

利用离散时间聚合图的无人机编队最短时延路由协议

李 博^① 王改芳^① 杨洪娟^{*①} 茹雪菲^② 张敬淳^② 王 钢^②

^①(哈尔滨工业大学(威海)信息科学与工程学院 威海 264209)

^②(哈尔滨工业大学通信技术研究所 哈尔滨 150001)

摘 要: 针对传统的无人机编队路由算法无法有效利用拓扑变化的可提前预知特性、以发送探测包的方式获取链路的连接情况会导致开销大等问题, 该文引入时变图模型, 提出了基于离散时间聚合图的无人机编队最短时延路由协议。首先, 利用无人机编队网络的先验知识, 如节点的运动轨迹以及网络拓扑变化情况, 使用离散时间聚合图对网络的链路资源和拓扑进行表征。其次, 基于该图模型设计路由决策算法, 即在路由探索阶段将链路时延作为链路权重求解网络的源节点到目的节点的最短时延路由。最后, 性能仿真结果表明, 该路由协议与传统按需距离矢量路由协议相比提高了网络的分组投递率、降低了端到端时延和网络的控制开销。

关键词: 无人机自组网; 无人机编队; 时变图模型; 最短时延路由

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2024)05-1931-09

DOI: [10.11999/JEIT230707](https://doi.org/10.11999/JEIT230707)

Shortest Delay Routing Protocol for UAV Formation with Discrete Time Aggregation Graph

LI Bo^① WANG Gaifang^① YANG Hongjuan^① RU Xuefei^②

ZHANG Jingchun^② WANG Gang^②

^①(School of Information Science and Engineering, Harbin Institute of Technology at Weihai, Weihai 264209, China)

^②(Communication Research Center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Aiming at the problems that the traditional UAV formation routing algorithm cannot effectively utilize the advance predictability of topology changes, and the high cost is caused by acquiring the link connection by sending detection packets, a UAV formation shortest delay routing protocol based on discrete time aggregation graph is proposed by introducing the time-varying graph model. Firstly, using the prior knowledge of the UAV formation network, such as the movement trajectory of nodes and the network topology changes, the network link resources and network topology are characterized by using the discrete time aggregation graph. Secondly, the routing decision algorithm is designed based on the graph model. The delay in the process of route discovery is used as the link weight to solve the shortest delay route from the source node to the destination node of the network. Finally, the simulation performance shows that the routing protocol improves the packet delivery rate, reduces the end-to-end delay and diminishes the network control overhead compared with the traditional Ad-hoc On-Demand Distance Vector routing protocol.

Key words: UAV ad hoc network; UAV formation; Time-varying graph model; Shortest delay route

收稿日期: 2023-07-15; 改回日期: 2024-01-17; 网络出版: 2024-01-25

*通信作者: 杨洪娟 hjyang@hit.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(62171154, 61971156), 山东省自然科学基金(ZR2020MF007), 广东省空天通信与网络技术重点实验室开放基金(2018B030322004)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (62171154, 61971156), The Natural Science Foundation of Shandong Province (ZR2020MF007), The Research Fund Program of Guangdong Key Laboratory of Aerospace Communication and Networking Technology (2018B030322004)

1 引言

如今这个万物互联互通的“智慧”时代,无人机是空地一体化战略的重要组成部分,在视频拍摄、图像采集等众多领域有着广泛的应用前景^[1]。以多跳方式实现队内通信、不受地面基站限制、队内可实现高度自治的无人机自组网是多无人机协同方向中最受关注的研究方向之一^[2,3]。无人机编队作为特殊的无人机自组网,与传统的移动自组网^[4]、车载自组网^[5]相比,前者节点移动性高、速度变化大、节点搭载的电池能量有限,这些特点使得无人机编队的通信传输具有链路通断频繁、网络拓扑结构高动态变化等特征,给通信传输的可靠性与高效性带来了一定的挑战。因此,为无人机编队网络设计可靠的路由协议成为当前无人机编队领域中具有挑战且急需解决的问题之一^[6]。

国内外学者为该网络的路由协议进行了大量的研究,主要工作分为两类:一类是对可能应用在该网络中的典型路由协议进行性能评估;另一类是为了进一步提高网络的性能,在传统的路由协议基础上进行优化。文献^[7]基于OPNET平台对按需式距离矢量路由(Ad-hoc On-Demand Distance Vector, AODV)、动态源路由(Dynamic Source Routing, DSR)、优化链路状态路由(Optimized Link State Routing, OLSR)等路由协议在不同的移动速度下进行仿真。文献^[8]设置仿真节点采用高斯-马尔可夫移动模型,基于该模型对传统的路由协议AODV和OLSR在指定搜索区域覆盖场景中的性能进行评估。文献^[9]、文献^[10]分别从择路判决依据和路由发现过程对AODV路由协议进行优化和改进。

虽然依据不同的影响因素设计了多种路由选择函数来提高路由协议的性能,但是目前已有的、应用较为广泛的路由协议仍然存在路由开销大、路由发现过程耗时长等问题。无人机编队网络是一种可提前预知的时变网络,传统的路由协议并没有利用节点移动轨迹的可提前预知特性和网络拓扑的先验知识。基于时变图模型的路由算法是一种依赖于环境先验信息的路由算法,与传统的路由协议算法相比,它需要较多的网络信息,也能更好地利用无人机编队场景下节点移动路径可提前预知的特性。

文献^[11]针对低轨卫星间链路的周期性时变特性设计一种新的路由方案,即离散时间下动态虚拟的拓扑路由也称快照图模型。文献^[12]研究了时变网络中的流量问题,发现与经典的静态流动问题不同,为该网络构建时间扩展图模型并将时间流动和穿越时间转化为时间扩展图模型中的静态流动问题,在此基础上开发了具有流量相关渡越时间的时

间扩展网络算法工具箱。文献^[13]针对时间扩展图的高存储开销和高昂的计算成本等缺陷设计了一种简单高效的时间聚合图模型,不跨时间复制节点和节点之间的边,允许将边和节点的时变属性建模为时间序列。文献^[14]研究了时变网络中的计算最短路径问题并表明基于时间聚合图模型的最短路由算法并不总是表现出贪婪特性或最优化子结构,传统的静态图论算法并不适用。因此,针对时变非平稳非先进先出网络设计了基于离散时间聚合图模型的端到端最短时延路由,非平稳非先进先出原则该算法要求时变网络的传输时延不遵循先进先出原则。西安电子科技大学的李红艳团队在时间聚合图的基础上提出了存储时间聚合图,用此模型来解决延迟容忍网络的最大流问题^[15],以及为保证卫星网络的多业务服务质量设计了多路径传输路由^[16]。

本文根据无人机编队的特点分析了传统路由协议在无人机编队的适用性,参考卫星网络中成熟的时变图理论及路由算法设计思路,通过离散时间聚合图对无人机编队网络进行建模,并提出基于离散时间聚合图的无人机编队最短时延路由协议(Discrete Time Aggregate Graph-Minimum Delay, DTAGMD)。与AODV路由协议进行对比测试,仿真结果表明,利用先验信息来选择传输路径的方法提高了系统的数据包投递率,并且降低了端到端时延和网络的路由控制开销。

2 无人机编队中的路由协议

2.1 路由协议类型

无人机编队目前主要使用的路由协议是传统移动自组网中的路由协议,如AODV和OLSR等。编队中的无人机主要有两种通信模式,“广播”方式和“点对点”方式,两种方式相辅相成,使得无人机编队能有效地完成指定的任务。首先,收到任务的无人机以“广播”方式向周边邻近的无人机广播该任务并请求其他无人机的协助,当周边邻近无人机收到该任务请求后会结合自身当前的飞行状态、外界环境等指标考虑自身是否能接受该任务。如果能,则通过“点对点”方式返回应答消息,并将该任务请求进一步以“广播”方式发送给其他无人机;如果不能,则仅以“广播”方式进一步转发该任务请求消息。最后,无人机编队中的所有无人机均收到了该任务请求消息并根据自身情况进行是否执行任务的决策,由此构建起了执行任务的无人机子编队。

无人机编队网络具有节点移动速度快、网络拓扑变化频繁、节点携带的能量资源有限等特点,设

计路由协议的过程中需要考虑到以上特征。目前无人机编队网络常用的路由协议如图1所示。

主动式路由协议是指当网络中的任一节点产生通信请求时, 源节点直接依次查询本地保留的全局路由表表项, 直到找到从源-目的节点的路由路径, 并按照该路由路径进行数据传输。定期广播控制信息也可以及时发现网络拓扑结构的变化, 避免全局路由表的过期, 保证网络的通畅。

被动式路由协议, 即按需路由协议, 只有当网络中的源节点需要进行数据传输时才会发起路由寻找请求来构建源节点-目的节点的路由路径并在数据开始传输后进行路由维护, 由此保证路由路径的稳定性。使用该协议的通信网络节点虽然不必维护所有节点的路由表, 一定程度上减少了路由开销, 但按需发起路由请求会导致很大的时延, 使得路由构建的时间急剧增加。典型的按需式路由协议有动态源路由协议DSR和AODV。

AODV路由协议的节点需要维护自身的路由表, 其中包含目的节点的地址、目的节点的序列号、目的节点序列号是否有效、下一跳节点的地址、路由生存时间等。工作流程主要包含路由发现和路由维护两步。在路由发现阶段, 当网络中的某一节点产生通信需求, 源节点遍历查找本地路由表中是否存在源-目的节点的有效路径。若存在, 则按照该路径进行信息传递; 若无, 则源节点向附近的邻居节点广播路由请求(Route Request, RREQ) 消息。当邻居节点接收到上一节点发送的RREQ消息时, 首先判断是否接收过相同的路由请求。若接收过, 则丢弃该路由请求消息; 若无, 则将该信息存入本地, 并查找自身路由表中是否含有到RREQ消息中的目的节点的有效路径, 若无则进一步通过广播方式转发该RREQ消息给自身的邻居节点, 直到找到源节点至目的节点的有效路径。在路由维护阶段, 路由路径上的无人机节点会按照指定的时间间隔相互发送HELLO消息来判断节点间的连接情况。若链路上的节点在指定时间间隔内没有接收到链路上游、链路下游节点发送的HELLO消息, 则表示这

些节点组成的链路已经断开。此时, 这些失效链路中的上游节点会按照反向路由的方向逐层的向源节点传递路由错误信息, 该消息用于通知源节点当前路由路径已经失效, 此时源节点需要再次建立有效的路由路径来传输数据包。

混合式路由协议将通信网络划分为两种, 在一定区域内部使用主动式路由、在区域外部使用被动式路由协议。使用该协议的通信网络在区域内部减少了路由构建的时间、在区域外部减少了路由开销, 但区域划分的规则对该协议的使用效果有很大影响, 并且该协议对网络中的节点计算能力要求更高。

2.2 路由协议的适用性分析

无人机编队在灾难紧急救援、指定目标跟踪与定位、科学探索、临时通信网络的搭建等方面有着巨大的需求与应用前景, 无人机编队网络的通信问题也随之成为该领域的热点问题。同时无人机编队时变网络是一种特殊的无人机自组网, 该网络的拓扑结构变化频繁、无人机节点搭载的能量十分有限、无人机节点的移动速度较快、缺少端到端的直连路径导致节点间的通信强烈依赖多跳方式。这些特性使得目前常用的无人机自组网的路由协议在无人机编队网络中无法发挥优势, 存在诸多弊端。因此, 如何有效利用网络中有限的网络资源成为无人机编队网络中路由设计领域中关键性的问题。

采用主动式路由协议的网络中所有的节点均需维护路由表, 所以该协议会造成极大的路由开销、路由表所占用的存储空间也会随着节点数的增加而急剧增加, 因此这种路由协议不适合应用在节点密度较大的无人机编队网络。

被动式路由协议与主动式路由协议相比, 网络中的节点无需定期广播控制消息、无需实时维护全局路由表, 节点的路由表只有在产生了通信需求时才会建立路由表, 因此更适合应用于节点密集程度较高、网络拓扑变化频繁、节点间链路通断频繁的无人机编队网络中。

AODV路由协议中的节点只需存储必要的路由

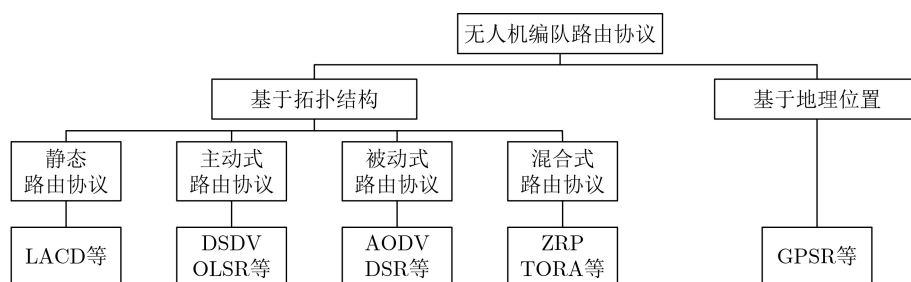


图1 常用的无人机编队路由协议分类

信息,因此适合应用在网络带宽、节点内存空间较小的网络中。因此,本文在仿真验证阶段将设计的算法与AODV进行对比,验证本文设计的算法的有效性。但是,该协议在路由发现阶段依旧采用广播方式来发现有效的路由,造成了网络中存在大量的路由控制消息造成控制数据的冗余。并且,在对该协议的研究中发现,AODV协议的效果依赖节点的位置信息,在存在多径衰落、存在噪声干扰的现实生活中节点位置的预知缺乏准确性,导致AODV路由协议的效果并不理想。

3 基于离散时间聚合图的无人机编队最短时延路由算法

3.1 离散时间聚合图

时间聚合图相比时间扩展图,无需重复复制网络的节点。因此该模型所占用的存储空间大大减小,仅通过一次计算便可获得网络中源-目的节点的最短路径无需大量重复计算。时间聚合图模型又可以根据划分时隙的方法分为离散时间聚合图模型^[13]和连续时间聚合图模型^[17],其中离散时间聚合图模型是将运行周期划分为若干等长的子时隙,该模型适合求解最短路径问题,连续时间聚合图模型是选取合适的连续函数来描述节点之间的连接关系以及资源的变化情况,该模型适合求解网络的最大流问题。

离散时间聚合图将不同时刻的拓扑图聚合到一张图上,并用链路权重序列来表示不同子时间段的链路权重。当链路权重表示传播延时,利用该模型可以求解网络的最短时延路径;当链路权重表示链路代价时,利用该模型可以求解网络的最小代价路径。为了更加精准地描述网络的资源变化情况,链路权重也可以是链路传播延时、节点剩余能量、节点间相对移动度等性能的权重组合,此时求解最短时延路径的算法不再适用。本文采用的模型见图2,将无人机描述为节点,节点间的链路权重为数据包的传播延时。

值得一提的是,离散时间聚合图模型表征网络拓扑变化情况的精准度和划分的子时隙个数密切相关。在网络的运行时间一定的情况下,划分的子时隙越多、子时隙的时间长度越短,时间聚合图描述的网络拓扑图越精准,更贴合实际的网络拓扑变化

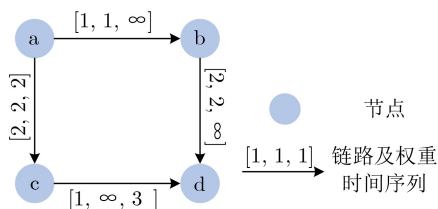


图2 离散时间聚合图模型

以及网络资源变化情况。虽然时间聚合图模型占用的存储空间小、计算复杂度较低,但该模型无法描述节点的缓存空间随时间的变化情况,在使用了存储-托管-转发机制的网络中应用受限,在现实使用的过程中依旧需要考虑时间聚合图模型存在的弊端和缺陷。因此,在网络的节点密集程度较高、网络的拓扑图呈现复杂连接时,求解该网络的最短路径以及最小代价等问题适合使用时间聚合图模型。

3.2 最小时延路由算法

DTAG-MD路由算法可以解决以下两类问题:给定起始时间,找到源节点最早到达目的节点的有效路由路径;给定时间域,找到数据包传输的最佳起始时间和该时间对应的路由路径。本文研究的最短时延路由算法是指,在时变非平稳的无人机编队网络中求解给定起始时间下源节点-目的节点的最短时延路由。非平稳的无人机编队网络是指,最短路径的决策会随着时间而发生变化,并且链路的传播延时不遵循先进先出原则,即在节点处可以通过等待来延迟数据包的传输由此减少总的传输时间。

如图3所示,网络中包含节点N1、节点N2和节点N3,节点间链路上标注的属性序列表示不同子时隙下该链路的传播延时。

如图4所示,当节点N1想要向节点N3发送数据包时,若遵循先进先出的原则,数据包将在第7个时刻到达节点N3,总的旅行时间为6个单位时间;若不遵循先进先出原则,数据包到达节点N2时将会等待1个单位时间再转发,数据包在第5个时刻到达节点N3,总的旅行时间大大减小。

根据上述分析,在算法的设计过程中不能使用节点间链路的最早有效性来选择节点的数据包转发时间,而要根据节点处的到达时间来进行路径选择。因此,在设计DTAG-MD路由协议时,需要根据到达时间转换(Arrival Time Series Transformation, ATST)^[14]将链路上的传播延时序列对应转换为节点的到达时间序列而不是最早的数据包离开时间。如图5所示,根据ATST进行转换后的时间聚



图3 三节点离散时间聚合图模型

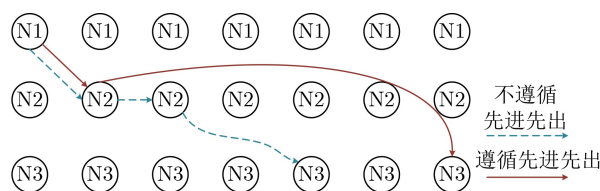


图4 先进先出与非先进先出原则示意图

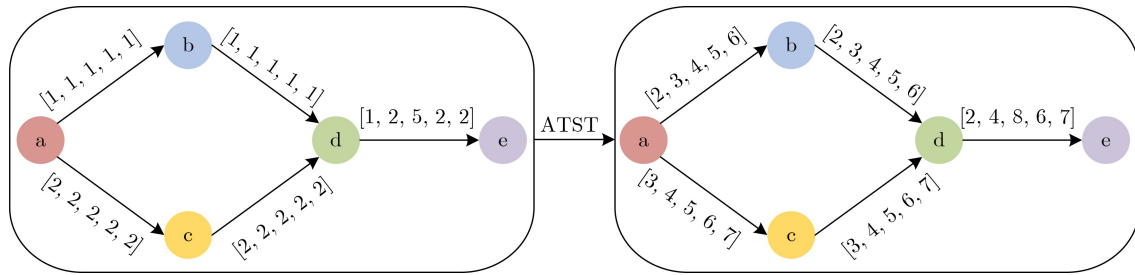


图5 到达时间转换示意图

合图满足最优子结构，也就是当在选择某一节点最早的到达时间时，可以保证从源节点到达经过的所有节点均为最短时延路径，故可以使用贪婪算法寻找最佳路径。

ATST是指在变换后的网络中节点间的链路 ab 上的时间序列表征了节点 a 在每个离开时间 t 到达节点 b 的到达时间 $T_{ab}(t)$ ，该时间由离开时间 t 和链路传播时延 $\sigma_{ab}(t)$ 的和表示，即 $T_{ab}(t) = t + \sigma_{ab}(t)$ 。最短时延路由算法会在链路的节点到达时间序列中选择对应时刻大于或等于链路起始节点离开时间的最早到达时间作为当前节点的各个邻居节点的最早到达时间，按照这种规则依次计算直到链路的尾部节点包含了目的节点，由此可以得到在给定的起始时间下源-目的节点的最短时延以及最短时延路由。具体步骤见**算法1**。

算法1 基于离散时间聚合图的无人机编队最短时延路由算法

输入：无人机编队在给定时间 T 内的移动轨迹，源节点 s ，目的节点 d 和开始时间 t_{start}

输出：在 t_{start} 时刻从源节点 s 到目的节点 d 的最短时延路径

- 1: 根据编队移动轨迹计算网络的离散时间聚合图 $G = (V, E)$ ，其中 V 表示节点集， E 表示链路集，且每条边 $e \in E$ 都有对应的链路传播时延序列
- 2: 根据ATST转换将链路传播时延序列转换为到达时间序列
- 3: 变量初始化，令 $c_{ss} = t_{start}$ ； $\forall d \neq s, c_{sd} = \infty$ ； $Q = \{s\}$ ； $P = \emptyset$ // c_{sd} 为从节点 s 出发，节点 d 的最早到达时间
- 4: **if** $Q \neq \emptyset$ **do**
- 5: 从 Q 中提取头部节点 u 并将节点 u 的邻居节点加入 P 中
- 6: **if** $P \neq \emptyset$ **do**
- 7: 从 P 中提取头部节点 v ，并计算 $c'_{sv} = \min\{T_{uv}(t)\}$
- 8: **if** $c'_{sv} < c_{sv}$ **do**
- 9: 更新节点 v 的最早到达时间 $c'_{sv} = c_{sv}$ 和 v 的上一跳节点 $parent_{sv} = u$
- 10: 若节点 v 未被遍历，则将节点 v 加入队列 Q
- 11: **end**
- 12: **else do**
- 13: 返回步骤4
- 14: **end**
- 15: **end**
- 16: 输出源节点到目的节点的最短时延 $c_{sd} - c_{ss}$ 以及对应的路径

DTAG-MD路由协议充分利用了无人机编队的网络拓扑可提前预知特性，根据预先设定的编队行进模式抽象出网络的离散时间聚合图模型。将网络中的无人机抽象为节点，无人机之间的传输链路抽象为线段，依次求解不同时间隙下的链路传播时延并以序列的方式标注在线上，然后根据成熟的图理论以及优先队列等算法思路求解该网络中给定的源节点到目的节点的最短时延路由路径以及由这些路由路径组成的全局分时隙路由表。通过这种提前计算路由路径、仿真时按需要查询路由表项的方式克服了传统的路由协议为了获取全局路由表而定期广播控制消息造成的网络开销大、无人机节点移动速度过快导致路由协议的数据包投递率较低以及按需寻找路由路径导致算法执行效率不高等问题。

4 仿真分析

4.1 仿真场景说明

为了验证本文提出的DTAG-MD路由协议的网络性能，采用仿真工具NS3对该协议以及典型的按需式路由协议AODV进行对比测试。仿真实验场景主要设置以下两种。

场景1 验证网络节点密集程度对两种协议性能的影响。节点最大的移动速度保持30 m/s不变，AODV路由协议的搜索范围增益为0且方向控制角为45°，无人机节点的数量分别为20, 30, ..., 100架。在该实验场景下比较不同无人机数量下使用上述路由算法对网络端到端时延、分组投递率以及路由归一化开销等网络性能的影响。

场景2 验证无人机移动速度对两种协议性能的影响。无人机编队中节点数目保持100不变，AODV路由协议的搜索范围增益为0且方向控制角为45°，无人机节点的移动速度分别为10, 20, ..., 80 m/s。在该实验场景下比较不同无人机移动速度下使用上述路由算法对网络端到端时延、分组投递率以及路由归一化开销等网络性能的影响。

为了保证仿真的随机性和仿真结果的可靠性，仿真过程中设置了10个不同的随机数种子对DTAG-MD路由协议和AODV路由协议进行性能测试并对

每次仿真出的数据值取20次平均值,表1展示了在仿真中使用的部分参数。

4.2 仿真评价指标

仿真参数主要选择网络的平均端到端时延、分组投递率、路由控制开销作为路由协议性能的主要评价标准。

(1) 平均端到端时延

网络的平均端到端时延值 $D_{\text{end-end}}$ 等于接收和发送数据包时间的差值与成功接收的数据包个数之比,如式(1)所示:

$$D_{\text{end-end}} = \frac{\sum_{i=1}^{N_r} (t_r(i) - t_s(i))}{n} \quad (1)$$

其中, n 为成功接收的数据包个数, $t_r(i)$ 为数据包的发送时间, $t_s(i)$ 为接收到数据包的时间。

(2) 分组投递率

网络的分组投递率值PDR等于接收端实际接收到的数据包数量与理论应接收到的数据包数量之比,如式(2)所示:

$$\text{PDR} = \frac{P_r}{P_s} \quad (2)$$

其中, P_r 为接收端实际接收到的数据包数量, P_s 为接收端理论应接收到的数据包数量。

(3) 路由控制开销

网络的路由控制开销值Load等于用于路由建立和维护的数据包数量与接收到的数据包数量之比,如式(3)所示:

$$\text{Load} = \frac{P_c}{P_d} \quad (3)$$

其中, P_c 为用于路由建立和维护的数据包数量, P_d 为接收到的数据包数量。

4.3 仿真结果分析

前文规定了各个场景下的无人机编队中节点的数目、移动速度以及各个节点的运动轨迹,由此可以得到网络中无人机节点间链路时延在给定时间内的变化情况,进而生成对应链路的传播时延序列。在不同的无人机节点数目和不同的无人机飞行速度

两种仿真场景下,采用平均端到端时延、分组投递率以及路由控制开销路由协议性能的评价指标,研究上述基于离散时间聚合图的无人机编队路由协议与典型的按需式路由协议AODV路由协议的网络性能,进而验证所设计的DTAG-MD路由协议更加适合轨迹可提前预知、网络拓扑变化频繁的无人机编队网络。

4.3.1 无人机密集程度的影响

无人机节点密集程度对网络的平均端到端时延的影响见图6。两种路由协议的平均端到端时延均随着网络节点密度的增加而逐渐减小,直到达到网络的密度饱和状态;DTAG-MD路由协议的平均端到端时延低于AODV路由协议。随着网络节点数的逐渐增加,AODV路由协议需要通过广播大量的HELLO消息来建立源-目的的路由路径,这个过程会占用大量的时间。而DTAG-MD协议根据节点提前预知的移动轨迹在数据请求前就已查找到源-目的的路由路径,极大地降低了网络的端到端时延。然而当网络节点数目达到70时,该指定大小的飞行区域中无人机节点分布已达到饱和状态,此时网络的平均端到端时延达到最优。若继续增加区域中的无人机节点数目,两种路由算法寻找的路由路径跳数过多,网络的平均端到端时延呈现小幅度的上升趋势。

无人机节点密集程度对网络的分组投递率的影响见图7。两种路由协议的分组投递率均随着网络

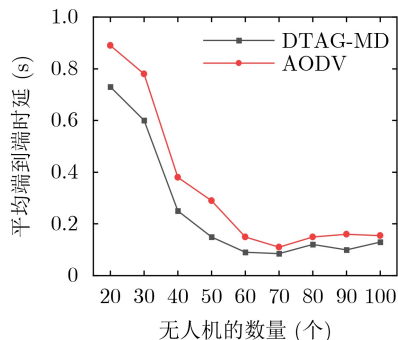


图6 网络节点密度对两种协议平均端到端时延的影响

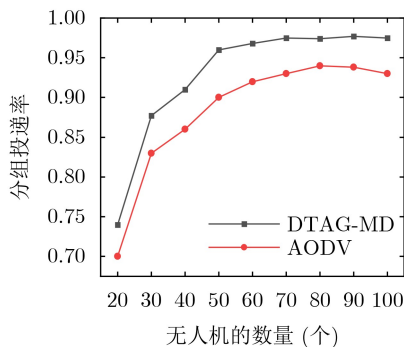


图7 网络节点密度对两种协议分组投递率的影响

表1 部分参数设置

仿真参数	参数值	仿真参数	参数值
移动范围	1000 m×1000 m	节点移动模型	追踪群移动模型
MAC层协议	802.11g	网络带宽	2 Mbit/s
传输距离	250 m	仿真时间	200 s
连接对数	10	最大队列	50
数据包大小	512 Byte	数据发送速率	4个/s
节点初始能量	60 J	节点发送功率	0.665 W

节点密度的增加而逐渐增加,直到达到网络的密度饱和状态;DTAG-MD路由协议相比AODV路由协议而言,分组投递率性能有了显著的提升。随着网络中节点数的逐渐增加,网络拓扑的变化程度也逐渐加大,由于AODV路由协议需要发送探测包来搜索路由路径以及保持链路的有效性,因此在网络拓扑变化十分频繁的环境中,节点的快速移动导致路由路径失效的可能性较大,而DTAG-MD路由协议根据网络拓扑的先验信息提前计算出源节点到目的节点的路由路径,极大地提高了路由路径的可靠性。然而当网络节点数目达到70时,该指定大小的飞行区域中无人机节点分布已达到饱和状态,此时可实现网络的分组投递率最优。若继续增加区域中的无人机节点数目,两种路由算法寻找的路由路径跳数过多、可能丢包的节点增加,由此导致网络的分组投递率呈现小幅度的下降趋势。上述分析表明,随着网络中节点数目的增加,DTAG-MD的分组投递率性能要显著优于AODV。

无人机节点密集程度对网络的路由控制开销的影响见图8。两种路由协议的路由控制开销均随着网络节点密度的增加而逐渐增加,直到达到网络的密度饱和状态;DTAG-MD路由协议的路由控制开销明显低于AODV路由协议。由于DTAG-MD路由协议无需间隔一定的时间来发送路由请求消息以获取全局路由表,也无需在数据包产生时发送路由请求消息以获取源-目的的有效路由路径,仅需在路由路径发生断裂时发送路由错误消息。因此在这种路由机制下,无论无人机节点密集程度如何,DTAG-MD路由协议的控制开销要远远小于AODV路由协议的路由控制开销。通过分析可知,随着节点数目增加,DTAG-MD的路由控制开销性能要优于AODV路由协议。

4.3.2 无人机移动速度的影响

无人机节点移动速度对网络的平均端到端时延的影响见图9。两种路由协议的平均端到端时延均随着网络节点移动速度的增加而逐渐增加;DTAG-

MD路由协议相比AODV路由协议而言,平均端到端时延性能有了显著的提升。AODV协议在节点移动速度较快、拓扑变化较频繁的网络中,寻路过程中花费的时间要远远高于拓扑结构稳定、节点移动速度慢的网络,导致路由协议的性能受节点移动速度的影响较大。而DTAG-MD路由协议无论无人机节点的移动速度如何,均在需求产生前就计算出了网络的全局路由表,因此平均端到端时延不易受到节点移动速度的影响。故随着网络中节点数目的增加,DTAG-MD的平均端到端时延性能要显著优于AODV路由协议。

无人机节点移动速度对网络的分组投递率的影响见图10。两种路由协议的分组投递率均随着网络节点移动速度的增加而逐渐降低;DTAG-MD路由协议的分组投递率明显高于AODV路由协议。AODV是按需式的路由协议,当有传输数据的需求产生时才会建立源-目的的有效路由。但是,当无人机节点移动速度过快时,前一时刻寻找的路由路径很大概率上已经失效或者已经不是最优路由路径,导致仿真过程中的数据包的丢失率增加,进而使得网络的分组投递率降低。而DTAG-MD路由协议在计算路由时会综合考虑仿真时间内的拓扑结构,从全局全时隙的角度选择最优的路由路径,极大地保证了路由路径的稳定性和有效性。

无人机节点移动速度对网络的路由控制开销的

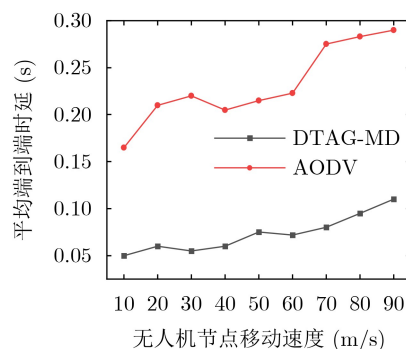


图9 网络节点移动速度对两种协议平均端到端时延的影响

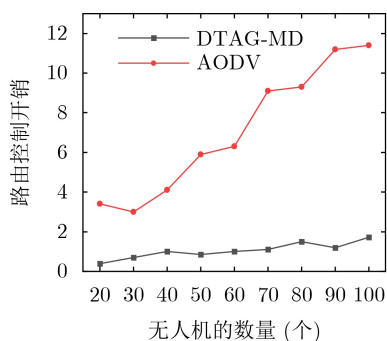


图8 网络节点密度对两种协议路由控制开销的影响

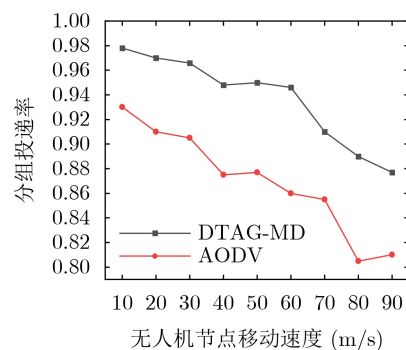


图10 网络节点移动速度对两种协议分组投递率的影响

影响见图11。两种路由协议的路由控制开销均随着网络节点移动速度的增加而逐渐增加；DTAG-MD路由协议相比AODV路由协议而言，路由控制开销明显下降。随着无人机节点的移动速度增加网络中链路的稳定性逐渐降低，此时AODV路由协议需要更频繁地寻找和维护路由，并且节点速度增加也会导致路由路径的抖动概率增加、链路断裂的可能性相应增加，此时AODV路由协议也需要更频繁地向上游发送路由维护消息。而DTAG-MD路由协议无需发送大量的路由请求消息，并且基于全局拓扑决策出的路由路径更加稳定，因此也无需频繁地进行路由维护与错误报告。综合上述因素，无人机节点的移动速度对AODV路由协议的影响较大，而对基于图模型的路由协议的影响较小，并且DTAG-MD路由协议的控制开销要远远小于AODV路由协议的控制开销。

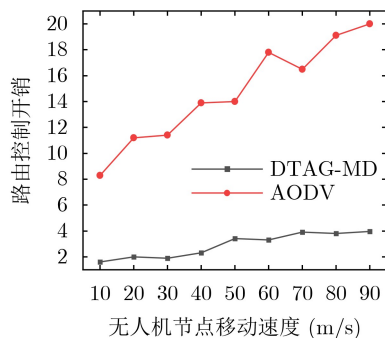


图 11 网络节点移动速度对两种协议路由控制开销的影响

5 结束语

传统的路由协议应用在无人机编队网络中存在广播控制消息导致网络开销大、未充分利用无人机编队网络拓扑结构可提前预知等缺陷。针对该不足，引入离散时间聚合图模型对网络拓扑进行数学表征，结合该图模型设计了无人机编队最短时延路由算法。最后通过软件仿真验证了所提路由协议的有效性，并对比了该协议和传统路由协议的平均端到端时延、分组投递率、路由控制开销。仿真结果证明所提协议有效地提升了无人机编队网络的多项网络性能，更适合应用于移动轨迹可提前预知的、网络拓扑变化剧烈的无人机编队网络，具有一定的实际应用意义。但在本文中，寻路过程只考虑了链路传播时延，综合考虑无人机剩余能量以及相对移动速度等因素的路由协议还有待继续研究。

参考文献

- [1] AZARI M M, GERACI G, GARCIA-RODRIGUEZ A, *et al.* UAV-to-UAV communications in cellular networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2020, 19(9): 6130–6144. doi: 10.1109/TWC.2020.3000303.
- [2] 陈新颖, 盛敏, 李博, 等. 面向6G的无人机通信综述[J]. *电子与信息学报*, 2022, 44(3): 781–789. doi: 10.11999/JEIT210789.
- [3] CHEN Xinying, SHENG Min, LI Bo, *et al.* Survey on unmanned aerial vehicle communications for 6G[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2022, 44(3): 781–789. doi: 10.11999/JEIT210789.
- [4] YOU Wenjing, DONG Chao, CHENG Xiao, *et al.* Joint optimization of area coverage and mobile-edge computing with clustering for FANETs[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 8(2): 695–707. doi: 10.1109/JIOT.2020.3006891.
- [5] SRILAKSHMI U, ALGHAMDI S A, VUYYURU V A, *et al.* A secure optimization routing algorithm for mobile ad hoc networks[J]. *IEEE Access*, 2022, 10: 14260–14269. doi: 10.1109/ACCESS.2022.3144679.
- [6] SRIVASTAVA A, BAGGA N, and RAKHRA M. Analysis of cluster-based and position-based routing protocol in VANET[C]. *Proceedings of the 2021 9th International Conference on Reliability, Infocom Technologies and Optimization (Trends and Future Directions)*, Noida, India, 2021: 1–5. doi: 10.1109/ICRITO51393.2021.9596325.
- [7] KANG Hongyue, CHANG Xiaolin, MIŠIĆ J, *et al.* Improving dual-UAV aided ground-UAV bi-directional communication security: Joint UAV trajectory and transmit power optimization[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2022, 71(10): 10570–10583. doi: 10.1109/TVT.2022.3184804.
- [8] DARABKH K A, ALFAWARES M G, and ALTHUNIBAT S. MDRMA: Multi-data rate mobility-aware AODV-based protocol for flying ad-hoc networks[J]. *Vehicular Communications*, 2019, 18: 100163. doi: 10.1016/j.vehcom.2019.100163.
- [9] LI Xianfeng and YAN Jiaojiao. LEPR: Link stability estimation-based preemptive routing protocol for flying ad hoc networks[C]. *Proceedings of 2017 IEEE Symposium on Computers and Communications*, Heraklion, Greece, 2017: 1079–1084. doi: 10.1109/ISCC.2017.8024669.
- [10] GANKHUYAG G, SHRESTHA A P, and YOO S J. Robust and reliable predictive routing strategy for flying ad-hoc networks[J]. *IEEE Access*, 2017, 5: 643–654. doi: 10.1109/ACCESS.2017.2647817.
- [11] LEE S W, ALI S, YOUSEFPOOR M S, *et al.* An energy-aware and predictive fuzzy logic-based routing scheme in flying ad hoc networks (FANETS)[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 129977–130005. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3111444.
- [12] TANG Zhu, YU Wanrong, ZHAO Baokang, *et al.* Time-efficient transient loops avoiding in snapshot routing

- algorithm[C]. Proceedings of 2014 International Conference on Smart Computing Workshops, Hong Kong, China, 2014: 57–64. doi: [10.1109/SMARTCOMP-W.2014.7046668](https://doi.org/10.1109/SMARTCOMP-W.2014.7046668).
- [12] KÖHLER E, LANGKAU K, and SKUTELLA M. Time-expanded graphs for flow-dependent transit times[C]. Proceedings of the 10th Annual European Symposium on Algorithms, Rome, Italy, 2002: 599–611. doi: [10.1007/3-540-45749-6_53](https://doi.org/10.1007/3-540-45749-6_53).
- [13] GEORGE B and SHEKHAR S. Time-aggregated graphs for modeling spatio-temporal networks[C]. Proceedings of International Conference on Conceptual Modeling, Tucson, USA, 2006: 85–99. doi: [10.1007/11908883_12](https://doi.org/10.1007/11908883_12).
- [14] GEORGE B, KIM S, and SHEKHAR S. Spatio-temporal network databases and routing algorithms: A summary of results[C]. Proceedings of the 10th International Symposium on Spatial and Temporal Databases, Boston, USA, 2007: 460–477. doi: [10.1007/978-3-540-73540-3_26](https://doi.org/10.1007/978-3-540-73540-3_26).
- [15] LI Hongyan, ZHANG Tao, ZHANG Yangkun, *et al.* A maximum flow algorithm based on storage time aggregated graph for delay-tolerant networks[J]. *Ad Hoc Networks*, 2017, 59: 63–70. doi: [10.1016/j.adhoc.2017.01.006](https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2017.01.006).
- [16] ZHANG Tao, LI Hongyan, ZHANG Shun, *et al.* STAG-based QoS support routing strategy for multiple missions over the satellite networks[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2019, 67(10): 6912–6924. doi: [10.1109/TCOMM.2019.2929757](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2019.2929757).
- [17] LEI Liu and LI Hongyan. A routing policy based on time-varying graph for predictable delay tolerant networks[C]. Proceedings of 2015 International Conference on Wireless Communications & Signal Processing, Nanjing, China, 2015: 1–6. doi: [10.1109/WCSP.2015.7341072](https://doi.org/10.1109/WCSP.2015.7341072).
- 李 博：男，副教授，研究方向为空天地网络、飞行自组织网络、物理层网络编码。
- 王改芳：女，硕士生，研究方向为时变图理论、无人机自组网。
- 杨洪娟：女，副教授，研究方向为无线通信、水声通信、无人机网络。
- 茹雪菲：女，博士生，研究方向为无线携能通信。
- 张敬淳：男，博士生，研究方向为海洋通信感知一体化。
- 王 钢：男，教授，研究方向为物理层网络编码、通信网理论与技术、数据通信。

责任编辑：陈 倩