

基于移动预测的集群组网分簇路由协议

王沁飞, 南建国, 黄金科, 张红梅, 贾旭峰

(空军工程大学航空工程学院, 西安, 710038)

摘要 针对无人机集群组网中拓扑结构更新快、网络通信效率低的问题,提出了基于移动预测的分簇算法 MPC,并提出了一种分簇路由协议 MPC-R。灰色-WNN 联合预测模型的基础上,通过将预测结果运用在方向、速度、位置评价因子上,得出移动状态评价因子。综合计算移动因子和链路保持时间进行簇头选择,路由协议簇间采用被动路由发现机制,簇内采用主动路由发现机制。通过仿真,对预测准确性、分簇算法、路由协议进行验证,结果表明:WNN 提高了预测的准确性,分组投递率提高了 3%~4%。该分簇算法延长了簇头持续时间和平均链路保持时间,能够提高分簇稳定性。相应的路由协议与其他同类协议相比降低了端到端时延,提高了数据包分组投递率和路由性能。

关键词 无人机集群;分簇算法;联合预测;链路保持时间

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2018.06.015

中图分类号 TP393 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2018)06-0090-07

Clustering Routing Protocol for Cluster Networks Based on Mobile Prediction

WANG Qinfei, NAN Jianguo, HUANG Jinke, ZHANG Hongmei, JIA Xufeng

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

Abstract: Aimed at the problem that topology updating is fast in construction and network communication is low in efficiency in drone cluster networking, a clustering algorithm MPC based on mobile prediction is proposed. On the basis of this, a new clustering routing protocol MPC-R is proposed. At the base of the gray-WNN joint forecasting model, the mobile state movement factor is obtained by applying the prediction results to the direction, speed, and position evaluation factors. The clustering algorithm selects cluster heads by calculating the mobility factor and link retention time comprehensively. Passive routing discovery mechanism between clusters and active routing discovery mechanism between cluster members are used by the routing protocol for decreasing routing overhead. This paper verifies the prediction accuracy, the clustering algorithm, and the routing protocol through the simulation. The results shows that WNN improves forecast accuracy and packet delivery rate by 3 to 4 percentage points. And the clustering algorithm extends the cluster head holding time and the average link holding time, improving the clustering stability. The corresponding routing protocol reduces the end-to-end delay, compared with other same protocols, and increases packet delivery ratio of packets, improving the routing performance.

Key words: drone cluster; clustering algorithm; joint forecasting; link retention time

收稿日期: 2018-03-21

基金项目: 陕西省重点研究计划(2017GY-049)

作者简介: 王沁飞(1993—),男,河南沁阳人,硕士生,主要从事通信与网络技术研究。E-mail:641808277@qq.com

引用格式: 王沁飞,南建国,黄金科,等.基于移动预测的集群组网分簇路由协议[J].空军工程大学学报(自然科学版),2018,19(6):90-96. WANG Qinfei, NAN Jianguo, HUANG Jinke, et al. Clustering Routing Protocol for Cluster Networks Based on Mobile Prediction[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2018, 19(6): 90-96.

近年来,无人机朝着微型化、智能化、集群化的方向发展。在大规模和高速度的网络环境下,集群内节点之间的通信,成为影响无人机集群发展的难题之一。将移动自组织网络(Mobile Ad-Hoc Networks, MANETs)应用到无人机集群情况下,形成无人机集群自组织网络(Flying Ad-Hoc Networks, FANETs)^[1-3]。在无人机集群组网中,若采用平面结构路由算法,会占用本来就少的带宽资源,造成多余的路由开销,降低集群作战的效能,因此采用适当的基于分簇的路由算法是十分必要的。

分簇网络路由算法^[4-5]对于解决平面路由由网络开销大、端到端时延长等问题十分有效,非常适合大规模集群组网。运用特定的分簇策略,将网络分割为不同的子网络,可以减轻网络拓扑的频繁变化对路由协议性能的影响,还能够大大提高通信效率。在无人机集群组网中,节点的高速移动会造成网络拓扑结构更新频繁,使网络管理变得更加复杂。分簇能够增大网络容量,实现空间资源的复用,是优化网络管理的有效手段之一。南京理工大学的徐佳等人提出的自适应分簇过渡路由协议^[6],增强了网络的可扩展性,但是在解决大规模的网络问题时,没有兼顾到网络节点的高速移动性。文献^[7]提出的自组织网络路由协议是基于互联网基础的,虽然能够保持较好的可扩展性和路由性能,但需要互联网基础为硬件支持,不适合无人机集群应用环境。文献^[8~11]提出的多参数加权分簇算法,能够将多方面因素考虑进去,但是计算难度较大,性能不稳定,容易造成较大的网络开销。

本文在移动预测的基础上,通过计算节点间的移动状态因子与链路保持时间,提出一种基于移动预测的分簇算法(Mobility Prediction based Clustering Algorithm, MPC),并在分簇算法的基础上,提出了分簇路由协议 MPC-R。

1 灰色-WNN 联合预测模型

灰色预测不需要设定目标的运动规律,而是将目标的运动看作灰色过程,挖掘潜在的运动规律,具有计算复杂度低、所需样本量少的优点^[12-13]。这里使用新陈代谢 GM(1,1)模型,控制建模长度为恒值,通过增添新值、去除旧值进行预测。但是在无人机集群组网环境下,节点运动方向与速度变化快,若只使用 GM(1,1)模型,容易出现较大的误差,很难达到精度方面的要求。小波神经网络(Wavelet Neural Network, WNN)^[14]相较于传统的 RBF 神经网络、BP 神经网络,收敛速度加快,拥有更好的学

习和逼近能力,避免了设计网络结构时的盲目性。同时,WNN 具有较强的容错以及逼近能力^[15-17]。将灰色预测模型与小波网络预测模型结合在一起,构成灰色-WNN 联合预测模型,来预测无人机集群组网环境下节点的运动位置。

预测流程如下:以 x 轴坐标预测为例,获得 x 轴原始坐标后根据 GM(1,1)模型进行建模,得到坐标拟合值和预测值,计算实际坐标值与拟合值的残差序列。以残差序列为 WNN 的训练样本值,当输出误差小于设定的阈值时,WNN 停止学习。

将 GM(1,1)模型得到的预测值与残差预测值相加,得到最终预测的坐标值,计算公式如下:

$$\hat{x}^{(0)}(i, l) = \hat{x}^{(0)}(i) + \hat{e}^{(0)}(l) \quad (1)$$

2 节点状态分析

节点的运动状态包括位置、速度以及方向等,为使分簇算法适应节点的高动态特征,必须对节点的运动特征进行深入研究与分析。假设无人机能够通过北斗或 GPS 等手段实时获取高精度的定位信息,利用灰色-WNN 预测模型对节点位置进行预测,将预测结果运用到运动状态的分析中,能够避免对节点分析的滞后性。

2.1 方向评价因子

假设网络节点 i, j 是其邻居节点。通过定位系统,在 t_1 时刻节点 i 和节点 j 的坐标分别为 $(x_i(t_1), y_i(t_1))$ 、 $(x_j(t_1), y_j(t_1))$,记作 B 和 A 。经过预测,得到在 $t_2 = t_1 + \Delta t$ 时刻,预测点 B' 和预测点 A' 的坐标分别为 $(x'_i(t_2), y'_i(t_2))$ 、 $(x'_j(t_2), y'_j(t_2))$,见图 1。假设在 Δt 时间内,节点的运动状态保持不变。

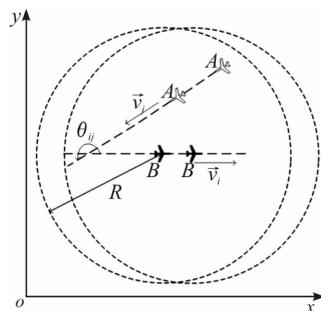


图 1 相邻无人机节点移动情况

Fig. 1 The situation of adjacent drone node movement

定义节点 i 与 j 之间的移动方向评价因子为:

$$d_{ij} = \sin \frac{\theta_{ij}}{2} = \sqrt{\frac{1 - \cos \theta_{ij}}{2}} \quad (2)$$

式中: θ_{ij} 为两节点实际速度方向的夹角。

$$\cos \theta_{ij} = \frac{\vec{v}_i \cdot \vec{v}_j}{|\vec{v}_i| |\vec{v}_j|}, \quad \theta_{ij} \in [0, 2\pi] \quad (3)$$

式中: \vec{v}_i 与 \vec{v}_j 可以通过 Δt 时间内的位移求得。从式(2)中易得 $d_{ij} \in [0, 1]$,它体现了相邻无人机运动方向的一致性。 d_{ij} 越大,表示两节点运动方向有较大差异; d_{ij} 越小,表示两节点运动方向相近。

2.2 速率评价因子

图2中,将节点*i*与节点*j*相对移动状态分为“远离”与“接近”2种。在 t_1 时刻,节点*j*相对于节点*i*的相对位置为*R*点,坐标为 $(x_j(t_1) - x_i(t_1), y_j(t_1) - y_i(t_1))$,在 $t_2 = t_1 + \Delta t$ 时刻节点*j*经过灰色-WNN联合预测模型预测之后为*R'*点,坐标为 $(x'_j(t_2) - x'_i(t_2), y'_j(t_2) - y'_i(t_2))$ 。

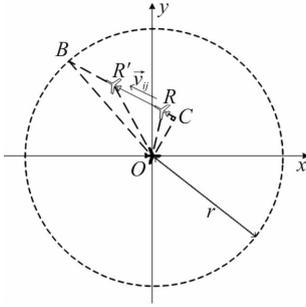


图2 无人机节点相对远离情况

Fig. 2 The situation of adjacent drone node far away from each other

在图2中的情况下,可得:

$$\overline{RR'} = \sqrt{\overline{OR}^2 + \overline{OR'}^2 - 2\overline{OR}\overline{OR'}\cos\angle ROR'} \quad (4)$$

其中 \overline{OR} 、 $\overline{OR'}$ 、 \overline{OR} 、 $\overline{OR'}$ 可根据勾股定理求得:

$$\cos\angle ROR' = \frac{\overline{OR}\overline{OR'}}{|\overline{OR}||\overline{OR'}|} = \frac{\overline{OR}\overline{OR'}}{\overline{OR}\overline{OR'}} \quad (5)$$

将式(4~5)整合可得,节点*i*与节点*j*之间的平均相对移动速率 v_{ij} 为:

$$v_{ij} = \frac{\overline{RR'}}{\Delta t} = \frac{1}{\Delta t} (\sqrt{\overline{OR}^2 + \overline{OR'}^2 - 2\overline{OR}\overline{OR'}}) \quad (6)$$

同理可得两节点相互接近情况下的平均相对移动速率。节点间的相对移动速率越小时,节点间的链路就越稳定,因此构造速率评价因子 s_{ij} 为:

$$s_{ij} = \log\left(\frac{v_{ij}}{v_{\max}} + 1\right) \quad (7)$$

式中: v_{\max} 是两节点间最大的相对移动速率,约为无人机节点最大速率的2倍。

2.3 位置评价因子

如图2所示,定义节点*i*与节点*j*间的位置评价因子 l_{ij} 为:

$$l_{ij} = \log\left(\frac{\overline{OR}}{r} + 1\right) \quad (8)$$

式中: r 为无人机的最大通信距离。位置评价因子体现通信链路受速度影响的大小,其值越大,表示无人机节点越容易受到节点速度变化的影响。

2.4 移动状态评价因子

邻居节点间的运动状态由运动方向、运动速率、相对距离等因素构成。综合前文内容,定义在一定时间间隔 Δt 内,相邻节点之间的移动状态评价因子 $M_{ij}(\Delta t)$ 为:

$$M_{ij}(\Delta t) = e^{d_{ij} + s_{ij} + l_{ij}} \quad (9)$$

在计算过程中,使用了预测函数的预测信息,具备节点间移动状态的预见性,其值越大,表示相邻节点间的链路状态越不稳定。

3 链路保持时间

链路保持时间能够体现邻居节点间通信链路以及分簇的稳定性,在本节中,根据无人机的实际所在位置与预测位置,以相邻无人机的相对运动情况为研究对象,对相邻节点*i*与节点*j*的链路保持时间 T_{ij} 进行研究。

如图2所示,在两节点相互远离情况下进行分析,节点*i*与节点*j*的链路保持时间 T_{ij} 计算公式为:

$$T_{ij} = \frac{\overline{RB}}{v_{ij}} = \frac{\overline{CB} - \overline{CR'}}{v_{ij}} \quad (10)$$

根据几何关系可得:

$$T_{ij} = \frac{\sqrt{r^2 - (\overline{OR}\sin\angle OR'R)} - \overline{OR'}\cos\angle OR'R}{\sqrt{\overline{OR}^2 + \overline{OR'}^2 - 2\overline{OR}\overline{OR'}}} \quad (11)$$

其中:

$$\overline{BC} = \sqrt{r^2 - \overline{OC}^2} = \sqrt{r^2 - \overline{OR}\sin\angle OR'R} \quad (12)$$

$$\overline{R'C} = \overline{RC} - \overline{RR'} = \overline{OR}\cos\angle OR'R - \overline{RR'} \quad (13)$$

同理可得两节点相互接近情况下的链路保持时间 T_{ij} 为:

$$T_{ij} = \frac{\sqrt{r^2 - \overline{OR}\sin\angle OR'R} + \overline{OR}\cos\angle OR'R - \overline{RR'}}{\sqrt{\overline{OR}^2 + \overline{OR'}^2 - 2\overline{OR}\overline{OR'}}} \quad (14)$$

其中:

$$\angle OR'R = \arccos\left(\frac{\overline{RR'}^2 + \overline{OR}^2 - \overline{OR'}^2}{2\overline{RR'}\overline{OR}}\right) \quad (15)$$

4 分簇策略

4.1 簇头选举指标

MPC算法根据节点的实际位置与预测位置,计算移动状态因子与链路保持时间,将两者有机结合作为簇头选择的度量指标,公式如下:

$$CP_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{T_{ij}}{M_{ij}} \quad (16)$$

式中: n 为节点*i*的节点度。 CP_i 越大,表明在一跳

邻居节点范围内,该节点的链路状态更稳定,与邻居节点的相对移动状态更接近,更适合选为簇头。

4.2 簇初始化

在网络组建初期,所有节点均为孤立状态。各节点通过计算簇头选举指标,与邻居节点进行比较,选举具有最大 CP_i 值的节点作为簇头。具体步骤如下:

步骤 1 无人机群升空后,周期性的接收定位系统提供的定位信息,通过灰色-WNN 联合预测模型,对本节点下一时刻的位置进行预测。通过节点间交互 HELLO 数据包,并根据 2.1 节~2.4 节所述计算节点间的移动状态因子和链路保持时间。

步骤 2 节点 i 根据式(16)计算簇头选举度量指标,并通过 HELLO 数据包向周围邻居节点发送度量指标值。通过接收、对比邻居节点的 CP 值,若自身 CP 值大,则继续广播包含自身 CP 值的数据包;若小,则该节点不再广播自身 CP 值。

步骤 3 当节点 i 长时间没有受到来自其他节点的 CP 值时,表示节点 i 在一跳邻居节点内的 CP 值最大,因此,选举节点 i 为簇头,记为 CH_i 。之后节点 i 通过 HELLO 数据包向所有邻居节点广播簇头声明信息。

步骤 4 邻居节点收到包含簇头声明信息的 HELLO 数据包后,向该簇头发送信息请求加入,簇头接收信息后恢复信息允许加入,邻居节点收到允许加入信息后表明该节点已成为该簇头的簇内节点。

步骤 5 重复前 4 步,直到所有的节点状态确定完毕。

4.3 簇维护机制

在分簇之后的网络中,节点的快速移动会使节点经常加入或者离开簇,甚至导致簇头的更新和簇内成员的增减。为保证网络正常运行并且降低路由开销,必须有合理的簇维护机制来重建通信连路,维持簇的稳定^[18]。

簇维护机制包括以下 4 种规则:

1) 删除簇内节点。当一个成员节点收不到带有簇头信息的 HELLO 数据包或者簇头节点收不到该节点周期性广播的 HELLO 数据包时,表明该节点已经不在簇头的通信范围内,应该将该节点信息从簇内删除。

2) 增加新节点。新节点包括网络中最新加入的节点和被其它分簇删除的节点。当一个新节点想加入一个分簇时,通过“握手”行为确定关系,并重新计算 CP 值进行簇头的竞选。

3) 更换簇头。当簇头收不到带有簇内成员信息的 HELLO 数据包或者簇头因为其他原因退出网络

时,视为放弃簇头的“领导地位”。此时,簇内成员恢复到初始状态,按照分簇的 5 个步骤重新进行簇头的选举。

4) 簇的合并。当 2 个簇的簇头成为了一跳邻居节点时,面临簇的合并问题。计算 2 个簇头的 T_{ij}/M_{ij} 的大小,如果 $T_{ij}/M_{ij} > \phi$ (ϕ 为阈值,通过实际情况进行设置),说明 2 个簇会在各自的范围内停留很久,值得合并。如果 $T_{ij}/M_{ij} \leq \phi$,说明 2 个簇只是“擦肩而过”,若合并为一个簇,会造成较大的网络开销。

5 仿真与分析

在分簇算法的基础上,针对无人机集群的应用场景,构建基于分簇的路由算法——MPC-R 算法,内容主要包括簇内和簇间通信 2 部分,簇内采用主动式路由策略,簇间采用被动式路由策略。

本文首先利用 NS-2 对 WNN 预测准确性进行对比分析,说明其对网络性能的影响。之后对本文所提出的 MPC 分簇算法进行仿真验证分析,并与 MOBIC、DDVC、DLDC、MPBC 等分簇算法进行仿真对比分析。构造相应的分簇路由算法进行仿真,对路由性能进行评估。

在仿真环境中,设置 100 架无人机随机分布在 $100 \text{ km} \times 100 \text{ km}$ 的平面空间范围内,移动模型采用 RRM 模型^[19]。各无人机节点可以通过改变发射功率的方式对通信半径进行控制,采用自由空间缩减的无线信道模型。在实际的网络环境中,由于电磁干扰和遮挡等原因所造成的通信链路衰减问题^[20]十分复杂,为了方便计算并且体现该分簇路由算法性能,这里设置为理想的无干扰和遮挡环境。仿真参数设置见表 1。

表 1 参数设置
Tab. 1 Parameter settings

参数	值
移动速率/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	40~70
通信半径/km	15~20
MAC 类型	TDMA
数据传输速率/Mbps	2
数据包长度/kbit	2
数据包格式	CBR
仿真时长/min	30

5.1 分簇算法仿真

图 3 表示当无人机节点通信半径为 15 km 时,节点间的平均链路保持时间与节点最大移动速度的关系。如图 3 所示,随着节点移动速度的增大,节点间的平均链路保持时间逐渐减小,这是因为节点移

动性增强导致网络拓扑结构剧烈变化,节点间的通信链路更加容易断裂。但是 MPC 算法通过联合预测模型,能够准确预测节点的运动趋势,通过全面合理的分析,尽可能地避免了节点的高速移动对通信链路的影响,从而具有较高的平均链路保持时间。

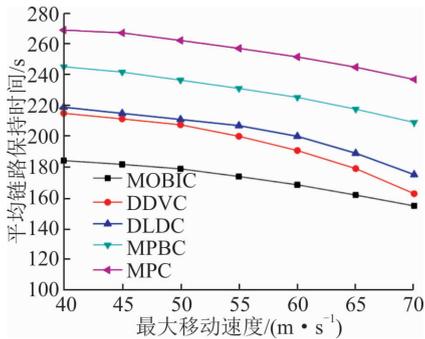


图3 平均链路保持时间与最大移动速度间的关系
Fig. 3 Relationship between average link holding time and maximum moving speed

图4表示无人机节点移动速度为50 m/s时,节点通信半径对平均链路保持时间的影响。如图4所示,随着通信半径的增加,节点间的链路保持时间不断增大。与其他4种分簇算法相比,MPC分簇算法的簇头选举机制与簇维护机制带有预测性,能够获得更久的链路保持时间。

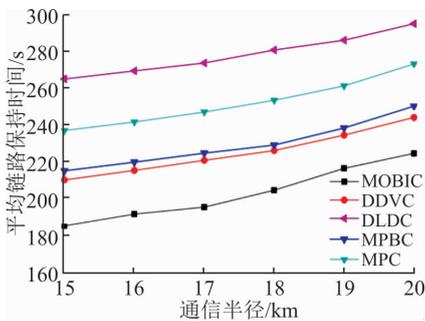


图4 通信半径与平均链路保持时间的关系
Fig. 4 Relationship between average link holding time and communication radius

图5表示无人机节点通信半径为15 km时,节点最大移动速度与簇头保持时间的关系。图8中,随着节点移动速度的增大,各分簇算法的簇头保持时间均逐渐降低。节点移动性增强,网络拓扑结构剧烈变化,会频繁出现增加/删除节点、合并簇、簇头的更换等问题,从而造成更多的路由开销,减少了簇头保持时间。但是 MPC 分簇算法通过预测模型估计链路保持时间,全面分析节点的运动状态,能够更好地适应节点高速移动的网络环境,提高了分簇的稳定性。

图6是无人机节点最大移动速度为50 m/s时,节点的通信半径对簇头保持时间的影响。随着节点通信半径的增大,分簇网络的簇头保持时间逐渐增

大,较其他分簇算法来说,MPC分簇算法在分簇的时候综合考虑节点的既定位置以及预测为止,所以具有更久的簇头寿命,能够降低网络开销,提高分簇的稳定性。

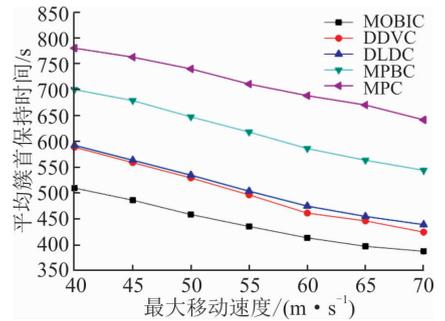


图5 最大移动速度与平均簇首保持时间的关系
Fig. 5 Relationship between average cluster head hold time and maximum moving speed

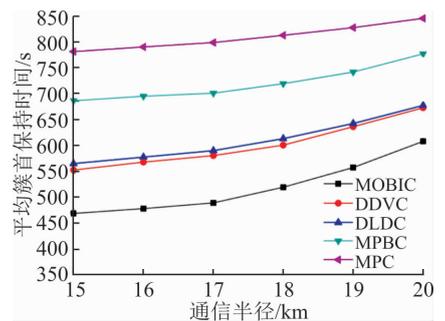


图6 通信半径与平均簇首保持时间的关系
Fig. 6 Relationship between average cluster head hold time and communication radius

5.2 分簇路由性能仿真

图7表示无人机节点通信半径为15 km时,节点移动速度对路由算法分组投递率的影响。随着节点移动速度的不断增大,节点间的相对位置变化较快,通信链路更易断裂,分组投递率普遍下降。但 MPC-R 路由算法在分簇时基于联合预测模型,所建立的簇结构具有更强的稳定性,为数据传输提供保障,因此具有相对较高的分组投递率。

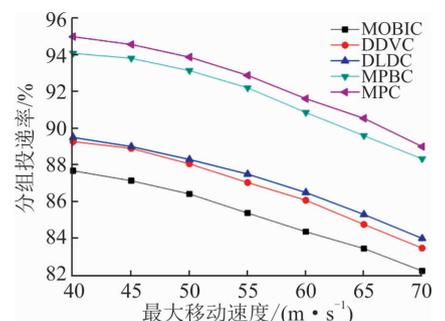


图7 最大移动速度与分组投递率的关系
Fig. 7 Relationship between maximum moving speed and group delivery rate

图8表示无人机节点通信距离为15 km时,节点移动速度对数据传输时延的影响。节点移动速度增大,数据传输时延也随之增大。在5种分簇路由算法中,MPC-R路由算法的簇头竞选机制与簇维护机制增强了分簇的稳定性,节点间的通信链路相对稳定,相比其他算法,具有更短的端到端时延。

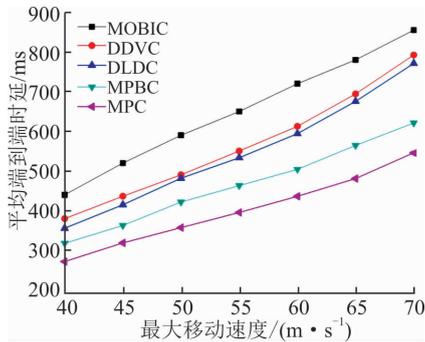


图8 最大移动速度与平均端到端时延的关系

Fig. 8 Relationship between maximum moving speed and end-to-end delay

6 结论

本文在现有分簇算法以及分簇路由协议的研究与分析的基础上,提出了基于移动预测的分簇算法和分簇路由协议,仿真结果表明:

- 1) WNN方法对于预测误差纠正有明显作用,能够提高分簇的稳定性;
- 2) MPC分簇算法对分簇的稳定性有明显改善;
- 3) 较现有分簇路由协议来说,MPC-R协议具有较高的分组投递率和较低的端到端时延,提高了路由性能。

参考文献(References):

[1] ZAFAR W, KHAN B M. Flying Ad-Hoc Networks: Technological and Social Implications [J]. IEEE Technology & Society Magazine, 2016, 35(2):67-74.

[2] YU J Y, CHONG P H J. A Survey of Clustering Schemes for Mobile Ad-Hoc Networks [J]. Communications Surveys & Tutorials IEEE, 2005, 7(1): 32-48.

[3] SREEVATSAN A P, THOMAS D. An Optimal Weighted Cluster Based Routing Protocol for MANET [C]// International Conference on Data Mining & Advanced Computing. New York: IEEE Press, 2016: 310-316.

[4] 倪旻明. 移动 Ad Hoc 网络中分簇组网技术的研究 [D]. 北京:北京交通大学,2012.

NI W M. Research on Clustering Network Technology

in Mobile Ad Hoc Networks [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012. (in Chinese)

- [5] 黄金科,樊晓光,万明,等. 基于稳定分簇的移动自组织网络路由协议[J]. 北京航空航天大学学报, 2016, 42(11): 2332-2339.
- HUANG J K, FAN X G, WAN M, et al. Stable Cluster-Based Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2016, 42(11): 2332-2339. (in Chinese)
- [6] 徐佳,李陟,李千目,等. Ad hoc 网络中一种自适应分簇路由过渡协议[J]. 通信学报, 2008, 29(3): 54-62.
- XU J, LI Z, LI Q M, et al. Adaptive Clustering Routing Transition Protocol in Ad Hoc Networks [J]. Journal on Communications, 2008, 29(3): 54-62. (in Chinese)
- [7] 王蓉,陈爱网,管桦,等. 分级集中式自组织网络路由模型研究[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2012, 13(2): 60-64.
- WANG R, CHEN A W, GUAN H, et al. Study of Self-Organizing Network Routing Model [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2012, 13(2): 60-64. (in Chinese)
- [8] 唐奎,刘改霞,钟汶娟,等. 移动 Ad hoc 网络多参数加权分簇算法[J]. 重庆大学学报, 2014, 37(2): 106-112.
- TANG B, LIU G X, ZHONG W J, et al. Multi-Parameter Weighted Clustering Algorithm for Mobile Ad Hoc Networks [J]. Journal of Chongqing University, 2014, 37(2):106-112. (in Chinese)
- [9] DYABI M, HAJAMI A, ALLALI H. A New Manets Clustering Algorithm Based on Nodes Performances [C]// International Conference on Next Generation Networks & Services. New York: IEEE Press, 2014: 22-29.
- [10] 丁青. 一种新的 Ad Hoc 网络自适应分簇算法[J]. 信息通信, 2013, 37(9): 78-79.
- DING Q. A New Adaptive Clustering Algorithm for Ad Hoc Networks [J]. Information & Communications, 2013, 37(9):78-79. (in Chinese)
- [11] 马豫青,李晓宇. Ad Hoc 网络自适应安全加权分簇算法[J]. 计算机工程与设计, 2014, 24(10): 3346-3350.
- MA Y Q, LI X Y. Adaptive Security Weighted Clustering Algorithm for Ad Hoc Networks [J]. Computer Engineering & Design, 2014, 24(10):3346-3350. (in Chinese)
- [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. Grey System Theory and Its 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. Hybrid Neural Network Technology [M]. Beijing: Science Press, 2009. (in Chinese)
- [15] 陈标. 短期电力负荷的小波神经网络预测[D]. 长沙: 湖南大学, 2012.
CHEN B. Wavelet Neural Network for Short-Term Power Load Forecasting [D]. Changsha: Hunan University, 2012. (in Chinese)
- [16] ZHAO Q, FANG X, LI Q, et al. WNN-Based NGN Traffic Prediction[J]. Autonomous Decentralized System, 2005, 37(1): 230-234.
- [17] LEI Y, HE Z, ZI Y. EEMD Method and WNN for Fault Diagnosis of Locomotive Roller Bearings[J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38(6): 7334-7341.
- [18] 王沁飞, 南建国, 黄金科, 等. 基于加权的无人机集群组网分簇算法[J/OL]. 计算机应用研究, 2019, 36(5). [2018-03-19]. <http://www.aocmag.com/article/02-2019-05-044.html>.
- WANG Q F, NAN J G, HUANG J K, et al. Weighting Based Clustering Algorithm for FANETs [J/OL]. Application Research of Computers, 2019, 36(5). [2018-03-19]. <http://www.aocmag.com/article/02-2019-05-044.html>. (in Chinese)
- [19] YU Y L, RU L, FANG K. Bio-Inspired Mobility Prediction Clustering Algorithm for Ad Hoc UAV Networks [J]. Engineering Letters, 2016, 24(3): 328-337.
- [20] 孙佩刚, 赵海, 罗玎玎, 等. 无线传感器网络通信链路评估问题[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2008, 29(4): 500-503.
SUN P G, ZHAO H, LUO D D, et al. A Communication Link Evaluation Model for Wireless Sensor Networks [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2008, 29(4): 500-503. (in Chinese)

(编辑: 徐楠楠)

(上接第 83 页)

- [13] KACHA I, ABED-MERAIM K, BELOUCHRANI A. A Low-Cost Adaptive Algorithm for Blind Equalization without Channel Order Estimation[C]// 2008 3rd International Symposium on Communications, Control and Signal Processing. St Julians, Malta: IEEE, 2008: 1384-1388.
- [14] 薛江, 彭华, 马金全. 一种不受信道阶数估计影响的 SIMO 直接盲均衡算法[J]. 信号处理, 2012, 28(4): 519-525.
XUE J, PENG H, MA J Q. SIMO Direct Blind Equalization Algorithm Unaffected by Channel Order Estimation [J]. Signal Processing, 2012, 28(4): 519-525. (in Chinese)
- [15] XIANG Y, YANG L, PENG D, et al. A Second-order Blind Equalization Method Robust to Ill-conditioned SIMO FIR Channels[J]. Digital Signal Processing, 2014, 32(2): 57-66.
- [16] BADEAU R, DAVID B, RICHARD G. Yet Another Subspace Tracker[C]//IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. IEEE, 2014: 329-332.
- [17] ABED-MERAIM K, CHKEIF A, HUA Y. Fast Orthogonal PAST Algorithm[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2000, 7(3): 60-62.
- [18] DOUKOPOULOS X, MOUSTAKIDES G. Techniques De La Puissance Pour L'estimation Aveugle D'un Canal Dans Des Systèmes De Communication Sans Fil[J]. Bibliogr, 2004, 22: 217-245. (in French)
- [19] BADEAU R, GAËL R, BERTRAND D. Fast and Stable YAST Algorithm for Principal and Minor Subspace Tracking[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2008, 56(8): 3437-3446.
- [20] FARZAN H. Steady-State Statistical Performance Analysis of Subspace Tracking Methods [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2016, 64(18): 4781-4791.
- [21] YANG B. Projection Approximation Subspace Tracking [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2002, 43(1): 95-107.

(编辑: 徐楠楠)