

非授权频段下无人机辅助通信的轨迹与资源分配优化

潘钰^① 胡航^② 金虎^① 雷迎科^① 冯辉^① 姜丽^{*①} 张孟伯^①

^①(国防科技大学电子对抗学院 合肥 230031)

^②(空军工程大学信息与导航学院 西安 710082)

摘要: 为解决无人机(UAV)在非授权频段下频谱资源受限的瓶颈问题,针对城市环境中UAV辅助监测的通信网络,该文提出一种下垫式(Underlay)接入机制下的高谱效联合优化方案。基于UAV的高机动性将空地信道建模为概率性视距(LoS)信道,考虑同信道干扰和UAV最大速度约束建立联合功率分配-轨迹规划的混合资源优化模型,在主用户占用频谱情况下使UAV在给定任务时间内实现监测数据的快速传输。原始问题为NP-hard的混合整数非凸问题,首先将其解耦为双层规划问题,采用松弛变量和逐次凸逼近(SCA)技术将轨迹问题转换为凸规划问题后实现有效求解。仿真验证了所提联合优化方案相比改进粒子群优化(PSO)方案能够提升最高约19%的频谱效率,且对于维度较高的轨迹规划问题,所提基于SCA的算法具有更低的算法复杂度和更快的收敛性。

关键词: 无人机通信; 频谱共享; 轨迹规划; 凸优化

中图分类号: TN915

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2024)11-4287-08

DOI: 10.11999/JEIT240275

Trajectory and Resource Allocation Optimization for Unmanned Aerial Vehicles Assisted Communications in Unlicensed Bands

PAN Yu^① HU Hang^② JIN Hu^① LEI Yingke^① FENG Hui^① JIANG Li^①
ZHANG Mengbo^①

^①(School of Electronic Countermeasures, National University of Defense Technology, Hefei 230031, China)

^②(Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710082, China)

Abstract: To solve the bottleneck problem of constrained spectrum resource for Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) in unlicensed bands, a co-optimization scheme high spectral efficiency in underlay mechanism is proposed for UAV-assisted monitoring communication networks in urban environment. Considering the high maneuverability of UAVs, the air-to-ground channel is modeled as a probabilistic Line-of-Sight (LoS) channel, and the co-channel interference and maximum speed constraints are adopted to formulate a hybrid resource optimization model for power allocation and trajectory planning, enabling UAVs to construct the fast transmission scheme for monitoring data with occupied spectrum within the given time. The original problem is an NP-hard and non-convex integer problem, which is first decomposed into a two-layer programming problem, and then solved by applying the slack variable and Successive Convex Approximation (SCA) technologies to transform the trajectory design problem into a convex programming problem. Compared with the Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm, the proposed joint optimization scheme is verified to improve the spectral efficiency by up to about 19% in simulations. For high-dimensional trajectory planning problems, the SCA-based algorithm is proved to have lower complexity and faster convergence.

Key words: Unmanned Aerial Vehicle (UAV) communication; Spectrum sharing; Trajectory planning; Convex optimization

收稿日期: 2024-04-15; 改回日期: 2024-08-30; 网络出版: 2024-09-09

*通信作者: 姜丽 jiangli17@nudt.edu.cn

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划(2024JC-YBMS-514)

Foundation Item: Shaanxi Province Natural Science Basic Research Program (2024JC-YBMS-514)

1 引言

近年来,构建“空地海”一体化信息网络已成为实现6G愿景的关键一环,我国政府在“十四五”规划和“2035远景目标”中也明确提出需“建设高速泛在、天地一体、集成互联、安全高效的信息基础设施”,积极引导空地一体化网络的技术研究和产业发展。无人机(unmanned aerial vehicle, UAV)依托其轻量化、多功能和高机动等优势,一直是连接天基网和陆基蜂窝网的重要枢纽。UAV辅助的通信网络能够根据具体需求动态调整多节点间的协作和接入技术,以提供更加广域、精细化的组网服务。尽管UAV为传统通信网络的发展提供了诸多优势与机遇,但也将带来一系列严峻的技术挑战。随着机载传感器分辨率越来越高,骨干网络中UAV的任务数据正迅速增长。当前UAV的授权频段仅存在于840.5~845 MHz和1 430~1 444 MHz频段,此外其只能工作于2.4 GHz和5.7 GHz等ISM(Industrial Scientific Medical)非授权频段,非授权频段下UAV不能对其他合法无线电业务造成干扰,更不能寻求无线电干扰保护。

受限于当前频谱资源的稀缺性^[1]和静态的频谱管理方式,UAV将面临接入难度大、传输速率受限和通信时延高等多种难题。将认知无线电(Cognitive Radio, CR)技术应用于UAV通信网络是缓解这一问题的手段之一,该技术还能够有效融合通信感知一体化^[2]和非正交多址接入^[3,4]等技术,从而进一步提升频谱利用率。按用户接入方式的不同可将CR划分为3种频谱共享机制^[5],即机会性频谱接入(Opportunistic Spectrum Access, OSA)机制、下垫式(Underlay)机制和覆盖式(Overlay)机制。CR技术要求UAV能够快速适应由移动性产生的频谱变化和干扰,并针对相应场景设计合理的频谱接入策略和动态轨迹。目前相关研究主要集中于物理层^[6]、介质访问控制层、网络层和传输层的设计,其中针对信道建模、天线设计、感知阈值和资源配置等问题均有大量研究。

相较于OSA机制下针对频谱感知能力的大量研究,Underlay机制下的设计重点是UAV的功率控制:文献^[7]在满足多个地面用户的吞吐量需求下,通过对能量收集时隙和发射功率的联合设计使UAV的平均能量效率最大化。文献^[8]结合匈牙利算法和深度Q网络得到链路配对和功率控制的优化方案,以最大化UAV辅助的车联网系统的能量效率。上述方案主要集中于功率控制与用户配对的联合优化,尚未考虑UAV的轨迹规划问题,并且Underlay机制下的飞行轨迹需着重考虑对主网络的干

扰问题,故传统的轨迹规划方案并不适用。针对这一问题,文献^[9]初步研究了UAV作为空中接入节点时的最佳位置部署,采用拟凸策略解决了非凸的端到端能效优化问题。在此基础上,文献^[10]在移动边缘计算网络中研究了UAV轨迹规划和资源分配的联合优化方案,然而,该文献针对的是UAV的能耗问题,并未考虑多个参数对于信道增益及频谱效率的影响,并且其将通信链路仅建模为简单的视距(Line-of-Sight, LoS)链路。综上所述,在高建筑密度的城市环境中进一步挖掘时/频/空等多域潜能,基于Underlay机制研究无人机通信网络多域资源的协同优化问题仍具有重大意义。

本文研究工作的创新性如下:(1)采用了更为实际的空地信道模型,根据不同仰角下LoS链路的存在概率,精准设计飞行轨迹与通信资源分配;(2)在PR位置未知的情况下,将谱效最大化问题解耦为两个子问题,引入松弛变量和逐次凸逼近(Successive Convex Approximation, SCA)技术将轨迹优化问题转换为凸规划问题,得到具有通用性的最优轨迹高效求解算法;(3)仿真结果表明所提基于SCA算法的优化方案的复杂度和稳定性均优于基于改进PSO算法的优化方案,且大幅优于其他基准方案。

2 系统模型

构建如图1所示系统模型,城市环境中UAV作为监测器沿规划轨迹飞行,并在飞行过程中将监测数据以特定时间间隔回传给地面无线用户(Wireless Device, WD)。主网络由一个主发射机(Primary Transmitter, PT)和 K 个主接收机(Primary Receiver, PR)构成,分别以 P 和 $R_k(k \in \mathcal{K} = \{1, 2, \dots, K\})$ 表示,其中PR分布未知。次级网络由单架UAV作为次级发射机(Secondary Transmitter, ST)和 M 个

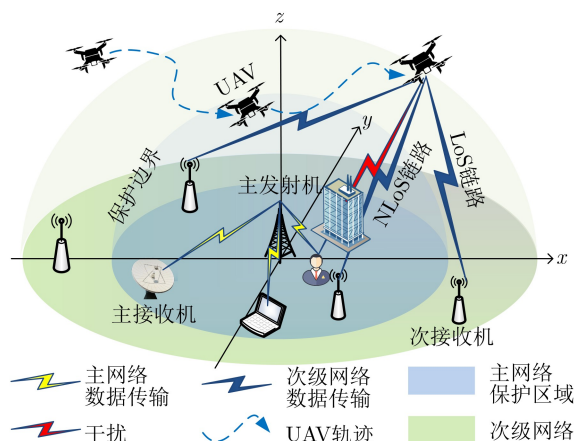


图1 城市环境下基于Underlay机制的UAV通信网络模型

WD作为次级接收机(Secondary Receiver, SR)组成, 分别以 S 和 $G_m(m \in \mathcal{M} = \{1, 2, \dots, M\})$ 表示。UAV配备全球定位系统以实时更新其位置动态, 并基于时分多址接入协议向WD传输信息。次级网络采用Underlay的频谱接入模式, 即UAV通过功率控制保证PR的用户服务质量(Quality of Service, QoS)。该场景下, UAV作为ST需在有限时间内快速完成监测任务并传回数据, 同时最大限度降低对主网络的干扰。因此, 该频谱共享方案的目标是在给定任务时间内完成起点至终点的地面监测及报告, 并在飞行速度和主网络掉线约束条件下实现次级网络频谱效率的最大化。

用 $\mathbf{G} = \{\mathbf{g}_1, \mathbf{g}_2, \dots, \mathbf{g}_M\}$ 表示地面WD的位置, 其中 $\mathbf{g}_m \in \mathbb{R}^{2 \times 1}$ 。UAV飞行高度为 h , 任务总时长 T_{tot} 被划分为 N 个时隙, 每个时隙时长为 T_s 。在第 n 个时隙UAV投影到水平面的位置用 $\mathbf{q}[n] \in \mathbb{R}^{2 \times 1}$ 表示, 其中 $n \in \mathcal{N} = \{1, 2, \dots, N\}$, 则UAV到第 m 个WD的距离为 $d_{\text{SG}}^m[n] = \sqrt{\|\mathbf{q}[n] - \mathbf{g}_m\|^2 + h^2}$ 。为更符合实际场景, 综合考虑地地信道和地空信道, 将随机阴影衰落建模为概率性LoS链路模型。节点 u 与 v 之间的信道增益表示为^[11]

$$\left. \begin{aligned} h_{uv}^L &= \sqrt{\beta_0 d_{uv}^{-\alpha_L} \tilde{g}_{uv}} \\ h_{uv}^N &= \sqrt{\mu \beta_0 d_{uv}^{-\alpha_N} \tilde{g}_{uv}} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中, h_{uv}^L 和 h_{uv}^N 分别表示LoS和非视距(non-LoS, NLoS)链路下的信道增益, $2 \leq \alpha_L < \alpha_N \leq 6$ 则为两种链路下的平均路径损耗指数。 β_0 表示单位距离下的路径损耗, μ 表示NLoS链路下的额外衰减因子, d_{uv} 表示节点 u 与 v 之间的距离。 \tilde{g}_{uv} 表示归一化的小尺度衰落, 且 $\mathbb{E}[\tilde{g}_{uv}^2] = 1$ 。时隙 n 中第 m 个WD与UAV之间为LoS信道的概率为 $p_m^{\text{LoS}}[n]$, 该概率通常取决于传播环境和节点与UAV间的仰角, 具体表示为^[12]

$$p_m^{\text{LoS}}[n] = \frac{1}{1 + a \exp[-\beta(\theta_m[n] - a)]} \quad (2)$$

其中, a 和 β 由传播环境确定, 仰角(以度为单位)可表示为 $\theta_m[n] = 180 \arctan(h/\|\mathbf{q}[n] - \mathbf{g}_m\|)/\pi$ 。令 $\lambda_m[n] \in \{0, 1\}$ 表示时隙 n 中UAV与地面用户间的接入策略, 即 $\lambda_m[n] = 1$ 表示UAV接入第 m 个WD进行通信, 否则 $\lambda_m[n] = 0$ 。由于UAV在时分多址协议下向WD传输信息, 因此有

$$\sum_{m=1}^M \lambda_m[n] \leq 1, \quad \forall n \in \mathcal{N} \quad (3)$$

PT的发射功率由 P_P 表示, PR处的接收功率为 $P_P |h_{\text{PR}}^N|^2$ 。考虑到PR位置的不确定性, 本文定义

保护边界 L_{max} 以确保主网络的QoS不受影响。 L_{max} 由PR的信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR)门限决定, 具体计算为 $P_P |h_{\text{PR}}^N|^2 / \sigma^2 \geq \gamma^{\text{th}}$, 其中 σ^2 为PR处的噪声功率, 因此有 $L_{\text{max}} = \alpha \sqrt{P_P \mu \beta_0 / \gamma^{\text{th}} \sigma^2}$ 。由于PR的位置部署未知且具有移动性, 因此考虑通过假设PR部署于保护边界以最大限度保证其QoS。此外, 将主网络中断约束定义如下

$$\frac{P[n] \left(p_{\text{SR}}^{\text{LoS}}[n] |h_{\text{SR}}^L|^2 + p_{\text{SR}}^{\text{NLoS}}[n] |h_{\text{SR}}^N|^2 \right) + \sigma^2}{P_P |h_{\text{PR}}^N|^2} \leq \rho_{\text{out}} \quad (4)$$

其中, $P[n]$ 表示UAV的发射功率, $p_{\text{SR}}^{\text{LoS}}[n]$ 为时隙 n 中第 m 个UAV与PR之间存在LoS链路的概率, ρ_{out} 为中断阈值。

3 无人机轨迹及通信资源优化

3.1 问题描述

考虑快速传输机制的需求, 本节研究UAV飞行全程的平均谱效最大化问题, 基于PT的存在概率, 首先将 n 时隙吞吐量的期望 $\mathbb{E}(\bar{R}_m[n])$ 表示如下

$$\mathbb{E}(\bar{R}_m[n]) = \pi_0 \bar{R}_m^{k=0}[n] + \pi_1 \bar{R}_m^{k=1}[n] \quad (5)$$

其中, $k \in \mathcal{K} = \{0, 1\}$, $k = 1$ 表示PT存在, 否则 $k = 0$, π_1 和 π_0 则分别为PT存在与空闲的概率。基于上节构建的概率性LoS链路, 在时隙 n 内UAV与第 m 个WD间的平均吞吐量 $\bar{R}_m^{k=0/1}[n]$ 为

$$\bar{R}_m^{k=0/1}[n] = p_m^{\text{LoS}}[n] R_m^{L,k=0/1}[n] + p_m^{\text{NLoS}}[n] R_m^{N,k=0/1}[n] \quad (6)$$

其中, $R_m^L[n]$ 和 $R_m^N[n]$ 分别为UAV与第 m 个WD在LoS链路和NLoS链路下的信道容量, 在 k 为0或1时分别计算为

$$R_m^{L/N, k=0}[n] = B \log_2 \left(1 + \frac{P[n] |h_{\text{SG}}^{L/N}|^2}{\sigma^2} \right) \quad (7)$$

$$R_m^{L/N, k=1}[n] = B \log_2 \left(1 + \frac{P[n] |h_{\text{SG}}^{L/N}|^2}{\sigma^2 + P_P |h_{\text{PG}}^N|^2} \right) \quad (8)$$

由于UAV位置及LoS链路的概率是时变的, 因此需考虑所有时隙的吞吐量期望的平均, 即

$$\bar{R} = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \frac{\lambda_m[n] \mathbb{E}\{R_m[n]\}}{N} \quad (9)$$

本节的目标是在任务时间、最大速度和中断阈值等约束下最大化UAV的平均谱效, 因此可将原始问题建模为

$$\begin{aligned} \text{P1:} \quad & \max_{\{Q[n]\}, \{\lambda_m[n]\}, \{P[n]\}} \frac{\tilde{R}}{B} \\ \text{s.t.} \quad & T \leq T_{\text{tot}} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} & \|\mathbf{q}[n+1] - \mathbf{q}[n]\| \leq v_{\text{max}} \cdot T_s \\ & \text{式(3)、式(4)} \end{aligned} \quad (11)$$

其中, 式(10)为任务完成时间约束, 式(11)为UAV的飞行速度约束, 式(3)为UAV与WD的接入策略约束, 式(4)为主网络掉线约束。 $\mathbf{q}[0] = \mathbf{q}_I$, $\mathbf{q}[n+1] = \mathbf{q}_F$, $\mathbf{q}_I, \mathbf{q}_F \in R^{2 \times 1}$ 分别代表UAV投影到水平面的初始位置和最终位置。

3.2 基于SCA的轨迹和功率联合优化方案

由式(5)可知, UAV在 n 时刻的通信速率主要由两部分组成, 即主用户存在时的速率 $\bar{R}_m^{k=1}[n]$ 及主用户空闲时的速率 $\bar{R}_m^{k=0}[n]$, 而 $\bar{R}_m[n]$ 则由LoS速率和NLoS速率组成。显然, LoS信道下的通信速率远大于NLoS信道下速率, 因此影响次网络通信性能的主要是LoS链路的存在概率及UAV的飞行轨迹。由此易推得, 当 h_{SG}^L 固定时, 最大化 $p_m^{\text{LoS}}[n]R_m^L[n]$ 近似等价于最大化 $p_m^{\text{LoS}}[n]R_m^L[n] + (1 - p_m^{\text{LoS}}[n])R_m^N[n]$, 则可将式(6)近似为仅考虑LoS速率的下界^[13]

$$\bar{R}_m^{k=0/1}[n] \geq p_m^{\text{LoS}}[n]R_m^{L,k=0/1}[n] \quad (12)$$

由此将问题P1中的目标函数改写为

$$\begin{aligned} \frac{\tilde{R}[n]}{B} & \geq p_m^{\text{LoS}}[n] \left[\pi_0 \log_2 \left(1 + \frac{P[n]|h_{\text{SG}}^L|^2}{\sigma^2} \right) \right. \\ & \left. + \pi_1 \log_2 \left(1 + \frac{P[n]|h_{\text{SG}}^L|^2}{\sigma^2 + P_P|h_{\text{PG}}^N|^2} \right) \right] \triangleq \tilde{R}^L[n] \end{aligned} \quad (13)$$

由式(13)可进一步观察到, 该目标函数的变量为 $p_m^{\text{LoS}}[n]$, $P[n]$ 及 h_{SG}^L , 且前后两部分均随 $P[n]|h_{\text{SG}}^L|^2$ 单调递增, 因此最大化该目标函数等效于最大化 $\bar{R}^L[n] = p_m^{\text{LoS}}[n] \log_2(1 + P[n]|h_{\text{SG}}^L|^2/\sigma^2)$ 。由第2节构建的信道模型可知 $h_{\text{SR}}^L > h_{\text{SR}}^N$, 易推得 $P[n]|h_{\text{SR}}^L|^2 \geq P[n](p_{\text{SR}}^{\text{LoS}}[n]|h_{\text{SR}}^L|^2 + p_{\text{SR}}^{\text{NLoS}}[n]|h_{\text{SR}}^N|^2)$, 由此可将约束(4)松弛为

$$\frac{P[n]|h_{\text{SR}}^L|^2 + \sigma^2}{P_P|h_{\text{PR}}^N|^2} \leq \rho_{\text{out}} \quad (14)$$

考虑最严格的功率限制情况, 即存在PR部署于距离UAV最近的保护边界边缘, 则有

$$\begin{aligned} P[n] & \leq \\ & \frac{(\rho_{\text{out}}P_P|h_{\text{PR}}^N|^2 - \sigma^2) \left((\|\mathbf{q}[n] - \mathbf{g}_P\| - L_{\text{max}})^2 + h^2 \right)^{\tilde{\alpha}}}{\beta_0} \end{aligned} \quad (15)$$

其中, \mathbf{g}_P 为PT的位置, $\tilde{\alpha} = \alpha_L/2$ 。式(13)显示次级网络的频谱效率与UAV的发射功率成正比, 因此 $P[n]$ 应取该约束下的最大值。此时目标函数为

$$\begin{aligned} & \bar{R}^L[n] \\ & = \frac{1}{1 + a \exp[-\beta(\theta_m[n] - a)]} \\ & \cdot \log_2 \left(1 + \gamma_0 \frac{\left((\|\mathbf{q}[n] - \mathbf{g}_P\| - L_{\text{max}})^2 + h^2 \right)^{\tilde{\alpha}}}{\left(\|\mathbf{q}[n] - \mathbf{g}_P\|^2 + h^2 \right)^{\tilde{\alpha}}} \right) \end{aligned} \quad (16)$$

其中, $\gamma_0 = (\rho_{\text{out}}P_P|h_{\text{PR}}^N|^2 - \sigma^2)/\sigma^2$ 。根据上述分析, 可将原问题P1转化为

$$\begin{aligned} \text{P2:} \quad & \max_{\{Q[n]\}, \{P[n]\}} \bar{R}^L[n] \\ \text{s.t.} \quad & \text{式(4)、式(10)、式(11)} \end{aligned}$$

为解决问题P2, 首先需得到UAV的通信调度变量 $\{\lambda_m[n]\}$, 对该问题进行解耦后将内层问题表示为

$$\begin{aligned} \text{P3:} \quad & \max_{\lambda_m[n]} \bar{R}^L[n] \\ \text{s.t.} \quad & \text{式} \end{aligned}$$

通信调度变量可由枚举法简单求得, 给定 $\{\lambda_m^*[n]\}$ 后, 为将原问题转化为凸问题, 首先引入松弛变量 $\eta[n]$, $\varphi[n]$, $\vartheta[n]$ 及 $\varpi[n]$, 对 $\bar{R}^L[n]$ 进行变形, 得到转换后的问题P4

$$\begin{aligned} \text{P4:} \quad & \max_{\{Q[n]\}, \{\eta[n]\}, \{\varphi[n]\}, \{\vartheta[n]\}, \{\varpi[n]\}} \sum_{n=1}^N \eta[n] \\ \text{s.t.} \quad & \eta[n] \leq \frac{1}{1 + a \exp[-\varphi[n]]} \log_2 \left(1 + \frac{\gamma_0}{\varpi[n]^{\tilde{\alpha}}} \right) \end{aligned} \quad (17)$$

$$\varphi[n] \leq \beta(\vartheta[n] - a) \quad (18)$$

$$\vartheta[n] \leq \frac{180}{\pi} \arctan \left(\frac{h}{\|\mathbf{q}[n] - \mathbf{g}_m\|} \right) \quad (19)$$

$$\varpi[n] \geq \frac{\|\mathbf{q}[n] - \mathbf{g}_m\|^2 + h^2}{(\|\mathbf{q}[n] - \mathbf{g}_P\| - L_{\text{max}})^2 + h^2} \quad (20)$$

式(10)、式(11)

假设松弛后的问题P4中的任一最优解满足式(17)的不等式约束, 则可通过增大松弛变量 $\eta[n]$ 的值使其满足等式约束, 这将同时导致目标函数的增大。其他松弛变量的放缩同理, 因此, 问题P4中所有约束均应满足等式约束, 由此可证得问题P2与问题P4之间的等价性。然而问题P4中约束式(17)、式(19)和式(20)仍然是非凸的, 首先观察约束式(17), 根据文献^[13]可知, 当 $\gamma > 0$ 且 $\alpha > 2$ 时, $f(x, y) = (a + b/x)$

$\log_2(1 + \gamma/y^{\alpha/2})$ 为关于 $x > 0$ 和 $y > 0$ 的凸函数。由此可证得约束(17)不等式右边的函数是关于 $(1 + a \exp[-\varphi[n]])$ 和 $\varpi[n]$ 的凸函数, 由凸函数的性质可通过SCA对其进行一阶泰勒展开得到其下界, 即

$$\begin{aligned} & \frac{1}{1 + a \exp[-\varphi[n]]} \log_2 \left(1 + \frac{\gamma_0}{\varpi[n]^{\alpha}} \right) \\ & \leq \frac{1}{1 + a e^{-\varphi(l)[n]}} \log_2 \left(1 + \frac{\gamma_0}{(\varpi(l)[n])^{\alpha}} \right) \\ & - \frac{1}{(1 + a e^{-\varphi(l)[n]})^2} \log_2 \left(1 + \frac{\gamma_0}{(\varpi(l)[n])^{\alpha}} \right) \\ & \cdot \left(a e^{-\varphi[n]} - a e^{-\varphi(l)[n]} \right) - \frac{1}{1 + a e^{-\varphi(l)[n]}} \\ & \cdot \frac{a \gamma_0 \ln 2}{\varpi(l)[n] \left((\varpi(l)[n])^{\alpha} + \gamma_0 \right)} \left(\varpi[n] - \varpi(l)[n] \right) \end{aligned} \quad (21)$$

其中, $\varphi(l)[n]$ 和 $\varpi(l)[n]$ 为两个函数在第 l 次迭代时的初始取值。类似地, 约束(19)右边的表达式为关于 $\|\mathbf{q}[n] - \mathbf{g}_m\|$ 的凸函数, 同样可对其进行一阶泰勒展开

$$\begin{aligned} \theta_m[n] & \leq \frac{180}{\pi} \left[\arctan \left(\frac{h}{\|\mathbf{q}(l)[n] - \mathbf{g}_m\|} \right) \right. \\ & - \frac{h}{\|\mathbf{q}(l)[n] - \mathbf{g}_m\|^2 + h^2} \\ & \left. \cdot \left(\|\mathbf{q}[n] - \mathbf{g}_m\| - \|\mathbf{q}(l)[n] - \mathbf{g}_m\| \right) \right] \end{aligned} \quad (22)$$

约束(20)为凸函数的平方除以凸函数的平方, 该类型约束难以处理, 引入松弛变量 $\delta_G[n]$ 和 $\delta_P[n]$, 将其转换为如下形式

$$\varpi[n] \delta_P[n] \geq \delta_G[n] \quad (23)$$

$$\delta_P[n] \leq (\|\mathbf{q}[n] - \mathbf{g}_P\| - L_{\max})^2 + h^2 \quad (24)$$

$$\delta_G[n] \leq \|\mathbf{q}[n] - \mathbf{g}_m\|^2 + h^2 \quad (25)$$

式(23)仍为非凸约束, 对其左边进行1阶泰勒展开

$$\begin{aligned} & \varpi(l)[n] \delta_{P(l)}[n] + \varpi(l)[n] (\delta_P[n] - \delta_{P(l)}[n]) \\ & + \delta_{P(l)}[n] (\varpi[n] - \varpi(l)[n]) \geq \delta_G[n] \end{aligned} \quad (26)$$

同样, 对式(24)和式(25)不等式右边的函数进行1阶泰勒展开

$$\begin{aligned} \delta_P[n] & \leq (\|\mathbf{q}(l)[n] - \mathbf{g}_P\| - L_{\max})^2 + h^2 \\ & + 2 (\|\mathbf{q}(l)[n] - \mathbf{g}_P\| - L_{\max}) \\ & \cdot (\|\mathbf{q}[n] - \mathbf{g}_P\| - \|\mathbf{q}(l)[n] - \mathbf{g}_P\|) \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} \delta_G[n] & \geq \|\mathbf{q}(l)[n] - \mathbf{g}_m\|^2 + h^2 + 2 \|\mathbf{q}(l)[n] - \mathbf{g}_m\| \\ & \cdot (\|\mathbf{q}[n] - \mathbf{g}_m\| - \|\mathbf{q}(l)[n] - \mathbf{g}_m\|) \end{aligned} \quad (28)$$

此时约束(28)已形成凸集, 然而约束式(27)不

等号右边为凸函数, 进一步引入松弛变量 $\varsigma[n]$, 将该约束转换为如下形式

$$\delta_P[n] \leq (\varsigma(l)[n])^2 + h^2 + 2\varsigma(l)[n] (\varsigma[n] - \varsigma(l)[n]) \quad (29)$$

$$\varsigma[n] + L_{\max} \leq \|\mathbf{q}[n] - \mathbf{g}_P\| \quad (30)$$

对约束(30)右边进行1阶泰勒展开, 得到

$$\begin{aligned} \varsigma[n] + L_{\max} & \leq \|\mathbf{q}(l)[n] - \mathbf{g}_P\| + (\mathbf{q}(l)[n] - \mathbf{g}_P) \\ & \cdot \frac{1}{\|\mathbf{q}(l)[n] - \mathbf{g}_P\|} (\mathbf{q}[n] - \mathbf{q}(l)[n]) \end{aligned} \quad (31)$$

至此, 通过引入松弛变量和SCA技术, 可将问题P4重构为如下形式

$$\begin{aligned} \text{P5:} & \max_{\{\mathbf{Q}[n]\} \{\eta[n]\} \{\varphi[n]\} \{\theta[n]\} \{\varpi[n]\} \{\delta_G[n]\} \{\delta_P[n]\} \{\varsigma[n]\}} \sum_{n=1}^N \eta[n] \\ \text{s.t.} & \text{式(10)、式(11)、式(18)、式(21)、式(22)、} \\ & \text{式(26)、式(28)、式(29)、式(31)} \end{aligned}$$

综上, 轨迹优化问题P3被转换为P5, 此时P5为凸规划问题, 可使用现有优化工具如CVX等进行有效求解。尽管在问题转换过程中将非凸约束通过泰勒展开近似为他们的下界, 但P5的可行域始终为P3的子集, 且每次得到的最优解将作为输入再次迭代问题P4进行循环求解, 因此可证得最终目标值将以给定精度 ε_0 收敛于P3的全局最优点, 算法复杂度为 $\mathcal{O}(L_S I_N^3)$, 其中 L_S 表示迭代次数, I_N 表示每次迭代中更新的变量个数。

4 仿真结果及性能分析

本节展示了仿真结果以分析所提出的基于SCA的联合优化方案的有效性。仿真中采用的信道模型已在第1节中给出, 具体参数设置如下: UAV需在 T_{tot} 的时长限制下从起点 $(-200, -200, h)$ 飞行至终点 $(200, 200, h)$, 单位距离下的平均路径损耗为 $\beta_0 = -50$ dB, 带宽 $B = 1$ MHz^[11], PT发射功率为 $P_P = 30$ dBw, 接收机处高斯白噪声功率 $\sigma^2 = -78$ dBm, WD位置分布为 $\mathbf{G} = [-50, -300; 50, 150; 100, 0]$ 。信道环境为高建筑密度的城市环境, 其中概率性LoS信道模型参数 $a = 25$, $\beta = 0.112$, 路径损耗指数 $\alpha_L = 2.5$, $\alpha_N = 3.5$, NLoS额外衰落因子 $\mu = -15$ dB^[12]。受建筑物高度对UAV飞行的限制, UAV飞行高度被设置在100 m, 最大飞行速度为 $v_{\max} = 18$ m/s。在Underlay接入模式下, 主网络中断阈值为 $\rho_{\text{out}} = -10$ dB, PT存在的概率 $\pi_1 = 0.7$, 终止迭代的精度设置为 $\varepsilon_0 = 10^{-2}$ 。

图2分别在 $(\mathbf{a}, \mathbf{g}_P = (-100, 100))$ 和 $(\mathbf{b}, \mathbf{g}_P = (50, -150))$ 两种情况下展示了不同任务时长下UAV的最优飞行轨迹, 其中离散轨迹点数为 $N = 30$,

$\gamma^{\text{th}} = 15 \text{ dB}$ 。观察图2(a)可以看到, 飞行全程UAV都会趋于WD飞行。当任务时长不甚充足(如 $T_{\text{tot}} = 35 \text{ s}$)时, UAV的首要目的是在给定时长内完成飞行任务, 因此它只能略微趋近WD, 以牺牲吞吐量为代价满足时间约束。而当分配较长的任务时间(如 $T_{\text{tot}} = 50 \text{ s}$)时, UAV对WD₁的趋近程度将变得更深。此外, 还可以观察到随着时间的延长, UAV在WD附近的飞行速度也将逐渐降低, 甚至在某些区域保持静止, 以持续获取较高的信道增益。而在图2(b)中, 由于主网络被设置在距离WD₁较近的位置, 此时UAV将划分更多的通信时长给WD₂和WD₃。此时, 4种时长下UAV的飞行轨迹十分相似, 因为它们均选择以最快的速度飞行至其他用户所在区域接入通信。

图3刻画了PT在不同位置时最佳的UAV-WD接入策略及功率控制结果, 其中 $T_{\text{tot}} = 55 \text{ s}$ 。结合图2可以观察到当UAV在图2(a)中趋近于WD₂和图2(b)中趋近于WD₃时, 其发射功率大幅下降。这是由于Underlay机制下UAV接近主网络时会增加对PR的同信道干扰, 因此其发射功率需严格限制。此外, $g_P = (-100, 100)$ 时WD₂距主网络较近, 这意味着当UAV趋近WD₂时其对主网络的同信道干扰将增大, 因此UAV倾向于分配更多时间趋近WD₁。

这也是 $g_P = (50, -150)$ 时UAV放弃WD₁选择径直飞向WD₃的原因。并且UAV还选择在距离WD₃一定距离的位置与其通信, 这是通过牺牲部分信道增益获取更高的发射功率, 上述仿真结果进一步说明了对轨迹和发射功率进行联合优化的必要性。

图4显示了应用改进PSO算法得到的UAV最优轨迹, 其中离散轨迹点数为 $N = 15$, 粒子种群数 $A = 1000$, 迭代次数为 $L_P = 1 \times 10^4$ 。可以看到PSO算法所得轨迹与基于SCA算法的轨迹基本一致, 已知PSO算法未对目标函数进行任何处理, 因此从仿真结果上进一步验证了3.2节中通过一系列松弛处理后得到的转换问题与原问题的等价性。然而PSO算法固有的缺点是其只能处理较低维度的问题, 这导致仿真验证过程中发现UAV的离散点数最多只能取到15, 继续增加将导致算法难以收敛。

图5分别展示了基于SCA的联合优化算法和改进PSO算法在 $T_{\text{tot}} = \{40 \text{ s}, 45 \text{ s}, 50 \text{ s}\}$ 时的收敛性, 可以观察到SCA算法在两次外循环内基本就能够收敛, 而改进PSO算法随着任务时间的缩短收敛速度逐渐减慢, 当任务时长为40 s时迭代次数达到7500次算法才初步收敛。这是由于轨迹优化问题变量维度较高, PSO算法本身就收敛性不佳, 而缩短任务时间后粒子更易跳出可行域, 将导致收敛速度减

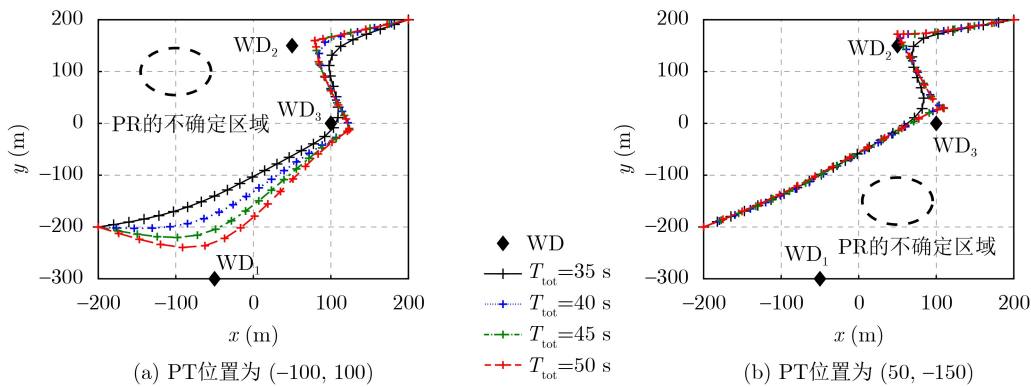


图2 不同主网络位置下UAV的最优轨迹

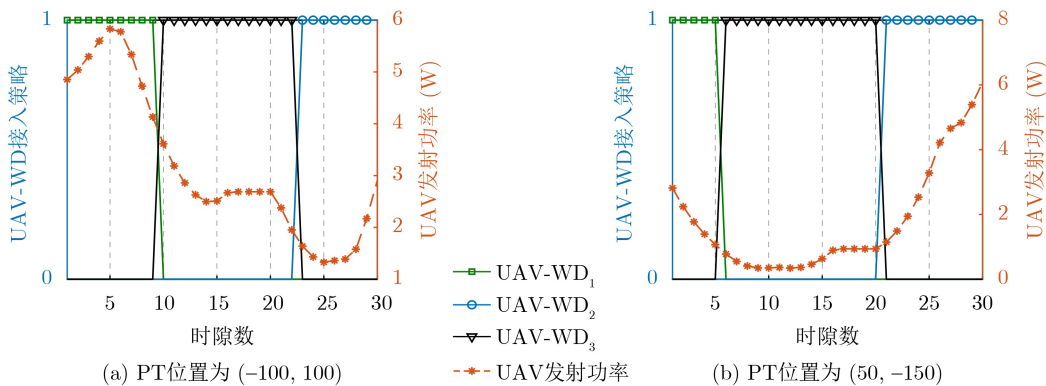


图3 $T_{\text{tot}} = 55 \text{ s}$ 时的最佳UAV-WD接入策略和发射功率

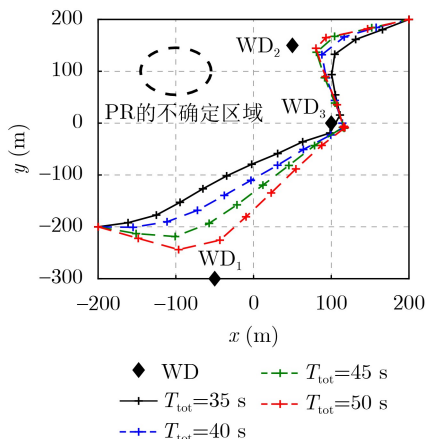


图 4 改进的 PSO 算法下的 UAV 最优轨迹

缓。同时，轨迹的离散点数继续增加也将导致算法的收敛速度进一步减缓。已知 PSO 算法的时间复杂度为 $\mathcal{O}(ANL_P)$ ，当前参数下，改进 PSO 算法的计算复杂度就已经是 SCA 算法复杂度的千倍之余，由

此可验证在高维度的轨迹问题中使用所提基于 SCA 的优化算法的高效性与优越性。

最终，图 6 给出了所提优化方案与另外几种基准方案的性能对比。首先可以看到，基于 SCA 的优化方案较基于改进 PSO 算法的方案性能有一定提升，尤其是在任务时间分配较为紧张或宽裕的情况下优势更为明显，并且这还是在 PSO 算法复杂度极高的情况下实现的。此外，基准方案 1^[14] 的性能整体优于基准方案 2^[15]，且在任务时间更为充裕时两种方案的上升趋势均逐渐提高。显然，匀速直线方案下任务时间的增长并不会提升 UAV 的性能，这是由于该方案下 UAV 无法充分利用自身的移动性优势，而变速直线方案中谱效则有一定程度提升。图 6 在验证了所提基于 SCA 的联合轨迹-功率优化方案的优越性的同时，也展示了 Underlay 机制下不同轨迹方案在不同任务完成时间下的性能趋势，能够为未来复杂场景下 UAV 的轨迹设计问题提供重要借鉴。

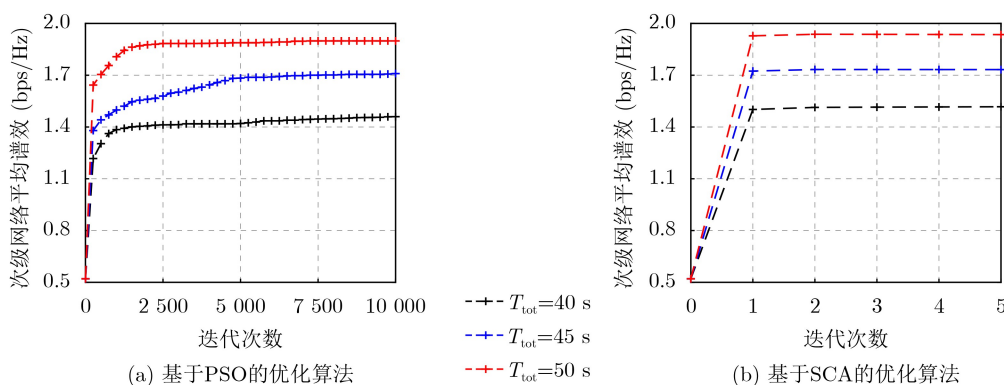


图 5 两种算法的收敛性对比

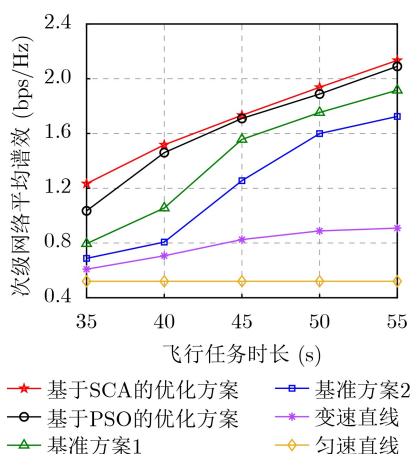


图 6 任务时长变化时不同方案的性能对比

5 结束语

本文将 Underlay 的频谱接入模型应用于 UAV 通信网络，使其能够在非授权频段下有效通信，并

研究了 PR 分布未知情况下次级网络的平均谱效提升方案。在给定任务时间、飞行速度和 PR 中断阈值等约束条件下，基于概率性 LoS 信道联合研究了 UAV 轨迹规划、用户接入及功率控制问题，实现了 UAV 监测数据的快速传输。为解决所构建的初始非凸整数问题，首先将其解耦为两个子问题，在解决通信调度问题后，提出基于 SCA 的联合优化方案对轨迹问题进行求解，且该轨迹规划算法能够推广至求解 UAV 轨迹的大部分模型。仿真结果中，通过与改进 PSO 算法的对比，验证了所提优化方案在解决 UAV 轨迹规划问题上的高效性和稳定性；通过与另外两种基准方案的对比，表明所提联合优化方案能够显著提升 UAV 次级网络的频谱效率，证明了其优越性。

参考文献

[1] 林志, 林敏, 黄清泉, 等. 能效最大化准则下的星地融合网络的

- 安全波束成形算法[J]. 电子学报, 2022, 50(1): 124–134. doi: [10.12263/DZXB.20200944](https://doi.org/10.12263/DZXB.20200944).
- LIN Zhi, LIN Min, HUANG Qingquan, *et al.* Secure beamforming algorithm in satellite-terrestrial integrated networks with energy efficiency maximization criterion[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2022, 50(1): 124–134. doi: [10.12263/DZXB.20200944](https://doi.org/10.12263/DZXB.20200944).
- [2] 张广驰, 顾泽霖, 崔苗. 空地协同通信感知一体化系统的轨迹与资源分配联合优化[J]. 电子与信息学报, 2024, 46(6): 2382–2390. doi: [10.11999/JEIT230716](https://doi.org/10.11999/JEIT230716).
- ZHANG Guangchi, GU Zelin, and CUI Miao. Joint Trajectory and resource allocation optimization for air-ground collaborative integrated sensing and communication systems[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2024, 46(6): 2382–2390. doi: [10.11999/JEIT230716](https://doi.org/10.11999/JEIT230716).
- [3] 徐勇军, 李国权, 陈前斌, 等. 基于非正交多址接入异构携能网络稳健能效资源分配算法[J]. 通信学报, 2020, 41(2): 84–96. doi: [10.11959/j.issn.1000-436x.2020029](https://doi.org/10.11959/j.issn.1000-436x.2020029).
- XU Yongjun, LI Guoquan, CHEN Qianbin, *et al.* Robust energy efficiency for SWIPT-enabled heterogeneous NOMA network[J]. *Journal on Communications*, 2020, 41(2): 84–96. doi: [10.11959/j.issn.1000-436x.2020029](https://doi.org/10.11959/j.issn.1000-436x.2020029).
- [4] 徐勇军, 刘子隼, 李国权, 等. 基于NOMA的无线携能D2D通信鲁棒能效优化算法[J]. 电子与信息学报, 2021, 43(5): 1289–1297. doi: [10.11999/JEIT200175](https://doi.org/10.11999/JEIT200175).
- XU Yongjun, LIU Zijian, LI Guoquan, *et al.* Robust energy efficiency optimization algorithm for NOMA-based D2D communication with simultaneous wireless information and power transfer[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2021, 43(5): 1289–1297. doi: [10.11999/JEIT200175](https://doi.org/10.11999/JEIT200175).
- [5] GOLDSMITH A, JAFAR S A, MARIC I, *et al.* Breaking spectrum gridlock with cognitive radios: An information theoretic perspective[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2009, 97(5): 894–914. doi: [10.1109/JPROC.2009.2015717](https://doi.org/10.1109/JPROC.2009.2015717).
- [6] 韩蕙竹, 黄仰超, 胡航, 等. 无人机短包通信中基于NOMA传输的安全性能分析[J]. 信号处理, 2022, 38(12): 2582–2593. doi: [10.16798/j.issn.1003-0530.2022.12.013](https://doi.org/10.16798/j.issn.1003-0530.2022.12.013).
- HAN Hui Zhu, HUANG Yangchao, HU Hang, *et al.* Security performance analysis based on NOMA transmission in UAV short packet communication[J]. *Journal of Signal Processing*, 2022, 38(12): 2582–2593. doi: [10.16798/j.issn.1003-0530.2022.12.013](https://doi.org/10.16798/j.issn.1003-0530.2022.12.013).
- [7] XU Xiaoren, XU Yihan, ZHOU Wen, *et al.* Energy efficient resource allocation for UAV-served energy harvesting-supported cognitive industrial M2M networks[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2023, 12(8): 1454–1458. doi: [10.1109/LWC.2023.3278627](https://doi.org/10.1109/LWC.2023.3278627).
- [8] QI Weijing, SONG Qingyang, GUO Lei, *et al.* Energy-efficient resource allocation for UAV-assisted vehicular networks with spectrum sharing[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2022, 71(7): 7691–7702. doi: [10.1109/TVT.2022.3163430](https://doi.org/10.1109/TVT.2022.3163430).
- [9] XIAO He, WU Chun, JIANG Hong, *et al.* Energy-efficient resource allocation in multiple UAVs-assisted energy harvesting-powered two-hop cognitive radio network[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2023, 23(7): 7644–7655. doi: [10.1109/JSEN.2023.3247436](https://doi.org/10.1109/JSEN.2023.3247436).
- [10] 刘伯阳, 杨宁乐, 马杰, 等. 无人机认知边缘计算资源分配与轨迹优化方案[J]. 西安邮电大学学报, 2021, 26(1): 20–27. doi: [10.13682/j.issn.2095-6533.2021.01.004](https://doi.org/10.13682/j.issn.2095-6533.2021.01.004).
- LIU Boyang, YANG Ningle, MA Jie, *et al.* Resource allocation and trajectory optimization scheme for UAV-enabled cognitive edge computing networks[J]. *Journal of Xi'an University of Posts and Telecommunications*, 2021, 26(1): 20–27. doi: [10.13682/j.issn.2095-6533.2021.01.004](https://doi.org/10.13682/j.issn.2095-6533.2021.01.004).
- [11] ZENG Yong, XU Jie, and ZHANG Rui. Energy minimization for wireless communication with rotary-wing UAV[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2019, 18(4): 2329–2345. doi: [10.1109/TWC.2019.2902559](https://doi.org/10.1109/TWC.2019.2902559).
- [12] AL-HOURANI A, KANDEEPAN S, and LARDNER S. Optimal LAP altitude for maximum coverage[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2014, 3(6): 569–572. doi: [10.1109/LWC.2014.2342736](https://doi.org/10.1109/LWC.2014.2342736).
- [13] YOU Changsheng and ZHANG Rui. Hybrid offline-online design for UAV-enabled data harvesting in probabilistic LoS channels[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2020, 19(6): 3753–3768. doi: [10.1109/TWC.2020.2978073](https://doi.org/10.1109/TWC.2020.2978073).
- [14] XU Jie, ZENG Yong, and ZHANG Rui. UAV-Enabled wireless power transfer: Trajectory design and energy optimization[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2018, 17(8): 5092–5106. doi: [10.1109/TWC.2018.2838134](https://doi.org/10.1109/TWC.2018.2838134).
- [15] WU Qingqing, ZENG Yong, and ZHANG Rui. Joint trajectory and communication design for Multi-UAV enabled wireless networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2018, 17(3): 2109–2121. doi: [10.1109/TWC.2017.2789293](https://doi.org/10.1109/TWC.2017.2789293).
- 潘 钰: 女, 讲师, 研究方向为无人机通信。
 胡 航: 男, 副教授, 研究方向为无线移动通信。
 金 虎: 男, 教授, 研究方向为无线移动通信。
 雷迎科: 男, 教授, 研究方向为无线移动通信。
 冯 辉: 男, 讲师, 研究方向为无线移动通信。
 姜 丽: 女, 副教授, 研究方向为通信抗干扰。
 张孟伯: 男, 讲师, 研究方向为通信抗干扰。