

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

贾旭峰¹, 茹乐¹✉, 乐波², 于云龙¹, 方堃¹

(1. 空军工程大学无人机运用工程系, 西安, 710038;
2. 盲信号处理重点实验室, 成都, 610041)

摘要 无人机集群网络, 相较于传统 Ad Hoc 网络, 其节点速度更快, 拓扑变化更剧烈。传统路由算法已难以满足无人机集群作战需要。因此, 提出一种基于链路质量预测的按需路由算法。通过链路稳定性和节点拥塞度评估当前链路质量, 并以此作为选路标准。同时, 通过灰色-WNN 组合预测模型, 对相关参数进行合理预测, 并以此估计链路稳定性与节点拥塞程度, 进而对链路质量进行提前评估。算法根据得到的链路质量预测值来优化路由发现与路由维护过程, 避免无人机的高动态特性对集群网络的不利影响。仿真结果表明, 与 AODV 及其他相关改进算法相比, 该算法明显改善了网络性能, 减少了路由断裂的次数, 大幅降低了节点高速移动时的路由开销与平均时延, 使分组投递率得到明显提高。

关键词 无人机集群; Ad Hoc 网络; 路由算法; 链路质量预测

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2017.05.009

中图分类号 V416.216 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2017)05-0048-07

A Link Quality Prediction Based On-Demand Routing Algorithm for UAVs Swarm Network

JIA Xufeng¹, RU Le¹✉, YUE Bo², YU Yunlong¹, FANG Kun¹

(1. Unmanned Aerial Vehicle Department, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;
2. National Key Laboratory of Science and Technology on Blind Signal Processing, Chengdu 610041, China)

Abstract: Topology of UAV ad hoc networks is more dynamic due to fast movement of nodes compared with other traditional ones. The performance of traditional routing algorithms is not able to satisfy efficient communication for multi-UAVs carrying out missions, and this paper proposes an on-demand routing algorithm based on link quality prediction. The link quality is chosen as a standard to choose route and calculated by sensing the stability of a link and the congestion level of a link. Meanwhile, relevant parameters are predicted by Grey-WNN prediction model, and then they are used to estimate the stability of a link and the congestion level of a link. After that, the link quality can be evaluated in advance. The process of routing discovery and routing maintenance is optimized according to the predicted link quality, thus avoiding the negative influence on swarm network caused by the high-dynamic characteristics of UAVs. The simula-

收稿日期: 2016-11-29

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划(2017JM6071)

作者简介: 贾旭峰(1993—), 男, 河北保定人, 硕士生, 主要从事无人机集群 ad hoc 网络研究。E-mail: 1066546813@qq.com

通信作者: 茹乐(1978—), 男, 陕西西安人, 教授, 主要从事无人机信息系统研究。E-mail: 3218959462@qq.com

引用格式: 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 Xufeng, RU Le, YUE Bo, 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.

tion results show that the algorithm improves the network performance obviously, decreases the number of route fracture, reduces the route overhead and average delay increases the packet delivery ratio when nodes are moving at a high speed.

Key words: UAV swarm; Ad Hoc network; Routing protocol; link quality prediction

随着科学技术的迅速发展,无人机从最初的执行情报、监视和侦察任务开始向对抗性作战任务发展,而其作战样式也开始从单平台向集群作战方向发展^[1]。因此,研究满足无人机集群作战需要的通信网络显得尤为重要。而移动 Ad hoc 网络作为由移动节点组成的动态自治网络,无需预先布置固定基础设施^[2],因此十分适合应用于无人机集群通信网络^[3]。但相较于传统网络节点,无人机所具有的高动态性,使得网络拓扑变化更加剧烈,路由断裂与分组丢失的问题变得更加严重,对集群网络路由的设计造成了较大困难^[4],因此如何尽可能地选择一条稳定的路由成为一个重要研究问题。文献[5~8]各通过不同方式对链路生存时间进行预测,虽提高了链路的稳定性,但均易使得路由跳数过多,难以满足拓扑频繁变化的情况。文献[9]利用节点剩余能量和传输负载得到链路保持时间,但在中大型无人机中能量不是短板,因此并不适用于无人机集群网络的路由设计,并且文中通过节点单位时间内邻居节点数的变化率判断稳定性的方法,不够精确,误差较大。文献[10]提出了链路可用性预测,通过接受分组的能量值来判断链路的当前状态,但未考虑链路的负载情况,易出现负载不均,造成重负载节点出现分组丢失。文献[11]提出一种基于链路保持概率的稳定性计算方法,但过程较为复杂,且适用环境较小,对由速度时变节点组成的网络的扩展性不足。

综合上述研究的成果与不足,并考虑到无人机集群所要求的高动态、高可靠性和低延时等特点,本文提出一种基于链路质量预测的按需路由算法(LQPRA)。

1 预测模型

灰色预测是一种不需要具体物理模型,计算复杂度低,需要样本量少的预测方法^[12-13]。其中,GM(1,1)模型是较为常用的数列预测模型,但其对于较为复杂的系统,缺乏较好的非线性自适应能力,尤其在无人机集群网络中,通信易受人为、自然等因素的干扰,若单独使用 GM(1,1)模型,预测值与实际值可能相差较大,难以满足精度要求。小波神经网络(Wavelet Neural Network),简称小波网络^[14](WNN)。它将常规神经网络的隐层节点激励函数

用小波函数来代替(紧致型),相比于传统的 BP 神经网络 RBF 神经网络等具有更强的学习能力和逼近能力,加快了收敛速度,同时避免了网络结构设计上的盲目性。本文采用将灰色预测模型与 WNN 结合的方式,构造灰色-WNN 组合预测模型,并将其应用于无人机集群 Ad hoc 网络的参数预测中。

1.1 灰色预测模型

为了更好地提取当前网络参数的特征,避免灰色预测中建模序列过长,本文采用新陈代谢 GM(1,1)模型,即采用滑动窗口进行预测,通过保持建模长度不变,不断增加新值、去除旧值来进行动态预测。

设原始数据数列为 $x^{(0)} = \{x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n)\}$, 其中 $x^{(0)}(k)$ 是在时刻 k 时的数据。令 $x^{(1)}(1) = x^{(0)}(1)$, 那么 $x^{(0)}$ 的累加生成序列 $(1-AGO)$ 为 $x^{(1)} = \{x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(n)\}$, 其中 $x^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k x^{(0)}(i)$ 。对于新陈代谢 GM(1,1) 预测模型,其灰色微分方程为:

$$x^{(0)}(k) + az^{(1)}(k) = b \quad (1)$$

式中: $z^{(1)}(k) = \frac{x^{(1)}(k) + x^{(1)}(k-1)}{2}$; a 和 b 为参数。

$$x^{(1)}(t) = \left[x^{(1)}(0) - \frac{b}{a} \right] e^{-at} + \frac{b}{a} \quad (2)$$

对其进行离散化得到:

$$x^{(1)}(k+1) = \left[x^{(1)}(0) - \frac{b}{a} \right] e^{-ak} + \frac{b}{a},$$

$$k = 0, 1, \dots, n-1 \quad (3)$$

最终得到预测值:

$$\hat{x}^{(0)}(k+1) = (1 - e^a) \left[x^{(0)}(1) - \frac{b}{a} \right] e^{-ak},$$

$$k = 1, 2, \dots, n-1 \quad (4)$$

在时刻 l 真实值 $x^{(0)}(l)$ 与预测值 $\hat{x}^{(0)}(l)$ 之差,称为时刻 l 的残差,记为 $e^{(0)}(l)$,并将 $e^{(0)}(L)$ 设为残差序列。

1.2 WNN 预测模型

本文采用的小波神经网络模型包括 3 层网络:输入层、隐含层和输出层。输出层使用线性输出。其中,输入层、隐含层和输出层分别有 m 个、 n 个和 1 个神经元。输入参数为 $e^{(0)}(l-1), e^{(0)}(l-2), \dots, e^{(0)}(l-m)$ 。输出预测值为 $e^{(0)}(l)$ 。 w_{ij} 和 w_{j1} 是层与层之间的连接权值。其网络结构见图 1。

图 1 中隐含层节点的输出为:

$$g(j) = g_j \left(\frac{\sum_{i=1}^m \omega_{ij} X_i - b_j}{a_j} \right), \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

网络的输出层为:

$$\hat{e}^{(0)}(l) = \sum_{j=1}^n \omega_{j1} g(j) \quad (6)$$

式中: $g_j(x)$ 为小波基函数; a_j, b_j 分别为小波基函数的伸缩参数和平移参数; ω_{ij} 与 ω_{j1} 分别是输入层和隐含层、隐含层和输出层的连接权值, 训练过程中权值的大小通过最陡下降法来进行调整。隐含层的节点数我们通过文献[15]中的经验公式获得。在本文中, 小波基选取 Morlet 小波, 其函数表达式为:

$$g_j(x) = Ce^{-x^2/2} \cos 5x \quad (7)$$

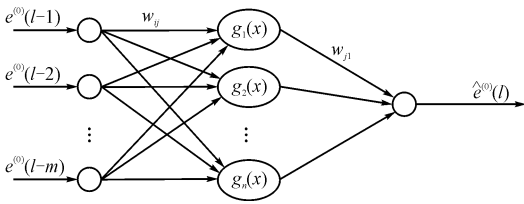


图1 WNN 结构图

Fig. 1 The structure chart of WNN

1.3 灰色-WNN 预测模型

灰色-WNN 预测模型在结合灰色预测所需样本点少、对一定发展速度的系统预测较好和 WNN 在处理非线性、不确定问题时良好的时频局域化性质等优点的同时, 避免了各自不足的一面。如图 2 所示。

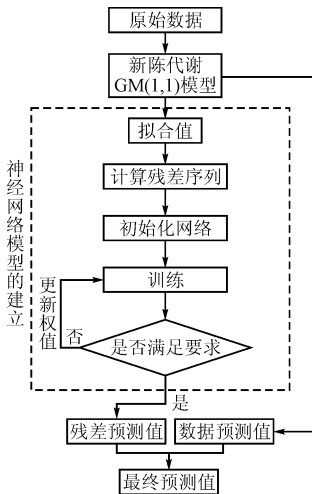


图2 灰色-WNN 模型流程图

Fig. 2 The flow chart of the GREY-WNN model

其主要流程为: 通过得到的网络参数原始数据对新陈代谢 GM(1,1) 进行建模, 然后利用该模型得到数据的拟合值与预测值, 计算数据实际值与拟合值的残差序列。将得到的残差序列作为 WNN 的训练样本, 对 WNN 进行训练, 当输出误差值小于预先设定的阈值时, WNN 停止学习, 否则继续训练。

当我们根据确定的模型得到残差预测值后, 将其与 GM(1,1) 模型得到的数据预测值相加, 就得到了最终的网路参数预测值, 其计算公式如下:

$$\hat{x}^{(0)}(i, l) = \hat{x}^{(0)}(i) + \hat{e}^{(0)}(l) \quad (8)$$

2 路由算法的基本思想

2.1 链路稳定度

为判断链路稳定性, 本文采取文献[17]中的方法, 并做了如下改进:

$$LS_{ij} = \left(1 - \left(\alpha \frac{length_{ij} - \min(length_{ij}, length_{thr})}{R - \min(length_{ij}, length_{thr})} + \beta \frac{mobility_{ij}}{v_{max}} \right)^2 \right) \quad (9)$$

式中: ij 是相应链路中的发送节点与接收节点。 $mobility_{ij}$ 是节点 ij 间的相对移动速度, $length_{ij}$ 是节点间链路长度, 在计算中选择上述二者经过灰色-WNN 预测的预测值。 $length_{thr}$ 为设定的对应链路长度阈值[16]。 R 和 v_{max} 分别是节点间最大传输距离与节点最大速度。 α 和 β 是链路长度与节点相对速度各自的权重值, 有 $\alpha + \beta = 1$ 。由于 GPS 的局限性[17], 本文算法采取节点周期性发送 HELLO 消息来获取需要的信息, 并且因为此 HELLO 消息只在一跳范围内传播, 因此增加开销较小。

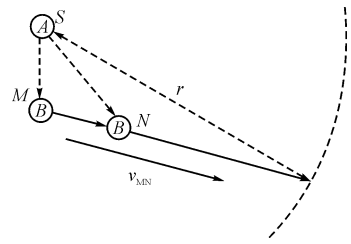


图3 B 相对 A 远离

Fig. 3 Relative node position in receding scenario

如图 3 所示, 假设 2 个节点 A 和 B, 节点 B 相对于节点 A 做接近或远离运动, 且 A 的发送功率为 P_A 。在 t 时刻, B 到达 M 处, B 在 M 处接收到的信号功率为 P_{EM} , 经过 Δt (Δt 很小) 时间 B 到达 N 处, 在此接收到功率为 P_{EN} 的信号。A 发送分组的频率为 f , 可知有 $\Delta t = \frac{1}{f}$ 。B 在 M、N 处接收到的频率为 f_{EM} 、 f_{EN} 。由于一般无人机节点间距离比较远, 故在无线传播模型中选择 Two-Ray 模型[18-19]:

$$P_r = \frac{P_i G_i G_r (h_i h_r)^2}{d^4} \quad (10)$$

式中: P_i 表示发送功率; P_r 表示接收功率; G_i 表示发送天线增益; G_r 表示接收天线增益; h_i 表示发送天线高度; h_r 表示接收天线高度; d 是发送方与接收方的距离。在本文中, P_i, G_i, G_r, h_i, h_r 均设为定值。

设节点能接收到数据的最低功率为 P_{\min} , 则当某个节点的接收功率为 P_{\min} 时, 其与发送节点间的距离就是一跳通信距离 r 。

B 在 M 、 N 处与 A 的距离分别为:

$$\overline{SM} = \sqrt[4]{\frac{P_{BM}}{P_A}} r, \quad \overline{SN} = \sqrt[4]{\frac{P_{BN}}{P_A}} r \quad (11)$$

另外, 根据文献[20]可以计算得到相对速度为:

$$v_{MN} = \frac{\sqrt{2cf_{BM}}}{P_{\Delta f}} \sqrt{2P_{\Delta}P_{BM} - 4P_{BM}^2 + 4\left(\frac{P_{BM}^5}{P_{BN}}\right)^{\frac{1}{2}}} \quad (12)$$

式中: $P_{\Delta} = |P_{BM} - P_{BN}|$ 。

当无人机通过 HELLO 消息, 计算获得足够数量的节点运动信息后, 就可以利用前文所述的灰色-WNN 预测模型对节点间的距离与速度进行预测, 得到相应值就可计算得到节点的稳定度预测值。

2.2 节点拥塞度

数据传输时若只考虑链路的稳定性, 那么就极易造成负载不均, 从而出现拥塞, 严重影响网络性能, 因此在考虑链路稳定性的情况下, 必须防止节点出现过度拥塞的现象^[20]。

本文通过节点缓冲队列长度判断节点的拥塞程度。并在计算时, 对节点到达流(即单位时间内到达节点的分组数)进行预测, 提前感知链路的拥塞度, 最大程度上避免拥塞的发生。

设时间间隔为 T , 节点缓冲区内在第 i 个时刻 T_i 的到达分组数为 $Sum_Pac(T_i)$ 。其主要由节点当前产生的分组数 $Pac_g(T_i)$ 、因碰撞而需重新发送的分组数 $Pac_c(T_i)$ 和转发来自其他节点的分组数 $Pac_f(T_i)$ 共同组成。由文献[21]可以得到节点的碰撞概率为 P_{col} , 那么就有:

$$Sum_Pac(T_i) = Pac_g(T_i) + Pac_f(T_i) + Pac_c(T_i) \quad (13)$$

式中:

$$Pac_c(T_i) = (Pac_g(T_i) + Pac_f(T_i))P_cR_c \quad (14)$$

式中: R_c 为 j 节点内分组重发次数, 在本文中所有分组的长度均设为定值。

设所有节点单位时间内发包速率为 R_T (Transmitting Rate, TR) 时, 节点 j 在时刻 T_i 的队列长度为:

$$L(T_i) = \min\{(L(T_{i-1}) - R_T + Sum_Pac_{pred}(T_i)), M\} \quad (15)$$

式中: M 为节点缓冲区队列总长度, $Sum_Pac_{pred}(T_i)$ 是节点在时刻 T_i 对 Sum_Pac 的预测值。

设节点的节点拥塞度为 C , 根据文献[22], 对拥塞度进行非线性处理, 定义为:

$$C = (1 - (1 - L/M)^2) \quad (16)$$

2.3 链路质量预测模型

无人机集群 Ad hoc 网络, 与其他 Ad hoc 网络相比, 节点速度更快, 拓扑变化更剧烈, 造成了更多路由的断裂与重建。链路稳定性与拥塞控制都是解决路由断裂的有效手段, 但对于无人机集群 Ad hoc 网络, 其各自都具有不足之处, 难以有效满足需要的延时低, 吞吐量高, 丢包率小的要求。为此, 本文引入链路质量(Link Quality, LQ), 设为 Q , 并定义两相邻节点 ij 间链路质量为链路 ij 的稳定度与节点 j 的拥塞度之比, 如下式所示:

$$Q_{ij} = S_{ij}/C_j \quad (17)$$

也就是说, 链路 ij 的质量由当前链路的稳定度与链路相应下游节点的拥塞度决定。当链路的稳定性越高, 相应节点的拥塞程度越小时, 就判断该链路的质量越好。

同时, 为了防止出现某条链路质量值过小而路径的质量值较大的情况, 设定链路质量最小值为 Q_{\min} , 当发现路径中某链路有 $Q \leq Q_{\min}$ 时, 此链路舍去, 不予考虑。

并且不同于以往稳定度及拥塞的计算, 本文利用灰色-WNN 组合预测模型来对稳定度计算中需要的速度、距离和拥塞度计算中需要的节点缓冲区单位时间内增加分组数等数据进行预测, 计算出链路质量预测值, 从而确保路由选择时得到在将来的一段时间内质量较高的路径, 以减少因无人机高速移动造成的链路断裂等诸多问题, 其计算基本流程见图 4。

通过图中所述流程, 得到当前网络中所有发现路径上的链路质量值后, 就可以计算得到相应路径的质量为:

$$RQ_p = Q_1 Q_2 Q_3 \cdots Q_l \cdots \quad (18)$$

式中: P 是发现的相应路径, l 是路径中的链路。

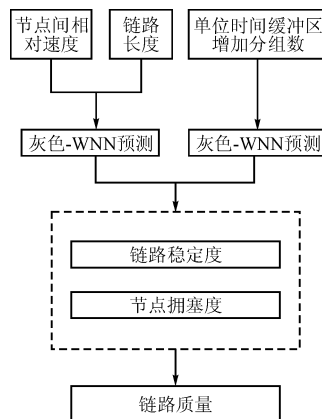


图4 链路质量预测流程图

Fig. 4 The flow chart of link quality prediction

2.4 LQPRA 算法实现

本文以按需路由协议为基础,构造基于链路质量预测的按需路由算法(LQPRA),见图4。以提出的路由质量预测值衡量寻得路由的优劣,并通过实时的质量预测,在路径即将断裂或拥塞程度过大前,重启路由发现过程,发现替代路由,从而减少分组时延,路由开销等问题。

在路由发现过程中,源节点广播的RREQ包除原有的组成域外,增加一个路由质量缓存区,长度为32 bit,路由质量计算公式为式(18)。当中间节点第1次收到RREQ包,并确定非目的节点后,该节点判断其上游节点与其组成链路的质量值是否满足 $Q > Q_{\min}$,若不满足,丢弃该RREQ包,该链路不予考虑,若满足条件,RREQ包除了记录原有相应的路由信息记录外,将式(18)算出的路径到目前为止的路由质量值存储到RREQ相应的缓存区内。当RREQ包到达目的节点或到达知道目的节点的中间节点后,目的节点或中间节点沿原来路由回送一个RREP包,该包同样增加了一个路由质量缓存区,大小仍为32 bit,其值与RREQ包内路由质量值的最终值相同。在源节点在规定时间内接收到多个RREP包,即发现多条路由后,选出质量值 Q 最大的一条路径作为传输路由。若在整个路由发现过程中,未能找到满足条件的路由,那么适当降低链路质量最小值 Q_{\min} ,并重新进行路由发现过程,直到 Q_{\min} 为0。

在路由维护过程,活动路由中的HELLO消息一般用来确认网络链路的连接状态,在本文中,出于尽可能不增加额外开销的考虑,我们同时利用HELLO消息来计算链路的稳定度。中间节点在收到消息后,根据前文所述预测模型得到当前链路质量预测值,同时为了消除实际情况中可能发生因异常情况导致的预测值错估,尽可能确保不引起不必要的路由发现过程,设定当节点第1次发现出现预测值低于设定最小值时,连续取该次预测后的连续3次预测值,对其求算数平均值。若平均预测值大于设定最小值,则不认为链路质量较差,反之,则启动路由发现过程,尽可能的在路由即将断裂前,寻到最佳路径并切换,减少因路由切换带来的路由时延。

3 仿真设置和结果与性能分析

本文使用NS-2进行仿真,并将数据导入origin8中进行分析。选取的仿真区域是 $3\ 000\text{ m} \times 3\ 000\text{ m}$ 的矩形区域,区域内随机分布100个节点,仿真时间为400 s。为了更加贴近实际,节点的移动

方式采用随机路点随机移动模型(RWP),节点的最小速度设为0,最大移动速度可变。每个节点使用相同的无线收发设备,采用单一增益的全向天线,其余主要仿真参数见表1。仿真比较对象选取AODV,LAP-AODV^[10],和采用[11]中算法的路由协议,为表示方便,记为PAODV。

表1 主要仿真参数设置

Tab. 1 The main setting of simulation parameter

参数	值
路径衰减模型	Two-Ray
MAC协议	IEEE802.11
业务类型	CBR
数据分组大小/B	512
仿真时间/s	500
带宽/Mb	2
天线类型	全向天线
传播距离/m	250
队列长度	50
发送速率 packet/s	4

为了反映不同路由协议在上述场景下的网络性能,本文采用以下3个性能指标:①路由开销:仿真时间内整网发送的路由控制分组数量与整网接收到的数据分组数量的百分比;②平均端到端时延:从源节点成功到达目的节点的所有数据分组的端到端时延的平均值;③分组成功投递率:仿真时间内目的节点收到的数据分组数与源节点发送的数据分组数的百分比。

为保证实验的精确性,消除可能存在的随机误差,采集的实验数据均为进行10次仿真后求得的平均值,图5显示了不同路由算法中,路由开销与无人机最大速度的关系。

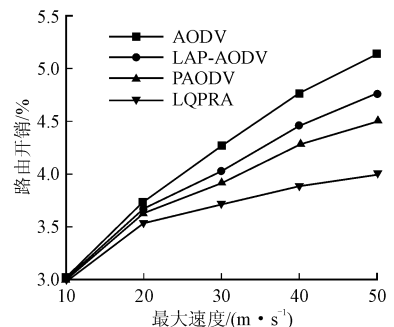


图5 路由开销-节点最大速度

Fig. 5 Routing overhead versus node maximum speed

由图可知,随着无人机的最大移动速度的增大,4种协议下的路由开销均在不同程度的增加。这是因为速度越大,网络拓扑变化就越剧烈,路由的断裂变得更加频繁,需要更多的控制分组来进行路由选择与维护。LQPRA的开销在移动速度较低时,与其他协议较为接近,但随着无人机最大移动速度的

不断增加,其他协议与 LQPRA 的差距也逐渐拉大。这是因为 LQPRA 在对链路的稳定性进行判断时,加入了预测机制,对下一时刻的无人机速度和链路距离进行了预判,对于速度的变化较为敏感,能够使无人机在高速移动时选择到高稳定链路,在路由维护时尽可能避免了链路断裂,从而减少了不必要的路由开销。

图 6 显示了不同路由协议中,无人机最大移动速度与时延的关系。随着无人机最大移动速度的逐渐增大,4 种协议的平均时延均在增加,这是因为无人机的移动性越强,网络的拓扑变化就越剧烈,导致了链路的频繁断裂与重建。同时,LQPRA 的平均时延在任意速度时均低于其他 3 种协议,且其上升率也为最低,说明速度变化对 LQPRA 的影响较小。这是因为 LQPRA 通过预测机制对链路未来状态的判断,避免了不可靠链路可能带来的路由断裂,减少了路径重建次数,降低了平均端到端时延。同时,加入的拥塞判断机制,进一步减少了数据传输过程中的排队时延。

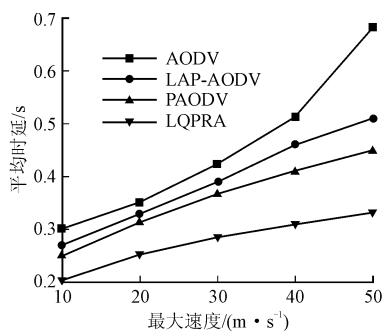


图 6 平均时延-节点最大速度

Fig. 6 Average delay versus node maximum speed

图 7 表示了无人机最大移动速度不同时,不同路由协议的分组投递率变化比较。

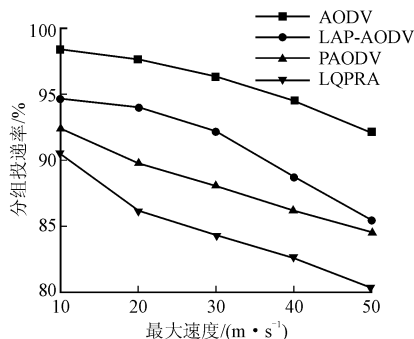


图 7 分组成功投递率-节点最大速度

Fig. 7 The packet delivery ratio versus node maximum speed

移动速度的增大会增加链路的不稳定性,增大链路的断裂机率,因此数据分组发送失败的概率也

随之提高,这导致了分组投递率的不断下降。LQPRA 加入了链路稳定度预测机制,使得选择到链路的稳定性增加,降低了不稳定链路的影响,同时其对于拥塞情况的判断,使得负载更加均衡,进一步降低了掉包率。因此,LQPRA 比其他 3 种协议具有更高的数据成功传输率。

4 结语

无人机的高动态性为无人机集群 Ad hoc 网络的路由设计带来了较大挑战,如何选择维护一条稳定可靠,延时较低的路由成为了亟需解决问题。本文提出一种基于链路质量预测的按需路由算法,通过灰色-WNN 模型,对链路稳定度及节点拥塞度进行预测,判断链路下时刻的质量,尽可能降低无人机高动态性带来的不良影响。仿真结果表明,提出算法较以往协议,进一步减少了路由断裂次数,提高了数据分组投递率,降低了路由端-端时延与路由开销,提高了网络性能,较好的满足了无人机集群网络路由需要。下一步,本文将进一步研究在无人机群执行不同任务时,对于网络性能的具体要求,以提高路由算法的精确性,增强算法的扩展性。

参考文献(References):

- [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. (in Chinese)
- [2] 史美林, 莢春. 自组网路由协议综述 [J]. 通信学报, 2001, 22(11): 93-103.
SHI M L, YING C. Routing Protocols for Ad Hoc Networks: A Survey [J]. Journal of China Institute of Communications, 2001, 22(11): 93-103. (in Chinese)
- [3] YU Y, RU L, MAO S, et al. Bionic Optimization Based Stability and Congestion Aware Routing Algorithm for Airborne Highly Dynamic Network [J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2016, 2016(6): 1-17.
- [4] YU Y Y, RU L, CHI W S, et al. Ant Colony Optimization Polymorphism-Aware Routing Algorithm for Ad Hoc UAV Network [J]. Multimedia Tools and Applications, 2016, 75(22): 14451-14476.
- [5] JIANG S. An Enhanced Prediction-Based Link Availability Estimation for MANETs [J]. IEEE Transactions on Communications, 2004, 52(2): 183-186.

- [6] JIANG S, HE D, RAO J. A Prediction-Based Link Availability Estimation for Routing Metrics in MANETs [J]. *IEEE/ACM transactions on networking*, 2005, 13(6): 1302-1312.
- [7] 何晖, 王换招, 李昊, 等. 增强 Ad Hoc 网络稳定性的移动问题解决策略 [J]. *西安交通大学学报*, 2011, 45(4): 6-11.
HE H, WANG H Z, LI H, et al. Strategy to Enhance the Communication Stability in Mobile Ad Hoc Network [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University* 2011, 45(4): 6-11. (in Chinese)
- [8] 胡曦, 李喆, 刘军. 移动 Ad hoc 网络中基于链路稳定性预测的按需路由协议 [J]. *电子与信息学报*, 2010, 32(2): 284-289.
HU X, LI Z, LIU J. A Link Stability Prediction-Based on-Demand Routing Protocol in Mobile Ad hoc Networks [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(2): 284-289. (in Chinese)
- [9] LI X, QI L, JIAN Z, et al. A State-Aware Routing Protocol Based on Energy and Stability for Mobile Ad Hoc Networks [C]//*Communication Systems, Networks and Applications (ICCSNA)*, 2010 2nd International Conference on. *IEEE*, 2010: 329-332.
- [10] 洪利, 黄庭培, 邹卫霞, 等. 基于链路可用性预测的 AODV 路由协议研究 [J]. *通信学报*, 2008, 29(7): 118-123.
HONG L, HUANG T D, ZOU W X, et al. Research of AODV Routing Protocol Based on Link Availability Prediction [J]. *Journal on Communications*, 2008, 29(7): 118-123. (in Chinese)
- [11] AN B. The Analysis of Route Availability and Route Stability in Mobile Ad-hoc Wireless Networks [C]//*Ubiquitous Intelligence and Computing*, 2013 *IEEE 10th International Conference on and 10th International Conference on Autonomic and Trusted Computing (UIC/ATC)*. *IEEE*, 2013: 607-612.
- [12] 刘思峰. 灰色系统理论及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 1999.
LIU S F. *The Grey System Theory and Application* [M]. Beijing: Science Press, 1999. (in Chinese)
- [13] WU L, LIU Y, YAO L, et al. The Effect of Sample Size on the Grey System Model [J]. *Applied Mathematical Modeling*, 2013, 37(9), 6577-6583.
- [14] 田雨波. 混合神经网络技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2009.
Tian Y B. *The Hybrid Neural Network Technology* [M]. Beijing: Science Press, 2009. (in Chinese)
- [15] 谷松, 张振文, 李国军. 矿井瓦斯涌出量的灰色小波神经网络预测模型 [J]. *煤炭技术*, 2009, 28(10): 123-125.
GU S, ZHANG Z W, LI G J. Forecasting Method of Grey Theory and Wavelet Neural Network for Mine Gas Gushing [J]. *Coal Technology*, 2009, 28(10): 123-125. (in Chinese)
- [16] KOK G X, CHOW C O, XU Y H, et al. Sensor-free Route Stability Metric for Mobile Ad Hoc Networks [J]. *Computer Networks*, 2016, 100: 166-178.
- [17] NI M, ZHANG Z, WU H, et al. A New Stable Clustering Scheme for Highly Mobile Ad Hoc Networks [C]//*2010 IEEE Wireless Communication and Networking Conference*. *IEEE*, 2010: 1-6.
- [18] ANDREA G. *Wireless Communication* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- [19] NI M, ZHONG Z, ZHAO D. MPBC: A Mobility Prediction-Based Clustering Scheme for Ad Hoc Networks [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2011, 60(9): 4549-4559.
- [20] 王小平, 苏赛语, 林秦颖, 等. 能量感知多路径负载均衡路由算法 [J]. *空军工程大学学报(自然科学版)*, 2017, 18(3):85-91.
WANG X P, SU S Y, LIN Q Y, et al. Energy Multipath Load Balancing Routing [J]. *Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition*, 2017,18(3):85-91. (in Chinese)
- [21] ZHANG X, ZHANG Y, YAN F, et al. Interference-Based Topology Control Algorithm for Delay-Constrained Mobile Ad Hoc Networks [J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2015, 14(4): 742-754.
- [22] CHATTERJEE S, DAS S. Ant Colony Optimization Based Enhanced Dynamic Source Routing Algorithm for Mobile Ad-hoc Network [J]. *Information Sciences*, 2015, 295: 67-90.

(编辑: 徐楠楠)