

复杂电磁干扰环境下频谱感知无人机集群的高效自适应信道交会方案设计与分析

陈佳美, 霍乾琦, 李玉峰*, 王宇鹏

沈阳航空航天大学电子与信息工程学院, 辽宁 沈阳

收稿日期: 2026年3月1日; 录用日期: 2026年3月23日; 发布日期: 2026年4月2日

摘要

在现代复杂电磁环境中, 复杂电磁干扰对频谱感知无人机集群的信道交会构成了严峻挑战。为此, 本文提出了一种面向频谱感知无人机集群的高效自适应信道交会设计方案, 以应对复杂干扰环境。该方案首先提出低干扰信道扩展的预处理机制, 提高低干扰信道的访问频次; 接着, 设计了一种自适应交会算法, 该算法采用跳频-等待双模式生成序列以实现两两交会, 并结合信息交换协作机制, 引导集群同步切换至全局公共信道, 从而大幅提高多机交会效率。理论分析证明, 该算法存在确定的最大交会时间, 且在多无人机集群场景下能够保证交会的确定性和高效性。仿真结果表明, 所提算法在最大交会时间、平均交会时间以及系统能耗方面均显著优于现有方法, 为频谱感知无人机集群的可靠通信提供了有效路径。

关键词

频谱感知无人机, 信道交会, 电磁干扰, 自适应交会

Design and Analysis of an Efficient Adaptive Channel Rendezvous Scheme for Spectrum-Aware UAV Swarms in Complex Electromagnetic Interference Environments

Jiamei Chen, Qianqi Huo, Yufeng Li*, Yupeng Wang

School of Electronics and Information Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang Liaoning

Received: March 1, 2026; accepted: March 23, 2026; published: April 2, 2026

*通讯作者。

文章引用: 陈佳美, 霍乾琦, 李玉峰, 王宇鹏. 复杂电磁干扰环境下频谱感知无人机集群的高效自适应信道交会方案设计与分析[J]. 无线通信, 2026, 16(1): 1-16. DOI: 10.12677/hjwc.2026.161001

Abstract

In modern complex electromagnetic environments, complex electromagnetic interference poses severe challenges to the channel rendezvous of spectrum-aware unmanned aerial vehicle (UAV) swarms. To address this issue, this paper proposes an efficient adaptive channel rendezvous design scheme for spectrum-aware UAV swarms to cope with complex interference environments. First, the scheme puts forward a preprocessing mechanism for low-interference channel expansion to increase the access frequency of low-interference channels. On this basis, an adaptive rendezvous algorithm is designed. The algorithm adopts a frequency hopping-waiting dual-mode sequence generation strategy to achieve pairwise rendezvous, and is combined with a cooperative information exchange mechanism to guide the swarm to synchronously switch to the global common channel, thus greatly improving the rendezvous efficiency of multi-UAV systems. Theoretical analysis proves that the proposed algorithm has a deterministic maximum time-to-rendezvous (MTTR), and can guarantee the determinacy and high efficiency of rendezvous in multi-UAV swarm scenarios. Simulation results show that the proposed algorithm significantly outperforms state-of-the-art methods in terms of maximum time-to-rendezvous, average time-to-rendezvous (ATTR) and system energy consumption, which provides an effective approach for reliable communication of spectrum-aware UAV swarms.

Keywords

Spectrum-Aware Unmanned Aerial Vehicle, Channel Rendezvous, Electromagnetic Interference, Adaptive Rendezvous

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

无人机(unmanned aerial vehicle, UAV)集群协同作业已成为现代复杂任务执行的重要辅助[1]。然而,高动态复杂的电磁环境使得无人机集群通信面临极大挑战。此外,无人机用户具备尤为显著的快速移动特性,在执行任务期间,它们常常要以极高速度在复杂环境中来回穿梭[2]。这种高速移动的情况,致使它们的位置与状态持续改变,进而让交会的难度大幅提升,当下迫切需要研发有效方案来应对解决。只能频谱感知无人机可以在复杂电磁环境中动态感知与共享干扰以外的空闲频谱资源,为无人机集群通信提供灵活的频谱资源[3]。因此,带有频谱感知功能的无人机集群网络是解决无人机集群复杂干扰问题的有效手段。其可以在无固定基础设施、无固定频谱的情况下[4],实现通感一体化无人机网络的动态构建,对关键任务集群通信等诸多应用具有重要意义。

具备频谱感知功能的无人机可以在复杂电磁干扰环境下动态访问可用信道以及低干扰信道,并通过同一公共信道与集群内其他无人机相遇并建立通信链路。该过程称为“信道交会”。如何在短时间内找到这样的公共信道并完成交会对于无人机集群通信至关重要[5]。目前,基于信道跳频(channel hopping, CH)序列的盲交会策略成为无人机网络实现交会的首选方法[6][7]。无人机首先感知可用频谱,然后依据预设的CH序列在可用信道间进行切换,当发送者和接收者同步切换至同一信道时,交会过程完成。交会过程如图1所示,两个无人机在时隙6同时切换至信道3,完成交会。现有的基于CH序列的盲交会算法按

网络结构大致可以分为集中式和分布式两类[8]。集中式算法假设存在一个中央控制器来协助交会过程。虽然该系统易于实现，但它的可扩展性和鲁棒性较差，容易出现单点故障导致通信中断。而分布式交会算法是去中心化的，各个无人机用户不依赖公共控制，可以仅通过自身算法完成信道交会，因此，分布式算法的研究是更需重视的。

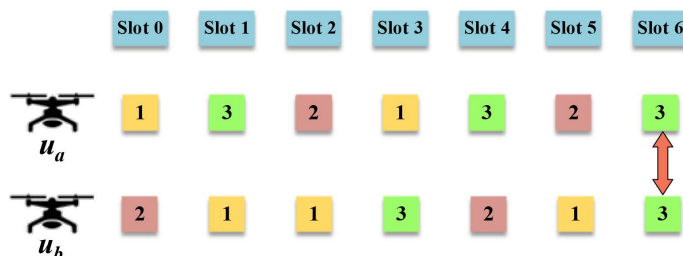


Figure 1. Example of the UAV channel rendezvous process
图 1. 无人机信道交会过程示例

当今学者已提出很多基于 CH 序列的分布式盲交会算法。文献[9]提出了基于素数的移动遍历指针算法 PMTP，该算法在拥有较高信道交会效率的同时，保证了低水平的能耗。文献[10]针对易冲突无线网络提出分布式信道交会问题，设计有限交会延迟的抗冲突分布式交会算法，并通过理论分析与数值模拟证明其性能。文献[11]提出基于对称角色模型的 K 组随机信道跳频(K-RCH)协议，通过分组同步跳频模式与多轮交会提升成功概率，在异构信道环境下显著缩短交会时间。文献[12]提出双信道交会算法 IDRDS-CMM 及多信道算法 C-MTP，通过优化信道跳频序列设计，将首次交会时间上界显著降低至接近当前最优算法的 1/4。然而，以上交会算法普遍针对静止用户设计，所有认知用户访问信道范围相同，即假定信道对称。但实际上，无人机用户的快速时空变化特性导致不同无人机用户可访问的信道范围往往存在差异。因此，以上算法对于高速移动的无人机场景不能适用。

MTP 算法依赖两个不同移动速率的指针交替移动来发现彼此[13]，这减少了每个无人机都要具备感知一系列连续信道的需求。然而，以上算法交会延迟较高，交会效率较低，无法适用于动态性极高的无人机集群网络。E-AHW 算法利用无人机的 ID 来确保快速交会[14]。CBH 算法将无人机用户的 ID 转换为不同的位串，并利用这些位串构造序列进而实现交会[15]。L-PDP 算法在不需要使用无人机用户的 ID 的同时[16]，还可将交会时间优化至理想的分集。然而，上述交会算法未考虑信道受到的干扰，假定信道均匀，即假定所有无人机用户以相同概率访问所有信道。实际上，复杂环境中的无人机用户往往面临复杂电磁干扰，进而导致不同信道可能存在非均匀的干扰。低干扰信道利于高效建立通信链路，高干扰信道则可能导致信息传输失效。

综上所述，复杂动态环境下，将无人机集群用户所在信道考虑成非对称且非均匀信道才更加合理。因此，本文提出一种复杂电磁干扰环境下具有频谱感知功能的无人机集群的高效自适应信道交会方案。该算法将一对无人机用户分成跳频用户和等待用户两种模式，根据不同的跳频模式生成相应的 CH 序列。针对信道的异构干扰，将信道按干扰值大小降序排列，使无人机用户更频繁地跳转到更优信道。通过提高优质信道的访问频率，该方案可使无人机用户以更高的概率在高质量信道上实现交会。

本文的主要贡献如下。首先，由于不同信道受到的干扰不同，同时无人机的动态性极高导致不同信道可用性不同，因此提出低干扰信道扩展预处理机制，提高低干扰信道在集合内的占比，将扩展得到的信道子集应用于所提出的信道交会算法，使算法具备对复杂干扰环境的适配能力。然后，提出一种多无人机干扰自适应协作跳频-等待交会算法(Interference-Adaptive Cooperative Hop-and-Wait Rendezvous for Multi-UAV, IACHR-M)，融入双模式信道序列生成与信息交换协作机制与同步切换来加速交会过程。同

时,从理论上证明了 IACHR-M 算法存在最大交会时间。最后,进行大量的模拟,以验证所提出的 IACHR-M 算法相较于传统交会算法的有效性。

本文的其余部分结构如下。第 2 节给出系统模型,包括网络模型、干扰模型以及问题描述;第 3 节提出低干扰信道扩展预处理机制;第 4 节提出无人机集群协作自适应交会算法并对其理论性能进行了分析;第 5 节通过仿真验证算法有效性;第 6 节总结研究内容并展望未来研究方向。

2. 系统模型

2.1. 网络模型

假设一个由多无人机集群 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_i, \dots, v_M\}$, ($M \geq 2$) 组成的网络。其工作在 N 个不重叠的信道,信道集合表示为 $C = \{c_1, c_2, \dots, c_j, \dots, c_N\}$, ($N \geq 2$)。对于任意无人机 $v_i \in V$, 假设其配备一个能够感知信道状态并支持跨信道切换的半双工无线电。因此,无人机用户具有信道切换和运动控制的能力。该无人机集群网络的飞行区域限定在一个 $X_l \times X_l$ 的矩形区域内,如图 2 所示。任意无人机 $v_i \in V$ 初始位置随机,在飞行区域内按照随机移动模型飞行。且每个无人机的频谱感知范围为一个以其位置为圆心,以 r_i 为半径的圆。假设每架无人机只能感知其感知范围 r_i 内的部分可访问频谱,即 v_i 能感知的信道集合 C_i 为整个信道集合 C 的子集,即 $C_i \in C$ 。该范围内两架或多架无人机只能感知部分重叠信道。为不失一般性,假设任意一对位于彼此感知范围内的无人机共享至少一个公共可用信道。

系统采用基于时隙的架构设计,其中每个时隙的时长均保持固定。设定最小时隙长度为某一特定值 τ , 这一长度足以确保相邻的无人机用户能够顺利完成包括信标发送、握手协议等在内的通信链路建立流程。进一步,将实际应用的时隙长度设定为最小时隙长度的两倍,即 $t = 2\tau$ 。在此时隙框架下,即便无人机用户在不同的时间点开始尝试访问信道,任意两个无人机用户的交会时隙之间也总会存在大于 τ 的重叠部分。无人机采用周期性频谱感知,假设一个周期 T 里含有 K 个时隙 t , 即 $T = K \cdot t$ 。每隔周期 T 执行一次全面的频谱感知操作,并在交会期间确保所获取的频谱信息保持稳定不变。每当完成新一轮的频谱感知后,无人机用户会依据当前环境状况动态地更新其本地可用的信道集合,并基于这些最新更新的信道信息,重新启动交会算法。

2.2. 干扰模型

在复杂电磁干扰的应用环境中,信道干扰主要来源于电子设备的主动或被动辐射以及自然电磁现象,具有显著的时空动态特性。不同信道在同一时刻受到的干扰特征不同,而同一信道在不同空间位置上受到的干扰分布也表现出非均匀性,如图 2 所示,不同曲线代表无人机轨迹,不同圆圈代表非均匀的信道可用性。因此,本研究采用动态干扰感知模型,假设无人机在频谱感知阶段能够获取各信道干扰信息。定义无人机用户 v_i 受到的干扰集合为 $I_i = \{I_i^1, I_i^2, \dots, I_i^j, \dots, I_i^N\}$, 其中 I_i^j 表示用户 v_i 在信道 c_j 上受到的干扰。基于射频能量检测原理,该值通过接收信号强度指示 (received signal strength indication, RSSI) 进行模拟测量,单位为 dBm,数值越大表示干扰信号强度越高。需要特别说明的是,不同干扰测量体系可能采用差异化的量化标准。例如,本系统采用归一化 RSSI 值,其取值范围规范为 $[0, 1]$,而传统方法测量出来的 RSSI 都是负值,归一化方法通过线性变换保持了原始数据的分布特征。

根据干扰源特性,本研究将干扰分为三类:干扰机产生的电磁干扰、自然噪声干扰与电磁爆炸干扰。

- 干扰机产生的电磁干扰:干扰机采用移动干扰策略,其干扰随传播距离衰减,遵循自由空间路径损耗模型。若无人机用户位于干扰机的传输范围内(假设干扰机的传输范围与无人机用户相同),则该无人机用户的信道干扰值需叠加此动态分量。若无人机用户尝试在受干扰较大的信道上交换消息,可能会导致消息损坏。

- 自然噪声干扰：包括背景噪声和其他不可预测的时变随机干扰，如热噪声、大气噪声(如雷电)和太阳活动，其统计特性服从对数正态分布。这些干扰是随机的，因此在不同的时空位置，同一信道的自然噪声干扰水平可能会有所不同。值得注意的是，由于该干扰影响较小，因此并不是主要部分。
- 电磁爆炸干扰：爆炸事件产生的电磁脉冲具有短时强干扰特性，导致无人机系统的通信临时中断。

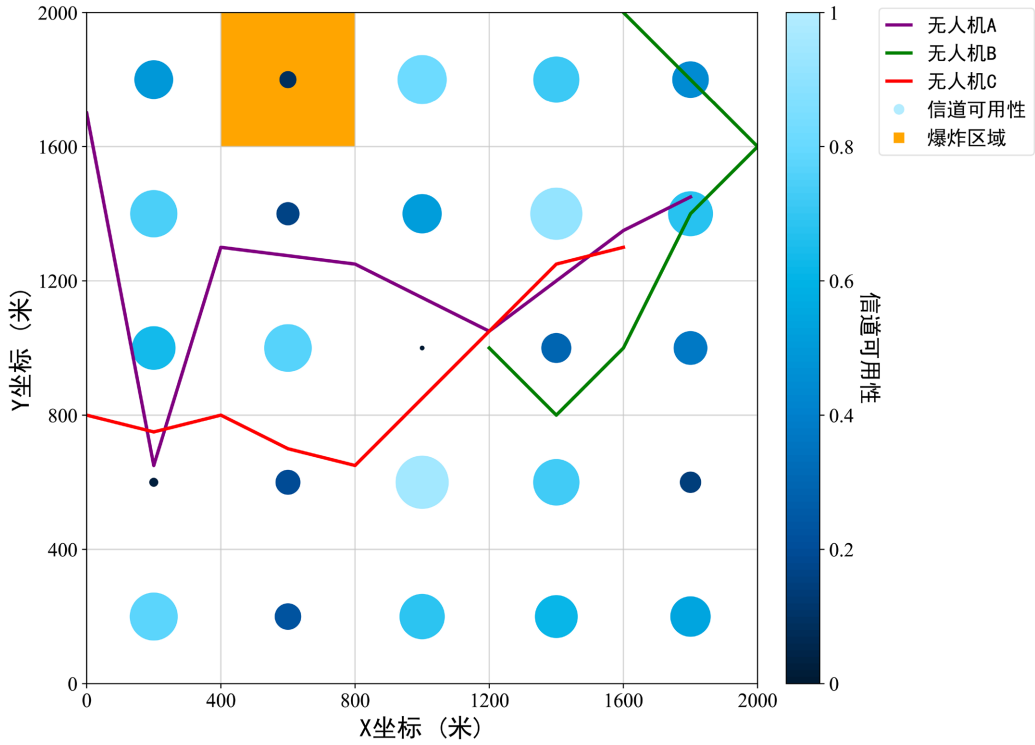


Figure 2. UAV trajectories and spatial distribution of channel availability
图 2. 无人机轨迹与信道可用性空间分布

2.3. 问题描述

假设无人机集群用户 v_α , v_β 的可用信道集分别为 C_α , C_β , 干扰分别由集合 I_α , I_β 表述。令 $\mathbf{Ch}_{i,I_i} = \{\mathbf{Ch}_{i,I_i}^t, \mathbf{Ch}_{i,I_i}^{2t}, \dots, \mathbf{Ch}_{i,I_i}^k, \dots, \mathbf{Ch}_{i,I_i}^T\}$ 表示无人机用户 v_i 在干扰集 I_i 下周期为 T 的 CH 序列, \mathbf{Ch}_{i,I_i}^k 表示干扰集为 I_i 的无人机用户 v_i 在时隙 kt 访问的信道, δ 表示异步场景下 v_α 和 v_β 的时钟漂移。因此, 优化问题可以描述为, 对于 $\forall \delta > 0$, $\forall C_\alpha, C_\beta \subseteq C$, $\forall I_\alpha, I_\beta$, 设计 CH 序列 $\mathbf{Ch}_{\alpha, I_\alpha}$ 与 $\mathbf{Ch}_{\beta, I_\beta}$, 并设计一种适用于复杂干扰环境下无人机集群的 CH 交会算法, 进而找到符合

$$\mathbf{Ch}_{\alpha, I_\alpha}^t = \mathbf{Ch}_{\beta, I_\beta}^{t+\delta} = c, \exists c \in C_\alpha \cap C_\beta \quad (1)$$

条件的两者的公共信道 c , 以实现无人机用户在干扰和交会时间都尽可能小的信道上完成交会。

3. 低干扰信道扩展预处理机制

如图 2 所示, 在复杂电磁干扰环境下, 不同无人机所能感知和占用的信道, 会因干扰类型和程度的差异而有所区别。尤其是有些信道虽然可以被感知到, 但是由于其受干扰严重, 实际上可用性不高。传统算法通常不对信道质量加以区分, 假设所有可感知信道是同质的, 并以相同概率进行访问和交会。这种机制在真实的复杂干扰环境中会导致交会效率低下。为此, 本节提出一种低干扰信道扩展预处理机制。

该机制通过扩展低干扰信道集，旨在提高低干扰信道访问频率，为后续的序列设计提供高可靠性的候选信道集。

信道扩展流程包含两个环节。首先，对各信道受到的干扰水平进行归一化处理；随后，基于归一化后的干扰程度，对信道集合进行扩展，通过增加低干扰信道的出现次数来提高其在集合内的占比。这样可以为后续的交会算法提供能适配动态干扰环境的候选信道集。

由于复杂干扰环境下不同信道的原始干扰 RSSI 值存在量级和分布差异，通过归一化处理，将每个无人机用户感知到的各信道干扰值映射到统一的 $[0, 1]$ 区间。具体地，对于任意无人机用户 v_i ，假设其感知到的所有信道中的最小和最大干扰值分别为 I_i^{\min} 与 I_i^{\max} ，则用户 v_i 在信道 c_j 上的干扰值可通过下式进行归一化：

$$\widetilde{I}_i^j = \frac{I_i^{\max} - I_i^j}{I_i^{\max} - I_i^{\min}} \quad (2)$$

其中 \widetilde{I}_i^j 即为归一化后的干扰值。值得注意的是，该方法通过保留原始数据的分布特征，使得低干扰信道 (RSSI 值较小) 对应更大的归一化值，从而获得更高的优先级权重，为后续信道扩展提供统一的量化基准。

接着，在归一化的基础上进行低干扰信道扩展，以提高低干扰信道的访问频率。具体而言，对于无人机用户 v_i ，根据其可用信道集 C_i 中各信道的干扰程度，将其扩展为一个更大规模信道集合 \hat{C}_i ，使低干扰信道在扩展集合中重复出现的频次更多，进而调整信道访问频率，使得干扰较小的信道获得更多调度次数。该过程需满足以下约束条件：

$$\begin{cases} l_j \geq 1, & \forall c_j \in C_i \\ l_j = 0, & \forall c_j \notin C_i \\ \sum_{j=1}^N l_j = N' \\ \widetilde{I}_i^j \geq \widetilde{I}_i^{j'} \Rightarrow l_j \geq l_{j'}, & \forall j', j'' \\ l_j \in \mathbf{Z}_{\geq 0}, \end{cases} \quad (3)$$

其中， l_j 表示信道 c_j 的调度次数， N' 为总调度次数，即扩展信道集的大小， $\mathbf{Z}_{\geq 0}$ 表示非负整数集。该约束要求每个可被感知到的信道至少被调度一次，没有被感知到的信道不参与调度，总调度次数固定，且归一化值较高(干扰较低)的信道应获得不小于该值较低信道的调度次数。

具体地，首先每个可感知信道各被调度 1 次，以满足可用性约束，此时已使用的调度次数为 $|C_i|$ 。接着，计算剩余可调度次数

$$R = N' - |C_i| \quad (4)$$

然后，按照归一化干扰值占可用信道归一化值总和的比例，将剩余的调度次数按比例分配给每个信道，得到期望增量 l'_j ，即

$$l'_j = \frac{\widetilde{I}_i^j}{\sum_{c_j \in C_i} \widetilde{I}_i^{c_j}} \cdot R \quad (5)$$

接下来，取整数部分更新信道的调度次数

$$l_j \leftarrow l_j + \lfloor l'_j \rfloor \quad (6)$$

并计算剩余未调度的次数

$$\Delta = R - \sum_{c_j \in C_i} \lfloor l'_j \rfloor \quad (7)$$

将这部分剩余的调度次数按照归一化干扰值大小从大到小的顺序进行补偿，确保满足单调性约束。最终，信道 c_j 的被调度次数为：

$$l_j = 1 + \lfloor l'_j \rfloor + \Delta_j \quad (8)$$

其中， $\Delta_j \in \{0,1\}$ 且 $\sum_{c_j \in C_i} \Delta_j = \Delta$ ，保证了信道调度的正确性和公平性。

信道扩展机制通过干扰值与访问频次的动态关联，实现对复杂电磁干扰环境的自适应应对，确保低干扰信道优先被访问。

4. 干扰自适应协作跳频 - 等待信道交会算法

为有效解决多无人机集群的交会问题，本研究采用分步策略：首先实现无人机间的两两交会，然后将已完成交会的无人机组合成协作集群，最后再将该集群扩展至整个多无人机网络，以便将无人机用户的信道跳频信息通过本地广播传输。

4.1. 分布式角色演化机制

为实现完全分布式的盲交会，避免依赖中心控制器进行角色分配，本文引入一种基于无人机唯一标识符(ID)的分布式角色演化机制。该机制确保任意两个无人机用户在无需协商的情况下，仅通过本地计算即可在有限轮次内演化出互补的“跳频 - 等待”角色组合。

每个无人机用户 v_i 均具备一个全局唯一的硬件标识符 ID_i (如无线通信模块 MAC 地址)，无人机可基于该标识符在本地生成专属二进制模式序列 S_i ，用于决定其在每一轮交会周期内的角色。为避免无人机因启动时间异步导致序列循环对齐的问题，本文采用带唯一锚点的编码方式构造模式序列。

首先，将无人机的唯一标识符 ID_i 转换为 J 位二进制串，记为 b_1, b_2, \dots, b_J 。在此基础上执行防冲突编码，将二进制串中的每一个比特 b_i 映射为双比特串 $0b_i$ ，即在原始比特前插入 1 个比特 0，以此得到 ID_i 对应的防冲突编码串 $\text{Enc}(ID_i)$ ，该编码的核心特性为编码串内部不会出现连续比特串“11”。完成防冲突编码后，为序列添加唯一锚点，在防冲突编码串 $\text{Enc}(ID_i)$ 的头部拼接固定比特串“11”，尾部补充 1 个比特“0”，形成最终的模式序列： $S_i = 11 \parallel \text{Enc}(ID_i) \parallel 0$ ， \parallel 为二进制串拼接运算符，通过该方式构造的序列 S_i 中，连续比特串“11”仅在序列头部的锚点位置出现一次，保证了序列锚点的全局唯一性。

定义模式序列 S_i 的第 m 位比特值为 $S_i[m]$ ，无人机用户 v_i 在第 n 轮交会周期内的角色由序列索引对应的比特值决定，索引由下面公式计算： $m = n \bmod |S_i|$ 。其中， $|S_i|$ 为 S_i 的总长度， \bmod 为模运算运算符。对应的角色映射规则为：当 $S_i[m] = 0$ 时， v_i 在本轮交会周期内的角色为跳频用户；当 $S_i[m] = 1$ 时， v_i 在本轮交会周期内的角色为等待用户。由于不同无人机的硬件标识符全局唯一，生成的模式序列互不相同，且序列锚点位置具备全局唯一性，经理论推导可证明：对于任意两个无人机用户之间的任意启动时间偏移量，必然存在某一交会轮次 n ，使得两机角色互补，为确定性信道交会提供了前提保障。

4.2. 双模式干扰自适应两两交会过程

假设任何一对无人机用户之间必须至少有一个公共信道，即对于 $v_\alpha \neq v_\beta$ ，有 $C_\alpha \cap C_\beta \neq \emptyset$ 。本节提出的双模式干扰自适应无人机两两交会，其基本目标是在复杂干扰环境下实现快速交会(即低 TTR)。为实现该目标，首先通过前述的低干扰信道扩展预处理机制，提高交会概率，然后采用双模式序列生成算法，使得两个无人机用户在同一信道上交会。其基本思想是将任意一对无人机用户非对称地划分为跳频用户 v_α 和等待用户 v_β ，两者分别遵循预设的跳频信道序列 HopCh'_α 和等待信道序列 WaitCh'_β 进行信道切

换，直至成功交会。跳频序列和等待序列的定义如下：

- 跳频序列 HopCh'_{α} ：用户 v_{α} 在其高质量可用信道集 \hat{C}_{α} 上进行周期性跳频，周期为 p 。该序列的生成保证了在一个周期内，低干扰的信道被访问的概率更高。如果在跳频过程中，序列中的某个目标信道因突发强干扰而临时不可用，则 v_{α} 会从 \hat{C}_{α} 中依据权重重新选择一个可用信道进行替代，以保证通信的鲁棒性。
- 等待序列 WaitCh'_{β} ：用户 v_{β} 会周期性地遍历其可用信道集 C_{β} 。遍历的顺序是按照各信道在扩展集 \hat{C}_{β} 中的出现次数降序排列的。在访问每个信道时， v_{β} 会停留 p 个时隙以等待 v_{α} 的到来。 v_{β} 的等待序列总周期长度是不固定的，因为它取决于可用信道集 C_{β} 的大小。一个完整的等待周期包含对 C_{β} 中所有信道的遍历，显然，该周期是 p 的整数倍。例如，当 $|C_{\beta}| = p$ 时，周期长度为 p^2 。

算法 1 描述了跳频序列与等待序列的生成方式。停留时长 p 设置为 $p = 2\lceil \log_2 N \rceil$ ，旨在平衡交会速度与序列复杂度。如前所述，等待序列的总周期为 $p \cdot |C_{\beta}|$ 。由于干扰环境是动态的， v_{β} 的可用信道集 C_{β} 及其大小 $|C_{\beta}|$ 会随时间变化，因此，等待序列的周期也是动态变化的。于是，无人机用户两两交会过程具体如下：首先，对无人机用户 v_{α} 和 v_{β} ，分别有可用的信道集 C_{α} 和 C_{β} 。接着，按照第 3 节中的低干扰信道扩展预处理机制对干扰集 I_{α} 和 I_{β} 进行归一化，并对可用信道集进行扩展得到扩展信道集 \hat{C}_{α} 和 \hat{C}_{β} 。随后， v_{α} 和 v_{β} 分别通过算法 1 生成跳频序列 HopCh'_{α} 与等待序列 WaitCh'_{β} 。其中，跳频序列需要按照扩展信道集中信道出现次数权重将不可用信道替换成可用信道。等待序列也需要按照其扩展信道集中信道出现次数的降序进行信道排序，然后执行循环重复操作。最后，两个无人机用户在各自生成的序列中找到相同且满足信道质量要求的信道，完成交会。

算法 1：跳频与等待序列生成算法

```

1. if 用户是跳频用户  $v_{\alpha}$  do
2. for  $t=1$  to  $N_{\alpha}$  do //  $N_{\alpha}$  是  $\text{HopCh}'_{\alpha}$  的总长度
3.  $\text{HopCh}'_{\alpha} = \text{mod}(t-1, p) + 1$ 
4. end for
5. else
6. for  $t=1$  to  $N_{\beta}$  do //  $N_{\beta}$  是  $\text{WaitCh}'_{\beta}$  的总长度
7.  $t = \text{mod}(t-1, |C_{\beta}| \cdot p) + 1$ 
8.  $n = \lfloor t / p \rfloor$ 
9.  $\text{WaitCh}'_{\beta} = \text{repeat}(c_n, p)$ ，其中  $c_n \in C_{\beta}, n=1, 2, \dots, |C_{\beta}|$ 
10. end for
11. end if

```

4.3. 多无人机集群交会过程

IACHR-M 算法的具体步骤在算法 2 中提出。首先，采用低干扰信道扩展预处理机制得到每个无人机用户的扩展信道集。如算法 2 的第 1~2 行所示。

每个无人机用户仅依赖本地 ID 构造模式序列，并按固定轮长在跳频与等待两种模式间切换。每个无人机用户根据自身角色按照算法 1 分别生成对应的跳频序列或等待序列，如算法 2 的第 3~10 行所示。当第一个无人机用户与剩余无人机用户中的任意一个无人机用户率先在同一信道上完成交会，则将这两个已交会的无人机用户初步组成协作集群。若集群内的任一成员与集群外成员在某一间隙跳转到相同信道

时，协作集群成员将进行信息交换，并通知所有集群内成员，在下一时隙同步切换至所有无人机用户共享的全局公共信道，如算法 2 的第 11~23 行所示。之后，若任何新成员加入该集群，则可继续重复该过程，以确保新成员能够通过共享公共信道与已有成员进行交会，最终达成多无人机用户交会目标。

算法 2: 干扰自适应协作跳频 - 等待信道交会算法(IACHR-M)

输入: 无人机网络总信道数 N , 无人机数 M , 无人机 v_i 的可用信道数 N_i , 无人机 v_i 的干扰集 I_i

输出: 交会时间 TTR

1. 对 I_i 进行归一化处理
 2. 将无人机 v_i 的可用信道集 C_i 通过信道映射, 得到扩展信道集 \hat{C}_i
 3. 每个用户依据其唯一标识本地生成模式序列 S_i
 4. 初始化全局轮次计数器 $n = 0$
 5. 在第 n 轮中, 用户根据 $S_i[m]$ 选择本轮角色: $S_i[m] = 0$ 为跳频用户, $S_i[m] = 1$ 为等待用户
 6. 跳频用户通过算法 1 生成跳频序列
 7. if 跳频用户无法使用信道 c_j do
 8. c_j 通过加权选择函数, 按照信道出现次数的权重从该用户扩展信道集中选择信道
 9. end if
 10. 等待用户通过算法 1 按信道出现次数的顺序生成等待序列
 11. while 未完成信道交会 do
 12. if 任意两个用户成功完成信道交会 do
 13. 交换并存储彼此的 CH 信息
 14. 完成交会的用户组成协作集群, 独立进行信道跳变
 15. end if
 16. $t = 0$
 17. 尝试与任意集群成员完成信道交会
 18. $t = t + 1$
 19. if 新加入的用户与任意集群成员接入了同一信道 do
 20. 该集群成员通知其他用户在下一时隙切换到公共信道
 21. end if
 22. $n = n + 1$
 23. end while
 24. return TTR
-

4.4. 多无人机集群交会算法分析与证明

首先分析两两交会过程的最大交会时间(maximum time to rendezvous, MTTR)。

定理 1: 在非对称模型下, 具有干扰集 I_α 和 I_β 的任意两个相邻无人机用户 v_α 和 v_β , 交会时间上限

为:

$$\text{MTTR}_{\text{HW}} = 2p^2 - p = O(p^2) = O((\log_2^2 N)) \quad (9)$$

证明: 证明可以分为以下两种情况: 1) 跳频用户 v_α 比等待用户 v_β 早开始 δ_1 个时隙如图 3(a)所示; 2) v_α 比 v_β 晚开始 δ_2 个时隙如图 3(b)所示。

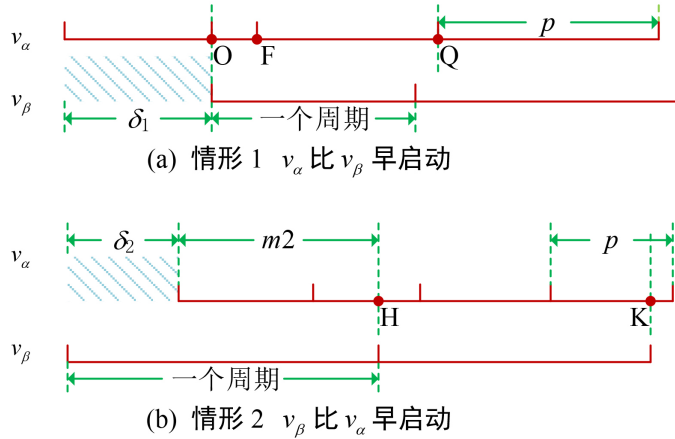


Figure 3. Two cases of guaranteed rendezvous for two-UAV users
图 3. 两无人机用户保证交会的两种情况

情形 1: 不失一般性, 假设无人机用户 v_α 和 v_β 至少有一个公共可用信道 c_{j_1} 。下文通过反证法对该情形进行证明。假定 v_α 和 v_β 在区间 OQ 内未实现交会, 即交会既未发生于区间 OF , 也未发生于区间 FQ 。然而, 我们知道跳频序列 HopCh'_α (以 p 为模) 根据其生成方式周期性地遍历所有可用信道。

情形 2: 与情形 1 类似, 为简化论述, 省略交会保证性证明过程。此处着重分析 MTTR 。与情形 1 不同的是, v_α 跳变时隙晚于 v_β , 且 v_β 的周期不固定, 情形更为复杂。不失一般性, 仍假设 v_α 和 v_β 间存在一个公共可用信道 c_{j_2} 。若交会发生于区间 $m2$, 显然 v_α 和 v_β 最多在 p^2 个时隙内实现交会。反之, 交会必然发生于情形 1 已证明的区间 HK , 此时 v_α 和 v_β 最多在 $2p^2$ 个时隙内实现交会。由此, 得到交会时间的上限为 $2p^2$ 个时隙。

事实上, 若 v_α 和 v_β 间仅有一个公共信道 c_{j_2} , 交会将早于 $2p^2$ 个时隙发生。这是因为, 仅当 HopCh'_α 只包含 c_p 时, 才会出现需 $2p^2$ 个时隙实现交会的情况。然而, 基于无人机两两交会的加权替换操作, 此情形下交会最多在 p^2 个时隙内即可完成。因此, 若 v_α 和 v_β 间仅有一个公共可用信道 c_{j_2} ($c_{j_2} = c_{p-1}$), 交会最多在 $2p^2 - 2p$ 个时隙内实现。若两者间存在两个公共信道, 交会最多在 $2p^2 - p$ 个时隙内实现。否则, 交会显然早于 $2p^2 - p$ 个时隙发生。这意味着无人机两两交会过程的 MTTR 存在上限。

推论 1: 若单轮交会周期时长取 $T = \text{MTTR}$, 则考虑分布式角色演化机制后, 任意两机的总 MTTR 满足:

$$\text{MTTR}_{\text{total}} \leq |S| \cdot \text{MTTR}_{\text{HW}} \quad (10)$$

其中, $|S|$ 为模式序列 S_i 的长度。以 48 位 MAC 地址为例, 经本文所提带锚点的防冲突编码后, 模式序列长度满足 $|S| \approx 99$ 。式(10)为保守的理论上限, 实际仿真结果表明, 由于序列的伪随机性, 平均演化轮数远小于 $|S|$, 因此该角色演化机制对系统平均交会时间(ATTR , average time to rendezvous)的影响可忽略不计。

对于多无人机集群协作方案, 考虑最坏情形: 所有无人机用户仅共享全局公共信道集 \hat{C} , 任意两个

无人机用户间不存在专属可用公共信道。该场景下，多无人机集群协作交会过程退化为依次完成的两两交会过程，即首个入网无人机用户需与剩余 $M - 1$ 个无人机用户依次完成交会，每次交会的最大交会时间为 $\text{MTTR}_{\text{total}}$ 。依据最坏情形的定义， M 个无人机用户的集群总交会时间上界为 $M - 1$ 次两两交会最大时间的累加，即：

$$\text{MTTR}_{\text{swarm}} \leq (M - 1) \cdot \text{MTTR}_{\text{total}} \quad (11)$$

5. 仿真与分析

5.1. 仿真参数设置

本节对所提出的信道交会算法进行性能评估，通过与两种算法 EJS [17]，DRDS [18] 进行比较。每个无人机用户至少处于一个其他无人机用户的传输覆盖范围内，且各无人机用户均尝试与潜在交会无人机用户同时接入到公共可用信道。交会算法在多无人机用户场景下的异构和异步环境下实施。主要关注以时隙为度量的 ATTR 与 MTTR 性能，并对相应的能量消耗进行量化分析。ATTR 是所有无人机用户同时选择相同可用信道前所经历的平均时隙数，MTTR 是所有无人机用户同时选择相同可用信道前所经历的最大时隙数。系统能耗按下面公式计算得到： $t \cdot \text{TTR} \cdot (E_p + E_r + E_h)$ 。其中， t 为时隙长度， E_p 和 E_r 分别为无人机用户探测请求和响应请求的单位时间能耗， E_h 为无人机水平飞行的单位时间能耗，该参数取自 3DR Solo 商用四旋翼无人机的实飞测试数据，对应工况为无风环境、空载状态、9 m/s 水平恒定巡航直线飞行，具备可靠的实验支撑[19]。本文仿真核心参数如表 1 所示。

Table 1. Simulation parameter settings
表 1. 仿真参数设置

参数	变量	值
飞行区域边长	X_l	2 km
感知范围	r_i	500 m
无人机数量	M	3
最小时隙长度	τ	10 ms
干扰信号频率	f	2.4 GHz
电磁爆炸区域	R_e	250 m
电磁爆炸间隔	t_e	200 τ
探测请求单位时间能耗	E_p	0.06 J/s
响应请求单位时间能耗	E_r	0.045 J/s
水平飞行单位时间能耗	E_h	702 J/s

此外，为避免模拟 v_α 过程中的随机性，本研究采用 1000 次独立测试的方法。在复杂干扰环境下，任意一组相邻无人机用户与 v_β 受空间位置关联性影响，为更好表示每个无人机用户信道中的干扰由于异构干扰以及无人机移动性导致的差异性，为每个信道生成一个不同的干扰值。无人机用户基于其 ID 生成的模式序列确定自身角色。

5.2. 仿真结果分析

图 4、图 5 与图 6 展示的为 $M = 3$ 时，IACHR-M 多无人机集群交会算法与基准算法 ATTR、MTTR

与能耗的性能比较。如图 4 所示为不同 N 值，即 N 从 10 到 50，对 ATTR 评估指标的影响。可以看出，对于所有算法，ATTR 均随 N 的增加而增加，这是由于信道数的增多使得无人机群交会到公共信道的几率变小。另外，IACHR-M 算法的 ATTR 均优于其他两种算法，特别是当 N 足够大时。这种优势的取得是由于两两无人机交会时的跳频 - 等待双模式跳频序列生方法成与无人机集群交会过程中的协作信息交换策略结合大大降低了最大交会时间。其核心在于，每个无人机用户对之间都存在除全局公共信道外的专属共享信道集，它们在专属共享信道集上交会的可能性更大。与仅依赖单一全局公共信道的传统方案相比，这种信息交换的机制使得信道跳频序列信息的传播更加灵活，大幅增加了协同交会的机会，进而实现了更高效的多无人机用户交会过程。

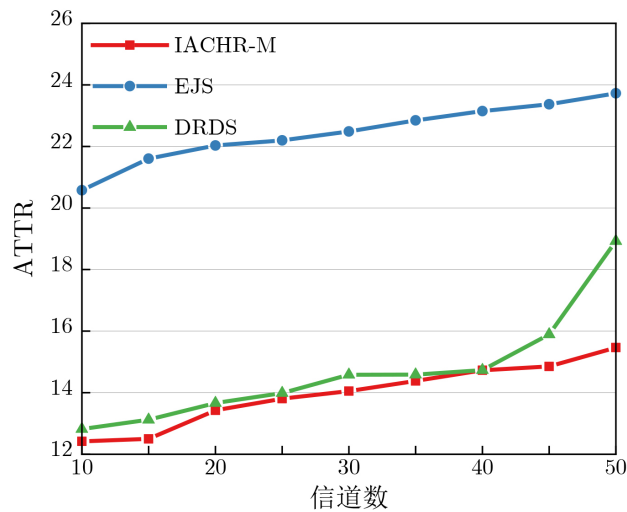


Figure 4. Effect of the number of channels N on ATTR

图 4. 信道数 N 对 ATTR 的影响

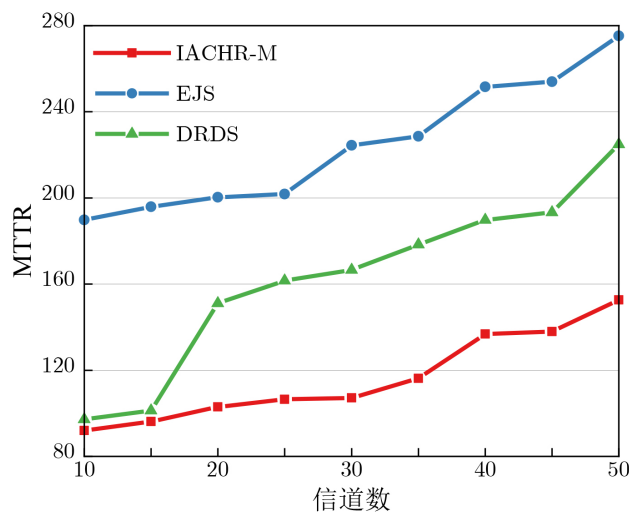


Figure 5. Effect of the number of channels N on MTTR

图 5. 信道数 N 对 MTTR 的影响

如图 5 所示为不同 N 值对最大交会时间 MTTR 评估指标的影响。可以看出，IACHR-M 算法的 MTTR 性能均优于其他两种算法，其中比 EJS 算法低 44.2%，比 DRDS 算法低 28.9%。这是由于 IACHR-M 算

法与其他两种仅依赖单一全局公共信道的传统方案相比，其信息交换机制使得信道跳频序列信息的传播更加灵活，大幅增加了协同交会的机会，进而实现了更高效的多无人机用户交会过程。值得注意的是，EJS 算法由于算法稳定性较差，因此平均交会时间与最大交会时间相差较大。

如图 6 所展示的数据表明，在面对不同信道数量 N 值的变化时，IACHR-M 算法在能耗评估指标上表现出色，其能耗增长及波动范围均保持在一个较低的水平，显著优于其他对比算法。具体而言，IACHR-M 算法相较于 EJS 算法，能耗降低了 34.3%；与 DRDS 算法相比，也实现了 8.3% 的能耗缩减。这一显著优势主要归因于 IACHR-M 算法在交会时间上的极致优化，使得系统整体能耗达到最低。IACHR-M 算法为每对无人机用户设计了除全局公共信道之外的专属共享信道集合，这一创新设计极大地提升了无人机用户在专属信道上进行交会的概率。这不仅增强了无人机用户间的协同交会能力，还大幅提高了多无人机用户在复杂环境下的交会效率，从而实现了更为高效且节能的多无人机用户交会过程。

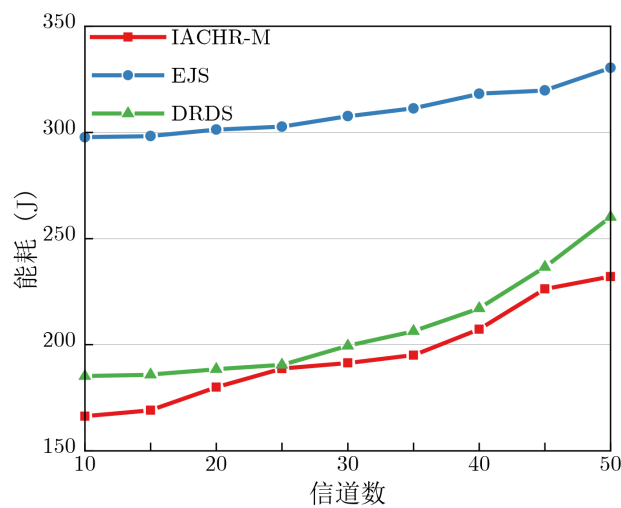


Figure 6. Effect of the number of channels N on system energy consumption
图 6. 信道数 N 对系统能耗的影响

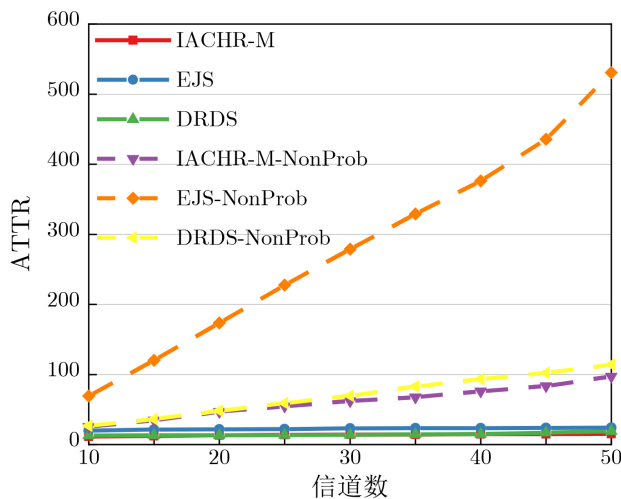


Figure 7. Performance comparison of ATTR with and without the channel extension preprocessing mechanism
图 7. 应用信道扩展预处理机制与无该机制的 ATTR 性能对比

图 7、图 8 展示的为 $M = 3$ 时，采用信道扩展预处理机制的三种算法，其 ATTR，MTTR 指标性能相

较于未采用该机制的三种算法的比较。图 7 为六种算法的 ATTR 性能比较。可以看出，采用了信道扩展预处理机制算法的 ATTR 与 MTTR 远低于未采用该机制的算法。这是由于信道扩展预处理机制充分考虑了集群内无人机的高移动性导致不同无人机所在位置不同，因此所受干扰不同，从而提出非均匀以及非对称感知信道序列，同时提出提高低干扰信道的访问频率以更真实还原复杂电磁干扰环境中无人机集群信道访问场景。该信道序列设计方法以及低干扰信道扩展预处理机制使得交会算法能够更好地适应复杂电磁干扰环境，大幅度降低最大交会时间以及平均交会时间。

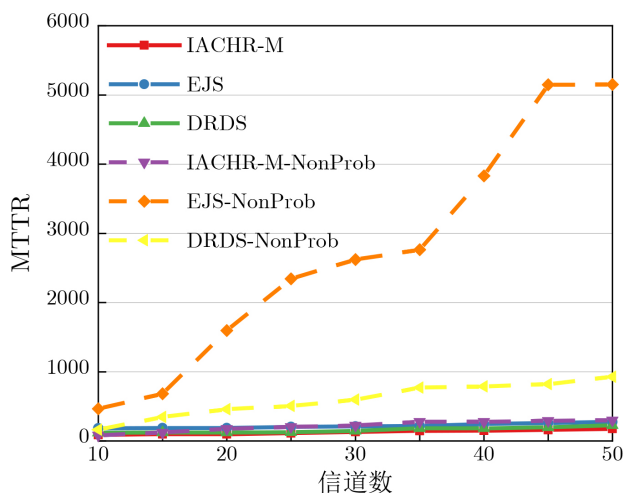


Figure 8. Performance comparison of MTTR with and without the channel extension preprocessing mechanism
图 8. 应用信道扩展预处理机制与无该机制的 MTTR 性能对比

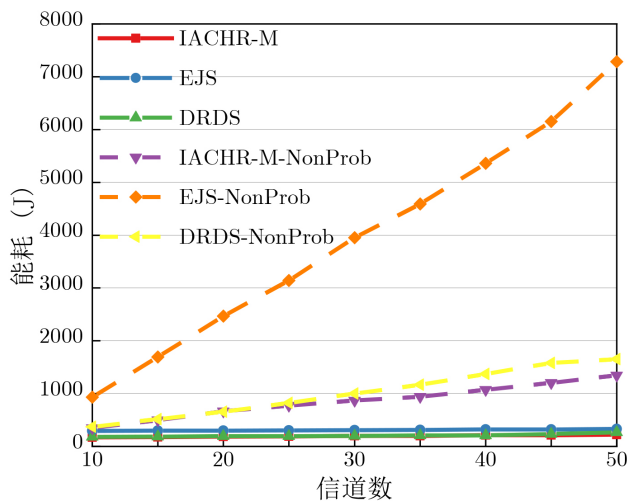


Figure 9. Performance comparison of system energy consumption with and without the channel extension preprocessing mechanism
图 9. 应用信道扩展预处理机制与无该机制的系统能耗性能对比

图 9 展示了应用信道扩展预处理机制的三种算法与未采用该机制的三种算法在系统能耗方面的性能对比。从图中数据可以看出，采用了信道扩展预处理机制的算法在系统能耗上显著低于未采用该机制的算法。与此同时，在未引入该机制的三种算法里，本文提出的 IACHR-M 算法依然展现出最优的性能表现。这一显著优势主要归因于低干扰信道扩展预处理机制能够使得算法能够更精准地选择最优信道，减

少了无效的信道尝试和通信中断,进一步降低了系统能耗。此外,由于我们对算法进行了严格的证明分析,确保了算法在不同场景下的稳定性和可靠性,这使得算法结果更具保证性与可扩展性。

6. 结束语

本文针对具备频谱感知功能的无人机集群在复杂电磁环境下进行信道交会时,所面临的复杂电磁干扰与高移动性挑战,提出了一种高效的自适应信道交会方案。其中,低干扰信道扩展预处理机制通过动态调整信道访问频次,实现了低干扰信道的优先选择。该方案采用跳频-等待双模式跳频序列生成策略,首先实现无人机间的两两交会,在此基础上融入基于信息交换的集群协同机制,最终通过同步切换至全局公共信道,实现多无人机之间的确定性交会。理论分析与仿真实验均表明,本研究提出的算法在交会性能上具有显著优势。未来的研究方向可包括两个方面:一是将算法拓展至大规模无人机集群,以检验其可扩展性;二是通过融合信道状态预测技术,进一步提升信道选择的效率,并降低算法的时间复杂度。

基金项目

国家自然科学基金(61501306)、辽宁省教育厅平台建设项目(LJ232510143007)、辽宁省科技厅项目-联合项目(2025-MSLH-554)、沈阳市自然科学基金专项项目(23-503-6-18)、辽宁省科技厅国际科技合作项目(2025JH2/101900012)。

参考文献

- [1] Zhang, J.F., Lu, W.D., Xing, C.W., Zhao, N., Al-Dhahir, N., Karagiannidis, G.K., *et al.* (2024) Intelligent Integrated Sensing and Communication: A Survey. *Science China Information Sciences*, **68**, 131-301. <https://doi.org/10.1007/s11432-024-4205-8>
- [2] 赵子俊, 陈士涛, 贺维艳, 等. 有人/无人机协同作战效能智能评估方法[J/OL]. *航空学报*, 2025: 1-10. <https://link.cnki.net/urlid/11.1929.V.20251216.0900.002>, 2026-03-26.
- [3] 左怀宇, 张二青, 唐宇龙, 等. 博弈论视角下无人机通信网络中资源管理优化研究综述[J]. *高技术通讯*, 2025, 35(11): 1188-1200.
- [4] Liang, H., Wu, J., Liu, T., Wang, H. and Cao, W. (2024) Efficient Cooperative Spectrum Sensing in UAV-Assisted Cognitive Wireless Sensor Networks. *IEEE Sensors Letters*, **8**, 1-4. <https://doi.org/10.1109/lsens.2024.3454718>
- [5] Pan, Y., Li, S.N., Ning, Z.Y., Li, B., Zhang, Q. and Zhu, T. (2020) *auSense*: Collaborative Airspace Sensing by Commercial Airplanes and Unmanned Aerial Vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, **69**, 5995-6010. <https://doi.org/10.1109/tvt.2020.2986219>
- [6] Yang, B., Liu, M. and Li, Z. (2018) Rendezvous on the Fly: Efficient Neighbor Discovery for Autonomous UAVs. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, **36**, 2032-2044. <https://doi.org/10.1109/jsac.2018.2864422>
- [7] Chang, C.S., Sheu, J.P. and Lin, Y.J. (2021) On the Theoretical Gap of Channel Hopping Sequences with Maximum Rendezvous Diversity in the Multichannel Rendezvous Problem. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, **29**, 1620-1633. <https://doi.org/10.1109/tnet.2021.3067643>
- [8] Idries, A., Mohamed, N., Jawhar, I., Mohamed, F. and Al-Jaroodi, J. (2015) Challenges of Developing UAV Applications: A Project Management View. 2015 *International Conference on Industrial Engineering and Operations Management (IEOM)*, Dubai, 3-5 March 2015, 1-10. <https://doi.org/10.1109/ieom.2015.7093730>
- [9] Gu, Z.Q., Wang, Y.X., Shen, T. and Lau, F.C.M. (2021) On Heterogeneous Sensing Capability for Distributed Rendezvous in Cognitive Radio Networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, **20**, 3211-3226. <https://doi.org/10.1109/tmc.2020.2997077>
- [10] Chen, L., Zhang, Y., Wang, K., Zheng, M., Yu, J. and Liang, W. (2022) Deterministic Collision-Resilient Channel Rendezvous: Theory and Algorithm. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, **21**, 8967-8978. <https://doi.org/10.1109/twc.2022.3171413>
- [11] Xue, X.C., Yu, S.C., Song, M. and Xin, C. (2021) K-Group Random Channel Hopping (K-RCH) Rendezvous for Cognitive Radio Networks. *ICC 2021-IEEE International Conference on Communications*, Montreal, 14-23 June 2021, 1-6. <https://doi.org/10.1109/icc42927.2021.9500643>
- [12] Chang, Y.B., Li, F.Y. and Tsai, M.J. (2026) Time-Efficient Channel Hopping Sequence with Maximum Rendezvous

- Diversity in Cognitive Radio Networks. *IEEE Transactions on Communications*, **74**, 291-306.
<https://doi.org/10.1109/tcomm.2025.3624171>
- [13] Gu, Z.Q., Pu, H.S., Hua, Q.S. and Lau, F.C.M. (2015) Improved Rendezvous Algorithms for Heterogeneous Cognitive Radio Networks. 2015 *IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM)*, 26 April-1 May 2015, 154-162.
<https://doi.org/10.1109/infocom.2015.7218378>
- [14] Chuang, I.H., Wu, H.Y. and Kuo, Y.H. (2014) A Fast Blind Rendezvous Method by Alternate Hop-and-Wait Channel Hopping in Cognitive Radio Networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, **13**, 2171-2184.
<https://doi.org/10.1109/tmc.2013.2297313>
- [15] Gu, Z.Q., Hua, Q.S., Dai, W.G. (2014) Fully Distributed Algorithms for Blind Rendezvous in Cognitive Radio Networks. *Proceedings of the 15th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing*, Philadelphia, 11-14 August 2014, 155-164. <https://doi.org/10.1145/2632951.2632981>
- [16] Yang, B., Zheng, M. and Liang, W. (2015) Padded-Dyck-Path-Based Rendezvous Algorithms for Heterogeneous Cognitive Radio Networks. 2015 *24th International Conference on Computer Communication and Networks (ICCCN)*, Las Vegas, 3-6 August 2015, 1-8. <https://doi.org/10.1109/icccn.2015.7288447>
- [17] Yuan, M.Z., Chu, Y.Y. and Guo, W.B. (2024) Frequency-Gateway Based Differential Rendezvous Algorithm for Cognitive Radio Networks. 2024 *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, Dubai, 21-24 April 2024, 1-6. <https://doi.org/10.1109/wcnc57260.2024.10570950>
- [18] Gu, Z.Q., Shen, T., Wang, Y.X. and Lau, F.C.M. (2020) Efficient Rendezvous for Heterogeneous Interference in Cognitive Radio Networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, **19**, 91-105.
<https://doi.org/10.1109/twc.2019.2942296>
- [19] Goss, K., Musmeci, R. and Silvestri, S. (2017) Realistic Models for Characterizing the Performance of Unmanned Aerial Vehicles. 2017 *26th International Conference on Computer Communication and Networks (ICCCN)*, Vancouver, 31 July-3 August 2017, 1-9. <https://doi.org/10.1109/icccn.2017.8038444>