

无人机辅助蜂窝网络的模式选择与资源优化

冯大权¹, 郑灿健², 孔祥琦³

(1. 深圳大学电子与信息工程学院, 广东 深圳 518055; 2. 哈尔滨工业大学(深圳)电子与信息工程学院, 广东 深圳 518060;
3. 国家无线电监测中心检测中心, 北京 100041)

摘要: 研究了无人机 (UAV, unmanned aerial vehicle) 与蜂窝网络共存下的无线通信资源分配和优化方案。为了提高网络频谱利用率, 无人机用户以全双工 (FD, full duplex) 或半双工 (HD, half duplex) 设备对设备 (D2D, device-to-device) 技术复用蜂窝频谱资源接入网络。此外, 构造了一个联合接入控制、模式选择、功率控制和资源分配优化问题最大化网络的整体吞吐量, 并保证无人机用户和地面蜂窝用户的服务质量要求。为解决这个问题, 首先利用凸优化的第一阶段方法分别对全双工和半双工两种设备对设备模式进行接入控制和可行性判定。然后, 对可接入无人机用户对使用凸凹过程 (CCCP, convex and concave procedure) 迭代算法求解功率控制问题。利用该局部最优值, 原优化问题可以简化为加权最大化问题。最后, 通过库恩-芒克斯 (KM, Kuhn-Munkres) 算法对最优信道资源进行匹配, 获得系统的全局最优吞吐量值。数值结果表明, 所提方案能显著提高系统性能。

关键词: 无人机通信; 全双工设备对设备技术; 模式选择; 功率控制; 资源分配与优化

中图分类号: TN92

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.2024.00380

Mode selection and resource optimization for UAV-assisted cellular networks

FENG Daquan¹, ZHENG Canjian², KONG Xiangqi³

1. College of Electronics and Information Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518055, China

2. School of Electronics and Information Engineering, Harbin Institute of Technology (Shenzhen), Shenzhen 518060, China

3. The State Radio Monitoring Center Testing Center, Beijing 100041, China

Abstract: The resource allocation and optimization scheme was studied in a coexistence scenario of unmanned aerial vehicle (UAV) and cellular communication network. To improve spectrum efficiency of the system, UAV users could reuse the cellular spectrum resources to access the network through full duplex or half duplex device-to-device technique. Additionally, a joint access control, mode selection, power control and resource allocation optimization problem was formulated to maximize the overall throughput of the network while ensuring quality of service requirements for both UAV users and ground cellular users. Specifically, the phase 1 method in the convex optimization was adopted for access control and feasibility check, and then the convex and concave procedure (CCCP) iterative algorithm was used to solve the power control problem for feasible UAV user pairs. By using this local optimum value, the original optimization problem can be simplified into a weighted maximization problem. Finally, the Kuhn-Munkres (KM) algorithm was used to match the optimal channel resources and obtain the global optimal throughput value of the system. Numerical results show that the

收稿日期: 2023-09-05; 修回日期: 2024-01-07

通信作者: 孔祥琦, kongxiangqi@srtc.org.cn

基金项目: 国家重点研发计划 (No. 2020YFB1807601); 广东省重点研发计划 (No. 2022B0101010001); 深圳市科技计划 (No. JCYJ20210324095209025)

Foundation Items: The National Key Research and Development Program of China (No. 2020YFB1807601), The Key Research and Development Program of Guangdong (No. 2022B0101010001), The Shenzhen Science and Technology Program (No. JCYJ20210324095209025)

proposed scheme can significantly improve the performance of system.

Key words: unmanned aerial vehicle communication, full duplex device to device technique, mode selection, power control, resources allocation and optimization

0 引言

无人机 (UAV, unmanned aerial vehicle) 是一种可远距离操控的新型飞行器设备, 已被广泛地应用于多个领域^[1]。由于具有成本低廉、部署灵活、操作简便等特点, 近年来, 无人机辅助的无线通信网络受到了学术界和工业界越来越多的关注, 并被提出作为下一代无线蜂窝网络的重要组成部分, 以满足大规模连接、全覆盖、低时延和高吞吐量的需求^[2-4]。

现有的许多研究工作已经探讨了无人机辅助无线通信技术带来的巨大潜力。例如, 文献[5-7]考虑了利用无人机通信技术来提高小区边缘用户的性能。文献[8-9]研究了无人机的部署和轨迹设计, 以提高无人机通信的频谱效率 (SE, spectrum efficiency) 和能量效率 (EE, energy efficiency)。文献[10]分析了无人机辅助通信的信道模型, 并提出了一个低复杂度的无人机选择策略来降低信号处理复杂性。文献[11]研究了无人机对无人机通信的保密性能。文献[12]探讨了软件定义无人机网络的自适应服务质量 (QoS, quality of service) 机制。此外, 文献[13-15]分别研究了无人机辅助物联网下的网络吞吐量和能量效率最大化问题以及信息年龄最小化问题。文献[16-17]探讨了基于无人机通信的移动边缘计算 (MEC, mobile-edge computing) 网络。文献[18]提出了一个无人机辅助的数据采集和传输方案来保证从传感器到远程地面基站的短数据包传输的及时性和安全性。文献[19]研究了无线网络资源分配与无人机定位的联合优化问题, 并提出了一个启发式算法最小化无人机的部署数量。文献[20]探讨了基于用户调度的多无人机辅助通信系统资源优化。另外, 文献[21]调研了无人机网络的组网协议以及消息收集与转发机制。然而, 上述工作只考虑了无人机作为移动基站或中继的场景, 没有考虑无人机作为普通用户的情况。通常, 无人机在无线通信系统中的作用主要包括: 作为空中基站或中继快速地部署在特定区域以提高网络的覆盖范围。与传统的陆地基站相比, 无人机具有高移动性和灵活性的特点, 能够调整高

度, 避开障碍物, 从而与用户建立视距 (LOS, light-of-sight) 传播链路^[22]; 作为空中用户设备与地面用户共存在蜂窝网络下, 以实现基于无人机通信的数据收集、转发和传输^[23]。无人机作为空中用户设备的相关应用见表 1。

表 1 无人机作为空中用户设备的相关应用

应用领域	应用方向
公共服务	边境巡逻、森林防火、河道监测、交通管理
能源通信	电力巡线、石油管道巡线、天然气管道巡线、基站巡检
国土资源	城镇规划、铁路建设、线路测绘、考古调查、矿产开采
商业娱乐	航拍娱乐、新闻采集、电影拍摄、三维建模、物流运输
农林牧渔	农药喷洒、农情监测、辅助授粉

一般情况下, 无人机用户通过与地面蜂窝用户共享频谱实现无线通信^[24]。为了提高无人机网络的频谱效率, 一种可行的方法是使用设备对设备 (D2D, device-to-device) 技术^[25]。在 D2D 技术中, 邻近的用户可以直接进行点对点的数据传输而不需要经过基站的中继, 因此可以有效地减少基站的负载, 提高数据传输速率和系统频谱效率^[26]。针对基于 D2D 技术的无人机网络, 文献[27]提出了一个联合优化发射功率、带宽、无人机飞行高度和位置的策略最大化设备对设备用户对传输速率。文献[28]提出了一个联合无人机和设备对设备技术的协同缓存架构最大化网络的缓存效率。文献[29]分析了无人机辅助的设备对设备通信网络的短包性能。此外, 文献[30]研究了基于设备对设备技术和无人机网络的三维频谱感知。文献[31]探讨了基于设备对设备技术的无人机和用户的高能效传输。文献[32]研究了基于无人机和无线电力传输的设备对设备无线网络, 并提出了一个优化能量收集时间和功率分配算法来实现网络资源的优化分配。文献[33]研究了基于设备对设备技术的无人机辅助物联网保密通信的频谱利用率问题。然而, 文献[27-33]主要考虑基于半双工 (HD, half duplex) 通信模式的设备对设备技术, 也即设备对设备用户对在一定时隙内只发送或接收数据, 而没有考虑到全双工 (FD, full duplex) 通信模式。

在全双工通信模式中，通信双方可以在同一频谱资源上同时发送和接收数据^[34]。与半双工通信模式相比，基于全双工通信模式的系统频谱效率可以得到明显的改善。因此，全双工通信模式被认为是未来蜂窝网络的关键技术之一^[35]。针对基于全双工通信模式的无人机网络，文献[36-37]分别提出了一个联合优化用户调度、无人机飞行轨迹和发射功率策略来最大化网络的吞吐量和能量效率。文献[38]考虑了一个多天线的全双工无人机通信场景，并提出了一个联合波束成形和功率分配策略来最大化网络的瞬时数据速率。此外，文献[39-40]研究了基于毫米波的全双工无人机通信网络。文献[41-42]探讨了基于设备对设备技术的全双工无人机中继系统的频谱共享规划和资源分配问题。然而，文献[36-42]的研究主要集中在无人机作为移动基站或中继的场景，因此无法探讨全双工通信模式对无人机用户网络的性能提升。对于无人机用户场景，文献[43]提出了一个模式选择和功率分配算法来最大化网络的吞吐量。遗憾的是，文献[43]只考虑了单对无人机用户和单个蜂窝用户，而没有考虑多个无人机用户对和多个蜂窝用户的情况。

基于上述文献，本文考虑了一个由多个无人机用户对和多个地面蜂窝用户组成的单小区网络场景。并且，为了提高系统的频谱效率，每个无人机用户对使用全双工或半双工设备对设备技术进行数据传输。针对无人机通信带来干扰问题，本文提出了一个联合接入控制、模式选择、功率控制和资源分配优化策略，在保证无人机用户对和地面蜂窝用户的服务质要求的同时，最大化系统的整体吞吐量。具体地，首先采用凸优化^[44]的阶段1(Phase 1)

方法检验全双工和半双工两种设备对设备通信模式的可行性。然后，运用文献[45]的凸凹过程(CCCP, convex and concave procedure)迭代算法进行功率分配，获得局部最优的吞吐量。基于获得的局部最优吞吐量值，原优化问题得到简化，并可以转化为图论的加权最大化匹配问题。最后，本文采用文献[46]中的库恩-芒克斯(KM, Kuhn-Munrkes)算法，对无人机用户和地面蜂窝用户的最优信道资源进行匹配，从而得到网络的全局最优吞吐量值。

1 系统模型

系统模型如图1所示，假设在一个小区中存在有 M 个地面蜂窝用户和 N 对无人机用户。我们用 $\mathcal{M} = \{1, 2, \dots, M\}$, $\mathcal{N} = \{1, 2, \dots, N\}$, RCU_i 和 DU_j 分别表示网络中的地面蜂窝用户集合，无人机用户对集合，第 i 个地面蜂窝用户和第 j 对无人机用户，且 $i \in \mathcal{M}$, $j \in \mathcal{N}$ 。此外，正交频分多址(OFDMA, orthogonal frequency division multiple access)策略被应用在系统模型中，即带宽大小为 W 的频谱资源，以正交的方式平均分给所有地面蜂窝用户进行上行链路传输。而无人机用户则通过复用地面蜂窝用户的频谱资源来实现无人机通信。令 $h_{j_1,b}$ 、 $h_{j_2,b}$ 、 $h_{j_1,i}$ 和 $h_{j_2,i}$ 分别表示 DU_{j_1} 和 DU_{j_2} 与基站和蜂窝用户 RCU_i 的信道功率增益，该类信道模型假设采用基于视距传播的空对地信道模型， g_j^d 表示 DU_{j_1} 和 DU_{j_2} 之间的信道功率增益，该类信道假设采用自由空间路径损耗模型， $g_{i,b}$ 表示蜂窝用户 RCU_i 和基站之间的上行信道功率增益，该类信道假设采用自由空间路径损耗模型加上多径衰落和阴影衰落，以及 σ^2 表示噪声功率。此外，由于全双工通信模式下的

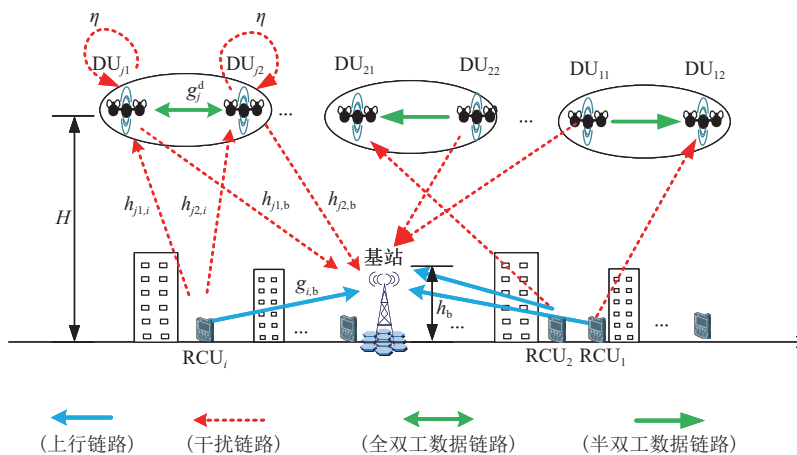


图1 系统模型

无人机用户可以在同一频段下同时发送和接收数据，因此存在与发射功率成正比的剩余自干扰（RSI, residual self-interference）。为了描述全双工通信产生的剩余自干扰，用 η 表示剩余自干扰值。基于提出的系统模型，第2节构造吞吐量最大化问题，并且保证小区内蜂窝用户和无人机用户的服务质量要求。此外，该模型可以应用于常见的无人机协作的蜂窝网络场景中。

2 吞吐量最大化问题

通过对无人机用户的接入控制、模式选择、功率控制和资源分配优化，本文拟解决的问题如下：在保证无人机用户和蜂窝用户的服务质量（为了方便，定义为信号对干扰加噪声比）要求的同时，使用现有的稀缺无线资源使得吞吐量最大化。具体地，使用 $\rho_{x,i,j} \in \{0,1\}$ 表示通信模式分配因子，其中，下标 $x=0$ 和 $x=1$ 分别表示半双工通信模式和全双工通信模式， $\rho_{x,i,j}=1$ 表示 DUP_j 复用 RCU_i 的频谱资源，否则 $\rho_{x,i,j}=0$ 。此外，定义 $\mathbf{P}=(P_i^c, P_{j1}^d, P_{j2}^d)$ 为 RCU_i 、 DU_{j1} 和 DU_{j2} 的发射功率向量。因此，该异构通信网络吞吐量最大化的数学模型可以表示为

$$\max_{P_i^c, P_{j1}^d, P_{j2}^d, \rho_{x,i,j}} \sum_{i \in \mathcal{M}} \sum_{j \in \mathcal{N}} \rho_{x,i,j} \{ \text{lb}(1 + \zeta_i^c) + \text{lb}(1 + \zeta_{j1}^d) + \text{lb}(1 + \zeta_{j2}^d) \} \quad (1)$$

$$\text{s.t. } \rho_{x,i,j} \in \{0,1\}, x \in \{0,1\}, \forall i, j \quad (1a)$$

$$\sum_{x \in \{0,1\}} \sum_{j \in \mathcal{N}} \rho_{x,i,j} \leq 1, \forall i \in \mathcal{M} \quad (1b)$$

$$\sum_{x \in \{0,1\}} \sum_{i \in \mathcal{M}} \rho_{x,i,j} \leq 1, \forall j \in \mathcal{N} \quad (1c)$$

$$P_{j1}^d \leq P_{j1,\max}^d, P_{j2}^d \leq P_{j2,\max}^d, \forall j \in \mathcal{N} \quad (1d)$$

$$P_i^c \leq P_{i,\max}^c, \forall i \in \mathcal{M} \quad (1e)$$

$$\zeta_i^c \triangleq \frac{P_i^c \mathbf{g}_{i,b}}{\sigma^2 + \rho_{x,i,j} P_{j1}^d h_{j1,b} + \rho_{x,i,j} P_{j2}^d h_{j2,b}} \geq \zeta_{i,\min}^c, \forall x, i, j \quad (1f)$$

$$\zeta_{j1}^d \triangleq \frac{\rho_{x,i,j} P_{j1}^d \mathbf{g}_{j1}^d}{\sigma^2 + P_i^c h_{j1,i} + \rho_{x,i,j} \eta P_{j1}^d} \geq \zeta_{j1,\min}^d, \forall x, i, j \quad (1g)$$

$$\zeta_{j2}^d \triangleq \frac{\rho_{x,i,j} P_{j2}^d \mathbf{g}_{j2}^d}{\sigma^2 + P_i^c h_{j2,i} + \rho_{x,i,j} \eta P_{j2}^d} \geq \zeta_{j2,\min}^d, \forall x, i, j \quad (1h)$$

其中， ζ_{j1}^d 、 ζ_{j2}^d 和 ζ_i^c 分别为 DU_{j1} 、 DU_{j2} 和 RCU_i 的瞬时信干噪比（SINR, signal-to-interference-plus-noise ratio）， $\zeta_{j1,\min}^d$ 、 $\zeta_{j2,\min}^d$ 和 $\zeta_{i,\min}^c$ 分别为 DU_{j1} 、 DU_{j2} 和 RCU_i 的最小信干噪比要求。 $P_{j1,\max}^d$ 、 $P_{j2,\max}^d$ 和 $P_{i,\max}^c$ 分别为 DU_{j1} 、 DU_{j2} 和 RCU_i 的峰值传输功率。考虑“一对一”的信道复用，约束式(1b)表示一个RCU的

信道资源只能被一个DUP复用进行全双工通信或者半双工通信；约束式(1c)表示一个DUP最多只能复用一个RCU的信道资源。由于无线移动设备都有最大发射功率要求，使用约束式(1d)~式(1e)表示设备的发射功率不能超过对应峰值要求。此外，约束式(1f)~式(1h)表示DU和RCU的信干噪比要求（也即服务质量要求）。显然，由于存在优化变量 $\rho_{x,i,j}$ ，并且式(1)的目标函数并不是线性函数，因此，该无人机网络的吞吐量最大化问题为一个混合整型非线性优化问题，很难直接得出闭式解。第3节将提出相应的算法获得网络的全局最优吞吐量值。

3 基于全双工设备对设备技术的无人机资源分配方案

本节联合接入控制、模式选择、功率控制和资源分配优化对式(1)进行分解，并通过依次使用凸优化的阶段1方法，CCCP迭代算法和KM算法得到式(1)的全局最优解。观察式(1)可以发现，当固定 $\rho_{x,i,j}=1$ （此时 DUP_j 工作在全双工模式），式(1)的约束条件（包括峰值传输功率、最低服务质量限制和信道资源复用限制）可以转换成线性的形式，因此，可以使用凸优化理论的阶段1方法进行可行性检测，首先判断 DUP_j 是否能够工作在全双工模式下接入蜂窝网络，如果可行发射功率为空值，则没有一个可行的功率分配能够满足 DUP_j 复用 RCU_i 的信道资源的条件。此时，继续检测 DUP_j 能否工作在半双工模式，令 P_{j1}^d 或者 P_{j2}^d 为0，且去掉与之对应的最低速率限制，再使用阶段1方法对其可行域进行检测，判断是否为空。如果为空，则可以判定 DUP_j 不能复用 RCU_i 的信道资源接入蜂窝网络；如果非空，则 DUP_j 可以工作在半双工模式下通过复用 RCU_i 的信道资源接入网络，此时，若 DUP_j 两种通信模式都满足接入条件，为了提高传输效率，优先考虑服务质量要求高的传输模式。至此，如果没有任何一个蜂窝用户能够满足 DUP_j 的复用条件， DUP_j 不能接入网络；如果至少有一个蜂窝用户能够满足 DUP_j 的复用条件，称此 DUP_j 为可接入的用户对，并把蜂窝用户加入候选集。根据此方法可以排除不能接入的无人机用户对，从而缩小了变量优化范围，而且最终也能为接入的无人机用户找到合适的通信模式。进一步，对于满足接入条件的 DUP_j 和潜在的复用宿主 RCU_i ，对其发射功率进行优化，

获取到相应的最大的组合吞吐量。最后，原问题可以转化成图论中加权二部图的最大匹配问题。接下来将对式(1)进行分步求解。

3.1 接入控制和模式选择

本节对单个无人机用户对能否接入蜂窝网络进行探究。如果能接入，将对其最优通信模式进行讨论和选择。此外，由于全双工通信模式拥有更高的频谱效益，而且通信双方都具有传输资格，因此在基站的控制下，系统优先考虑无人机的全双工通信模式。当全双工通信模式可行域为空，进行半双工通信模式建模并进行其可行域检测，并根据检测的结果由基站进行通信模式的选择。

3.1.1 全双工通信

考虑 DUP_j 工作在全双工通信模式下 ($\rho_{1,i,j} = 1$)，此时 DUP_j 复用 RCU_i 的信道资源进行同时同频的传输，由于3个用户使用了单条信道进行传输，提高了频谱效益，信道同频干扰也变得复杂，包括 DUP_j 和 RCU_i 之间的相互干扰，无人机用户接收天线端的自干扰。因此，定义 $\zeta_{j1}^{d(f)}$ 、 $\zeta_{j2}^{d(f)}$ 和 $\zeta_i^{c(f)}$ 分别为 DU_{j1} 、 DU_{j2} 和复用蜂窝宿主 RCU_i 在全双工模式下的瞬时信干噪比，其值分别为

$$\begin{cases} \zeta_{j1}^{d(f)} \triangleq \frac{P_{j2}^d g_j^d}{\sigma^2 + P_i^c h_{j1,i} + \eta P_{j1}^d} \\ \zeta_{j2}^{d(f)} \triangleq \frac{P_{j1}^d g_j^d}{\sigma^2 + P_i^c h_{j2,i} + \eta P_{j2}^d} \\ \zeta_i^{c(f)} \triangleq \frac{P_i^c g_{i,b}}{\sigma^2 + P_{j1}^d h_{j1,b} + P_{j2}^d h_{j2,b}} \end{cases} \quad (2)$$

按照系统模型定义，如果 DUP_j 能够复用 RCU_i 的资源工作在全双工模式下，对式(1d)~式(1h)的约束进行化简，可以得到

$$\begin{cases} \zeta_{j1}^{d(f)} \geq \zeta_{j1,\min}^d, \zeta_{j2}^{d(f)} \geq \zeta_{i,j2,\min}^d, \zeta_i^{c(f)} \geq \zeta_{i,\min}^c \\ P_{j1}^d \leq P_{j1,\max}^d, P_{j2}^d \leq P_{j2,\max}^d, P_i^c \leq P_{i,\max}^c \end{cases} \quad (3)$$

此时，需要寻找一个可行功率分配同时满足以上约束。由于使用几何求解不容易进行分析，因此，本文采取文献[44]中的凸优化阶段1方法进行凸可行域的判断。具体地，通过移项并引入辅助变量 s_1 ，构建出如下凸优化问题

$$\max_{P_i^c, P_{j1}^d, P_{j2}^d, s_1} s_1 \quad (4)$$

$$\text{s.t. } f_i(P) \geq s_1, i = 1, 2, \dots, 5, 6$$

其中，

$$\begin{cases} f_1(P) = P_{i,\max}^c - P_i^c \\ f_2(P) = P_{j1,\max}^d - P_{j1}^d \\ f_3(P) = P_{j2,\max}^d - P_{j2}^d \\ f_4(P) = P_i^c g_{i,b} - P_{j1}^d h_{j1,b} \zeta_{i,\min}^c - P_{j2}^d h_{j2,b} \zeta_{i,\min}^c - \sigma_N^2 \zeta_{i,\min}^c \\ f_5(P) = P_{j1}^d g_j^d - P_i^c h_{j2,i} \zeta_{j2,\min}^d - \eta P_{j2}^d \zeta_{j2,\min}^d - \sigma_N^2 \zeta_{j2,\min}^d \\ f_6(P) = P_{j2}^d g_j^d - P_i^c h_{j1,i} \zeta_{j1,\min}^d - \eta P_{j1}^d \zeta_{j1,\min}^d - \sigma_N^2 \zeta_{j1,\min}^d \end{cases} \quad (5)$$

由于式(4)的目标函数为线性函数，并且约束均为线性不等式约束，因此存在着严格的可行初始点 $P^{(0)} = (P_i^{c(0)}, P_{j1}^{d(0)}, P_{j2}^{d(0)}, s^{(0)})$ ，可以通过经典的内点法求解到一个最优解 s_1^* 。至此，本文对 DUP_j 和 RCU_i 工作在全双工模式的情况进行了判定，并且若其可行，则将 RCU_i 加入 DUP_j 的复用候选集合中，通过以上判定可以找到对应的接入功率值 P_1 。

3.1.2 半双工通信

观察不等式约束式(1d)~式(1h)可以发现，基站能够比较容易地为信干噪比要求较低的 DUP_j 找到可复用蜂窝用户，但无人机用户并非总能以全双工通信模式进行通信，例如， DU_{j1} 和 DU_{j2} 相距太远导致距离增益不足以抵消自干扰的影响时，无法满足相应的信干噪比要求，因此，考虑让无人机用户工作在半双工模式下 ($\rho_{0,i,j} = 1$)，此时剔除原问题中因复用资源带来的干扰项和全双工通信带来的自干扰项。当无人机用户工作在半双工通信时，其频谱资源复用方式，以及对应干扰如系统模型图1所示（如实例 DUP_1 和 DUP_2 ）。此时，令 DUP_j 中一个用户的发射功率为0，即复用的信道只用于一个方向的传输，当 $P_{j2}^d = 0$ 时， DU_{j1} 向 DU_{j2} 传输，定义 $\zeta_{j2}^{d(h1)}$ 、 $\zeta_i^{c(h1)}$ 分别为 DU_{j2} 和 RCU_i 的瞬时SINR，可以表示为

$$\begin{cases} \zeta_{j2}^{d(h1)} \triangleq \frac{P_{j1}^d g_j^d}{\sigma^2 + P_i^c h_{j2,i}} \\ \zeta_i^{c(h1)} \triangleq \frac{P_i^c g_{i,b}}{\sigma^2 + P_{j1}^d h_{j1,b}} \end{cases} \quad (6)$$

同理， DU_{j1} 进行半双工通信时，系统需要求解一个功率分配，同时保证 DUP_j 和 RCU_i 的服务质量要求和峰值发射功率限制，式(1d)~式(1h)的约束进一步简化为

$$\begin{cases} \zeta_{j2}^{d(h1)} \geq \zeta_{j2,\min}^d, \zeta_i^{c(h1)} \geq \zeta_{i,\min}^c \\ P_{j1}^d \leq P_{j1,\max}^d, P_i^c \leq P_{i,\max}^c \end{cases} \quad (7)$$

对以上不等式进行转化并引入变量 s_2 ，定义如下凸优化问题

$$\begin{aligned} & \max_{P_i^c, P_{j1}^d, s_2} s_2 & (8) \\ \text{s.t. } & f_i(P) \geq s_2, i = 1, 2, 3, 4 \end{aligned}$$

其中,

$$\begin{cases} f_1(P) = P_{i,\max}^c - P_i^c \\ f_2(P) = P_{j1,\max}^d - P_{j1}^d \\ f_3(P) = P_i^c g_{i,b} - P_{j1}^d h_{j1,b} \zeta_{i,\min}^c - \sigma_N^2 \zeta_{i,\min}^c \\ f_4(P) = P_{j1}^d g_j^d - P_i^c h_{j2,i} \zeta_{j2,\min}^d - \sigma_N^2 \zeta_{j2,\min}^d \end{cases} \quad (9)$$

类似地, 当 $P_{j1}^d = 0$ 时, DU_{j2} 向 DU_{j1} 单向传输时, 定义 $\zeta_{j1}^{d(h2)}$ 、 $\zeta_i^{c(h2)}$ 分别为 DU_{j1} 和 RCU_i 的瞬时信噪比, 且其可以表示为

$$\begin{cases} \zeta_{j1}^{d(h2)} \triangleq \frac{P_{j2}^d g_j^d}{\sigma^2 + P_i^c h_{j1,i}} \\ \zeta_i^{c(h2)} \triangleq \frac{P_i^c g_{i,b}}{\sigma^2 + P_{j2}^d h_{j2,b}} \end{cases} \quad (10)$$

同理, 针对以上不等式, 引入变量 s_3 , 定义如下凸优化问题

$$\begin{aligned} & \max_{P_i^c, P_{j1}^d, s_3} s_3 & (11) \\ \text{s.t. } & f_i(P) \geq s_3, i = 1, 2, 3, 4 \end{aligned}$$

至此, 利用内点法同时对优化式(8)和式(11)进行求解, 若对应的约束能够满足, 可以获得其最优值和对应的非空初始发射功率。具体地, 定义最优值分别为 \bar{s}_2^* 、 \bar{s}_3^* , 如果 $\bar{s}_2^* \geq 0$, 则存在功率分配 $P_2 \neq \emptyset$; 如果 $\bar{s}_3^* \geq 0$, 则存在功率分配 $P_3 \neq \emptyset$; 若 $\bar{s}_2^* < 0$ 且 $\bar{s}_3^* < 0$, 以上两种情况均不存在可行功率分配, 半双工通信的条件也不可达, 因此 DUP_j 不接入蜂窝网络。观察发现如果 $\bar{s}_1^* \geq 0$, 则 \bar{s}_2^* 和 \bar{s}_3^* 均大于零, 即全双工通信可行的情况下, 半双工通信可行, 反之则不然, 因此半双工通信模式可以保障无人机的接入。

3.2 功率控制

本节将对能够接入的无人机用户和对应的复用蜂窝用户的功率控制进行探究, 以进一步获取最大的吞吐量。当 DUP_j 工作在全双工模式下, 定义 DUP_j 和 RCU_i 的总吞吐量为 $T_{ij}^{(f)}$, 并且有 $\{T_{ij}^{(f)} = W [\text{lb}(1 + \zeta_i^{c(f)}) + \text{lb}(1 + \zeta_{j1}^{d(f)}) + \text{lb}(1 + \zeta_{j2}^{d(f)})]\}/M$, 此时, 全双工通信最优功率控制问题可以表示为

$$\max_{P_i^c, P_{j1}^d, P_{j2}^d} T_{ij}^{(f)} \quad (12)$$

s.t. 式(1d)~式(1h)

接下来, 使用文献[46]的CCCP迭代算法对式(5a)进行迭代求解, 可以得出全双工最大吞吐量为

$T_{ij}^{(f)}$ 。具体地, 化简 $T_{ij}^{(f)}$ 进行转换, 可以得到

$$T_{ij}^{(f)} = f_{\text{cave}}(P) + f_{\text{vex}}(P) \quad (13)$$

其中,

$$f_{\text{cave}}(P) = \text{lb}(P_c g_{c,b} + \sigma^2 + P_{d1} h_{d1,b} + P_{d2} h_{d2,b}) + \text{lb}(P_{d2} g_d + \sigma^2 + P_c h_{c,d1} + \eta P_{d1}) + \text{lb}(P_{d1} g_d + \sigma^2 + P_c h_{c,d2} + \eta P_{d2}) \quad (14)$$

$$f_{\text{vex}}(P) = -\{\text{lb}(\sigma^2 + P_{d1} h_{d1,b} + P_{d2} h_{d2,b}) + \text{lb}(\sigma^2 + P_c h_{c,d1} + \eta P_{d1}) + \text{lb}(\sigma^2 + P_c h_{c,d2} + \eta P_{d2})\} \quad (15)$$

类似地, 当 DUP_j 和 RCU_i 工作在半双工模式下时, 也可以使用CCCP迭代算法对目标函数进行化简和计算。根据接入控制分析, 若 $\bar{s}_2^* \geq 0$, DU_{j1} 进行传输, 此时定义 $T_{ij}^{(h1)}$ 为 DU_{j2} 和 RCU_i 的总吞吐量和, $T_{ij}^{(h1)} = \{W [\text{lb}(1 + \zeta_i^{c(h1)}) + \text{lb}(1 + \zeta_{j2}^{d(h1)})]\}/M$, 对应的功率控制和吞吐量最大化凸优化模型为

$$\max_{P_i^c, P_{j1}^d} T_{ij}^{(h1)} \quad (16)$$

s.t. 式(1d)~式(1h)

通过求解式(16), 可以得到其最优吞吐量 $T_{ij}^{(h1)*}$ 。同理, 若 $\bar{s}_3^* \geq 0$, DU_{j2} 进行传输, 定义 $T_{ij}^{(h2)}$ 为 DU_{j1} 和 RCU_i 的总吞吐量和, $T_{ij}^{(h2)} = \{W [\text{lb}(1 + \zeta_i^{c(h2)}) + \text{lb}(1 + \zeta_{j1}^{d(h2)})]\}/M$, 对应的功率控制和吞吐量最大化凸优化模型为

$$\max_{P_i^c, P_{j2}^d} T_{ij}^{(h2)} \quad (17)$$

s.t. 式(1d)~式(1h)

通过求解式(17), 可以得到最大吞吐量 $T_{ij}^{(h2)*}$ 。在半双工通信模式中, 若 DU_{j1} 和 DU_{j2} 都可以进行接入, 可以通过以下计算式得到半双工模式的最优吞吐量

$$T_{ij}^{(h)} = \begin{cases} T_{ij}^{(h1)*}, \text{SINR}_{j1} \geq \text{SINR}_{j2} \\ T_{ij}^{(h2)*}, \text{SINR}_{j1} < \text{SINR}_{j2} \end{cases} \quad (18)$$

最后, 定义 T_{ij}^* 为 DUP_j 和 RCU_i 的最优通信模式下的最优吞吐量, T_{ij}^* 的值为

$$T_{ij}^* = \begin{cases} T_{ij}^{(f)*}, \bar{s}_1^* \geq 0 \\ T_{ij}^{(h)*}, (\bar{s}_1^* < 0) \& (\bar{s}_2^* \geq 0 \parallel \bar{s}_3^* \geq 0) \\ 0, \text{其他} \end{cases} \quad (19)$$

3.3 信道资源分配

以上的接入控制/功率控制已经对不可接入的无人机用户对进行排除, 对可行的无人机用户加入可接入集合中, 若同时存在两种可行通信模式时, 为无人机用户对选择了一种通信模式。在功率控制步骤中, 对于所有能接入的无人机用户和相应的蜂

窝用户进行了最优功率分配，并且得到了对应的最优吞吐量和，当 DUP_j 可以复用的地面蜂窝用户频谱资源多于一个时，根据式(1)的频谱资源复用约束条件，需要为 DUP_j 寻找一个最优频谱资源。因此，原问题转换为在所有候选的频谱资源中寻找最优的可复用频谱资源。

当 DUP_j 复用蜂窝用户频谱资源时，其最优的配对蜂窝用户 i^* 可以通过式(20)求得

$$i^* = \arg \max_{i \in \mathcal{R}_j} T_{i,j}^* \quad (20)$$

至此已经获得了单个 DUP_j 的最优信道复用宿主 RCU_i 。当存在多对无人机用户时，问题将变得十分复杂，无法通过式(20)进行求解，其原因在于系统中存在着多对无人机用户抢占相同的蜂窝用户频谱资源的现象。可以发现，当存在多对无人机用户时，式(1)可以简化为加权最大匹配问题，其可以描述为

$$\max_{\rho_{i,j}} \sum_{i \in \mathcal{R}_j, j \in \mathcal{D}} \rho_{i,j} T_{i,j}^* \quad (21)$$

$$\text{s.t.} \sum_{j \in \mathcal{D}} \rho_{i,j} \leq 1, \forall i \in \mathcal{R}_j \quad (21a)$$

$$\sum_{i \in \mathcal{R}_j} \rho_{i,j} \leq 1, \forall j \in \mathcal{D} \quad (21b)$$

$$\rho_{i,j} \in \{0,1\} \quad (21c)$$

其中， \mathcal{D} 为可接入的 DUP 集合， \mathcal{R}_j 为 DUP_j 的可复用 RCU 候选集合， $\rho_{i,j}$ 为经过化简后的信道资源分配指示变量。复用收益二部图如图2所示，集合 \mathcal{D} 和集合 \mathcal{R}_j 为两个独立的顶点集合，代表着同类用户之间不进行频谱资源的复用，并且当 DUP_j 和 RCU_i 存在复用关系时，在图2中表示为顶点 i 和 j 通过边 ij 进行连接，也即二部图的权值，其值为 $T_{i,j}^*$ ，借助文献[46]中指派问题的KM算法，很容易得出式(21)的最优分配和吞吐量值。

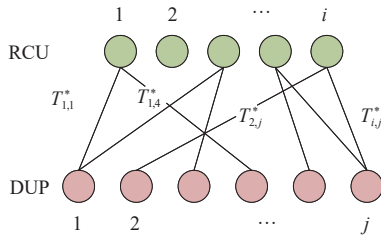


图2 复用收益二部图

基于全双工设备对设备技术的最优资源分配算法见算法1。

算法1 基于全双工设备对设备技术的最优资源分配算法

输入 蜂窝用户集合 \mathcal{M} 、无人机用户对集合 \mathcal{N} 、 DUP_j 的复用蜂窝用户候选集合 \mathcal{R}_j

步骤1:

for all $j \in \mathcal{N}$ **and** $i \in \mathcal{M}$ **do**

构造全双工可行性检测优化问题并计算 S_1 ;

← 凸优化^[44]中的阶段1算法

if $S_1^* \geq 0$ **then**

$i \in \mathcal{R}_j$, 继续判定下一个 DUP ;

else if $\text{SINR}_{j1} \geq \text{SINR}_{j2}$ **then**

令 $P_{j1} = 0$, 构造半双工可行性检测优化问题并计算 S_2 ;

if $S_2^* \geq 0$ **then**

$i \in \mathcal{R}_j$;

end if

else {令 $P_{j2} = 0$, 构造半双工可行性检测优化问题并计算 S_3 }

if $S_3^* \geq 0$ **then**

$i \in \mathcal{R}_j$;

end if

end if

end for

if $\mathcal{R}_j = \emptyset$ **then**

$N = N - j$, 删除不可接入无人机用户;

end if

步骤2:

for all $j \in \mathcal{N}$ **and** $i \in \mathcal{R}_j$ **do**

计算最优功率分配和对应的最优总吞吐量和 $T_{i,j}^*$;

← 文献[45]的凸凹过程算法

end for

步骤3:

if then

$i^* = \arg \max_{i \in \mathcal{R}_j} T_{i,j}^*$; ← 只有一个 DUP 可以接入

else

通过式(11)获取 i^* ; ← 文献[46]的库恩-芒克斯算法

end if

4 仿真测试

本节使用MATLAB仿真建立系统模型并比较3

种接入方案性能参数，包括本文提出的接入控制和模式选择方案，仅配备了全双工通信模式和仅配备了半双工通信方案。此外，假设地面蜂窝用户随机分布在水平地面上，其坐标表示为 $(x_c, y_c, 0)$ ，无人机用户随机分布在近地空中，距离水平面的高度为 H ，其坐标表示为 $(x_d, y_d, 0)$ 。采用文献[47]中的AtG信道参数作为郊区信道参数，其具体数值为(21, 0.1, 3.511, 0.352 1)，仿真参数见表2。本文主要对比了两个参考量，接入率（接入蜂窝的无人机用户数量与总的无人机数量的比率）以及总吞吐量（接入无人机用户和地面蜂窝用户的吞吐量总和）。

表2 仿真参数

名称	取值
蜂窝小区覆盖半径 R	400 m
DU的距离 d	20~120 m
DU的高度 H	80 m
基站天线高度 h_b	15 m
带宽 W	5 MHz
光速 c	3.0×10^8 m/s
载波中心频率 f	2.0×10^9 Hz
多径衰落系数 μ	1 dB
阴影效应系数 λ	8 dB
RCU最小信噪比要求 $\zeta_{c,\min}$	0~20 dB
DU最小信噪比要求 $\zeta_{d,\min}$	0~20 dB
RCU最大发射功率 $P_{c,\max}$	21 dBm, 24 dBm
DU最大发射功率 $P_{d,\max}$	21 dBm
RCU数目 M	10, 20
DUP数目 N	M 的10%~100%
剩余自干扰系数 η	-120 dB
噪声功率 σ^2	-114 dBm

$H=80$ m, $\eta=-120$ dB时，总吞吐量和系统接入率与无人机间距离的关系如图3所示，可以看出，随着DU之间的距离从20 m增加到120 m，DU的接入率和系统的总体吞吐量都逐渐降低，原因在于随着DU之间距离的增加，DU之间的信道增益逐渐减少。还可以看出，当DU进行全双工通信时，其性能下降比半双工通信下降快，包括DU接入率和总吞吐量。此外，随着RCU的信噪比要求的提高，DU接入率和吞吐量减少，因为此时RCU处于低速率需求的情况，可以容忍更多的干扰，因此接入更多的用户。再者，提出的模式选择方案不管在接入DU数量上还是总吞吐量上，表现都比只进行全双工通信和只进行半双工通信的方案优，因为模式选择方案为DU提供了更好的通信自由度。

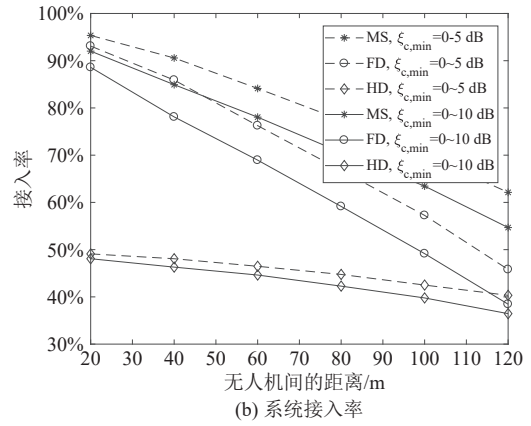
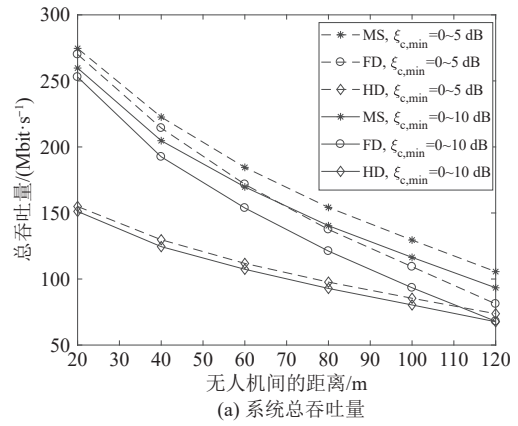
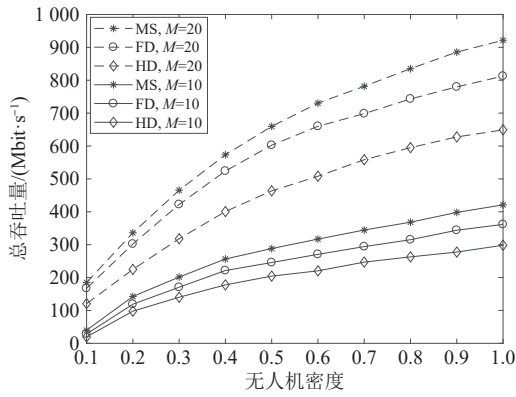


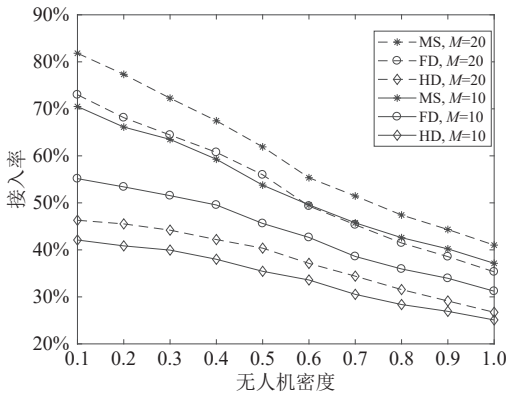
图3 $H=80$ m, $\eta=-120$ dB时，总吞吐量和系统接入率与无人机间距离的关系

$H=80$ m, $\eta=-120$ dB时，总吞吐量和系统接入率与无人机密度(N/M)的关系如图4所示，此时 $d=60$ m。通过仿真结果可以得出，当固定RCU数目不变时，随着DUP密度的增加，总吞吐量先迅速增加，当DUP的密度达到RCU的50%时，随后缓慢增加，原因在于虽然DU的复用接入可以带来额外的系统容量，但是蜂窝网络会趋于饱和，也即蜂窝网络能容忍的干扰存在着一定的极限，蜂窝饱和的情况下多用户增益只能提供少量的吞吐量提升；相反，DU接入率则随之递减。从图4中也可以看出，若蜂窝网络中RCU的数量增加，则吞吐量和DU接入率也随之增加，原因在于更多的RCU给DU的选择带来了更宽的信道资源配对范围。

为了探究不完美自干扰消除对系统性能的影响， $H=80$ m, $\eta=-120$ dB时，总吞吐量和系统接入率与RSI的关系如图5所示。为了公平比较，令 $d=60$ m, $M=10$, $N=2$ 。可以看出，随着RSI的增加，在全双工模式中，DU的接入率和吞吐量逐渐降低，原因在于自干扰会对全双工通信中的有用信号带来严



(a) 系统总吞吐量



(b) 系统接入率

图4 $H=80\text{ m}$, $\eta=-120\text{ dB}$ 时,总吞吐量和系统接入率与无人机组数的关系

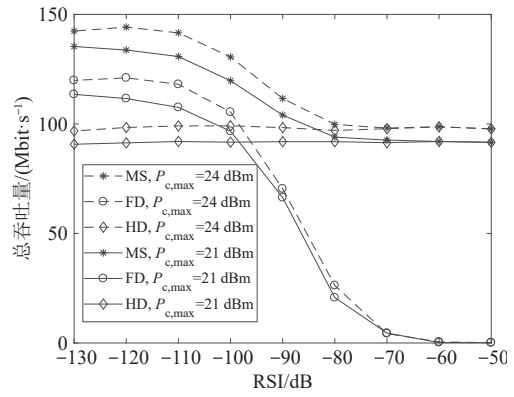
重的淹没效应；而半双工模式下，系统的性能表现则不随着RSI值的变化而变化，处于平衡状态，因此可以为模式选择方案提供保障。还可以看出，RCU峰值传输功率的增加使得优化变量的可行域变宽，可行功率方案增加，因此其系统的性能表现较好。

5 结束语

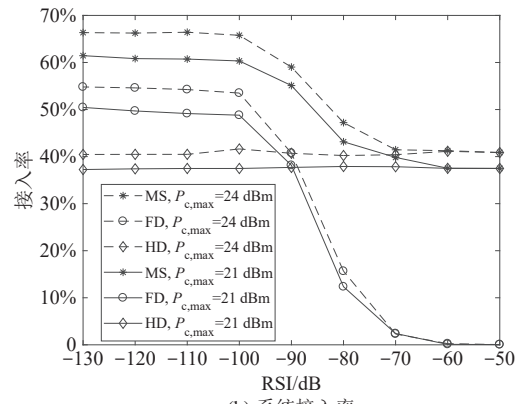
本文研究了一个基于全双工和半双工设备对设备技术的无人机网络与蜂窝网络共存的场景。在保证无人机用户和蜂窝用户服务质量要求的情况下，本文构建了一个吞吐量最大化的数学模型。此外，本文提出了一个联合接入控制、模式选择、功率控制和信道资源分配的策略来解决吞吐量最大化的问题。仿真分析验证了提出的模式选择策略在吞吐量和无人机的接入率方面，相比半双工通信模式，具有明显的提升。

参考文献：

[1] LI B, FEI Z S, ZHANG Y. UAV communications for 5G and be-



(a) 系统总吞吐量



(b) 系统接入率

图5 $H=80\text{ m}$, $\eta=-120\text{ dB}$ 时,总吞吐量和系统接入率与RSI的关系

yond: recent advances and future trends[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(2): 2241-2263.

[2] ZENG Y, LYU J B, ZHANG R. Cellular-connected UAV: potential, challenges, and promising technologies[J]. IEEE Wireless Communications, 2019, 26(1): 120-127.

[3] ULLAH Z, AL-TURJMAN F, MOSTARDA L. Cognition in UAV-aided 5G and beyond communications: a survey[J]. IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, 2020, 6(3): 872-891.

[4] FENG D Q, LAI L F, LUO J J, et al. Ultra-reliable and low-latency communications: applications, opportunities and challenges[J]. Science China Information Sciences, 2021, 64(2): 1-12.

[5] WU H C, WEI Z Q, HOU Y Z, et al. Cell-edge user offloading via flying UAV in non-uniform heterogeneous cellular networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2020, 19(4): 2411-2426.

[6] ZHOU H, WANG Z N, MIN G Y, et al. UAV-aided computation offloading in mobile-edge computing networks: a stackelberg game approach[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2023, 10(8): 6622-6633.

[7] 曾耀平, 夏玉婷, 江伟伟, 等. 加权能耗最小化的无人机辅助移动边缘计算策略研究[J]. 计算机工程, 2023: 1-11.

ZENG Y P, XIA Y T, JIANG W W, et al. UAV-assisted mobile edge computing strategy for weighted energy minimization[J].

- Computer Engineering, 2023:1-11.
- [8] ZHANG Q Q, MOZAFFARI M, SAAD W, et al. Machine learning for predictive on-demand deployment of uavs for wireless communications[C]//Proceedings of 2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-6.
- [9] TANG H Y, WU Q Q, LI B Q. An efficient solution for joint power and trajectory optimization in UAV-enabled wireless network[J]. IEEE Access, 2019, 7: 59640-59652.
- [10] BITHAS P S, NIKOLAIDIS V, KANATAS A G, et al. UAV-to-ground communications: channel modeling and UAV selection[J]. IEEE Transactions on Communications, 2020, 68(8): 5135-5144.
- [11] YE J, ZHANG C, LEI H J, et al. Secure UAV-to-UAV systems with spatially random UAVs[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2019, 8(2): 564-567.
- [12] 吕鑫, 黎海涛, 黄嘉伟. 软件定义UAV网络的自适应QoS机制研究[J]. 中国电子科学研究院学报, 2023, 18(8): 717-723.
- LYU X, LI H T, HUANG J W. Research on adaptive QoS mechanism for software defined UAV network[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2023, 18(8): 717-723.
- [13] LIN X H, SU G C, CHEN B, et al. Striking a balance between system throughput and energy efficiency for UAV-IoT systems[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(6): 10519-10533.
- [14] ABD-ELMAGID M A, DHILLON H S. Average peak age-of-information minimization in UAV-assisted IoT networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(2): 2003-2008.
- [15] ZHENG C J, FENG D Q, ZHANG S L, et al. Energy efficient V2X-enabled communications in cellular networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(1): 554-564.
- [16] HU X Y, WONG K K, YANG K, et al. UAV-assisted relaying and edge computing: scheduling and trajectory optimization[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2019, 18(10): 4738-4752.
- [17] LI J, YI C Y, CHEN J Y, et al. Joint trajectory planning, application placement, and energy renewal for UAV-assisted MEC: a triple-learner-based approach[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2023, 10(15): 13622-13636.
- [18] CHEN X Y, ZHAO N, CHANG Z, et al. UAV-aided secure short-packet data collection and transmission[J]. IEEE Transactions on Communications, 2023, 71(4): 2475-2486.
- [19] HAMMAMI M, CHAIEB C, AJIB W, et al. UAV-assisted wireless networks for stringent applications: resource allocation and positioning[C]//Proceedings of 2023 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). Piscataway: IEEE Press, 2023: 1-6.
- [20] 唐菁敏, 黄嘉琪, 王炳文, 等. 基于用户调度的多无人机辅助通信系统资源优化[J]. 北京航空航天大学学报, 2023: 1-15.
- TANG J M, HUANG J Q, WANG B W, et al. Joint optimization scheme of trajectories and resources allocation for UAV aided communication[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2023:1-15.
- [21] ARAFAT M Y, MOH S. Routing protocols for unmanned aerial vehicle networks: a survey[J]. IEEE Access, 2019, 7: 99694-99720.
- [22] MOZAFFARI M, SAAD W, BENNIS M, et al. A tutorial on UAVs for wireless networks: applications, challenges, and open problems[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2019, 21(3): 2334-2360.
- [23] DAI M H, HUANG N, WU Y, et al. Unmanned-aerial-vehicle-assisted wireless networks: advancements, challenges, and solutions[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2023, 10(5): 4117-4147.
- [24] HAYAT S, YANMAZ E, MUZAFFAR R. Survey on unmanned aerial vehicle networks for civil applications: a communications viewpoint[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016, 18(4): 2624-2661.
- [25] FENG D Q, LU L, YI Y W, et al. Device-to-device communications underlying cellular networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2013, 61(8): 3541-3551.
- [26] FENG D Q, LU L, YI Y W, et al. Device-to-device communications in cellular networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(4): 49-55.
- [27] HUANG W H, YANG Z H, PAN C H, et al. Joint power, altitude, location and bandwidth optimization for UAV with underlaid D2D communications[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2018, 8(2): 524-527.
- [28] ZHANG T K, WANG Y, YI W Q, et al. Joint optimization of caching placement and trajectory for UAV-D2D networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2022, 70(8): 5514-5527.
- [29] MONEMI M, TABASSUM H. Performance of UAV-assisted D2D networks in the finite block-length regime[J]. IEEE Transactions on Communications, 2020, 68(11): 7270-7285.
- [30] SHANG B D, LIU L J, RAO R M, et al. 3D spectrum sharing for hybrid D2D and UAV networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2020, 68(9): 5375-5389.
- [31] CHEN P X, ZHOU X, ZHAO J, et al. Energy-efficient resource allocation for secure D2D communications underlying UAV-enabled networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2022, 71(7): 7519-7531.
- [32] YIN C, YANG H L, XIAO P, et al. Resource allocation for UAV-assisted wireless powered D2D networks with flying and ground eavesdropping[J]. IEEE Communications Letters, 2023, 27(8): 2103-2107.
- [33] 丁徐飞, 田文, 刘光杰, 等. 基于D2D通信系统的无人机辅助物联网保密通信频谱共享方法[J]. 无线电工程, 2023:1-9.
- DING X F, TIAN W, LIU G J, et al. Spectrum sharing planning of UAV-assisted secrecy communication with D2D communication systems in IoT[J]. Radio Engineering, 2023:1-9.
- [34] LIU G, CHEN X H, DING Z G, et al. Hybrid half-duplex/full-duplex cooperative non-orthogonal multiple access with transmit power adaptation[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2018, 17(1): 506-519.

- [35] SHAHAB M B, SHIN S Y. Time shared half/full-duplex cooperative NOMA with clustered cell edge users[J]. IEEE Communications Letters, 2018, 22(9): 1794-1797.
- [36] LI B, ZHAO S J, ZHANG R Q, et al. Full-duplex UAV relaying for multiple user pairs[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(6): 4657-4667.
- [37] DUO B, WU Q Q, YUAN X J, et al. Energy efficiency maximization for full-duplex UAV secrecy communication[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(4): 4590-4595.
- [38] SONG Q H, ZHENG F C, ZENG Y, et al. Joint beamforming and power allocation for UAV-enabled full-duplex relay[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(2): 1657-1671.
- [39] ZHU L P, ZHANG J, XIAO Z Y, et al. Millimeter-wave full-duplex UAV relay: joint positioning, beamforming, and power control[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2020, 38(9): 2057-2073.
- [40] MA Y H, NIU Y, HAN Z, et al. Robust transmission scheduling for UAV-assisted millimeter-wave train-ground communication system[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2022, 71(11): 11741-11755.
- [41] 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.
- [42] 周理辉, 肖霖, 吴法辉, 等. 无人机全双工双向中继的资源及轨迹优化设计[J]. 北京邮电大学学报, 2023, 46(1): 77-83.
ZHOU L H, XIAO L, WU F H, et al. Resource and trajectory optimal design for unmanned aerial vehicles full duplex two-way relay[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2023, 46(1): 77-83.
- [43] FENG D Q, JIANG W, QIAN G B, et al. Mode selection and power allocation for UAV-assisted cellular networks[C]//Proceedings of 2021 13th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP). Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-5.
- [44] BOYD S P, VANDENBERGHE L. Convex optimization[M]. Cambridge, UK: Cambridge, 2004.
- [45] Yuille A L, Rangarajan A. The concave-convex procedure (CCCP) [P]. Advances in Neural Information Processing Systems, 2001: 1033-1040.
- [46] WEST D B. Introduction to graph theory[M]. 2nd ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2001.
- [47] AL-HOURANI A, KANDEEPAN S, LARDNER S. Optimal LAP altitude for maximum coverage[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2014, 3(6): 569-572.

[作者简介]



冯大权(1986-), 男, 博士, 深圳大学电子与信息工程学院副教授, 主要研究方向为超可靠低时延通信、移动边缘计算和大规模物联网等。



郑灿健(1992-), 男, 哈尔滨工业大学(深圳)电子与信息工程学院博士生, 主要研究方向为超可靠低时延通信、短包通信、超密集网络等。



孔祥琦(1995-), 女, 国家无线电监测中心检测中心工程师, 主要研究方向为无线电设备检测、无线电频谱管理等。