

启发式无人机蜂群自组网协议及仿真

郑繁繁¹ 张立冬² 赵浦媛¹ 吕欣¹ 郝明¹

摘要 针对传统大规模无人机自组网网络开销过高,以及小型/微型无人机能量受限的特点,提出了一种基于蜜蜂采蜜的启发式无人机蜂群自组网协议,适用于饱和攻击等作战场景。通过仿真分析验证,该协议具有网络结构简单、协同探测时延低、群体生存时间长等优点。

关键词 网络开销,能量受限,自组网协议,无人机蜂群,启发式算法,饱和攻击

引用格式 郑繁繁,张立冬,赵浦媛,吕欣,郝明.启发式无人机蜂群自组网协议及仿真[J].指挥与控制学报,2020,6(1):50-59

DOI 10.3969/j.issn.2096-0204.2020.01.0050



开放科学计划 (Open Science Identity, OSID) 标识码:

Heuristic Unmanned Aerial Vehicle Swarm Self-organizing Network Protocol and Simulation

ZHENG Fan-Fan¹ ZHANG Li-Dong² ZHAO Pu-Yuan¹ LYU Xin¹ HAO Ming¹

Abstract Aiming at the high network overhead of the traditional large scale Unmanned Aerial Vehicle (UAV) and the energy-constrained character of the small UAV and micro UAV, this paper proposes a heuristic UAV self-organizing network protocol based on the swarm behavior. Simulation results show that this protocol can apply to the scenario of UAV saturation attack, etc., and has the advantages of simple structure, low network latency and long time-to-live.

Key words network overhead, energy-constrained, self-organizing network protocol, unmanned aerial vehicle swarm, heuristic algorithm, saturation attack

Citation ZHENG Fan-Fan, ZHANG Li-Dong, ZHAO Pu-Yuan, LYU Xin, HAO Ming. Heuristic unmanned aerial vehicle swarm self-organizing network protocol and simulation[J]. Journal of Command and Control, 2020, 6(1): 50-59

蜂群是一种自然界的生物群集行为^[1]。虽然单个蜜蜂的能力弱小,但蜂群能够完成筑巢、采蜜等复杂任务,呈现出群集行为的优势。蜂群这种自然界的群体智能涌现行为被应用于无人机的集群组网、控制和航迹规划等^[1-4],通过将大量功能简单、造价低的无人机组成网络的方式来扩展更强大的能力,执行更复杂的任务。

无人机蜂群是由大量小型化、低成本的无人机组成的自组织网络。构成无人机蜂群的单机具有低成本的优势,同时相应地具有能力弱的劣势,比如载荷低、探测能力不全面、航程短、智能程度低、打击能力有限等,但通过自组网的形式构建无人机蜂群,实现无人机之间的协同探测、分工协作、饱和攻击等,能有效弥补单机能力弱的劣势,并体现出抗毁顽存、功能分布化、费效比低等优势。

在无人机蜂群领域,美军已经开展了大量的项目研究^[5-7]。美国国防部战略能力办公室2012年8

月设立了“灰山鹑”(Perdix)微型无人机项目。Perdix无人机具有低成本的优势,它的绝大部分部件通过3D打印技术制造,它的长度不足0.3m,重量不足1kg,由高速飞行的飞机一次性释放且不需要回收。Perdix无人机低成本的优势可以导致庞大的数量,从而形成超越敌方探测防御能力的饱和战术优势。2015年4月,美国海军实验室测试了代号“蝗虫”的LOCUST低成本无人机集群项目,计划发射上限为30架舰载自主集群的无人机。LOCUST无人机长1m左右,重12~14磅,单机价格在1万美元以下,属于一次性无人机。2016年4月,美国正式发布《小型无人机系统路线图2016年-2036年》^[8],该路线图凸显了小型无人机蜂群系统的重要意义,并计划在2036年实现无人机系统集群作战,将以较低成本实现在多样作战环境下的作战能力。

随着无人机蜂群自组网技术的发展,无人机蜂群作战在未来战场中将具有重要的军事应用价值。本文结合自然界蜂群采蜜的群集行为与无人机蜂群的作战特点和需求,提出了一种适用于无人机饱和攻击场景的启发式自组网协议,并仿真分析了相对于传统自组网协议的优势,以及针对小型/微型无人

收稿日期 2020-02-03

Manuscript received February 3, 2020

1. 中国电子科技集团公司第二十研究所 陕西 西安 710068 2. 军事科学院系统工程研究院 北京 100141

1. The 20th Research Institute of China Electronic Technology Group Corporation, Xi'an Shaanxi 710068, China 2. Institute of Systems Engineering, Academy of Military Sciences, Beijing 100141, China

机能量受限的特点分析了复杂战场环境下无人机蜂群的生存时间。

1 基于蜜蜂采蜜的启发式算法

观察自然界中蜜蜂采蜜的活动, 可以发现无论在怎样的环境下, 蜜蜂都能够高效地找到食物源采集花蜜。尽管单一个体的蜜蜂能力有限, 但蜜蜂采蜜作为一种群集行为, 表现出了强大的处理复杂问题的能力。在蜜蜂采蜜这种群体活动中, 各成员的分工协同、各司其职是关键因素, 使得整个蜜蜂群体涌现出解决复杂问题的高效智能^[9]。受此启发, 2005 年 Karaboga 提出了系统的人工蜂群 (Artificial Bee Colony, ABC) 算法^[10], 并应用于函数的数值优化问题上, 表现出优越的性能。

本文基于 ABC 算法模型, 将蜜蜂采蜜的群集行为建模, 并应用于构建启发式的无人机蜂群自组网协议。在 ABC 算法模型中, 蜜蜂有 3 种角色分工: 引领蜂、侦察蜂和跟随蜂。在蜜蜂采蜜过程中, 这 3 种角色的具体职能如下所示:

1) 引领蜂: 引领蜂的数量一般与食物源的数量相对应。引领蜂记录食物源的有关信息, 如距离蜂巢的方向、远近、食物量的多少等, 并分享给其他蜜蜂。

2) 侦察蜂: 侦察蜂的职责是负责对食物源进行探索, 在蜂巢附近搜索新的食物源。根据经验, 蜂群中侦察蜂的数量约占整个蜂群数目的 5% ~ 20%^[3, 9]。

3) 跟随蜂: 蜂群中跟随蜂的数量最多, 但它们不主动搜索食物源, 它们只在蜂巢附近等待, 当引领蜂分享食物源信息时, 根据食物源信息选择认为合适的引领蜂并跟随到食物源采蜜。

在蜜蜂采蜜的群集行为中, 信息交换在群体智能涌现中扮演着关键角色。蜜蜂通过在蜂巢附近的舞蹈区进行信息交换, 获得食物源信息的蜜蜂 (引领蜂) 通过一种动线为 8 字型的摇摆舞描述食物源的信息, 招募在蜂巢附近等待的蜜蜂 (跟随蜂) 去食物源采蜜。通过信息交换, 蜜蜂在工作角色之间进行灵活切换, 最终目的是获取最大化的采蜜量。在自然界的生物模型中, 蜜蜂在 3 种角色分工之间存在切换行为^[3-4], 如下所示:

1) 侦察蜂探索到食物源后, 采蜜回到蜂巢, 这时它可以切换为引领蜂, 通过摇摆舞分享食物源信息, 招募跟随蜂到食物源采蜜; 或者在获取其他引领蜂的更大食物源信息后, 放弃现有的食物源, 切换为跟随蜂。

2) 引领蜂即记录有食物源信息的蜜蜂, 探测到食物源信息的侦察蜂或跟随蜂都可以切换为引领蜂, 但引领蜂的数量一般与食物源的数量相对应。引领蜂在回到食物源前, 可以通过摇摆舞为它探索到的

食物源招募更多的蜜蜂, 或者放弃记录的食物源信息, 切换为侦察蜂或跟随蜂。

3) 跟随蜂在蜂巢附近等待, 通过观察引领蜂的摇摆舞获取食物源信息, 其中花蜜越多的食物源被跟随蜂选择的概率也就越大。跟随蜂在前往选中的食物源采蜜过程中, 若探索到更好的食物源, 也可以切换为侦察蜂或引领蜂。

将引领蜂、侦察蜂和跟随蜂等效为蜜蜂采蜜活动中存在的 3 种状态, 蜜蜂在以上 3 种角色的分工协作与角色切换可以用如图 1 所示的状态图表示。

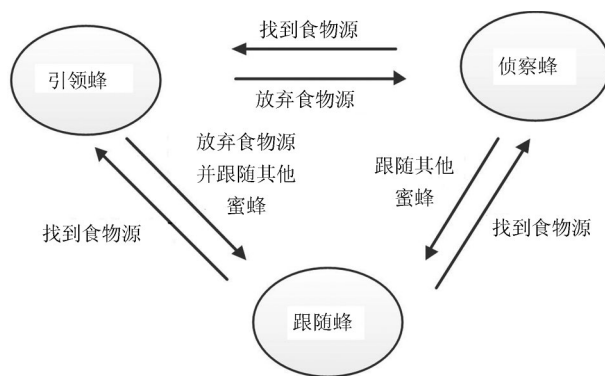


图 1 生物模型中蜜蜂 3 种角色的切换

综上所述, 蜜蜂采蜜的群集行为有如下特点:

1) 一种自然的高效算法。利用自然界中简单生物自发形成的生存规则, 可以构造合理有效的启发式算法, 用于解决复杂的问题。

2) 多角色分工机制。蜜蜂在采蜜过程中有不同的社会分工, 社会分工必然带来效率的提升, 可以有效节省群体的能量消耗同时获得更多食物量。

3) 协同工作机制。蜜蜂通过摇摆舞进行信息交换实现协同工作, 优先选择更为丰富的食物源, 形成正反馈效应, 加快获取最大化食物量的速度。

基于以上特点, 将蜜蜂映射为无人机, 食物源映射为敌方目标, 通过对蜜蜂采蜜的群集行为进行建模, 构建启发式的自组网协议, 能够应用于无人机蜂群对敌方目标的高效打击。无人机蜂群天然具备应用启发式自组网协议的基础, 如下所示:

1) 与自然界蜂群类似, 无人机蜂群是由能力对等节点构成的自组织网络, 通过集群的方式获得完成复杂任务的能力。

2) 无人机蜂群的节点可以实现不同的角色等级分类, 拥有不同的网络参与权限。

3) 无人机蜂群的节点之间存在交互协议, 无人机蜂群节点的角色等级可以实现自主切换。

2 启发式无人机蜂群自组网协议

2.1 应用场景

设定如下应用场景: 由大量小型/微型低成本无人机组成蜂群网络, 针对敌方一个或多个目标进行饱和和打击. 网络中每架无人机都拥有对等的能力 (鉴于低成本的限制, 对敌方目标的探测能力, 如红外、光电、雷达等, 可分布式配置在多架无人机上), 我方指挥站只需要告知其中一架无人机关于敌方目标的初始信息, 无人机群即可自组织形成蜂群网络对目标发起攻击. 无人机蜂群具有多目标打击能力, 在攻击目标的过程中, 无人机蜂群保持对新目标的探测以及打击. 无人机蜂群可完成对敌方目标的协同探测、持续跟踪、精确打击和毁伤评估等一系列作战流程.

2.2 基于蜜蜂采蜜的分工协同机制

将无人机的打击目标与蜜蜂的食物源相对应, 在无人机蜂群中, 可以基于自然界蜂群中引领蜂、侦察蜂、跟随蜂的角色分工, 定义无人机蜂群中引领机、侦察机、跟随机的角色分工. 如图2所示, 图2为自然界蜂群与本文定义的无人机蜂群的角色分工对应关系.

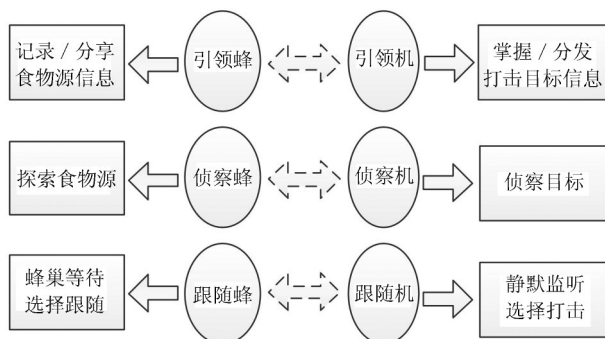


图2 自然界蜂群与无人机蜂群的角色分工对应关系

其中, 无人机蜂群具体的角色分工如下:

1) 引领机: 即“引领蜂”无人机, 其任务是掌握目标信息, 对侦察机周期汇报的探测信息进行融合处理, 并分发融合后的目标信息, 达到精确跟踪的目的. 引领机的数量与敌方目标 (或作战任务) 的数量对应, 如在针对单一目标的打击任务时只需要配置一架引领机. 引领机的数量决定网络的类型为单簇或多簇的网络.

2) 侦察机: 即“侦察蜂”无人机, 其任务是对目标进行持续探测, 周期向引领机汇报目标探测信息. 每架引领机需要配置多架侦察机配合完成对目标的协同侦察任务. 侦察机的数量在网络中有限制, 因为无人机蜂群饱和攻击时, 无人机之间的相对距离较近,

各无人机获取的目标探测信息具有较大的相关性, 探测节点的数量与目标估计误差之间呈指数幂关系, 随着探测节点数量的增多, 目标跟踪精度的提升效果显著降低^[1]. 所以在整个无人机蜂群网络中, 只需要有效数量的侦察机对目标进行协同探测即可提供对目标的精确跟踪和定位能力.

3) 跟随机: 即“跟随蜂”无人机, 其任务是保持监听引领机发布的目标信息以及打击指令, 随时准备对目标进行打击. 如存在多个打击目标时, 跟随机根据各引领机发布的敌方目标信息, 自主选择较大价值的目标进行打击. 跟随机可选择执行或不执行目标探测任务. 跟随机进行目标探测的频率较低, 且未探测到新目标时不进行任何操作, 若探测到新目标可自举成为引领机.

引领机、侦察机和跟随机的角色因分工不同导致各类型无人机的功耗不一致, 为保证无人机蜂群的整体攻击能力, 三者角色之间应可以切换. 同时, 无人机蜂群受到敌方攻击, 容易出现部分无人机被干扰或击毁等状况, 为维持无人机蜂群功能的完整性, 关键角色 (引领机、侦察机) 需要具备替补成员, 无人机应具备角色自主切换的能力.

如图3所示, 无人机蜂群的3种角色分工之间的切换需要至少满足以下规则:

1) 由于引领机和侦察机担任的任务多, 功耗相对较大, 当其自身能量消耗至一定阈值时, 角色即切换为功耗更低的侦察机或跟随机.

2) 能量富裕的无人机通过被指定或自举的方式切换为功耗更大的角色. 如引领机或侦察机可以在事先或依规则指定某跟随机为自己角色的替补机, 这样在其被击毁或能量低于阈值后能够快速恢复网络功能的完整性.

3) 跟随机能够通过自举成为引领机或侦察机, 通常发生在无人机蜂群受到敌方打击或干扰而导致网络分裂的时候. 另外, 跟随机若探测到新目标, 可以自举成为引领机.

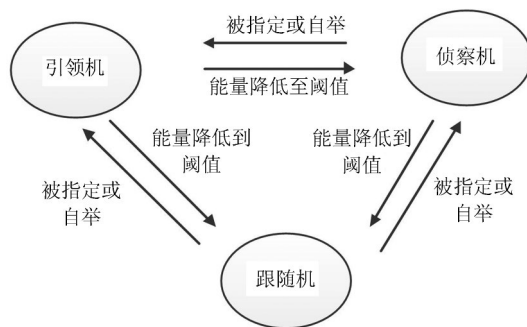


图3 无人机蜂群模型中无人机3种角色的切换

2.3 无人机蜂群自组网结构

无人机蜂群采用 TDMA 工作方式, 按照如图 4 所示的时帧结构组成单簇或多簇的星型结构自组织网络, 用于支持多目标或多任务的应用. 在一个时帧中, 时隙主要分为引领机时隙、侦察机时隙和跟随机时隙 3 类, 这 3 类时隙在时帧中均匀分布. 无人机蜂群根据其成员的角色分工分配时隙资源, 分配规则如下所示:

1) 引领机时隙: 引领机在网络中的作用相当于簇首节点, 负责对侦察机获取的探测信息进行融合, 发布目标信息以及打击指令等. 引领机在网络中的任务众多, 以及为保证协同打击的低时延, 需要分配较多的时隙资源. 因此, 引领机时隙具有最短的循环周期.

2) 侦察机时隙: 一架引领机可配置的侦察机最大数量对应于一帧中分配的侦察机时隙数量 N . 为保证协同探测的低时延要求, 侦察机时隙分配的数量较多, 用于及时向引领机汇报目标探测信息.

3) 跟随机时隙: 跟随机进入网络后, 绝大部分时间处于无线电静默状态, 保持监听引领机发布的目标信息以及打击指令. 跟随机在整个蜂群中占绝大多数, 但分配的时隙数量最少, 时隙循环周期最长. 跟随机时隙主要用于维护在网状态.

2.4 无人机蜂群低时延协议

无人机蜂群的作战需求是协同探测与打击, 通过群体智能涌现的方式, 有效规避单无人机能力弱小的缺点. 协同探测与打击的必要前提是端到端的低时延保证, 而通过无人机蜂群的分工协同机制能有效降低 TDMA 网络中的端到端时延.

TDMA 网络中, 节点的相邻时隙间隔决定了节点的传输时延. 无人机蜂群通过角色分工, 只有侦察机与引领机需要低时延保证. 其中, 侦察机的最大时隙间隔应不大于其探测信息的获取周期, 保证探测

信息无堆积; 引领机的最大时隙间隔应不大于侦察机最小的探测信息上报周期, 保证信息融合的及时性. 而跟随机主要处于静默监听状态, 只需要极少量的时隙用于维护在网状态.

首先, 如图 4 所示的无人机蜂群时帧结构中, 引领机与侦察机可以获得更大的时隙分配权限, 能够分配得到一个时帧中的绝大多数时隙. 同时, 引领机与侦察机的数量相对较少, 它们有能力获得足够小的时隙周期.

其次, 引领机作为网络的整体或局部中心节点, 可成为侦察机的时间基准节点. 因此, 通过合理设置时隙起点, 使得侦察机的目标探测与信息发射的时间匹配, 在侦察机获得探测信息后无需等待即可发射, 从而进一步降低节点的端到端时延.

最后, 引入动态时隙分配机制, 如图 4 所示的无人机蜂群时帧结构中加入竞争时隙, 竞争时隙不固定分配, 在使用时通过概率竞争获取, 仅用于低时延业务的传输. 动态时隙分配可以保证网络拓扑动态变化时的低时延, 尤其在受到敌方干扰或打击网络发生分裂与合并时、探测到新目标后发生单簇与多簇网络结构演变时. 另外, 引领机和侦察机有权临时占用跟随机时隙. 引领机与侦察机在占用跟随机时隙时, 需要提前广播申请占用的时隙数量以及时长, 在使用完毕后即释放, 若需要再次使用时, 需要重新申请.

2.5 无人机蜂群的最优化问题

2.5.1 网络能耗的最优化

由于小型/微型无人机造价低, 载荷有限, 导致机载能量成为其发挥能力的瓶颈, 在完成对敌方目标的侦察、跟踪、打击和评估等复杂任务时, 有必要考虑无人机蜂群的能耗问题. 为简化建模, 在以下无人机蜂群的最优化问题分析中均假设无人机具备最优航迹规划^[12-13]的能力.

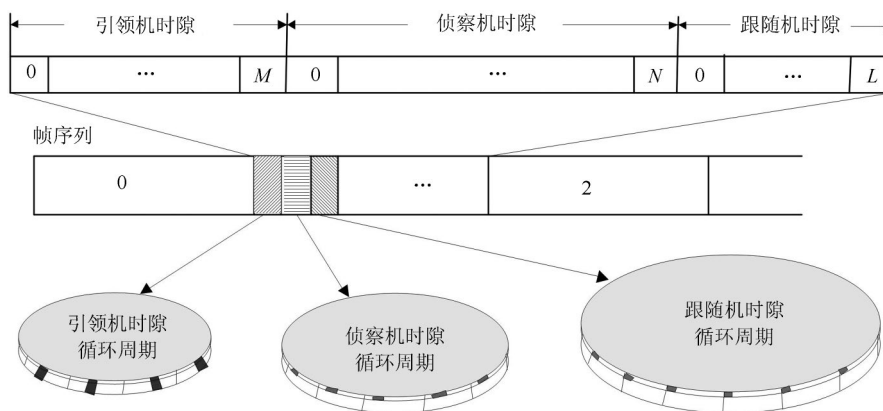


图 4 无人机蜂群的时帧结构

无人机的总能耗 E_{total} 包括通信能耗 E_T 和动力能耗 E_M 两部分, 如式 (1) 所示:

$$E_{total} = E_T + E_M \quad (1)$$

其中, 根据无线电能量衰减模型^[14-17], 通信能耗 E_T 又包含无线电发射能耗 E_{TX} 和无线电接收能耗 E_{RX} , 如下式表示:

$$E_{TX}(q, d) = qE_{elec} + q\epsilon_{fs}d^2 \quad (2)$$

$$E_{RX}(q) = qE_{elec} \quad (3)$$

$$E_T(q, d) = E_{TX}(q, d) + E_{RX}(q) = (q_{TX} + q_{RX})E_{elec} + q_{TX}\epsilon_{fs}d^2 \quad (4)$$

其中, $E_{TX}(q, d)$ 表示无人机发送 q 比特数据至距离 d 的无人机所消耗的能量; E_{elec} 表示发射每比特数据电路消耗的能量, 一般取值为 50 nJ/bit ^[14,16]; ϵ_{fs} 的取值为 10 pJ/bit/m^2 , 表示自由空间传播模型中的功率放大所需的能量参数^[17]; $E_{RX}(q)$ 表示无人机接收 q 比特数据所消耗的能量。

另外, E_M 表示无人机的动力能耗, 取 e 表示无人机飞行过程中的平均功率, 则有

$$E_M(t) = et \quad (5)$$

设无人机工作状态为引领机、侦察机和跟随机时的功耗分别用 P_a 、 P_b 和 P_c 表示。 P_a 、 P_b 和 P_c 可以分别通过每秒的时隙分配、数据发送量和无人机的可通信距离计算 E_{total} 获得。同时, 设引领机、侦察机和跟随机的数量分别为 α 、 β 和 γ , 无人机的初始能量为 E_0 。假设无人机蜂群按如图 3 所示的状态图进行角色切换, 在理想情况下, 无人机蜂群整体能量将同时耗尽, 此时获得最大的网络生存时间, 如式 (6) 所示:

$$t_{\max} = \frac{(\alpha + \beta + \gamma)E_0}{P_a + P_b + P_c} \quad (6)$$

2.5.2 作战效能的最优化

战场环境中面对多敌方目标的情况下, 如何对无人机进行合理的任务调度, 以最小的己方消耗获得最大的作战效能是无人机指挥与控制的关键技术之一。这是一个多目标优化问题, 作战效能的最优化与网络能耗的最优化存在一定程度的制约关系, 两者很难同时达到最优, 而相对于其他群体智能算法对多目标优化问题的求解, ABC 算法具有在较短时间内平衡大规模复杂空间内的全局搜索和局部探索之间关系的优势^[18]。

假设初始敌方目标数量为 N , 在打击任务中发

现新目标的数量为 M , 无人机蜂群的目的是获得最大的作战效能, 如式 (7) 所示:

$$\text{MIN } Y = \sum_{i=1}^{N+M} (V_i - \omega_i C) \quad (7)$$

其中, V_i 表示第 i 个目标的价值; ω_i 表示针对第 i 个目标进行打击的无人机数量; C 表示单个无人机的打击效能; Y 表示完成打击后的敌方目标的剩余价值。

启发式无人机蜂群自组网协议是一个面向任务的自组网协议, 能够有效地支撑多目标任务下的作战效能优化问题的求解。无人机蜂群中的单机个体具有自主决策能力, 并执行如图 3 所示的能量平衡策略, 式 (7) 的求解过程如下所示:

1) 当某个侦察机或跟随机探测到新目标时, 通过自举切换为引领机, 发布目标信息以及招募侦察机与跟随机的信息。若引领机侦察到新目标, 则优先选择价值较大的目标。

2) 当侦察机和跟随机监听到多个目标信息后, 可按轮盘赌的策略选择相应的引领机, 如式 (8) 所示:

$$P_i = \epsilon \frac{V_i}{\sum_i V_i} + \phi \frac{S_i}{\sum_i S_i} + \varphi \frac{L_i}{\sum_i L_i} \quad (8)$$

其中, V_i 表示第 i 个目标的价值; S_i 表示针对第 i 个目标进行打击的饱和度, 由已选择该目标的无人机数量决定; L_i 表示无人机到达第 i 个目标后的剩余能量估计值; P_i 表示选择打击第 i 个目标的概率; ϵ 、 ϕ 以及 φ 分别为以上因素的量化因子, 有 $\epsilon + \phi + \varphi = 1$ 。量化因子是一个变量, 如第 i 个目标的饱和度 S_i 低于下限阈值时, 该量化因子 ϕ 获得较大的定值, 当饱和度高于上限阈值时, 该量化因子 ϕ 失效, 应设置值为 0。

3 仿真分析

3.1 基于 OMNeT++ 平台的网络优化分析

OMNeT++ (Objective Modular Network Testbed in C++) 是一款面向对象的离散事件网络仿真器^[19], 它是由布达佩斯大学通信工程系开发的一个开源的、基于组件的、模块化的开放仿真平台, 具有强大的图形用户界面接口和嵌入式仿真内核, 可以运行于 Linux、Windows 及 MacOS/X 等多个操作系统, 可以用来仿真任何离散事件的系统, 包括仿真通信协议、计算机网络、并行系统、多处理系统和分布式系统, 能够建立目前几乎所有网络对象的基本模型之间的互联, 并且使复杂的网络通信和拓扑结构得到简单而正确的仿真。

仿真场景设置为在指定区域(指挥站的通信范围内)随机布撒 90 个无人机节点 (node), 所有节点在 20 s 内随机开机. 在以上区域中设置 3 个目标节点 (target), 目标节点的价值在 (60, 100) 范围内随机生成, 仿真时采用简化的量化因子 ($\varepsilon = 1, \phi = 0$ 以及 $\varphi = 0$). 在仿真比较中, 使用相同的网络资源.

在传统自组网协议的分层网络架构中, 网络由簇首和簇成员组成, 同类型节点配置相同的网络时隙资源, 如图 5 所示 (其中, 簇首由加方框的图标表示, 节点 ID 在图标下方标识, 簇首的簇成员数量在图标上方标识, 簇成员的簇首 ID 在图标上方标识, 节点的通信范围用标准圆表示, 簇首的通信范围采用深色圆表示). 图 5 中所示的传统自组网由 9 个簇组成, 簇内最大簇成员的数量为 8 (不包含簇首), 其中若干节点 (如 node [7]、node [10] 等) 由于时隙资源不足而未能入网.

在启发式无人蜂群自组网协议中, 网络由引领机、侦察机和跟随机 3 类节点成分层网络结构, 如图 6 所示 (其中, 引领机由加方框的图标表示, 侦察机用深色图标表示, 节点 ID 在图标下方标识, 引领机的侦察机与跟随机数量分别在图标上方标识, 侦察机和跟随机的引领机 ID 在图标上方标识, 引领机的通信范围采用深色圆表示). 图 6 中所示的无人机蜂群自组网由 3 个引领机簇组成, 一个引领机簇可以容纳大量的无人机节点.

在传统自组织网络中, 节点接入网络的权限是对等的, 时隙的分配方式不灵活, 适用的网络规模有限, 不能获得低时延保证; 虽然通过分簇的方式可以

获得网络的大容量, 但无法保证簇间的端到端低时延传输, 大量簇首节点会造成骨干网络信息交互的效率低下 (簇首时隙的循环周期大). 而启发式无人机蜂群自组网协议使得网络结构的复杂度大为降低, 首先表现在节点的差异化分类使得骨干网节点数量减少, 有效提升了骨干网的信息交换效率; 其次表现在节点的差异化分类使得网络资源的分配差异化, 让节点按角色分工获得匹配的网络资源, 有效提升网络资源的利用效率.

如图 7 所示, 通过对比两种类型自组网的节点入网时间, 启发式无人机蜂群自组网协议具有明显的优势 (其中横轴表示节点 ID, 纵轴表示节点入网时间). 同时, 如图 8 所示为两种类型自组网的端到端时延仿真对比, 仿真中随机选取一个节点 (如 node [43]), 测试其到网络中其他节点的端到端时延, 其中启发式无人机蜂群自组网协议可以获得相对于传统自组网协议更低的端到端传输时延 (其中横轴表示节点 ID, 纵轴表示测试包到达节点的传输时延).

另外, 随着网络规模的扩大, 尤其是移动场景中, 传统自组网分布式的特性使得大量的资源被消耗于网络的维护, 如拓扑控制、路由更新等, 导致网络吞吐量急剧恶化^[20-22]. 在仿真中, 通过节点受干扰失效模拟网络拓扑的急剧变化, 通过网络重构需要的时间分析网络开销带来的影响.

干扰模型设置为随机选取 25% 的节点为受干扰节点 (受干扰节点在仿真中使用加圆形背景的图标标识). 图 9 和图 10 分别表示在该干扰模型下, 传统自组网以及启发式无人机蜂群自组网在网络重构

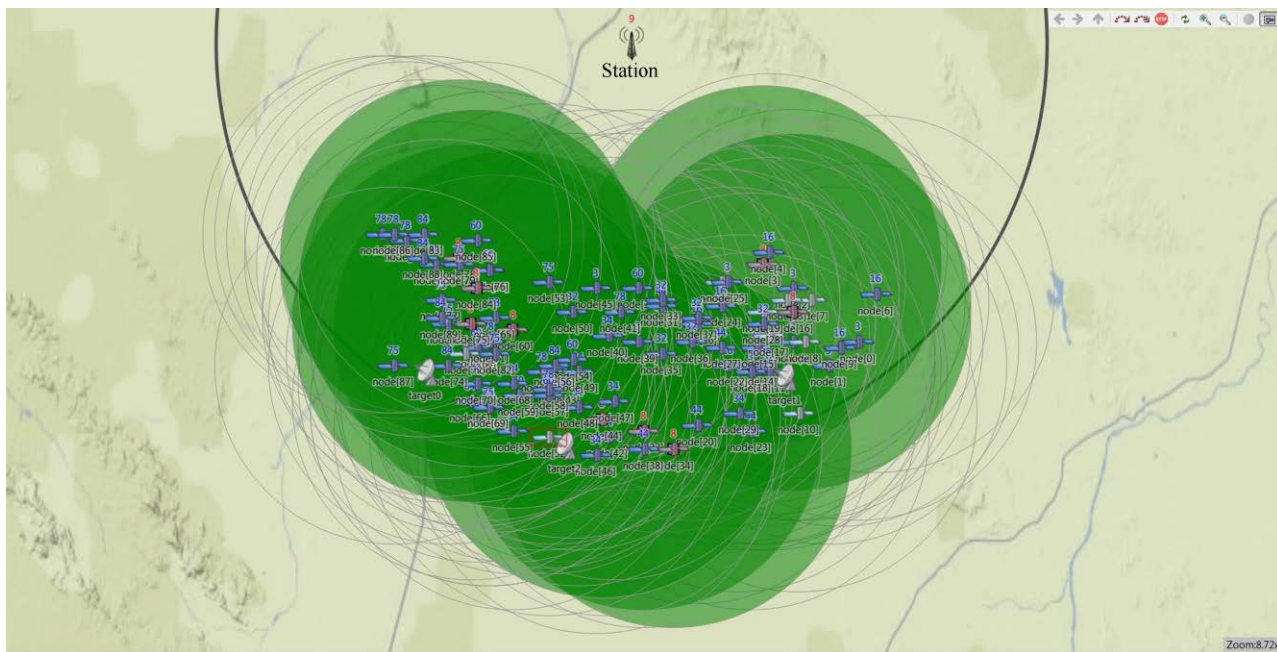


图 5 传统自组网的网络结构

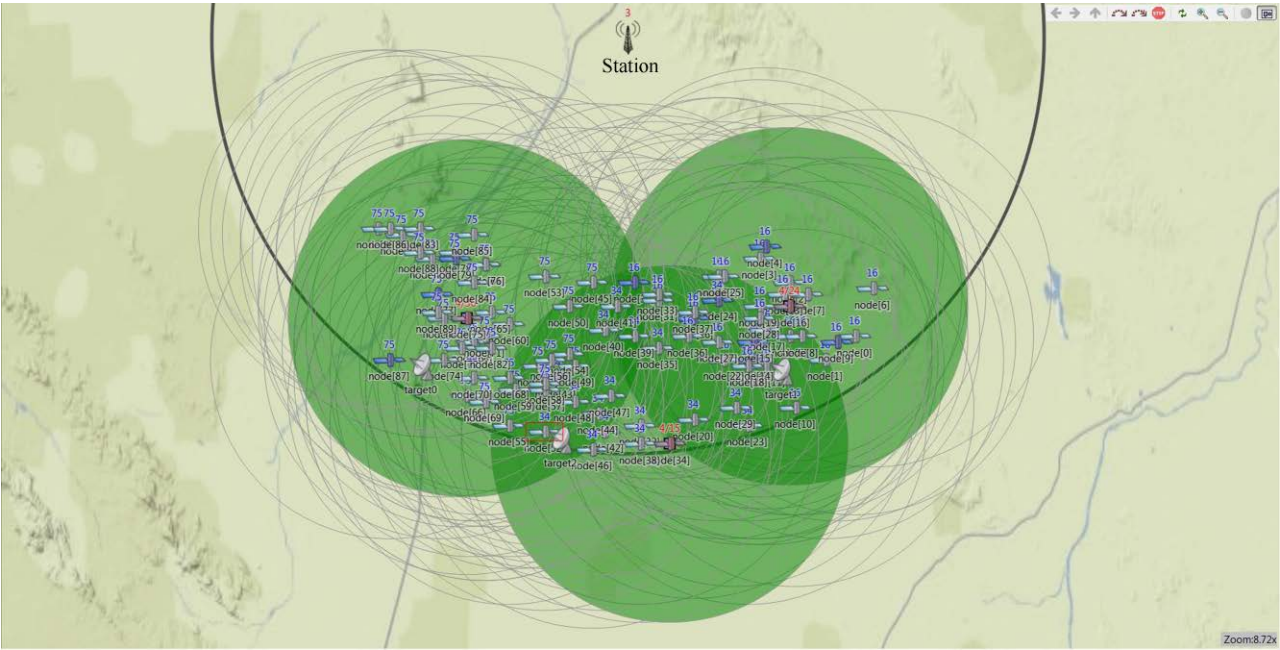


图6 无人机蜂群自组网的网络结构

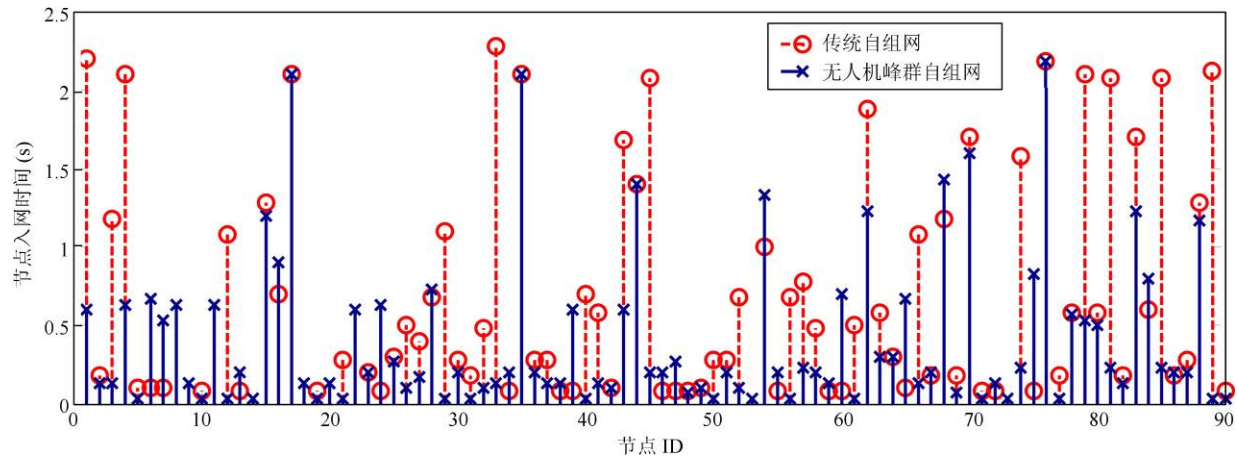


图7 节点入网时间对比

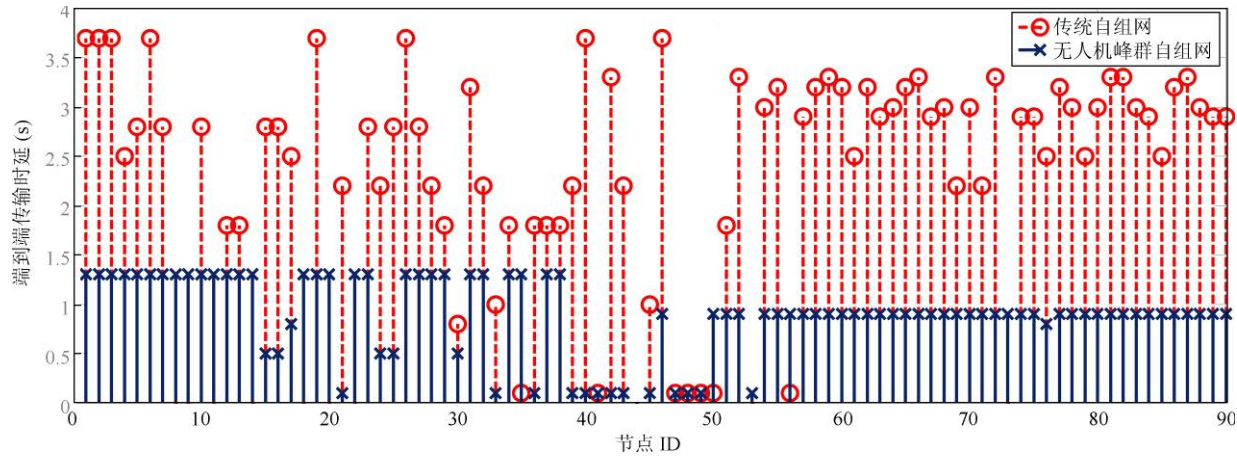


图8 端到端传输时延对比

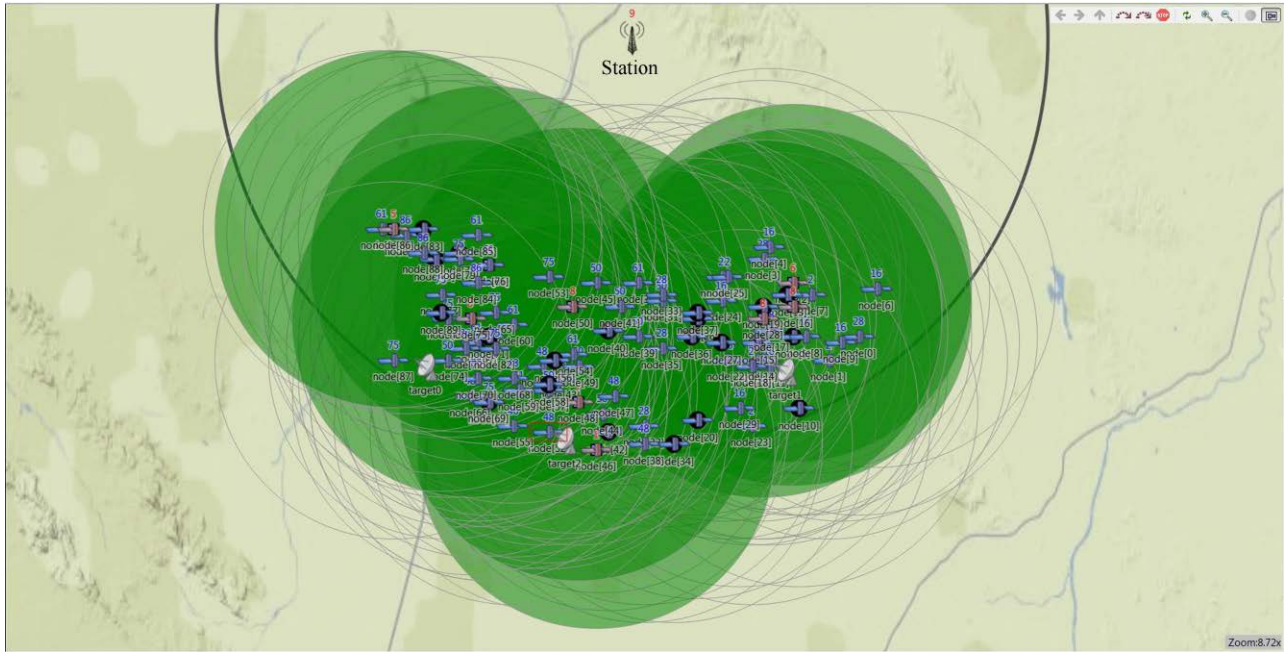


图9 干扰模型下传统自组网的网络结构

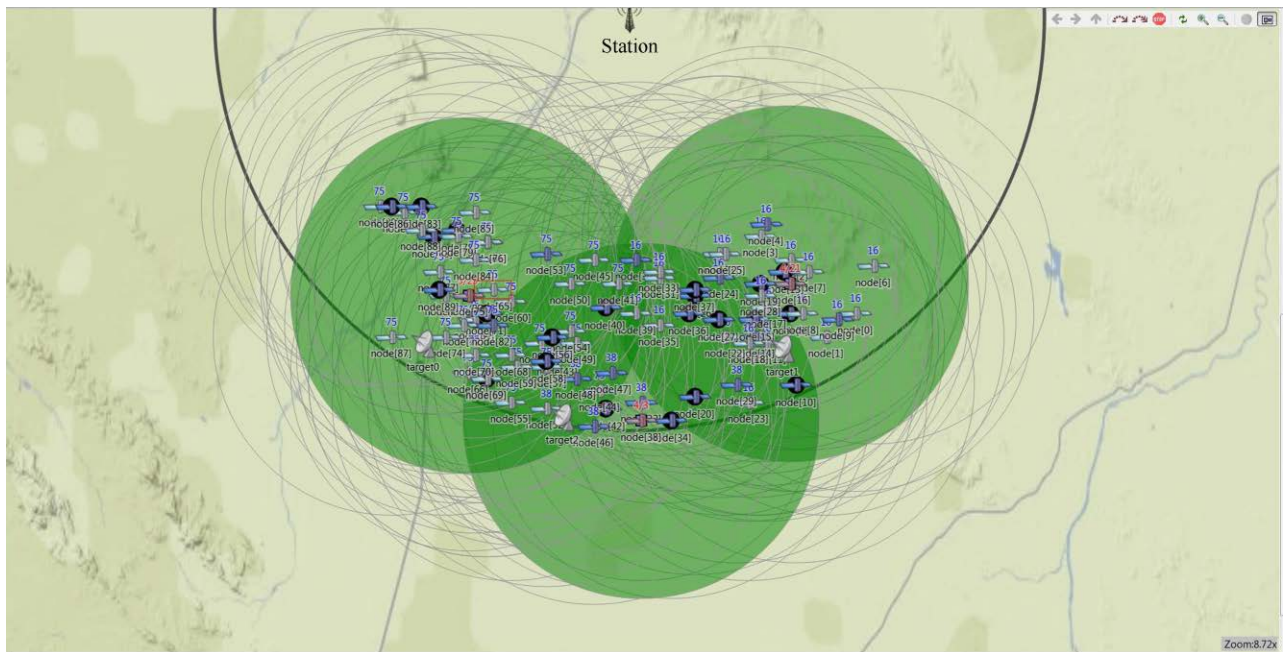


图10 干扰模型下无人机蜂群自组网的网络结构

后网络结构对比. 图 11 为两种类型自组网在拓扑变化后的网络重构时间 (其中横轴表示节点 ID, 纵轴表示节点重新入网并完成路由更新的时间), 从图 11 中可以看出, 无人机蜂群自组网的网络重构速度具有明显的优势.

3.2 网络能耗分析

如图 12 所示为无人机蜂群执行针对单目标的单簇网络, 以及执行针对 2 个目标的双簇网络的生

存时间分析. 其中仿真参数设置为: 无人机的飞行功耗 e 取值为 $225 \text{ W}^{[14]}$, 无人机的总能量设为 $3\ 600e$, 即在关闭无线电通信模块时, 可持续飞行 1 h ; 无人机蜂群的数量为 64; 引领机和侦察机在每 10 ms 内的数据量为 $1\ 024 \text{ bits}$, 每 100 ms 允许一架跟随机发送 $1\ 024 \text{ bits}$ 数据; 在单簇网络中, 设无人机的无线电覆盖范围为 1 km , 在双簇网络中, 设无人机的无线电覆盖范围为 300 m .

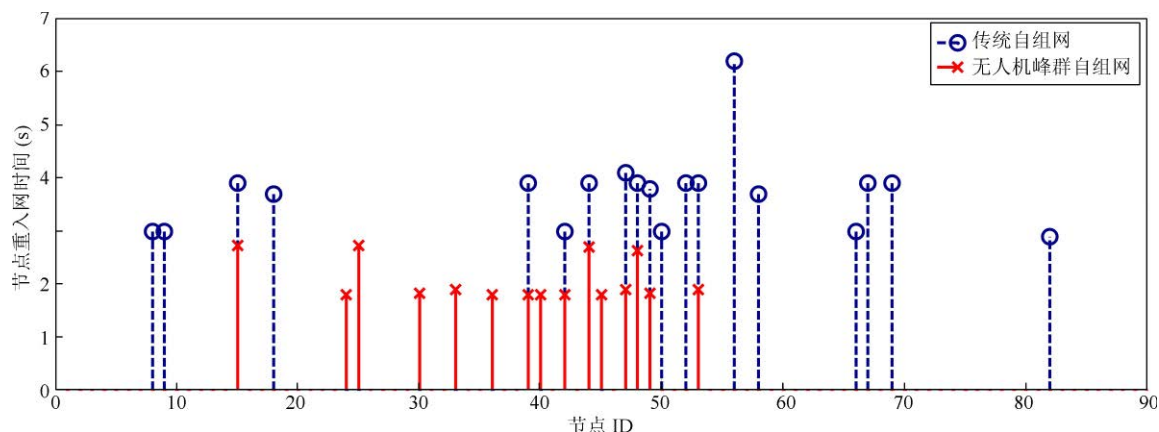


图 11 网络重构时间对比

首先,如图 12 所示,大功率的无线电信号发射消耗了无人机大量的能量,侦察机数量增加使得蜂群网络的生存时间大为降低;其次,通过对比双簇网络的生存时间,虽然引领机与侦察机的数量增加一倍,但无线信号发射能量的降低能够有效延长网络的生存时间。因此,在现实应用中,有必要合理折衷设置侦察机的有效数量以及无线电发射功率来获取更长的无人机蜂群网络的生存时间。

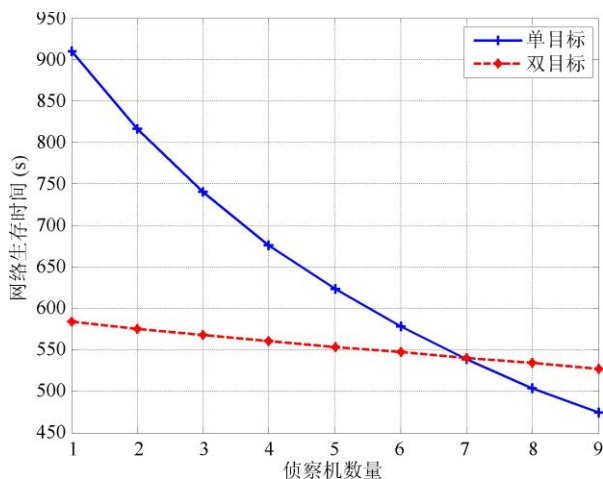


图 12 单目标与多目标任务的网络生存时间对比

在复杂战场环境中,敌方电磁干扰是不可忽略的因素。当面对强电磁干扰时,对比分析无人机两种应对策略下的网络生存时间,一种是增加发射功率维持原有网络的连通性;二是维持发射功率不变,网络分裂为若干个簇。

如图 13 所示为无人机蜂群面对敌方干扰时两种应对策略下的网络生存时间对比。其中参数设置为:敌方干扰噪声比 INR 为 10 dB,网络分裂为 2 个独立的簇。对比图 12 与图 13 可得,电磁干扰会造成无人机蜂群网络生存时间的剧烈下降,但通过网络分裂的应对策略能够获取相对更长的网络生存时间,

是遭遇电磁干扰时的合理应对策略。同时,在现实应用中,受限于低成本无人机功放模块的能力,提高发射功率的能力有限。另外,面对电磁干扰,无人机蜂群遭遇生存危机时,还可以适当减少侦察机的数量以节省无人机蜂群整体的能耗。但电磁干扰不可避免地造成无人机蜂群的网络生存时间下降,因此,在执行作战任务时,需要评估敌方的干扰强度,配置足够饱和数量的无人机,以保证作战效能不降低。

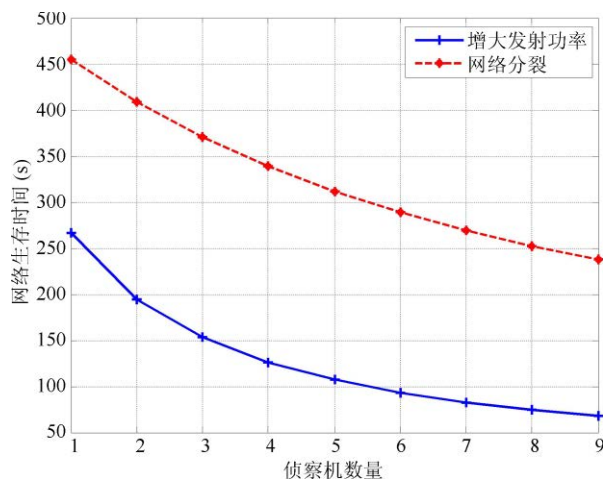


图 13 电磁干扰下两种应对策略的网络生存时间对比

无人机蜂群作战的特点要求单机造价低,不可避免地造成无人机的生存能力弱小,在应对复杂战场环境下的强对抗作战时,无人机蜂群的生存能力将遭受严重威胁(如图 12 与图 13 所示)。启发式无人机蜂群自组网协议具有良好的兼容性和可扩展性,在实际作战应用中,无人机蜂群可以灵活配置有人机实现有人机/无人机蜂群的协同作战,提升无人机蜂群的生存能力,同时有效提升整体作战效能^[23-24]。其中,有人机具有能量充足以及无线电发射接收能力强的特点,适合担任引领机角色。而引领机无线电覆盖能力的增强能够降低自组网的网络管理复杂度,

尤其在面对敌方干扰时,能够有效减少网络分裂的数量,提升无人机蜂群的生存能力.

4 结论

本文基于蜜蜂采蜜群集行为的多角色分工协同机制,提出了一种适用于小型/微型无人机的启发式无人机蜂群自组网协议,包含了无人机蜂群自组网的网络结构设计、角色分工与协同机制、端到端传输、网络与能耗优化等.通过仿真分析验证,相对于传统自组网,启发式无人机蜂群自组网具有结构简单、网络开销小、协同探测时延低、群体生存时间长等特点,适用于饱和攻击等作战场景,也可以推广应用到其他能量受限无人平台自组织网络中.

References

- 1 段海滨,李沛.基于生物群集行为的无人机集群控制[J].科技导报,2017,35(7): 17-25.
- 2 刘宏波,孟进,赵奎.蜂群无人机数据链自组网协议设计[J].火力与指挥控制,2018,43(9): 163-168.
- 3 程晓雅.人工蜂群算法理论及其在通信中的应用研究[D].济南:山东大学,2012.
- 4 郭海洋.基于蜂群算法的无人机群协同飞行策略研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2011.
- 5 武晓龙,王茜,焦晓静.美国小型无人机集群发展分析[J].飞航导弹,2018(2): 31-37.
- 6 周军.无人机蜂群自组网信道接入与相对定位协议研究[D].南京:南京航空航天大学,2017.
- 7 钮伟,黄佳沁,缪礼锋.无人机蜂群对海作战概念与关键技术研究[J].指挥控制与仿真,2018,40(1): 20-27.
- 8 DARPA. Gremlins[R]. Arlington VA: Tactical Technology Office, 2015.
- 9 SEELEY T D. The wisdom of the hive[M]. Massachusetts: Harvard University Press, 1995.
- 10 BASTURK B, KARABOGA D. An Artificial Bee Colony (ABC) algorithm for numeric function optimization[C]// IEEE Swarm Intelligence Symposium, 2006: 3-4.
- 11 张倩.多传感器机动目标状态融合算法研究[D].南京:南京理工大学,2008.
- 12 杨健,董力勇,王鸿,等.应用分层优化法的多协作无人机任务规划方法[J].指挥与控制学报,2019,5(1): 41-46.
- 13 杨晨,张少卿,孟光磊.多无人机协同任务规划研究[J].指挥与控制学报,2018,4(3): 234-248.
- 14 徐马蒙,刘航,夏宁.能量受限的微型无人机移动策略研究[J].电子设计工程,2016,24(20): 56-58.
- 15 尚小富,王玉文,董家志,等.基于能耗参量的拥塞控制算法无人机数据链设计[J].通信技术,2014,47(9): 1037-1040.
- 16 方堃,茹乐,于强强,等.无人机编队信息传输能耗平衡协同设计[J].计算机仿真,2016,33(4): 63-66.
- 17 HEINZELEMAN W R. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks[J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2002, 1(4): 5660-5670.
- 18 姜艳秋.基于人工蜂群的协同干扰任务调度技术的研究[D].南京:南京航空航天大学,2017.
- 19 王俊义. OMNeT++ 网络仿真[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2014.
- 20 任瑶. 移动 Ad hoc 网络中低开销广播算法的研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2016.
- 21 周赫. 一种用于移动自组网的方向性路由协议[D]. 天津: 天津大学, 2007.
- 22 蒲潇. 战术自组网网络结构及分群算法研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
- 23 樊洁茹,李东光.有人机/无人机协同作战研究现状及关键技术浅析[J].无人系统技术,2019,2(1): 39-47.
- 24 李腾.有人/无人机协同编队控制技术研究[D].南京:南京航空航天大学,2017.

郑繁繁 (1986-), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为自组织网络技术.

张立冬 (1978-), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为数据链系统总体设计.

赵浦媛 (1993-), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为通信网络管理与优化.

吕欣 (1994-), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为群体智能技术.

郝明 (1979-), 男, 学士, 研究员, 主要研究方向为数据链系统、物联网技术. 本文通信作者.

E-mail: haoming1000@sina.com