

无人机机间毫米波阵列通信技术

肖振宇¹, 刘珂¹, 朱立鹏²

(1. 北京航空航天大学电子信息工程学院, 北京 100191; 2. 新加坡国立大学电子与计算机工程系, 新加坡 117583)

摘 要: 随着无人机应用范围的扩大和所承担任务的多样化, 机间通信对于大带宽、高数据率、抗干扰能力的需求快速增长, 具有丰富频谱资源的毫米波阵列通信成为支持机间宽带安全通信的关键技术之一。围绕机间毫米波阵列通信这一新兴领域, 以点对点通信和无人机自组网为核心分析了机间毫米波阵列通信的研究难点和挑战, 对机间点对点通信中信道建模、稳健性波束成形、安全通信以及无人机自组网中邻居发现、路由决策、资源分配、分布式部署的问题和方法进行综述, 并总结了有价值的研究方向, 为未来相关研究提供启发。

关键词: 无人机通信; 毫米波通信; 阵列天线; 点对点通信; 无人机自组网

中图分类号: TN928

文献标志码: A

DOI: 10.11959/j.issn.1000-436x.2022158

Millimeter-wave array enabled UAV-to-UAV communication technology

XIAO Zhenyu¹, LIU Ke¹, ZHU Lipeng²

1. School of Electronics and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China

2. Department of Electrical and Computer Engineering, National University of Singapore, Singapore 117583, Singapore

Abstract: As the application scope of unmanned aerial vehicle (UAV) expands and the tasks become more complicated, the demands for large bandwidth, high data rate and antijamming capability in UAV-to-UAV (V2V) communication grow rapidly. With abundant spectrum resource, millimeter-wave (mmWave) array communication has been one of the key technologies to support V2V communications. Focusing on the emerging field of mmWave array V2V communication, the difficulties and challenges in point-to-point communication and unmanned aerial vehicle ad-hoc network were analyzed. The problems and approaches for channel modeling, robust beamforming, secure communication in point-to-point communication and neighbor discovery, routing decisions, resource allocation, distributed deployment in unmanned aerial vehicle ad-hoc network were reviewed. Some valuable research directions were summarized to provide inspiration for future relevant research.

Keywords: UAV communication, mmWave communication, array antenna, point-to-point communication, unmanned aerial vehicle ad-hoc network

0 引言

随着低空空域的开放和无人机技术的快速发展, 无人机在多个领域得到了越来越广泛的关注和应用, 作为未来空天地一体化网络中重要的组成部分, 无人机移动通信已逐渐成为学术界和工业界的

热门研究方向^[1-2]。随着应用范围的不断扩大, 无人机需要对数据进行快速收集、处理和传递, 要求较高的数据传输速率以满足各类应用需求^[3]。无线通信是无人机打破信息孤岛、提升作业能力的关键技术之一, 其中频段和带宽是影响无线通信传输质量的重要因素, 而低频微波频段被大量占用, 6 GHz

收稿日期: 2022-03-21; 修回日期: 2022-06-21

通信作者: 刘珂, iliuke@buaa.edu.cn

基金项目: 国防基础科研计划基金资助项目 (No.JCKY2020601B014)

Foundation Item: Defense Industrial Technology Development Program (No.JCKY2020601B014)

以下中低频段的频谱资源日益短缺、拥挤严重^[4]。各类新兴业务和应用场景导致现有低频段已难以满足无人机通信对于大带宽的需求。在此背景下，毫米波频段（30~300 GHz）因其丰富的频谱资源和较强的抗干扰能力将应用于无人机通信中^[5]。然而，毫米波信号衰减严重，需要部署大规模阵列天线获取阵列增益弥补路径传播损耗。近年来，毫米波基带、射频以及天线器件工艺逐渐成熟，已经基本具备大规模生产和应用的能力^[6]。毫米波信号频率高且波长短，天线尺寸小，毫米波器件多呈小型集成化，可以在不过多增加负重的情况下在小范围内部署大规模天线阵列，例如，对于频率为 38 GHz 的半波天线阵列，25×25 个天线阵元集成后的面积接近 1 dm²，随着频率进一步增加，天线阵元可以更加密集，或者在相同尺寸下部署更多天线，这对于尺寸和负载有限的无人机平台是非常有利的^[7-8]。此外，无人机平台具有高度优势和灵活移动的能力，可以利用毫米波波束的捷变能力和高指向性实现实时波束追踪对准。虽然毫米波信号依赖于视线线路（LoS, line of sight）通信，但无人机在空中遮挡少，且可以利用移动特性主动创造 LoS 条件。因此，在无人机上搭载毫米波阵列天线是支持无人机大容量安全传输的有效手段。

1 无人机典型应用场景与挑战

近年来，关于无人机毫米波通信的研究主要集中在空对地通信系统，即无人机与地面平台、设备之间的通信，其部分典型应用场景如图 1 所示，无人机不仅可以在复杂的作战环境和作战任务中发挥重要的作用^[9]，得益于其低成本和高机动性，还可以为灾害救援、热点地区、航空监视、交通运输、设施巡检等任务提供重要支持，同时，在远距离通信中也可以作为中继辅助信息传输，完成远距离宽

带回传任务，在未来空天地一体化网络的构建中也将扮演重要的角色^[10]。随着无人机通信向集群协同方向发展，无人机机群需要借助局部交互，以分布式完成大量单无人机无法完成的协同任务^[11]。因此，机间通信的研究尤为重要。值得关注的是，机间通信与传统的地面通信和空对地通信有着显著差异。首先，高频毫米波信号衰减严重，而机间通信对于传输距离的要求很高，需要在收发端搭载大规模阵列天线以获取可观的定向传输增益。尽管能耗会随着天线规模增加有所增长，但指向性波束不仅可以增加传输距离，还具有抗干扰、低截获的特性，可以增加网络可靠性和安全性。权衡在实际应用场景中，性能和能耗也是一个重要研究问题。其次，收发无人机的快速移动性与毫米波窄波束的高指向性相矛盾，机间宽带传输和安全通信需求日益增长，毫米波波束的持续追踪对准是一项重要挑战。最后，对于无人机自组网来说，网络拓扑快速变化，通信资源也随之快速变化，对于时效性、生存性、扩展性的需求更高，这使无人机机间通信面临前所未有的挑战。毫米波波束成形技术可以为提高机间通信质量和通信效率提供技术支持，为机间高效组网提供更高的传输带宽和安全性，但目前针对机间阵列通信场景的研究十分有限，尚未形成完整的技术体系，有必要展开更深入的研究。

本文着眼于无人机机间毫米波阵列通信所面临的挑战，围绕机间点对点通信的信道建模、稳健性波束成形设计、安全通信以及无人机自组网中邻居发现、路由决策、资源分配和分布式部署展开，结合现有的研究成果，指出毫米波阵列通信技术在无人机机间通信中发挥的重要作用。无人机机间毫米波通信面临的问题与挑战如表 1 所示，本文分析其中潜在的、有价值的研究方向，为未来无人机通信相关学术研究提供参考。

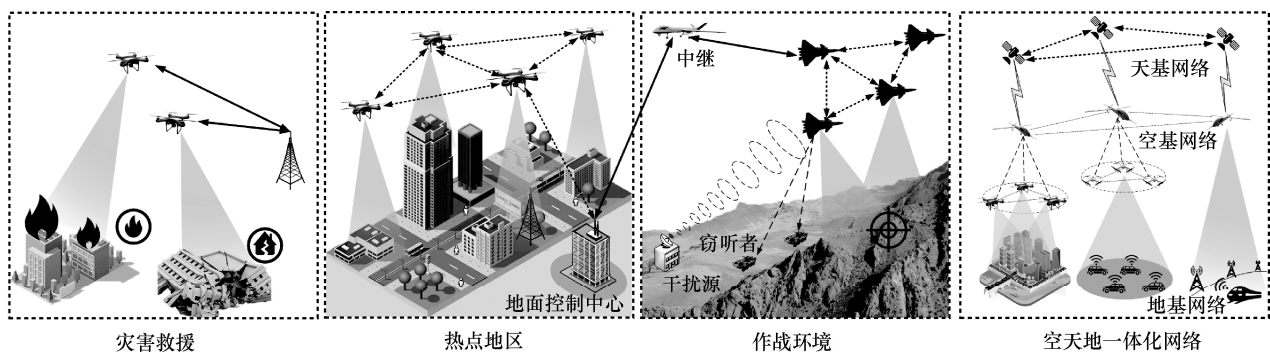


图 1 无人机毫米波通信典型应用场景

表 1 无人机机间毫米波阵列通信面临的问题与挑战

机间通信类型	应用需求	主要挑战	毫米波阵列的技术支持
无人机点对点通信	信道建模	收发无人机位置与姿态快速变化, 信道指向角快速变化, 多普勒效应严重; 现有的空对地通信信道模型并不适用于无人机机间通信	毫米波信号在角度域离散、动态波束追踪
	稳健性波束成形	高指向性毫米波对于角度偏差敏感, 需要快速波束追踪实时获取信道状态信息, 无人机高速运动平台在毫米波频段多普勒频移严重	低复杂度稳健性波束成形、自适应波束追踪、局部空间高增益波束
	安全通信	无线传输具有开放性和广播性, 容易泄露信息	为跳频、扩频技术提供更多选择、三维波束成形为安全通信提供空域自由度
无人机自组网	邻居发现	三维全空域邻居发现; 频繁波束追踪; 广播信号传播范围有限且隐蔽性较差	高指向性波束、任意波束宽度灵活波束成形、动态波束追踪
	路由决策	节点移动速度快、网络拓扑结构变化快; 高数据流量需求; 低时延需求; 与资源分配相耦合	指向性波束增加传输距离、减少路由建立时间、减少数据包碰撞
	资源分配	对空域、时域、频域、功率资源的高效分配; 资源冲突和资源竞争问题; 与分布式部署相耦合	毫米波波段频谱资源分配、空间复用与波束追踪、灵活功率分配
	分布式部署	与资源分配相耦合, 多变量非凸问题难以求解; 毫米波覆盖范围有限; 波束调度任务复杂	动态全空域波束追踪、波束移交

2 无人机点对点毫米波通信

无人机点对点毫米波通信是指两架无人机之间的通信, 场景如图 2 所示, 与传统的地面通信和空对地通信有着明显不同。发射端和接收端无人机均处于快速移动状态, 姿态变化频繁, 还会由于气流、发动机运行、螺旋桨旋转等的影响造成机身抖动, 导致机间信道快速变化, 这对于对角度变化十分敏感的高指向性毫米波信号的是非常不利的, 是机间毫米波通信面临的巨大的挑战, 因此, 对快速时变的信道进行建模并进行稳健性波束成形设计是非常有必要的。此外, 机间通信往往具有更高的安全性需求, 需要进行有效的波束成形设计避免信息泄露, 并减小接收端受到的干扰^[12]。

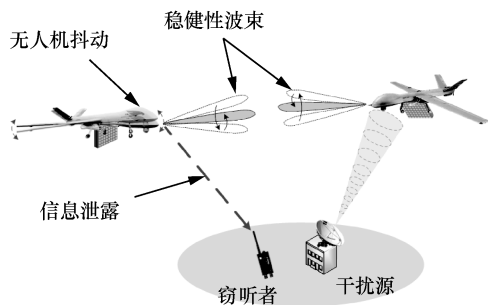


图 2 无人机点对点毫米波通信场景

2.1 毫米波信道建模

无人机通常处于高空作业环境, 毫米波频段信道在传播损耗、多径效应、多普勒效应等方面与空对地通信信道有显著差异。现有研究很多是针对无人机作为空中基站或中继协助地面通信的空对地

信道进行建模, 而针对无人机机间信道的研究相对较少^[13-15]。无人机通信信道具有明显的三维传播特性, 无人机的位置变化和姿态变化对机间毫米波阵列信道有显著影响^[16]。无人机快速移动过程中, 信道指向角快速变化, 且具有严重的多普勒效应, 导致传统地面毫米波阵列通信的信道模型并不适用于无人机机间通信。对机间信道进行建模时, 需要特别考虑无人机平台的高速移动特性和抖动特性, 揭示其对机间信道的影响机理。

毫米波信道通常具有角度域离散特性, LoS 分量一般是最强分量且最先到达的, 在可观的信噪比条件下, 非视距 (NLoS, non-LoS) 分量也可以达到不可忽略的信号强度^[17]。特别地, 对于机间毫米波信道, 潜在的反射源更少, 稀疏性更加明显, 毫米波信道可以视为一条 LoS 分量和若干条 NLoS 分量的叠加。考虑收发端均搭载均匀平面阵列 (UPA, uniform planar array) 的无人机通信系统, 机间时变信道可以表示为

$$\begin{aligned}
 \mathbf{H}(t, f) &= \sqrt{\frac{N_t N_r}{L}} \sum_{l=1}^L \rho_l \exp[j2\pi(\nu_l t - \tau_l f)] \cdot \\
 &\mathbf{a}_r(\theta_{r,l}, \varphi_{r,l}) \mathbf{a}_t^H(\theta_{t,l}, \varphi_{t,l})
 \end{aligned} \tag{1}$$

其中, t 表示时刻, f 表示载波频率, N_t 和 N_r 分别表示发射端和接收端的天线数, L 为 t 时刻频率为 f 的载波上多径分量总数, ρ_l 表示第 l 条路径的复增益系数, ν_l 和 τ_l 分别表示第 l 条路径的多普勒频偏和时延, $\theta_{r,l}$ 、 $\varphi_{r,l}$ 、 $\theta_{t,l}$ 和 $\varphi_{t,l}$ 分别表示第 l 条路径的接收端俯仰角, 接收端方位角、发射端俯仰角

和发射端方位角, $\mathbf{a}_r(\bullet)$ 和 $\mathbf{a}_t(\bullet)$ 分别表示接收端和发射端的阵列响应向量, 定义为

$$\mathbf{a}(\theta, \varphi) = \frac{1}{\sqrt{MN}} \cdot \left[1, \dots, \exp\left(j \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta [(m-1) \cos \varphi + (n-1) \sin \varphi]\right), \dots, \exp\left(j \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta [(M-1) \cos \varphi + (N-1) \sin \varphi]\right) \right]^T \quad (2)$$

其中, MN 为无人机搭载的均匀平面阵列天线阵元数, λ 为毫米波信号波长, d 为相邻天线阵元之间的距离。由式(1)可以看出, 无人机的快速移动特性导致信道状态在空域、时域和频域均处于动态变化状态。在空域, 多径复增益系数 ρ_l 主要与无人机间的相对距离有关, 收发端指向角由无人机的相对位置、姿态和抖动共同决定, 即 $\theta_{r,l}$ 、 $\varphi_{r,l}$ 、 $\theta_{t,l}$ 和 $\varphi_{t,l}$ 在宏观层面会随着无人机的位置变化和姿态变化而改变; 在微观层面, 当无人机机身存在抖动时, 这些角度也会随着天线阵列的抖动而变化, 这种微小的角度变化在大规模天线阵列毫米波通信中的影响是不可忽略的, 值得进一步研究。在频域, 多普勒频移 ν_l 主要由无人机的径向相对速度决定; 在时域, 传播时延 τ_l 主要与路径长度有关。值得注意的是, 机间毫米波时变信道中参数的实时获取是实现机间通信的重要前提, 也是实现机间高效通信的一大挑战。因此, 探索高效的信道估计手段是一项具有重要意义的工作, 而采用概率模型信道系数只能获取理论上统计意义下的性能, 并不能表现出特定场景下真实的通信性能, 需要对机间毫米波通信信道测量进行更多的相关研究和实验, 通过统计测量得到不同场景下具体信道参数数值。

尽管已经有很多应用于无人机通信网络的信道模型, 但无人机高时变性毫米波信道建模研究依然处于初始阶段。无人机因其高度优势以及空中遮挡少的特性, 很容易与其他无人机建立 LoS, 因此大多数机间信道被简化为 LoS 且被视为准静态的^[18-19]。而实际应用中高动态情境下的信道建模是非常必要的, Bai 等^[20]提出了一种空时非静态无人机毫米波多输入多输出 (MIMO, multiple input multiple output) 系统信道模型, 其中无人机搭载均匀线性阵列 (ULA, uniform linear array), 兼顾各种无人机相关特性对信道统计特性的影响, 包括无人机的移动方向、飞

行高度、飞行速度等, 适合实际无人机通信场景。Ma 等^[21]针对无人机点对点毫米波 MIMO 信道进行建模, 发射端和接收端移动特性被考虑在内, 该研究采用二态连续时间马尔可夫过程来描述散射源的出现和消失, 在毫米波频段, 所提出的信道模型的参数对信道相关性和非平稳性有显著影响, 对毫米波机间 MIMO 通信系统的研究具有一定参考价值。文献[22]在多无人机用户的空对空毫米波阵列通信场景中, 无人机接入点和无人机用户均搭载均匀平面阵列, 提出了基于先验轨迹信息和压缩感知的信道估计方法, 所采用的信道模型考虑了时延、多普勒频移以及无人机位置变化对信号的发射角 (AoD, angle of departure) 和到达角 (AoA, angle of arrival) 的影响, 虽然该方法只用于 LoS 路径的信道估计, 但容易扩展到多径场景。

现有的关于无人机机间毫米波信道建模研究考虑的信道特征如表 2 所示, 其中 Y 表示考虑了多普勒频移。从表 2 可以看出, 综合考虑毫米波阵列通信多径类型、无人机位置姿态变化和频移的信道建模研究还非常有限, 另外无人机的抖动也是需要重点考虑的影响因素。现有的机间毫米波通信信道建模研究尚未具备成熟的理论支撑, 无人机在空中的运动复杂多变, 机间快速时变毫米波信道的建模和准确的信道估计面临巨大的挑战, 值得展开更深入的研究以揭示无人机位置和姿态变化与信道状态变化之间的关联, 为未来复杂无人机网络通信研究提供支持。

表 2 无人机间毫米波信道建模研究考虑的信道特征

文献	天线类型	多径类型	位置姿态变化	多普勒频移
文献[18]	UPA	LoS	位置和姿态	—
文献[19]	UPA	LoS+NLoS	位置	—
文献[20]	ULA	LoS+NLoS	位置	Y
文献[21]	全向天线	LoS+NLoS	位置	Y
文献[22]	UPA	LoS+NLoS	位置	Y

2.2 稳健性波束成形

在毫米波阵列通信系统中, 天线阵元数越多形成的波束越窄, 极窄的波束对信道指向角的变化更加敏感, 微小的角度偏差也会导致严重的波束增益损失, 在发射端无人机和接收端无人机均处于高速运动状态时增益损失更严重。采用窄波束发射和接收信号需要非常精确的信道状态信息, 尽管已有很多基于波束码本、深度学习等获取准确毫米波信道

状态信息的信道估计方法^[23-26]，但这些方法的波束训练开销太大，实时性难以保证。对于快速移动中的无人机来说，实时精确的信道状态信息是很难获取的，因为其不同于传统地面高速通信网络中各节点具有固定的移动轨迹（如高铁会沿着轨道运行）可以就近连接沿道路分布的基站或接入点^[27]，空基通信网络中，无人机需要根据任务需求及时灵活地调整路径和姿态，通常是不可预测的，且在三维空间的运动状态更复杂，多普勒频移更严重，因此，如何实现在收发端波束快速对准和持续跟踪的同时对抗多普勒频移、实现机间稳健性波束通信是一个独特的难题。

无人机在一定飞行高度一般不会面临复杂的散射环境，毫米波信道多径分量数量很少，波束的指向主要依赖于信号的 AoD 和 AoA，因此，确定信号的 AoD 和 AoA 是进行波束对准的关键。已有研究提出了基于位置预测的波束追踪方案，通过预测无人机的位置获取信号的角度域信息，进而进行波束追踪^[18,28-30]。Xu 等^[28]针对毫米波无人机网络提出了基于角度域信息的快速波束追踪算法，首先利用高斯过程机器学习算法预测无人机的位置，减少了无人机为获取位置而进行的机间信息交互，降低了时延，然后采用适用于无人机网络的聚类算法获取粗略的角度域信息，进而在限定的角度区域内进行单波束追踪或多波束追踪进一步去除粗略角度域的冗余，提高了频谱效率。该方法可以实现较高的频谱效率和较低的网络时延，满足高动态无人机网络中对数据传输速率的需求。类似地，Zhang 等^[18]针对无人机点对点动态通信场景设计了一种基于位置、姿态预测的机间波束追踪方案，首先利用已有的位置、姿态数据和位置与姿态之间的关系，采用基于高斯过程的机器学习算法预测无人机的位

置和姿态，并估计信号的 AoD 和 AoA，再根据预测出的空间指向角采用基于几何位置的波束追踪算法设计最优的模拟波束成形向量，该方法可以有效预测无人机的位置和姿态，所提出的波束追踪算法的频谱效率高于没有无人机姿态预测的算法的频谱效率。为应对无人机的高动态性，Chiang 等^[29]提出了基于 Q 学习的波束追踪算法，利用当前和过去的观测值设计来自环境的奖励促进预测，以提高数据传输和波束切换的效率，该波束追踪算法可以在多无人机高动态环境中实现平稳追踪。除了无人机位置的快速变化，无人机的抖动造成的波束失准问题也需要得到解决，Yuan 等^[30]提出了一种基于机器学习的预测波束成形方案解决由无人机抖动引起的波束失准，采用基于深度学习的方法根据先前的波束状态预测无人机与终端之间的角度，方便无人机和终端提前准备波束并快速建立和维持通信链路，可以用于无人机抖动环境可靠通信的建立，具有较强的稳健性。

除波束追踪外，机间通信中收发端相对运动速度很大，毫米波载波频率高，导致多普勒效应比地面低频段通信系统严重得多，对通信性能的影响更显著。因此，无人机机间毫米波阵列通信系统需要针对多普勒效应进行分析和应对。Zhang 等^[31]提出了一种多普勒频移估计和补偿方法，根据历史估计结果优化估计过程，可以实现准确、低复杂度的多普勒频移估计，进而进行有效的多普勒频移补偿，对于无人机毫米波通信中实现机间稳定、可靠的通信具有重要意义。

现有关于无人机机间毫米波阵列通信稳健性波束成形方法的研究成果如表 3 所示，针对机间稳健性波束成形设计和自适应波束追踪设计是机间通信重要的研究课题之一，且高动态无人机通信环

表 3 无人机机间毫米波阵列通信稳健性波束成形方法的研究结果

研究内容	文献	主要贡献	优缺点
波束追踪	文献[18,28]	利用高斯过程机器学习算法预测无人机的位置和姿态，估计信号的 AoA 和 AoD，进而进行波束追踪	优点：预测准确度高、频谱效率高，适用于高动态无人机自组网 缺点：没有讨论时间效率
	文献[29]	提出了基于 Q 学习的波束追踪算法	优点：可以在多无人机高动态环境中实现平稳追踪 缺点：可能需要极大的训练开销
	文献[30]	基于机器学习的预测波束成形方案解决由无人机抖动引起的波束失准	优点：无人机和终端提前准备波束并快速建立和维持通信链路 缺点：抖动只存在于发射端无人机
多普勒频移补偿	文献[31]	根据历史估计结果优化估计过程，实现准确、低复杂度的多普勒频移估计，进而进行有效的多普勒频移补偿	优点：能够实现快速准确的多普勒频移补偿 缺点：信道模型采用统计模型

境中多普勒频移会对通信质量造成严重的影响，机间快速精确的波束追踪和多普勒频移的对抗是亟须解决的问题，时效性、计算复杂度、收发节点的动态性、模型的实用性等问题都需要进一步考虑，以实现机间稳定可靠的信息交互，更好地完成复杂的协作任务。

2.3 安全通信

随着无线通信技术的发展，大量隐秘信息也会通过无线系统进行传输，如无人机执行侦查等任务时对于信息的保密程度要远远高于普通通信场景。此外，无人机本身也可能处于复杂的电磁环境中，无线传输介质的开放性和广播特性使地面或空中的窃听者可能破解合法链路的信号，造成信息泄露，干扰源也会对有用信息进行恶意攻击造成污染，影响接收端正常接收信号。因此，安全通信是机间通信的一个重要的研究课题。在无人机上搭载毫米波阵列天线为安全通信提供了更有利的支持，毫米波的宽频带可以为跳频、扩频技术提供更多选择，有利于躲避窃听者和干扰源；毫米波波束成形技术也为安全通信提供了更多空域自由度，收发无人机之间可以形成极窄的指向性波束，有效降低窃听者接收信号的强度，并抑制合法接收端受到的干扰，提高通信安全性。

不失一般性，本文考虑无人机 A 向无人机 B 发送机密信号，同时地面存在 I 个单天线窃听者和 J 个单天线干扰源的通信场景，窃听者窃取无人机 A 发出的信号，干扰源干扰无人机 B 的信号接收，无人机均搭载毫米波阵列天线，则无人机 B 的接收信号可以表示为

$$y_B = \mathbf{w}_B^H \mathbf{H}_{AB} \mathbf{w}_A \sqrt{P_A} s + \sum_{j=1}^J \mathbf{w}_B^H \mathbf{h}_{jB} \sqrt{P_j} s_j + n \quad (3)$$

其中， \mathbf{w}_A 和 \mathbf{w}_B 分别为无人机 A 和无人机 B 的波束成形向量， \mathbf{H}_{AB} 为无人机 A 到无人机 B 的信道响应矩阵， P_A 为无人机 A 的发射信号功率， s 为发送的机密信号， \mathbf{h}_{jB} 为干扰源 j 到无人机 B 的信道响应向量， P_j 为干扰源 j 的发射信号功率， s_j 为干扰信号， n 为无人机 B 处方差为 σ^2 的零均值高斯白噪声。可以得到无人机 A 到无人机 B 的传输可达率为

$$R_{AB} = \text{lb} \left(1 + \frac{|\mathbf{w}_B^H \mathbf{H}_{AB} \mathbf{w}_A|^2 P_A}{\sum_{j=1}^J |\mathbf{w}_B^H \mathbf{h}_{jB}|^2 P_j + \sigma^2} \right) \quad (4)$$

窃听者 i 窃听到的信号可以表示为

$$y_{Ei} = \mathbf{h}_{Ai}^H \mathbf{w}_A \sqrt{P_A} s + n_i \quad (5)$$

其中， \mathbf{h}_{Ai} 为无人机 A 到窃听者 i 的信道响应向量， n_i 为窃听者 i 处方差为 σ_i^2 的零均值高斯白噪声。那么窃听者窃听信号可达率之和为

$$R_E = \text{lb} \left(1 + \sum_{i=1}^I \frac{|\mathbf{h}_{Ai}^H \mathbf{w}_A|^2 P_A}{\sigma_i^2} \right) \quad (6)$$

本文将无人机机间安全通信率定义为^[32-33]

$$R_S = [R_{AB} - R_E]^+ \quad (7)$$

其中， $[x]^+$ 表示实数 x 与 0 之间的最大值。从式(7)可以看出，无人机机间安全通信率与信道响应、波束成形、发射功率、干扰源窃听者数量、无人机的位置、窃听者和干扰源的位置等因素密切相关，因此，有效的波束成形是提高机间安全通信率的关键手段。

关于无人机安全通信的实现，现有研究大多针对无人机作为信号源向地面用户发送秘密信息^[34-35]或者无人机作为中继辅助地面秘密信息传输^[36-37]的场景。Mukherjee 等^[38]介绍了几类典型的反窃听技术，如人工噪声、协同干扰、发射端波束成形等，但这些方法主要针对地面合法用户或恶意节点，在无人机安全通信中可能并不适用，这些经典的方法需要专门针对无人机通信场景进行设计，寻找新的解决方向^[39]。Sun 等^[40]讨论了无人机无线通信系统中潜在的安全攻击，针对主动窃听和被动窃听这两类典型的安全问题，对轨迹设计、资源分配、多无人机协同进行了介绍，指出了非正交多址接入（NOMA, non-orthogonal multiple access）、MIMO、毫米波技术、三维波束成形技术等在空中对地安全通信系统中的应用，利用毫米波信道在角度域的离散性，在无人机上搭载天线阵列进行三维波束成形生成窄的、精确的波束，利用合法接收端和窃听者在空间中的分散特性，提高合法接收端的传输效率，减少可能的信息泄露。Wu 等^[41]通过联合设计机密信号和人工噪声的波束成形，在保证最差条件（合法链路数据率最小、窃听链路数据率最大）下的保密通信的前提下实现了发射功率最小化，且考虑了无人机的抖动特性对天线阵列响应的影响。

但现有研究成果大多是针对无人机对地面用户的安全通信，当接收端也处于高速移动状态并伴

随无人机抖动时，机间安全通信的难度会大大增加，且无人机机间通信环境更开放、电磁环境更复杂，抑制干扰、降低泄露的难度更大。目前，关于无人机机间安全通信技术的研究还很少，尚未形成完善的理论来定量分析毫米波波束成形对无人机机间安全通信的影响，无人机的位置、波束的形状、指向等因素对安全通信的影响尚未明确，有待开展更深入的研究，有效结合无人机平台的移动特性和毫米波通信的波束成形特性，进一步提高机间安全通信率。

2.4 点对点通信小结

本节总结了基于毫米波阵列天线的无人机点对点通信研究，指出现有成果中存在的不足和未来需要解决的实际问题。首先，对于机间快速时变的毫米波信道，需要综合考虑无人机位置、姿态、抖动的影响以及多普勒效应，快速、精确的信道估计是实现机间高效通信重要的技术突破。其次，为应对无人机的高动态性造成的影响，高效的动态波束追踪和多普勒频移补偿是非常重要的，但机间通信对于时效性要求很高，基于训练和学习的算法需要在时间效率上有所提升。最后，无人机处于更开放的环境中对安全性要求更高，但现有的无人机安全通信研究大多基于地面通信，对于无人机通信网络，需要更适用于机间安全通信的发射和接收波束形状设计、波束指向方向设计和节点部署方法。

3 无人机自组网

随着无人机通信向集群化发展，无人机自组网已然成为重要的发展趋势，多架无人机共享网络资源，相互协同完成通信任务，比单无人机具有更高的可靠性。无人机飞行自组网(FANET, flying ad-hoc network)具有高度自治、灵活、自愈等特点，在多个领域有着广泛的应用^[42-45]。不同于传统移动自组网(MANET, mobile ad-hoc network)和车载自组网(VANET, vehicular ad-hoc network)，无人机最高飞行速度可达 140 m/s，且伴随着姿态的变化，移动轨迹会随着任务需求和网络结构灵活调整，具有不可预见性，受平台负载和功耗的限制，需要一套专用的组网技术以完成更高难度的任务^[46-47]。尤其是在电磁环境复杂的极端条件下，无法直接采用地面自组网技术，高吞吐、低泄露、干扰抑制等特殊需求也给无人机自组网带来巨大的挑战。但毫米波丰富的频谱资源为空中自组网大容量传输提供了可

能性，且毫米波窄波束的高指向性可以为加强空中自组网的安全性和反干扰性提供有力支持。无人机自组网毫米波通信场景如图 3 所示，如何实现无人机高动态自组网，且满足时效性、生存性、扩展性要求，是无人机自组网技术研究的一大难题，具体包括三维空域邻居发现、路由决策、快速空时频资源调度、分布式部署等问题。

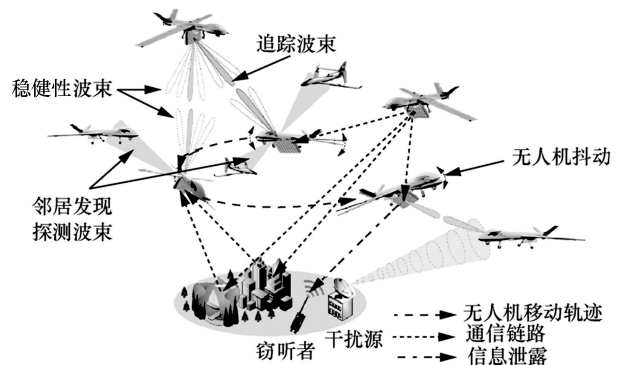


图 3 无人机自组网毫米波通信场景

3.1 邻居发现

网络中 2 个节点之间建立通信链路需要感知并维持二者之间的连接，即邻居发现。无人机邻居发现如图 4 所示，有效的邻居发现可以提高上层协议的实现效率，是组网的关键基础。为满足扩展性需求，无人机自组网需要根据任务需求频繁地增加更多节点或关闭一些节点，及时的邻居发现是实现快速网络重构的前提。根据天线的工作模式，邻居发现算法主要可以分为四类：全向发送全向接收、全向发送定向接收、定向发送全向接收以及定向发送定向接收^[48]。对于全向天线使能的网络，一个简单的广播信号可以发送到传输范围内的所有节点，邻居发现比较容易，但信号传播范围非常有限，且无法满足特殊场景对于安全性和隐蔽性的需求。全向发送定向接收和定向发送全向接收模式可以视为全向发送全向接收和定向发送定向接收之间的平衡，比纯定向发送接收邻居发现更容易实现^[49]。而对于搭载毫米波阵列天线的无人机自组网，指向性波束所覆盖的角度范围有限，且邻居节点需要知道什么时间将波束指向什么方向以发现彼此，即只有 2 个节点同时将波束指向彼此且收发模式相反，才能成功实现邻居发现^[50]。因此，如何在收发端双定向的条件下快速进行三维全空域的邻居发现，是无人机自组网中的一大挑战。

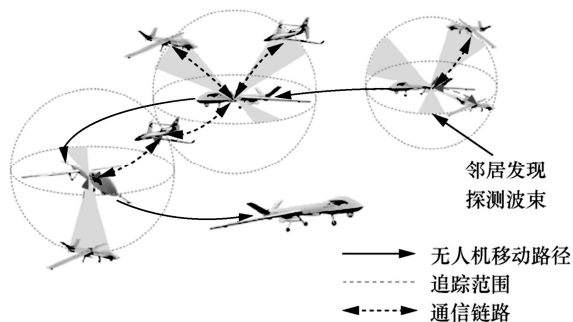


图 4 无人机邻居发现

此外，无人机自组网中各节点处于快速移动状态，需要频繁的邻居探测来更新邻居列表并维持网络连接，最简单的方法是在整个任务过程中始终进行邻居发现，但持续的邻居探测会消耗大量能量和资源，引起不必要的开销，而不时地打开或关闭探测过程也会造成不确定的发现时延^[51]。因此，应仔细设计邻居发现波束探测的频率，以平衡效率和开销。Wei 等^[52]提出了一种基于定向发送全向接收的双握手邻居探测方法，信号通过定向发射可以实现远距离传输，同时全向接收可以降低波束对准的难度，实现远距离传输和波束对准速度的平衡。考虑到无人机的部署、机动性以及功耗的问题，无人机以一定概率在发射、接收、休眠 3 种模式中切换，休眠状态中无人机暂停邻居发现过程，休眠概率取决于网络拓扑结构变化的概率，无人机相对运动越快，各个节点的邻居列表需要越频繁地更新以及及时去除离开的无人机、发现新加入的无人机，相应的休眠概率就越小。该研究通过设计并解决与无人机位置和运动相关的最优化问题得到最优的休眠概率，实现了开销和邻居发现准确度之间的平衡，所提出的算法适用于无人机网络。

除了方法和频率，邻居发现还需要考虑到同步、时延问题以及无人机抖动造成的波束失准等问题^[53-54]。除了空域的波束对准外，在时域和频域也需要完善对准和同步策略，但这也进一步增加了邻居发现的开销和时延，为系统时效性带来挑战。在毫米波频段定向传输时，为快速发现邻居并实现快速收敛，节点具有部分先验知识（如邻居节点的坐标）是非常有利的，但实时获取移动无人机的三维位置和速度也很困难。因此，无人机的三维运动预测对于简化邻居发现和维持网络连接至关重要。此外，聋问题和隐藏终端问题也会对无人机自组网邻居发现和上层定向通信协议的设计带来挑战，需要有针对性地展开研究^[55-56]。

邻居发现通常会受到无人机平台能耗、计算能力和覆盖能力的限制。因此，地面或卫星网络协作的无人机邻居发现会更加高效可行。在无人机自组网中，一般会有专门用于连接地面控制中心和其他无人机的专用无人机，用于接收控制信息（如预定的飞行高度、合适的速度等）并回传网络状态信息和收集到的信息，以扩大覆盖范围。因此可以将部分计算任务在地面控制中心完成，以减少无人机的能耗并延长任务时间^[57]。当无人机自组网受地域等因素限制无法连接地面控制中心时，也可以选择接入卫星通信网络，利用导航卫星获取节点位置信息，有助于无人机节点的邻居发现，卫星可以支持无人机机间的关键数据交换，也可以利用卫星的广域覆盖，将收集到的信息传送到远距离的地面控制中心，实现更高效的邻居发现^[57-58]。

3.2 路由决策

在无人机自组网中完成邻居发现后，需要设计各节点间的路由和沿着这些路由转发数据包的机制，当一架无人机向其他无人机传输数据时，选择数据传输的路径需要考虑通信质量要求、数据流量要求、网络拓扑结构变化以及传输时延等因素，还需要特别考虑无人机的三维移动特性。传统移动自组网和车载自组网通常可以由地面基站提供辅助路由，而无人机自组网很多时候无法经由地面基站进行数据转发，且无人机自组网各节点的运动更灵活，距离更远，网络范围更大，频繁的节点加入和离开导致网络拓扑结构快速变化，位置数据需要快速更新，其移动路径也需要根据任务和环境及时调整，周期性的拓扑变化和临时的链路故障是常态。因此，无人机自组网需要具备及时发现节点状态变化的能力和更强的网络快速重构能力，即具备时效性和生存性。此外，为了避免碰撞，无人机自组网对于数据包传输距离和时延的要求也更高。特别地，为无人机自组网设计的路由协议还应考虑安全性和隐蔽性问题，尤其是在对敌作战模式下。综上，为移动自组网和车载自组网设计的路由方案已无法满足无人机自组网的需求，这给无人机自组网的路由设计带来了巨大的挑战^[59-60]。

根据所采用的路由策略，现有的无人机自组网路由方案可以分为基于拓扑路由、基于位置路由、混合路由和仿生路由 4 种类型，这些协议中有的新提出的协议，有的根据现有移动自组网路由协议进行改进^[59]。4 种路由协议的工作模式和特点如表 4 所示。

表 4

4 种路由协议的工作模式和特点

协议类型	文献	工作模式	特点
基于拓扑路由	文献[61-62]	根据整个网络的拓扑信息在数据包发送前确定从源节点到目的节点的传输路径	路由发现数据包在整个网络中散播, 路由表定期更新, 对带宽、可扩展性、存储功能要求较高, 开销大
基于位置路由	文献[63-64]	利用每个节点已知的自身位置信息和当前邻居节点的位置信息确定传输路径	不需要全局网络信息, 只需要源节点、邻居节点和目的节点的位置信息, 能耗低、开销小, 计算时间短, 可扩展性强
混合路由	文献[65-66]	当数据无法通过基于拓扑的路由到达目的节点时, 采用基于位置路由将数据转发给离目的节点最近的邻居节点, 直至数据到达目的节点	能够在快速移动场景下实现更高的数据包传送率, 适用于无人机自组网
仿生路由	文献[67-70]	模仿自然界生物群体的规律和动态, 将路由发现过程模拟为蜂群采蜜或蚁群觅食等过程	适应性和自组织能力, 能有效应对网络拓扑结构的快速变化并调整路由, 适用于大型网络

基于拓扑路由根据网络节点的拓扑信息, 在数据传输开始之前获取从发送端到目的端的路由信息, 主要分为主动路由协议 (proactive protocol) 和被动路由协议 (reactive protocol) 2 种模式, 在主动路由协议中, 网络中的每个节点在任意时刻都持有向网络中任一节点的最新的路由信息, 而被动路由协议则只在需要建立路由时进行全局路由发现和链路建立^[61-62]。基于位置路由根据无人机节点的位置设计数据包发送路径, 具有很强的可扩展性, 适用于无人机自组网场景^[63-64]。混合路由融合了基于拓扑路由和位置路由的机制, 设计了基于拓扑路由中断时采用基于位置路由传输信息的应对模式, 保证了快速移动场景下的数据包传送率, 适用于高动态、大规模、密集的无人机自组网^[65-66]。特别地, 近年来仿生算法因其出众的解决复杂优化问题的能力而备受关注, 仿生路由策略, 如人工蜂群算法和蚁群算法^[67-70], 被应用于无人机自组网路由发现, 该过程可以模拟为蜂群的采蜜过程, 也可以模拟为蚁群的食物发现过程, 具有很强的适应性和自组织能力。Zhao 等^[68]介绍了一种高斯马尔可夫移动模型来描述无人机在三维空间中的移动, 使基于人工蜂群算法的路由发现策略适用于由节点快速移动造成的网络拓扑快速变化的情况, 实现了高数据包传输率和低端到端时延。Yu 等^[70]提出了一种由蚁群算法和动态元路由算法集成的无人机自组网多态感知路由算法, 通过感知路由的距离、稳定性以及拥塞程度来建立路由的选择标准, 可以有效避免拥塞和中断, 保证较低的平均端到端时延、路由开销和较高的数据包投递率, 该算法还可以针对不同无人机编队调整路由策略, 能够满足无人机自组网的数据传输需求。各类路由发现算法具有各自的优缺点和适用场景, 当路由确定后, 指向性波束成形可以用来增加传输距离、减少路由建立时间、减少数据包碰撞^[71]。

在很多实际应用场景中, 路由选择和资源分配往往是耦合的, 因此, 路由路径选择的建模过程可能会比较困难^[71-72]。如何求解该耦合问题并找到一个全局的解决方案将会是非常有价值的研究。

3.3 资源分配

无人机自组网中各节点需要互相协作以完成实际传输任务, 但节点对于通信资源的独占性会导致资源冲突和资源竞争问题。为提高无人机网络的性能, 大规模无人机网络需要动态管理各种资源的机制, 需要对无线资源进行合理分配以减少干扰并提高吞吐量, 对不同节点实现合理的空间、时间、频率等有限资源的共享至关重要。此外, 功率控制在能效方面对于毫米波无人机自组网也是非常关键的。随着无人机集群规模的增加, 计算任务大大增加, 计算资源的高效分配也是无人机自组网需要的技术突破。

在时域方面, 半双工模式的毫米波无人机网络中合理的帧设计可以保证有效的信息传输, 避免多径和多跳路由造成的冲突^[73], 而全双工模式下需要精心设计调度算法以减小干扰, 达到提高频谱效率、减少网络时延的目的^[74]。在空域方面, 尽管毫米波频段波束成形技术可以有效提高频谱效率、抑制干扰、增加空间复用, 但在高动态的网络拓扑中进行波束管理依然是巨大的挑战, 需要进行快速的波束跟踪和资源重构, 同时应尽量减小冲突和干扰。在频域方面, 合理的频谱分配可以有效提高频谱利用率、减小干扰以及保证无线组网系统高效的数据传输^[75]。随着三维网络拓扑结构快速变化, 实时的全局频谱分配是资源分配面临的巨大挑战。在功率方面, 传输功率控制、负载平衡和节点休眠是无人机自组网中需要着重考虑的问题, 对于储能有限的小型无人机来讲至关重要^[76]。在计算资源方面, 数据量随着无人机数量的增加而急剧增长, 而

无人机设备通常对时延的要求很高，无人机自组网需要超高计算能力和超低响应时延，这对于功耗和计算能力有限的无人机平台来说很难完成，将计算任务分配到移动边缘计算（MEC, mobile-edge computation）平台并实现合适的功率分配是解决无人机自组网计算能力限制的有效方法^[77]。

随着自组网规模增加、动态性增强，资源优化的计算复杂度呈指数级增长，这对网络管理的时效性提出了挑战。传统的无线资源分配通常基于优化技术，且大多基于已知、精确的信道状态信息，在大规模毫米波阵列天线通信中可能并不适用^[78-81]。随着机器学习的应用越来越广泛，基于深度学习、联邦学习的资源分配策略引起越来越多的关注^[82-83]。但基于机器学习的方法复杂度高，需要着重考虑时效性问题，这也是未来无人机自组网资源分配需要解决的重要问题。

3.4 分布式部署

无人机的高移动性和灵活部署特性可以全时全域地建立空中自组织网络，但高动态、大规模、密集的部署面临很大的挑战，为实现无人机之间的高效协作、提升系统性能和资源利用率，节点的分布式部署和所有可用资源的联合优化是非常有必要的。

值得说明的是，无人机位置部署与资源分配是相互影响的，优化变量相互耦合，而通常具有多个耦合变量和因果约束的问题是凸的，最优解的求取相当困难。文献[84]考虑了无人机自组网作为中继系统、多无人机协作辅助多个发射端与其对应接收端之间实现信息传输的场景，通过联合优化各节点的位置、功率和带宽分配以最大化最小的通信率，为解决该复杂非凸问题，该研究将变量解耦，采用块坐标下降法和连续凸逼近算法，在给定位置条件下优化带宽和功率，在给定带宽和功率的条件下优化位置，以此循环迭代直至收敛，得到了原问题的次优解。文献[85]针对典型的多无人机高效协作的监视系统场景，将无人机分为若干集群，每个集群由一个簇头和若干簇成员节点构成，自组网中另有负责边缘计算的无人机，集群内无人机将收集到的信息发送到簇头，簇头根据自身能耗和计算能力决定信息处理任务在本地完成还是交由边缘计算无人机完成，以及交由哪个边缘计算无人机（即任务调度）完成，边缘计算无人机需要对每个任务分配相应的计算资源以及最优化移动路径，从而最小化所有集群内无人机的能量消耗，这是一个

混合整数非凸问题，该研究将原问题分解为任务调度计算资源分配子问题和边缘计算无人机路径规划子问题，分别采用分支定界法和连续凸逼近法求解。可以看出，无人机轨迹和资源分配往往需要将原始复杂问题分解、简化、逐个求解、迭代优化，逐步逼近最优解。

尽管已有相当一部分无人机自组网分布式部署联合资源分配的研究成果，但极少有针对毫米波阵列通信辅助的无人机集群进行部署和资源分配联合优化的方法，且大多数场景中节点的移动速度较低，网络拓扑结构较稳定。当采用毫米波阵列通信技术辅助机间通信以及网络动态性更强时，多无人机的位置部署会面临毫米波波束覆盖范围有限、波束调度任务更复杂、波束移交更频繁等问题，需要进一步展开研究。

3.5 组网通信小结

本节总结了无人机自组网面临的技术挑战和未来研究方向。首先，无人机为满足扩展性需求需要快速的节点变更，及时进行邻居发现更新路由链表、快速网络重构和规划最优路由是满足时效性、生存性的关键前提。其次，毫米波阵列通信中空间、时间、频率、功率、计算等资源的高效动态分配是无人机自组网性能提升的关键基础。最后，解决高动态、大规模网络部署与资源分配的耦合问题以实现机间高效协作是进一步完善无人机自组网技术的关键突破。无人机自组网是一个开放性非常高、应用非常广泛的研究方向，本节所提到的问题都是有待解决的重要研究课题。

4 结束语

本文对无人机间毫米波阵列通信的潜力和挑战进行了综述，首先介绍了点对点通信信道建模、稳健性波束设计以及安全通信面临的挑战，总结了现有的研究成果并指出其中存在的问题。之后，指出无人机自组网中需要进行有效的、实时的网络管理，总结了邻居发现、路由决策、资源分配和分布式部署方面的相关成果以及值得展开深入研究的问题。

现有无人机间毫米波阵列通信的研究还处于初始阶段，尚未形成完整的理论和技术体系，机间信道的空-时-频演变机理有待揭示，以挖掘平台机动性与信道状态和通信性能的内在关联，为无人机间毫米波通信和无人机自组网提供支持。无人

机机间通信还需要设计可靠的定向传输和快速波束追踪用以对抗信道状态的快速变化、平台抖动和多普勒频移,此外,毫米波三维波束成形可以为机间的安全通信提供额外的空间自由度,如何利用空间自由度提升通信安全性能需要进一步探究。对于多无人机集群网络,三维空间高动态特性为组网的时效性、生存性和扩展性带来严峻的挑战,如何在收发端定向的条件下进行快速邻居发现、在高动态网络拓扑结构中进行高效的路由决策、在通信资源快速时变条件下进行空-时-频资源调度以及三维空间中的部署等,都是有待解决的重要问题。无人机自组网也是未来空天地一体化网络中空基平台的重要组成部分,不仅是无人机机间组网,无人机与卫星、其他空基平台、地面设施协同的大型网络的多址接入、资源调度、路由协议设计等问题也是亟须解决的重要研究课题。

参考文献:

- [1] ZHANG H L, SONG L Y, HAN Z, et al. Cooperation techniques for a cellular Internet of unmanned aerial vehicles[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2019, 26(5): 167-173.
- [2] ZHANG C Y, ZHANG W Z, WANG W, et al. Research challenges and opportunities of UAV millimeter-wave communications[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2019, 26(1): 58-62.
- [3] 徐磊, 周黎莎, 李仁俊, 等. 毫米波波束编码技术在无人机智能集群中的应用[J]. *航空学报*, 2020, 41(S1): 723754.
XU L, ZHOU L S, LI R J, et al. Application of millimeter wave beam coding technology in UAV intelligent swarm[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2020, 41(S1): 723754.
- [4] 詹文浩, 戴国华, 王朝晖. 高频段频谱现状与技术分析[J]. *移动通信*, 2016, 40(3): 7-12.
ZHAN W H, DAI G H, WANG Z H. Status of high frequency spectrum and technical analysis[J]. *Mobile Communications*, 2016, 40(3): 7-12.
- [5] 郑婷婷. 面向高速移动平台的毫米波波束成形与波束追踪技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2018.
ZHENG T T. Millimeter wave beamforming and beam tracking for high speed mobile platforms[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2018.
- [6] 于大群, 孙磊, 林维涛, 等. 一种用于 5G 移动通信的毫米波大规模天线系统[J]. *微波学报*, 2021, 37(1): 7-13.
YU D Q, SUN L, LIN W T, et al. A millimeter-wave massive MIMO antenna system for 5G mobile communication[J]. *Journal of Microwaves*, 2021, 37(1): 7-13.
- [7] MA W Y, QI C H, LI G Y. High-resolution channel estimation for frequency-selective mmWave massive MIMO systems[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2020, 19(5): 3517-3529.
- [8] MA W Y, QI C H, ZHANG Z C, et al. Sparse channel estimation and hybrid precoding using deep learning for millimeter wave massive MIMO[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2020, 68(5): 2838-2849.
- [9] 高杨, 李东生, 柳向. 无人机集群协同态势觉察一致性评估[J]. *电子学报*, 2019, 47(1): 190-196.
GAO Y, LI D S, LIU X. UAV swarm cooperative situation perception consensus evaluation[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2019, 47(1): 190-196.
- [10] LIU J J, SHI Y P, FADLULLAH Z M, et al. Space-air-ground integrated network: a survey[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2018, 20(4): 2714-2741.
- [11] 王祥科, 刘志宏, 丛一睿, 等. 小型固定翼无人机集群综述和未来发展[J]. *航空学报*, 2020, 41(4): 023732.
WANG X K, LIU Z H, CONG Y R, et al. Miniature fixed-wing UAV swarms: review and outlook[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2020, 41(4): 023732.
- [12] 王长龙, 袁全盛, 胡永江. 无人机通信安全中的三维波束成形技术[J]. *航空兵器*, 2021, 28(1): 39-44.
WANG C L, YUAN Q S, HU Y J. 3D beamforming for security of UAV communications[J]. *Aero Weaponry*, 2021, 28(1): 39-44.
- [13] JIANG H, ZHANG Z C, WANG C X, et al. A novel 3D UAV channel model for A2G communication environments using AoD and AoA estimation algorithms[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2020, 68(11): 7232-7246.
- [14] CAI X S, IZYDORCZYK T, RODRÍGUEZ-PIÑEIRO J, et al. Empirical low-altitude air-to-ground spatial channel characterization for cellular networks connectivity[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2021, 39(10): 2975-2991.
- [15] YANG L, ZHANG W. Beam tracking and optimization for UAV communications[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2019, 18(11): 5367-5379.
- [16] 朱秋明, 华博宇, 毛开, 等. 无人机毫米波信道建模进展和挑战[J]. *数据采集与处理*, 2020, 35(6): 1049-1059.
ZHU Q M, HUA B Y, MAO K, et al. Advances and challenges of UAV millimeter-wave channel modeling[J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 2020, 35(6): 1049-1059.
- [17] RAPPAPORT T S, MACCARTNEY G R, SAMIMI M K, et al. Wide-band millimeter-wave propagation measurements and channel models for future wireless communication system design[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2015, 63(9): 3029-3056.
- [18] ZHANG J L, XU W J, GAO H, et al. Position-attitude prediction based beam tracking for UAV mmWave communications[C]// *Proceedings of ICC 2019-2019 IEEE International Conference on Communications*. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-7.
- [19] KE Y N, GAO H, XU W J, et al. Position prediction based fast beam tracking scheme for multi-user UAV-mmWave communications[C]// *Proceedings of 2019 IEEE International Conference on Communications*. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-7.
- [20] BAI L, HUANG Z W, ZHANG X, et al. A non-stationary 3D model for 6G massive MIMO mmWave UAV channels[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2022, 21(6): 4325-4339.

- [21] MA Z F, AI B, HE R S, et al. Three-dimensional modeling of millimeter-wave MIMO channels for UAV-based communications[C]//Proceedings of 2020 IEEE Global Communications Conference. Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-6.
- [22] RODRÍGUEZ-FERNÁNDEZ J, GONZÁLEZ-PRELCIC N, PAMPLONA-TRINDADE I, et al. Position-aided compressive channel estimation and tracking for millimeter wave multi-user MIMO air-to-ground communications[C]//Proceedings of 2019 IEEE 20th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-5.
- [23] DONG P H, ZHANG H, LI G Y, et al. Deep CNN-based channel estimation for mmWave massive MIMO systems[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2019, 13(5): 989-1000.
- [24] WU Y, GU Y T, WANG Z C. Efficient channel estimation for mmWave MIMO with transceiver hardware impairments[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(10): 9883-9895.
- [25] ZHANG D Y, LI A, SHIRVANIMOGHADDAM M, et al. Codebook-based training beam sequence design for millimeter-wave tracking systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2019, 18(11): 5333-5349.
- [26] NOH S, ZOLTOWSKI M D, LOVE D J. Multi-resolution codebook and adaptive beamforming sequence design for millimeter wave beam alignment[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, 16(9): 5689-5701.
- [27] KIM J, SCHMIEDER M, PETER M, et al. A comprehensive study on mmWave-based mobile hotspot network system for high-speed train communications[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(3): 2087-2101.
- [28] XU W J, KE Y N, LEE C H, et al. Data-driven beam management with angular domain information for mmWave UAV networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2021, 20(11): 7040-7056.
- [29] CHIANG H L, CHEN K C, RAVE W, et al. Machine-learning beam tracking and weight optimization for mmWave multi-UAV links[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2021, 20(8): 5481-5494.
- [30] YUAN W J, LIU C, LIU F, et al. Learning-based predictive beamforming for UAV communications with jittering[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2020, 9(11): 1970-1974.
- [31] ZHANG Q X, SUN H Q, FENG Z Y, et al. Data-aided Doppler frequency shift estimation and compensation for UAVs[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 7(1): 400-415.
- [32] CHEN X Y, YANG Z T, ZHAO N, et al. Secure transmission via power allocation in NOMA-UAV networks with circular trajectory[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(9): 10033-10045.
- [33] WANG Q, CHEN Z, LI H. Energy-efficient trajectory planning for UAV-aided secure communication[J]. China Communications, 2018, 15(5): 51-60.
- [34] DUO B, LUO J S, LI Y L, et al. Joint trajectory and power optimization for securing UAV communications against active eavesdropping[J]. China Communications, 2021, 18(1): 88-99.
- [35] LI S X, DUO B, RENZO M D, et al. Robust secure UAV communications with the aid of reconfigurable intelligent surfaces[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2021, 20(10): 6402-6417.
- [36] SUN G E, LI N, TAO X F, et al. Power allocation in UAV-enabled relaying systems for secure communications[J]. IEEE Access, 2019, 7: 119009-119017.
- [37] CHENG F, GUI G, ZHAO N, et al. UAV-relaying-assisted secure transmission with caching[J]. IEEE Transactions on Communications, 2019, 67(5): 3140-3153.
- [38] MUKHERJEE A, FAKOORIAN S A A, HUANG J, et al. Principles of physical layer security in multiuser wireless networks: a survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2014, 16(3): 1550-1573.
- [39] WU Q Q, MEI W D, ZHANG R. Safeguarding wireless network with UAVs: a physical layer security perspective[J]. IEEE Wireless Communications, 2019, 26(5): 12-18.
- [40] SUN X F, NG D W K, DING Z G, et al. Physical layer security in UAV systems: challenges and opportunities[J]. IEEE Wireless Communications, 2019, 26(5): 40-47.
- [41] WU H C, WEN Y, ZHANG J Z, et al. Energy-efficient and secure air-to-ground communication with jittering UAV[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(4): 3954-3967.
- [42] 邹玉龙, 姜晓, 严培舜, 等. 下一代无人机群协同通信网络[J]. 南京邮电大学学报(自然科学版), 2017, 37(3): 43-51.
ZOU Y L, JIANG X, YAN P S, et al. Next-generation unmanned aerial vehicle (UAV) cooperative communications[J]. Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2017, 37(3): 43-51.
- [43] 徐俊. 多无人机的组群飞行特性与控制分析[D]. 南京: 南京理工大学, 2017.
XU J. Group flight characteristics and control analysis of multiple UAVs[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2017.
- [44] 段海滨, 邱华鑫, 陈琳, 等. 无人机自主集群技术研究展望[J]. 科技导报, 2018, 36(21): 90-98.
DUAN H B, QIU H X, CHEN L, et al. Prospects on unmanned aerial vehicle autonomous swarm technology[J]. Science & Technology Review, 2018, 36(21): 90-98.
- [45] ZAFAR W, MUHAMMAD K B. Flying ad-hoc networks: technological and social implications[J]. IEEE Technology and Society Magazine, 2016, 35(2): 67-74.
- [46] 付有斌, 康巧燕, 王建峰, 等. 无人机飞行自组网通信协议[J]. 指挥与控制学报, 2021, 7(1): 89-96.
FU Y B, KANG Q Y, WANG J F, et al. Communication protocols for UAV flying ad-hoc network[J]. Journal of Command and Control, 2021, 7(1): 89-96.
- [47] GUPTA L, JAIN R, VASZKUN G. Survey of important issues in UAV communication networks[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016, 18(2): 1123-1152.
- [48] WANG Z, PENG L X, XU R H, et al. Neighbor discovery in three-dimensional mobile ad hoc networks with directional antennas[C]//Proceedings of 2016 25th Wireless and Optical Communica-

- tion Conference (WOCC). Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-5.
- [49] LIU L J, PENG L X, XU R H, et al. A neighbor discovery algorithm for flying ad hoc network using directional antennas[C]//Proceedings of 2019 28th Wireless and Optical Communications Conference (WOCC). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-5.
- [50] CAI H, LIU B, GUI L, et al. Neighbor discovery algorithms in wireless networks using directional antennas[C]//Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Communications. Piscataway: IEEE Press, 2012: 767-772.
- [51] SUN W, YANG Z, ZHANG X L, et al. Energy-efficient neighbor discovery in mobile ad hoc and wireless sensor networks: a survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2014, 16(3): 1448-1459.
- [52] WEI Z Q, LIU X Y, HAN C Y, et al. Neighbor discovery for unmanned aerial vehicle networks[J]. IEEE Access, 2018, 6: 68288-68301.
- [53] YANG B, LIU M, LI Z C. Rendezvous on the fly: efficient neighbor discovery for autonomous UAVs[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2018, 36(9): 2032-2044.
- [54] WANG Y, MAO S W, RAPPAPORT T S. On directional neighbor discovery in mmWave networks[C]//Proceedings of 2017 IEEE 37th International Conference on Distributed Computing Systems. Piscataway: IEEE Press, 2017: 1704-1713.
- [55] YAN L, DING H C, ZHANG L, et al. Machine learning-based handovers for sub-6 GHz and mmWave integrated vehicular networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2019, 18(10): 4873-4885.
- [56] DAI H N, NG K W, LI M L, et al. An overview of using directional antennas in wireless networks[J]. International Journal of Communication Systems, 2013, 26(4): 413-448.
- [57] OUBBATI O S, ATIQUZZAMAN M, LORENZ P, et al. Routing in flying ad hoc networks: survey, constraints, and future challenge perspectives[J]. IEEE Access, 2019, 7: 81057-81105.
- [58] WANG J J, JIANG C X, HAN Z, et al. Taking the drones to the next level: cooperative distributed unmanned-aerial-vehicular networks for small and mini drones[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2017, 12(3): 73-82.
- [59] SHUMEYE L D, SAAD U, DAO N-N, et al. Routing in flying ad hoc networks: a comprehensive survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2020, 22(2): 1071-1120.
- [60] 李盼. 三维场景无人机自组网路由协议研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2021.
- LI P. Research on routing protocol for 3D UAV adhoc network[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2021.
- [61] SHIN J, BAEK Y, SON S H. Fundamental topology-based routing protocols for autonomous vehicles[C]//Proceedings of 2016 IEEE 22nd International Conference on Embedded and Real-Time Computing Systems and Applications. Piscataway: IEEE Press, 2016: 265-265.
- [62] BAYAD K, BOURHIM E H, RZIZA M, et al. Comparative study of topology-based routing protocols in vehicular ad hoc network using IEEE802.11p[C]//Proceedings of 2016 International Conference on Electrical and Information Technologies (ICEIT). Piscataway: IEEE Press, 2016: 526-530.
- [63] POPESCU A M, TUDORACHE I G, PENG B, et al. Surveying position based routing protocols for wireless sensor and ad-hoc networks[J]. International Journal of Communication Networks and Information Security (IJCNIS), 2012, 4(1): 41.
- [64] LIN L, SUN Q, LI J, et al. A novel geographic position mobility oriented routing strategy for UAVs[J]. Journal of Computational Information Systems, 2012, 8(2): 709-716.
- [65] LI Y, ST-HILAIRE M, KUNZ T. Enhancements to reduce the overhead of the reactive-greedy-reactive routing protocol for unmanned aeronautical ad-hoc networks[C]//Proceedings of 2012 8th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing. Piscataway: IEEE Press, 2012: 1-4.
- [66] MEDJO M B J D, KUNZ T, ST-HILAIRE M, et al. Unmanned aerial ad hoc networks: simulation-based evaluation of entity mobility models-impact on routing performance[J]. Aerospace, 2015, 2(3): 392-422.
- [67] BITAM S, MELLOUK A, ZEDADALLY S. Bio-inspired routing algorithms survey for vehicular ad hoc networks[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015, 17(2): 843-867.
- [68] ZHAO B Z, DING Q. Route discovery in flying ad-hoc network based on bee colony algorithm[C]//Proceedings of 2019 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Computer Applications. Piscataway: IEEE Press, 2019: 364-368.
- [69] LEONOV A V. Modeling of bio-inspired algorithms AntHocNet and BeeAdHoc for flying ad hoc networks (FANETS)[C]//Proceedings of 2016 13th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering. Piscataway: IEEE Press, 2016: 90-99.
- [70] YU Y L, RU L, CHI W S, et al. Ant colony optimization based polymorphism-aware routing algorithm for ad hoc UAV network[J]. Multimedia Tools and Applications, 2016, 75(22): 14451-14476.
- [71] EL-SHERIF A A, MOHAMED A. Joint routing and resource allocation for delay minimization in cognitive radio based mesh networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(1): 186-197.
- [72] WEERADDANA P C, CODREANU M, LATVA-AHO M, et al. Resource allocation for cross-layer utility maximization in wireless networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011, 60(6): 2790-2809.
- [73] NIU Y, GAO C H, LI Y, et al. Boosting spatial reuse via multiple-path multihop scheduling for directional mmWave WPANs[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(8): 6614-6627.
- [74] CHANG W, WU C W, LIN Y X. Efficient time-slot adjustment and packet-scheduling algorithm for full-duplex multi-hop relay-assisted mmWave networks[J]. IEEE Access, 2018, 6: 39273-39286.
- [75] WANG H C, WANG J L, DING G R, et al. Spectrum sharing planning for full-duplex UAV relaying systems with underlaid D2D communications[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2018, 36(9): 1986-1999.
- [76] FENG Z Y, JI L, ZHANG Q X, et al. Spectrum management for

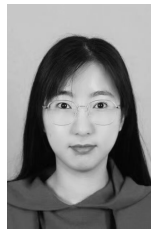
- mmWave enabled UAV swarm networks: Challenges and opportunities[J]. IEEE Communications Magazine, 2019, 57(1): 146-153.
- [77] SEID A M, BOATENG G O, ANOKYE S, et al. Collaborative computation offloading and resource allocation in multi-UAV-assisted IoT networks: a deep reinforcement learning approach[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(15): 12203-12218.
- [78] WU X Z, TAVILDAR S, SHAKKOTTAI S, et al. FlashLinQ: a synchronous distributed scheduler for peer-to-peer ad hoc networks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2013, 21(4): 1215-1228.
- [79] SHEN K M, YU W. FPLinQ: a cooperative spectrum sharing strategy for device-to-device communications[C]//Proceedings of 2017 IEEE International Symposium on Information Theory. Piscataway: IEEE Press, 2017: 2323-2327.
- [80] QIAN L P, ZHANG Y J. S-MAPEL: monotonic optimization for non-convex joint power control and scheduling problems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(5): 1708-1719.
- [81] JOHANSSON M, XIAO L. Cross-layer optimization of wireless networks using nonlinear column generation[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2006, 5(2): 435-445.
- [82] CUI W, SHEN K M, YU W. Spatial deep learning for wireless scheduling[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2019, 37(6): 1248-1261.
- [83] WADU M M, SAMARAKOON S, BENNIS M. Federated learning under channel uncertainty: joint client scheduling and resource allocation[C]//Proceedings of 2020 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-6.
- [84] CHEN Q B. Joint position and resource optimization for multi-UAV-aided relaying systems[J]. IEEE Access, 2020, 8: 10403-10415.

- [85] YOU W J, DONG C, WU Q H, et al. Joint task scheduling, resource allocation, and UAV trajectory under clustering for FANETs[J]. China Communications, 2022, 19(1): 104-118.

[作者简介]



肖振宇（1983-），男，湖北天门人，博士，北京航空航天大学教授、博士生导师，主要研究方向为毫米波通信、阵列信号处理、空基通信网络、空天地一体化网络等。



刘珂（1998-），女，陕西榆林人，北京航空航天大学硕士生，主要研究方向为无人机毫米波波束成形等。



朱立鹏（1995-），男，河北承德人，博士，新加坡国立大学博士后，主要研究方向为毫米波波束成形、非正交多址接入、无人机通信等。