

无人机编队中无线紫外光隐秘通信的能耗均衡算法

赵太飞^{*①②} 林亚茹^① 马倩文^① 郑博睿^{①②}

^①(西安理工大学自动化与信息工程学院 西安 710048)

^②(陕西省智能协同网络军民共建重点实验室 西安 710000)

摘要: 针对强电磁干扰环境下无人机之间的隐秘通信, 该文提出了无人机编队中无线紫外光隐秘通信的能耗均衡算法。该算法能够结合紫外光非直视、低窃听等优点, 克服传统无线电易被监听的缺点, 在均衡能耗的同时为长机收集僚机信息提供可靠保证。通过引入考虑距离和剩余能量的优先级函数, 提出基于分簇机制的改进算法 BEAD-LEACH, 并采用改进算法对无人机随机部署和呈圆形编队部署时进行仿真。仿真结果表明, 在两种部署方式下, 网络中50%节点出现死亡经历的时间分别延长了12%, 16%, 改进算法能够有效地均衡网络的通信能耗, 延长无人机网络的生存时间。

关键词: 紫外光通信; 电磁干扰; 分簇机制; 能耗均衡; 生存周期

中图分类号: TN929.12

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2020)12-2969-07

DOI: 10.11999/JEIT190965

Energy Balance Algorithm for Wireless Ultraviolet Secret Communication in UAV Formation

ZHAO Taifei^{①②} LIN Yaru^① MA Qianwen^① ZHENG Borui^{①②}

^①(*Institute of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China*)

^②(*Shaanxi Civil-Military Integration Key Laboratory of Intelligence Collaborative Networks, Xi'an 710000, China*)

Abstract: In view of secret communication among unmanned aerial vehicles under the strong electromagnetic interference environment, this paper proposes the energy balance algorithm for wireless ultraviolet secret communication in Unmanned Aerial Vehicle (UAV) formation. The proposed algorithm combines the advantages of ultraviolet in non-line-of-sight and low eavesdropping, overcomes the disadvantage of the traditional radio, which can easily be monitored. It can provide reliable assurance for the leader to collect information of wingmen while balancing the energy consumption. The improved algorithm is proposed based on cluster mechanism via introducing the priority function, which considers distance and residual energy. Adopting the improved algorithm to simulate under two scenarios in which UAVs are deployed randomly or UAVs are deployed in circle formation respectively, the simulation results show that the time of 50% death nodes occurring in UAV network is prolonged by 12% and 16% respectively under two types of deployment, and the improved algorithm can effectively balance the communication energy consumption of the network and prolong the survival time of UAV network.

Key words: Ultraviolet communication; Electromagnetic interference; Cluster mechanism; Energy consumption balance; Life cycle

收稿日期: 2019-12-02; 改回日期: 2020-01-20; 网络出版: 2020-11-13

*通信作者: 赵太飞 zhaotafei@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(61971345), 陕西省教育厅服务地方专项计划 (17JF024), 陕西省重点产业链创新计划 (2017ZDCXL-GY-05-03), 西安市碑林区科技计划(GX1921), 西安市科学计划(CXY1835(4))

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61971345), The Scientific Research Program Funded by Shaanxi Provincial Education Department (17JF024), The Shaanxi Key Industry Chain Innovation (2017ZDCXL-GY-05-03), The Science and Technology Plan Project of Xi'an Beilin Area (GX1921), The Xi'an Science Project (CXY1835(4))

1 引言

近年来,无人机以其体积小、重量轻等优势,被广泛应用于各领域。但是由于单个无人机的能力有限,通常采用多机协作的蜂群无人机。蜂群无人机是指一群自主组网协同作业的小型无人机,能有效地提高无人机执行各种复杂任务的能力^[1]。在军事方面,蜂群无人机可以被广泛用于执行各种军事任务,包括监视、侦察、攻击以及危险评估等^[2]。在民事方面,蜂群无人机可以用于航拍测绘、抢险救援、电力巡检以及农业植保等方面。目前,蜂群无人机在军用领域的广泛应用使得机间的通信安全与通信能耗问题也备受关注。

蜂群无人机协同的基础是各机之间能够保持可靠通信,只有建立稳定可靠的通信,才能提高编队集群协同完成任务的能力。无线紫外光通信主要是以200~280 nm波段的“日盲”紫外光作为传输媒介,大气分子对紫外光的散射作用,使其具有非直视传输的特点^[3],此外“日盲”段紫外光兼顾背景噪声小、抗电磁干扰能力强、低窃听等优点^[4,5],使其可以适应复杂的传输环境,作为强电磁干扰环境下集群内部的隐秘通信方式,为长机收集僚机信息提供可靠保障。

一般引入分簇的拓扑管理机制,可以有效均衡无人机编队网络的通信能耗。选取若干簇首无人机,管理并收集簇内僚机成员的信息,可以降低整个无人机网络的负载消耗。文献^[6]考虑节点移动性、节点度以及电功率等因素,采用加权分簇算法(Weighted Clustering Algrithom, WCA),分析了不同算法下簇首个数和簇首保持时间,但是没有分析不同算法对无人机网络通信能耗的影响。文献^[7]基于距离提出成簇策略,但是未考虑能量耗尽对网络通信的影响。文献^[8]考虑节点的自身剩余能量以优化簇首选举概率,但是未考虑节点的实时位置对簇首选举的影响。

结合上述分析,本文提出无人机编队中无线紫外光隐秘通信的能耗均衡算法。基于无人机编队的分簇模型以及无线紫外光能量消耗模型,并针对LEACH(Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy)簇首选举的随机性问题,引入考虑节点位置和剩余能量的优先级函数,提出改进算法BEAD-LEACH(Based on Energy And Distance LEACH),推导出软阈值门限实现对簇首选举阶段的改进,从而达到延长网络生存期和平衡无人机网络能耗的目的。

2 无线紫外光非直视通信模型

大气中气溶胶粒子、大气分子等对无线紫外光

的散射作用会使信号发生衰减,因此接收端信号主要来源于单次散射^[9],本文主要以单次散射链路模型为研究对象。

2.1 紫外光非直视单次散射模型

图1为无线紫外光单次散射链路模型^[10], β_T 和 β_R 分别是紫外收发装置的仰角, θ_T 是发送装置的光束发散半角, θ_R 是接收装置的接收视场半角, r 是收发装置 R_X 和 T_X 间的水平距离, r_2 和 r_1 分别为收发装置到公共散射体 V 的距离,其中 $\theta_s = \beta_T + \beta_R$ 。能量为 E_T 的紫外光光束经过体积元 δV 被散射至接收端,可以得到单位面积上接收的能量并记为: δE_R 。对 δE_R 在公共体积 V 上进行积分,可以得到接收总能量为^[11]

$$E_R = \frac{E_T k_s P(\mu) A_r V \sin^4 \theta_s \exp \left[-\frac{k_e r}{\sin \theta_s} (\sin \beta_T + \sin \beta_R) \right]}{2\pi r^4 \sin^2 \beta_T \sin^2 \beta_R (1 - \cos \theta_T)} \quad (1)$$

其中, E_R 表示接收到的总能量, $P(\mu)$ 为散射相函数, $\mu = \cos(\theta_s)$, ζ 是接收装置到体积元 δV 之间的向量与接收视场角轴线之间的夹角, k_e 为大气散射系数, Ω_t 为发射端发射光束的立体角。

2.2 紫外光非直视单次散射链路损耗

定义路径损耗为 $L = E_T/E_R$,根据文献^[11]中对体积 V 的近似方法,将相关参数代入式(1)可以得到路径损耗为

$$L = \frac{3r \sin \beta_T \sin^2 \beta_R (1 - \cos \theta_T) \exp \left[\frac{k_e r (\sin \beta_T + \sin \beta_R)}{\sin(\theta_s)} \right]}{k_s P(\mu) A_r \theta_T^2 \theta_R \sin \theta_s (3\sin^2 \beta_R + \theta_R^2 \sin^2 \beta_T)} \quad (2)$$

一般近距离通信时多采用简化的路径损耗计算式^[12]

$$L = \xi r^\alpha \quad (3)$$

其中, ξ 是路径损耗因子, α 是路径损耗指数,两者都是与收发仰角有关的参数。由于式(2)计算参数复杂,因而采用简化的路径损耗式(3)。

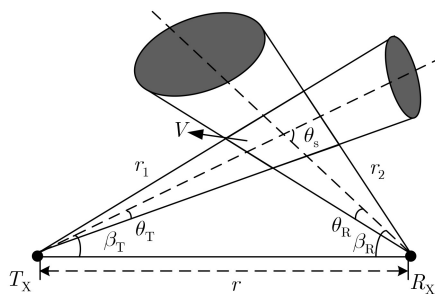


图1 无线紫外光非直视单次散射链路模型^[10]

3 蜂群无人机的分簇模型

3.1 分簇模型

蜂群无人机的紧凑的集群编队, 蜂群分簇的思想主要是对目标区域划分簇群。通常, 编队控制策略分为3种模式: 集中式控制、分布式控制以及分层式控制^[13], 而分层式控制兼顾了集中式控制和分布式控制的优点。如图2所示, 采用分层式控制方式将蜂群无人机划分成3层架构, 即长机、簇首僚机、成员僚机。首先, 选取符合条件的若干僚机作为簇首, 用于收集簇内成员僚机的数据, 其次, 簇首僚机将簇内的数据收集之后, 将信息融合后传输至长机, 最后, 长机根据收集到的信息进行下一步的决策工作, 从而降低无人机的负载消耗。

3.2 能量消耗模型

无人机编队网络采用无线紫外光能量消耗模型, 能量衰减满足 $E_{\text{los}} = E_T (1 - 1/L)$, 因此当发送端发送能量为 E_T 的脉冲时, 经过距离 r 到达接收端, 消耗的能量由发射数据损耗和衰减损耗两部分构成^[14], 可以表示为

$$E_{\text{Tx}} = lE_T \left(2 - \frac{1}{L} \right) \quad (4)$$

同理, 位于接收端的无人机接收 l bit 数据消耗的能量为

$$E_{\text{Rx}} = lE_R \quad (5)$$

此外, 簇首无人机还需要将簇内成员的信息收集, 通过进一步的数据融合消除数据的冗余, 因此簇首无人机融合簇内信息所需要的总能量为

$$E_f = (m + 1) lE_{\text{DA}} \quad (6)$$

其中, m 表示簇内的成员僚机个数, E_{DA} 表示簇首僚机平均融合每比特信息所消耗的能量。

3.3 改进算法

LEACH算法采用轮循的工作方式。在每一轮开始时, 僚机节点在 $0 \sim 1$ 之间产生随机数并与选举门限进行比较, 若节点产生的随机数小于选举门限, 则节点在本轮中当选簇首^[15]。但是LEACH算法在簇首选举时具有随机性, 且没有考虑网络热区

问题^[16], 因此会导致簇首分布不均或簇首位置过偏。如果簇首僚机离长机较远, 就会由于传输距离过远而过度消耗能量, 进而导致无人机失效死亡。

针对LEACH算法在簇首选择过程中的随机性, 本文从节点自身状态出发, 主要考虑每轮中无人机自身剩余能量和与长机的距离, 对簇首选举阶段进行改进。首先定义优先级函数

$$C_i = w_1 \cdot \frac{E_i(R)}{\overline{E(R)}} + w_2 \cdot \frac{\overline{\text{Dist}(R)}}{\text{Dist}_i(R)} \quad (7)$$

其中, w_1 和 w_2 分别为能量权重因子和距离权重因子, 且满足 $w_1 + w_2 = 1$ 。 $\text{Dist}_i(R)$, $E_i(R)$ 分别为第 R 轮僚机 i 至长机的距离和其剩余能量, $\overline{E(R)}$, $\overline{\text{Dist}(R)}$ 分别为第 R 轮所有存活僚机的平均剩余能量和所有存活僚机至长机的平均距离。从优先级函数可以看到僚机 i 剩余能量越多, 离长机越近, 成为簇首僚机的优先级越高。引入优先级函数后, 可以得到第 R 轮每个僚机当选簇首僚机的概率为

$$p_i = p \cdot C_i \quad (8)$$

其中, p 表示簇首僚机在无人机编队中所占的期望比例, 进而得到软阈值门限为

$$T_i(n) = \begin{cases} \frac{p_i}{1 - p_i \cdot \left(R \bmod \frac{1}{p_i} \right)}, & n \in G \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (9)$$

其中, G 表示 $1/p_i$ 轮未当选簇首僚机的集合。每一轮的选举阶段结束后, 簇首僚机向整个蜂群编队中广播消息, 成员僚机根据通信代价最小决定归属哪个簇, 并向相应的簇首僚机发送入簇请求。簇首僚机接收到请求信息之后, 为簇内的成员僚机分配通信时隙, 簇内进入数据传输阶段, 簇首僚机收集并融合各成员僚机的状态信息, 并将融合信息发送至长机等待长机做出下一步决策, 至此, 一轮数据传输结束。之后, 采用轮循方式重复上述过程。

4 仿真分析

蜂群编队下的每个无人机均搭载紫外光半球形LED阵列作为光源, 采用OOK调制方式, 数据调制速率设置为 $R_b = 10$ kbps, 仿真区域设置为 $100 \times 100 \text{ m}^2$, 网络生存周期 $R_{\text{max}} = 2000$ 。分别在无人机随机部署和呈圆形编队部署的不同编队场景下进行仿真。假设所有僚机是同构的, 在空间的同高度处于编队保持状态, 即在算法迭代过程中网络拓扑不发生变化。具体仿真参数如表1所示。

4.1 无人机随机部署

无人机随机部署一般适用于无人机紧急完成任务时, 选取长度为1000 bit的数据包进行数据传

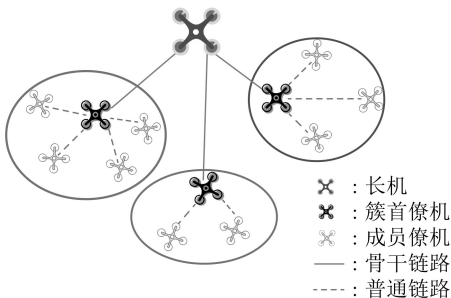


图2 蜂群无人机分簇示意图

输。一般认为网络高效期是指协议从开始运行到50%节点出现死亡所经历的时间，网络在高效期内具有良好的监测性能^[17]，因此选择高效期内 $R=1200$ 时的无人机节点分布与图3(a)对比分析，此时网络中已经出现死亡节点，且死亡节点在区域各个位置均有分布，并且通过优先级函数选举出若干无人机作为簇首。

从图4(a)中可以看到，在整个数据传输过程中，BEAD-LEACH算法消耗能量的速度明显慢于

LEACH算法，能够有效地节省无人机编队网络的能量，达到均衡能耗的目的。从图4(b)中可以看到，改进算法可以有效地延长网络的生存时间，在 $R=2000$ 时，LEACH算法中的所有节点由于能量消耗殆尽全部死亡，而改进算法通过考虑节点自身条件，优先选择剩余能量多和距离长机近的成员僚机作为簇首节点，可以避免成员僚机由于距离过远导致过度的能量消耗。

对网络的3个关键生存期进行分析，即1%节点、50%节点、90%节点出现死亡所经历的时间。从图5中可以看到改进算法能够有效地延长3个关键生存期的时间周期，其中，1%节点出现死亡所经历的时间延长了13%，50%节点和90%节点出现死亡所经历的时间均延长了12%。

图6(a)、图6(b)仿真结果表明，当迭代轮数一定时，数据包长度越大，网络能量消耗越快，存活节点数越少。数据包长度一定时，网络剩余能量和存活节点数均与迭代轮数呈负相关。图7反映了不同数据包长度下1%节点、50%节点以及90%节点出现死亡所经历的时间，与数据包长度为1000 bit相比，数据包长度为1500 bit时，1%节点、50%节点以及90%节点死亡所经历的时间分别缩短了34%，30%和31%；在数据包长度为2000 bit时，1%节

表 1 仿真参数设置

参数	数值
紫外光波长 λ (nm)	260
节点个数 n	100
节点初始能量 E_0 (J)	300
发送能量 E_T (μ J)	80
接收能量 E_R (μ J)	80
融合能量 E_{DA} (μ J)	8
发收仰角 β_T, β_R ($^\circ$)	40
发散半角与接收视场半角 θ_T, θ_R ($^\circ$)	15
路径损耗因子 ξ	1.69×10^8
路径损耗指数 α	1.3498
能量和距离权重因子 w_1, w_2	0.5

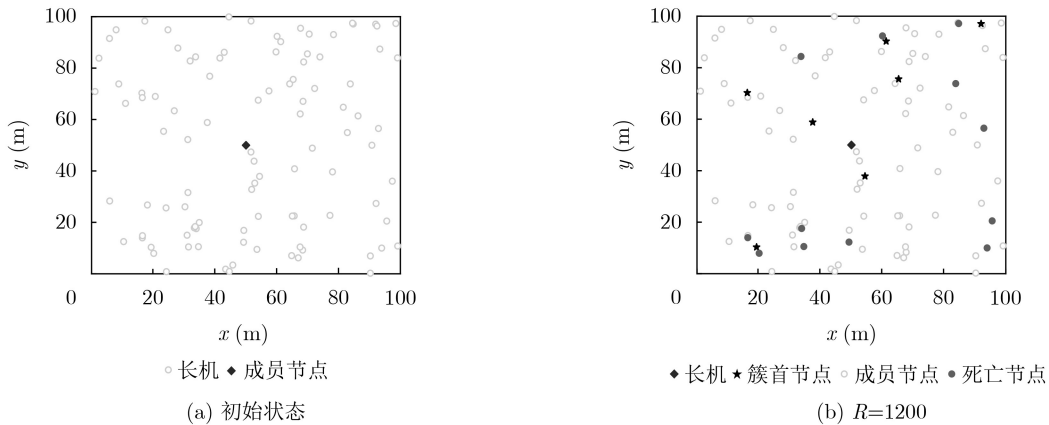


图 3 随机部署时的节点及簇首分布

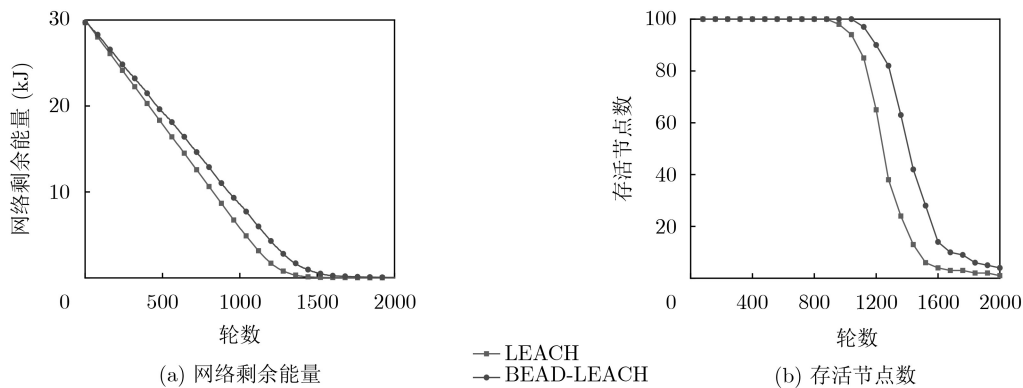


图 4 随机部署时不同算法的网络性能对比

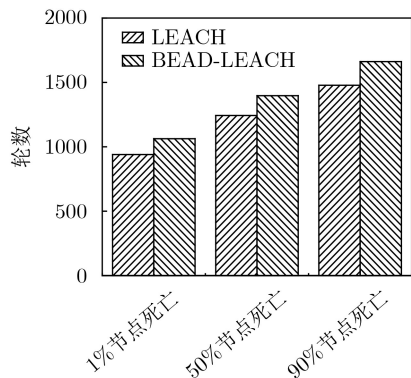


图5 随机部署时不同算法的网络生存期

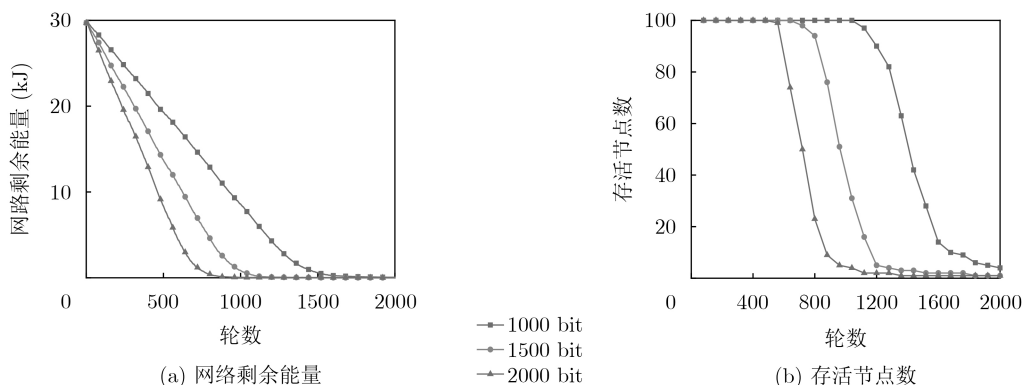


图6 随机部署时不同数据包长度的网络性能

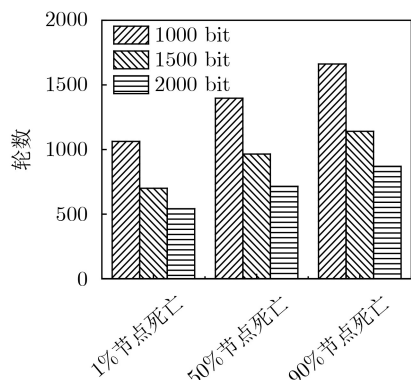


图7 随机部署时不同数据包长度的网络生存期

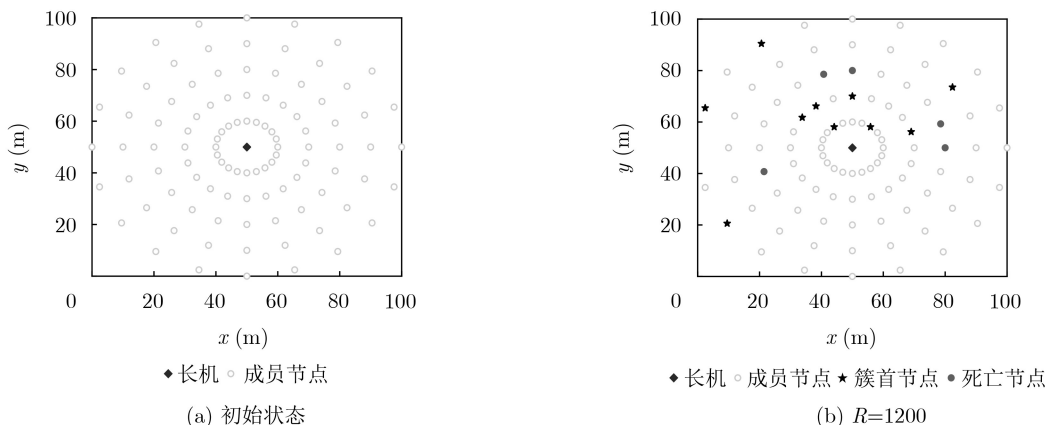


图8 圆形编队时的节点及簇首分布

点、50%节点以及90%节点死亡所经历的时间分别缩短了49%, 48%和47%。

4.2 无人机圆形编队部署

无人机呈圆形编队部署多用于特定的场景下, 比如空中合围、定点侦察等军事场景。对图8(a)、图8(b)对比分析可以看出, 在网络初始运行时僚机以长机为中心构成圆形编队。在网络运行至 $R=1200$ 时, 网络中若干节点因为过度的能量消耗导致节点失效死亡。僚机簇首多分布于靠近长机的位置, 由于距离长机越近, 成为簇首的优先级越高。

图9(a)、图9(b)的仿真结果表明网络的剩余能量和存活节点数均与迭代轮数呈负相关, 且当迭代轮数一定时, BEAD-LEACH算法在网络剩余能量和存活节点数两个性能指标均优于LEACH算法。由于引入优先级函数, 可以避免网络热区问题, 从而有效均衡网络的能量消耗。图10的仿真结果表明, BEAD-LEACH算法下1%节点、50%节点以及90%节点死亡所经历的时间, 分别比LEACH算法延长了23%, 16%以及12%, 通过局部地延长3个网络关键期以达到从全局延长无人机网络生命周期的目的。

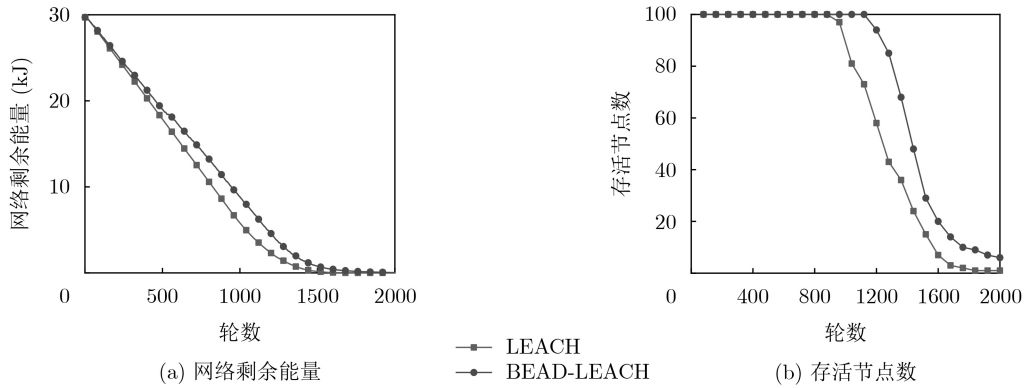


图9 圆形编队时不同算法的网络性能对比

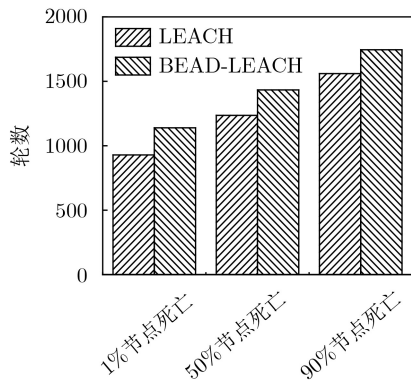


图10 圆形编队时不同算法的网络生存期

图11(a)、图11(b)的仿真结果表明迭代轮数一定时，网络剩余能量和存活节点数均随着数据包长度的增加而减小，分析原因可知，数据包长度越大，能量消耗越多，网络中的节点由于能量过度消耗导致节点失效的速度越快。图12表明，与数据包长度为1000 bit相比，数据包长度为1500 bit时网络1%节点、50%节点以及90%节点死亡经历的时间分别缩短了41%，33%以及32%；当数据包长度为2000 bit时，网络1%节点、50%节点以及90%节点死亡经历的时间均缩短了51%。

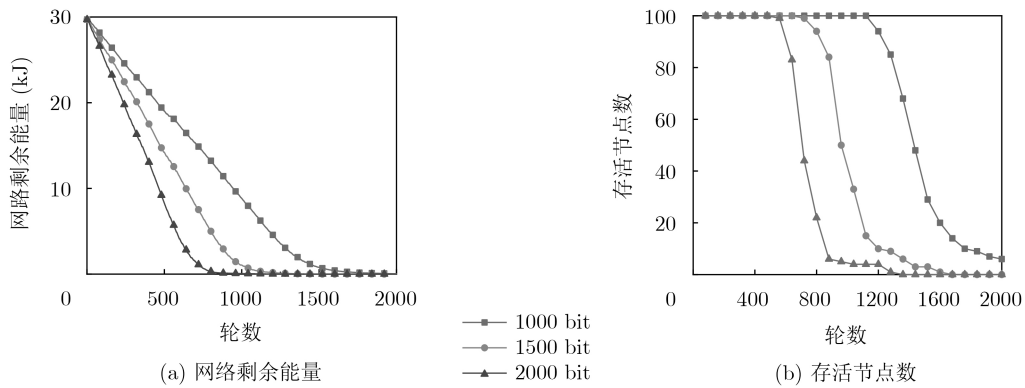


图11 圆形编队时不同数据包长度的网络性能

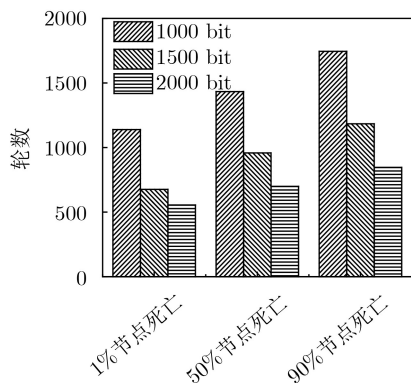


图12 圆形编队时不同数据包长度的网络生存期

5 结论

本文通过引入考虑距离和剩余能量的优先级函数，推导出软阈值选举门限，并结合紫外光隐秘通信的优点，提出了无人机编队中无线紫外光隐秘通信的能耗均衡BEAD-LEACH算法。在不同编队场景下，网络剩余能量和存活节点数两个性能指标均得到提高，且能有效地延长网络的3个关键期，即1%节点、50%节点以及90%节点出现死亡所经历的时间。通过有效的均衡能量并延长无人机网络生命周期，可以为长机收集僚机信息并及时感知战场态势争取更多时间，从而大大提高无人机编队协同作战效率。

参 考 文 献

- [1] BEKMEZCI I, SAHINGOZ O K, and TEMEL Ş. Flying Ad-Hoc Networks (FANETs): A survey[J]. *Ad Hoc Networks*, 2013, 11(3): 1254–1270. doi: [10.1016/j.adhoc.2012.12.004](https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2012.12.004).
- [2] WU Husheng, LI Hao, XIAO Renbin, *et al.* Modeling and simulation of dynamic ant colony's labor division for task allocation of UAV swarm[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2017, 491: 127–141. doi: [10.1016/j.physa.2017.08.094](https://doi.org/10.1016/j.physa.2017.08.094).
- [3] 李霁野, 邱柯妮. 紫外光通信在军事通信系统中的应用[J]. *光学与光电技术*, 2005, 3(4): 19–21. doi: [10.3969/j.issn.1672-3392.2005.04.007](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-3392.2005.04.007).
LI Jiye and QIU Keni. Military application of UV communication[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2005, 3(4): 19–21. doi: [10.3969/j.issn.1672-3392.2005.04.007](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-3392.2005.04.007).
- [4] ARDAKANI M H and UYSAL M. Relay-assisted OFDM for ultraviolet communications: performance analysis and optimization[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2017, 16(1): 607–618. doi: [10.1109/TWC.2016.2626438](https://doi.org/10.1109/TWC.2016.2626438).
- [5] SUN Yu, GONG Chen, XU Zhengyuan, *et al.* Link gain and pulse width broadening evaluation of non-line-of-sight optical wireless scattering communication over broad spectra[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(3): 7900212. doi: [10.1109/JPHOT.2017.2707468](https://doi.org/10.1109/JPHOT.2017.2707468).
- [6] ZANG Chunhua and ZANG Shouhong. Mobility prediction clustering algorithm for UAV networking[C]. 2011 IEEE GLOBECOM Workshops (GC Wkshps), Houston, USA, 2011: 1158–1161. doi: [10.1109/GLOCOMW.2011.6162360](https://doi.org/10.1109/GLOCOMW.2011.6162360).
- [7] WANG Tianshu, ZHANG Gongxuan, YANG Xichen, *et al.* A trusted and energy efficient approach for cluster-based wireless sensor networks[J]. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2016: 3815834. doi: [10.1155/2016/3815834](https://doi.org/10.1155/2016/3815834).
- [8] WU Wenliang, XIONG Naixue, and WU Chunxue. Improved clustering algorithm based on energy consumption in wireless sensor networks[J]. *IET Networks*, 2017, 6(3): 47–53. doi: [10.1049/iet-net.2016.0115](https://doi.org/10.1049/iet-net.2016.0115).
- [9] LUETTGEN M R, SHAPIRO J H, and REILLY D M. Non-line-of-sight single-scatter propagation model[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1991, 8(12): 1964–1972. doi: [10.1364/JOSAA.8.001964](https://doi.org/10.1364/JOSAA.8.001964).
- [10] ZUO Yong, XIAO Houfei, WU Jian, *et al.* A single-scatter path loss model for non-line-of-sight ultraviolet channels[J]. *Optics Express*, 2012, 20(9): 10359–10369. doi: [10.1364/OE.20.010359](https://doi.org/10.1364/OE.20.010359).
- [11] XU Zhengyuan, DING Haipeng, SADLER B M, *et al.* Analytical performance study of solar blind non-line-of-sight ultraviolet short-range communication links[J]. *Optics Letters*, 2008, 33(16): 1860–1862. doi: [10.1364/OL.33.001860](https://doi.org/10.1364/OL.33.001860).
- [12] CHEN Gang, XU Zhengyuan, DING Haipeng, *et al.* Path loss modeling and performance trade-off study for short-range non-line-of-sight ultraviolet communications[J]. *Optics Express*, 2009, 17(5): 3929–3940. doi: [10.1364/OE.17.003929](https://doi.org/10.1364/OE.17.003929).
- [13] TANG Shuyan, QIN Zheng, and XIN Jiankuan. Collaborative task assignment scheme for multi-UAV based on cluster structure[C]. 2010 Second International Conference on Intelligent Human-machine Systems and Cybernetics, Nanjing, China, 2010: 285–289. doi: [10.1109/IHMISC.2010.171](https://doi.org/10.1109/IHMISC.2010.171).
- [14] 赵太飞, 许杉, 屈瑶, 等. 基于无线紫外光隐秘通信的侦察无人机蜂群分簇算法[J]. *电子与信息学报*, 2019, 41(4): 967–972. doi: [10.11999/JEIT180491](https://doi.org/10.11999/JEIT180491).
ZHAO Taifei, XU Shan, QU Yao, *et al.* Cluster-based algorithm of reconnaissance UAV swarm based on wireless ultraviolet secret communication[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(4): 967–972. doi: [10.11999/JEIT180491](https://doi.org/10.11999/JEIT180491).
- [15] LIU Xiaoyang. Simulation and analysis of an improved LEACH algorithm in wireless sensor network[C]. Proceedings of SPIE 8878, Fifth International Conference on Digital Image Processing, Beijing, China, 2013: 43. doi: [10.1117/12.2030941](https://doi.org/10.1117/12.2030941).
- [16] 张小波, 程良伦, ZHU Quanmin. SAHRC: 一种基于分簇的无线传感器网络路由控制算法[J]. *电子与信息学报*, 2011, 33(8): 2013–2017. doi: [10.3724/SP.J.1146.2010.01270](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2010.01270).
ZHANG Xiaobo, CHENG Lianglun, and ZHU Quanmin. SAHRC: A cluster-based routing control protocol for wireless sensor network[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(8): 2013–2017. doi: [10.3724/SP.J.1146.2010.01270](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2010.01270).
- [17] 温佩芝, 许晨蛟, 邓珍荣, 等. 多级异构无线传感器网络分簇路由协议[J]. *计算机工程与设计*, 2016, 37(6): 1471–1477. doi: [10.16208/j.issn1000-7024.2016.06.010](https://doi.org/10.16208/j.issn1000-7024.2016.06.010).
WEN Peizhi, XU Chenjiao, DENG Zhenrong, *et al.* Cluster-routing protocol for heterogenous multi-level wireless sensor networks[J]. *Computer Engineering and Design*, 2016, 37(6): 1471–1477. doi: [10.16208/j.issn1000-7024.2016.06.010](https://doi.org/10.16208/j.issn1000-7024.2016.06.010).

赵太飞: 男, 1978年生, 教授, 研究方向为无线紫外光通信、无线光通信与组网。

林亚茹: 女, 1996年生, 硕士生, 研究方向为无人机组网通信。

马倩文: 女, 1996年生, 硕士生, 研究方向为无人机编队。

郑博睿: 男, 1981年生, 讲师, 研究方向为无人机飞行控制。

责任编辑: 陈 倩