network link congestion; congestion control

## 0 引言

无人机通信网络中最常见的失效是链路拥塞。链路拥塞是指分组数量过多, 使得网络来不及处理, 从而导致网络性能下降或服务中断。链路拥塞产生的主要原因是资源承载能力和处理能力的不足, 这两种能力不足的主要原因是存储空间不足和链路带宽有限。简单地增加存储空间或链路带宽并不能解决拥塞问题, 甚至可能加剧拥塞问题。

要解决链路拥塞问题, 需要对网络中的拥塞进行控制。因此提出了无人机通信网络链路拥塞控制方法。

现阶段对通信网络拥塞控制方法展开研究, 并得出了诸多研究成果, 文献 [1] 中提出了面向虚拟数据空间的智能 TCP 拥塞控制算法, 文献 [2] 和文献 [3] 中分别提出了基于博弈论的命名数据网络拥塞控制策略和基于数据驱动的无线传感器网络拥塞控制方法, 然而上述拥塞控制方

收稿日期: 2023-07-06; 修回日期: 2023-08-09。

作者简介: 吴珊云(1974-), 男, 硕士, 讲师。

李玉(1980-), 男, 硕士, 副教授。

引用格式: 吴珊云, 李玉. 基于鲸鱼优化算法的无人机通信网络链路拥塞控制研究[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(7): 112-118.

法主要针对的是静态通信网络, 也就是节点固定的通信网络, 将其应用到无人机通信网络链路拥塞的控制工作中, 由于无法适应无人机位置的动态变化, 导致出现明显的拥塞控制效果不佳的问题, 主要体现在时延、误码、丢包等方面, 为此引入鲸鱼优化算法。

鲸鱼优化算法是一种群体智能算法, 通过对自然界中座头鲸捕捉食物时团体行为的分析, 可以模拟出一套优化搜索的方法, 是当前新兴的仿生类算法之一。利用鲸鱼优化算法对无人机通信网络链路拥塞控制方法进行优化, 能够提升网络链路拥塞控制效果, 从而彻底解决无人机通信网络链路的拥塞问题。

## 1 无人机通信网络链路拥塞控制方法设计

优化设计无人机通信网络链路拥塞控制方法的基本运行原理为: 在无人机通信网络链路模型下, 模拟通信与拥塞过程, 确定拥塞状态下无人机通信网络的基本运行特征, 从而判断任意时刻无人机通信网络链路是否处于拥塞状态。针对存在拥塞现象的通信网络链路, 执行一系列控制指令, 具体包括: 通信链路切换、资源调度、动态增益等<sup>[4]</sup>。在实际的控制过程中, 利用鲸鱼优化算法得出通信链路切换目标的最优解, 间接地提升无人机通信网络链路的拥塞控制效果。

### 1.1 获取无人机通信链路实时运行数据

采用 NetFlow 技术在无人机通信网络链路模型中获取实时运行数据, NetFlow 技术可以很容易地收集和输出流量的统计信息, NetFlow 技术可以支持多种网络接口, 所以每个思科的网络装置都可以测量、收集和管理无人机通信网络的流量。在进行数据收集时, 要确保无人机通信网络中的路由器是 IP 路由, 并且确保其具有充足的 CPU 和内存来收集 NetFlow 的输出<sup>[5]</sup>。在进行 NetFlow 网络流的获取的时候, 采集端首先要启动路由器的设定, 之后对监控制定端口的数据包进行: 如果它是 UDP 数据包, 那么就会进行 NetFlow 协议的分析, 通过分析来实现对 NetFlow 数据的特征的提取, 并将数据写入到文本文件中。在无人机通信链路实时运行数据的采集过程中, 用链路拥塞状态识别中所需的运行数据总量除以允许运行数据的采集时长<sup>[6]</sup>, 将得到的数值设置为实时运行数据的采集频率。最终将获取无人机通信链路实时运行数据进行融合处理, 完成实时运行数据的采集工作。

### 1.2 识别无人机通信网络链路拥塞状态

在采集到无人机通信网络链路实时运行数据的基础上, 综合考虑无人机通信网络链路利用率、丢包率、时延等因素。以实时获取的无人机通信网络链路实时运行数据为分析对象, 判断当前链路是否处于拥塞状态。链路利用率取决于链路的负荷状况和链路传送带宽之比决定, 链路利用率指标的度量结果为:

$$\mu_a = \frac{W(i)}{U(i)} \quad (1)$$

式中,  $W(i)$  和  $U(i)$  分别为无人机通信网络第  $i$  条链路的负载和传输带宽, 其中,  $i = 1, 2, 3, \dots, n$ 。无人机通信网络链

路中缓存内数据队列越长, 节点缓存的剩余空间将变得越少, 如果有更多的数据涌入这个节点, 那么这个节点的缓存将会因为负载过多而发生溢出, 从而造成数据丢掉, 从而造成拥塞<sup>[7]</sup>。当在网络链路上出现了不止一条拥塞链路时, 该网络链路的性能往往比只经过一条拥塞链路的链路要差, 可能具有更高的链路丢包率, 由此计算无人机通信网络的链路丢包率, 可表示为:

$$\mu_i = \frac{L}{n} \quad (2)$$

式中,  $L$  为丢失的数据链条数。在已知链路丢包率的情况下, 链路的拥塞状态可以表示为:

$$y = U(i) \cdot t_R \cdot \sqrt{2\mu_i} \quad (3)$$

式中,  $t_R$  为数据包在网络中来回传输的时间, 即往返时延。如果链路丢包率低于 0.01, 此时公式 (3) 求解得出的链路拥塞状态为 0, 表示当前无人机通信网络链路未发生拥塞, 否则认为当前链路发生拥塞, 且  $y$  取值越大证明拥塞程度越严重<sup>[8]</sup>。

除了上述指标外, 还需要计算链路拥塞的趋势度, 通过分析中间节点的动态缓冲排队时间, 探测无人机通信网络 MAC 层的出报率和输报率, 进而得到无人机通信网络中节点的缓冲区域达到满负载的速率, 也就是拥塞趋势度<sup>[9]</sup>。链路拥塞趋势度的计算公式为:

$$\lambda = y + \frac{v_{out}}{v_{in}} + K + l_c \quad (4)$$

式中,  $v_{in}$  和  $v_{out}$  分别为数据的输入和输出速率;  $K$  为无人机通信网络链路的缓存区域大小;  $l_c$  为缓存队列长度<sup>[10]</sup>。通过利用率、丢包率等指标的度量, 可以得出网络链路拥塞状态的识别结果, 而链路拥塞趋势度的计算结果能够预测网络链路拥塞状态的发展趋势。

### 1.3 模拟无人机通信与链路拥塞过程

无人机通信网络由多个节点组成, 组成节点包括无人机和地面基站, 任意无人机均可与地面基站或其他无人机之间形成通信链路, 为了节省网络损耗, 同时保证通信安全, 只有在无人机或地面基站发出通信申请时, 才会形成通信网络链接, 无人机通信的建立流程如图 1 所示。

假设无人机 A 希望与无人机 B 进行通信, 则无人机 A 会向地面基站发送通信建立请求, 地面基站接收到通信请求后, 产生链路测量控制信息, 并通过控制链路发送给无人机 A 和 B, 无人机按照地面基站的任务发布结果, 执行测量任务, 并将测量结果反馈给地面基站<sup>[11]</sup>。然后, 地面基站根据反馈的测量信息进行资源分配, 建立相应的通信链接。在通信过程中需要选择合适的通信频段, 并对生成链路的信号截获性能进行度量, 度量结果如下:

$$\delta = \frac{n}{s} \cdot \left(1 - \frac{\gamma}{M} \cdot \lambda\right) \quad (5)$$

式中,  $s$  为链路上截获的数据包数量;  $M$  为链路的最大容量。

将准备的通信数据输入到通信队列中, 在通信网络链路的作用下, 完成通信数据的传输<sup>[12]</sup>。当实际传输的数据

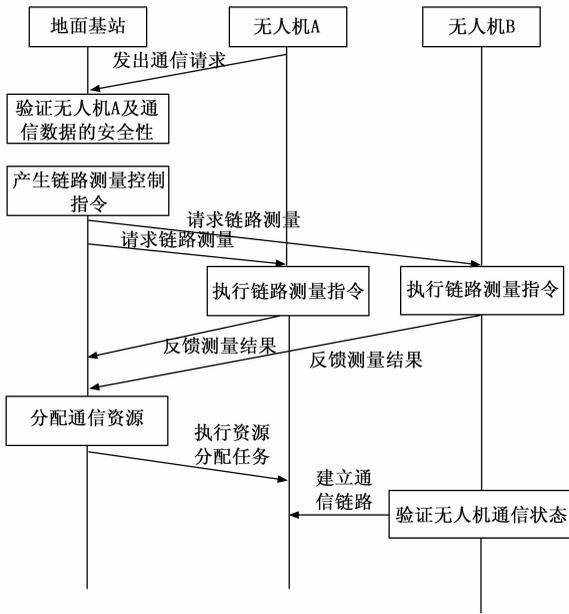


图 1 无人机通信网络链接建立进程图

量高于链路的最大负载或链路带宽低于传输数据包大小时, 无人机通信网络链路出现拥塞现象, 设  $R_{Not\ Occurring}$  和  $R_{happen}$  分别为未发生丢包和发生丢包的链路集合, 则  $R_{Not\ Occurring}$  中包含  $n-s$  个数据包,  $R_{happen}$  中包含  $s$  个数据包。该过程可以量化表示为:

$$C(t+1) = \begin{cases} C(t) + \frac{t_r - t_q}{t_r} \cdot \frac{1}{C(t)}, R_{Not\ Occurring} \\ \frac{1}{2} C(t), R_{happen} \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $C(t)$  为  $t$  时刻的链路拥塞窗口;  $t_r$  为时延;  $t_q$  为排队时延。按照上述流程, 完成对无人机通信与链路拥塞过程的模拟。

### 1.4 构建无人机通信网络链路模型

无人机通信网络链路通常为抽头时延模型, 无人机与地面基站均为高增益有向天线, 且链路中有一个很大的直接信号成分, 因此无人机通信网络链路通常包括一个较大时延。直射信号在传输时, 由于受到地形、地物和空气的影响, 会产生多路径传输。另外, 微波通信中也会有从陆地或海面上的回波<sup>[13]</sup>。所以, 一般将无人驾驶飞机链路描述成一个由直射路径、反射路径以及多个散射路径所构成的莱斯链路。针对不同的通信环境, 由于受各种因素的影响, 在不同的情况下, 各链路的呈现方式也各不相同。无人机与地面之间通信网络链路模型的构建结果如下:

$$G = C(t+1) \cdot [\gamma_z e^{2\varphi_z t} (t_r - t_{rc}) + \gamma_f e^{2\varphi_f t} (t_r - t_{rf})] + \beta \gamma_s \sum_{n=1}^{N_s} e^{\Delta\varphi_n} e^{2\varphi_n t} (t_r - t_{rn}) \quad (7)$$

式中,  $\gamma_z$ 、 $\gamma_f$  和  $\gamma_s$  分别表示通信网络链路的直射径分量、反射径分量和散射径分量的强度;  $\varphi_z$ 、 $\varphi_f$  和  $\varphi_s$  对应的是直射径、反射径和散射径的多普勒频移;  $t_{rc}$ 、 $t_{rf}$  和  $t_{rn}$  均为时延分量;  $\Delta\varphi$  表示相位差; 系数  $\beta$  代表散射径归一化因子。当无人

机处于飞行状态时, 无人机通信网络链路中的直视径部分可以表示为:

$$G_z = G \cdot \gamma_z(t) \left[ 2\pi\varphi_z \left( t - \frac{|l_{AB}|}{v_c} - \frac{l_{AB} \odot v_{AB}}{|l_{AB}| v_c} t \right) \right] \quad (8)$$

式中,  $l_{AB}$  表示无人机通信网络中接收节点 A 与发送节点 B 之间的链路长度,  $v_{AB}$  和  $v_c$  分别表示接收端与发送端之间的通信速度以及光速。同理可以得出海平面镜面反射以及地面/海平面漫反射条件下的链路分量表达式, 最终将链路分量进行融合处理, 得出无人机通信网络链路的构建结果。根据无人机的工作状态, 设置通信网络链路上的工作频率为 5 GHz, 链路的调制方式为 TH-BPM。

### 1.5 设置无人机通信网络链路拥塞控制协议

将 TCP 协议选作无人机通信网络链路拥塞的控制协议, TCP 的功能实现是由多个函数一起来完成的, 并且每个函数之间也是有相互调用的关系。该功能包含了 TCP 的两部分, 即 TCP 的接收与发送。当接收方接收到对方发送的数据包时, 函数 `ip_local_delivery()` 用于将所收到的数据包从网络层分配给传送层。然后, 进入 INET 套接字层, 该传送层的接收功能 `tcp_v4rcv()` 功能。此功能为 TCP 收到的资料的总入点, 用以检查 TCP 区段, 决定所收到的资料的端点数等<sup>[14]</sup>。然后, 通过对 `tcp_v4_dolrcv()` 功能的调用, 向属于传送控制块的接收排队中加入这个 TCP 数据分组。如果这个时候连接是处于 Established 的状态, 那么就用 `tcp_rvestablished()` 函数, 其他的连接状态也有相应的处理函数来与之对应, 一个正常的 TCP 连接在很大程度上是处于 Established 状态的。TCP 协议中的拥塞控制函数调用流程如图 2 所示。

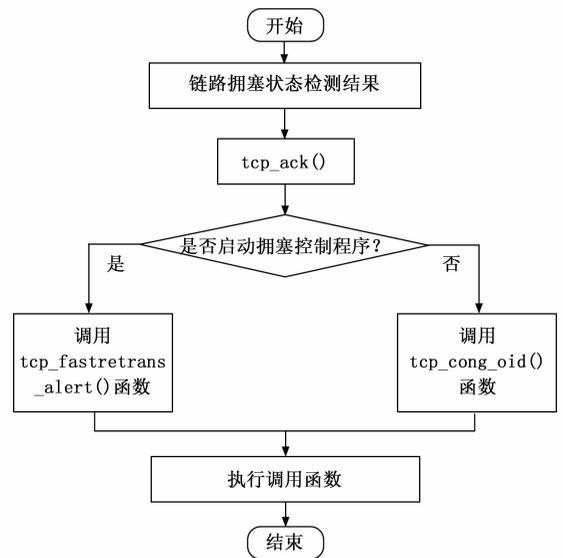


图 2 TCP 协议中的拥塞控制函数调用流程

无人机通信网络链路接收方传回的应答信号通常会与负载 TCP 的应答信号同时出现, 当没有任何数据传输时, 该应答信号为空载应答信号<sup>[15]</sup>。其中, `tcp_ack()` 函数是对接收到的 ACK 信息进行处理, 它是 TCP 协议的一个

接口函数。该方法主要是利用 ACK 来计算回路中的信息, 并在此基础上使用相关的阻塞控制方法, 对拥塞窗进行调整, 实现拥塞避免。

### 1.6 实现无人机通信网络链路拥塞

针对处于拥塞状态的无人机通信网络链路, 在设置控制协议的约束下, 通过均衡调度、链路切换等操作, 实现链路拥塞控制<sup>[16]</sup>。图 3 为无人机通信网络链路拥塞控制过程的 4 个阶段。

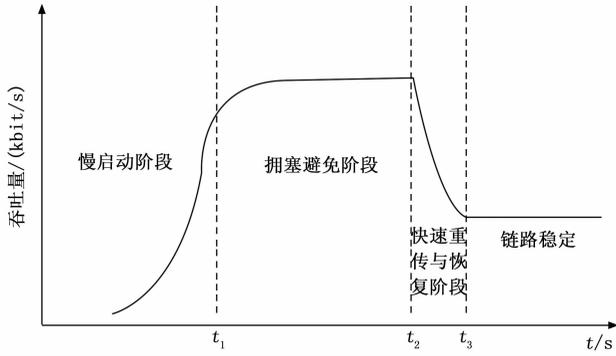


图 3 无人机通信网络链路拥塞控制演化阶段示意图

在无人机通信网络链路拥塞控制过程中, 设置链路中节点跳数参数的最大门限值, 并对节点聚集的链路进行疏导, 疏导计算过程如下:

$$J = \frac{\sum (N_f \cdot G)}{N_s} \quad (9)$$

式中,  $N_f$  和  $N_s$  分别为与新组数据流发送目标地址相同的数据量总和以及节点瞬态信息存储量, 同时设置链路层中节点聚集参数的最大门限值, 防止节点因大量聚集造成链路出现拥塞。从图 3 中可以看出, 无人机通信网络链路拥塞控制可以分为 3 个阶段, 其中拥塞避免就是将通信数据从拥塞链路切换到空闲或其他未拥塞的链路中, 避免拥塞的产生以及进一步恶化, 而均衡调度、资源分配和动态增益也是拥塞避免阶段的重要手段<sup>[17]</sup>。快速重传和恢复阶段是指在报文超时, 将 cwnd 设定为初始值, 然后再进行“慢启动”, 这样会造成发送窗口的过度缩小, 从而使链路连接的吞吐率下降<sup>[18]</sup>。

#### 1.6.1 均衡调度无人机通信数据

采用分簇调度的方式保证无人机通信网络链路之间的均衡性, 通信数据的分簇均衡调度可以分为簇头选举和数据传输两个阶段, 簇头选举过程中, 由整个无人机通信网络中的每一个节点生成 0 到 1 的随机数字, 然后对该数字与门限的关系进行判定, 若解出的结果低于门限, 那么该节点就会变成簇头, 并将门限设定为 0, 从而进行簇头公告<sup>[19]</sup>。而簇首公告则是将自己的簇首身份通知给其他节点, 而收到这一消息的非簇首节点则通过与公告的距离来决定是否加入。在收到了新的成员之后, 簇首点的设置就结束了。第三步为调度, 簇首采用 TDMA/CDMA 技术对簇中各结点进行分组, 以降低簇中各结点之间的干扰和冲突。簇头选举过程中设置的阈值可以表示为:

$$\zeta = \begin{cases} \frac{\chi \cdot J}{1 - \chi \times [n_{\text{wheel}} \bmod (\psi)]}, & \text{if } n_{\text{wheel}} \in J \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (10)$$

式中,  $\chi$  为簇头占网络内全部节点的百分比,  $n_{\text{wheel}}$  表示循环轮数,  $\psi$  为生成的随机数,  $J$  表示未当选簇头的节点集合。簇内通信通过簇头的调度, 完成对簇内数据的收集, 簇头将收集的数据进行数据融合处理, 然后单跳发送给汇聚节点, 完成无人机通信网络链路数据的均衡调度。

#### 1.6.2 利用鲸鱼优化算法切换无人机通信网络链路

鲸鱼优化算法把每一条鲸看成是一个可能的解, 所有的鲸鱼的好坏都用一个需要解决的优化问题决定的适应值去衡量, 它由 3 个步骤组成: 包围猎物、气泡网收缩和寻找猎物。在一个鲸类群体的捕食过程中, 一只鲸会做出两个选择: 一是围堵食物, 二是用泡沫网状物袭击; 在围堵猎物的过程中鲸鱼会通过某个概率去选择是向当前最优的鲸鱼靠近还是向随机选择的一只鲸鱼游去<sup>[20]</sup>。群体不断地循环, 直至达到结束条件, 并在最后一次搜索截断时刻, 得到该问题的最优解。在无人机通信网络链路拥塞控制过程中, 利用鲸鱼优化算法获得切换链路的最优解, 并将当前拥塞链路中的通信数据转移到另一链路中。在搜索解空间范围内, 每一个搜索个体的位置即代表所求优化问题的一个潜在解。假定被寻获的目标能够被确定, 并对其进行围捕, 而该方法的最优解在寻获时是未知的, 因而, 该方法假定被寻获的最优解就是最接近全局最优解的位置。其他鲸鱼搜索个体会根据当前最佳候选解, 来更新自己的位置, 具体的位置更新原理如图 4 所示。

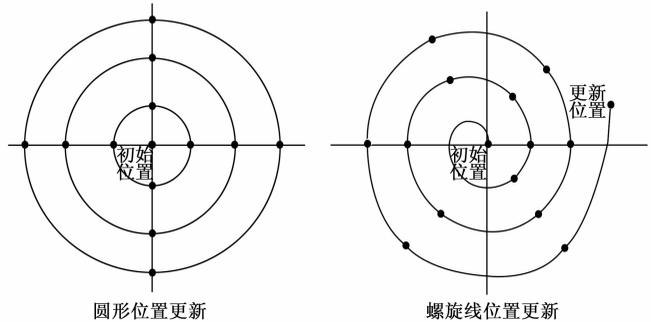


图 4 鲸鱼包围猎物阶段的位置更新原理图

使用收缩包围运动方式, 可以得出任意时刻鲸鱼位置的更新结果如下:

$$x(t+1) = \zeta \cdot x_{\text{Best}}(t) - A_1 \cdot |A_2 \cdot x_{\text{Best}}(t) - x(t)| \quad (11)$$

式中,  $x(t)$  和  $x(t+1)$  分别为  $t$  和  $t+1$  时刻的鲸鱼位置,  $x_{\text{Best}}(t)$  为当前最佳候选解的位置, 参数  $A_1$  和  $A_2$  的求解公式为:

$$\begin{cases} A_1 = 2 \cdot \left(2 - 2 \cdot \frac{t}{n_{\text{max}}}\right) \cdot \chi_1 - \left(2 - 2 \cdot \frac{t}{n_{\text{max}}}\right) \\ A_2 = 2 \cdot \chi_2 \end{cases} \quad (12)$$

式中,  $\chi_1$  和  $\chi_2$  均为随机数,  $n_{\text{max}}$  代表鲸鱼优化算法设置的最大迭代次数, 若计算得出参数  $A_1$  和  $A_2$  取值低于 1 时, 鲸鱼始终在收缩包围圈内进行游动, 即以收缩包围机制对猎物

进行包围, 此时搜索代理处于局部搜索阶段。在泡泡网攻击阶段, 采用螺旋更新位置的方法对猎物发起攻击, 更新公式如下:

$$x(t+1) = |x_{best}(t) - x(t)| \cdot e^{\lambda} \cdot \cos(2\pi\chi) + x_{best}(t) \quad (13)$$

当搜寻个体在被捕食者缩小的圈子里游荡时, 搜寻者有 50% 的机率会选择袭击或包围捕食。鲸群的猎物搜索过程可以量化表示为:

$$x(t+1) = x_{rand}(t) - A_1 \cdot |A_2 \cdot x_{rand}(t) - x(t)| \quad (14)$$

公式 (14) 中  $x_{rand}(t)$  为从群体中随机选取的鲸鱼个体的位置信息。由此, 完成鲸鱼优化算法的运行, 并输出搜索结果。将无人机通信网络中的所有链路信息输入到鲸鱼优化算法中, 输出结果即为通信信息切换选择链路的最优解, 在保证原链路与切换链路连通性的情况下, 直接将通信数据移动至选择的切换链路中。

除上述操作外, 还可以针对处于拥塞状态的链路进行拥塞窗口的调节与扩频操作, 在一定程度上扩大链路的存储空间, 从而实现对无人机通信网络链路的拥塞控制。

## 2 拥塞控制效果测试实验分析

以测试优化设计的基于鲸鱼优化算法的无人机通信网络链路拥塞控制方法的拥塞控制效果为目的, 设计效果测试实验。此次测试实验的基本思路为: 在无人机通信网络环境下, 将网络链路调整至拥塞状态, 以此作为实验中网络链路的初始状态。利用优化设计的控制方法, 处理链路的拥塞情况, 并通过传输时延和吞吐率等指标, 反映出优化设计方法对拥塞的控制效果, 并判断优化设计方法在控制过程中是否会对链路的通信精度产生影响。

### 2.1 构建无人机通信网络环境

构建的无人机通信网络由多个无人机设备、地面基站、路由器、网关等部分组成, 其中无人机设备包含: KY601S 型号无人机、JDA7 型号无人机等。构建的无人机通信网络的拓扑结构如图 5 所示。

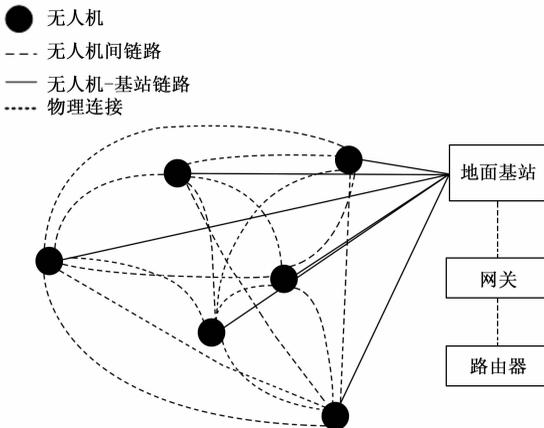


图 5 无人机通信网络拓扑结构图

图 5 表示的无人机通信网络环境中, 地面基站、路由器以及网关均处于静止状态, 其装设位置基本不发生变化。而网络中的无人机具有静态和动态两种飞行状态, 静态即无人机处于悬停状态, 而动态则表示无人机处于水平飞行状态或起降状态, 由于无人机实时位置的变化, 无人机通信网络的内部结构也会实时发生变化。设置无人机的载波频率为 5.5 GHz, 通信网络中数据的传输速度为 50 MB/s, 无人机的飞行速度均相同, 设置为 180 km/h。任意两个无人机之间存在通信链路, 所有无人机与地面基站之间存在通信链路。

### 2.2 设定无人机通信网络链路初始状态

通过对无人机通信网络结构的分析, 发现该网络中共包含 22 条网络链路, 其中 16 条为无人机间通信链路, 6 条无人机-基站通信链路。将通信数据输入到各个链路中, 链路切换至拥塞状态。考虑到通信数据的生成和传输情况, 基于对实际数据流量的分析经验, 对每个链路中的通信数据量进行预测。通过对无人机通信链路的性能和容量进行评估, 确定每个链路的最大传输容量, 并以此估算无人机通信网络链路容量。综合以上方面, 设定无人机通信网络链路的初始状态数据, 具体如表 1 所示。

表 1 无人机通信网络链路初始状态数据表

链路编号	运行状态	通信数据量/GB	链路容量/GB
1	拥塞	33.6	31.5
2	拥塞	39.2	38.0
3	拥塞	48.3	44.5
4	拥塞	49.6	47.5
5	拥塞	45.7	42.0
6	拥塞	44.9	40.0
7	拥塞	53.8	51.5
8	拥塞	55.1	52.0

从表 1 中可以看出, 在无人机通信网络的初始状态下, 所有链路都处于拥塞状态, 即其当前的通信数据量超过了链路的容量, 各个链路的通信数据量在 33.6 GB 到 55.1 GB 之间, 各个链路的容量在 31.5 GB 到 52.0 GB 之间。这样的情况可能导致数据传输的延迟增加、数据丢失或质量下降等问题, 故可对其进行拥塞控制, 以检验所提方法的应用效果。同理可以得出无人机通信网络中其他链路初始状态的设定结果。

### 2.3 描述拥塞控制效果测试实验过程

此次实验选择 Mininet 工具作为实验平台, Mininet 工具可以很好地支持 OpenFlow 协议。将 OpenvSwitch 与 Mininet 相结合, 使其能够提供定制 SDN 的实验环境, 而且其特点是容易部署, 在该环境中, 无需对其进行任何的改动和配置, 就可以将其直接部署到一个基于硬件实现的真实环境中。同时, 该工具的性能能够较好地反映出实际的网络性能。利用 Mininet 工具对优化设计的基于鲸鱼优化算法的无人机通信网络链路拥塞控制方法进行开发, 并采用 Floodlight 控制器执行优化设计方法的控制程序。Floodlight 控制器是完全由 Java 写成的, 它可以减少开发的难度

和复杂性, 并且可以通过较少的依赖来简化安装。除此之外, 它还提供了一个可以更方便地实现扩展和增强的基于模块的加载系统, 而且还专门为高性能网络而进行了设计, 可以支持大量的 OpenFlow 交换机。将控制器以及无人机通信网络链路拥塞控制程序作用在构建的网络链路中, 通过链路切换、均衡调度等工作, 完成链路的拥塞控制。图 6 为部分无人机通信网络链路的拥塞控制结果。

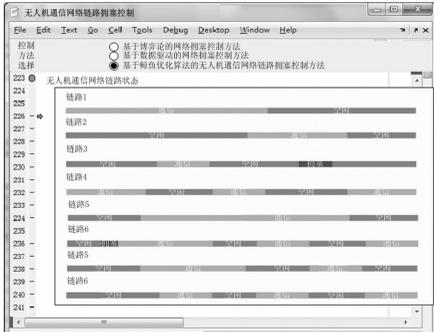
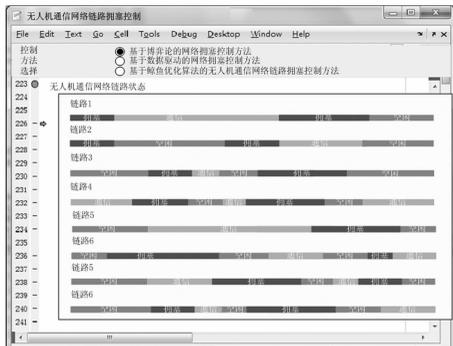
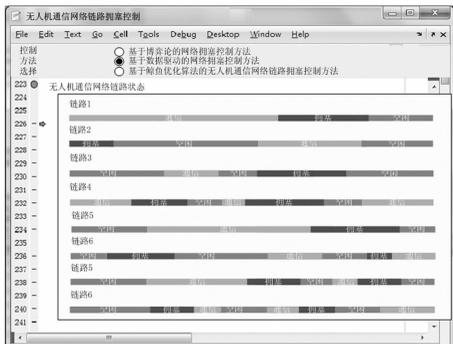


图 6 优化方法的无人通信网络链路拥塞控制界面

为了体现出优化设计方法在拥塞控制效果方面的优势, 设置传统的基于博弈论的网络拥塞控制方法和基于数据驱动的网络拥塞控制方法作为实验的对比方法, 利用相同的开发工具实现对比方法的运行, 并得出相应的控制结果, 如图 7 所示。



(a) 基于博弈论的网络拥塞控制方法



(b) 基于数据驱动的网络拥塞控制方法

图 7 对比方法的无人通信网络链路拥塞控制界面

同理可以得出无人机通信网络中所有链路的拥塞控制结果, 并对拥塞控制方法运行下通信网络的运行数据进行实时记录。

## 2.4 设置拥塞控制效果量化测试指标

设置传输时延和吞吐率指标用来反映优化设计方法对链路拥塞的控制效果, 其中传输时延的数值结果为:

$$t_c(i) = |t_{\text{receive}}(i) - t_{\text{send}}(i)| \quad (15)$$

公式 (16) 中变量  $t_{\text{send}}(i)$  和  $t_{\text{receive}}(i)$  分别为无人机通信网络中第  $i$  条链路通信数据的发送时间和接收时间,  $t_c(i)$  为第  $i$  条链路通信时延的测试结果。另外链路吞吐率的测试结果:

$$\eta = \frac{Y}{t_{\text{test}}} \quad (16)$$

其中:  $Y$  为无人机通信网络的吞吐量,  $t_{\text{test}}$  为实验测试时间。计算得出传输时延越小、链路吞吐率越大, 证明对应方法的拥塞控制效果越优。为了验证优化设计的控制方法是否会对网络的通信效果产生影响, 设置误码率和溢出丢包率作为测试指标, 其数值结果如下:

$$\begin{cases} \eta_{\text{error}} = \frac{N_{\text{error}}}{N_{\text{send}}} \times 100\% \\ \eta_{\text{overflow}} = \frac{N_{\text{send}} - N_{\text{receive}}}{N_{\text{send}}} \times 100\% \end{cases} \quad (17)$$

上式中  $N_{\text{error}}$ 、 $N_{\text{send}}$  和  $N_{\text{receive}}$  分别为接收错误的通信数据量、网络通信进程中发送与接收的数据量。求解得出误码率和溢出丢包率越低, 说明对应方法对网络通信任务的影响程度越小。

## 2.5 拥塞控制效果测试实验结果与分析

在不同方法的拥塞控制下, 统计无人机通信网络链路的实时运行数据, 通过公式 (16) 和公式 (17) 的计算, 得出反映链路拥塞控制效果的测试对比结果, 如图 8 所示。

图 8 表示的拥塞控制效果测试结果综合考虑了无人机通信网络中的所有链路, 从测试结果中可以看出, 在两种对比控制方法下, 无人机通信网络的平均时延分别为 81 s 和 65 s, 平均吞吐率分别为 200 kbit/s 和 304 kbit/s, 而优化设计控制方法下, 无人机通信网络的平均时延和平均吞吐率分别为 12 s 和 387 kbit/s, 由此证明优化设计方法具有更好的拥塞控制效果。另外在上述拥塞控制方法作用下, 收集并统计相应的网络通信进程中接收数据量与接收错误通信数据量信息, 得到无人机通信网络运行情况的测试结果, 如表 2 所示。

表 2 网络链路拥塞控制方法对通信进程影响的测试结果

链路编号	基于博弈论的网络拥塞控制方法/GB		基于数据驱动的网络拥塞控制方法/GB		基于鲸鱼优化算法的无人通信网络链路拥塞控制方法/GB	
	$N_{\text{receive}}$	$N_{\text{error}}$	$N_{\text{receive}}$	$N_{\text{error}}$	$N_{\text{receive}}$	$N_{\text{error}}$
1	32.8	0.5	33.1	0.2	33.5	0.1
2	38.3	0.4	38.7	0.3	39.2	0.2
3	47.4	0.5	47.6	0.4	48.2	0.1
4	49.1	0.4	49.3	0.2	49.5	0.1
5	45.0	0.4	45.3	0.3	45.6	0.1
6	44.1	0.5	44.4	0.4	44.8	0.2
7	53.2	0.5	53.4	0.2	53.8	0.1
8	54.2	0.6	54.6	0.4	55.0	0.1

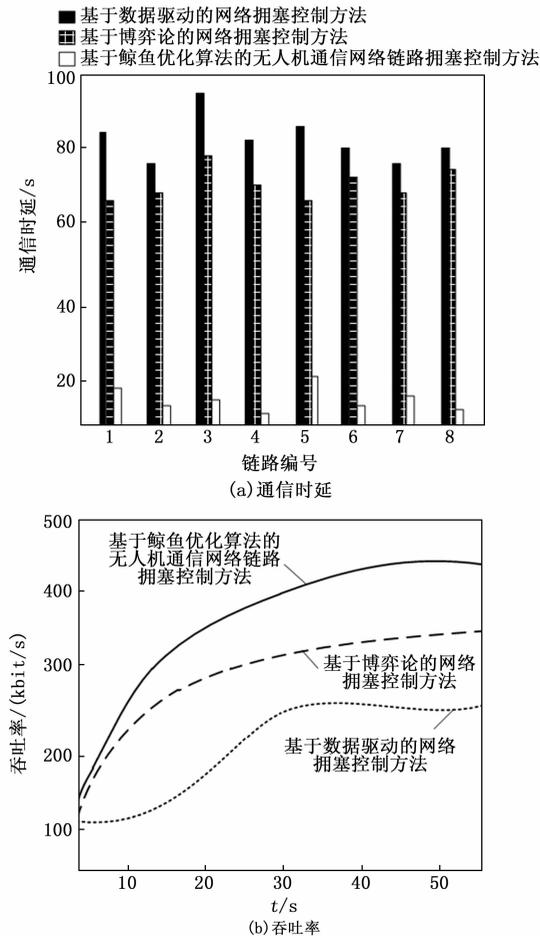


图 8 无人机通信网络链路拥塞控制效果测试结果

将表 1 和表 2 中的数据代入到公式 (17) 中, 计算得出 3 种拥塞控制方法运行下, 无人机通信网络的平均误码率分别为 1.04%、0.65% 和 0.28%, 应用本文方法得到的无人机通信网络的平均误码率比两种传统方法更低, 这表明本文的优化设计方法能够更有效地减少错误发生的频率, 提高数据传输的可靠性。而通信网络的平均溢出丢包率分别为 1.70%、1.06% 和 0.15%, 应用本文方法得到的无人机通信网络的平均溢出丢包率也比两种传统方法更低, 这说明本文的优化设计方法能够更好地管理链路容量, 减少数据包丢失的情况, 提高数据传输的成功率。从而证明, 与传统拥塞控制方法相比, 优化设计控制方法对无人机通信网络的影响程度更小。

### 3 结束语

无人机的通信质量直接决定了无人机的工作精度, 甚至还会影响其飞行安全, 为了保证通信数据能够在无人机通信网络中快速传输, 利用鲸鱼优化算法对网络链路拥塞控制方法进行优化设计。从实验结果中可以看出, 与传统控制方法相比, 优化设计方法的控制效果更优, 对于无人机通信网络而言具有较高的应用价值。

#### 参考文献:

[1] 王龙翔, 董 凯, 李小轩, 等. 面向虚拟数据空间的智能 TCP

拥塞控制算法 [J]. 西安交通大学学报, 2021, 55 (5): 83-91.

[2] 杨 华, 孙欣伊, 贾宗星, 等. 基于博弈论的命名数据网络拥塞控制策略 [J]. 东华大学学报 (自然科学版), 2021, 47 (4): 49-54.

[3] 杨美艳. 基于数据驱动的无线传感器网络拥塞控制 [J]. 沈阳工业大学学报, 2022, 44 (5): 570-574.

[4] 刘明霄, 王玉江, 刘 东. 多频与无线传感融合下的植保无人机通信系统研究 [J]. 农机化研究, 2021, 43 (8): 214-219.

[5] 石东森, 田 峰. 基于多目标粒子群算法的无人机通信三维位置部署及优化研究 [J]. 南京邮电大学学报 (自然科学版), 2022, 42 (4): 45-55.

[6] 张宏伟, 达新宇, 胡 航, 等. 基于协作频谱感知的多无人机通信网络谱效优化研究 [J]. 北京理工大学学报, 2021, 41 (8): 830-839.

[7] 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.

[8] 曹胜男, 贾向东, 郭艺轩, 等. 基于认知无人机移动中继网络的物理层安全通信研究 [J]. 信号处理, 2022, 38 (3): 651-658.

[9] 潘成胜, 张 松, 赵 晨, 等. 一种基于 TCP-ARED 的网络动态拥塞控制策略 [J]. 火力与指挥控制, 2023, 48 (1): 1-7.

[10] 李莉莉, 周二, 李 清, 等. 蜂窝移动网络拥塞控制机制研究综述 [J]. 高技术通讯, 2022, 32 (10): 1036-1048.

[11] 曲大鹏, 张建坤, 吕国鑫, 等. 命名数据网络中带宽时延感知的拥塞控制机制 [J]. 计算机科学与探索, 2022, 16 (5): 1076-1086.

[12] 潘婉苏, 李晓风, 谭海波, 等. BBR 拥塞控制算法的 RTT 公平性优化 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2022, 54 (11): 38-46.

[13] 王龙翔, 董 凯, 李小轩, 等. 面向虚拟数据空间的智能 TCP 拥塞控制算法 [J]. 西安交通大学学报, 2021, 55 (5): 83-91.

[14] 周小玲, 付银莲. WSN 中的最大冗余丢弃和覆盖传输拥塞控制 [J]. 计算机工程与设计, 2021, 42 (7): 1844-1850.

[15] 刘步花, 丁 丹, 杨 柳, 等. 基于 DNN 的无人机数据 OFDM 传输技术 [J]. 系统工程与电子技术, 2022, 44 (2): 696-702.

[16] 樊凌雁, 燕 武, 陈晞涵. 一种低传输能耗的无人机数据传输设计 [J]. 电子学报, 2021, 49 (3): 573-577.

[17] 赖涵光, 李 清, 江 勇. 基于场景变化的传输控制协议拥塞控制切换方案 [J]. 计算机应用, 2022, 42 (4): 1225-1234.

[18] 罗 钧, 庞亚男, 刘建强. 基于历史认知的鲸鱼算法求解动态能耗 [J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36 (1): 236-245.

[19] 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.

[20] 陈廷祚, 倪小龙, 白素平, 等. 改进 YOLOv4 网络的无人机光通信实时捕获定位技术 [J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59 (11): 235-244.