

引用格式:刘朝霞,杨少石,张涛,董文宇,祝学军.一种面向多业务服务质量优化的飞行自组织网络路由协议[J].中国传媒大学学报(自然科学版),2022,29(02):19-26.

文章编号:1673-4793(2022)02-0019-08

# 一种面向多业务服务质量优化的飞行自组织网络路由协议

刘朝霞<sup>1,2</sup>,杨少石<sup>1,2\*</sup>,张涛<sup>3</sup>,董文宇<sup>1,2</sup>,祝学军<sup>3\*</sup>

(1.北京邮电大学信息与通信工程学院,北京100876;2.泛网无线通信教育部重点实验室,北京100876;3.中国运载火箭技术研究院,北京100076)

**摘要:**基于节点间链路传播时延和链路维持时间建模,提出了一种可实现多业务服务质量优化的飞行自组织网络路由协议,针对链路传播时延和链路维持时间进行了定量分析,从计算视角为路由决策算法提供了支撑。首先利用大地中心坐标系建立节点移动模型,并结合移动模型计算链路传播时延和链路维持时间。其中,链路传播时延为节点间通信距离的函数;链路维持时间计算模型相关参数包括节点间的相对距离矢量、相对速度和加速度矢量。然后,针对三种业务类型构建了相应的差异化路由度量,并以此计算最优路由。仿真结果表明,所提路由协议在保证各业务服务质量的基础上,降低了网络时延和丢包率。

**关键词:**飞行自组织网络;路由协议;多业务;QoS;丢包率;端到端时延

中图分类号:TN92

文献标识码:A

DOI:10.16196/j.cnki.issn.1673-4793.2022.02.003

## A routing protocol for optimizing the quality of multi-service provisioning in flying ad hoc networks

LIU Zhaoxia<sup>1,2</sup>, YANG Shaoshi<sup>1,2\*</sup>, ZHANG Tao<sup>3</sup>, DONG Wenyu<sup>1,2</sup>, ZHU Xuejun<sup>3\*</sup>

(1. School of Information and Communication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunication, Beijing 100876, China;

2. Key Laboratory of Universal Wireless Communications, Ministry of Education, Beijing 100876, China;

3. China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China)

**Abstract:** We propose a routing protocol that optimizes the quality of multi-service provisioning in flying ad hoc networks (FANETs) by modeling the link propagation latency and link duration between nodes. We present quantitative analysis of the link propagation latency and link stability, which supports the routing decision algorithm from the computing perspective. Firstly, a mobility model is established by using the geocentric coordinate system, while the link propagation latency and link duration are calculated with the aid of the mobility model. The link propagation latency is a function of the communication distance between nodes. The relevant parameters in the link duration calculation model include the relative distance vector, relative velocity vector and acceleration vector between nodes. Then, the corresponding routing metrics are constructed for the three services considered, and the optimal routes are calculated based on these metrics. Simulation results show that the proposed routing protocol can reduce the network latency and packet loss rate while ensuring the quality of each service.

**Key words:** flying ad hoc network; routing protocol; multi-service; link stability; network latency

基金项目:北京市自然科学基金-海淀原始创新联合基金前沿项目(L202012)

作者简介(\*为通讯作者):刘朝霞(1996-),女,硕士研究生,主要从事基于环境和业务感知的飞行自组织网络路由协议研究。Email:zhaoxiaoliu@bupt.edu.cn;杨少石(1983-),男,教授、博士生导师,主要从事B5G/6G和分布式感知-通信-计算-智能融合理论与技术研究。Email:shaoshi.yang@bupt.edu.cn;祝学军(1962-),女,中国科学院院士,研究员、博士生导师,主要从事高速飞行器设计及空天网络信息技术研究。

## 1 引言

在 B5G 和 6G 时代,依靠诸如无人机、气球、低/中/高空平台、低/中/高地球轨道卫星等无人平台(Unmanned Flying Platform, UFP)的非地面网络<sup>[1][2]</sup>,在各领域<sup>[3][4][5]</sup>引起了广泛关注。为了充分利用 UFP,研究人员提出了由多个协同 UFP 组成的飞行自组织网络(Flying Ad hoc Network, FANET)的概念。随着 FANET 传输业务的多样性和复杂性逐渐增加,用户对网络带宽、速率和时延等传输质量的需求也越来越高。传统的路由协议大多采用最小跳数作为路由度量<sup>[6]</sup>,不能实时反应链路状态,所以无法保障不同类型业务的服务质量(Quality of Service, QoS)要求。

Alzenad M 等人提出了一种更稳定、更可靠的移动自组网多路径 QoS 组播路由协议(Stable and Reliable Multi-path QoS Multicast Routing, SR-MQMR)<sup>[7]</sup>。该协议利用节点的信号强度来选择最稳定的节点,然后根据路由过期时间和跳数选择一条时延低、稳定性高的路由。Wang Y L 等人提出了一种改进的基于蚁群的多约束 QoS 节能路由(Improved Ant colony-based Multi-constrained QoS Energy-saving Routing, IAMQER)算法<sup>[8]</sup>。该算法基于节点队列长度、转发数据包数和节点剩余能量等本地节点信息进行路径选择,提高了多约束 QoS 路由性能。Chen Z 等人提出一种拓扑变化自适应的自组网按需多径距离矢量(Topological change Adaptive Ad hoc On-demand Multipath Distance Vector, TA-AOMDV)路由协议<sup>[9]</sup>。该协议以节点资源为选路参数,并引入链路中断预测机制,以适应节点的高速移动,并提供 QoS 支持。

总的来说,目前针对 FANET 路由协议的研究中,结合具体业务类型进行路由优化的工作相对较少。因此,为了保障 FANET 中多业务传输场景对于 QoS 的不同需求,需针对不同类型业务提出不同的路由选择度量,构建路由优化模型。本文首先对任务场景进行建模并建立移动模型。其次,通过分析业务特点将业务划分为时延敏感类、丢包敏感类和尽力而为类三种类型。然后结合移动模型提出链路传播时延和链路维持时间的计算模型,并根据这两种模型设计路由度量。最后,本文利用 ns-3 网络模拟器进行仿真对比。结果显示,本文所提路由协议在保证各业务 QoS 的同时提高了网络性能。

## 2 系统模型

### 2.1 场景建模

在紧急事件或灾害救援情况下,仅仅依靠地面战略部署往往不足以有效控制局势,所以利用无人机进行空中辅助救援对于执行任务是必不可少的。因此,本文考虑无人机集群协同执行任务的场景。多架无人机以不同的编队从一个地方聚集飞行到任务地点,然后分散飞行执行任务,聚集飞行场景如图 1 所示,分散飞行场景如图 2 所示,其中黑色箭头代表无人机运动方向。

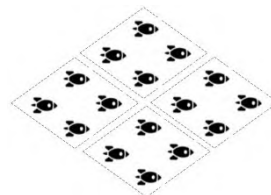


图1 聚集飞行场景

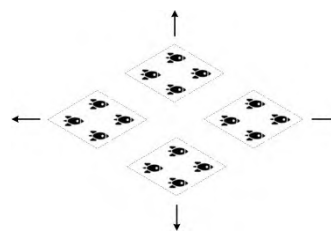


图2 分散飞行场景

### 2.2 移动模型

本文所述场景中的所有无人机节点均分布在三维空间,同一编队内的无人机节点都具有相同的确定性移动模型——按给定的方向和速度移动,且各节点的运动相互独立,互不干扰。在较短的时间周期内,节点的高速运动可近似认为是匀变速运动或匀速运动,即加速度保持不变;节点的平均运动速度大小变化范围是 $[v_{\min}, v_{\max}]$ ,节点飞行分为两个阶段:聚集飞行与分散飞行。

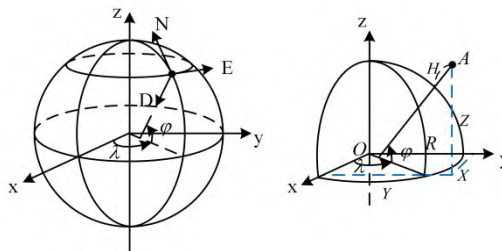


图3 地球中心坐标系

本文采用地球中心坐标系<sup>[10]</sup>来描述无人机节点的运动,如图3所示。地球中心坐标系的坐标原点位于地心,x轴穿过格林尼治线和赤道线的交点,向东为正,z轴经过原点指向北极,y轴与x、z轴构成右手坐标系。任意一点A在地球中心坐标系上的坐标 $(\varphi,\lambda,H)$ 均可表示为:

$$\begin{cases} \varphi = \arctan\left(\frac{Z \times (R + H)}{\sqrt{(X^2 + Y^2)} \times [R(1 - e^2) + H]}\right) \\ \lambda = \arctan\left(\frac{Y}{X}\right) \\ H = \frac{\sqrt{(X^2 + Y^2)}}{\cos\varphi} - R \end{cases} \quad (1)$$

其中, $R$ 为曲率半径, $e$ 为第一偏心率。为了方便表示,将其转换为空间直角坐标系,转换公式如下:

$$\begin{cases} X = (R + H) \cos\varphi \cos\lambda \\ Y = (R + H) \cos\varphi \sin\lambda \\ Z = [R(1 - e^2) + H] \sin\varphi \end{cases} \quad (2)$$

### 3 面向多业务的路由协议设计

#### 3.1 数据报头格式

本文所提出的路由协议借鉴了动态源路由(Dynamic Source Routing, DSR)协议<sup>[11]</sup>将路由信息存储在数据分组头部内的机制,数据报文头格式如图4所示。报文分为数据报文和控制报文,控制报文包括路由回复(Route Reply, RREP)报文和路由错误(Route Error, RERR)报文。在数据报文头中,使用Type字段表示报文的类型,长度为8位。Type的值为0表示该报文为数据报文;值为1表示该报文为RREP报文;值为2表示当前报文为RERR报文。Hop字段也是8位,表示从源节点到目的节点所经历的节点总跳数。在发送数据包时,为每个数据包分配一个序列号,即Seq字段,占8位。剩余8位分配给Reserved字段,为保留字段。然后,利用32位来表示每一跳节点的地址,地址Address[0]-Address[n]表示每个数据报文从源节点发送到目的节点所经过的各个节点的地址,这些节点共同构成数据传输的路由。

Type	Hop	Seq	Reserved
Address[0]			
Address[1]			
.....			
Address[n]			

图4 数据报文头格式

#### 3.2 业务类型分析

为了便于研究,考虑FANET中传输的具体业务类型,包括语音、图片、视频、数据等。通过分析各业务的特点进行业务类型划分。端到端时延是进行业务区分时最常用的一种指标<sup>[12]</sup>,未来网络中的许多应用场景也对网络时延性能提出了新的要求。其次,丢包率作为一种衡量业务传输可靠性的性能指标,也是一种区分业务类型的重要依据。因此,从时延和丢包率两个方面进行考虑,将网络中传输的业务分为以下三类:

**时延敏感类业务:**此类业务对于时延的敏感度较高,要求比较小的端到端时延,同时对丢包率具有一定的容忍度,如语音业务;

**丢包敏感类业务:**此类业务对数据传输的可靠性要求较高,但对时延并没有很高的敏感度,如图像及非直播类视频业务。相对来说,可以选择传输时延较长的路由进行传输,但要求较低的丢包率;

**尽力而为业务:**该类业务对于时延没有特殊的要求,只需网络将数据传送到目的地址即可,同时对丢包率也较不敏感。

针对以上三种业务类型分别提出不同的路由度量,以达到每种业务的服务要求。

#### 3.3 路由优化模型

考虑视距传播条件,且所有无人机节点间的链路具有相同的信道条件,FANET可被模型化为一个加权有向图 $G(V,E,W)$ 。其中, $V$ 表示无人机节点集合; $E$ 是各节点对组成的边的集合,表示相邻节点间存在的链路集合; $W$ 是边的权重值的集合,代表链路上各种有用的状态信息。设网络中源节点为 $S$ ,目的节点为 $D$ , $d(S,D)$ 表示从源节点通往目的节点的一条路径。

对于时延敏感类业务,假设采用 $d(S,D)$ 进行数据传输所需要的代价为 $C(d(S,D))$ 。端到端时延为所建立路径上所有链路的时延之和。本文所考虑的时延为传播时延。传播时延是数据包从一个网络节点传播到另一个网络节点所需要的时间,它是两个网络节点之间距离的函数,设从源节点 $S$ 到节点 $D$ 的传播时延为 $D_{SD}^{Pro}$ ,则:

$$D_{SD}^{Pro} = \frac{L_{SD}}{c} \quad (3)$$

其中, $L_{SD}$ 表示从源节点 $S$ 到目的节点 $D$ 的路径长度, $c$ 表示信号在信道上的传播速度。由于采用的确



定性移动模型可利用坐标系来描述节点的移动,所以任意时刻 $t$ 节点的位置信息可得,则时刻 $t$ 任意两相邻节点间链路长度 $dis(V_i, V_j)$ 为:

$$dis(V_i, V_j) = \sqrt{(X_i^t - X_j^t)^2 + (Y_i^t - Y_j^t)^2 + (Z_i^t - Z_j^t)^2} \quad (4)$$

其中,  $(X_i^t, Y_i^t, Z_i^t)$ 与 $(X_j^t, Y_j^t, Z_j^t)$ 分别表示节点 $V_i$ 与节点 $V_j$ 在 $t$ 时刻的位置坐标。从源节点S到目的节点D的某一条路由可由链路集合 $E_{SD} = \{(V_s, V_i), (V_i, V_n), \dots, (V_j, V_D)\}$ 表示,则该条路由的长度为:

$$L_{SD} = dis(V_s, V_i) + dis(V_i, V_n) + \dots + dis(V_j, V_D) \quad (5)$$

将公式(4)代入上述公式得:

$$L_{SD} = \sqrt{(X_s^t - X_i^t)^2 + (Y_s^t - Y_i^t)^2 + (Z_s^t - Z_i^t)^2} + \sqrt{(X_i^t - X_n^t)^2 + (Y_i^t - Y_n^t)^2 + (Z_i^t - Z_n^t)^2} + \dots + \sqrt{(X_j^t - X_D^t)^2 + (Y_j^t - Y_D^t)^2 + (Z_j^t - Z_D^t)^2} \quad (6)$$

将公式(6)代入公式(3)可得从源节点S到目的节点D的传播时延。

经以上分析,时延敏感类业务的代价函数为:

$$C(d(S, D)) = D_{SD}^{pro} \quad (7)$$

优化问题为:

$$\min_{d(S, D)} C(d(S, D)) \quad (8)$$

在FANET中,链路的稳定性与任务的完成质量和效率有密切关系。本文用链路的连通时间或维持时间表征链路的稳定性。节点组成的链路越稳定,即链路的连通时间越长,则传输越可靠,丢包率越低;反之,则传输越不可靠,丢包率越高。因此,对于丢包敏感类业务,要从链路稳定性角度来进行路由优化。鉴于已经建立的移动模型,本文从节点移动性出发,建立链路维持时间计算模型,如图5所示。网络中任意两个节点 $V_i, V_j$ 在初始时刻的相对位移矢量为 $\vec{\rho}_{ij}$ ,如图中红色箭头所示;相对速度矢量为 $\vec{v}_{ij}$ ,如图中蓝色箭头所示;相对加速度矢量为 $\vec{a}_{ij}$ ,如图中紫色箭头所示。 $\vec{\rho}_{ij}$ 与 $\vec{v}_{ij}$ 间的夹角为 $\theta$ , $\vec{v}_{ij}$ 与 $\vec{a}_{ij}$ 间的夹角为 $\alpha$ , $\vec{\rho}_{ij}$ 与 $\vec{a}_{ij}$ 的夹角为 $\beta$ 。在本文所考虑场景中,分散飞行阶段节点间存在相对运动,经过一定的时间 $t_d$ 后,两节点将运动至双方传输范围之外,通信链路随之断开。因此,我们选择用 $t_d$ 作为衡量链路稳定性的度量。 $t_d$ 的值越大,表示节点间通信维持时间越长,链路越稳定;反之, $t_d$ 的值越小,表示节点间通信维持时间越短,链路越不稳定。

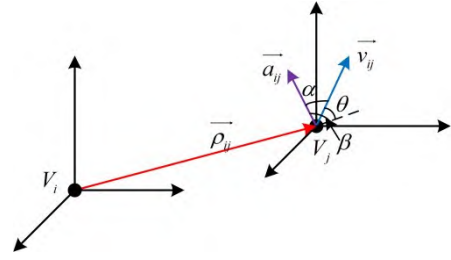


图5 链路维持时间计算模型

两个节点 $V_i$ 与 $V_j$ 在三维空间运动,坐标分别为 $(x_i, y_i, z_i)$ 和 $(x_j, y_j, z_j)$ ,则节点间的距离矢量为 $\vec{\rho}_{ij} = (x_j - x_i, y_j - y_i, z_j - z_i)$ ,相对速度矢量和相对加速度矢量分别为 $\vec{v}_{ij} = (v_{jx} - v_{ix}, v_{jy} - v_{iy}, v_{jz} - v_{iz})$ 和 $\vec{a}_{ij} = (a_{jx} - a_{ix}, a_{jy} - a_{iy}, a_{jz} - a_{iz})$ ,根据运动学公式可得相对位移:

$$\vec{\rho}_{t_d + t_0} = \vec{\rho}_{t_0} + \int_{t_0}^{t_0 + t_d} \vec{v}_{ij} dt_d + \int_{t_0}^{t_0 + t_d} \vec{a}_{ij}(t_d) dt_d^2 \quad (9)$$

其中, $\vec{\rho}_{t_d + t_0}$ 表示 $t_d + t_0$ 时刻节点的位移矢量。

设节点的传输范围为 $r$ ,那么当

$$|\vec{\rho}_{t_d + t_0}| > r \quad (10)$$

时,两节点间链路断开。在本文的场景中,无人机节点做匀变速运动,即加速度为常数,因此相对位移公式(9)可以简化为:

$$\vec{\rho}_{t_d + t_0} = \vec{\rho}_{t_0} + \vec{v}_{ij} t_d + \frac{1}{2} \vec{a}_{ij} t_d^2 \quad (11)$$

将相对距离矢量、速度矢量和加速度矢量的计算式代入公式(11),可以得到链路断开时刻 $t_d$ 的求解表达式:

$$\lambda_4 t_d^4 + \lambda_3 t_d^3 + \lambda_2 t_d^2 + \lambda_1 t_d + \lambda_0 = 0 \quad (12)$$

其中, $\lambda_0 = 4(\vec{\rho}_{ij} \cdot \vec{\rho}_{ij} - r^2)$ , $\lambda_1 = 8(\vec{v}_{ij} \cdot \vec{\rho}_{ij})$ , $\lambda_2 = 4(\vec{a}_{ij} \cdot \vec{\rho}_{ij} + \vec{v}_{ij} \cdot \vec{v}_{ij})$ , $\lambda_3 = 4(\vec{a}_{ij} \cdot \vec{v}_{ij})$ , $\lambda_4 = \vec{a}_{ij} \cdot \vec{a}_{ij}$ 。由公式(12)可知,两节点的链路维持时间 $t_d$ 是关于相对加速度的四次方程。值得注意的是,当两节点相对加速度为0时,即两节点做相对匀速运动,维持时间 $t_d$ 将转变为关于相对速度的二次方程:

$$\lambda_2' t_d^2 + \lambda_1' t_d + \lambda_0' = 0 \quad (13)$$

其中, $\lambda_0' = 4(\vec{\rho}_{ij} \cdot \vec{\rho}_{ij} - r^2)$ , $\lambda_1' = 8(\vec{v}_{ij} \cdot \vec{\rho}_{ij})$ , $\lambda_2' = 4(\vec{v}_{ij} \cdot \vec{v}_{ij})$ 。

对于丢包敏感类业务,设采用 $d(S, D)$ 进行数据传输所获得的效用为 $P(d(S, D))$ 。取链路维持时间 $t_d$ 为计算结果的最小正实数解。则丢包敏感类业务的效用函数为

$$P(d(S, D)) = t_d \quad (14)$$

优化问题为:

$$\max_{d(S,D)} P(d(S,D)) \quad (15)$$

尽力而为类业务是三种业务中最为简单的业务模型,因为网络只是尽最大努力来发送报文,但在整个传输过程中并不保证低时延和高可靠。虽然它不需对时延和丢包做特殊要求,但应尽量根据网络环境与信道条件为其选择更为适合的路由度量。由于尽力而为类业务对于时延和丢包率没有明显的偏向性要求,因此对时延和丢包率进行综合考虑。设尽力而为类业务的代价函数为:

$$B(d(S,D)) = \alpha \frac{1}{t_d} + (1 - \alpha) D_{SD}^{\text{Pro}} \quad (16)$$

其中, $\alpha$ 是区间 $[0,1]$ 的常数,其值由具体网络条件决定。

优化问题为:

$$\min_{d(S,D)} B(d(S,D)) \quad (17)$$

### 3.4 路由建立流程

由上述小节可知本文为时延敏感类业务选择各链路传播时延之和值最小的路径,为丢包敏感类业务选择各链路维持时间之和值最大的路径,为尽力而为业务综合考虑时延与链路维持时间选择路径。

首先,对于时延敏感类业务,将各链路的传播时延作为链路的权值,构建链路权值矩阵如下:

$$\mathbf{W}_1 = \begin{bmatrix} D_{11}^{\text{Pro}} & D_{12}^{\text{Pro}} & \cdots & D_{1n}^{\text{Pro}} \\ D_{21}^{\text{Pro}} & D_{22}^{\text{Pro}} & \cdots & D_{2n}^{\text{Pro}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ D_{n1}^{\text{Pro}} & D_{n2}^{\text{Pro}} & \cdots & D_{nn}^{\text{Pro}} \end{bmatrix} \quad (18)$$

其中, $D_{in}^{\text{Pro}}$ 表示由节点*i*和节点*n*连接而成的链路的传播时延,若节点*i*与节点*n*间没有连接链路,则将 $D_{in}^{\text{Pro}}$ 置为无穷大;若*i*等于*n*,则将传播时延置零。然后构建矩阵 $\mathbf{M}$ ,用来记录中间节点的信息。在初始情况下,中间节点信息矩阵 $\mathbf{M}$ 用来记录任意链路中的后继节点,即:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & \cdots & n \\ 1 & 2 & \cdots & n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 2 & \cdots & n \end{bmatrix} \quad (19)$$

其中,第*i*行*j*列元素( $i \neq j$ )表示节点*i*到节点*j*的链路上相对节点*i*而言的后继节点。初始时将网络中所有的节点加入未确定节点集*U*,依次对未确定节点集*U*中的所有节点进行遍历,将*U*中节点按特定的顺序依次加入到 $\mathbf{M}$ 中,同时保证从源节点*S*到 $\mathbf{M}$ 中其他各节点的链路传播时延都不大于从源节点*S*到*U*中

任何节点的链路传播时延。

算法1:具体的路由建立算法步骤如下:

算法输入参数: $S, D, U, \mathbf{W}_1, \mathbf{M}$

算法输出结果:Route

步骤1:初始化,确定源节点*S*与目的节点*D*;初始化 $\mathbf{W}_1$ 矩阵,其每个元素都代表链路的传播时延;初始化中间节点信息矩阵 $\mathbf{M}$ 与未确定节点集*U*;

步骤2:遍历未确定节点集*U*中的节点,如果加入节点*K*作为中间节点后, $\mathbf{W}_1$ 矩阵中的链路传播时延减小,则更新 $\mathbf{W}_1$ 矩阵中对应链路的传播时延为最新值;

步骤3:从未确定节点集*U*中移除节点*K*;矩阵 $\mathbf{M}$ 中对应链路处的后继节点更新为节点*K*;

步骤4:重复上述步骤2、步骤3,直到遍历完所有节点。

步骤5:从源节点*S*开始,在矩阵 $\mathbf{M}$ 中依次找寻到目的节点*D*的中间节点。

步骤6:路由建立完成,输出Route。

对于丢包敏感类业务,将计算所得的链路维持时间 $t_d$ 作为链路权值,构建链路权值矩阵

$$\mathbf{W}_2 = \begin{bmatrix} t_{d,11} & t_{d,12} & \cdots & t_{d,1n} \\ t_{d,21} & t_{d,22} & \cdots & t_{d,2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ t_{d,n1} & t_{d,n2} & \cdots & t_{d,nn} \end{bmatrix} \quad (20)$$

与之前所述相似, $t_{d,in}$ 表示由节点*i*和节点*n*连接而成的链路维持时间。由于时延敏感类业务的优化问题为最小化,而丢包敏感类业务的优化问题为最大化,参考算法1的流程,为了便于计算,这里在进行算法输入时,对矩阵 $\mathbf{W}_2$ 取负,即将 $-\mathbf{W}_2$ 作为输入。在矩阵 $-\mathbf{W}_2$ 中,若节点*i*与节点*n*之间没有链路,置链路维持时间为无穷;若*i*等于*n*,则对应位置的元素值置零。依然用公式(19)所述的节点信息矩阵 $\mathbf{M}$ 来保存中间节点信息。

算法2:具体的路由建立算法步骤如下:

算法输入参数: $S, D, U, -\mathbf{W}_2, \mathbf{M}$

算法输出结果:Route

步骤1:初始化,确定源节点*S*与目的节点*D*;初始化 $-\mathbf{W}_2$ 矩阵,其每个元素都代表链路维持时间的负值;初始化中间节点信息矩阵 $\mathbf{M}$ 与未确定节点集*U*;

步骤2:遍历未确定节点集*U*中的节点,如果加入节点*K*作为中间节点后, $-\mathbf{W}_2$ 矩阵中的链路维持时间的负值减小,则更新 $-\mathbf{W}_2$ 矩阵中对应元素的值为最新值;

步骤3:从未确定节点集*U*中移除节点*K*;矩阵 $\mathbf{M}$

中对应链路处的后继节点更新为节点K;

步骤4:重复上述步骤2、步骤3,直到遍历完所有节点。

步骤5:从源节点S开始,在矩阵M中依次找寻到目的节点D的中间节点。

步骤6:路由建立完成,输出Route。

算法3:对于尽力而为类业务,按照公式(16)计算其代价函数 $B(d(S,D))$ 的值,并参照(18)以类似方式构建权重矩阵,将其作为输入,并根据时延敏感类业务计算路由的步骤计算Route,这里不再重复叙述。

### 3.5 路由恢复策略

网络中的路由可以视为数据转发过程中每一条链路的集合,记为 $L = \{l_{SN_1}, l_{N_1N_2}, \dots, l_{N_{hop-1}D}\}$ ,表示从源节点S到目的节点D的hop跳路由中相邻节点构成的链路集合。

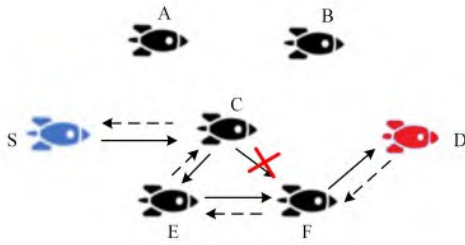


图6 路由恢复

路由恢复模型如图6所示。当节点C检测到下一跳路由发生断裂时,首先向源节点发送RERR报文告知源节点此处的链路发生断裂。接着,节点C重新计算到目的节点D的路由。图中重新计算的路由为S-C-E-F-D。值得注意的是,只有在中间跳节点之间发生链路断裂时,才会向源节点发送RERR报文。当源节点S的下一跳发生故障,即链路 $l_{SN_1}$ 发生断裂时,源节点不会接收到任何反馈,它会立即执行路由发现过程,重新计算到达目的节点的有效路由。如果到目的节点的最后一跳发生了传输故障,即链路 $l_{N_{hop-1}D}$ 断裂时,说明目的节点不可达。在这种情况下,将不会重新发送数据包。

## 4 仿真结果分析

### 4.1 性能指标

本文利用ns-3网络模拟器对所提出的路由协议进行仿真,并选择OLSR(Optimized Link State Rout-

ing)、DSDV(Destination Sequenced Distance Vector)、DSR和AODV(Ad hoc On-demand Distance Vector)四种路由协议与本文所提的路由协议进行比较。从平均端到端时延和丢包率两方面比较路由协议的性能。定义平均端到端时延(Average end-to-end latency,  $\bar{D}_{E2E}$ )如下:

$$\bar{D}_{E2E} = \frac{\sum D_{i,E2E}}{N_R} = \frac{\sum (t_{i,R} - t_{i,S})}{N_R} \quad (21)$$

其中, $t_{i,S}$ 和 $t_{i,R}$ 分别表示从源节点发送报文*i*的时刻和在目的节点接收报文*i*的时刻, $N_R$ 表示从这些目的节点接收报文的总数。这个时间既包括建立路由所花费的时间,也包括数据转发所花费的时间。此指标用于衡量网络传输的延迟性能。

定义丢包率(Packet Loss Rate, PLR)如下:

$$PLR = 1 - \frac{\sum N_{i,R}}{\sum N_{j,S}} \quad (22)$$

其中, $\sum N_{i,R}$ 和 $\sum N_{j,S}$ 分别为接收到的报文总数和发送的报文总数。它反映了使用特定路由协议进行网络传输的可靠性。

### 4.2 结果分析

仿真参数如表1所示,考虑了 $4 \times 9 = 36$ 的网络规模,即4个无人机编队,每个编队9个节点。

表1 仿真参数

参数名	参数值
网络模拟器	ns-3
节点数量	$4 \times 9 = 36$
平均速度	200/250/300/350/400 m/s
节点加速度	5 m/s <sup>2</sup>
数据包大小	1000 bytes
传播模型	Constant speed propagation
损耗模型	Friis propagation
传输功率	16.0206 dbm
仿真时间	100 s

图7比较了不同路由协议的平均端到端时延性能。从图中可以看出,在36节点场景下,随着节点的运动速度由200 m/s增加至400 m/s时,各路由协议的时延逐渐增加。其中,DSDV的时延最高,这是因为只有DSDV需要所有节点定期发送控制报文;平均而言,DSDV中每个节点产生的控制报文数量比其他任何协议都要多,导致了更高的报文排队延迟和报文处理延迟。OLSR路由协议由中继节点负责网络中所有



控制消息的转发,所以中继节点处的业务负载量较大,发生拥塞的概率较高,因此平均端到端时延也比较大。随着速度的增加,链路稳定性降低,平均时延继续增大。AODV路由协议在路由发现时,目的节点只回复最先到达的路由请求,因此其自动选择拥塞情况最好的路由,再加之其表驱动的特性在一定程度上可适应因速度增大导致的链路变化,因此平均端到端时延较小。DSR采用的路由缓存技术在链路比较稳定的情况下会大大降低时延。然而,随着节点速度的增加,其时延有明显的增加,这是因为链路状态大幅变化的情况下,DSR会过度依靠缓存路由,容易选择已经失效的路由,导致重新启动路由发现过程。本文提出的路由协议首先考虑了链路的传播时延,会优先选择传播时延低的链路。其次,通过分析节点间相对位移、相对速度及相对加速度的大小和方向对维持时间的影响,选择链路维持时间长的路径,能够更好的适应链路频繁变化,因此具有最好的时延性能。

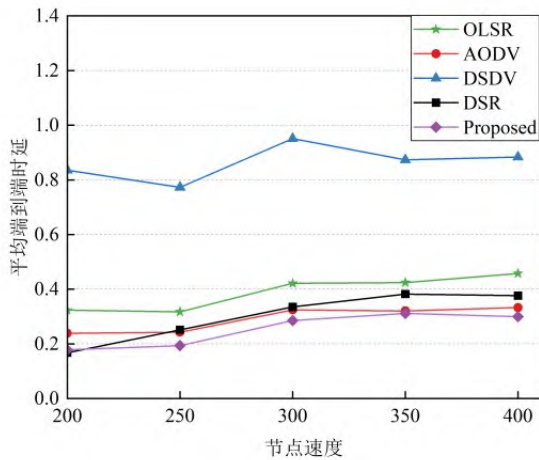


图7 平均端到端时延性能比较

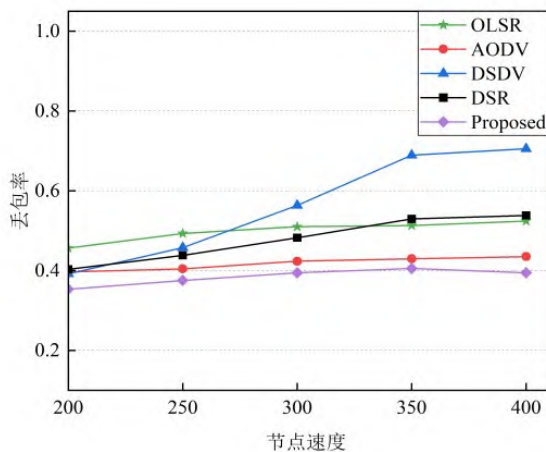


图8 丢包率比较

图8比较了不同路由协议的丢包率。整体上看,各路由协议丢包率随着网络节点动态性的增加而增大。DSDV的丢包率在开始时很小,但随着节点速度增大,DSDV的丢包率明显增加,到300 m/s时,已增至所有协议中最大。这是因为DSDV只为一个目的节点维护一条路由,且路由消息更新周期时间较长,随着节点的速度增大,网络连通性尤其是在分散飞行时会大幅降低,网络拓扑变化加剧,由于不能及时的更新路由信息,路由频繁中断导致丢包率上升。OLSR路由协议中定期广播HELLO消息等控制信息的时间比较折中,对链路变化信息的获取较为平稳,因此丢包率会随速度增大平稳增大。AODV路由协议为按需路由协议,在没有数据传输需求时,网络拓扑变化对其影响不大,所以丢包率也稳定增加。网络拓扑变化严重情况下,DSR过分依赖路由缓存,无法很好的适应频繁的链路变化,导致丢包率逐渐上升。本文所提路由协议在考虑链路稳定性的基础上,根据链路维持时间选择路由,能够选择维持时间最长且最稳定的链路,降低了因链路中断而导致的丢包,因此丢包率较低。

图9和图10比较了本文提出的路由协议中三种业务的平均时延和丢包率,其中A类业务表示时延敏感类业务,B类业务表示丢包敏感类业务,C类业务表示尽力而为业务。因为选择了传播时延最低的链路进行传输,A类业务表现出了最好的时延性能。对于C类业务的传输,也将传播时延纳入其路由选择时的考虑因素,所以其时延性能优于B类业务。B类业务的丢包率最低,这是因为传输B类业务时,会优先选择链路维持时间最长的链路,其链路稳定性最高,丢包率最小。而C类业务同样考虑了链路稳定性的因素,所以其丢包率会低于A类业务。

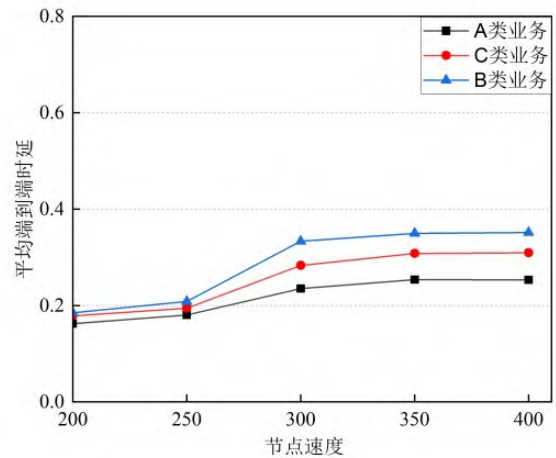


图9 各业务平均端到端时延

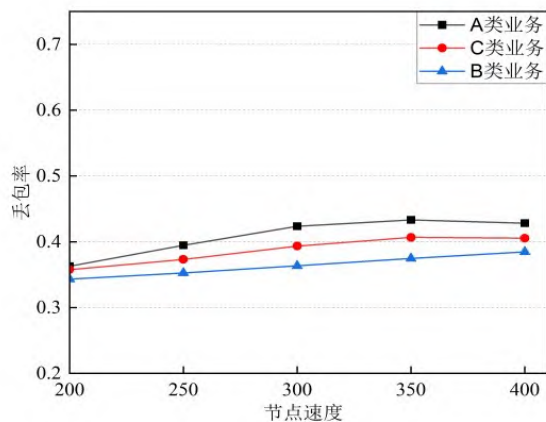


图10 各业务丢包率

根据以上分析,本章所提路由协议在保障不同类型业务 QoS 的基础上,在时延和丢包率方面实现了较为明显的性能提升。

## 5 结论

本文针对 FANET 中无人机执行任务时的多业务场景展开分析,提出了一种面向多业务的路由协议。首先对无人机编队先聚集再分散飞行的场景进行建模,并利用大地中心坐标系构建移动模型。然后根据各业务对 QoS 的要求不同划分业务类型并针对每种业务提出路由优化模型。本文利用链路传播时延和链路维持时间构建路由选择的度量,在保证可靠性传输的基础上提高网络性能。最后,本文利用 ns-3 网络模拟器对所提路由协议以及四种经典路由协议进行仿真,比较了平均端到端时延和丢包率两种网络性能。结果表明,本文提出的路由协议在保证各业务 QoS 的同时降低了时延和丢包率。

### 参考文献(References):

- [1] Alzenad M, Shakir M Z, Yanikomeroğlu H, et al. FSO-based vertical backhaul/fronthaul framework for 5G+ wireless networks [J]. IEEE Communications Magazine, 2018, 56(1): 218-224.
- [2] Giordani M, Zorzi M. Non-terrestrial networks in the 6G

era: challenges and opportunities [J]. IEEE Network, 2021, 35(2): 244-251.

- [3] Zhang S, Liu J. Analysis and optimization of multiple unmanned aerial vehicle-assisted communications in post-disaster areas [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(12): 12049-12060.
- [4] Liu M, Yang J, Gui G. DSF-NOMA: UAV-assisted emergency communication technology in a heterogeneous Internet of Things [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(3): 5508-5519.
- [5] Li M, Zhen L, Wang S, et al. Unmanned aerial vehicle scheduling problem for traffic monitoring [J]. Computers & Industrial Engineering, 2018, 122: 15-23.
- [6] 符琦. 一种具有业务感知的多路径 QoS 路由策略 [J]. 计算机学报, 2014, 37(10): 2153-2164.
- [7] Vaighan M G, Jamali M. A multipath QoS multicast routing protocol based on link stability and route reliability in mobile ad-hoc networks [J]. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 2019, 10(1): 107-123.
- [8] Wang Y L, Song M, Wei Y F, et al. Improved ant colony-based multi-constrained QoS energy-saving routing and throughput optimization in wireless ad-hoc networks [J]. The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications, 2014, 21(1): 43-53.
- [9] Chen Z, Zhou W, Wu S, et al. An adaptive on-demand multipath routing protocol with QoS support for high-speed MANET [J]. IEEE Access, 2020, 8: 44760-44773.
- [10] Liu J, Xu W, Jiang T, et al. Development of an attitude transformation method from the navigation coordinate system to the projection coordinate system [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2020, 17(8): 1318-1322.
- [11] Pan L. An improved the DSR routing protocol in mobile ad hoc networks [C]. The 6<sup>th</sup> IEEE International Conference on Software Engineering and Service Science (ICSESS). 2015: 591-594.
- [12] Tan X, Zuo Z, Su S, et al. Performance analysis of routing protocols for UAV communication networks [J]. IEEE Access, 2020, 8: 92212-92224.

编辑:王谦,王雨田