



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/eng



Research
Flying Ad Hoc Networks—Article

一种基于轨迹动力学的任务导向型飞行自组网赛博物理路由协议

胡蝶^{a,b}, 杨少石^{a,c,*}, 龚旻^b, 冯志勇^{a,c}, 祝学军^b

^a School of Information and Communication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

^b China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China

^c Key Laboratory of Universal Wireless Communications, Ministry of Education, Beijing 100876, China

ARTICLE INFO

Article history:

Received 23 February 2021

Revised 8 August 2021

Accepted 11 October 2021

Available online 25 February 2022

关键词

赛博物理系统

飞行自组网

路由协议

轨迹动力学

无人机

摘要

作为一种特殊的移动自组网(MANET),飞行自组网(FANET)具有在民用无线通信(如5G和6G)和国防工业中使能各种新兴应用的潜力。路由协议在FANET中起着关键作用。但是,在为FANET设计路由协议时,通常假设空中节点随机移动。这对于以任务为导向的FANET(MO-FANET)显然是不合适的。在该网络中,空中节点为了执行某些任务,通常保持良好的编队构型,沿着大致确定的飞行路径从给定的出发点向确定的目标点移动。本文提出了一种基于跨学科集成的新型赛博物理路由协议,基于MO-FANET的特定移动模式,充分利用由任务决定的轨迹动力学模型,构建节点重新加入网络和互相分离的时间序列,并将其与每个节点的邻接矩阵一起作为先验信息。通过大量符合真实情况的NS-3仿真试验,结果表明,与FANET中使用的现有代表性路由协议相比,本文提出的协议在保证更低的开销和更低的平均端到端延迟的同时,保持了相对适度和稳定的网络时延抖动,并实现了更高的数据包传输率(PDR)。

©2022 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. 引言

现代无人机(UAV)正在定义一种执行复杂任务的新范式,如紧急援助[1]、地质勘探[2]和边境监视[3]。与配备先进设施的单架无人机相比,多架无人机组成的编队或更大规模的无人机集群,在基于节点间联网和协作的飞行自组网(FANET)技术赋能下,能够以更好的效果、更快的收敛速度和更低的成本执行具有挑战性的任务[4–5]。FANET不需要固定的地面基础设施,因此在各种应用中特别具有吸引力。

路由协议在FANET中起着关键作用。一般来说,现

有的针对移动自组网(MANET)或车辆自组网(VANET)提出的路由协议[6]在具有高移动性或高度动态拓扑结构的FANET中表现不佳,尽管这些网络之间存在许多明显的相似之处[7]。为了使FANET更加强大,研究人员已经投入了大量的精力来探究路由协议。例如,参考文献[8–9]表明,针对优化链路状态路由(OLSR)协议的多点中继(MPR)选择方法进行改进,可以降低信令开销和路由重新计算成本[10]。当使用临时按需距离向量(AODV)[12]路由协议时,通过调用基于贪婪式地理信息辅助转发[11]的经典数据包传输技术,可改善网络的数据包传输率(PDR)和端到端延迟。尽管取得了这些改

* Corresponding author.

E-mail address: shaoshi.yang@bupt.edu.cn (S. Yang).

进, 但进行路由发现仍然需要巨大的开销, 这在大规模网络中是不可行的。因此, 高性能、低成本路由协议研究对于 FANET 至关重要。

自组网中路由协议的性能因移动模型而异[13], 将移动轨迹和协议结合起来进行网络设计是一个值得探究的重要议题[14]。这是研究 MANET 时要考虑的主要特征。在大多数移动模型中, 包括室内移动模型, 如随机游走[15]、随机路点和随机方向, 以及室外移动模型, 如高斯-马尔可夫[16]和随机游走的概率型版本, 节点的位置或速度被假定为随机变量。

然而, 对于由无人机和直升机等高价值空中节点组成的任务导向型飞行自组网 (MO-FANET), 采用随机移动模型不符合实际情况。事实上, 在 MO-FANET 中进行拓扑控制是非常必要的, 因为这会带来各种益处。更具体而言, 可以部署一个机载轨迹规划 (ATP) 系统, 通过基于行为、虚拟结构或领导-跟随的方法[17], 或通过动态使用自适应协议[18]来控制编队中每个空中节点的移动模式, 从而确保任务按计划完成, 并避免潜在的巨大经济损失。

ATP 是 MO-FANET 的基本功能模块之一, 因为它有利于提高操作效率和安全性, 并可以在任务中实现有效的节点间组网和协作。在飞行过程中, ATP 系统可以调整启发式算法 (如模拟退火) [19], 以生成满足速度和加速度平滑性约束的轨迹。然后, 该结果可以作为移动性模型应用于在更现实的场景中模拟路由协议。此外, 编队控制可以维持所有无人机位置的几何关系, 例如, 使用本地邻居信息[20], 这样就能在足够大的时间尺度上提供稳定的拓扑, 以执行路由计算。因此, 通过适当利用编队控制, 可以简化 MO-FANET 的路由协议设计。

更重要的是, 作为一个赛博物理系统, MO-FANET 不仅可以在通信网络中传递信息流, 而且还能够在物理空间中执行某些机动动作。因此, 在 MO-FANET 中简单地使用传统自组网的路由协议并不是最佳策略。

在上述背景下, 本文做出了以下创新性贡献:

本文创新性地提出了一种基于轨迹动力学的赛博物理路由协议 (CPR-TD), 将轨迹动力学模型作为先验信息, 以提高 MO-FANET 路由的整体性能。据我们所知, 除了从无线通信角度考虑之外, 之前的文献从未考虑过直接利用多个无人机的原生轨迹动力学作为输入来优化设计路由协议。本文的意义在于, 它有可能开辟一个新的跨学科研究方向, 充分利用来自每个协议层的信息来支持高效路由协议的设计。

本文建立了一个节点移动性的数学模型, 用于刻画多个无人机以不同的编队从一个地方协同飞行到另一个地方

以执行某项任务的场景。这是一个在民用和国防工业中都有广泛应用的重要场景。更具体地说, 本文将 MO-FANET 的飞行过程建模为五个阶段, 每个阶段由多个坐标系和不同的复杂机动动作来描述。此外, 本文还考虑了物理空间轨迹动力学和无线通信介质接入机制的时间尺度差异, 保证了 MO-FANET 的拓扑结构对于路由协议的运行具有足够的可预测性和稳定性。

与其他最先进的协议相比, 本文提出的 CPR-TD 协议不仅实现了最优的 PDR 性能, 而且在 MO-FANET 的场景下实现了最高的开销效率 (OE)。此外, 在大多数的情况下, 它表现出比基线协议更低的平均端到端延迟, 以及相对较低且稳定的网络抖动。本文提出的 CPR-TD 协议可以借助单个无人机的应用层 ATP 系统来实现, 因此, 它比 FANET 中使用的传统路由协议更适合 MO-FANET。

本文的其余部分组织如下。在第 2 节中, 我们通过考虑由多个坐标系和复杂机动动作描述的轨迹动力学, 对 MO-FANET 的飞行过程进行建模。在第 3 节中, 我们详细描述了我们的 CPR-TD 协议。基于 NS-3 的模拟, 我们假设真实的网络配置, 并进行了详细的讨论, 这部分在第 4 节中介绍。最后, 我们在第 5 节给出结论。

2. MO-FANET 飞行过程的建模

2.1. 应用场景

在紧急情况或灾害救援情况下, 地面应急策略通常难以有效控制局势, 基于 FANET 的策略成为执行任务不可或缺的手段。例如, 在最近的澳大利亚森林大火、亚马孙雨林大火和加利福尼亚州野火等几件具有全球影响力的大型事件中, 灭火无人机发挥了重要作用, 但它们通常以个体方式工作。

本文考虑了一个具有挑战性的场景, 其中多个无人机以不同的编队从一个地方协同飞行到另一个地方, 以执行某项任务。如图 1 所示, 我们的场景中有四个飞行编队。为了保证飞行安全和任务执行效率, 各个 ATP 系统通过分布式优化算法协同寻找每架无人机的最佳轨迹, 并保持每个无人机集群的编队队形。为此, 无人机需要实时捕获其他无人机的运动信息, 然后进行轨迹计算。在飞行过程中, 编队中的无人机可能会机动飞行, 例如, 飞行来绕过障碍物或危险情况。因此, MO-FANET 的动态运动可分为四种状态: ①飞行编队聚集; ②机动飞行; ③会合; ④返回飞行编队聚集。

值得注意的是, 对于飞行编队, 在一定时间段内可以根据 ATP 的结果在一定程度上预测运动状态, 这与其他文

献中经常使用的随机移动模型有很大不同。

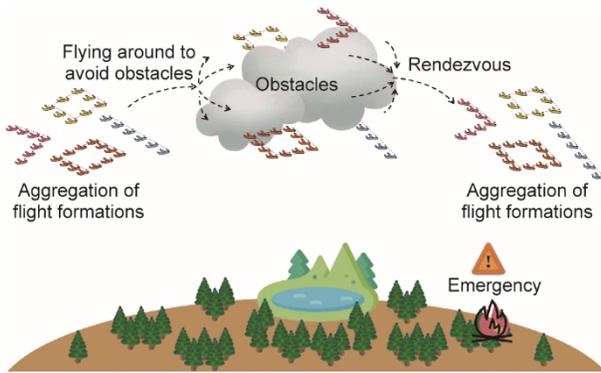


图1. 飞行编队在MO-FANET中的应用实例。

2.2. 轨迹生成

为了更清楚地描述MO-FANET的飞行过程，本文采用了捷联惯性导航系统（SINS）的轨迹生成方法。该方法可以尽可能真实地再现无人机轨迹，并已广泛应用于飞控领域的捷联惯性导航算法和集中式导航算法的分析与实验中[21]。本文重点在于获取无人机的轨迹参数，因此，在路由协议设计中不考虑比力和惯性张量。图2中的流程图总结了轨迹参数采集的方法。为了便于理解，下文会首先介绍相关坐标系定义。然后，本文将进一步描述典型的机动动作，最后介绍移动模型。

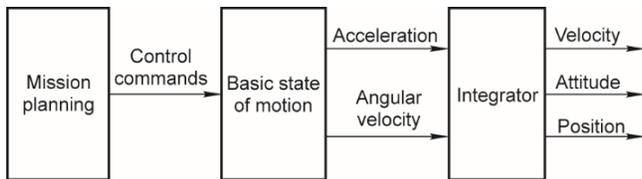


图2. 轨迹参数获取方法。

2.2.1. 坐标系的定义

本文涉及的相关坐标系如图3所示，下面进行简要介绍。

(1) 机体坐标系（b-frame）： y 轴指向无人机机头向前的方向，记作 y_b ； x 轴指向 y 轴右侧，且垂直于 y 轴，记为 x_b ； z 通过无人机底部向上指向，垂直于 xy 平面，并满足右手定则。

(2) 大地坐标系（e-frame）：大地坐标系使用一个三元组（纬度、经度和高度）来表示物体的位置；例如，在图3中，e-frame将 β 定义为纬度， λ 定义为经度， h 定义为高度， R_e 为地球的赤道半径， L 为从无人机到地球表面交点的距离。

(3) 导航坐标框（n-frame）：n-frame将 x_n 、 y_n 和 z_n 分别定义为地球方向的东、北、上三个方向。

(4) 轨迹坐标系（t-frame）：t-frame将运动轨迹的水平向右定义为 x_t ，与轨迹相切的运动方向定义为 y_t 。同样， z_t 垂直于 xy 平面，并满足右手定则。

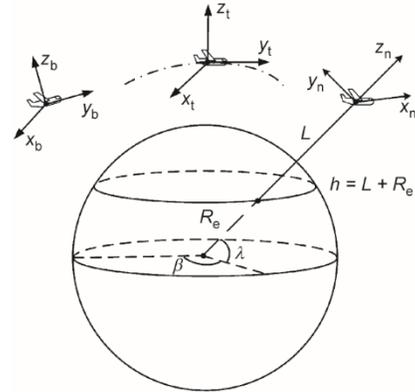


图3. 坐标系。

反映飞行状态的无人机姿态角如图4所示。其中， ψ 表示航向角，即地理北极与无人机机体纵轴水平投影之间的夹角； θ 表示俯仰角，即机身纵轴的水平投影与该纵轴本身之间的夹角； γ 表示滚转角，即垂直轴和垂直平面之间的角度。

本文假设 ψ 、 θ 和 γ 是时间 t 的线性函数，该假设符合实际情况。

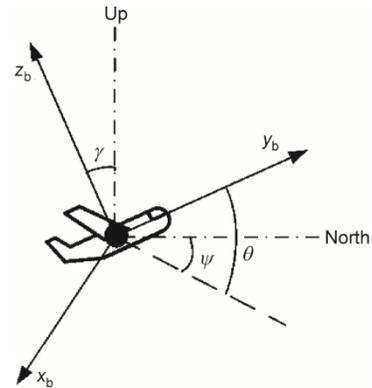


图4. 无人机的姿态角。

通过旋转和平移，我们可以实现不同坐标系之间的转换[22]。具体来说，t-frame与n-frame之间的转换关系可以表示为 $[x_n, y_n, z_n]^T = C_t^n [x_t, y_t, z_t]^T$ ，其中， T 表示转置运算符； C_t^n 是从t-frame到n-frame的旋转矩阵，其定义如下所示：

$$C_t^n = \begin{bmatrix} \cos \psi & \cos \theta \sin \psi & -\sin \theta \sin \psi \\ -\sin \psi & \cos \theta \cos \psi & -\sin \theta \cos \psi \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (1)$$

另外，考虑到地球偏率的影响，e-frame中位置的变

化可以通过 t-frame 中运动状态的变化来得到，微分方程如下：

$$\begin{cases} \left[\frac{\partial \theta}{\partial t}, \frac{\partial \gamma}{\partial t}, \frac{\partial \psi}{\partial t} \right] = \boldsymbol{\omega}_b \\ \frac{\partial \mathbf{v}_n}{\partial t} = \mathbf{a}_n \\ \frac{\partial \beta}{\partial t} = \mathbf{v}_{y,n} / (R_M + L) \\ \frac{\partial \lambda}{\partial t} = \mathbf{v}_{x,n} \sec \beta / (R_N + L) \\ \frac{\partial h}{\partial t} = \mathbf{v}_{z,n} \end{cases} \quad (2)$$

式中， $\boldsymbol{\omega}_b$ 是 b-frame 中的姿态角速度矢量； \mathbf{v}_n 是 n-frame 中的速度矢量； \mathbf{a}_n 是 n-frame 中的加速度矢量； $R_N = R_e(1 - 2e + 3e \sin 2\beta)$ 是质点垂直方向的曲率半径； $R_M = R_e(1 + e \sin 2\beta)$ 是子午线中的曲率半径；常数 e 表示地球的偏度。在方程组 (2) 中，通过将加速度 \mathbf{a}_t 从 t-frame 坐标更改为 n-frame 坐标我们可以得到 \mathbf{a}_n ，即：

$$\mathbf{a}_n = \mathbf{C}_t^n \mathbf{a}_t \quad (3)$$

式中， \mathbf{a}_t 是 t-frame 中的加速度矢量。

然后，通过使用四阶龙格-库塔方法求解上述微分方程[23]，我们可以获得无人机的轨迹、速度和姿态。任何其他可行的积分方法也可以获得相同的结果。

2.2.2. 典型机动动作描述

无人机运动状态的变化主要是由 b-frame 中的姿态角速度和 t-frame 中的加速度引起的。本文归纳总结了无人机执行任务时几种典型的机动动作，几种动作的数学模型如下。

(1) 均匀直线运动。在这种状态下，姿态角速度和加速度都不会改变。因此，我们可以得到：

$$\begin{cases} \boldsymbol{\omega}_b = [0, 0, 0] \\ \mathbf{a}_t = [0, 0, 0] \end{cases} \quad (4)$$

(2) 均匀加减速。在这种状态下，只有加速度发生变化，无人机继续以加速度 a 加速或减速，随向前运动。因此，我们可以得到：

$$\begin{cases} \boldsymbol{\omega}_b = [0, 0, 0] \\ \mathbf{a}_t = [0, a, 0] \end{cases} \quad (5)$$

(3) 协作转弯。无人机根据实际情况通过倾斜的方式转弯，因此，转弯的过程分为三个阶段：倾斜、转弯和恢复正常飞行。在第一阶段，无人机的滚转角从零变为 γ ，角速度 $\frac{\partial \gamma}{\partial t}$ 恒定，以便后续转弯。因此，我们可以得到：

$$\begin{cases} \boldsymbol{\omega}_b = [0, \frac{\partial \gamma}{\partial t}, 0] \\ \mathbf{a}_t = [0, 0, 0] \end{cases} \quad (6)$$

在第二阶段，无人机保持等于 γ 的滚转角，并以恒定的角速度 $\frac{\partial \psi}{\partial t}$ 开始转弯；向心力由倾斜产生的升力提供。因此，我们可以得到：

$$\begin{cases} \boldsymbol{\omega}_b = [0, 0, \frac{\partial \psi}{\partial t}] \\ \mathbf{a}_t = [0, 0, g \tan \gamma] \end{cases} \quad (7)$$

式中， g 是重力加速度。

在第三阶段，无人机在转弯后趋于平稳，并以恒定的角速度 $-\frac{\partial \gamma}{\partial t}$ 改变滚转角。因此，我们可以得到：

$$\begin{cases} \boldsymbol{\omega}_b = [0, -\frac{\partial \gamma}{\partial t}, 0] \\ \mathbf{a}_t = [0, 0, 0] \end{cases} \quad (8)$$

(4) 爬升或下降。这种动作也可以分为三个阶段：在第一阶段，无人机在垂直平面上做半径为 r 的圆周运动，并以恒定的角速度 $\frac{\partial \theta}{\partial t}$ 将俯仰角从零变为 θ ，以准备爬升或下降。因此，我们可以得到：

$$\begin{cases} \boldsymbol{\omega}_b = [\frac{\partial \theta}{\partial t}, 0, 0] \\ \mathbf{a}_t = [0, 0, (\frac{\partial \theta}{\partial t})^2 r] \end{cases} \quad (9)$$

在第二阶段，无人机保持俯仰角并进行均匀的直线运动以爬升或下降。因此：

$$\begin{cases} \boldsymbol{\omega}_b = [0, 0, 0] \\ \mathbf{a}_t = [0, 0, 0] \end{cases} \quad (10)$$

第三阶段是第一阶段的逆过程，无人机在爬升或下降后趋于平稳。因此：

$$\begin{cases} \boldsymbol{\omega}_b = [-\frac{\partial \theta}{\partial t}, 0, 0] \\ \mathbf{a}_t = [0, 0, -(\frac{\partial \theta}{\partial t})^2 r] \end{cases} \quad (11)$$

2.2.3. 移动模型

为了更贴合实际情况，本文考虑了一种无人机集群执行任务时的常见场景，即无人机集群在飞行过程中需要协作避开障碍物。如图 5 所示，假设所有无人机最初分为四组，各组由四种不同的颜色表示。为简单起见，假设每组无人机相对静止，并在整个飞行过程中使用机载编队控制系统保持菱形编队。

无人机集群的编队队形或机动动作可以根据实际情况改变。例如，当检测到障碍物时，无人机群首先进行分离，然后重新组合以避开障碍物。图 6 显示了所有无人机

集群的飞行轨迹，其中，每种颜色的每个轨迹对应图5中相同颜色的无人机集群。

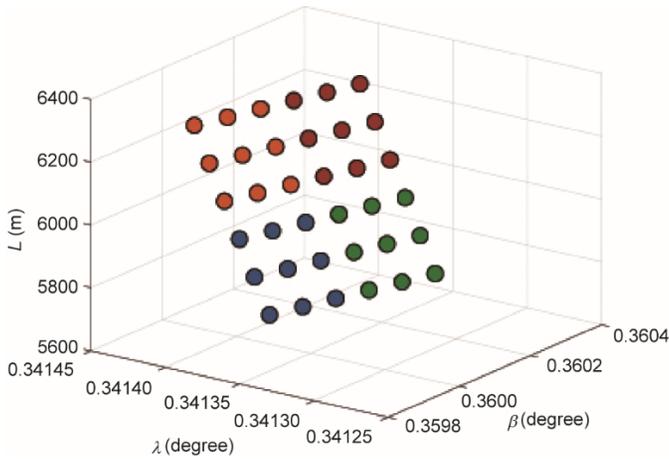


图5. 飞行编队。

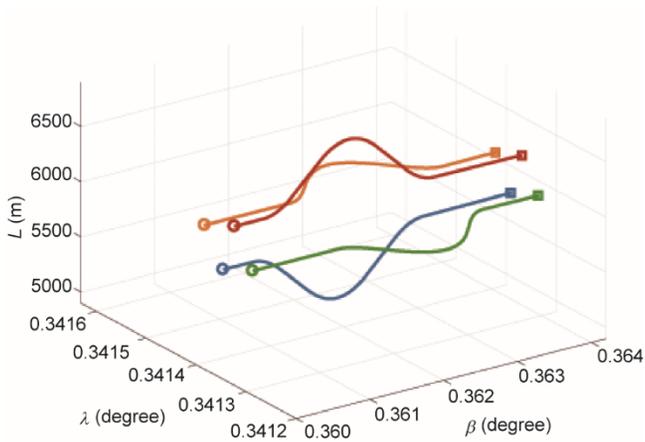


图6. 四个无人机集群的轨迹。

3. 基于轨迹动力学的MO-FANET赛博物理路由协议

本节将介绍面向MO-FANET设计的CPR-TD协议细节。该协议是跨学科研究的结果，通过调用ATP系统的输出来优化路由选择的设计。

3.1. 数据包头

受到动态源路由协议（DSR）协议中控制包的启发，此协议中的全部路由信息存储在数据包头部中，该头部构成了数据包的一部分，且包括控制数据包。数据包头部的作用是通知其他节点路由的跳数、对每个数据包进行唯一索引、识别数据包类型并指示数据包传递路线，如图7所示。我们假设相同的ATP系统单独部署在MO-FANET的所有节点上，而分布式节点之间可以实现信令和动作同

步。同时我们还假设MO-FANET在每个会话中都处于稳定状态，并且它可以根据所涉及的每个空中节点的周期性状态广播在另一个会话中切换到不同的状态。然后，在每个会话中，源节点根据ATP系统的输出和可用的通信资源单独计算路由，并将跳数存储在“Hop”字段中，将路由上第 m 个节点的地址存储在“Address[m]”字段中。此外，每当给定源节点生成数据包时，都会为数据包分配一个8位序列号，该序列号与“Address[0]”字段（即源节点的地址）和“Address[n]”字段（即目标节点的地址）一起构成了数据包和源-目标节点之间的一一对应关系。该序列号存储在“Seq”字段中。此外，数据包标头中的“Type”字段存储数据包类型，包括数据包、路由应答命令（RREP）数据包和路由错误（RRER）数据包。其中，RREP和RRER数据包都是控制数据包。最后，我们为尚未定义的功能保留了8位。

Hop (8 bit)	Seq (8 bit)	Type (8 bit)	Reserved (8 bit)
Address [0] (32 bit)			
Address [1] (32 bit)			
...			
Address [n] (32 bit)			

图7. 数据包头部格式。

3.2. 路由建立

与现有方案不同，我们的协议在建立源节点到目标节点的路由时没有路由请求（RREQ）过程，因此大大减少了开销。实际上，我们协议中的源节点利用来自特定应用的轨迹信息来建立路由。从通信的角度来看，任务和轨迹规划的信息可以在MO-FANET的无人机之间进行共享。运行在网络层的路由协议可以通过应用层从ATP系统获取每个节点的位置信息，或者从物理层信号处理模块来获取位置信息，如全球定位系统（GPS）模块或网络内分布式协作定位模块，以支持路由计算。从物理空间的角度来看，我们的协议可以提供更可靠的数据传递，这是ATP系统控制无人机轨迹所需的。具体来说，我们利用所有节点之间重新连接和分离时间的通知来获得重新连接和分离时间列表，并利用编队配置的输出来获得邻接矩阵。图8中给出了我们数据包传输方案中路由建立过程的流程图。

具体地，当应用程序有消息传递需求时，源节点按如下方式处理数据包：

(1) 根据重新加入和分离的时间列表、源节点，确定是否存在一条使消息在当前时刻能够到达目标节点的

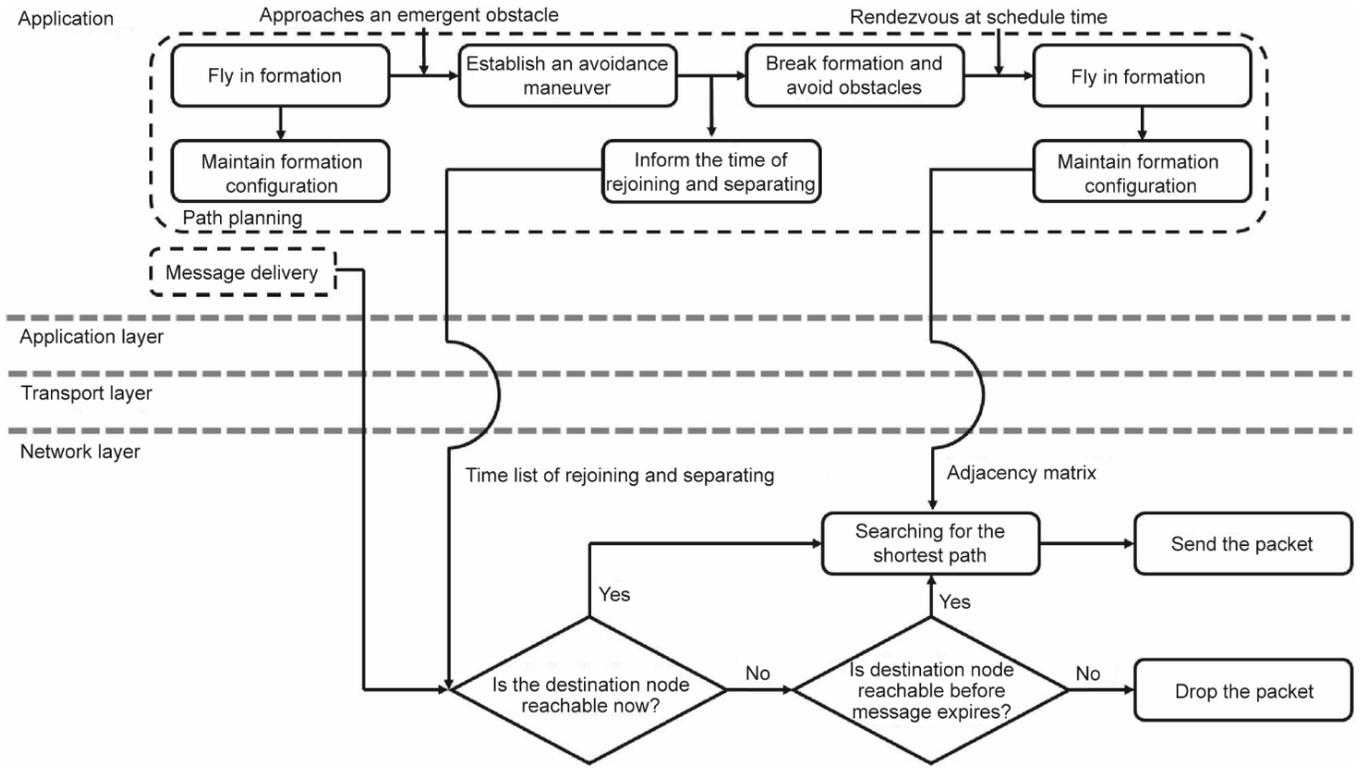


图8. 数据包传输方案中路由建立过程的流程图。

路由。

(2) 如果目标节点可达，源节点利用 Dijkstra 算法基于邻接矩阵计算最短路径，并将结果存储在数据包头部。然后，数据包传递过程可以立即开始。

(3) 否则，源节点会在消息过期之前判断是否可以将消息传递给目标节点。

(4) 如果在消息过期前到达目标节点，源节点利用 Dijkstra 算法以邻接矩阵为输入计算最短路径，并将结果存储在数据包头部，然后等待传输时间。

(5) 否则，源节点会主动丢弃数据包，并且不会尝试传输。

3.3. 数据传输

源节点生成路由，中间节点仅进行数据转发和反馈。具体来说，当任何节点收到一个数据包时，它会判断目标节点是否是它自己。如果该接收节点确实是目标节点，则向源节点反馈一个 RREP 包，以确认成功传递数据包。否则，此接收节点将数据包转发到相应的下一跳节点，该节点由数据包头中存储的路由信息确定。在假设传输无误的情况下，我们用图 9 中的示例说明发送数据包和 RREP 数据包的过程，其中每个圆圈代表一个节点。具体而言，源节点 S 发送一个携带路由信息的数据包。收到来自源节点 S 的数据包后，位于计算出路由上的中间节点 M4 将数据

包转发给路由上的下一个中间节点 M5。最后，当目标节点 D 接收到数据包时，根据数据包头中存储的反向路由信息，通过节点中继向源节点 S 反馈一个 RREP 数据包。

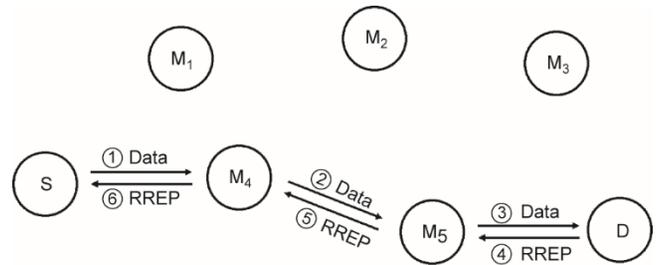


图9. 假设无差错传输下的数据包转发机制。S: 来源; M₁~M₅: 中间节点; D: 目标节点。

3.4. 路由恢复

为了保证数据在网络上的高度可靠传输，源节点支持两种情况下的重传机制：(a) 下一跳节点故障和 (b) 其他跳节点故障，如图 10 所示。

在图 10 (a) 中，由于从源节点到下一跳节点的传输失败，源节点在预先设置的当前环境时间段内将不会收到任何反馈。因此，源节点必须重新计算绕过传输失败的下一跳节点的路由，然后再次发送数据包。

在图 10 (b) 中，虽然紧邻源节点的下一跳节点成功接收源节点转发的数据包，但其他中间节点（目标节点除

外)可能出现传输失败。因此,源节点将永远不会收到目标节点发回的RREP数据包。相反,目标节点将向源节点发送RRER数据包,从而确认中间节点之间的某个链接出现传输故障。然后,源节点重新计算绕过出现传输故障的特定中间节点的路由。然而,如果传输故障发生在最后一跳到目标节点的传输过程中,目标节点将无法到达。在这种情况下,不会触发重传机制。

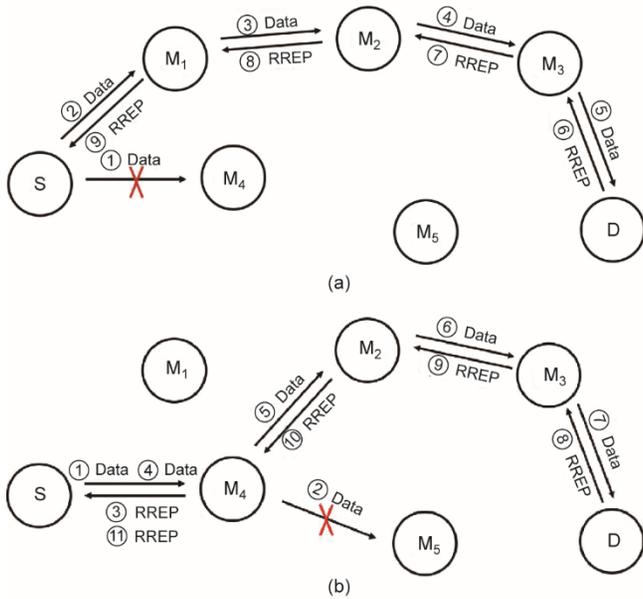


图10. 数据传输机制。(a) 下一跳节点故障情况;(b) 其他跳节点故障方案。

4. 仿真结果和讨论

本节将介绍本研究所提出的CPR-TD协议在MO-FANET背景下的性能评估结果。此协议是在NS-3网络模拟器上实现的。表1总结了仿真实验中使用的参数。

4.1. 轨迹配置

为了评估所提出的协议在模拟网络中的性能,我们将MO-FANET的运行轨迹分为五个阶段,如表2所示。每个阶段代表一种不同的运动状态,如图5所示。

- 第一阶段:所有无人机都以紧密的队形飞行,并以相对稳定的拓扑结构进行匀速直线运动。

- 第二阶段:为了避开新出现的障碍物,单一编队通过机动操作转变为多个子编队。换句话说,网络从集结态转变为分散态。具体而言,每个无人机组首先在其个体的空中控制系统内建立了避障机动策略,然后各个无人机分别开始上升、下降、左转和右转。在这个过程中,每个组内的无人机之间仍然可以保持通信,但来自不同组的无人

表1 参数设置

Parameter	Value
Network simulator	ns-3 (release ns-3.30)
Number of UAVs	36, 100, and 196
Speed of UAVs	$250 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
Radio technology	802.11b
Frequency band	2.4 GHz
Transport protocol	UDP
Data rate	11 Mbps
PHY protocol	DSSS
MAC protocol	CSMA/CA
Packet size	1000 bytes
Packet-generating interval	0.1 s
Traffic model	CBR
Delay model	Constant speed propagation
Loss model	Friis propagation
Transmission power	16.0206 dbm
Energy detection threshold	-96 dbm
Mobility model	Adaptive flight formation
Simulation time	100 s

UDP: user datagram protocol; PHY: physical layer; DSSS: direct sequence spread spectrum; MAC: medium access control; CSMA/CA: carrier sense multiple access/collision avoidance; CBR: constant bit rate.

表2 轨迹配置

Phase	Time periods	Flight scenarios
1	[0, 30.1)	Fly in close formation
2	[30.1, 37.7)	Transition to diversion by maneuver
3	[37.7, 60.1)	Fly in diversion
4	[60.1, 62.8)	Transition to rendezvous in batches
5	[62.8, 100]	Fly in rendezvous and adjust topology

机可能逐渐失去连接。

- 第三阶段:每个子编队都超出了其他子编队的通信范围,而每个子编队无人机之间的编队保持良好。因此,数据包只能在每个子编队内传递。

- 第四阶段:子编队开始在预定的时间会合,并逐渐互相靠近。同时,子编队之间的通信正在逐步重建。

- 第五阶段:子编队重新通信,然后它们再次以紧密的队形飞行。

4.2. 性能指标

为了进行性能评估,本文考虑了两种实际且典型的应用场景。在第一种情况下,所有无人机都处于良好状态并按照预定的轨迹飞行。在第二种情况下,假设每个子编队中有一架无人机运行不正常。我们定义了几个评估路由协议的性能指标,如下所示。

(1) PDR: 这个指标定义为接收的数据包总数 N_{received}

与从源发送到目标的数据包总数 N_{sent} 之比, 即

$$\text{PDR} = \frac{N_{\text{received}}}{N_{\text{sent}}} \quad (12)$$

这反映了路由协议的传输可靠性。

(2) OE: 这个指标被定义为接收的所有数据包的大小 (即有效负载 N_{payload}) 与发送的所有控制数据包的大小 (即开销 N_{overhead}) 之比, 即

$$\text{OE} = \frac{N_{\text{payload}}}{N_{\text{overhead}}} = \frac{\sum \text{DP}_{\text{size},i}}{\sum \text{CP}_{\text{size},j}} \quad (13)$$

式中, $\text{DP}_{\text{size},i}$ 表示第 i 个数据包的大小; $\text{CP}_{\text{size},j}$ 表示第 j 个控制数据包的大小; OE 用于描述路由协议的开销大小。以更少的控制包为代价接收更多的数据包, 表明路由协议的效率更高。

(3) 平均端到端延迟: 这个指标被定义为通过网络将数据包从源节点传递到目标节点的平均时间, 即

$$\bar{T}_{\text{E2E}} = \frac{\sum (T_{\text{received}} - T_{\text{sent}})}{N_{\text{received}}} \quad (14)$$

式中, T_{received} 和 T_{sent} 分别表示在目标接收数据包和从源发送数据包的时间; \bar{T}_{E2E} 是确定网络是否满足传输延迟要求的关键因素。

(4) 网络抖动: 此指标被定义为端到端延迟的标准差 $T_{\text{E2E}} = T_{\text{received}} - T_{\text{sent}}$, 该指标表征了网络的稳定性, 即:

$$T_{\text{jitter}} = \frac{\sqrt{\sum (T_{\text{E2E},i} - \bar{T}_{\text{E2E}})^2}}{N_{\text{received}} - 1} \quad (15)$$

4.3. 结果和讨论

基于表 1 和表 2 中指定参数, 本文使用 ns-3 网络模拟器将所提出的 CPR-TD 协议与五种最先进的路由协议进行了综合比较, 五种路由协议分别是 AODV、DSDV、DSR、OLSR 和 GPSR。

AODV 是一种基于拓扑的按需路由协议。AODV 中的每个节点通过控制数据包 Hello、RREQ、RRER 和 RREP 来维护路由表[24]。路由表包含网络中每个已知目标节点的一条路由条目, 并且只有在需要路由时才会发现从源节点到目标节点的路由。DSDV 是一种源自 Bellman-Ford 算法的主动路由协议。每个 DSDV 节点定期将其路由表发送给邻居节点, 重新计算最短距离并更新表格[25]。在 DSR 中, RREP 和 RREQ 数据包也用于路由发现, 并且在传输开始时将路由存储在数据包头部[26]。对于特定节点, 通过将其声明为每个邻居节点的 MPR 选择器, OLSR 减小了控制数据包的大小[24]。在 GPSR 中, 根据其邻居和目标节点的地理位置, 使用贪婪算法为每个节点分配全局路由[27]。

在不同的网络规模 (即节点数分别 $4 \times 9 = 36$ 、 $4 \times 25 = 100$ 和 $4 \times 49 = 196$, 其中, 前一个“4”表示系统中的子编队数量)、不同的运动状态和不同的节点故障概率下, 我们分别评估了提出的四个性能指标, 即 PDR、OE、平均端到端延迟和网络抖动。在每个路由协议下, 我们通过进行 100 次蒙特卡洛模拟实验来获取结果; 在每次 100 s 的蒙特卡洛实验中, 我们从随机选择的源节点发送总共 990 个数据包到随机选择的目标节点。值得注意的是, 由于 ns-3 软件的固有机制, 仿真过程在 0 s 和 100 s 的时间点处不工作, 数据包生成间隔为 0.1 s。因此, 第一个数据包被设定在 1 s 的时间点发送, 而最后一个数据包的传输在 99.9 s 的时间点结束。

图 11 比较了不同网络规模下不同路由协议的 PDR。同时本文考虑两种节点故障概率。条件 1 表示所有节点都正常工作的情况, 条件 2 假设每个组中的中心节点发生故障。可以看出, 所提出的 CPR-TD 协议与其他基准协议相比, 获得了最高的 PDR, 即使在条件 2 的故障下也是如此。这是因为所提出的 CPR-TD 通过利用轨迹动力学来进行路由预测, 因此它不需要路由发现和维持过程, 从而由路由发现操作引起的介质访问冲突的概率较低。

在条件 1 和条件 2 下, DSDV 协议在所有考虑的协议中表现出最差的 PDR。这是因为 DSDV 是一种主动路由协议, 它要求网络中的每个节点定期发送控制数据包, 因此无论是否存在数据传输请求, 发生介质访问冲突的可能性最高。相比之下, 所有其他协议在调用网络中的节点来维护路由表时都相对谨慎, 因此产生的开销更少。此外, 随着网络规模的增长, AODV 协议的 PDR 性能下降幅度最大, 而 DSR、OLSR 和 GPSR 协议的 PDR 性能较相似。对于所有协议, 节点故障的影响随着网络规模的增加而减小。这是一个显然的结果, 因为当网络规模变大时, 节点故障的密度会变小。

图 12 显示了不同路由协议在飞行过程的不同阶段和不同网络规模下的 PDR 比较。在不损失普遍性的情况下, 我们首先考虑所有节点运行良好的场景。与从图 12 (a) 和 (b) 获得的观察结果不同, 在图 12 (c) 中可以看出, 当网络规模足够大时, 所提出的 CPR-TD 在表 2 中指定的五个阶段中都实现了最佳性能。当网络规模较小时, 这种优势会略有下降, 但如图 12 (a) 和 (b) 所示, 本研究提出的 CPR-TD 协议在第 1、2 阶段和第 5 阶段的表现仍然优于其他基准协议, 只有 AODV 协议的 PDR 略高于第 3 阶段和第 4 阶段的 CPR-TD。此外, 可以看出, 与第 1 阶段和第 5 阶段相比, 第 2、3 和 4 阶段所有协议的 PDR 性能均有明显下降。这是因为网络在第 1 阶段和第 5 阶段的连

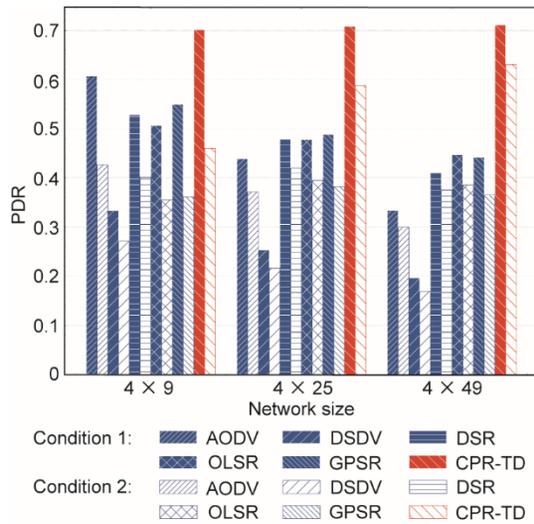


图 11. 不同网络规模和不同节点故障条件下不同路由协议的 PDR 比较。

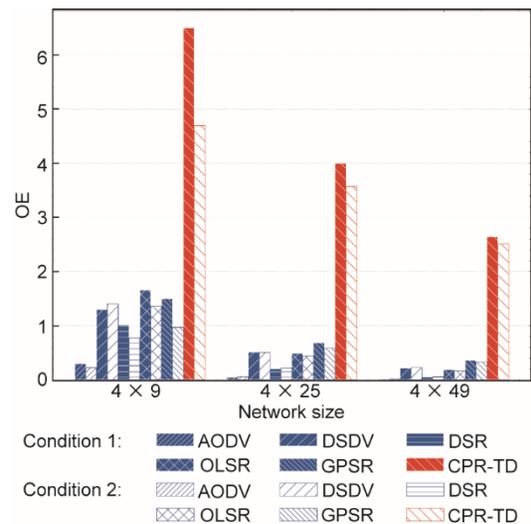


图 13. 不同网络规模和不同节点故障条件下不同路由协议的 OE 比较。

通性较高，而在阶段 2 和阶段 3，节点分别从单个编队过渡到多个子编队，并且分别处于分离的多个子编队的状态。因此，阶段 2 和 3 的网络连接性较弱。值得注意的是，AODV 在第 4 阶段表现良好，其中节点正处于从分离到重新加入单个编队的过渡过程中，这是因为 AODV 具有高效的路由发现机制来寻找发送消息的机会。然而，它的优势随着网络规模的增加而下降。

图 13 显示了不同路由协议的 OE 与网络规模性能的对比。同样，我们考虑了两种节点故障的概率。很明显，在条件 1 和条件 2 下，我们的 CPR-TD 协议具有最高的开销效率，这意味着它以最少的开销传递大量的数据。相比之下，所有基准协议都表现出明显较低的开销效率。这是因为这些协议通常调用路由发现机制，这假定节点的随机运动在普通的 MANET 中无法预测。然而，在我们考虑的 MO-FANET 中，无人机必须受到控制。因此，可以通过计

算轨迹动态来获取节点的运动特性，并将其作为特定类型的先验信息用于定制的路由协议。此外，在条件 2 下的节点故障中，我们的 CPR-TD 协议的开销略有增加，这与我们预期在此条件下需要为路由恢复付出一些开销是一致的。同时，值得注意的是，在基准协议中，DSDV、OLSR 和 GPSR 的开销比 AODV 和 DSR 高。这发现指出了它们在不同路由发现机制中产生的相对开销量。最后，从理论上讲，我们的 CPR-TD 协议还可以将节点信息反馈给轨迹规划的应用程序，从而实现了一个完整的网络控制闭环设计。

图 14 展示了不同路由协议在飞行过程不同阶段和网络规模下的 OE 性能，我们假设所有节点都运行良好。可以看出，在五个阶段和所有考虑的网络规模中，本研究的 CPR-TD 协议实现了最高的 OE，而 AODV 表现出最低的 OE。这一观察结果与从图 13 获得的观察结果一致。同样，这是因为 AODV 中的路由发现机制在每个阶段都会

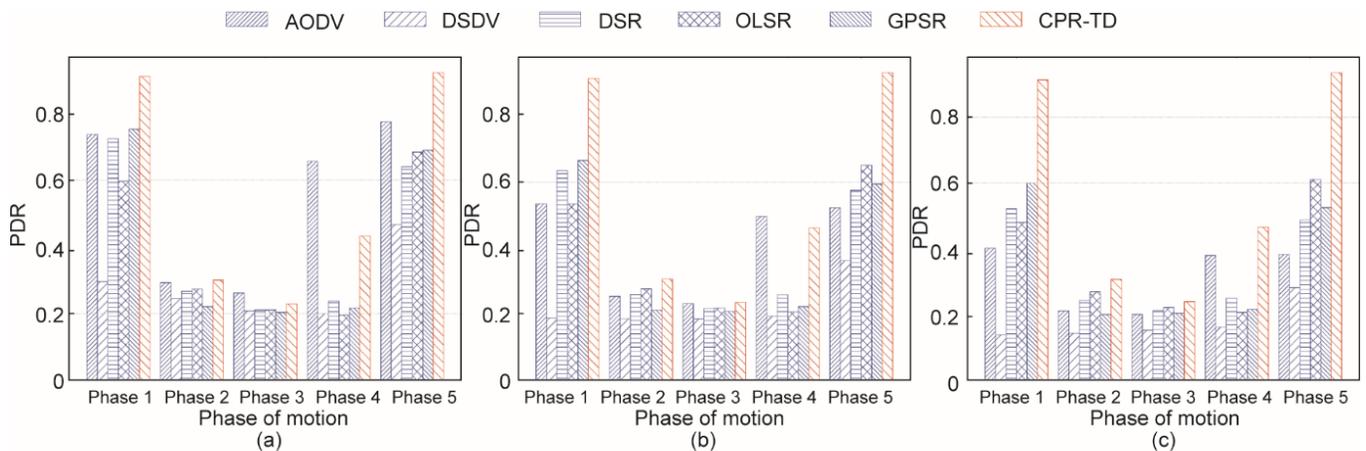


图 12. 在飞行过程的不同阶段和不同网络规模下的不同路由协议的 PDR 比较。(a) 节点数：4 × 9；(b) 节点数：4 × 25；(c) 节点数：4 × 49。

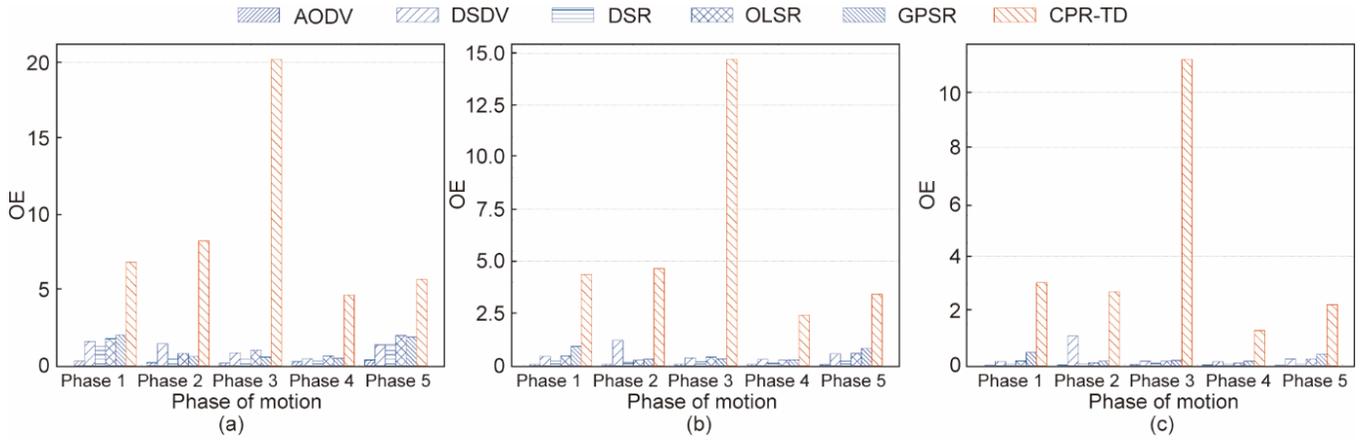


图 14. 在飞行过程的不同阶段和不同网络规模值下不同路由协议的 OE 比较。(a) 节点数: 4×9 ; (b) 节点数: 4×25 ; (c) 节点数: 4×49 。

产生最大的开销, 而 CPR-TD 则相反。

图 15 比较了不同路由协议在不同网络规模 and 不同节点故障条件下的平均端到端延迟。在条件 1 中, 可以看出, 尽管 DSDV 的延迟随着网络大小的增加而减少, 但在所考虑的所有路由协议中, 它仍然是最大的。这是因为只有 DSDV 要求网络中的所有节点定期发送控制数据包, 并且随着网络规模的增加, 其 PDR 仍然是最差的 (图 11)。当网络大小较大时, 对于 DSDV, 数据包传递过程仅涉及彼此靠近相邻的节点, 从而减少了延迟。因此, DSDV 不适合对时间敏感的应用场景。对于其余路由协议, 延迟通常会随着网络规模的增加而变大, 尽管延迟增加的程度因特定协议而异。AODV 和 DSR 的延迟分别位居第二和第三。当网络规模较小时, OLSR 表现出最小的延迟, 但当网络规模变大时, 其延迟显著增加, GPSR 和 CPR-TD 随着网络规模的增加, 延迟性能相对稳定。通过分析可知,

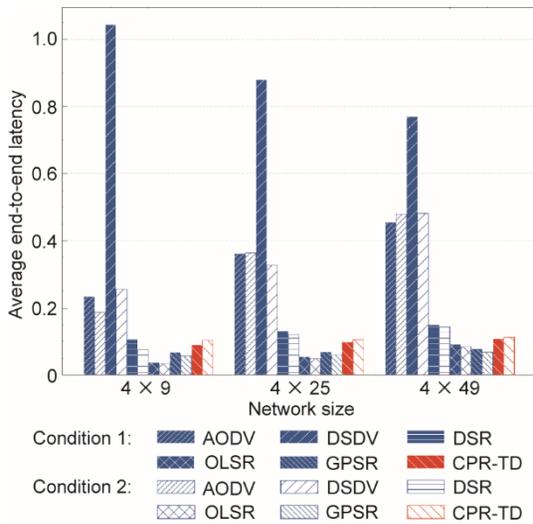


图 15. 不同路由协议在不同网络规模值和不同节点故障条件下的平均端到端延迟的比较。

本研究提出的 CPR-TD 具有适中的延迟性能, 因为源节点仍然需要计算最短路径, 这需要花费一定的时间, 并且在消息转发过程中需要提取和处理数据包的头部。总体而言, CPR-TD 协议在大规模网络中表现良好。最后, 在条件 2 下, 可以看出除 DSDV 之外, 节点故障对路由协议的平均端到端延迟性能影响很小。

图 16 显示了在不同的网络规模下, 不同路由协议在飞行过程不同阶段的平均端到端延迟性能。可以看出, 在三个不同的网络规模下, DSDV 在阶段 1 中表现出比其他协议大得多的平均端到端延迟。但是, 从阶段 2 到阶段 5, 当网络规模足够大 (如 4×25 和 4×49) 时, AODV 表现出最大的延迟。这是因为 DSDV 在第 1 阶段主动维护具有密集网络连接的路由表, 从而导致更多的介质访问冲突和更多的节点参与转发路由, 进而导致巨大的平均端到端延迟。当网络连通性降低 (如从第 2 阶段到第 5 阶段), AODV 的路由发现机制在延迟方面起到主导作用。我们的 CPR-TD 协议在第 4 阶段具有相对较大的延迟, 因为源节点必须等待重新加入的时间, 以在数据包过期之前 (如果可用的话) 将它们发送到目标节点。

图 17 展示了不同路由协议在不同网络规模值和不同节点故障概率下的网络抖动性能。可以看出, CPR-TD 的网络抖动虽然不是最低的, 但仍然具有竞争力。就该指标而言, 不同协议的优缺点以及相应的原因与图 15 相似。综合比较图 11、图 13、图 15 和图 17, 可以得出结论, 本文提出的 CPR-TD 协议在 PDR、OE、平均端到端延迟和网络抖动之间实现了最佳的性能平衡。

5. 结语

在本文中, 我们提出了一种适用于 MO-FANET 的路

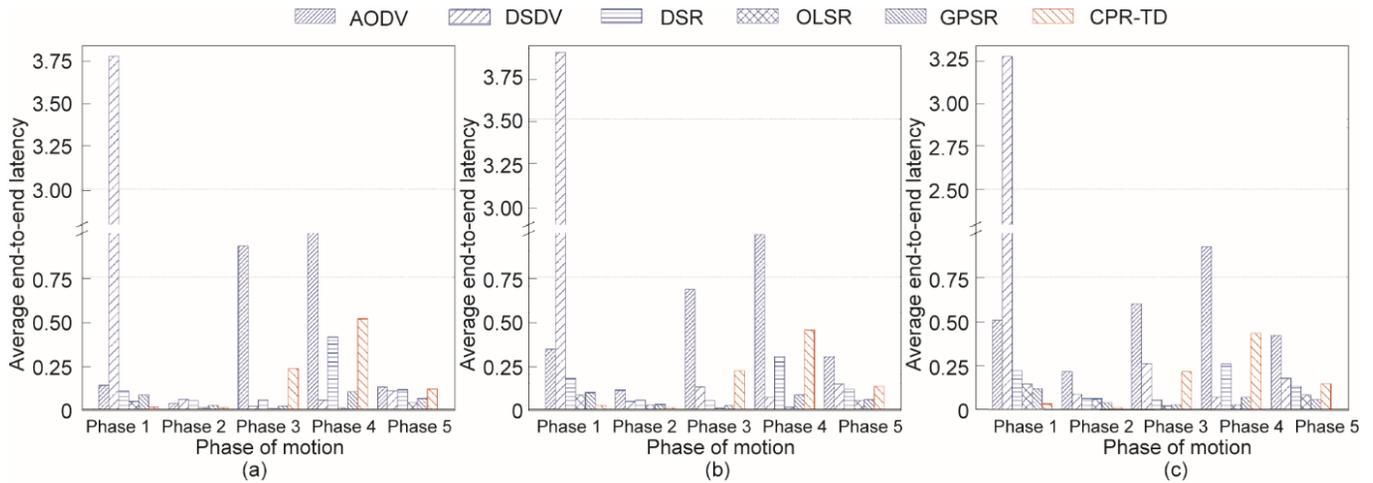


图16. 不同路由协议在飞行过程的不同阶段和不同网络规模值下的平均端到端延迟的比较。(a) 节点数: 4×9 ; (b) 节点数: 4×25 ; (c) 节点数: 4×49 。

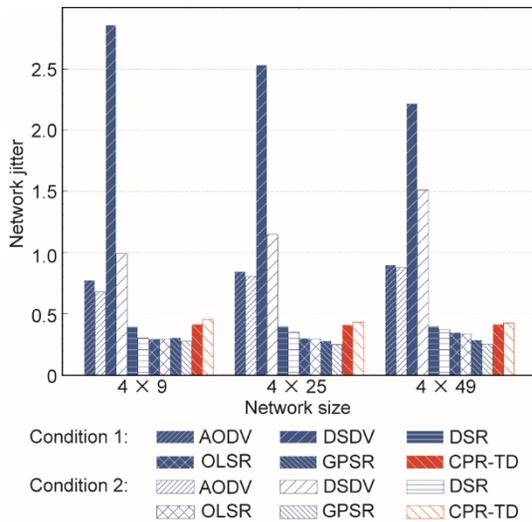


图17. 网络抖动比较。

由协议——CPR-TD协议。该协议在民用和国防工业领域具有广泛的应用潜力。我们考虑了一个具有挑战性的场景，其中多架无人机在不同编队中协同飞行，从一个地点飞往另一个地点以执行特定任务。我们将MO-FANET的飞行过程建模为五个阶段，这些阶段由多个坐标系和复杂的机动动作描述。CPR-TD协议充分利用了轨迹动力学与无线通信的跨学科优势，可以在单个ATP系统和跨层协议栈的辅助下实现性能的提升。通过与FANET中使用的五种代表性路由协议进行比较，我们基于大量NS-3仿真发现CPR-TD协议不仅实现了最高的PDR性能，而且达到了最佳的OE。此外，在大多数考虑的情况下，该协议的平均端到端延迟低于基准协议，并且网络抖动较低且稳定。

在未来的工作中，我们打算进行以下几方面的深入研究：①探索如何访问和利用其他层的信息来辅助路由协议，以改善网络的整体性能；②研究如何利用分布式算法

加快计算并实现更低的处理延迟，以支持实时决策；③尝试将该协议应用于真实的MO-FANET中，测试其性能并进行进一步的优化。

致谢

本工作得到了北京市自然科学基金项目(L202012)、中国传媒大学媒体融合与传播国家重点实验室开放研究项目(SKLMCC2020KF008)和中央高校基本科研业务费项目(2020RC05)的资助。作者感谢张平教授(中国工程院院士、北京邮电大学教授)和于全教授(中国工程院院士,鹏城实验室研究员)富有洞察力的意见和建议。

Compliance with ethics guidelines

Die Hu, Shaoshi Yang, Min Gong, Zhiyong Feng, and Xuejun Zhu declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

References

- [1] Maza I, Caballero F, Capitán J, Martínez-de-Dios JR, Ollero A. Experimental results in multi-UAV coordination for disaster management and civil security applications. *J Intell Robot Syst* 2011;61(1-4):563-85.
- [2] Vollgger SA, Cruden AR. Mapping folds and fractures in basement and cover rocks using UAV photogrammetry, Cape Liptrap and Cape Paterson, Victoria, Australia. *J Struct Geol* 2016;85:168-87.
- [3] Meng XY, Wang W, Leong B. SkyStitch: A cooperative multi-UAV-based realtime video surveillance system with stitching. In: *Proceedings of 23rd ACM International Conference on Multimedia*; 2015 Oct 26-30; Brisbane, QSD, Australia. ACM; 2015. p. 261-70.
- [4] Cheng X, Lyu F, Quan W, Zhou C, He H, Shi W, et al. Space/aerial-assisted computing offloading for IoT applications: a learning-based approach. *IEEE J*

- Sel Area Commun 2019;37(5):1117–29.
- [5] Zhao E, Chao T, Wang S, Yang M. Finite-time formation control for multiple flight vehicles with accurate linearization model. *Aerosp Sci Technol* 2017;71:90–8.
- [6] Quan W, Cheng N, Qin M, Zhang H, Chan HA, Shen X. Adaptive transmission control for software defined vehicular networks. *IEEE Wirel Commun Lett* 2019;8(3):653–6.
- [7] Oubbati OS, Lakas A, Zhou F, Günes M, Yagoubi MB. A survey on position-based routing protocols for flying ad hoc networks (FANETs). *Veh Commun* 2017;10:29–56.
- [8] Alshbatat AI, Dong L. Cross layer design for mobile ad-hoc unmanned aerial vehicle communication networks. In: *Proceedings of 2010 International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC)*; 2010 Apr 10–12; Chicago, IL, USA. New York City: IEEE; 2010. p. 331–6.
- [9] Paul AB, Nandi S. Modified optimized link state routing (M-OLSR) for wireless mesh networks. In: *Proceedings of 2018 International Conference on Information Technology*; 2008 Dec 17–20; Bhubaneswar, India. New York: IEEE; 2008. p. 147–52.
- [10] Park SY, Shin CS, Jeong D, Lee H. DroneNetX: Network reconstruction through connectivity probing and relay deployment by multiple UAVs in ad hoc networks. *IEEE Trans Veh Technol* 2018;67(11):11192–207.
- [11] Shirani R, St-Hilaire M, Kunz T, Zhou Y, Li J, Lamont L. On the delay of reactivegreedy-reactive routing in unmanned aeronautical ad-hoc networks. *Procedia Comput Sci* 2012;10:535–42.
- [12] Perkins CE, Royer EM. In: *Ad-hoc on-demand distance vector routing*. New Orleans, LA, USA. New York City: IEEE; 1999. p. 90–100.
- [13] Camp T, Boleng J, Davies V. A survey of mobility models for ad hoc network research. *Wirel Commun Mob Comput* 2002;2(5):483–502.
- [14] Cheng N, Quan W, Shi W, Wu H, Ye Q, Zhou H, et al. A comprehensive simulation platform for space-air-ground integrated network. *IEEE Wirel Commun* 2020;27(1):178–85.
- [15] Sánchez M, Manzoni P. ANEJOS: A Java based simulator for ad hoc networks. *Future Gener Comput Syst* 2001;17(5):573–83.
- [16] Liang B, Haas ZJ. Predictive distance-based mobility management for multidimensional PCS networks. *IEEE/ACM Trans Network* 2003;11(5):718–32.
- [17] Lin Z, Wang L, Han Z, Fu M. A graph Laplacian approach to coordinate-free formation stabilization for directed networks. *IEEE Trans Autom Control* 2016;61(5):1269–80.
- [18] Wang R, Dong X, Li Q, Ren Z. Distributed adaptive formation control for linear swarm systems with time-varying formation and switching topologies. *IEEE Access* 2016;4:8995–9004.
- [19] Ning Q, Tao G, Chen B, Lei Y, Yan H, Zhao C. Multi-UAVs trajectory and mission cooperative planning based on the Markov model. *Phys Commun* 2019;35:1–10.
- [20] Dong X, Hua Y, Zhou Y, Ren Z, Zhong Y. Theory and experiment on formationcontainment control of multiple multirotor unmanned aerial vehicle systems. *IEEE Trans Autom Sci Eng* 2019;16(1):229–40.
- [21] Zhong D, Zhang H, Chen K. Trajectory generator of SINS based on flight mechanics and control in simulink. In: *Proceedings of 2018 Chinese Automation Congress (CAC)*; 2018 Nov 30–Dec 2; Xi'an, China. New York City: IEEE; 2018. p. 1638–43.
- [22] Chen K, Wang X, Liu M, Yu Y, Yan J. Coordinate transformation with application in HWIL simulation. *Command Control Simul* 2017;39(2):118–22. Chinese.
- [23] Butcher JC. *The numerical analysis of ordinary differential equations: Runge–Kutta and general linear methods*. Chichester: John Wiley & Sons Ltd; 1987.
- [24] Ferronato JJ, Trentin MAS. Analysis of routing protocols OLSR, AODV and ZRP in real urban vehicular scenario with density variation. *IEEE Lat Am Trans* 2017;15(9):1727–34.
- [25] Malik FM, Khattak HA, Almogren A, Bouachir O, Din IU, Altameem A. Performance evaluation of data dissemination protocols for connected autonomous vehicles. *IEEE Access* 2020;8:126896–906.
- [26] Bai R, Singhal M. DOA: DSR over AODV routing for mobile ad hoc networks. *IEEE Trans Mobile Comput* 2006;5(10):1403–16.
- [27] Chen Q, Kanhere SS, Hassan M. Adaptive position update for geographic routing in mobile ad hoc networks. *IEEE Trans Mobile Comput* 2013;12(3):489–501.