

DOI: 10.13382/j.jemi.B2104000

基于负载感知和伪流言机制的高稳定性路由协议

梅家栋 南建国

(空军工程大学 航空工程学院 西安 710038)

摘要:通过建立无人机自组网可以有效满足无人机集群作战的组网通信需求,但相较于传统移动自组网,无人机自组网具有节点移动速度更快,网络拓扑高度动态变化的显著特征。针对链路频繁断开带来网络性能下降严重的问题,提出了一种基于负载感知和伪流言机制的高稳定性路由协议。网络拥塞和节点移动性是影响路径稳定性的两个主要因素。针对网络拥塞问题,提出了基于节点负载预测的伪流言受限洪泛机制,在发起路由请求过程中,通过动态调整节点转发概率,均衡了网络负载的同时降低了控制开销。针对无人机节点的高移动性特征,基于接收到分组信号功率强度,提出了链路稳定性的联合度量指标。仿真结果表明,与AODV协议及其他改进型协议相比,该协议有效减少了网络的控制开销,提高了分组投递率,降低了平均端到端时延,显著改善网络性能,增强了数据传输的实时性和可靠性。

关键词:无人机自组网;路由协议;负载均衡;伪流言机制;链路稳定性

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.5030

Load awareness and pseudo gossip mechanism based high stability routing protocol

Mei Jiadong Nan Jianguo

(Aeronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract:The establishment of flying ad hoc networks (FANETs) can effectively meet the networking communication requirements of UAV cluster operation, but compared with the traditional mobile ad hoc network, flying ad hoc network has the characteristics of faster node movement and dynamic network topology. To solve the problem of network performance degradation caused by frequent link disconnection, this paper proposes a high stability routing protocol based on load sensing and pseudo gossip mechanism. Network congestion and node mobility are two main factors affecting path stability. In order to solve the problem of network congestion, a pseudo rumor limited flooding mechanism based on node load prediction is proposed. In the process of initiating routing requests, the node forwarding probability is dynamically adjusted to balance the network load and reduce the control overhead. Aiming at the high mobility characteristics of UAV nodes, a joint measurement index of link stability is proposed based on the received packet signal power strength. Simulation results show that, compared with AODV protocol and other improved protocols, this protocol can effectively reduce the network control overhead, improve the packet delivery rate, reduce the average end-to-end delay, significantly improve the network performance, and enhance the real-time and reliability of data transmission.

Keywords:FANETs; routing protocol; load balancing; pseudo gossip mechanism; link stability

0 引言

无人机集群系统具有编队灵活、生存能力强、可扩展性好、完成任务高效、使用成本低等优点。相较于单无人机系统,无人机集群能在复杂多变的战场环境中更好更

有效地完成作战任务^[1-2]。而无人机集群作战的基础是建立稳定可靠的通信网络,无人机节点通过实时的信息交互,实现任务协同,充分发挥集群优势,更加高效地完成作战任务。移动 Ad Hoc 网络具有无中心,组网高度灵活,拓扑动态可变,抗毁性强等特点,可有效满足无人机集群组网通信需求^[3]。无人机集群采用移动 Ad Hoc 网

络的通信架构,形成了无人机自组网(flying ad hoc networks, FANETs)。由于无人机节点的高机动性,无人机自组网具有网络拓扑变化剧烈、链路断开频繁、带宽资源受限等特点^[4-5]。而路由协议是影响网络性能的关键,因此,设计能够适应无人机特点的路由协议是一项重要研究课题^[6-9]。AODV 路由协议是一种典型的按需式路由协议,只有当节点需要通信时才建立路由,大大节省了网络资源,扩展性好,对网络拓扑动态变化具有一定的自适应性,较适合于无人机自组网^[10-11]。但在发起路由请求过程中,AODV 协议通过盲目洪泛的方式转发 RREQ 消息^[12],会带来大量冗余,占用网络资源,影响数据分组的转发,降低网络的通信效能。此外,AODV 协议以最小跳数作为路径选择的标准,会带来两个方面的问题:1)在网络中处于相对中间位置的节点需要支持大量路径,分组转发频繁,负载较重,可能会导致网络拥塞;2)跳数最小也代表着平均链路长度最大,链路容易因为节点的移动而断开频繁,链路不稳定。针对 AODV 协议存在的问题,文献[13]为应对网络拓扑结构快速变化,从提高路由本地修复成功概率方面进行改进,降低了路由重启的频率。但没有从本质改善建立路径的稳定性,且没有考虑网络负载均衡的问题。文献[14]在文献[13]的基础上,考虑了网络节点资源耗费不均的问题,提出了资源可用性模型。文献[15]提出了网络中拥塞控制和负载均衡的方法,但未考虑节点移动对链路稳定性影响。文献[16]提出一种基于链路保持概率的稳定性计算方法,但计算较为复杂,且对环境动态变化的适应性不足。文献[17]提出了保证路径有效的关键指标:链路持续时间、拥塞可能性因子。并结合两个关键性指标,设计一种稳定性路由机制,但在计算链路持续时间时,假定节点运动特性是不变的,而实际的网络节点的运动参数是时变的,同时没有考虑路由发现过程中盲目洪泛对网络性能的影响。文献[18]提出一种基于链路质量预测的按需路由算法,通过链路稳定度和节点拥塞度评估当前链路质量,并将其作为选路标准。但在计算链路稳定度时,没有体现节点间相互运动的方向性。

通过建立稳定的路径可以有效减少路由的断裂与重建。而网络拥塞和节点移动性是影响路径稳定性的两个主要因素。针对网络拥塞问题,提出了基于节点负载预测的伪流言受限洪泛机制,在发起路由请求过程中,通过结合负载预测和伪流言机制下的受限洪泛,实现网络负载均衡和降低网络开销,同时提高了建立路由的可靠性;针对无人机节点的高移动性特征,基于接收到分组信号功率强度,提出了链路稳定性的联合度量指标,通过建立高稳定性的路径降低网络拓扑高度动态变化对网络性能的影响。本文提出了一种基于负载感知和伪流言机制的高稳定性路由协议(load awareness and pseudo gossip

mechanism based high stability routing protocol, LPBGR)。

1 基于节点负载预测的伪流言受限洪泛机制

节点通过负载预测模型获取下一时刻自身和邻居节点的负载状况,并根据节点的局部分布密度,使用伪流言机制动态调整转发 RREQ 消息的概率,实现受限洪泛。通过基于节点负载预测的伪流言受限洪泛机制,降低了负载较重节点成为最终建立路由的中间节点的可能性,减少节点分布密集区域 RREQ 消息过度冗余,减小控制开销,均衡网络负载,保证建立路径的稳定性。

1.1 负载预测模型

节点的负载通过 MAC 层队列中的数据长度来度量^[19],通过计算缓存区的队列长度与最大队列长度的比值确定负载状态函数 $L_i(t)$ 如下所示:

$$L_i(t) = \frac{q_i(t)}{q_{i\max}} \quad (1)$$

式中: $q_i(t)$ 为节点 i 在 t 时刻 MAC 层接口的队列长度; $q_{i\max}$ 表示为节点 i 最大 MAC 层接口最大队列长度。负载状态函数会随时间变化,可以通过采样获得观测值的时间序列 $L_i(k)$ 。

ARIMA 模型具有算法实现简单,运算速度快,短期预测精度较高,时效性强的优点,具有强线性预测的特点,但无法准确预测负载时间序列的非线性关系。小波神经网络(wavelet neural network, WNN)有效结合了小波分析和神经网络,具备对复杂非线性不确定系统较好的预测效果。因此,本文采用基于 ARIMA-WNN 组合预测模型,实现对节点负载状态信息的预测。通过将负载状态函数看作由线性部分和非线性部分组成,组合预测的步骤如下。

1) 得到负载函数采样序列后,通过差分法将非平稳的负载时间序列进行平稳化处理,通过建立 ARIMA 模型后,得到线性部分的预测值。负载时间序列的非线性特征通过将预测结果与原序列的残差得到。ARIMA 模型数学表达如下所示:

$$\begin{cases} \Phi(B) \nabla^d x_t = \Theta(B) \varepsilon_t \\ E(\varepsilon_t) = 0, \text{Var}(\varepsilon_t) = \delta_\varepsilon^2, E(\varepsilon_t \varepsilon_s) = 0, s \neq t \\ E(x_s \varepsilon_t) = 0, \forall s < t \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\Phi(B) = 1 - \sum_{n=1}^p \Phi_n B_n$; $\Theta(B) = 1 - \sum_{n=1}^q \Theta_n B_n$; $\nabla = 1 - B$ 是差分算子; $|B| \leq 1$ 为滞后算子; x_t 为样本值; $\{\varepsilon_t\}$ 为白噪声序列; Φ_n 和 Θ_n 为待估参数。

WNN 模型的结构如图 1 所示,网络拓扑机构图本文采用的 3 层网路 WNN 模型,分别为输入层、隐含层和输

出层,输出层采用线性输出。输入层、隐含层和输出层分别有个 m 、 n 个和 1 个神经元。模型的输入参数为 X_k , $X_{k+1}, \dots, X_{k-1+m}, \hat{X}_{k+1}$, 为输出预测值。 ω_{ij} 和 ω_{j1} 分别为隐含层与输入层、输出层之间的连接权值。

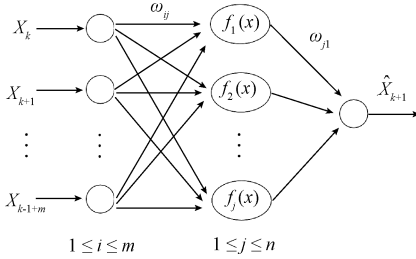


图 1 WNN 模型结构

Fig. 1 The structure chart of WNN model

图 1 中隐含层节点的输出为:

$$f(j) = f_j \left(\frac{\sum_{i=k}^{k-1+m} \omega_{ij} X_i - b_j}{a_j} \right) \quad j = k, k + 1, \dots, k - 1 + m \quad (3)$$

式中: $f_j(x)$ 为小波基函数; a_j 、 b_j 分别小波基函数的伸缩参数和平移参数; $f(j)$ 为第 j 个节点的输出值。

2) 隐含层选取 Morlet 函数作为激励函数,其数学表达式为:

$$y = \cos(1.75x) e^{-\frac{x^2}{2}} \quad (4)$$

模型的输出结果为:

$$\hat{X}_{k+1} = \sum_{j=1}^n \omega_{j1} f(j) \quad (5)$$

3) 通过将线性部分的预测值和非线性部分的预测值相加,得到下一时刻负载的预测值。

1.2 伪流言机制下的受限洪泛

通过将路由发现过程中的 RREQ 消息的洪泛过程与流言的传输进行类比,将流言机制应用到路由协议中^[20]。基本的流言机制 $GOSSIP(p)$ 可描述为,源节点以概率 1 发送消息,中间节点首次收到后,以概率转发该消息,以概率对其进行丢弃。若接收到相同的消息,则直接丢弃。根据扩散理论, $GOSSIP(p)$ 会呈现出双峰行为,在消息传播过程中,会出现要么大部分节点都接收到消息,要么几乎都没有接收到消息的极端情况。结果的呈现形式由网络的拓扑结构和流言概率 p 共同作用。理想情况是在保证消息成功建立路由前提下, p 尽可能小,以减少控制开销。但可能会出现当源节点的邻居节点较少时,消息会过早消失。为了避免这一现象,有以下两种措施进行改进:1) 可以规定源节点 k 跳范围内节点以概率 1 广播消息,之后的中间节点以概率 p 传播,记作 $GOSSIP1(p, k)$; 2) 中间节点接收到消息后,有 $1-p$ 的概

率不转发,此时通过缓存该消息一段时间,期间如果节点接收到不少于 m 个邻节点转发的消息,则将缓存的消息丢弃,否则立即转发该消息,记作 $GOSSIP3(p, k, m)$ 。节点通过感知邻居节点对消息的转发情况,处理未发送的消息。

流言机制的消息转发概率 p 是固定,中间节点不能根据自身状态及环境的变化改变转发概率。而无人机自组网具有高度的动态性,因此通过节点的负载状况和局部分布情况调整,形成伪流言机制 $gossip(p_i, k, m)$ 。其中的 p_i 的计算方法如下:节点 i 通过自身和 n 个邻居节点的负载的大小按照降序进行排列,即是负载最大的节点序号为 1,负载最轻的节点序号为 $n + 1$,并假设节点 i 对应负载 L_i 的排列序号为 $R(i)$,则节点 i 转发 RREQ 消息的概率表示为式(6)。

$$P_i = \begin{cases} 1, R(i) \geq n - 2 \text{ 或 } n \leq 3 \\ \frac{R(i)}{n + 1}, \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

节点根据下一时刻自身的邻居节点个数和负载的预测值,动态调整转发 RREQ 消息的概率,负载大则转发概率较小,降低了负载较重节点成为最终建立路由的中间节点的可能性,实现网络负载均衡和降低网络开销,同时提高了建立路由的可靠性。同时,节点的邻居节点个数可以在一定程度上反映节点的局部分布情况。在洪泛的过程中,希望在分布密集的区域,降低节点的转发概率,调控 RREQ 消息的数量,减少分组的碰撞和控制开销。而在分布相对稀疏的区域,节点转发 RREQ 消息的概率较大,保证建立路由的成功率。在式(6)中,当节点的邻居节点数 ≤ 3 时,节点分布较稀疏,转发概率为 1,当邻居节点数 $n > 3$ 时, n 在转发概率表达式的分母项, n 值与转发概率成反比关系,减少节点分布密集区域 RREQ 消息的过度冗余。

2 链路稳定性指标和路径选择

设节点的发送功率为 P_t ,接收功率为 P_r ,成功接收分组的最低功率为 P_{\min} ,当 P_r 大于等于 P_{\min} 时才能正确接收分组。且在自由空间传输模型中, P_r 的大小取决于收发节点之间的距离, P_{\min} 对应的距离即为一跳通信的距离 r 。考虑到周围节点发送信号和环境中存在的噪声对数据接受的影响, P_{\min} 并不是固定的^[21]。在通信链路断开前,记上一次成功接收的分组的接收功率为 P'_r ,通过采用平滑的方式更新节点的最小接收功率 P_{\min} ,如式(7)所示。

$$P_{\min} \leftarrow \omega P'_r + (1 - \omega) P_{\min} \quad (0 < \omega < 1) \quad (7)$$

节点接收到的邻居节点信号的功率值变化情况可以反映节点间的链路状态信息。通过节点间周期性交互的

HELLO 消息,可以在链路层获取到功率变化参数。如图 2 所示,规定节点 i, j 分别是接收节点和发送节点。在 T_1, T_2 时刻 i 接收到 j 的信号功率强度为 $P_i^{T_1}(j)$ 和 $P_i^{T_2}(j)$, 则定义功率强度比函数为:

$$S_i(j) = 10\lg \frac{P_i^{T_2}(j)}{P_i^{T_1}(j)} \quad (8)$$

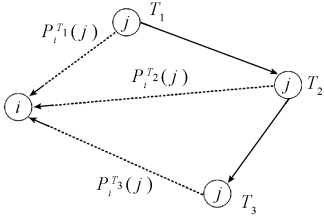


图 2 节点运动与接收信号功率关系

Fig. 2 The relationship between node motion and received signal power

如果 $P_i^{T_1}(j) < P_i^{T_2}(j)$, 表明节点 i 和 j 相互靠近, 此时 $S_i(j) > 0$, 若 $P_i^{T_1}(j) > P_i^{T_2}(j)$, 说明两节点相互远离, $S_i(j) < 0$, 因此可以用 $S_i(j)$ 的正负性表征节点间的运动关系。节点 i 通过对接收到来自 j 的信号功率采样 M 次, 设第 M 次记作 $P_i^M(j)$, 可计算出 $M - 1$ 个功率强度比数值 $S_i^1(j), S_i^2(j), \dots, S_i^{M-1}(j)$, 其中:

$$S_i^{M-1}(j) = 10\lg \frac{P_i^M(j)}{P_i^{M-1}(j)} \quad (9)$$

对获得的功率强度比数值样本求均值后, 得到:

$$ES_{ij} = \text{mean} \{ S_i^1(j), S_i^2(j), \dots, S_i^{M-1}(j) \} \quad (10)$$

ES_{ij} 可以反映经过一段采样时间后, 两节点最终的相对运动方向, 如果 $ES > 0$ 说明两节点相互靠近, 反之, 则是相互远离。样本的方差可用来反映 i 和 j 之间链路 $l(i, j)$ 的稳定状态。

$$LS_{ij} = \text{var} \{ S_i^1(j), S_i^2(j), \dots, S_i^{M-1}(j) \} \quad (11)$$

LS_{ij} 的值越小说明和之间相对运动程度低, 也是说明链路 $l(i, j)$ 的相对稳定性好。

如图 3 所示, 对于下一跳备选节点, 设其邻居节点数为 u , 设是的一个邻居节点, 则对于可求其功率强度比。

$$S_j(q_k) = 10\lg \frac{P_j^{T_2}(q_k)}{P_j^{T_1}(q_k)} \quad (12)$$

同样的方法可以求得 u 个邻居节点对应的功率强度比数值 $\{ S_j(q_1), S_j(q_2), \dots, S_j(q_u) \}$, 对其求方差后作为 j 的节点稳定性 NS_j 。

$$NS_j = \text{var} \{ S_j(q_1), S_j(q_2), \dots, S_j(q_u) \} \quad (13)$$

通过获得的链路相对稳定状态值 LS_{ij} , 下一跳备选节点的节点稳定性 NS_j 联合加权, 以及 ES_{ij} 修正后可以得到链路 $l(i, j)$ 稳定性的联合指标 CI_{ij} :

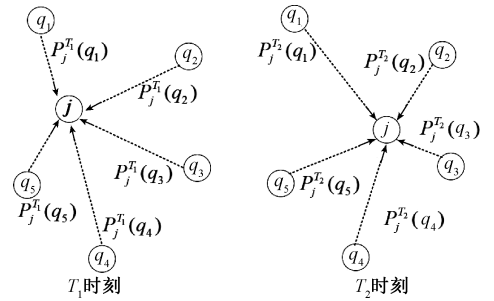


图 3 节点运动与接收信号功率关系

Fig. 3 The relationship between node motion and received signal power

$$CI_{ij} = \alpha \times LS_{ij} \times e^{-ES_{ij}} + \beta \times NS_j \quad (14)$$

其中 $\alpha + \beta = 1$, CI_{ij} 用来表示链路的稳定性, 且 CI_{ij} 值越小, 则链路 $l(i, j)$ 稳定性越高。

规定路径 P 的稳定性 PL 为路径中所有链路稳定性最低的链路确定, 即:

$$PL = \max_{l(i,j) \in P} \{ CI_{ij} \} \quad (15)$$

3 路由策略设计

3.1 建立信息列表

通过 HELLO 消息在一跳范围周期性广播, 节点可以感知邻居节点存在及获取对应的参数信息。通过在 HELLO 分组中添加写入有节点负载预测值的字段, 节点通过接收 HELLO 消息建立相邻节点列表的同时形成邻居节点的负载状况列表。根据第 2 节的方法计算关于邻居节点间的链路稳定性联合指标, 并建立并实时维护链路稳定性列表。

3.2 路由发现

当源节点需要发送数据时, 首先查找自身存储的路由表项是否存在到达目的节点的有效路径, 如果不存在, 则发起路由请求。源节点广播 RREQ 消息, 中间节点在首次收到 RREQ 消息后, 且自身不是该消息的目的节点, 则读取 RREQ 消息中跳数字段的数值。如果 $h \leq k$, 其中 k 取值为 2, 则以概率 1 广播该 RREQ 消息。如果 $h > k$, 则通过式 (6) 代入相关参数计算转发概率 p_i 。如果最后节点以概率 $1 - p_i$ 未发送 RREQ 消息, 节点则暂时缓存该消息, 如果在超时间隔时间 (设置为平均一跳传输时间的 5 倍) 内收到的邻居点发送的相同的 RREQ 消息数目小于 m 个, 其中 m 取值为 1, 则立刻转发该消息, 否则将该消息从缓存中删除。

3.3 路由确立

目的节点在收到 RREQ 消息后, 开启时间窗口, 并统计收到的 RREQ 消息个数。当收到的消息个数达到预设

值或统计时间窗超时,则停止统收集过程。

在建立路径式在充分考虑链路稳定性的基础上,还要考虑路径跳数对时延的影响。假设通过路由发现建立的多条路径中,路径稳定性最大值为 PL_{max} ,最小值为 PL_{min} 。定义归一化路径稳定性值 ε_{PL} 如式(16)所示,在满足 $\varepsilon_{PL} \leq \eta_{th}$ 的路径中,选择跳数最小的路径, η_{th} 为归一化稳定性阈值,其取值可根据网络拓扑变化程度调整,网络拓扑变化越剧烈,对应取值越小,本文选取 $\eta_{th} = 0.5$ 。

$$\varepsilon_{PL} = \frac{PL - PL_{min}}{PL_{max} - PL_{min}} \quad (16)$$

设路由发现后建立了 R 条路径且 ($R \geq 2$),第 r 条路径跳数为 $PH(r)$,则最优路径 P_{opt} 可表示为:

$$P_{opt} = \min \{ PH(r) \mid \varepsilon_{PL}(r) \leq \eta_{th} \} \quad (17)$$

3.4 路由维护

在路由维护阶段,节点通过交互 HELLO 消息,确认链路的连接情况,如果在一定时间周期内,未收到相邻节点的 HELLO 消息,则两节点间的链路出现断开,如果该链路存在于有效路径中,则发起路由的本地修复。如果本地修复失败,则向源节点发送 RERR 消息路径的源节点,进行路由重启。

4 仿真分析

4.1 仿真环境设置

本文通过 OPNET14.5 网络仿真软件对 LPBGR 路由协议的性能,进行仿真验证。比较对象选取 AODV 协议、文献[14]的 RaBlqr-AODV 协议和文献[18]的 LQPRA 协议。仿真区域大小设置为 $4\ 000\text{ m} \times 4\ 000\text{ m}$,100 个节点在区域内随机分布,各个节点参数设置相同,通过参数设置使得节点具有小型无人机的典型特征,共同构成无人机自组织网络。节点的通信半径为 300 m,运动模型为 RWP 模型^[22](暂停时间为 0),最大移动速度取值范围为 $10 \sim 70\text{ m/s}$,通信模型采用 CBR 数据源,数据包大小为 512 B,MAC 协议采用 IEEE802.11DCF,信道传输速率为 2 Mbit/s,信号传播损失模型为 Friis 模型,MAC 层队列缓存区最大长度为 40,仿真运行时间为 20 min。通过改变网络中的节点发包速率以及节点的运动速度,设置不同的仿真场景。仿真实验主要测量指标有如下 3 项:1) 分组投递率,仿真时间内,目的节点成功接收到的数据分组与源节点发送数据分组的比值;2) 平均端到端时延,网络中数据分组由源节点发送到被目的节点成功接收的端到端时延的平均值;3) 路由开销,实验完成数据传输所需控制分组字节大小之和与成功接收到数据分组字节大小之和的比值。通过对 3 项性能指标的仿真结果对比分析,

反映协议的网络性能,实验结果取 10 次实验的平均值。

4.2 结果分析

图 4~6 所示为节点在发包速率保持为 5 packets/s 不变的条件下,节点在不同的最大移动速度下路由协议性能比较。通过保持节点的发包速率不变,以实现控制变量,改变实验中网络节点的最大移动速度,取值范围为 $10 \sim 70\text{ m/s}$,每次增加 10 m/s 进行多组实验,记录每组实验中分组投递率的多次结果并取平均值,得到无人机节点最大移动速度与分组投递率之间关系曲线如图 4 所示。随着运动速度的增大,4 种路由协议的数据分组投递率都会不同程度的下降。这是因为运动速度的增大会使得节点间的链路更加不稳定,链路断开的可能性增大,路由失败机率增加。但 LPBGR 协议在建立路由阶段选择了高稳定的路径,减轻了网络拓扑变化对分组投递率的影响,同时减少了高负载节点成为中间节点的概率,使负载更加均衡,降低了丢包率。

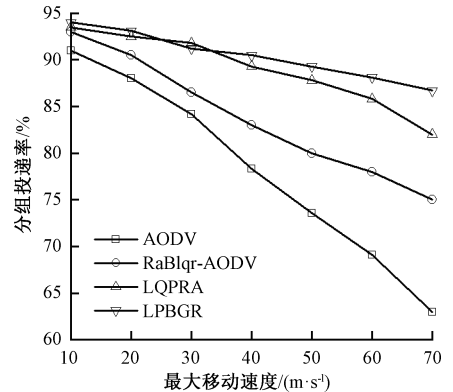


图 4 节点最大移动速度与分组投递率关系

Fig. 4 The relationship between node maximum moving speed and packet delivery rate

图 5 为节点最大移动速度对分组平均端到端时延性能的影响。在节点运动速度较小时,4 种协议的性能接近。随着节点运动速度的增大,路由协议的平均端到端时延都在增大。节点运动速度的增大,使链路失效概率加大,路由的本地修复和重启带来了时延的增加。LPBGR 协议相较于其他 3 种协议增幅较小,更加能适应节点速度的变化。

由图 6 可知,随着节点移动速度增大,路径断裂概率增加,路由的本地修复和重启次数增加,4 种协议的开销都在增大。而 AODV、RaBlqr-AODV 协议和 LQPRA 协议在建立路由时,使用的是全网洪泛的方式,而 LPBGR 协议在路由发现过程中,节点根据自身负载及邻居节点的状况调整 RREQ 消息转发概率,减少了控制开销。

图 7~9 所示为节点在最大移动速度保持为 20 m/s 不变的条件下,增大发包速率对不同路由协议的网络性

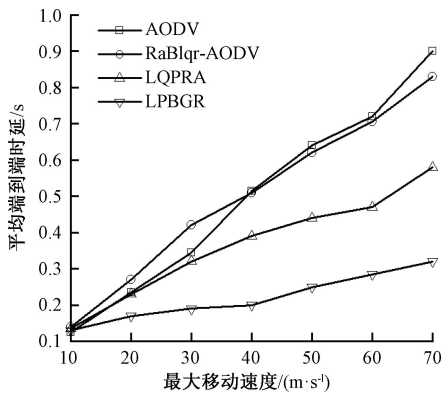


图5 节点最大移动速度与平均端到端时延关系
Fig. 5 The relationship between node maximum moving speed and average end-to-end delay

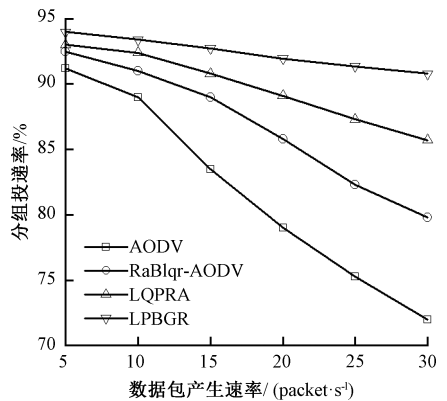


图7 数据包产生速率与分组投递率关系图
Fig. 7 The relationship between packet generation rate and packet delivery rate

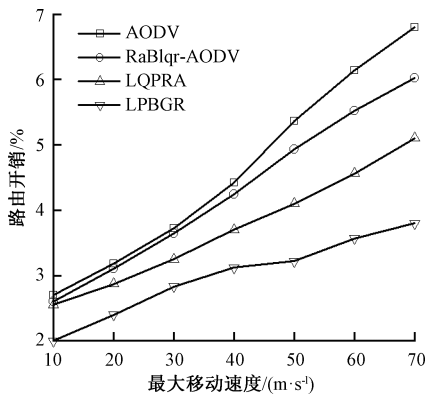


图6 节点最大移动速度与路由开销关系
Fig. 6 The relationship between node maximum moving speed and routing overhead

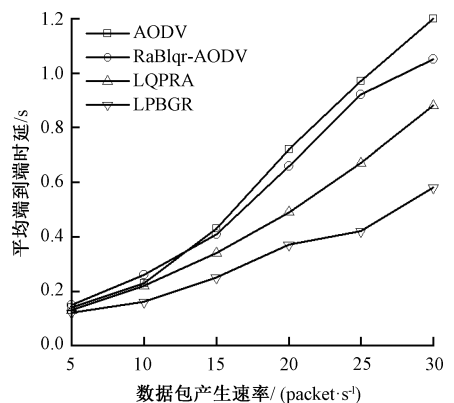


图8 数据包产生速率与平均端到端时延关系
Fig. 8 The relationship between packet generation rate and average end-to-end delay

能的影响。由图7可知,增大节点的数据包产生速率,节点的负载增大,网络出现拥塞概率增大,部分节点由于负载过大,会导致所在链路出现断裂,分组投递率降低。而LPBGR协议均衡了网络负载,降低了网络拥塞的概率,提高了分组投递率。

图8为不同路由协议下,数据包产生速率对分组平均端到端时延性能的影响。节点发包速率增大,4种协议的时延都在增大,且增加幅度较大,这是由于增加了数据包的排队时延和重传次数。LPBGR协议虽然平均时延低于其他3种协议,但是由于在建立路由时需要考虑降低负载较重节点成为中间节点概率,可能选取的路径跳数增大,协议的时延增大也较为明显。LQPRA协议也引入了拥塞判断机制,相较于其他两种未考虑节点负载的路由协议,时延更小。

由图9所示,随着数据包产生速率的增加,网络出现拥塞概率增大,控制消息增多,分组投递率下降,但是网络接收到的数据分组数量也显著增加,所以控制开销呈

下降趋势。当数据包产生速率小于15 packets/s时,分组投递率较高,控制消息数量增加较少,更多比例的数据分组被接收,路由开销下降明显。当数据包产生速率大于15 packets/s时,网络负载较重,分组投递率低,同时路由本地修复和重启概率增大,控制消息数量增加,路由开销平缓下降。而LPBGR协议采用受限洪泛的方式寻路,均衡了网络负载,降低了路由修复和重启的概率,在4种协议中控制开销最小。

5 结论

本文针对无人机自组网具有节点高移动性,网络拓扑变化剧烈,容易造成通信链路断开频繁的问题,基于AODV路由协议,提出了一种基于负载感知和伪流言机制的高稳定性路由协议。通过对影响路径稳定性的两个主要因素,网络拥塞和节点移动,分别提出了解决策略。提出了针对网络拥塞问题,提出了基于节点负载预测的

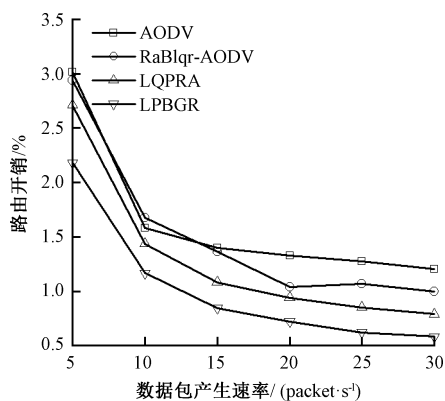


图 9 数据包产生速率与路由开销关系

Fig. 9 The relationship between packet generation rate and routing overhead

伪流言受限洪泛机制,在发起路由请求过程中,通过结合负载预测和伪流言机制下的受限洪泛,实现网络负载均衡和降低网络开销,同时提高了建立路由的可靠性;针对无人机节点的高移动性特征,基于接收到分组信号功率强度,提出了链路稳定性的联合度量指标,通过建立高稳定性的路径降低网络拓扑高度动态变化对网络性能的影响。在路由确立阶段,通过路径稳定阈值,在保证路径稳定性的基础上,选择跳数小的路由,降低时延。仿真结果表明,与 AODV 协议及其他改进型协议相比,该协议有效减少了网络的控制开销,提高了分组投递率,降低了平均端到端时延,显著改善网络性能。

参考文献

- [1] 牛轶峰,肖湘江,柯冠岩. 无人机集群作战概念及关键技术分析[J]. 国防科技, 2013, 34(5):37-43.
NIU Y F, XIAO X J, KE G Y. Operation concept and key techniques of unmanned aerial vehicle swarms [J]. National Defense Science & Technology, 2013, 34(5): 37-43.
- [2] 王祥科,刘志宏,丛一睿,等. 小型固定翼无人机集群综述和未来发展[J]. 航空学报, 2019, 41(4):023732.
WANG X K, LIU ZH H, CONG Y R, et al. Miniature fixed-wing UAV swarms: Review and outlook[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2019, 41(4):023732.
- [3] GUPTA L, JAIN R, VASZKUN G. Survey of important issues in UAV communication networks [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016, 18(2): 1123-1152.
- [4] BEKMEZCI I, SAHINGOZ O K, TEMEL S. Flying Ad-Hoc networks (FANETs): A survey [J]. Ad Hoc Networks, 2013, 11(3):1254-1270.
- [5] CHRIKI A, TOUATI H, SNOUSSI H, et al. FANET: communication, mobility models and security issues [J]. Computer Networks, 2019, 163(9): 106877.1-106877.17.
- [6] KHAN M F, YAU K L A, NOOR R M, et al. Routing schemes in FANETs: A survey [J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2020, 20(1):1-33.
- [7] MALHOTRA A, KAUR S. A comprehensive review on recent advancements in routing protocols for flying ad hoc networks [J]. Transactions on Emerging Telecommunications Technologies, 2019(1):1-32.
- [8] ARAFAT M Y, MOH S. Routing protocols for unmanned aerial vehicle networks: A survey [J]. IEEE Access, 2018(1):58-63.
- [9] 逯建琦,南建国,王伟. 基于萤火虫算法的无人机组网多径路由算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(9):69-76.
LU J Q, NAN J G, WANG W. Multipath routing algorithm for UAV networking based on firefly algorithm [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(9):69-76.
- [10] OUBBATI O S, ATIQUZZAMAN M, LORENZ P, et al. Routing in flying Ad Hoc networks: Survey, constraints and future challenge perspectives [J]. IEEE Access, 2019(7):81057-81105.
- [11] LEONOV A V, LITVINOV G A. Applying AODV and OLSR routing protocols to air-to-air scenario in flying ad hoc networks formed by mini-UAVs [C]. 2018 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, 2018:1-10.
- [12] LIU J, LI F M. An improvement of AODV protocol based on reliable delivery in mobile ad hoc networks [C]. Proceedings of the Fifth International Conference on Information Assurance and Security, IEEE, 2009: 507-510.
- [13] 梁建武,马晓亮,徐龙. 移动 Ad Hoc 网络 AODV 路由协议的研究与优化[J]. 重庆大学学报, 2015, 38(4):152-154.
LIANG J W, MA X L, XU L L. Research and optimization of AODV routing protocols in mobile ad hoc Networks [J]. Journal of Chongqing University, 2015, 38(4):152-154.
- [14] 张步硕,陈柯帆,迟晓燕,等. 面向航空集群网络的改进型 AODV 路由协议[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2017(29):480-486.
ZHANG B SH, CHENG K F, CHI X Y, et al. Improved AODV routing protocol for aeronautic swarm network [J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition),

- 2017(29):480-486.
- [15] BASARKOD P I, MANVI S S. Node movement stability and congestion aware anycast routing in Mobile Ad hoc networks [C]. 2014 IEEE International Advance Computing Conference (IACC), 2014:124-131.
- [16] DUNG L T, AN B. The analysis of route availability and route stability in mobile ad-hoc wireless networks [C]. IEEE International Conference on & International Conference on Ubiquitous Intelligence & Computing, 2013:607-612.
- [17] 李添泽, 武穆清, 武岳巍. 一种基于节点状态预测机制的高稳定性路由设计[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(6):1394-1400.
LI T Z, WU M Q, WU Y W. High stability routing design based on the node status predicting[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2017, 39(6):1394-1400.
- [18] 贾旭峰, 茹乐, 乐波, 等. 无人机集群网络中一种基于链路质量预测的按需路由算法[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2017, 18(5):48-54.
JIA X F, RU L, YUE B, et al. A link quality prediction based on-demand routing algorithm for UAVs swarm network [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2017, 18(5):48-54.
- [19] 马林华, 张嵩, 茹乐, 等. 航空高动态网络链路感知 OLSR 路由算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2016, 42(7):1326-1334.
MA L H, ZHANG S, RU L, et al. Link awareness-based OLSR routing algorithm for airborne highly dynamic networks [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2016, 42(7):1326-1334.
- [20] 朱斌, 曾孝平, 陈礼, 等. 自适应负载均衡路由算法研究[J]. 西安电子科技大学学报, 2011, 38(5):101-107.
ZHU B, ZENG X P, CHEN L, et al. Research on the adaptive load balancing routing algorithm [J]. Journal of Xidian University, 2011, 38(5):101-107.
- [21] 夏辉, 贾智平, 张志勇, 等. 移动 Ad Hoc 网络中基于链路稳定性预测的组播路由协议[J]. 计算机学报, 2013, 36(5):926-936.
XIA H, JIA ZH P, ZHANG ZH Y, et al. A link stability prediction based multicast routing protocol in mobile ad hoc networks [J]. Chinese Journal of Computers, 2013, 36(5):926-936.
- [22] BUJARI A, CALAFATE C T, CANO J C, et al. Flying Ad-Hoc network application scenarios and mobility models [J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2017, 13(10):1-17.

作者简介



梅家栋, 2019 年于空军工程大学获得学士学位, 现为空军工程大学硕士生, 主要研究方向为无人机组网通信路由协议。
E-mail: 1158292019@qq.com

Mei Jiadong received his B. Sc. degree from Air Force Engineering University in 2019. Now he is a M. Sc. candidate at Air Force Engineering University. His main research interest includes UAV networking communication routing protocol.