

控制与决策

Control and Decision

无人机集群编队自组网可靠性评估

齐小刚, 吴相远, 刘立芳

引用本文:

齐小刚, 吴相远, 刘立芳. 无人机集群编队自组网可靠性评估[J]. *控制与决策*, 2024, 39(2): 689–696.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2022.1299>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于领航-跟随的有人/无人机编队队形保持控制

Formation keeping control for manned/unmanned aerial vehicle formation based on leader–follower strategy

控制与决策. 2021, 36(10): 2435–2441 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0453>

大规模固定翼无人机集群编队控制方法

Formation control of large–scale fixed–wing unmanned aerial vehicle swarms

控制与决策. 2021, 36(9): 2063–2073 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0076>

分布式无人机的时变编队非线性控制设计

Time–varying formation nonlinear control of distributed multiple UAVs

控制与决策. 2021, 36(10): 2490–2496 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0136>

多无人机协同直播场景下自适应任务卸载决策

Adaptive task offloading decision of multi–UAVs cooperation in live broadcasting scenario

控制与决策. 2021, 36(4): 974–982 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1104>

微型无人机集群低时延组网规划方法

A low delay networking planning method for micro UAV swarm

控制与决策. 2020, 35(11): 2696–2706 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1549>

无人机集群编队自组网可靠性评估

齐小刚^{1†}, 吴相远¹, 刘立芳²

(1. 西安电子科技大学 数学与统计学院, 西安 710071; 2. 西安电子科技大学 计算机学院, 西安 710071)

摘要: 针对无人机集群编队自组网的可靠性评估问题, 考虑无人机集群编队在执行任务时对信息交互的时效性需求, 提出一种自组网可靠性评估方案. 首先, 分析消息传输的可用时间; 其次, 通过排队论建立消息传输延迟模型以计算消息传输所需时间; 然后, 以消息传输所需时间小于可用时间的概率作为评估指标建立消息传输可靠性计算模型, 进而为无人机集群编队提供一个动态可靠性评估框架以适应集群编队体系配置和环境变化的随机性与时变特性; 最后, 仿真分析在不同传输任务需求下, 编队构型、无人机数量、编队缩放因子、传输速率、信息交互强度以及环境干扰对消息传输可靠性的影响. 仿真结果可以为集群编队的队形设计以及集群编队的体系配置提供一定参考依据.

关键词: 可靠性评估; 无人机集群编队; 自组网; 传输延迟; 排队论

中图分类号: V249

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2022.1299

引用格式: 齐小刚, 吴相远, 刘立芳. 无人机集群编队自组网可靠性评估 [J]. 控制与决策, 2024, 39(2): 689-696.

Reliability evaluation of ad hoc network for UAV swarm formation

QI Xiao-gang^{1†}, WU Xiang-yuan¹, LIU Li-fang²

(1. School of Mathematics and Statistics, Xidian University, Xi'an 710071, China; 2. School of Computer Science and Technology, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: For the reliability evaluation of the ad hoc network of the UAV swarm formation, we consider the timeliness requirement of information interaction for UAV swarm formation to perform tasks, and propose a reliability evaluation scheme of the ad hoc network. Firstly, the message is analyzed. Secondly, a message transmission delay model is established using the queuing theory to calculate the time required for message transmission. Then, a message transmission reliability calculation model is established with the probability that the required time for message transmission is less than the available time as an evaluation index. Furthermore, a dynamic reliability evaluation framework is provided for UAV swarm formation to adapt to the randomness and time-varying characteristics of swarm formation system configuration and environmental changes. Finally, under different transmission task requirements, the influence of formation configuration, number of UAVs, formation scaling factor, transmission rate, network load and information interaction strength on the reliability of message transmission is simulated and analyzed. The simulation results can provide a certain reference for the formation design and the system configuration of the swarm formation.

Keywords: reliability assessment; UAV swarm formation; ad hoc network; transmission delay; queuing theory

0 引言

多无人机通过进行特定的编队和飞行配置相互协作, 可以提高集群作战能力, 因而成为军事领域研究的热点^[1]. 作战任务类型也已经从过去简单的辅助训练、侦察监视等战斗支援功能向反介入和区域拒止的高对抗环境下的侦查监视、协同目标搜索与跟

踪、协同干扰、协同攻击、通信中继等作战方向发展^[2-3]. 信息的传输与交互是无人机集群构建的基础, 无人机集群的控制和协作常通过多跳无线移动自组网相互通信. 自组网中传输的消息不仅包括视频、图像、温度、湿度和音频等与任务相关的消息, 还必须同时传输指令消息、协同消息和监测消息等^[4-5]. 在

收稿日期: 2022-07-20; 录用日期: 2022-11-10.

基金项目: 部委级技术基础项目 (212ZQT42004).

责任编辑: 贾英民.

[†]通讯作者. E-mail: xgqi@xidian.edu.cn.

*本文附带电子附录文件, 可登录本刊官网该文“资源附件”区自行下载阅览.

关键任务应用中,任何消息的传输失败都可能会导致任务失败以及集群碰撞等灾难性后果.因此,无人机集群自组网的可靠性越来越受到关注.

目前关于无人机自组网可靠性的研究主要分为两类,一类是优化无人机集群自组网的协议,提升信息交互的可靠性.文献[6]基于蚁群优化,利用蚁群信息素的正反馈机制,降低频繁的局部拓扑变化条件下的路由重建代价,实现了可靠的端到端传输;文献[7]考虑无人机之间的相对速度、信号强度和能量以及角度等因素选择路由,以实现自组网的高可用性;文献[8]提出一种基于优先级的自适应多路访问控制(multiple access control, MAC)协议,将到达的包分类为不同的优先级队列,通过马尔可夫链建模得到的理论信道访问概率控制信道争用,保证高优先级包的访问,以提升无人机集群之间的信息交互可靠性.另一类是对无人机自组网进行可靠性评估,其中连通性和性能指标评估是网络可靠性评估的两个分支^[9].文献[10]在同时考虑无人机节点设备可靠性、链路可靠性以及网络拓扑变化的情况下提出了无人机编队自组网连通性计算方法以评估网络可靠性;文献[11]根据丢失的数据包数量、整体带宽、吞吐量和延迟推测了网络的性能,并认为延迟和丢包率与网络中的跳数成比例地膨胀;文献[12]用路由由发送/接收的流量、延迟、负载、吞吐量等指标评估了用于无人机通信的AODV和DSR等路由协议的性能与数据速率变化的关系;文献[13]考虑网络规模对吞吐量、能耗和有效传输范围的影响评估无人机自组网的性能,其仿真结果表明,网络的性能取决于网络中无人机的数量、传输范围和能源消耗;文献[14]提出了一个多状态网络模型以衡量无人机集群中关键节点向其他节点发送信息以及其他节点向关键节点传输态势感知信息的能力;文献[15]利用经典的ADC(可用性、可靠性、能力)有效性评价模型以无人机自组网中的时延、交付率、吞吐量、链路安全性、链路安全性、链路稳定性和移动性为关键指标对无人机自组网的任务有效性进行了定量分析和评价.

以上研究在无人机集群编队执行具体任务时,都不能评估自组网的性能满足传输任务需求的能力.本文考虑任务的时效性需求,对消息传输过程的延迟建模,以消息传输延迟不超过任务限定时间的概率评估消息传输可靠性,并针对无人机集群编队运行环境的随机性与时变性,构建随环境和集群编队变化的自组网可靠性动态评估框架,最后分析编队构型、无人

机数量、编队缩放因子、传输速率、信息交互强度以及环境噪声干扰对传输可靠性的影响.仿真结果可为集群编队队形选择以及集群配置提供一定依据.

1 模型假设

1.1 无人机网络模型

本文假设无人机之间为双向通信,将由 n 架无人机组成的无线多跳自组织网络建模为一个无向图 $G(V, E)$.其中: $V = \{V_1, V_2, \dots, V_n\}$ 为图的顶点集,表示无人机集合; $E \subseteq V \times V$ 为图的边的集合.当无人机 V_i 与无人机 V_j 之间的距离小于通信设定距离 R 时建立通信链路,其通信链路可由无人机 V_j 接受的信噪比(SNR)表征^[16],即

$$\text{SNR}(V_i, V_j) = \frac{P(V_i, V_j)}{N(V_j)}. \quad (1)$$

其中: $N(V_j)$ 为无人机 V_j 处的环境噪声强度; $P(V_i, V_j)$ 为无人机 V_j 接收到的由无人机 V_i 发送的无线信号强度,有^[17-18]

$$P(V_i, V_j) = 10 \log_{10} \frac{P_0 d_0^\alpha}{|V_i - V_j|} + \nu, \quad (2)$$

P_0 为参考功, d_0 为参考距离, α 为常数, ν 为随机噪声因子.

文献[19]通过实验分析了在不同环境下无线链路的丢包率(PLR)、信噪比(SNR)和数据包长度(L)之间的依赖关系,建立了如下链路丢包率模型:

$$\text{PLR} = \alpha \cdot L \cdot \exp(-\beta \cdot \text{SNR}), \quad (3)$$

其中 α 、 β 为环境模型参数.因此,通过 k -hop建立的无人机 V_i 与无人机 V_j 的传输路径的数据包传递成功率为

$$p_{i,j}^{\text{ok}} = (1 - \text{PLR})^k. \quad (4)$$

1.2 编队队形模型

无人机集群形成的编队队形是无人机集群执行编队任务的基础,不同的编队队形对无人机集群执行任务有着不同程度的影响.在实际情况中,通常将无人机集群编队队形以二维平面的方式表现,为了表示无人机集群的编队构型,本文在文献[20]的基础上定义了如下编队队形的矩阵表示形式:

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 2 & \dots & i & \dots & n \\ 0 & \alpha \cdot d_2 & \dots & \alpha \cdot d_i & \dots & \alpha \cdot d_n \\ 0 & \theta_2 & \dots & \theta_i & \dots & \theta_n \end{bmatrix}, \quad (5)$$

其中 n 表示编队无人机的个数.在队形矩阵 H 中,第1行表示无人机的编号;第2行 $\alpha \cdot d_i$ 表示无人机 V_i 与参照无人机 V_1 的距离,其中 $\alpha(0 < \alpha < +\infty)$ 为编队缩放因子,表示编队的队形扩张与收缩;第3行 θ_i 表

示无人机 V_i 与参照无人机 V_1 的相对角度.

1.3 传输方案

考虑一个由 n 架配备全向天线的无人机组成的网络, 所有节点都采用半双工方法并且都可以参与信道竞争, 每个节点都可以发送数据包也可以接收数据包^[14]. 路由协议采用单路径按需路由, 按最短路径寻找节点对之间的通信路径, 路径长度为链路跳数. 介质访问控制 (medium access control, MAC) 主要解决节点间高效使用信道传输数据的问题, 是网络时延和吞吐量等性能指标的重要影响因素^[21]. 该协议通常可以分为3种类型: 基于竞争的协议、基于调度的协议、基于竞争和调度的混合协议. MAC层协议采用时分多址接入 (time division multiple access, TDMA) 协议, 将信道资源按时间以帧为最小分配周期, 时隙为最小分配单位, 并以一定的规则分配给节点使用, 节点只能在分配到的时隙内发送数据. 在网络负载较重的情况下, 这有效地避免了节点之间因竞争信道资源造成的信道冲突等问题, 其时延及吞吐量等多项指标均优于载波监听多路访问 (carrier sense multiple access, CSMA) 协议^[22-23], 更加适用于需要频繁进行数据交换的无人机集群自组网. 本文假设 TDMA 中的时隙分配策略为最基本的固定时隙分配策略, 为自组网中的每个节点分配一个固定的时隙, 每个时隙的长度由发送速率和网络中的数据包大小共同决定, 满足每个时隙发送一个数据包, 帧长为时隙长度乘以网络节点个数.

1.4 任务消息模型

在无人机集群执行任务的整个过程中需要传输大量的指令消息、协同消息、监测消息以及任务相关的消息, 且不同的消息对准确性和时延性的要求也不相同, 因此以一个四元组 $I = \langle L, N, T, \varepsilon \rangle$ 表示无人机集群的各种消息. 其中: L 表示消息的数据包长度, N 表示数据包个数, T 表示消息传输的最长时延, ε 表示对消息丢失的容忍度. 在时间 T 内, 记接收节点接收到的数据包个数为 N_{rec} , 如果 $\frac{N_{\text{rec}}}{N} \geq 1 - \varepsilon$, 则消息传输成功, 否则失败.

2 消息传输可靠性评估

2.1 消息传输可用时间

对于消息 I_m , 消息传输的最长时延为 T_m , 因此 I_m 传输的可用时间的上限为 T_m , 即消息传输的可用时间范围为 $[0, T_m]$. 若通过路由协议选择的 k -hop 传输路径的剩余连接时间为 T_{rp1}^k , 则消息 I_m 的传输可

用时间为 $T_{\text{ad}}^m = \min\{T_m, T_{\text{rp1}}^k\}$. 本文考虑无人机集群执行任务的过程中保持良好的编队队形, 且在消息传输时限要求内链路保持连接, 则消息传输可用时间为 T_m .

2.2 消息传输延迟分析

文献[24]将发送节点发送数据包的过程建模为 $M/D/1$ 排队服务系统, 数据包的延迟即分为排队时间 D_q 和系统服务时间 D_s . 为了模拟集群编队中无人机节点之间频繁的信息交互, 假设数据包在无人机 V_i 按参数为 $\lambda_i = m_i \cdot \hat{\lambda} + \lambda^k$ 的泊松分布到达. 其中: m_i 表示节点 v_i 的邻居节点数量; $m_i \cdot \hat{\lambda}$ 表示保持无人机集群编队正常运行的信息交互强度, 为每秒到达无人机 V_i 的消息发送队列的数据包数量; λ^k 表示每秒到达消息发送队列的任务消息 I_m 的数据包数. 由时隙分配策略可知一个数据包的平均服务时间 $T = T_F$, 方差 $\text{VAR}(T) = 0$, 其中 T_F 为帧长.

根据排队论理论中的 P-K 公式可以计算出队长

$$L_s = \rho + \frac{\rho^2 + \lambda^2 \cdot \text{Var}(T)}{2 \cdot (1 - \rho)}. \quad (6)$$

又根据 Little 公式 $L_s = W_s \cdot \lambda$ 可以计算出一个数据包在无人机 V_i 上的延迟为

$$W_s^i = T_F + \frac{\lambda_i \cdot T_F^2}{2(1 - \rho_i)}, \quad (7)$$

其中 $\rho_i = \lambda_i \cdot E(T)$. 因此, 对于队形矩阵为 H 的无人机编队中的一个数据包, 从无人机 V_i 到无人机 V_j 总延时时为

$$t_{\text{delay}}^{H,i,j,I_m} = \sum_{m \in \text{path}(i,j)} W_s^m, \quad (8)$$

其中 $\text{path}(i, j)$ 表示在无人机编队队形矩阵为 H 时, 无人机 V_i 到无人机 V_j 的消息传输路径.

2.3 消息传输需要时间

对于一个消息 $I_m = \langle L, N, T, \varepsilon \rangle$, 其接收节点如果在发送时间开始后的 T 时内接收到 $N_m = \lceil N \cdot (1 - \varepsilon) \rceil$ 个数据包, 则消息传输成功, 否则消息传输失败. 由于一个数据包通过发送节点 V_i 到接收节点 V_j 的延迟为 $t_{\text{delay}}^{H,i,j,I_m}$, 则从 V_i 成功传输任务 I_m 到 V_j 至少需要时间为 $t_{\text{delay}}^{H,i,j,I_m} \cdot N_m$. 因此, 当 $0 \leq t < t_{\text{delay}}^{H,i,j,I_m} \cdot N_m$ 时, 成功传输任务 I_m 所需时间 $T_{\text{need}}^{H,i,j,I_m}$ 满足 $P(T_{\text{need}}^{H,i,j,I_m} \leq t) = 0$.

本文考虑数据包传输遵循到达确认机制, 且忽略确认消息的时间, 当数据包传输发生错误时会立即重传, 即在时间 t 内可以传输的数据包个数为 $N_{\text{able}}^{H,i,j,I_m} = \left\lfloor \frac{t}{t_{\text{delay}}^{H,i,j,I_m}} \right\rfloor$. 因此, 如果要在时间 t 内成

功传输任务,必须在可传输次数为 $N_{\text{able}}^{H,i,j,I_m}$ 中成功传输 N_m 次. 则对于 $t \geq t_{\text{delay}}^{H,i,j,I_m} \cdot N_m$ 有

$$P(T_{\text{need}}^{H,i,j,I_m} \leq t) = P(N_m^{\text{try}} \leq N_{\text{able}}^{H,i,j,I_m}) = 1 - P(N_m^{\text{try}} > N_{\text{able}}^{H,i,j,I_m}) = 1 - \sum_{j=0}^{N_m-1} \binom{N_{\text{able}}^{H,i,j,I_m}}{j} (p_{i,j}^{\text{ok}})^j (1 - p_{i,j}^{\text{ok}})^{N_{\text{able}}^{H,i,j,I_m} - j}, \quad (9)$$

其中 N_m^{try} 是成功传输消息需要尝试传输的数据包次数. 因此,从 V_i 成功传输任务 I_m 到 V_j 所需时间 $T_{\text{need}}^{H,i,j,I_m}$ 的累计分布函数 $F_{T_{\text{need}}^{H,i,j,I_m}}(t)$ 如下:

$$\begin{cases} 0, & t < t_{\text{delay}}^{H,i,j,I_m} \cdot N_m; \\ 1 - \sum_{j=0}^{N_m-1} \binom{N_{\text{able}}^{H,i,j,I_m}}{j} (p_{i,j}^{\text{ok}})^j (1 - p_{i,j}^{\text{ok}})^{N_{\text{able}}^{H,i,j,I_m} - j}, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (10)$$

2.4 消息传输可靠性

本文将无人机集群编队自组网的消息传输可靠性定义为:对于消息 I_m ,由 n 架无人机组成的队形矩阵为 H 的集群编队中任意两架无人机之间能够成功传输消息 I_m 的概率. 因此,对于消息 I_m ,队形矩阵为 H 的无人机集群编队自组网的消息传输可靠性为

$$P_{H,I_m}^{\text{ok}} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j \neq i}^n P_{H,i,j,I_m}^{\text{ok}}}{n \times (n-1)} \times 100\%, \quad (11)$$

其中 $P_{H,i,j,I_m}^{\text{ok}} = F_{T_{\text{need}}^{H,i,j,I_m}}(T_m)$ 表示在队形矩阵为 H 的编队中,无人机 V_i 将消息 I_m 成功发送到无人机 V_j 的概率. 具体计算过程如下:

step 1: 输入模拟次数 iter , 数据包传输成功率 $P_{i,j}^{\text{ok}}$, 传输延迟 $t_{\text{delay}}^{H,i,j,I_m}$;

step 2: 初始化 $t = 0, k = 0$, 可传输数据包的次数

$$N_{\text{able}}^{H,i,j,I_m} = \left\lfloor \frac{t}{t_{\text{delay}}^{H,i,j,I_m}} \right\rfloor;$$

step 3: 生成 $N_{\text{able}}^{H,i,j,I_m}$ 个 0 到 1 之间的随机数,并统计小于等于 $p_{i,j}^{\text{ok}}$ 的个数记为 $M_{\text{able}}^{i,j}$, 令 $t = t + 1$;

step 4: 若 $M_{\text{able}}^{i,j} \geq N_m$, 则令 $k = k + 1$, 否则跳过此步;

step 5: 若 $t < \text{iter}$, 则转入 step 3, 否则跳过此步;

step 6: 输出

$$P_{H,i,j,I_m}^{\text{ok}} = \frac{k}{\text{iter}} \times 100\%.$$

3 动态评估框架

本文第2节提出的无人机集群编队自组网的消息传输可靠性计算方法首先需要确定无人机集群编队队形、传输方案、环境参数以及任务参数等. 然而,在无人机执行任务的过程中,集群编队的体系配置与运行环境以及传输任务都具有随机性与时变性. 为了能实时评估无人机集群编队自组网的可靠性以适应无人机集群编队体系配置与环境变化的随机性与时变特性,本文提供一个面向任务的无人机集群自组网可靠性动态评估框架如图1所示. 其中模型生成模块主要分为4部分,第1部分根据编队队形以及路由协议确定消息传输路径;第2部分对传输方案中的MAC协议进行解析,从数据库中选择对应的延迟模型;第3部分根据环境参数、传输路径以及延迟模型建立点对点之间的消息传输需要时间的计算模型;第4部分根据任务参数建立可靠性模型并输出计算结果. 更新管理模块负责监测编队队形、传输方案、环境参数以及任务参数,当监测到某一数据发生改变时,则会触发模型,生成模块重新建立可靠性计算模型并输出可靠性计算结果.

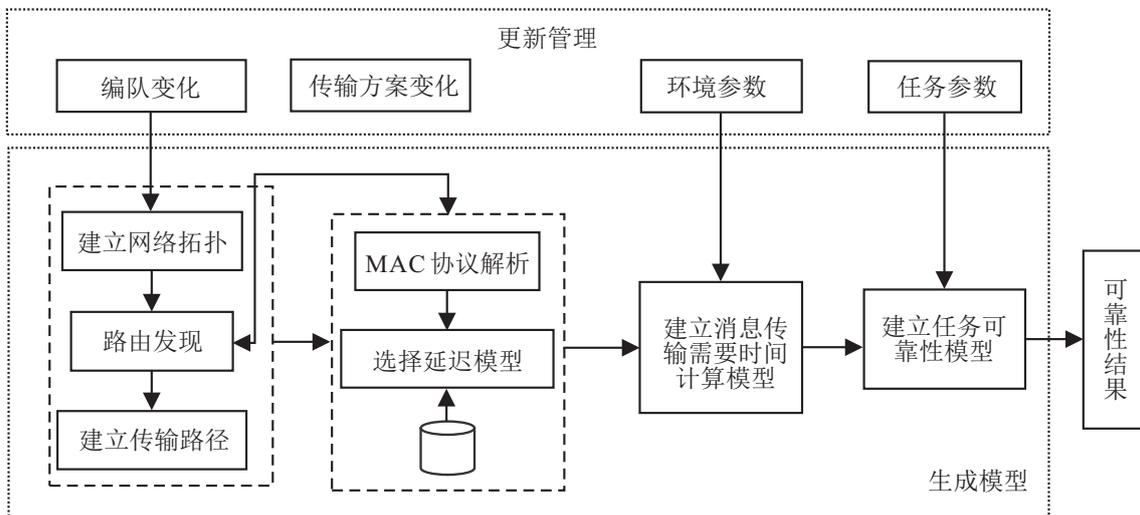


图1 动态评估框架

4 仿真分析

本文以配备全向天线的无人机组成的特定的编队进行协同侦查任务为研究对象,消息传输采用1.3节所描述的传输方案,编队队形见图2。由于无人机之间需要互相分享侦查信息以形成全局态势感知,假设侦查信息的数据包平均长度为300B,一次侦查信息的数据包个数平均为1000,消息丢失容忍度为0;丢包率环境参数以及环境信噪比取值参见文献[19];更具体的仿真参数见表1。仿真环境

为 Windows10 系统,8 GB 内存,Intel(R) Core(TM) i7-4790 CPU @3.60 GHz, MatlabR2018b。

表1 仿真参数

参数	符号	数值
传输速度	v	5 Mbps
负载强度	$\hat{\lambda}$	40
消息任务强度	λ	200
信噪比	SNR	10 dB
丢包率环境参数	α, β	0.644, 0.984

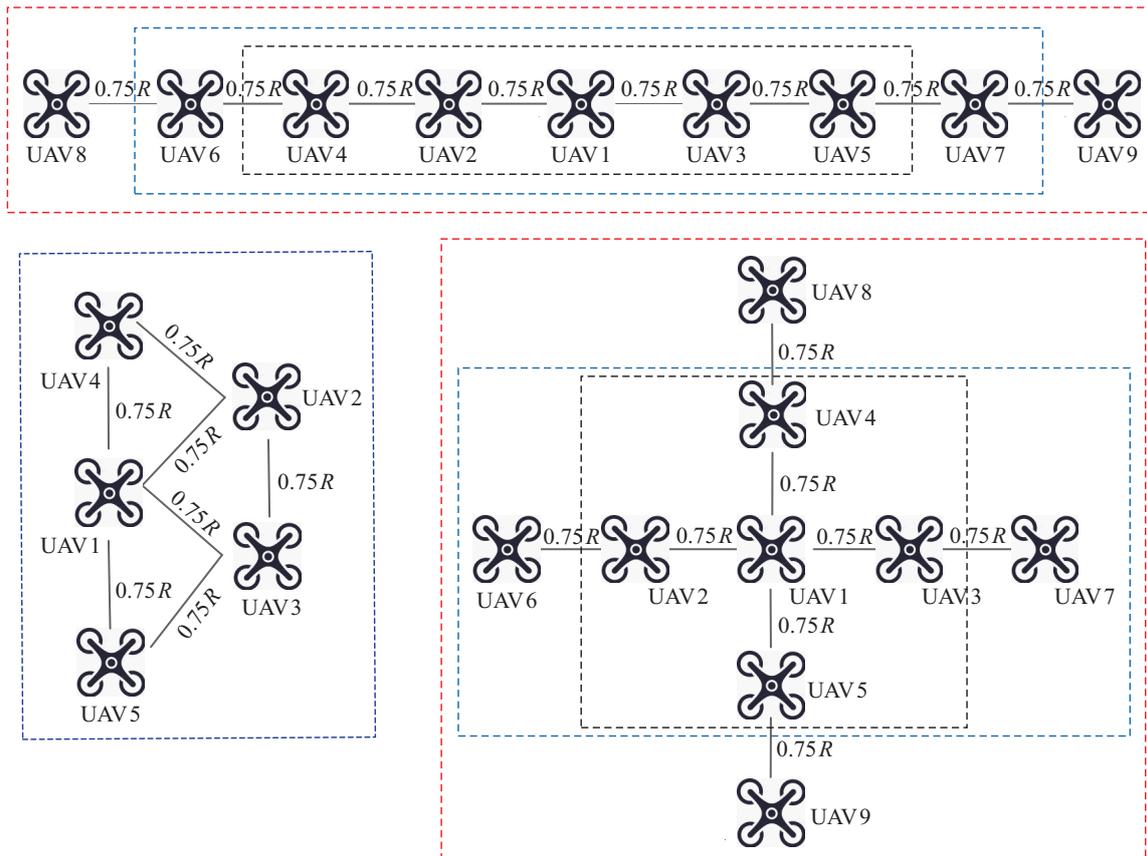


图2 编队队形

本文首先仿真分析了5架无人机的3种编队队形在不同传输时延要求下的可靠性变化,并进一步分析了一字形编队和十字形编队在无人机数量为5、7和9时可靠性与传输时延的关系。实验结果如图3所示,从图3(a)可以发现3种队形的传输可靠性都是随着时延要求的增加而增加,并与集群编队中无人机之间通过 k 跳及 k 跳以下的消息传输路径所占比例近似。这可以说明影响无人机集群编队可靠性最主要的因素是消息传输路径跳数。图3(b)和图3(c)分别是一字型编队和十字形编队在无人机数量为5、7和9时的可靠性与传输时延关系,当无人机数量增加时, k 跳及 k 跳以下的消息传输路径的比例都相应减小,与图中当无人机增加时,其可靠性曲线都向下移符合,

但又因为无人机数量增多,会额外增加时隙长度,从而增加了排队时延,导致整体向右移。

从图3(a)可以发现大部分可靠性取值所对应的时延要求都在5s、10s、15s、20s左右,并且这组时延要求可以代表对于任务的低时延要求到高时延要求。因此选择这一组时延要求仿真分析队形缩放因子与环境对可靠性的影响,其仿真结果分别如图4和图5所示。从图4可以发现随着队形因子的减小,即队形更紧凑时,在较低传输时延的要求下,其消息传输可靠性反而减小。这是由于当编队缩小时,为了避免碰撞,增加了无人机与邻居无人机之间的信息交互,使消息传输排队延迟增加,从而导致消息在低时延要求下传输失败。同时也发现对于不同的消息传输时

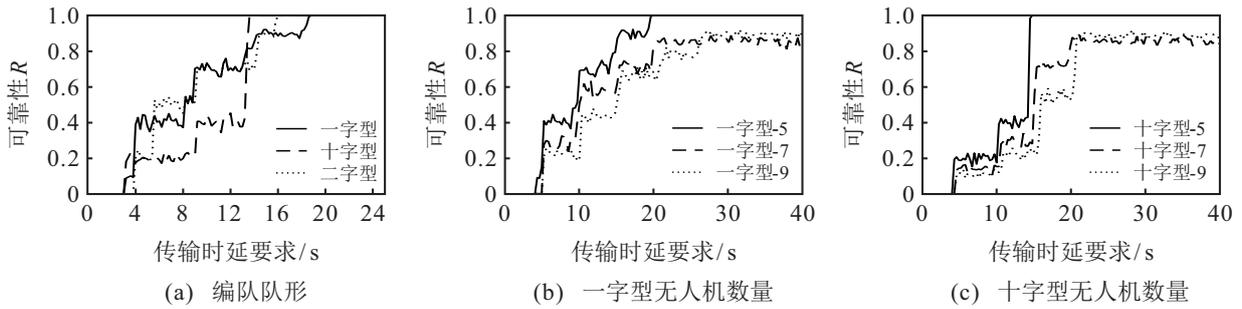


图3 编队队形和无人机数量对可靠性的影响

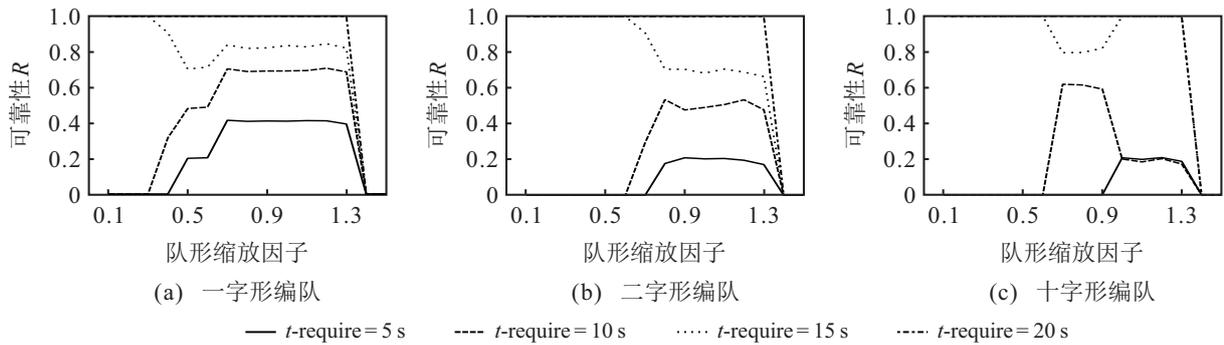


图4 队形缩放因子对可靠性的影响

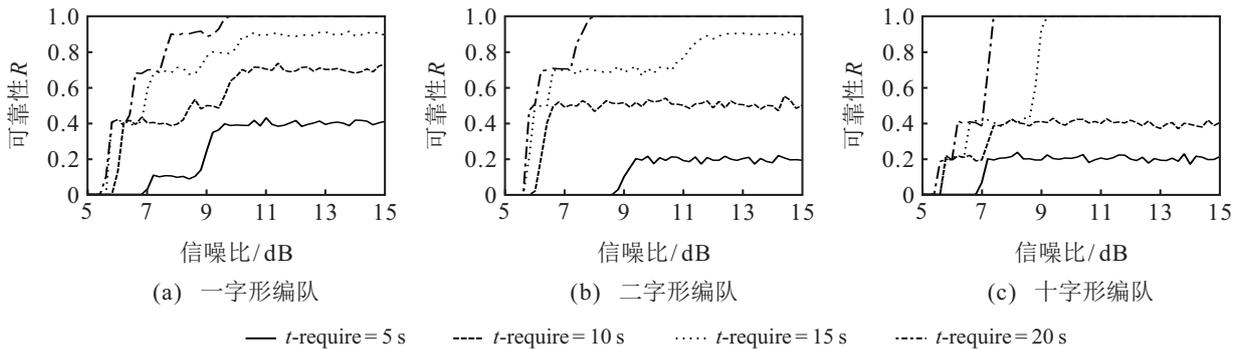


图5 环境干扰对可靠性的影响

延要求,不同的队形要达到较高的消息传输可靠性,其队形的缩放程度也不同.因此选择合适的队形缩放程度也是一种提高集群自组网消息传输可靠性的方式.从图5可以发现当信噪比从5 dB增加到10 dB的过程中,其可靠性快速提高,当信噪比继续增大时,可靠性基本保持不变.同时可以发现在信噪比较大即环境干扰较小时,不同的传输时延要求以及不同的

编队之间其可靠性明显不同.

图6展示了3种队形在不同传输速度下的传输时延要求与消息传输可靠性的关系.可以看出3种队形都随着传输速率的增加,传输时延相应减小.同时也发现当传输速率较小时,增大传输速率可以明显改变传输时延要求与可靠性的关系;当传输速率较大时,增大传输速度对可靠性的改变较小.

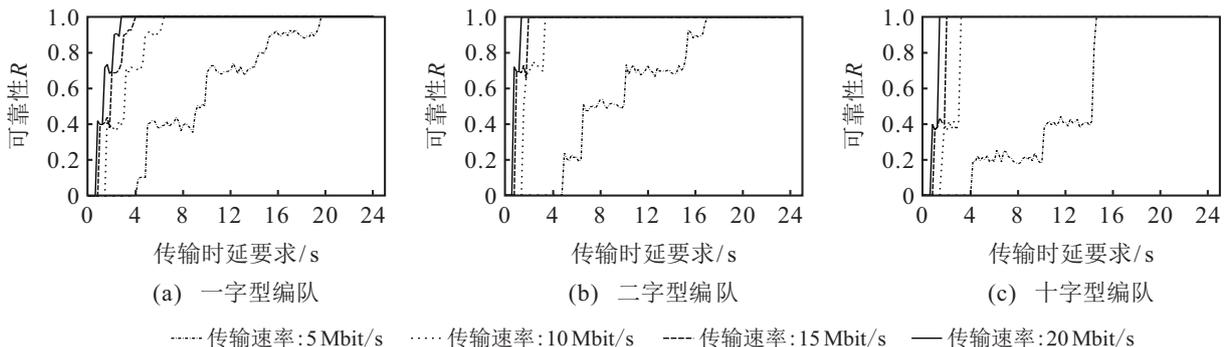


图6 传输速度对可靠性的影响

图7展示了3种队形在考虑无人机之间的信息交互强度分别为节点每秒发送20、30、40、50个数据包时,消息传输可靠性与传输时延要求的关系。从图中可以看出随着信息交互强度的增加,要达到相同的消息传输可靠性,其传输时间都在增加。其中一字形编队的传输时间随着信息交互加强而增长的比较

均匀,但是对于十字形编队和二字形编队,当信息交互强度为从40增长为50,消息传输可靠性要达100%时,其传输时间要求剧烈增加。这说明不同的编队对网络负载的承受能力不同,当无人机集群需要频繁交互信息时应该避免选择类似十字形编队和二字形编队这样的星形网结构。

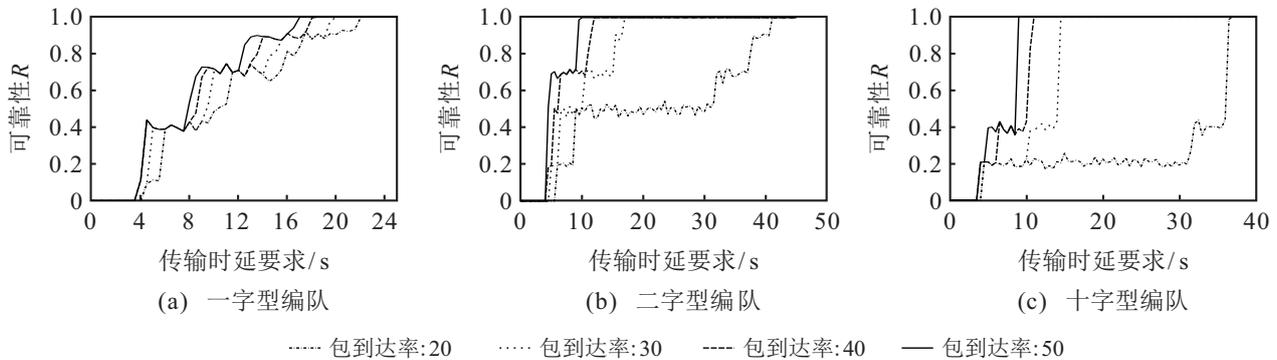


图7 网络负载对可靠性的影响

5 结论

本文首先分析无人机集群编队执行任务时对信息交互的需求,进而以无人机集群编队的自组网性能满足任务需求能力提出了消息传输可靠性指标。在假设路由协议为单路径最短路由、MAC层协议为固定时隙分配策略的前提下,通过排队论建立了消息传输可靠性计算模型。为适应无人机集群编队体系配置和环境变化的随机性与时变性,提出了一个动态评估框架。最后通过仿真分析了编队队形、无人机数量、队形缩放因子、传输速度、网络负载和环境干扰对消息传输可靠性的影响。仿真结果可以为无人机集群编队执行任务时选择编队队形以及集群体系配置提供一定的参考依据。

未来的工作还需着重关注两个方向:一是研究在路由协议为多路径路由协议、MAC协议为竞争类协议,并且消息具有优先级时消息传输的可靠性模型,以丰富动态评估框架;二是以消息传输可靠性指标和编队协同作战能力为联合优化目标,对无人机集群体系配置提供具体优化方案。

参考文献(References)

[1] 王祥科,陈浩,赵述龙. 大规模固定翼无人机集群编队控制方法[J]. 控制与决策, 2021, 36(9): 2063-2073.
(Wang X K, Chen H, Zhao S L. Formation control of large-scale fixed-wing unmanned aerial vehicle swarms[J]. Control and Decision, 2021, 36(9): 2063-2073.)

[2] 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.)

[3] 韩月明,方丹,张红艳,等. 无人机集群典型作战运用样式及关键技术分析[J]. 飞航导弹, 2020(9): 43-47.
(Han Y M, Fang D, Zhang H Y, et al. Analysis of typical operational application style and key technology of UAV cluster[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2020(9): 43-47.)

[4] 吴超宇,王明珠,张旭东,等. 浅谈无人机集群组网通信技术[J]. 信息通信, 2019, 32(7): 128-130.
(Wu C Y, Wang M Z, Zhang X D, et al. Talking about the communication technology of UAV cluster network[J]. Information & Communications, 2019, 32(7): 128-130.)

[5] Li J, Chen M, Dai F, et al. Prioritizing-based message scheduling for reliable unmanned aerial vehicles ad hoc network[J]. International Journal of Performability Engineering, 2018, 14(9): 2021-2029.

[6] Han C, Yin J, Ye L, et al. NCant: A network coding-based multipath data transmission scheme for multi-UAV formation flying networks[J]. IEEE Communications Letters, 2021, 25(3): 1041-1044.

[7] Usman Q, Chughtai O, Nawaz N, et al. A reliable link-adaptive position-based routing protocol for flying ad hoc network[J]. Mobile Networks and Applications, 2021, 26(4): 1801-1820.

[8] Mou X L, Li H, Yan F, et al. Priority based adaptive MAC protocol for UAV ad hoc networks[C]. The 7th International Conference on Computer and Communications. Chengdu, 2022: 210-214.

- [9] 黄宁, 伍志韬. 网络可靠性评估模型与算法综述[J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35(12): 2651-2660.
(Huang N, Wu Z T. Survey of network reliability evaluation models and algorithms[J]. Systems Engineering and Electronics, 2013, 35(12): 2651-2660.)
- [10] Li Y C, Li S F, Ding Q Q, et al. Research on reliability of ad hoc network communication in UAVs formations[C]. IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Nanjing, 2020: 1-7.
- [11] Wang X D, Mi Z C, Wang H, et al. Performance test and analysis of multi-hop network based on UAV Ad Hoc network experiment[C]. International Conference on Wireless Communications and Signal Processing. Nanjing, 2017: 1-6.
- [12] Hussen H R, Choi S C, Park J H, et al. Performance analysis of MANET routing protocols for UAV communications[C]. 2018 Tenth International Conference on Ubiquitous and Future Networks. Prague, 2018: 70-72.
- [13] Grodi R, Rawat D B, Bajracharya C. Performance evaluation of Unmanned Aerial Vehicle ad hoc networks[C]. IEEE SoutheastCon. Fort Lauderdale, 2015: 1-4.
- [14] Xu B, Liu T, Bai G H, et al. A multistate network approach for reliability evaluation of unmanned swarms by considering information exchange capacity[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2022, 219: 108221.
- [15] Cao J, Liu C H, Dong Z L, et al. Effectiveness evaluation of UAV Ad hoc network in complex task environment[C]. International Conference on Communications, Information System and Computer Engineering. Beijing, 2021: 745-748.
- [16] 邸斌, 周锐, 董卓宁. 考虑信息成功传递概率的多无人机协同目标最优观测与跟踪[J]. 控制与决策, 2016, 31(4): 616-622.
(Di B, Zhou R, Dong Z N. Cooperative localization and tracking of multiple targets with the communication-aware unmanned aerial vehicle system[J]. Control and Decision, 2016, 31(4): 616-622.)
- [17] Rigatos G G. Distributed filtering over sensor networks for autonomous navigation of UAVs[J]. Intelligent Service Robotics, 2012, 5(3): 179-198.
- [18] Rappaport T S. 无线通信原理与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012: 72-114.
(Rappaport T S. Wireless communications: Principles and practice[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2012: 72-114.)
- [19] Fu S W, Zhang Y, Ceriotti M, et al. Modeling packet loss rate of IEEE 802.15.4 links in diverse environmental conditions[C]. 2018 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Barcelona, 2018: 1-6.
- [20] Wang J N, Xin M. Integrated optimal formation control of multiple unmanned aerial vehicles[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2013, 21(5): 1731-1744.
- [21] Natkaniec M, Kosek-Szott K, Szott S, et al. A survey of medium access mechanisms for providing QoS in ad-hoc networks[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2013, 15(2): 592-620.
- [22] Suman B, Mangal L, Sharma S. Analyzing impact of TDMA MAC framing structure on network throughput for tactical MANET waveforms[C]. Proceedings of the Conference on Advances in Communication and Control Systems. Paris: Atlantis Press, 2013: 1-8.
- [23] Wang W J, Dong C, Wang H, et al. Design and implementation of adaptive MAC framework for UAV ad hoc networks[C]. The 12th International Conference on Mobile Ad-Hoc and Sensor Networks. Hefei, 2017: 195-201.
- [24] 杨光, 姚路, 任培. 基于排队论的TDMA数据链报文传输时延分析[J]. 计算机科学, 2014, 41(3): 120-123.
(Yang G, Yao L, Ren P. Time delay analysis of TDMA data link message transmission based on queue theory[J]. Computer Science, 2014, 41(3): 120-123.)

作者简介

齐小刚(1973—), 男, 教授, 博士生导师, 从事健康管理及故障诊断、资源调度与优化算法等研究, E-mail: xgqi@xidian.edu.cn;

吴相远(1997—), 男, 硕士生, 从事无人装备集群可靠性的研究, E-mail: wuxy0727@163.com;

刘立芳(1972—), 女, 教授, 博士, 从事数据处理与智能计算、计算机应用等研究, E-mail: lliu@xidian.edu.cn.