物联网空地通信：基于无人机的覆盖空洞检测与恢复

Xiao Fan、Wenkun Wen（IEEE会员）、Peiran Wu（IEEE会员）、Junhui Zhao（IEEE高级会员）和 Minghua Xia（IEEE高级会员）

arXiv:2601.04665v1 [cs.IT] 8 Jan 2026

摘要——无人驾驶飞行器（无人机）在确保物联网设备无缝连接方面发挥着关键作用，尤其是在传统地面网络受限或暂时无法使用的场景中。然而，传统的覆盖空洞检测方法（如最小化路测）成本高、耗时长，且依赖过时的无线电环境数据，因此不适用于实时应用。为解决这些局限，本文提出了一种无人机辅助框架，用于实时检测和恢复物联网网络中的覆盖空洞。在所提出的方案中，首先派遣一架巡逻无人机，在地面基站（BS）运行状态不确定的区域识别覆盖空洞。一旦检测到覆盖空洞，卫星或附近运行正常的基站便会部署一架或多架充当空中基站的无人机，以恢复连接。无人机群基于德劳内三角剖分进行组织，从而实现可扩展部署，并借助随机几何进行便于处理的分析表征。此外，基于多智能体系统理论的避碰机制可确保多架无人机之间安全、协调地移动。仿真结果表明，该框架在覆盖空洞检测和按需恢复连接方面均具有高效率，同时显著降低了运营成本和耗时。

索引词——空地通信、避碰、覆盖空洞、德劳内三角剖分、无人驾驶飞行器（无人机）。

I. 引言

为了普遍支持多样化的使用场景和应用，未来的第六代（6G）无线网络必须提供大范围覆盖、高容量和超低时延 [1]，[2]。在……背景下，

收稿日期：2025年10月12日；修订日期：2025年12月11日和2025年1月2日；录用日期：2025年1月7日。（通信作者：Wenkun Wen；Minghua Xia）

Xiao Fan 曾就职于中国广州510006的中山大学电子与信息技术学院；现就职于中国桂林541004的桂林电子科技大学信息与通信学院（电子邮箱：fanx26@mail2.sysu.edu.cn）。

Wenkun Wen 就职于中国广州510310的 Techphant Technologies Company Ltd. 研发部（电子邮箱：wenwenkun@techphant.net）。

PeiranWu 和 MinghuaXia 就职于中国广州 510006 的中山大学电子与信息技术学院（电子邮箱：wupr3@mail.sysu.edu.cn、xiamingh@mail.sysu.edu.cn）。

JunhuiZhao 就职于中国北京 100044 的北京交通大学电子与信息工程学院（电子邮箱：junhuizhao@bjtu.edu.cn）。

本文一幅或多幅图的彩色版本可在线获取，网址为 https://ieeexplore.ieee.org。

数字对象标识符

2327-4662© 2026 IEEE。保留所有权利，包括文本与数据挖掘以及人工智能和类似技术训练相关权利。允许个人使用，但重新出版/再分发须经 IEEE 许可。有关更多信息，请访问 https://www.ieee.org/publications/rights/index.html。

对于物联网 (IoT)，无缝通信覆盖对于确保互联设备之间可靠的数据交换尤为重要 [3]。为满足物联网应用严格的连接要求，电信运营商必须消除蜂窝网络中的覆盖空洞，并改善服务质量欠佳的问题。在实际部署中，覆盖空洞是指来自服务基站 (BS) 或其相邻协作基站的接收信号强度低于维持最低服务质量或可接受无线链路性能所需阈值的区域 [4]。当物联网设备或用户设备 (UE) 进入此类区域时，可能会遇到通信中断、服务质量下降，甚至无线链路故障，从而严重影响物联网运行。覆盖空洞可能由多种原因造成，包括物理障碍、欠佳的天线配置、硬件故障、频率规划不当或自然灾害 [5]。此外，毫米波 (mmWave) 通信是 6G 网络的关键赋能技术，尤其容易受到信号阻挡和衰减的影响，因此覆盖空洞出现的可能性也随之增加 [6]。

A. 相关工作与研究动机

传统蜂窝网络覆盖空洞检测方法依赖于路测、客户投诉以及软件或硬件告警的组合 [7]。这些方法通常成本高、耗时长且容易产生误差。为缓解这些限制，第三代合作伙伴计划（3GPP）对最小化路测（MDT）技术进行了标准化，使运营商能够自动收集用户测量数据和信令消息 [8]。然而，由于依赖用户设备（UE），基于 MDT 的方法存在一些缺点：UE 无法始终及时提供报告，并且由于隐私限制，其位置信息可能不准确或无法获取 [7]。因此，这类方法主要适用于城市或郊区环境，但在农村地区或灾后场景（例如地震或飓风）中通常难以实际应用，因为网络基础设施可能已经受损，且地面基站（BS）的运行状态未知。

应对这些挑战的一种新兴方案是采用移动机器人平台，例如无人驾驶飞行器（UAV） [9]。借助卫星和无人机——

搭载空中基站（ABS）的无人机，传统无线网络可扩展至三维（3D）空间，实现无处不在的宽带连接 [10]。与卫星相比，无人机更加灵活且成本效益更高，因此适合在洞穴或隧道等难以到达的区域提供临时无线覆盖。自然灾害引发紧急情况时，无人机可利用其强大的视距（LoS）信道迅速重建通信链路 [11]。附近基站 [12] 或卫星 [13]可为无人机提供高速回传连接。

除了单架无人机部署外，由多架无人机组成的无人机集群能够通过协同收集更丰富的时空信息，更高效地执行复杂任务。还可以进一步集成协同多点（CoMP）传输技术 [14] ，以增强无人机赋能的通信。为了系统地构建此类集群，可以利用德劳内三角剖分——一种在随机几何中广泛应用且数学上易于处理的几何结构——为对空 [15] 和空地 [16] 网络构建协同多点集群。

有效的移动控制对于充分发挥无线网络中无人机集群的机动性至关重要。现有关于无人机移动控制的研究主要集中于机器人学和控制理论 [17], ，旨在设计策略，使无人机形成特定的几何队形并协同机动 [18]。根据控制范式，无人机编队控制大致可分为领航者-跟随者式和无领航者式 [19]。对于地面覆盖空洞恢复，无领导者结构尤其有利，因为所有无人机都具有相同的功能，从而增强了系统对单架无人机故障的鲁棒性。

在真实环境中，无人机之间或无人机与外部障碍物发生碰撞仍然是重大风险 [20]。为提高运行可靠性，研究人员提出了各种避碰方案 [21]。其中，基于势函数的方法因其能够平滑地生成轨迹且易于实现，广泛应用于多智能体系统 [22]。该方法的灵感来自带电粒子之间的吸引力和排斥力 [23]。近期研究将势场方法与误差变换相结合，以实现无碰撞且保持连通性的队形 [24], ；还将势函数与抗积分饱和和补偿器结合，构建自适应、饱和的队形控制方案 [25]。

除经典的避碰策略外，近年来的研究日益关注利用深度强化学习和基于神经网络的方法进行智能无人机集群控制。例如， [26] 综述了无人机群体的避碰机制，而深度强化学习已被应用于带避碰功能的队形控制 [27], ，以及复杂环境中更为一般的无碰撞运动规划，例如URPlanner框架 [28]；基于神经网络的队形控制结合碰撞/避障规避和连通性维持，也已在 [29]中得到研究。这些工作凸显了朝着更加自主和自适应的集群行为发展的前景。相比之下，本文聚焦于基于势函数的平滑轨迹生成，该方法可作为未来智能协同控制框架中的互补性模型驱动组件或安全层。

受上述研究启发，本文采用正四面体——即三维空间中德劳内三角剖分的最优构型——对无人机集群的队形进行建模。这种几何结构具有两大优势：(i) 其对称性和简洁性有助于队形保持和集群的可扩展整合；(ii) 它可扩展至三维空对空网络，以实现空中基础设施的自主自愈，这是未来空天地一体化网络的关键组成部分 [15]。基于这一框架，本文根据检测到的覆盖空洞大小，设计了两种无人机调度算法。最后，本文基于李雅普诺夫稳定性理论设计了一种具备避碰功能的多无人机运动控制策略 [30], ，确保无人机集群的全局渐近稳定性。

B. 主要贡献总结

本文提出了一种无人机辅助框架，用于检测并恢复大规模物联网网络中的地面覆盖空洞。该框架整合了网络建模、无人机调度以及具备避碰功能的多无人机控制。主要贡献总结如下：

1）网络建模：本文提出了一种新颖的空对地无线网络模型，用于检测和恢复地面覆盖空洞，适用于应急场景（如地震和飓风）以及缺乏基站先验地理信息的一般环境。不同于传统路测，本文采用巡逻无人机检测地面基站，无需事先掌握其位置或运行状态。实时检测结果将传输至附近的幸存基站或远程低地球轨道（LEO）卫星，以确定覆盖空洞的大小和边界。

2）无人机调度算法：根据检测到的覆盖空洞大小，设计了两种不同的无人机调度方案。具体而言，针对小型和中型网络，开发了一种离线启发式调度算法；针对大规模网络，则设计了一种在线调度算法。为确保无缝覆盖恢复，本文基于圆覆盖理论推导了空中基站数量的上界和下界。

3) 具备避碰功能的多无人机控制：为增强群体运行的鲁棒性和可靠性，在无领航者结构下，采用基于势函数的方法开发了一种多无人机运动控制策略。该策略保证了无碰撞队形保持，并且能够证明其

全局渐近稳定性，即使不满足利普希茨条件。

C. 论文结构

本文其余部分安排如下。第二节提出一种用于覆盖空洞检测与恢复的新型空对地无线通信系统模型。第三节设计覆盖空洞检测与恢复算法，第四节则制定一种适用于无人机集群的避碰移动控制策略。第五节展示并讨论仿真和数值结果。最后，第六节总结全文。

符号说明：标量、向量和矩阵分别用斜体、小写粗体和大写粗体字母表示。符号 $\mathbb{R}^n$、$\mathbb{R}_+$ 和 $\mathbb{N}_+$ 分别表示 n 维实数空间、正实数集合和自然数集合。符号 $|\cdot|$ 和 $\|\cdot\|$ 分别表示一个数的绝对值或一个集合的基数，以及向量/矩阵的 ℓ_2-范数。上标 $(\cdot)^{\mathrm{T}}$ 表示转置，符号 $\mathbb{B}(\boldsymbol{x},\ r)$ 表示以 $\boldsymbol{x}$ 为圆心、r 为半径的开欧几里得圆。算子 $\mathbb{E}[\cdot]$ 用于计算随机变量的期望，$\dot{\boldsymbol{x}}(t)$ 表示函数 $\boldsymbol{x}(t)$ 关于 t 的一阶微分，$\oplus$ 用于计算凸多边形的闵可夫斯基和。特别地，函数 vol(·) 和 sgn(·) 分别表示几何体的体积和符号函数。伽马函数定义为 $\Gamma(a) \triangleq \int_0^\infty t^{a-1}\exp(-t)\,\mathrm{d}t$，可使用 MATLAB 和 Mathematica 等常见数值软件中的内置函数进行计算。

II. 系统建模与工作流程

我们考虑在给定区域内部署的蜂窝网络中的下行传输，其中环境遮挡或自然灾害可能导致覆盖空洞。地面基站的高度均为 H_{BS}，其建模为密度为 λ_B 的齐次泊松点过程（PPP）Φ_B。从数学上讲，覆盖空洞 A 定义为接收信干噪比（SINR）低于预定义阈值 γ_{th} 的地理区域，即：

$$A = \{(x,y) \in \mathbb{R}^2 \mid \mathrm{SINR}(x,y) < \gamma_{\mathrm{th}}\}. \tag{1}$$

每个空中基站配备一根天线，其工作高度范围为 $[H_1, H_2]$，其中 $H_2 > H_1 \geq H_{\mathrm{BS}}$。与按泊松点过程分布的地面基站不同，空中基站的初始位置服从聚合空间模式，采用簇过程（例如内曼–斯科特过程）建模 [31，第 5] 章。一旦调度完成，空中基站便从指定的集结点出发，飞向目标覆盖空洞区域。

为便于说明，图1展示了两种具有代表性的地面覆盖空洞检测与恢复场景。左图显示，巡逻无人机检测到一个较小的覆盖空洞，随后由单个空中基站予以恢复，其无线回传由附近的地面基站 1 和 2 提供。相比之下，右图展示了巡逻无人机检测到一个较大的覆盖空洞，并由 ABS集群予以恢复；其无线回传通过地面基站 1 和远程低轨卫星建立。为兼顾成本效益与恢复效果，所提出的框架利用无人机移动性，根据检测到的覆盖空洞的估计大小，自适应地部署单个空中基站（如图1左图所示）或 ABS集群（如图1右图所示）。

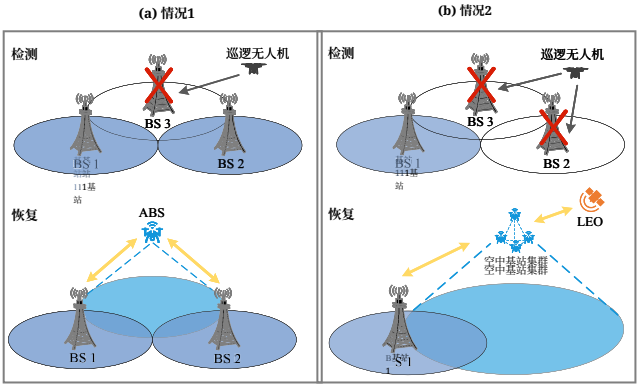


图1. 覆盖空洞检测与恢复示意图：(a) 巡逻无人机检测到一个小覆盖空洞，并由单个空中基站进行恢复，无线回传由附近的地面基站 1 和 2 提供；(b) 巡逻无人机检测到一个大覆盖空洞，并由 ABS集群进行恢复，无线回传由地面基站 1 和远程低轨卫星提供。

A. 信道模型

现在我们讨论检测阶段和恢复阶段的传输模型。

在检测阶段，巡逻无人机以相对较低的高度飞行，以近似地面用户所经历的信道条件。它接收地面基站发射的信号，并计算接收信干噪比。从地面基站到巡逻无人机的通信链路 $\boldsymbol{h}_{\mathrm{C2A}}$ 可能受到各种小尺度衰落的影响。因此，我们采用 Nakagami-m 模型来描述广泛的衰落环境。相应地，地面基站与巡逻无人机之间的小尺度衰落功率增益服从伽马分布，其概率密度函数为

$$f_{\|\boldsymbol{h}_{\mathrm{C2A}}\|}(x) = \frac{2m^m x^{2m-1}}{\Gamma(m)\Omega^m}\exp\!\left(-\frac{m}{\Omega}x^2\right), \quad m \geq 0.5,\ x \geq 0, \tag{2}$$

其中，下标“C2A” $\boldsymbol{h}_{\mathrm{C2A}}$ 表示从地面蜂窝基站到巡逻无人机的链路，m 和 Ω 分别表示形状因子和平均功率。

相比之下，在恢复阶段，由于视距传播占主导，空中基站与地面用户设备之间的小尺度衰落可以忽略不计。这与针对低空平台空地信道模型的基于测量的研究结果一致：在所研究的高度和环境范围内，视距概率较高，且小尺度波动相对较弱 [32]–[34]。

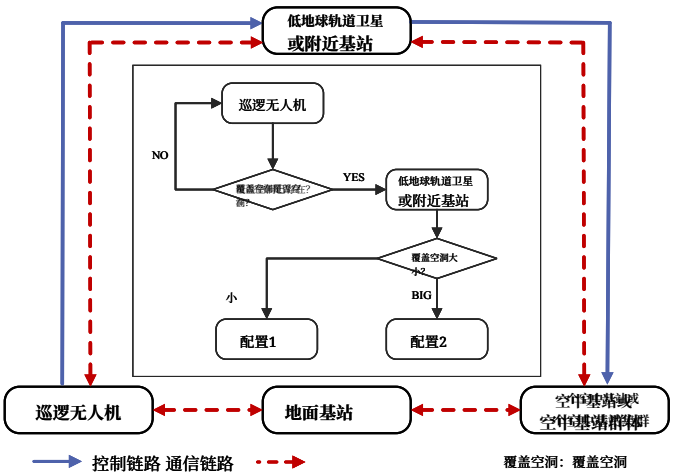


图2. 所研究的系统工作流程，其中蓝色链路表示控制信息流，红色链路表示通信数据流。配置1对应于单个空中基站为较小的覆盖空洞提供服务，而配置2则涉及由ABS集群为较大的覆盖空洞提供服务。

B. 系统工作流程

所提出系统的整体工作流程概述如下。巡逻无人机沿预定义轨迹定期巡航，以检测潜在的覆盖空洞。完成检测后，它会将结果发送给远程低轨卫星或附近基站，由后者根据空洞大小决定派遣单个空中基站还是ABS集群进行覆盖恢复。

为便于说明，图2展示了系统工作流程。从通信角度看，巡逻无人机持续接收来自地面基站的信号，计算接收信干噪比，并将其与阈值 γ_{th} 进行比较，以识别覆盖空洞。在实践中，巡逻无人机悬停于预先设定的检查点，以进行可靠检测。如果识别出覆盖空洞，则将相应检查点的地理信息发送至附近基站或低地球轨道卫星，随后由其安排适当的空中基站部署。

从控制角度看，巡逻无人机、低地球轨道卫星或附近基站，以及空中基站构成一个闭环控制。控制器（低地球轨道卫星或基站）收到巡逻无人机发送的检测信息后，会分析覆盖空洞周围两个连续检查点的检测结果，并决定部署单个空中基站还是ABS集群。随后，已安排的空中基站飞往指定检查点，以修复覆盖空洞。

尽管上述描述假设只有一架巡逻无人机，但由于检测检查点在时空上应当彼此独立，因此所提出的框架可以轻松扩展到多架协同运行的巡逻无人机。

III. 覆盖空洞检测与恢复

本节首先讨论巡逻无人机进行覆盖空洞检测的原理，然后介绍由单个空中基站或ABS集群进行覆盖空洞恢复的原理，从而有效恢复大规模无线网络中的潜在覆盖空洞。随后，我们提出一种离线启发式方法和一种在线调度算法，以支持覆盖空洞检测与恢复的一体化。最后，利用圆覆盖理论，我们得出在给定区域实现无缝覆盖所需空中基站数量的下界和上界。

A。覆盖空洞检测原理 on

给定信干噪比阈值 γ_{th}，我们可以利用（1）确定巡逻无人机是否处于覆盖区域内。基于第二节所讨论的传输模型，可以计算巡逻无人机在检查点处的接收信干噪比，其表达式为

$$\mathrm{SINR}_{\mathrm{C2A},i}=\frac{P_{\mathrm{BS},i}^{\mathrm{tx}}\|\boldsymbol{h}_{\mathrm{C2A},i}\|^2\,d_i^{-\alpha_{\mathrm{B}}}}{\sum_{m=1,m\neq i}^{M}P_{\mathrm{BS},m}^{\mathrm{tx}}\|\boldsymbol{h}_{\mathrm{C2A},m}\|^2\,d_m^{-\alpha_{\mathrm{B}}}+n},\quad(3)$$

其中，分子中的项表示来自 i^{th} 服务基站的接收信号功率；$P_{\mathrm{BS},i}^{\mathrm{tx}}$ 表示 i^{th} 基站的发射信号功率，$\boldsymbol{h}_{\mathrm{C2A,i}}$ 表示小尺度衰落，$d_i^{-\alpha_{\mathrm{B}}}$表示从 i^{th} 服务基站到巡逻无人机的大尺度路径损耗，其中两者之间的欧几里得距离为 d，路径损耗指数为 $\alpha_{\mathrm{B}}>2$。此外，（3）式分母中的项表示来自相邻小区的总干扰；参数$P_{\mathrm{BS},m}^{\mathrm{tx}}$ 表示 m^{th}基站的发射功率，其中 $1\leq m\leq M$；$\boldsymbol{h}_{\mathrm{C2A},m}$ 表示 m^{th} 基站与巡逻无人机之间的小尺度衰落，其中 d_m为两者之间的欧几里得距离。最后，（3）式第一种等式右侧分母中的项表示圆对称加性高斯白噪声的功率。

原则上，巡逻无人机轨迹上的检查点按照强度为 λ_{CP} 的齐次泊松点过程随机选取，然后剔除与其最近邻点之间的距离小于给定正数常量 D [35, Ch.3]， 的点，该常量由单架无人机的覆盖半径决定。换言之，检查点Φ_{CP} 的位置本质上服从参数为 $\mu_{\mathrm{CP}}=\lambda_{\mathrm{CP}}\exp\left(-2\pi\lambda_{\mathrm{CP}}D^2\right)$的 Matérn 硬核过程。这种设置有助于检测潜在的覆盖空洞，因为泊松点过程能够实现检查点的均匀分布。同时，稀疏化变换可确保最终检查点之间的最小距离为 D，从而减少检查点数量和系统成本。考虑到无人机的机动能耗和覆盖空洞检测效率，巡逻无人机应按照最近距离准则，不重复地遍历所有检查点。因此，对于巡逻无人机的路径规划，可以采用许多现有的哈密顿路径问题求解算法来满足上述要求，例如基于最近邻准则的贪心算法 [36]。

为便于说明，图 3 展示了巡逻无人机用于覆盖空洞检测的轨迹。具体而言，三个圆形区域表示三个相邻地面基站的覆盖区域，

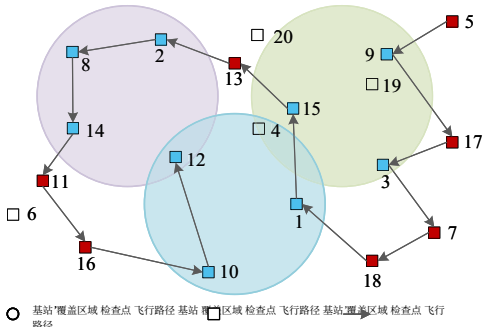


图 3. 巡逻无人机执行覆盖空洞检测的轨迹。蓝色/红色方块表示预设的巡逻无人机检查点，圆弧表示根据最近邻准则通过贪心算法确定的路径。每个检查点的颜色表示其覆盖状态：蓝色表示位于覆盖区域内，红色表示位于覆盖区域外。

方形表示原始检查点。此外，红色/蓝色方形表示属于 Φ_{CP} 的第二次选择中的 16 个检查点（即排除了点 4、6、19 和 20），弧线表示遍历所有检查点的哈密顿路径。巡逻无人机沿该轨迹飞行，并根据式（1）和式（3）以及给定的 γ_{th}，在每个预设检查点标注红色或蓝色。因此，形成了一个如图 3 所示、由 16 个点组成的有向图 $\mathcal{G}_{\mathrm{CP}}$。具体而言，覆盖区域之外的检查点标为红色（即巡逻无人机的接收信干噪比低于 γ_{th}）。相比之下，覆盖区域内的其他检查点标为蓝色（即巡逻无人机的接收信干噪比大于或等于 γ_{th}）。

B. 覆盖空洞恢复原理

根据检测到的覆盖空洞大小，考虑两种空中基站部署配置：

- 配置1：单个空中基站；
- 配置2：由四架无人机组成的空中基站集群，采用正四面体编队。

配置1用于恢复小型覆盖空洞，其特征是红色检查点彼此孤立（例如图 3 中的检查点 5、17 和 13）。配置2用于大型覆盖空洞，这类空洞可通过两个或更多连续的红色检查点识别（例如图 3 中的检查点 7 和 18，或 11 和 16）。对于大规模恢复，配置2采用由四架无人机组成的正四面体编队作为基本协作单元，这沿用了我们此前的研究成果 [15], [16], [37], ，并已通过三维覆盖和运动控制方面的验证。在此配置中，四架无人机执行协同多点传输，为地面用户设备提供服务。

对于位于已检测到的覆盖空洞内的地面用户设备，其从空中基站接收到的信干噪比可表示为

$$\mathrm{SINR}_{\mathrm{A2G}} \triangleq \frac{S_{\mathrm{A2G}}}{I_{\mathrm{A2G}}+n} \approx \frac{1}{n} P_{\mathrm{ABS}}^{\mathrm{tx}} \sum_{k=1}^{K} \|\boldsymbol{h}_{\mathrm{A2G},k}\|, \quad (4)$$

其中，A2G表示从空中基站到地面用户设备的链路， S_{A2G} 表示来自空中基站的接收信号功率，

算法1：离线调度算法

输入：基站位置 Φ_B 和检查点 Φ_{CP}，信道参数 $\boldsymbol{h}_{\mathrm{C2U}}$, α_{B}, $\boldsymbol{h}_{\mathrm{A2G}}$, $\alpha_{\mathrm{A,\ L}}$ 和 $\alpha_{\mathrm{A,\ N}}$，发射功率 $P_{\mathrm{BS}}^{\mathrm{tx}}$ 和 $P_{\mathrm{ABS}}^{\mathrm{tx}}$，以及信干噪比阈值 γ_{th}；
输出：配置和空中基站位置
1: 使用现有的哈密顿路径规划算法来构建一个有向图 $\mathcal{G}_{\mathrm{CP}}$；
2: 按照上一段中的思路，将 $\mathcal{G}_{\mathrm{CP}}$ 上的节点标记为‘R’或‘B’位于 III-A节 的最后一段；
3: 对于 $\mathcal{G}_{\mathrm{CP}}$ 上标记为‘R’的节点 i，执行
4: 　如果节点 i 的所有相邻节点都标记为‘B’ then
5: 　　节点 i 周围的覆盖空洞是‘小’；
6: 　else
7: 　　节点 i 周围的覆盖空洞为“大”；
8: 　结束 if
9: 结束 for
10: 如果节点 i 周围的覆盖空洞为“小”，则
11: 　采用配置1，且单个空中基站的位置位于节点 i上方；
12: 否则，如果节点 i 周围的覆盖空洞为“大”，则
13: 　采用配置2，且空中基站群体的质心位于节点 i 上方；
14: 结束 if

$P_{\mathrm{ABS}}^{\mathrm{tx}}$ 表示空中基站的发射功率，$\|\boldsymbol{h}_{\mathrm{A2G},\ k}\|$ 表示第 k个空中基站与用户设备之间的信道功率增益。这里，配置1中为 $K=1$，配置2中为 $K=4$。 I_{A2G} 表示来自相邻基站的干扰；由于用户设备位于覆盖空洞内，只能由空中基站提供服务，因此该干扰可以忽略不计。最后， n表示圆对称加性高斯白噪声的功率。

覆盖空洞大小的判定基于由有向图 $\mathcal{G}_{\mathrm{CP}}$ 表示的全局检测信息。根据红色检查点是分别出现还是连续出现，将覆盖空洞分为小型或大型（参见图 3）。确定位置和大小后，由卫星或附近基站安排空中基站部署。在配置1中，空中基站位于红色检查点的准确位置。在配置2中，ABS集群的质心与相应的红色检查点对齐。除非另有说明，简洁起见，使用“R”和“B”分别表示红色检查点和蓝色检查点。

C. 覆盖空洞检测与恢复算法

1) 一种离线启发式算法：巡逻无人机遍历其预设轨迹并得到有向图$\mathcal{G}_{\mathrm{CP}}$ 后，我们可以采用“先发现、先恢复”的简单思路来恢复所有检测到的覆盖空洞。因此，算法1给出了一个离线启发式方法。该方法主要由两部分组成：第1–9行检测覆盖空洞并确定其大小，第10–14行则调度空中基站对其进行恢复。由于对调度延迟不敏感，离线算法1适用于小型或中型无线网络。

2）在线调度算法：对于大规模无线网络，巡逻无人机需要很长时间才能完成预设轨迹，导致地面用户遭受难以忍受的服务时延。为解决这一问题，我们设计了一种在线调度算法

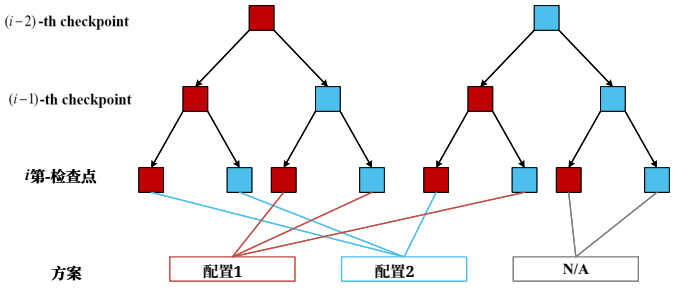


图4. 一种根据连续三个检查点的检测信息确定的在线调度策略。

以提升调度效率。原则上，根据（1），检测到的覆盖空洞可用平面形式表示。因此，图 3 所示的巡逻无人机检测过程可离散化为一系列序列，每个序列由连续三个检查点组成；每组三个连续检查点中前两个检查点对应的空中基站调度策略由其检测结果决定（参见图 4）。这一思路主要受到随机几何中的三角剖分理论启发，该理论有诸多应用，例如全球定位系统、地理信息系统和机器人定位 [38, 第 1],章 [39]以及近期的无线通信领域。

图4列举了所有根据连续三个检查点的检测结果确定调度策略的情况。空中基站针对前两个检查点，即$(i-2)^{\text{th}}$和$(i-1)^{\text{th}}$检查点，所作的调度决策是根据每连续三个检查点所获得的覆盖空洞信息确定的，即$(i-2)^{\text{th}}$、$(i-1)^{\text{th}}$和i^{th}检查点。显然，当三个检查点的颜色标签属于集合{RBR, RBB, BRB}时，采用配置1；当其属于集合{RRR, RRB, BRR}时，采用配置2。由于前两个检查点已完全决定该调度方案，因此，当标签属于集合{BBR, BBB}时，不采取任何行动。由此，算法2将在线调度算法形式化。原则上，这一算法思想可通过机器学习及其他基于人工智能的方法实现；这些问题留待今后研究。

注释1（检查点序列长度的选择）：在算法 2 中，我们采用由三个连续检查点构成的序列。我们并未声称这一长度是最优的，但它是使所提出的在线决策规则能够可靠地区分小型覆盖空洞和大型覆盖空洞的最小长度。只有两个检查点时，不同的空间模式（例如交错的“R”/“B”）会导致观测结果模糊。相比之下，更长的序列或许能提高鲁棒性，但代价是反应时间变慢，并可能掩盖虽短暂却至关重要的覆盖空洞。

3）在线调度与离线调度：我们将在线算法 2 与离线算法1进行比较。离线方案利用整个时间范围内的全局信息，能够实现接近最优的资源分配，但会依次执行发现与恢复。因此，对于覆盖空洞中的某个点，其中断

算法 2：在线空中基站调度算法

输入：地面基站的位置 Φ_B 和检查点 Φ_{CP}；
信道参数 $\boldsymbol{h}_{\text{C2U}}, \alpha_{\text{B}}, \boldsymbol{h}_{\text{A2G}}, \alpha_{\text{A}}$ $^{\text{L}}, \alpha_{\text{A}}$ $^{,\text{N}}$；
发射功率 $P_{\text{BS}}^{\text{tx}}$ 和 $P_{\text{ABS}}^{\text{tx}}$；信干噪比阈值 γ_{th}。
输出：空中基站配置和部署位置。
使用现有检查点构建有向图 $\mathcal{G}_{\text{CP}}$
哈密顿路径规划算法
检查点。
对于每个检查点 $i=3$：最大值 执行
  如果连续三个检查点的颜色标签
  属于 {RBR、RBB、BRB} 则
    部署配置1：单个空中基站。
    将空中基站放置在前两个检查点上方
    标记为‘R’。
  否则，如果连续三个检查点的颜色标签
  属于 {RRR、RRB、 BRR} 则
    部署配置2：采用四面体编队的ABS集群
    编队。
    将ABS集群的质心置于第一个
    标记为‘R’的两个检查点上方。
  结束 if
结束 for

时间在算法1下基本上等于发现时段与随后恢复时段之和。相比之下，算法 2 基于局部检查点序列运行，并将检测与恢复交错进行，使恢复能够在红色检查点出现后立即开始。这种重叠减少了平均中断时间，同时保持计算复杂度有界。

为量化这一增益，考虑一个边长为 a 的正方形区域，其中所有无人机都位于作为基地的一个角上，而巡逻无人机按照第三节 A 小节所述，沿检查点上的一条哈密顿路径行进。根据欧几里得空间 [40]，中的比尔德伍德–霍尔顿–哈默斯利定理，当检查点密度较大时，相应的路径长度满足

$$\mathbb{E}[L_{\text{CP}}] \approx \beta\, a^2 \sqrt{\lambda_{\text{CP}}}, \tag{5}$$

其中 β 是欧几里得平面上的一个普适常数。因此，总发现时间的增长规律为

$$\mathbb{E}[T_{\text{CP}}] \approx \frac{\beta a^2}{v} \sqrt{\lambda_{\text{CP}}}, \tag{6}$$

其中 v 是无人机的速度。

根据算法1，首先发现所有检查点（耗时 T_{CP}），之后再派遣空中基站。对于距离基地 r 的红色检查点，其完成时间为

$$T_{\text{Alg1}}(r) = T_{\text{CP}} + \frac{r}{v}. \tag{7}$$

对 R （从基地到随机选取的检查点的距离）取平均，并利用式（6）中 $\mathbb{E}[T_{\text{CP}}]$ 的增长规律，可得

$$\mathbb{E}[T_{\text{Alg1}}] = \frac{\beta a^2}{v} \sqrt{\lambda_{\text{CP}}} + \frac{\mathbb{E}[R]}{v}. \tag{8}$$

根据算法 2，一旦发现检查点并将其识别为红色，就会立即调度空中基站。沿着采用最近距离规则的哈密顿路径，距离为 r 的检查点的发现时间可

近似为 $t(r) \approx T_{\mathrm{CP}} F_R(r)$，其中 F_R 是 R 的累积分布函数。因此，相应的完成时间为

$$T_{\mathrm{Alg2}}(r) \approx T_{\mathrm{CP}} F_R(r) + \frac{r}{v}. \tag{9}$$

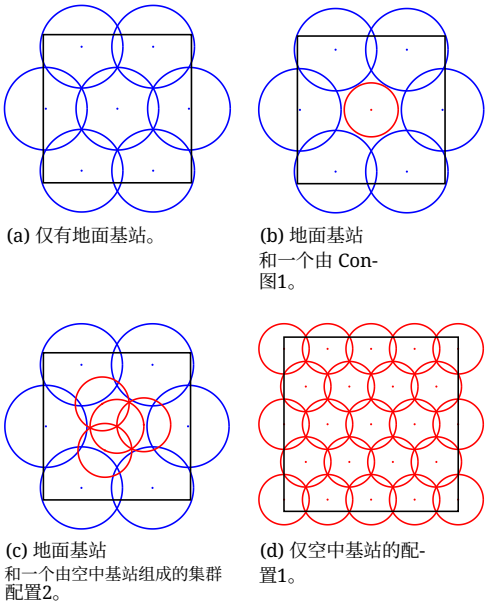
对 R 取期望，得到

$$\mathbb{E}[T_{\mathrm{Alg2}}] \approx \mathbb{E}[T_{\mathrm{CP}}]\,\mathbb{E}[F_R(R)] + \frac{\mathbb{E}[R]}{v}. \tag{10}$$

根据概率积分变换 [41, 第 3], 章，由于 R 是一个累积分布函数为 F_R 的连续随机变量，因此随机变量 $F_R(R)$ 在 $[0,1]$ 上服从均匀分布。因此，

$$\mathbb{E}[T_{\mathrm{Alg2}}] \approx \frac{1}{2}\frac{\beta}{v} a^2 \sqrt{\lambda_{\mathrm{CP}}} + \frac{\mathbb{E}[R]}{v}. \tag{11}$$

与 (8) 和 (11) 相比，可以得出，算法 2 将红色检查点的平均完成时间缩短了约总发现时间的一半，而且这一收益随 $a^2\sqrt{\lambda_{\mathrm{CP}}}/v$ 增大而提升；随着检查点密度 λ_{CP} 和区域长度 a 增大，这一收益会更加显著。总之，在大规模、密集监测场景中，在线调度策略的时延–性能权衡严格优于离线基准方案。



(a) 仅有地面基站。 (b) 地面基站和一个由 Con-图1。 (c) 地面基站和一个由空中基站组成的集群配置2。 (d) 仅空中基站的配-置1。

图5. 圆形覆盖问题示意图，其中蓝色圆和红色圆分别表示地面基站和空中基站的覆盖区域。

D. 建议的 ABS 最少数量

为实施所提出的恢复方法，我们必须确定在给定区域实现无缝覆盖所需的空中基站数量。为便于数学处理，基站部署被表述为一个圆覆盖问题：如图5(a)所示，整个网络覆盖区域由多个半径相同的圆覆盖。我们的目标是估算恢复所需服务质量所需的空中基站数量，如图5(b)和图5(c)所示。由于巡逻无人机完成检测之前，覆盖空洞的确切大小仍然未知，因此应按最坏情况准备充足的空中基站，如图5(d)所示。

定理 1（无缝覆盖所需基站数量的界）：设 $\mathcal{V} \in \mathbb{R}^2$ 表示可由 N_c（R）个基站完全覆盖的区域，每个基站的有效覆盖半径为 R。那么，

$$\underline{N_c} \triangleq \frac{\mathrm{vol}(\mathcal{V})}{\mathrm{vol}(\mathcal{B}(o,R))} \le N_c(R) \le \frac{\mathrm{vol}(\mathcal{V} \oplus \mathcal{B}(o,R/2))}{\mathrm{vol}(\mathcal{B}(o,R/2))} \triangleq \overline{N_c}. \tag{12}$$

证明：见附录 A。 ■

值得注意的是，R 是定理 1 中的一个关键参数，可按如下方式确定。回顾式（4），给定预设的信干噪比阈值 γ_{th}，并假设用户设备位于原点，则空中基站的覆盖半径为

$$\|\boldsymbol{r}\|^2 = \left(\frac{P_{\mathrm{ABS}}^{\mathrm{tx}}}{\gamma_{\mathrm{th}} n}\right)^{\frac{2}{\alpha_{\mathrm{U}}}} - h^2, \tag{13}$$

其中，$d = \sqrt{\|\boldsymbol{r}\|^2 + h^2}$ 是空中基站与用户设备之间的三维欧几里得距离，h 是空中基站高度。对于 ABS 集群，有效覆盖半径取决于 $\|\boldsymbol{r}_i\|$ 以及群体的几何构型，如图5(c)所示。因此，给定 $P_{\mathrm{ABS}}^{\mathrm{tx}}$、$\gamma_{\mathrm{th}}$和$h \in [H_1, H_2]$，即可近似计算所需的空中基站数量 $N_c(R)$。

在实际部署中，我们对$\|\boldsymbol{r}\|$ 关于空中基站高度分布取期望，并将有效覆盖半径定义为

$$R \triangleq \mathbb{E}[\|\boldsymbol{r}\|] \approx \left[\left(\frac{P_{\mathrm{ABS}}^{\mathrm{tx}}}{\gamma_{\mathrm{th}}}\right)^{\frac{2}{\alpha_{\mathrm{U}}}} - \mathbb{E}[h_i^2]\right]^{1/2}. \tag{14}$$

具体而言，对于单个空中基站（配置1），式（14）可简化为

$$R = \left[\left(\frac{P_{\mathrm{ABS}}^{\mathrm{tx}}}{\gamma_{\mathrm{th}}}\right)^{\frac{2}{\alpha_{\mathrm{U}}}} - h^2\right]^{1/2} \triangleq R_1. \tag{15}$$

对于一个ABS集群（配置2），如果一个空中基站以高度 h_a 飞行，另外三个以 h_b 飞行，其中 h_a，$h_b \in [H_1, H_2]$ 且 $h_a > h_b$，则有效覆盖半径可近似表示为

$$R = R_1 + \frac{\sqrt{2}}{2}(h_a - h_b) \triangleq R_2. \tag{16}$$

由于空中基站之间的垂直高度差受到限制，R_1 与 R_2 之间的差距很小。因此，实现无缝覆盖所需的空中基站数量可界定为

$$\begin{aligned}\min\left\{\underline{N_c}(R_1),\, 4\underline{N_c}(R_2)\right\} &\le N_c(R_1, R_2) \\ &\le \max\left\{\overline{N_c}(R_1),\, 4\overline{N_c}(R_2)\right\}.\end{aligned} \tag{17}$$

这一理论结果将在 V-A 节通过仿真进行验证和比较。

IV. 多ABS碰撞规避控制

为了修复检测到的覆盖空洞，我们同时调度多个空中基站，使其到达目标空间位置，并在必要时形成空中基站群体所需的几何图案。在这种情况下，必须谨慎设计具有避碰功能的多空中基站运动控制，以满足实际应用需求。因此，本节利用图论对空中基站的通信关系进行建模，并利用非线性多智能体系统理论解决具有避碰功能的空中基站群体控制问题。接下来，我们从空中基站动力学开始。

A. ABS动力学

假设在某一时刻，为实现覆盖恢复，存在 M 个配置1的空中基站和 N 个配置2的ABS集群，并令 $\mathcal{P}$ 和 $\mathcal{Q}$ 分别表示它们的空中基站集合。显然，由于 $|\mathcal{P}| = M$ 和 $|\mathcal{Q}| = 4N$，空中基站总数为 $M + 4N$ 个。考虑具有三维状态向量的 i^{th} 空中基站，其状态为 $i = 1, \cdots, M + 4N$，其动力学可描述为

$$\dot{\boldsymbol{x}}_i(t) = \boldsymbol{v}_i(t), \tag{18a}$$

$$\dot{\boldsymbol{v}}_i(t) = \boldsymbol{f}_R\left(\boldsymbol{v}_i(t)\right) + \boldsymbol{u}_i(\boldsymbol{x}_i(t), \boldsymbol{v}_i(t)), \tag{18b}$$

其中，式（18a）中的向量 $\boldsymbol{x}_i(t) \in \mathbb{R}^3$ 表示 i^{th} 空中基站的地理位置，关于 t 的一阶微分 $\dot{\boldsymbol{x}}_i(t)$表示其速度，即式（18a）中的 $\boldsymbol{v}_i(t)$；式（18b）中的函数 $\boldsymbol{f}_R(\boldsymbol{v}_i(t)) \in \mathbb{R}^3$ 表示 i^{th} 空中基站的固有非线性动力学，$\boldsymbol{u}_i(t) \in \mathbb{R}^3$ 表示时刻 t i^{th}空中基站的控制向量，其中包含两个参数 $\boldsymbol{x}_i(t)$和 $\boldsymbol{v}_i(t)$。为简化符号表示，若不会引起歧义，则省略式（18a）至（18b）中的所有自变量。

本文所考虑的每个空中基站的固有非线性动力学包括空气阻力、重力以及用于平衡重力的部分升力。其余升力用于维持空中基站在垂直方向上的状态，这一点已在下一小节的控制器设计中予以考虑。在数学上，式（18b）中的函数 $\boldsymbol{f}_R(\boldsymbol{v}_i(t))$ 可由 [42, 式（2.2）]明确近似为

$$\boldsymbol{f}_R\left(\boldsymbol{v}_i\right) = -\left(k_1\|\boldsymbol{v}_i\|_2 + k_2\|\boldsymbol{v}_i\|_2^2\right)\frac{\boldsymbol{v}_i}{M_i\|\boldsymbol{v}_i\|}, \tag{19}$$

其中，M_i 表示 i^{th} 空中基站的质量，正系数 k_1 和 k_2 的单位分别为千克每秒（kg/s）和千克每米（kg/m）。

B．空中基站集群控制与碰撞规避

我们首先在碰撞规避场景中定义碰撞区域和通信区域。如图6所示，对于位于 $\boldsymbol{x}_i$处的 i^{th} 空中基站，碰撞区域定义为 $\Psi_i \triangleq \{\boldsymbol{p}_i \mid \|\boldsymbol{x}_i - \boldsymbol{p}_i\| \le r_c\}$，通信区域定义为

$\Omega_i \triangleq \{\boldsymbol{p}_i \mid \|\boldsymbol{x}_i - \boldsymbol{p}_i\| \le r_d\}$，其中包含 $r_c \le r_d$。因此，i^{th}空中基站的相互避让区域可定义为 $\Psi_i \cap \Omega_i$。如果 j^{th} 空中基站进入 i^{th} 空中基站的相互避让区域，即 $\Omega_i \cap \Psi_j \neq \varnothing$，

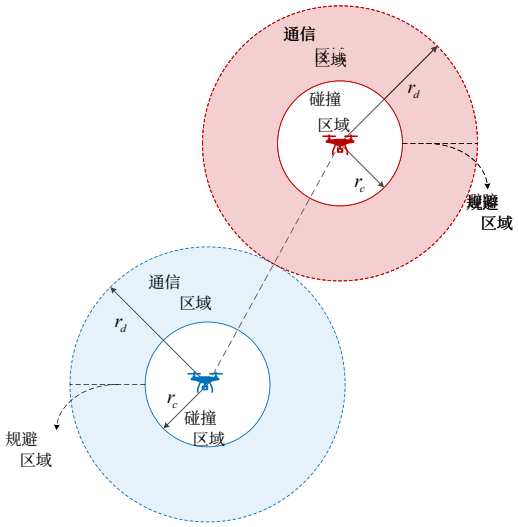


图6. 目标空中基站及其相邻空中基站的碰撞区域和通信区域示意图。

对于所有 $i \neq j$，其避碰机制都将被激活。

情况1：配置1的空中基站集合。考虑空中基站集合 $\mathcal{P}$ 中的 i^{th}ABS，我们采用控制策略 $\boldsymbol{u}_i \triangleq \boldsymbol{u}_i^{(\mathcal{P})}$ 来求解（18）。根据 [16]，$\boldsymbol{u}_i^{(\mathcal{P})}$ 可表示为

$$\boldsymbol{u}_i^{(\mathcal{P})} = -b_i\boldsymbol{v}_i - \sum_{q\in\mathcal{P}\cup\mathcal{Q}}\frac{\partial V^{ik}\left(\boldsymbol{x}_i, \boldsymbol{x}_k\right)}{\partial \boldsymbol{x}_i} + \boldsymbol{u}_i^{(\text{adap})}, \tag{20}$$

其中，$b_i \ge 0$ 表示在 i^{th} 空中基站处获得的局部反馈增益；碰撞避免势函数确定为 [43], ，即，

$$V^{(i,k)}\left(\boldsymbol{x}_i, \boldsymbol{x}_k\right) = \begin{cases} \left(\dfrac{r_d^2 - \|\boldsymbol{x}_i - \boldsymbol{x}_k\|^2}{\|\boldsymbol{x}_i - \boldsymbol{x}_k\|^2 - r_c^2}\right)^2, \\ \qquad \text{if } r_c \le \|\boldsymbol{x}_i - \boldsymbol{x}_k\|^2 \le r_d; \\ 0, \quad \text{if } r_d \le \|\boldsymbol{x}_i - \boldsymbol{x}_k\|^2, \end{cases} \tag{21}$$

而 $V_{(i,k)}\left(\boldsymbol{x}_i, \boldsymbol{x}_k\right)$ 关于 $\boldsymbol{x}_i$ 的每个元素（例如 $x_{i,\ell}$，其中 $\ell \in \{1,2,3\}$）的偏导数为

$$\frac{\partial V^{(i,k)}\left(\boldsymbol{x}_i, \boldsymbol{x}_k\right)}{\partial x_{i,\ell}} = \begin{cases} \frac{4\left(r_d^2 - r_c^2\right)\left(r_d^2 - \|\boldsymbol{x}_i - \boldsymbol{x}_k\|^2\right)\left(x_{k,\ell} - x_{i,\ell}\right)}{\left(\|\boldsymbol{x}_i - \boldsymbol{x}_k\|^2 - r_c^2\right)^3}, \\ \qquad \text{if } r_c \le \|\boldsymbol{x}_i - \boldsymbol{x}_k\|^2 \le r_d; \\ 0, \quad \text{if } r_d \le \|\boldsymbol{x}_i - \boldsymbol{x}_k\|^2. \end{cases} \tag{22}$$

（20）的最后一项为 $\boldsymbol{u}_i^{(\text{adap})} \in \mathbb{R}^3$，其元素 $u_{i\,\ell}^{(\text{adap})}$，（其中 $\ell \in \{1,2,3\}$）表示为

$$u_{i,\ell}^{(\text{adap})} = c_i \cdot \begin{cases} \varepsilon_{i,\ell}\,\text{sgn}\left(x_{i,\ell} - x_{i,\ell}^{\text{dest}}\right), \\ \qquad \text{if } |x_{i,\ell} - x_{i,\ell}^{\text{dest}}| > \varepsilon_{i,\ell}; \\ x_{i,\ell} - x_{i,\ell}^{\text{dest}}, \ \text{if } |x_{i,\ell} - x_{i,\ell}^{\text{dest}}| \le \varepsilon_{i,\ell}, \end{cases} \tag{23}$$

其中，c_i 和 $\varepsilon_{i,\ \ell}$ 均为正的控制常数，$\boldsymbol{x}_i^{\text{dest}} \triangleq \left[x_{i,1}^{\text{dest}}, x_{i,2}^{\text{dest}}, x_{i,3}^{\text{dest}}\right]^{\text{T}}$ 表示 i^{th} 空中基站的目标位置；上述变量

除非另有说明，其含义与式（18）中的变量相同。

直观而言，式（21）给出的势函数结合了吸引项和排斥项：吸引项将每架无人机拉向其期望的编队位置，排斥项则使其远离附近的无人机和障碍物。因此，式（20）中的负梯度项可视为引导运动的虚拟力场。

情况2：配置2中的空中基站群体。同一群体中的空中基站彼此交互。因此，空中基站集合 $\mathcal{Q}$ 可分解为 $\mathcal{Q} = \{\mathcal{Q}_1, \cdots, \mathcal{Q}_N\}$，且每个子集 $\mathcal{Q}_n$ 包含4个空中基站，并且 $\mathcal{Q}_m \cap \mathcal{Q}_n = \varnothing$，对于所有 $m \neq n$ 和$m, n \in \{1, \cdots, N\}$。为了对群体中空中基站之间的交互进行建模，本文采用图论，并在继续讨论前介绍几个概念。具体而言，我们将空中基站群体 $\mathcal{Q}_n$ 建模为由4个智能体组成的非线性多智能体系统。智能体之间的交互可用加权有向图$\mathcal{G} = \{\mathcal{V}, \mathcal{E}\}$描述，其中 $\mathcal{V} = \{1, 2, 3, 4\}$ 为节点集合，$\mathcal{E} \subseteq \mathcal{V} \times \mathcal{V}$ 表示边集合。 $\mathcal{E}$ 中的有向边a_{ij} 表示为节点的有序对（i, j），这意味着节点 j 可以从节点 i获取信息，反之则不然。定义加权邻接矩阵$\boldsymbol{A} = [a_{ij}] \in \mathbb{R}^{4\times 4}$，若 $i = j$，则 $a_{ij} = 0$；若$i \neq j$，则 $a_{ij} \geq 0$。

考虑群体 $\mathcal{Q}_n \subset \mathcal{Q}$中的 i^{th} 空中基站，我们采用控制策略 $\boldsymbol{u}_i \triangleq \boldsymbol{u}_i^{(\mathcal{Q})}$ 来求解该ABS集群的式（18），其形式为 [16]

$$\boldsymbol{u}_i^{(\mathcal{Q})} = -\left(\sum_{j\in\mathcal{Q}_n} a_{ij}(\boldsymbol{x}_i - \boldsymbol{x}_j - \boldsymbol{x}_i^* + \boldsymbol{x}_j^*) + b_i\boldsymbol{v}_i + \sum_{k\in\mathcal{P}\cup\mathcal{Q}} \frac{\partial V^{(i,k)}(\boldsymbol{x}_i, \boldsymbol{x}_k)}{\partial \boldsymbol{x}_i} + \boldsymbol{u}_i^{(\text{adap})}\right), \tag{24}$$

其中，$\boldsymbol{x}_i^*$表示群体编队中 i^{th} 空中基站的预期相对位置，其余变量的含义与式（18）和（20）中的相似。与式（20）相比，式（24）括号中的第一项是新增的，用于确保ABS集群的几何编队。

为简化符号，定义 $\tilde{\boldsymbol{x}}_i \triangleq \boldsymbol{x}_i - \boldsymbol{x}_i^{\text{dest}}$为 i^{th} 空中基站与其目的地之间的相对位置向量，并定义$\tilde{\boldsymbol{v}}_i \triangleq \dot{\tilde{\boldsymbol{x}}}_i = \boldsymbol{v}_i$。值得注意的是，$i^{\text{th}}$ 空中基站位置的二维（2D）投影（即 $\boldsymbol{x}_i^{\text{dest}}$）与集合 $\mathcal{P}$中的对应检查点相同。对于集合 $\mathcal{Q}$ 中的空中基站群体，i^{th}空中基站的 $\boldsymbol{x}_i^{\text{dest}}$不仅与其对应的检查点有关，也与其在群体编队中的相对位置有关（即 $\boldsymbol{x}_i^*$）。接下来，结合式（18）–（20）和式（24）并进行一些代数运算，可得

$$\dot{\tilde{\boldsymbol{x}}}_i = \tilde{\boldsymbol{v}}_i, \tag{25a}$$

$$\dot{\tilde{\boldsymbol{v}}}_i = \boldsymbol{f}_R(\tilde{\boldsymbol{v}}_i) - b_i\tilde{\boldsymbol{v}}_i - \sum_{q\in\mathcal{P}\cup\mathcal{Q}} \frac{\partial V^{(i,k)}(\boldsymbol{x}_i, \boldsymbol{x}_k)}{\partial \boldsymbol{x}_i} - \tilde{\boldsymbol{u}}_i^{(\text{adap})} - \begin{cases} \sum_{j\in\mathcal{Q}_n} a_{ij}(\tilde{\boldsymbol{x}}_i - \tilde{\boldsymbol{x}}_j), & \text{if } i \in \mathcal{Q}; \\ 0, & \text{if } i \in \mathcal{P}, \end{cases} \tag{25b}$$

其中 $\tilde{\boldsymbol{u}}_i^{(\text{adap})} \in \mathbb{R}^3$ 的每个元素表示为

$$\tilde{u}_{i,\ell}^{(\text{adap})} = c_i \cdot \begin{cases} \varepsilon_{i,\ell}\,\text{sgn}(\tilde{x}_{i,\ell}), & \text{if } |\tilde{x}_{i,\ell}| > \varepsilon_{i,\ell}; \\ \tilde{x}_{i,\ell}, & \text{if } |\tilde{x}_{i,\ell}| \leq \varepsilon_{i,\ell}, \end{cases} \tag{26}$$

其中 $\ell \in \{1, 2, 3\}$，上述变量的含义与式（18）、（20）和（24）中的相似。在给出本节的主要结果之前，下面重述稳定性理论中的两个预备假设。

假设1（强连通）：关于由 $\mathcal{Q}_n$、 $n = 1, \cdots, N$给出的系统的图 $\mathcal{G}$ 是强连通的，即图中任意一对顶点之间都存在双向路径。

显然，如果孤立节点未从任何其他节点接收到信息，则无法实现控制策略。因此，对于所研究的ABS集群，该强连接假设成立。

假设2（初始位置）：在 $t = 0$时，空中基站位于相互碰撞区域之外。

显然，如果合理选择空中基站的初始位置，假设2在实践中是成立的。

现在可以给出本节的主要结果。带避碰功能的ABS集群控制策略的可行性可由以下定理确定。

定理2：给定假设1和假设2，具有式(25)所示动力学的ABS集群能够在保持避碰的同时到达目标位置。

证明：见附录B。 ■

作为一种特殊情况，如果只有一个ABS集群执行任务，即 $M = 0$ 和 $N = 1$，上述移动控制策略便简化为我们先前工作 [16]中所述的情况。

V. 仿真结果与讨论

本节将展示并讨论蒙特卡洛仿真结果。在相关仿真实验中，假设无线网络的覆盖区域为边长和宽度均为1 k m的正方形。巡逻无人机以25 m的高度飞行，以检测潜在的覆盖空洞。根据技术报告3GPP TR 23.754 [44], ，无人机的飞行高度限制在300 m以下。因此，若采用配置1，单个空中基站以150 m的高度飞行；若采用配置2，ABS集群中的一个空中基站以300 m的高度飞行，其余三个空中基站则在150 m的高度构成一个正四面体。

此外，我们假设接收信干噪比阈值为 γ_{th} =11.3 dB。也就是说，假设接收信干噪比高于 11.3dB 时足以实现有效通信，而低于 11.3 dB 的 SINR 水平则被视为较弱，并会导致覆盖空洞。此外，检查点排斥半径（D）与地面基站之间的平均距离相同。为简洁起见，主要

表 I 仿真实验参数设置。

参数（符号）	值
地面基站密度（λ_B）	100 基站/千米^2
地面基站带宽	15 MHz
地面基站高度	30 m [45]
地面基站发射功率 ($P_{\mathrm{BS}}^{\mathrm{tx}}$)	43 分贝毫瓦 [46]
Nakagami形状因子（m）	3 [47]
路径损耗指数（α_{B}，$\alpha_{\mathrm{A,\ L}}$，$\alpha_{\mathrm{A,\ N}}$）	2.2,2, 2.5 [47]
非视距/视距环境变量（a，b）	$\pi/18$，0.11 [48]
巡逻无人机高度	25 m
接收信干噪比阈值 (γ_{th})	11.3 dB
检查点密度 (λ_{CP})	50 点/km^2 (默认)
检查点排斥半径 (D)	100 m
空中基站发射功率（$P_{\mathrm{ABS}}^{\mathrm{tx}}$）	37 分贝毫瓦 [49]

仿真实验中使用的参数汇总于表 I。

A. 覆盖空洞检测与恢复的有效性

为评估我们提出的覆盖空洞检测与恢复方法的有效性，我们进行了包含 2000 次独立试验的蒙特卡洛仿真。我们采用箱线图来呈现结果的统计变异性。图 7 展示了两种场景（常规场景和稀疏场景）下的仿真结果。常规场景对应于感兴趣区域内覆盖率超过 80% 的地面基站部署；稀疏场景则指仅有 30% 的基站仍在运行的情况。默认检查点密度设为 $\lambda_{\mathrm{CP}} = 50$ 个点// 千米^2。

图 7 上半部分比较了两种场景下的原始覆盖率与恢复后的覆盖率。在常规情况下，覆盖率中位数从 0.90 上升至 0.95；而在稀疏情况下，则从 0.55 上升至 0.79。这些结果表明，我们的方法提升了两种场景下的区域覆盖率，并且在稀疏条件下效果更为显著。

图 7 下方的面板展示了每个空中基站的平均覆盖改善，以及为恢复覆盖而部署的空中基站总数。常规场景中每个空中基站的覆盖改善中位数为 8961.57 m^2，，超过稀疏场景（4421.57 m^2）的两倍。相反，常规情况下用于恢复覆盖的空中基站数量中位数为 5，不到稀疏场景所需的 52 个空中基站的十分之一。这一差异是因为稀疏场景的平均信干噪比较低，需要部署更多空中基站才能实现充分覆盖。在实际应用中，对于稀疏场景，部署多个 ABS 集群比部署单个空中基站更有效

场景中，单个空中基站的覆盖范围相对有限。最后，基于（17）的理论计算表明，可行的空中基站数量范围为 $[3, 80]$，这与图 7 下方子图所示的仿真结果高度吻合。

图8展示了稀疏场景下的仿真结果，包括覆盖率和平均

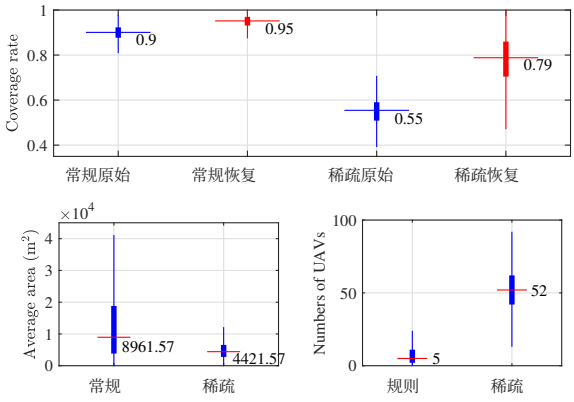


图 7. 常规场景和稀疏场景中的覆盖率（上图）、每个空中基站带来的平均覆盖区域增量（左下图），以及用于恢复的空中基站数量（右下图）。

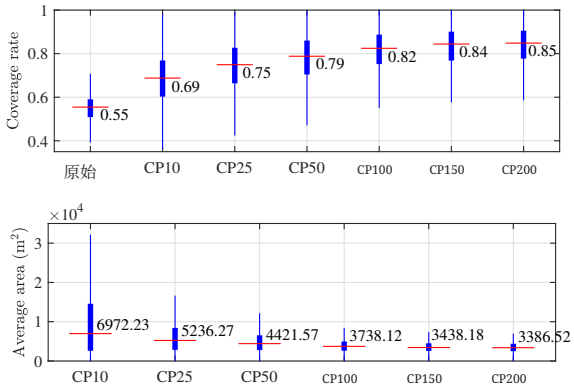


图8. 稀疏场景下，$\lambda_{\mathrm{CP}} = \{10, 25, 50, 100, 150, 200\}$ points/km^2 时的覆盖率（上）和每个空中基站的平均改进覆盖面积（下）。

不同检查点密度下每个空中基站的覆盖改进

$\lambda_{\mathrm{CP}} = \{10, 25, 50, 100, 150, 200\}$ 点/千米^2，分别标记为“CP10”、“CP25”、“CP50”、“CP100”、“CP150”和“CP200”。

图8上图比较了原始覆盖率与恢复后的覆盖率。正如预期，覆盖率随检查点密度的增加而提高，但随着检查点数量增多，增益逐渐减小。具体而言，当 $\lambda_{\mathrm{CP}} = 50$ points/km^{2}时——约为地面基站密度 λ_B的一半——恢复后的覆盖率达到79%，与常规场景（80%）几乎相同。这一观察结果表明，当检查点数量接近替代停用基站所需的最小数量时，恢复后的覆盖率能够达到常规网络的性能水平。

图8下方面板显示，随着检查点密度增加，每个空中基站的平均覆盖改善会降低。这一趋势的原因是，尽管检查点密度增加时部署的空中基站也会增多，但当

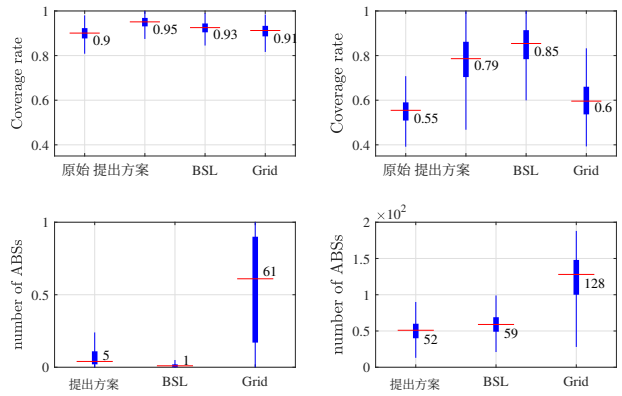


图 9. 在规则（左）和稀疏（右）场景下，所提出的方法、基于基站位置的方法和基于网格的方法在覆盖率（上）及用于恢复的空中基站数量（下）方面的比较。

密度足够高，正如预期。

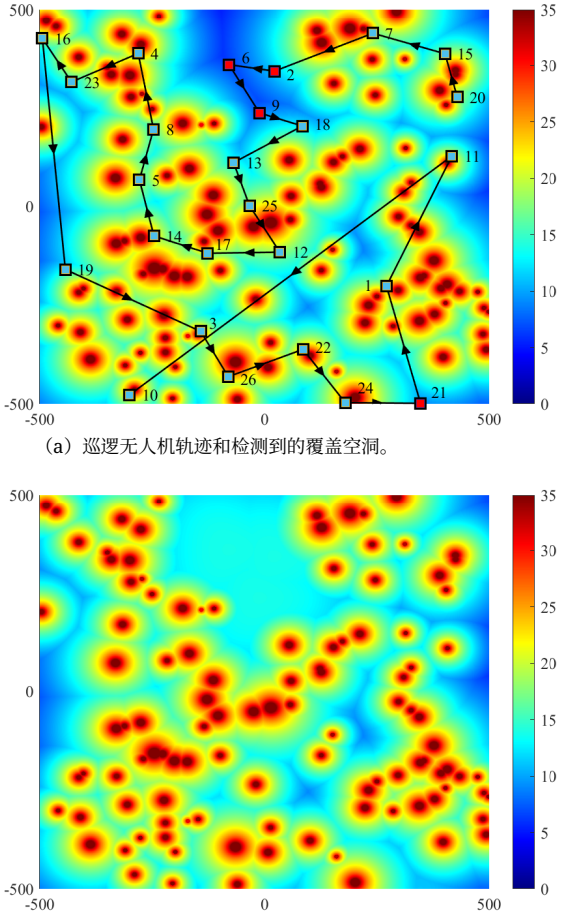
B. 所提出的方法、基于基站位置的方法和基于网格的方法的比较

图 9 对所提出的方法、基于基站位置（BSL）的方法和基于网格（Grid）的方法在覆盖率（上）及恢复所需的空中基站数量方面进行了比较评估，并以原始网络状态（原始）作为基准。具体而言：

- 原始（基准）：从原始数据获得的未经修改的网络状态，未部署空中基站；用作参考。
- 所提出的方法：本文介绍的方法，已在算法 2 中形式化定义。
- BSL：一种变体，将地面基站的位置用作先验知识，并将这些位置配置为算法 2 的检查点。
- 网格：一种基线方法，将检查点设置在均匀 7×7 网格的中心，并采用从上到下的蛇形遍历，以确保完整覆盖。

在标准场景（图9左侧面板）中，三种方法均实现了相近的高覆盖率（0.93–0.95），接近原始覆盖率（0.90）。然而，与基于网格的方法（61个）相比，所提出的方法和BSL方法所需的空中基站数量要少得多（分别为5个和1个），展现出更高的部署效率。

在稀疏场景下（图 9 右侧面板），与基于网格的方法（0.60）相比，所提出的方法和 BSL 方法在部署更少空中基站的情况下（52 和 59 个，而基于网格的方法为 128 个），实现了更高的覆盖率（0.79 和 0.85）。这些结果表明，所提出的方法和 BSL 方法都能以少得多的空中基站实现相当或更高的覆盖率，尤其是在稀疏网络条件下。与基于网格的方法不同，后者不考虑覆盖损失的空间模式，均匀分布空中基站；所提出的方法则会自适应地针对



（a）巡逻无人机轨迹和检测到的覆盖空洞。

（b）覆盖空洞恢复后的信干噪比热力图。

图10. 规则地面基站的覆盖空洞检测与恢复仿真结果。

实际覆盖缺口，从而最大限度地减少冗余部署并提高资源效率。

尽管BSL方法可以被视为所提出方法的一种特殊情况，但通过加强基站周围的覆盖范围，我们的方法在规则场景中始终能够实现更高的恢复率。借助更全面的检测，该方法在稀疏场景中也取得了显著改进。总体而言，这些发现凸显了采用自适应、需求驱动的空中基站部署策略对于在 diverse 环境中实现高效且有效的网络恢复的优势。

C. 案例研究1：覆盖空洞检测与恢复

为说明所提方法的有效性，我们针对规则和稀疏地面基站部署，开展了覆盖空洞检测与恢复案例研究。

1) 常规地面基站：图10展示了常规情况下的仿真结果。图10a的背景显示了信干噪比热力图，其中12.52%的区域信干噪比低于11.3 dB。我们通过排斥半径为 $D = 100$ m的Matérn硬核过程生成了26个检查点。巡逻无人机遍历这些检查点的最短路径

使用Dijkstra算法求得，如图10a中的弧线所示。

检测结果表明，26个检查点中有4个落在覆盖空洞内，这与信干噪比统计结果一致（约有15.38%低于阈值）。图10b展示了恢复后的信干噪比热力图，显示检查点2、6、9和21附近的情况显著改善。按每平方米的粒度计算，整体覆盖率提高了约5.8%，证明该方法在常规网络中的有效性。

2）稀疏地面基站：在地震或飓风等网络紧急情况下，大多数地面基站可能会失效。图11展示了仅有30%的基站仍正常运行时的覆盖检测与恢复情况。图11a显示，110个基站中仅有37个处于活动状态，导致43.42%的区域低于11.3 dB。图中还显示了巡逻无人机预设的31个检查点，以及通过Dijkstra算法得出的最短路径。其中，只有15个检查点位于有效覆盖区域内。

部署 ABS集群后，图11b中的信干噪比热力图变得更加均匀，使用52个空中基站替代73个失效基站，使覆盖率从56.58%提高到81.90%。对比图10b和图11b可以发现，即使在常规情况下，仍存在覆盖不理想的残余区域。在实际应用中，增加检查点密度或巡逻无人机的数量/频率可以进一步提升覆盖率。

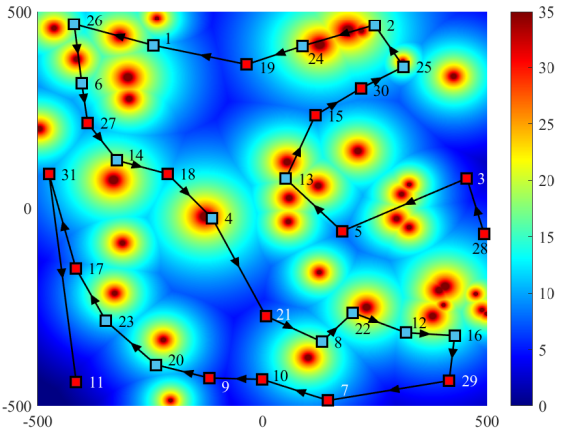
3）巡逻访问顺序的影响：为考察不同检查点访问顺序的影响，我们在原始覆盖率为56.58%的稀疏场景中，使用图11a所示的同一检查点图模拟了六种变化情况。检测从四个远端点（最左侧：31，最右侧：28，最顶部：26，最底部：7）和两个随机内部点（15和4）开始。

表 II总结了实验结果。不同起始点所使用的空中基站总数和恢复后的覆盖率基本相近。然而，访问顺序会显著影响空中基站配置。例如，从最左侧点31开始，需要使用6个独立空中基站来恢复检查点5、7、15、18、19和30周围的区域，并使用10个 ABS集群共同服务检查点 $\{3,28,29\}$、 $\{9,10,21\}$、 $\{11,17\}$和 $\{27,31\}$。相比之下，从最右侧点28开始，则需要4个独立空中基站和12个ABS集群来服务相应的检查点簇。

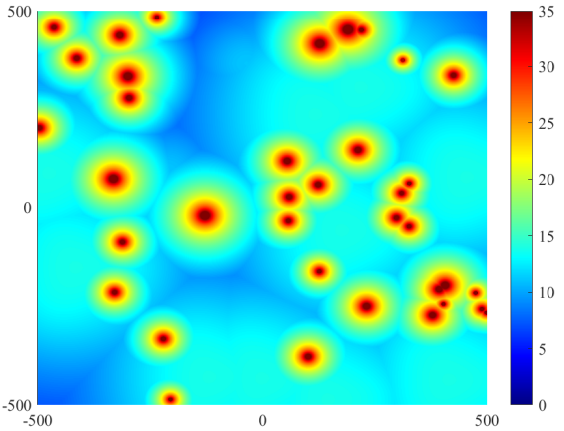
D. 案例研究2：多ABS碰撞规避控制

为展示所提出的控制策略 (20) 和 (24) 在ABS集群几何编队与避碰方面的有效性，我们考虑图11右上象限中的前九个检查点（标记为28、3、5、13、15、30、25、2和24）。在此场景中，计划由五个ABS集群分别恢复检查点28、3、5、15和30周围的覆盖空洞。

仿真参数设置如下：碰撞半径为 $r_c = 10$ 米，通信半径为 $r_d = 30$ 米，



(a) 巡逻无人机轨迹及检测到的覆盖空洞。



(b) 覆盖空洞恢复后的信干噪比热力图。

图11. 稀疏地面基站的覆盖空洞检测与恢复仿真结果。

ABS最大速度为 20 m/s，ABS质量为 1 千克。控制系数为 $k_1 = 0.01$ kg/s、 $k_2 = 0.02$ kg/m，其中 $b_i = 0.5$ 和 $\varepsilon_{i,\ell} = 10$ 适用于所有 $\ell \in \{1,2,3\}$。

每个空中基站在惯性坐标系中的三维位置向量为 $\boldsymbol{x}_i = [x_{iX}, x_{iY}, x_{iZ}]^{\mathrm{T}}$，遵循右手定则。图12展示了每个群体的互连拓扑，相应的加权邻接矩阵 $\boldsymbol{A}$ 用于 (24)，其形式为

$$\boldsymbol{A} = 0.01 \times \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}. \tag{27}$$

系数 0.01 是通信控制增益，用于使输入幅值保持在同一数量级。与 [16,图 3], 中的主从结构不同，这种无领航者互连方式提高了对故障的鲁棒性。

图13展示了ABS集群在恢复过程中的误差动态。位置误差和速度误差的各个分量均在400 s内收敛至零，且ABS速度越高，收敛越快。在约 $t = 500$ s时，由于一个模拟阵风的脉冲环境扰动 $[5, 10, -3]^{\mathrm{T}}$ ，误差出现轻微抖动，随后迅速恢复至零。这些结果表明

表 II 同一检查点图上不同访问顺序的统计数据。

起始点	空中基站数量	覆盖率 恢复后	空中基站配置	
			配置1	配置2
最左侧 点31	46	80。25%	{5}、{7}、{15}、 {18}, {19}, {30}	{3, 28, 29}, {9, 10, 21}, {11, 17}, {27, 31}
最右侧 点 28	52	81。90%	{18}, {19}, {21}, {27}	{3, 5, 28}, {7, 9, 10, 29}, {15, 30}, {11, 17, 31}
最顶部 点 26	55	85。06%	{18}, {19}, {27}	{3, 5, 11, 21, 28, 29}, {7, 9, 10}, {15, 30}, {17, 31}
最底部的 点 7	52	84.02%	{7}, {18}, {19}, {27}	{3, 5, 28, 29}, {9, 10}, {11, 17, 31}, {15, 30}
随机点 15	52	83.76%	{5}, {18}, {19}, {27}	{3, 28, 29}, {7, 11, 17, 31} {9, 10, 21}, {15, 30}
随机点 4	46	80。66%	{5}, {15}, {18}, {19}, {27}, {30}	{3, 28, 29}, {7, 11, 17, 31}, {9, 10, 21}

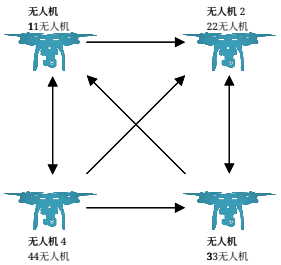
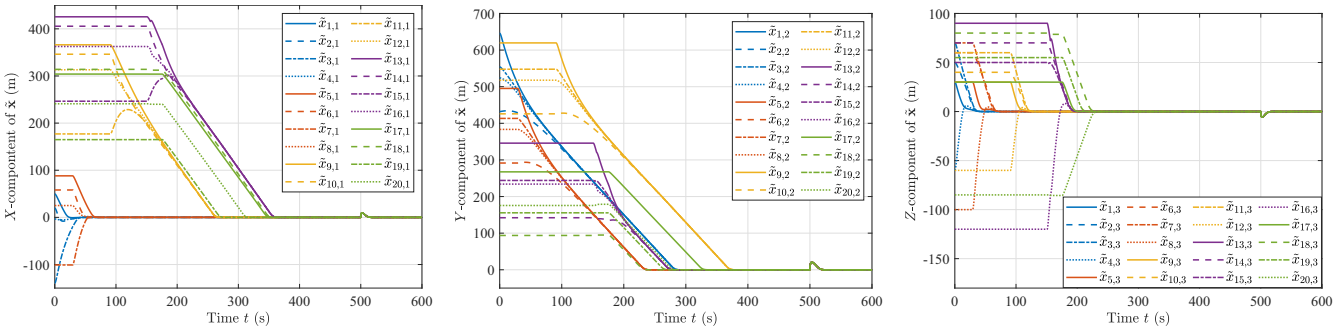
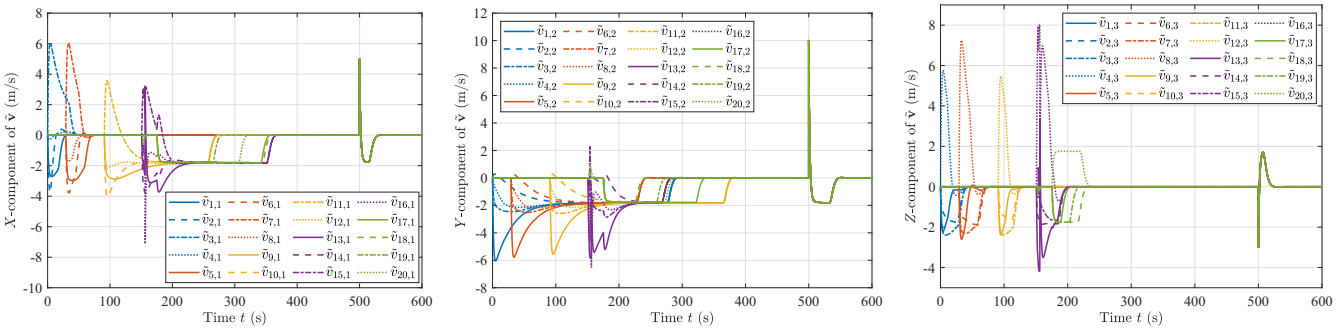


图12. 同一蜂群中空中基站之间的通信模型。



(a) X 分量的位置误差 (b) Y 分量的位置误差 (c) Z 分量的位置误差



(d) X 分量的速度误差 (e) Y 分量的速度误差 (f) Z 分量的速度误差

图13. 自主机器人蜂群恢复五个检查点时的误差动力学。上图显示位置误差，下图显示速度误差。

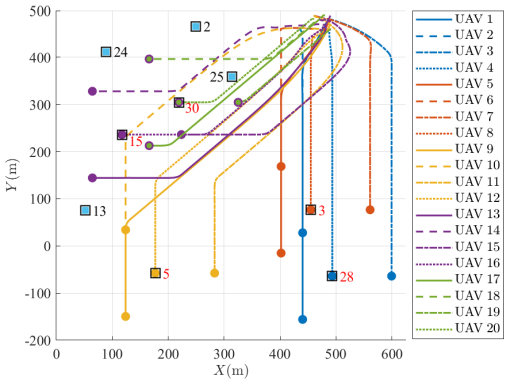
集群能够保持编队，有效到达目标位置，并且对扰动具有鲁棒性。

为便于直观展示，图14a显示了五个ABS集群恢复目标检查点时的二维轨迹。每个群体在起飞后形成，并前往预先确定的检查点位置。图14b描述了任意两个空中基站之间的最小距离，证实该距离始终大于 $r_c = 10$米，从而确保无碰撞运行。

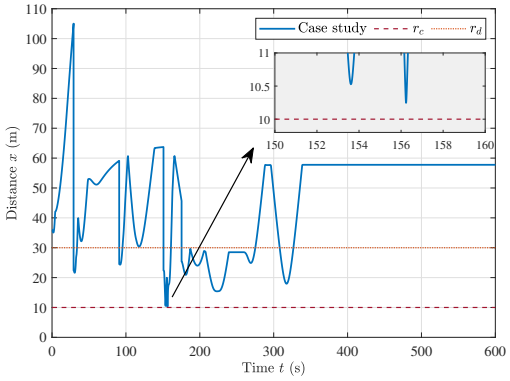
VI. 结论

本文提出了一种新颖的基于无人机的无线网络框架，用于检测并恢复地面覆盖空洞，并利用空天地资源实现快速且具有韧性的网络恢复。本文开发了一种在线调度方案，用于识别覆盖缺口，并根据缺口大小确定所需的空中基站数量；同时，针对单个空中基站和空中基站集群部署，设计了一种碰撞感知移动控制策略。仿真结果表明，即使在地面基站稀疏的条件下，所提出的方法也能有效恢复覆盖，并受益于空中基站集群中的协作多点传输。除了恢复覆盖，该框架还能够提升整体覆盖水平。

从运行角度来看，当前工作并未明确建模若干实际因素，但这些因素对真实部署至关重要。具体而言，无人机的能量消耗和续航约束将限制可行的巡逻时长和恢复频率；回传连接（例如通过卫星或地面网关实现）的可用性和容量，则会影响控制信息和用户流量的中继速率。



(a) ABS集群的二维轨迹。



(b) 任意两个空中基站之间的最小距离。

图14. ABS集群的二维轨迹与避碰。每个空中基站从随机选定的位置起飞，形成稳定的群体，并飞往目标检查点。在整个任务期间，空中基站之间的最小距离始终高于预设的碰撞半径 $r_c = 10$米。

未来的工作将通过制定感知能量的调度策略、续航约束巡逻规划以及感知回传的资源分配方案，将这些因素纳入框架；这些方案对于大规模非地面网络部署尤为重要。

附录 A 定理 1 的证明

考虑给定区域 $\mathcal{V} \subset \mathbb{R}^2$ 和空中基站的有效覆盖半径 R。假设 $\mathcal{V}$ 可以由 $N_c(R)$ 个空中基站无缝覆盖，即

$$\mathcal{V} \subset \bigcup_{i=1}^{N_c(R)} \mathcal{B}(\boldsymbol{x}_i, R), \tag{28}$$

其中，$\mathcal{B}(\boldsymbol{x}_i, R)$ 表示以 $\boldsymbol{x}_i$ 为中心、半径为 R 的球。于是可得

$$\begin{aligned}\operatorname{vol}(\mathcal{V}) \le \operatorname{vol}\left(\bigcup_{i=1}^{N_c(R)} \mathcal{B}(\boldsymbol{x}_i, R)\right) &\le \sum_{i=1}^{N_c(R)} \operatorname{vol}\left(\mathcal{B}(\boldsymbol{x}_i, R)\right) \\ &= N_c(R) \operatorname{vol}\left(\mathcal{B}(\boldsymbol{o}, R)\right).\end{aligned}$$

两边同时除以 $\operatorname{vol}(\mathcal{B}(\boldsymbol{o}, R))$，得到下界：

$$\frac{\operatorname{vol}(\mathcal{V})}{\operatorname{vol}(\mathcal{B}(\boldsymbol{o}, R))} \le N_c(R). \tag{29}$$

对于上界，考虑以 $\boldsymbol{y}_i \in \mathcal{V}$ 为球心、半径为 $R/2$ 的 $N_p(R)$ 个互不相交的球。尽管这些球可能并非完全位于 $\mathcal{V}$ 内，但它们可以容纳在膨胀后的集合中

$$\bigcup_{i=1}^{N_p(R)} \mathcal{B}(\boldsymbol{y}_i, R/2) \subset \mathcal{V} \oplus \mathcal{B}(\boldsymbol{o}, R/2), \tag{30}$$

其中，$\oplus$ 表示闵可夫斯基和。由于这些球互不相交，任意两个球心之间的距离至少为R。对两边取体积可得

$$\begin{aligned}\operatorname{vol}\left(\mathcal{V} \oplus \mathcal{B}(\boldsymbol{o}, R/2)\right) &\ge \operatorname{vol}\left(\bigcup_{i=1}^{N_p(R)} \mathcal{B}(\boldsymbol{y}_i, R/2)\right) \\ &= N_p(R) \operatorname{vol}\left(\mathcal{B}(\boldsymbol{o}, R/2)\right),\end{aligned}$$

这意味着

$$N_p(R) \le \frac{\operatorname{vol}\Big(\mathcal{V} \oplus \mathcal{B}(\boldsymbol{o}, R/2)\Big)}{\operatorname{vol}\Big(\mathcal{B}(\boldsymbol{o}, R/2)\Big)}. \tag{31}$$

最后，根据 [50, 引理 4.2。8], 可得 $N_c(R) \le N_p(R)$。结合上下界，可得定理 1 所要求的结果。

Appendix B
The proof of Theorem 2

构造如下李雅普诺夫泛函候选函数

$$V = V_1 + V_2 + V_3 + V_4, \tag{32}$$

其中

$$V_1 = \frac{1}{2} \sum_{\ell=1}^{3} \sum_{n=1}^{N} \sum_{i \in \mathcal{Q}_n} \sum_{j \in \mathcal{Q}_n} w_{ij} \left(\tilde{x}_{i,\ell} - \tilde{x}_{j,\ell}\right)^2, \tag{33a}$$

$$V_2 = \sum_{\ell=1}^{3} \left(\sum_{i \in \mathcal{P}} \tilde{v}_{i,\ell}^2 + \sum_{n=1}^{N} \sum_{i \in \mathcal{Q}_n} \tilde{v}_{i,\ell}^2 \right), \tag{33b}$$

$$\begin{aligned}V_3 = \sum_{\ell=1}^{3} \sum_{k \in \mathcal{P} \cup \mathcal{Q}} \Bigg(&\sum_{i \in \mathcal{P}} V_\ell^{(i,k)}\left(x_{i,\ell}, x_{k,\ell}\right) \\ &+ \sum_{n=1}^{N} \sum_{i \in \mathcal{Q}_n} V_\ell^{(i,k)}\left(x_{i,\ell}, x_{k,\ell}\right) \Bigg),\end{aligned} \tag{33c}$$

$$V_4 = \sum_{\ell=1}^{3} \left(\sum_{i \in \mathcal{P}} g_i(\tilde{x}_{i,\ell}) + \sum_{n=1}^{N} \sum_{i \in \mathcal{Q}_n} g_i(\tilde{x}_{i,\ell}) \right), \tag{33d}$$

其中，(33a) 中的 $w_{ij} = (a_{ij} + a_{ji})/2$，以及 (33d) 中的函数 $g_i(\tilde{x}_{i,\ell})$ $\ell \in \{1,2,3\}$ 表示为

$$G_i(\tilde{x}_{i,\ell}) = c_i \cdot \begin{cases} \varepsilon_{i,\ell} |\tilde{x}_{i,\ell}| - \frac{\varepsilon_{i,\ell}^2}{2}, & \text{if} |\tilde{x}_{i,\ell}| > \varepsilon_{i,\ell}; \\ \frac{\tilde{x}_{i,\ell}^2}{2}, & \text{if} |\tilde{x}_{i,\ell}| \le \varepsilon_{i,\ell}. \end{cases}$$

首先，对 V_1 关于时间 t 求导，得到

$$\begin{aligned}\dot{V}_1 &= \sum_{\ell=1}^{3} \sum_{n=1}^{N} \sum_{i \in \mathcal{Q}_n} \sum_{j \in \mathcal{Q}_n} w_{ij} \left(\tilde{x}_{i,\ell} - \tilde{x}_{j,\ell}\right)\left(\tilde{v}_{i,\ell} - \tilde{v}_{j,\ell}\right) \\ &\overset{(a)}{=} 2 \sum_{\ell=1}^{3} \sum_{n=1}^{N} \sum_{i \in \mathcal{Q}_n} \sum_{j \in \mathcal{Q}_n} w_{ij} \left(\tilde{x}_{i,\ell} - \tilde{x}_{j,\ell}\right) \tilde{v}_{i,\ell},\end{aligned} \tag{34a}$$

其中，步骤（a）由 $w_{ji}=w_{ij}\triangleq(a_{ij}+a_{ji})/2$ 得出。接下来，分别对 (33b)–(33d) 求时间导数，得到

$$\dot{V}_2=\underbrace{2\sum_{\ell=1}^{3}\sum_{i\in\mathcal{P}}\tilde{v}_{i,\ell}\dot{\tilde{v}}_{i,\ell}}_{\dot{V}_2^{(\mathcal{P})}}+\underbrace{2\sum_{\ell=1}^{3}\sum_{n=1}^{N}\sum_{i\in\mathcal{Q}_n}\tilde{v}_{i,\ell}\dot{\tilde{v}}_{i,\ell}}_{\dot{V}_2^{(\mathcal{Q})}},\tag{34b}$$

$$\dot{V}_3=\underbrace{2\sum_{\ell=1}^{3}\sum_{k\in\mathcal{P}\cup\mathcal{Q}}\sum_{i\in\mathcal{P}}\frac{\partial V_\ell^{(i,k)}\left(x_{i,\ell},x_{k,\ell}\right)}{\partial x_{i,\ell}}\tilde{v}_{i,\ell}}_{\dot{V}_3^{(\mathcal{P})}}$$
$$+\underbrace{2\sum_{\ell=1}^{3}\sum_{k\in\mathcal{P}\cup\mathcal{Q}}\sum_{n=1}^{N}\sum_{i\in\mathcal{Q}_n}\frac{\partial V_\ell^{(i,k)}\left(x_{i,\ell},x_{k,\ell}\right)}{\partial x_{i,\ell}}\tilde{v}_{i,\ell}}_{\dot{V}_3^{(\mathcal{Q})}},\tag{34c}$$

$$\dot{V}_4=\underbrace{\sum_{\ell=1}^{3}\sum_{i\in\mathcal{P}}\dot{g}_i(\tilde{x}_{i,\ell})}_{\dot{V}_4^{(\mathcal{P})}}+\underbrace{\sum_{\ell=1}^{3}\sum_{n=1}^{N}\sum_{i\in\mathcal{Q}_n}\dot{g}_i(\tilde{x}_{i,\ell})}_{\dot{V}_4^{(\mathcal{Q})}},\tag{34d}$$

当 $\dot{g}_i(\tilde{x}_{i,\ell})=c_i\varepsilon_{i,\ell}\operatorname{sgn}(\tilde{x}_{i,\ell})\tilde{v}_{i,\ell}$ 若 $|\tilde{x}_{i,\ell}|>\varepsilon_{i,\ell}$；否则，$\dot{g}_i(\tilde{x}_{i,\ell})=c_i\tilde{x}_{i,\ell}\tilde{v}_{i,\ell}$。然后，将 (32) 与 (34a)–(34d) 结合，V 的时间导数满足

$$\dot{V}=\dot{V}_1+\dot{V}_2+\dot{V}_3+\dot{V}_4$$
$$=\underbrace{\dot{V}_1+\dot{V}_2^{(\mathcal{Q})}+\dot{V}_3^{(\mathcal{Q})}+\dot{V}_4^{(\mathcal{Q})}}_{\dot{V}^{(\mathcal{Q})}}+\underbrace{\dot{V}_2^{(\mathcal{P})}+\dot{V}_3^{(\mathcal{P})}+\dot{V}_4^{(\mathcal{P})}}_{\dot{V}^{(\mathcal{P})}}.\tag{35}$$

将 (25) 与 (34a)–(34d) 结合，可得

$$\dot{V}^{(\mathcal{Q})}=-2\sum_{\ell=1}^{3}\sum_{n=1}^{N}\sum_{i\in\mathcal{Q}_n}\left(b_i|\tilde{v}_{i,\ell}|^2-f_{R,\ell}\tilde{v}_{i,\ell}\right),\tag{36}$$

其中，$f_{R,\ell}$ 是 (19) 中 $\boldsymbol{f}_R\in\mathbb{R}^3$ 的 ℓ^{th} 个元素。由于 $\tilde{v}_{i,\ell}=\dot{\tilde{x}}_{i,\ell}=\dot{x}_{i,\ell}-\dot{x}_i^{\text{dest},\ell}=v_{i,\ell}$，并结合 (19)，可得

$$\sum_{\ell=1}^{3}\sum_{n=1}^{N}\sum_{i\in\mathcal{Q}_n}f_{R,\ell}\tilde{v}_{i,\ell}=-\sum_{\ell=1}^{3}\sum_{n=1}^{N}\sum_{i\in\mathcal{Q}_n}\left(k_1|v_{i,\ell}|^2+k_2|v_{i,\ell}|^3\right)$$
$$\leq 0.\tag{23}$$

根据 (36)–(23)，显然 $\dot{V}^{(\mathcal{P})}\leq 0$，且 $\dot{V}^{(\mathcal{P})}=0$ 当且仅当 $\tilde{v}_{i,\ell}=0$。类似地，将 (25) 与 (34b)–(34d) 结合，可得

$$\dot{V}^{(\mathcal{P})}=-2\sum_{\ell=1}^{3}\sum_{i\in\mathcal{Q}}\left(b_i|\tilde{v}_{i,\ell}|^2-f_{R,\ell}\tilde{v}_{i,\ell}\right)\leq 0.\tag{24}$$

结合（35）与（36）–（24），显然可得 $\dot{V}\leq 0$。记 $\mathcal{M}$ 为 $\mathcal{M}\triangleq\{\boldsymbol{x}_1,\cdots,\boldsymbol{x}_{M+4N},\boldsymbol{v}_1,\cdots,\boldsymbol{v}_{M+4N}\mid V\equiv 0\}$ 的最大不变集。由（32）和（34a）–（34d）可得 $\tilde{x}_{i,\ell}=0$ 以及 $\tilde{v}_{i,\ell}=0$，当 $V\equiv 0$ 时。利用 LaSalle不变性原理 [51, 定理 3, 5],可得 $\lim_{t\to+\infty}|\tilde{x}_{i,\ell}|=0$ 以及 $\lim_{t\to+\infty}|\tilde{v}_{i,\ell}|=0$。换言之，李雅普诺夫泛函候选函数 V 在整个时间 $t\in[0,+\infty]$ 内均为非增且有界。

如果两个空中基站满足 $r_c\leq\|\boldsymbol{x}_i(0)-\boldsymbol{x}_k(0)\|$ 对于所有 $i,\ k\in\mathcal{P}\cup\mathcal{Q}$，显然，碰撞避免势函数 (21) 满足

$$\lim_{\|\boldsymbol{x}_i-\boldsymbol{x}_j\|\to r_c^+}V^{(i,k)}\left(\boldsymbol{x}_i,\boldsymbol{x}_k\right)=+\infty.\tag{25}$$

这里，$\lim_{x\to a^+}f(x)$ 表示函数$f(x)$ 在 a 处的右极限。根据（25），可以得出结论：空中基站之间可以避免发生碰撞。

参考文献

[1] W. Jiang 等，“迈向 6G 之路：全面综述”，IEEE Open J. Commun. Soc.，第 2 卷，334–366 页，2021 年 2 月。[2] C.-X. Wang 等，“迈向 6G 之路：愿景、需求、关键技术与试验平台”，IEEE Commun. Surveys Tuts.，第 25 卷，第 2 期，905–974 页，2023 年第 2 季度。[3] N. Cheng 等，“人工智能赋能无人机辅助物联网应用：全面综述”，IEEE Internet Things J.，第 10 卷，第 16 期，14 438–14 461 页，2023 年 8 月。[4] A. Gómez-Andrades、R. Barco 和 I. Serrano，“一种评估 LTE 覆盖空洞的方法”，EURASIP J. Wireless Commun. Netw.，第 2016 卷，第 1 期，1–12 页，2016 年 12 月。[5] 技术规范组无线接入网；最小化路测（MDT）的无线测量采集；总体描述；第 2 阶段（Rel-17），3GPP 标准 TS 37.320，2023 年 3 月。[6] C. K. Anjinappa 和 İ. Güvenç，“毫米波网络中的覆盖空洞检测：一种无监督学习方法”，IEEE Commun. Lett.，第 25 卷，第 11 期，3580–3584 页，2021 年 11 月。[7] I. Akbari 等，“存在用户和基站定位误差时，基于最小化路测的自主覆盖估计有多可靠？”，IEEE Wireless Commun. Lett.，第 5 卷，第 2 期，196–199 页，2016 年 4 月。[8] W. A. Hapsari 等，“3GPP 中的最小化路测解决方案”，IEEE Commun. Mag.，第 50 卷，第 6 期，28–36 页，2012 年 6 月。[9] M. Mozaffari 等，“无线网络中的无人机教程：应用、挑战与开放问题”，IEEE Commun. Surveys Tuts.，第 21 卷，第 3 期，2334–2360 页，2019 年第 3 季度。[10] C. Qi 等，“非地面网络辅助物联网无线传输的关键问题”，IEEE Internet Things Mag.，第 7 卷，第 1 期，40–46 页，2024 年 1 月。[11] M. Liu、J. Yang 和 G. Gui，“DSF-NOMA：无人机辅助异构物联网中的应急通信技术”，IEEE Internet Things J.，第 6 卷，第 3 期，5508–5519 页，2019 年 6 月。[12]Y. Li 和 M. Xia，“超越 5G 的地空通信：基于泊松德劳内三角剖分的协同多点传输”，《IEEE无线通信汇刊》，第 22 卷，第 3 期，1841–1854 页，2023 年 3 月。[13] Y. Hu、M. Chen 和 W. Saad，“卫星-无人机网络中的接入与回传联合资源管理：一种竞争市场方法”，《IEEE无线通信汇刊》，第 19 卷，第 6 期，3908–3923 页，2020 年 6 月。[14] LTE 物理层方面的协同多点操作（Rel-11），3GPP 标准 TR 36.819，2013 年 9 月。[15] Y. Li 等，“超越 5G 的空空通信：一种新型三维协同多点传输方案”，《IEEE无线通信汇刊》，第 19 卷，第 11 期，7324–7338 页，2020 年 11 月。[16] X. Fan、P. Wu 和 M. Xia，“超越 5G 的空地通信：无人机集群编队控制与跟踪”，《IEEE无线通信汇刊》，第 23 卷，第 7 期，8029–8043 页，2024 年 7 月。[17] R. Qian 等，“多智能体系统的编队控制稳定性与通信容量：联合分析”，IEEE Control Netw. Syst.，第 8 卷，第 2 期，917–927 页，2021 年 6 月。[18] R. Shakeri 等，“信息物理应用中多无人机系统的设计挑战：全面综述与未来方向”，IEEE Commun. Surveys Tuts.，第 21 卷，第 4 期，3340–3385 页，2019 年第 4 季度。[19] K.-K. Oh、M.-C. Park 和 H.-S. Ahn，“多智能体编队控制综述”，Automatica，第 53 卷，424–440 页，2015 年 3 月。[20] J. N. Yasin 等，“无人驾驶飞行器（无人机）：避碰系统与方法”，IEEE Access，第 8 卷，105 139–105 155 页

[21] M. Senanayake 等，“机器人群体的搜索与跟踪算法：综述”，《机器人与自主系统》，第 75 卷 B 部分，第 422–434 页，2016 年 1 月。[22] X. Zhu、Y. Liang 和 M. Yan，“一种灵活的多架无人驾驶飞行器编队避碰策略”，IEEE Access，第 7 卷，第 140 743–140 754 页，2019 年。[23] O. Khatib，“机械臂和移动机器人的实时避障”，载于 IEEE 国际机器人与自动化会议（ICRA）论文集，美国密苏里州圣路易斯，1985 年 3 月，第 500–505 页。[24] Y. Yang 等，“ 存在外部扰动时非线性多智能体系统的无碰撞且保持连通性的编队控制”，《IEEE车辆技术汇刊》，第 72 卷，第 8 期，第 9956–9968 页，2023 年 8 月。[25] J. Lu 等，“ 存在输入饱和与通信时延时的无人机编队无碰撞自适应控制”，《国际航空航天科学杂志》，第 23 卷，第 3 期，第 557–566 页，2022 年 3 月。[26] D. Marek 等，“无人机群体的碰撞避免机制”，传感器，第 25 卷，第 4 期，1141 页，2025 年 2 月。[27] Z. Sui 等，“利用模型引导示范的深度强化学习实现避碰编队控制”，《IEEE神经网络与学习系统汇刊》，第 32 卷，第 6 期，第 2358–2372 页，2021 年 6 月。[28] F. Ying 等，“ URPlanner：基于深度强化学习的通用无碰撞机器人运动规划范式”，《IEEE机器人汇刊》，第 41 卷，第 5169–5188 页，2025 年 8 月。[29] K. Aryankia 和 R. R. Selmic，“面向二阶非线性多智能体系统的基于神经网络的编队控制与目标跟踪”，《IEEE航空航天与电子系统汇刊》，第 58 卷，第 1 期，第 328–341 页，2022 年 2 月。[30] Y. Cao 等，“ 分布式多智能体协调研究最新进展综述”，《IEEE工业信息学汇刊》，第 9 卷，第 1 期，第 427–438 页，2013 年 2 月。[31] S. Chiu 等编，《随机几何及其应用》，第 3 版。英国西萨塞克斯：John Wiley & Sons, Ltd，2013 年。[32] J. Zheng、Z. Wang 和 A. Jamalipour，“面向无人机与蜂窝网络融合网络的空中与地面基站协作策略”，《IEEE物联网杂志》，第 11 卷，第 6 期，第 10 411–10 424 页，2024 年 3 月。[33] W. Khawaja 等，“无人驾驶飞行器空对地传播信道建模综述”，《IEEE通信调查与教程》，第 21 卷，第 3 期，第 2361–2391 页，2019 年第三季度。[34] J. Rodríguez-Piñeiro 等，“现实网络部署中低空无人机的空对地信道特性分析”，《IEEE天线与传播汇刊》，第 69 卷，第 2 期，第 992–1006 页，2021 年 2 月。[35] B. Matérn，《空间变化》。德国柏林：Springer-Verlag，1986 年。[36] D. Kühn 和 D. Osthus，“有向图中哈密顿圈研究综述”，《欧洲组合学杂志》，第 33 卷，第 5 期，第 750–766 页，2012 年 7 月。[37] J. Zhao 等，“毫米波蜂窝网络中协同多点传输的统一分析”，《IEEE物联网杂志》，第 9 卷，第 14 期，第 12 166–12 180 页，2022 年 7 月。[38] Ø. Hjelle 和 M. Dæhlen，《三角剖分及其应用》。德国柏林：Springer-Verlag，2006 年。[39] M. Xia 和 S. Aïssa，“泊松-德洛内单形体积分布的统一解析及其在协同多点传输中的应用”，《IEEE无线通信汇刊》，第 17 卷，第 7 期，第 4912–4921 页，2018 年 7 月。[40] J. Beardwood、J. H. Halton 和 J. M. Hammersley，“经过多个点的最短路径”，《剑桥数学学会会刊》，第 55 卷，第 4 期，第 299—327 页，1959 年 10 月。[41] P. Billingsley，《概率与测度》，第 3 版。英国西萨塞克斯：John Wiley & Sons, Ltd，1995 年。[42] J. R. Taylor，《经典力学》。美国加利福尼亚州米尔谷：University Science (Books)，2005 年。[43] P. F. Hokayem、D. M. Stipanović 和 M. W. Spong，“存在扰动时拉格朗日系统的协调与避碰”，《应用数学与计算》，第 217 卷，第 3 期，第 1085–1094 页，2010 年 10 月。[44] 《支持无人驾驶航空系统（UAS）连接性、识别与跟踪的研究》（Rel-17），3GPP 标准 TR 23.754，2021 年 3 月。[45] S. A. Al-Ahmed、M. Z. Shakir 和 S. A. R. Zaidi，“考虑自主性的最优三维无人机基站部署覆盖空洞检测、无线回传和用户需求”，《通信与网络期刊》，第 22卷，第6期，第467–475页，2020年12月。[46] A. Jahid 等人，“绿色蜂窝基站最优供电方案的技术经济与能源效率分析”，IEEE Access，第 8卷，2020年。[47] X. Guo 等人，“利用泊松空洞过程分析无人机辅助毫米波蜂窝网络的覆盖”，《IEEE车辆技术汇刊》，第71卷，第3期，第 3171–3186页，2022年3月。[48] Y. Qin、M. A. Kishk 和 M.-S. Alouini，“采用专用蜂窝基础设施的空中用户覆盖分析与轨迹优化”，《IEEE无线通信汇刊》，第23卷，第4期，第3042–3056页，2024年4月。[49] M. Özbaltan 等人，“利用符号控制优化无人机三维部署，通过无人机搭载的6G移动基站增强覆盖”，《无人机》，第9卷，第8期，第2504–446X页，2025年。[50] R. Vershynin，《高维概率：数据科学应用导论》。英国剑桥：剑桥大学出版社，2018年。[51] J.-J. E. Slotine 和 W. Li，《应用非线性控制》。美国新泽西州恩格尔伍德克利夫斯：培生教育，1990年。



Xiao Fan 于 2015 年和 2018 年分别获得中国大同山西大同大学数学学士学位，以及中国桂林桂林电子科技大学数学硕士学位。她于 2025 年获得中国广州中山大学信息与通信工程博士学位。目前，她是桂林电子科技大学的助理教授。她的研究兴趣包括协同无人机通信和非线性系统。



Wenkun Wen（IEEE 会员）于 2007 年获得中国广州中山大学电信与信息系统博士学位。自 2020 年起，他就职于中国广州的 Techphant Technologies Co. Ltd.，担任总工程师。

2008 年至 2009 年，他在中国广州的广东诺基亚研发中心工作，担任 4G系统的系统工程师。自 2009 年起截至2012年，他在中国广州的 New Postcom Equipment Co. Ltd. LTE研发中心工作，担任4G标准团队经理。2012年至2018年，他任职于中国电子科技集团公司第七研究所（CETC），担任无线通信专家。2018年至2020年，他担任CETC 5G创新中心副主任。他的研究兴趣包括5G/B5G移动通信、机器类通信、窄带无线通信和信号处理。



Peiran Wu（IEEE会员）于2015年在加拿大温哥华的不列颠哥伦比亚大学（UBC）获得电气与计算机工程博士学位。

2015年10月至2016年12月，他在UBC担任博士后研究员。2014年夏天，他曾在德国埃尔朗根的埃尔朗根-纽伦堡弗里德里希-亚历山大大学（FAU）数字通信研究所担任访问学者。

此后，他于2017年2月起任职于中国广州中山大学，目前担任副教授。自2019年起，他还兼任中国珠海南方海洋科学与工程广东省实验室副教授。他的研究兴趣包括移动边缘计算、无线能量传输和节能无线通信。



JunhuiZhao（IEEE高级会员）于1998年和2004年分别获得中国南京东南大学硕士和博士学位。

1998年至1999年，他在中兴通讯股份有限公司与南京工程师学院合作工作。随后，他于2004年在澳门科技大学信息技术学院担任助理教授，并于2007年前继续在该校担任副教授。2008年，他加入北京交通大学担任副教授，目前是电子与信息工程学院的教授。同时，他于2004年在韩国延世大学短期访问，并于2013年至2014年在新加坡南洋理工大学担任访问学者。他目前的研究兴趣包括无线通信、物联网和交通信息处理。



Minghua Xia（IEEE高级会员）于2007年在中国广州中山大学获得电信与信息系统博士学位。

2007年至2009年，他在韩国电子与电信研究院（ETRI）北京研发中心（中国北京）工作，先后担任工程人员和高级工程人员。2010年至2014年，他先后在香港大学（中国香港）、沙特阿拉伯吉达的阿卜杜拉国王科技大学，以及加拿大蒙特利尔的魁北克大学国家科学研究院（INRS）担任博士后研究员。自2015年起，他担任中山大学教授。自2019年起，他还兼任南方海洋科学与工程广东省实验室（珠海）兼职教授。他的研究兴趣主要涵盖无线通信和信号处理。