

**硕 士 学 位 论 文**

MASTER’S DISSERTATION

论文题目无人机辅助车联网中继管理与功率控制

作者姓名田秋来

学科专业控制工程

指导教师刘志新 教授

**2023年5月**

中图分类号：TP273.2 学校代码：10216

UDC：621.3 密级：公开

**工程硕士学位论文**

（工程设计型）

无人机辅助车联网中继管理与功率控制

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 硕士研究生 | ： | 田秋来 |
| 导师 | ： | 刘志新 教授 |
| 副导师 | ： | 杨会龙 高工 |
| 申请学位 | ： | 工程硕士 |
| 工程领域 | ： | 控制工程 |
| 所属学院 | ： | 电气工程学院 |
| 答 辩 日 期 | ： | 2023年5月 |
| 授予学位单位 | ： | 燕山大学 |

A Dissertation in Control Engineering

**RELAY MANAGEMENT AND POWER CONTROL in UAV ASSISTED INTERNET OF VEHICLES**

by Tian Qiulai

Supervisor: Professor Liu Zhixin

**Yanshan University**

May, 2023

燕山大学硕士学位论文原创性声明

本人郑重声明：此处所提交的硕士学位论文《无人机辅助车联网中继管理与功率控制》是本人在导师指导下，在燕山大学攻读硕士学位期间独立进行研究工作所取得的成果。论文中除已注明部分外不包含他人已发表或撰写过的研究成果。对本文的研究工作做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式注明。本声明的法律结果将完全由本人承担。

作者签字： 日期：2023 年 6 月 5 日

燕山大学硕士学位论文使用授权书

《无人机辅助车联网中继管理与功率控制》系本人在燕山大学攻读硕士学位期间在导师指导下完成的硕士学位论文。本论文的研究成果归燕山大学所有，本论文的研究内容不得以其它单位的名义发表。本人完全了解燕山大学关于保存、使用学位论文的规定，同意学校保留并向有关部门送交论文的复印件和电子版本，允许论文被查阅和借阅。本人授权燕山大学，可以采用影印、缩印或其它复制手段保存论文，可以公布论文的全部或部分内容。

保密□，在 年解密后适用本授权书。

本学位论文属于

不保密☑。

(请在以上相应方框内打“√”)

作者签名： 日期：2023 年 6 月 5 日

导师签名： 日期：2023 年 6 月 5 日

# 摘 要

5G技术使得车联网容量进一步提升，用户对于通信质量提出更高的要求，为满足低时延、高速率、高可靠性指标，移动中继技术得到了进一步发展。由于无人机具有移动性高、部署方便、能耗低等特点，所以在车联网中经常引入无人机作为移动中继。随着网联汽车数目的不断增多，车联网无线资源面临重要挑战，在保证通信质量的同时，合理的功率控制是非常有必要的。为了进一步提升车联网性能，移动无人机中继已经不再满足固定轨迹和随机游走模型，可以对其进行轨迹优化，利用其灵活的移动性主动构建有利的信道条件，在合适的位置转发信息。在多中继车联网中，中继的选择也会影响通信质量，可以根据相关的参数指标、信噪比、优化目标、聚类技术等进行合理的中继选择。因此，进行合理的中继管理并设计联合优化方案是全方位提升车联网性能的关键。本文针对不同场景和工作模式下的移动无人机中继辅助的车联网进行联合优化方案研究。

首先，针对车辆非密集网络通信快速性差的情况，提出了联合优化无人机轨迹和信道功率分配以实现吞吐量最大化的方案。通过求和变换及其它数学手段进行链路拆分，利用注水算法对并行子信道进行功率分配。提出了一种基于时隙的迭代算法，连续更新相邻时隙的源车辆位置和无人机位置。设计了一种基于时隙分配的联合优化算法。仿真结果表明，该方案能够显著的提升系统的吞吐量。

其次，针对车辆密集网络通信可靠性差的情况，提出了联合中继选择和无人机轨迹优化与节点功率分配以实现中断概率最小化的方案。通过改进的K-means聚类算法进行车辆的动态分簇和中继选择。通过拉格朗日法将轨迹优化和功率分配分别转化三次和四次方程问题，利用梯度上升法进行交替迭代求解。仿真结果表明，该方案在实现更低通信中断概率的同时，加快了系统收敛速度，提升了系统稳定性。

最后，针对双工通信车联网提出了联合优化无人机轨迹和双向功率分配以兼顾可靠性和快速性的方案。充分考虑了不完备的自干扰消除和无人机处理延迟造成的信息因果约束。通过松弛技术和利用极值法求解无人机双向功率分配，利用连续凸优化技术求解无人机位置，设计了一种基于连续逼近的联合优化算法。仿真结果表明，该方案在保证信息传输速率的同时，可以显著降低通信中断概率。

关键词：无人机中继；吞吐量；中断概率；中继选择；轨迹优化；功率控制

# **ABSTRACT**

5G technology has further improved the capacity of the Internet of Vehicles, users put forward higher requirements for communication quality, and mobile relay technology has been further developed to meet the indicators of low latency, high speed and high reliability. Due to the characteristics of high mobility, convenient deployment and low energy consumption, drones are often introduced as mobile relays in the Internet of Vehicles. With the increasing number of connected cars, the wireless resources of the Internet of Vehicles are facing important challenges, and reasonable power control is very necessary while ensuring communication quality. In order to further improve the performance of the Internet of Vehicles, mobile Unmanned Aerial Vehicle (UAV) relays no longer meet the fixed trajectory and random walk models, and their trajectory can be optimized, and their flexible mobility can be used to actively build favorable channel conditions and forward information at appropriate locations. In the multi-relay vehicle networking, the choice of relay will also affect the communication quality, and reasonable relay selection can be made according to relevant parameter indicators, signal-to-noise ratio, optimization goals, clustering technology, etc. Therefore, reasonable relay management and design of joint optimization schemes are the keys to improving the performance of the Internet of Vehicles in an all-round way. This thesis studies the joint optimization scheme of mobile UAV relay assisted Internet of Vehicles in different scenarios and working modes.

Firstly, aiming at the poor communication speed of non-dense vehicle networks, a scheme of jointly optimizing the UAV trajectory and channel power allocation to maximize throughput is proposed. Link splitting is carried out by summation transformation and other mathematical means, and the power allocation of parallel subchannels is carried out by water injection algorithm. An iterative algorithm based on time slots is proposed to continuously update the source vehicle position and UAV position of adjacent time slots. A joint optimization algorithm based on time slot allocation is designed. The simulation results show that the scheme can significantly improve the throughput of the system.

Secondly, aiming at the poor communication reliability of dense vehicle networks, a scheme of joint relay selection, UAV trajectory optimization and node power allocation is proposed to minimize the outage probability. Dynamic clustering and relay selection of vehicles are carried out by the improved K-means clustering algorithm. The trajectory optimization and power allocation were converted into third- and fourth-degree equation problems by the Lagrange method, respectively, and the gradient ascent method was used to solve them alternately iteratively. The simulation results show that the scheme not only achieves a lower communication outage probability, but also accelerates the system convergence speed and improves the system stability.

Finally, for duplex communication and Internet of Vehicles, a scheme for jointly optimizing UAV trajectory and bidirectional power allocation to take into account reliability and speed is proposed. The information causal constraints caused by incomplete self-interference elimination and UAV processing delay are fully considered. Through relaxation technology and extreme value method to solve the bidirectional power allocation of UAV, and continuous convex optimization technology to solve the UAV position, an joint optimization algorithm based on continuous approximation is designed. The simulation results show that the scheme can significantly reduce the communication outage probability while ensuring the information transmission rate.

**Keywords:** UAV relay; Throughput; Outage probability; Relay selection; Power control; Trajectory optimization

目 录

[摘 要 I](#_Toc30486)

[ABSTRACT II](#_Toc16751)

[第1章 绪 论 1](#_Toc8500)

[1.1 课题的研究背景及意义 1](#_Toc1382)

[1.2 国内外研究现状 3](#_Toc20090)

[1.2.1 无线协作网络功率控制 3](#_Toc20915)

[1.2.2 无人机中继轨迹优化 4](#_Toc11866)

[1.2.3 中继选择与聚类算法 5](#_Toc8288)

[1.3 研究动机 6](#_Toc16784)

[1.3.1 车辆非密集网络通信快速性 7](#_Toc2729)

[1.3.2 车辆密集网络通信可靠性 8](#_Toc12815)

[1.3.3 双工车联网的可靠性和快速性均衡 8](#_Toc22972)

[1.4 论文结构安排 9](#_Toc22346)

[第2章 基于吞吐量最大化的无人机轨迹优化与信道功率分配 12](#_Toc22093)

[2.1 引言 12](#_Toc12784)

[2.2 系统模型与问题描述 13](#_Toc5621)

[2.2.1 车辆非密集网络系统模型 13](#_Toc16973)

[2.2.2 吞吐量最大化数学模型建立 15](#_Toc15485)

[2.3 问题求解 16](#_Toc30449)

[2.3.1 信道功率分配 16](#_Toc6271)

[2.3.2 无人机轨迹优化 20](#_Toc7496)

[2.3.3 基于时隙分配的联合优化 23](#_Toc32256)

[2.4 仿真验证与性能分析 24](#_Toc19535)

[2.5 本章小结 27](#_Toc5874)

[第3章 基于中断概率最小化的中继选择和轨迹优化与节点功率分配 28](#_Toc16773)

[3.1 引言 28](#_Toc24774)

[3.2 系统模型与问题描述 29](#_Toc10950)

[3.2.1 车辆密集网络系统模型 29](#_Toc1899)

[3.2.2 中断概率最小化数学模型建立 31](#_Toc27582)

[3.3 问题求解 32](#_Toc4465)

[3.3.1 基于车辆分簇的中继选择 33](#_Toc9221)

[3.3.2 无人机轨迹优化 35](#_Toc11823)

[3.3.3 节点功率分配 38](#_Toc9009)

[3.3.4 基于交替迭代的联合优化 42](#_Toc15893)

[3.4 仿真验证与性能分析 42](#_Toc8799)

[3.5 本章小结 46](#_Toc11922)

[第4章 基于可靠性和快速性的无人机轨迹优化与双向功率分配 47](#_Toc5878)

[4.1 引言 47](#_Toc20028)

[4.2 系统模型与问题描述 49](#_Toc20675)

[4.2.1 双工通信车联网系统模型 49](#_Toc8984)

[4.2.2 通信可靠性与快速性均衡数学模型建立 51](#_Toc26001)

[4.3 问题求解 53](#_Toc23598)

[4.3.1 无人机双向功率分配 53](#_Toc16110)

[4.3.2 无人机轨迹优化 57](#_Toc217)

[4.3.3 基于连续逼近的联合优化 59](#_Toc708)

[4.4 仿真验证与性能分析 59](#_Toc21359)

[4.5 本章小结 63](#_Toc5599)

[结 论 64](#_Toc18986)

[参考文献 66](#_Toc12199)

[攻读硕士学位期间承担的科研任务与主要成果 73](#_Toc22664)

[致 谢 74](#_Toc28811)

# 第1章 绪 论

## 1.1 课题的研究背景及意义

物联网将各种信息传感设备接入到互联网中，能够实时采集相关信息并进行智能化感知、识别和管理，实现物与物、物与人的广泛连接[1]。随着网联汽车数量的激增，物联网作为一种使能技术在城市交通系统中有着巨大的应用前景，为实现车与车、车与物、车与用户设备的连接提供了技术支撑[2]-[3]。预计到2025年，中国将会有超过2800万辆网联汽车，并且该数量仍会持续增长。传统的车辆自组织网络（VANET）能够将车辆变为具有路由功能的移动节点，使得车辆之间能够相互连接，形成一个局部的网络，在信号覆盖范围内车辆可以退出和加入网络，形成一个小范围的临时的、随机的、不稳定的移动网络。该网络会受到车辆数量和移动性的影响，使用范围是局部的、离散的，随着道路交通道路环境的复杂化和网联汽车行业的大规模发展，VANET无法提供可持续性的服务，其发展受到了一定阻碍[4]。车联网（IOV）是对VANET的升级，扩展了其规模、结构和应用，IOV由三个网络组成，包含车辆互联的自组织网络、网联车辆远程通信网路、车载移动终端互联网络，能够通过计算和服务提供可持续性增强通信。同时5G技术为扩大车联网提供了新的可能性，为构建网联环境提供基础设施和服务，使车联网容量进一步提升[5][6]。

在车联网规模发展的基础上，提高车联网性能和提升车辆用户服务体验是需要重点解决的问题，为了满足车联网通信低时延、高速率和高可靠性指标，中继技术取得了很大程度的发展。根据基础设施可以把中继分为固定中继和移动中继，在实际中，移动中继比固定中继更便宜、更高效，因为移动中继不需要构建协作网络基础设施[7]。无人机具有机动性高、部署灵活、能耗低等优点，已广泛应用于无线通信领域，可以作为移动中继、移动边缘服务器或空中基站接入到车联网中从而提升其通信性能[8][9]。无人机作为移动中继，不但可以解决基站小区边缘的车辆用户由于通信距离过远导致的路径损耗过大问题，还能增加可视路径，从而减少由于障碍物遮挡导致的阴影衰落[10]。要想使中继协作网络发挥最大作用，离不开中继的管理，其研究主要集中在三个方面，分别为中继的选择、功率分配和轨迹优化[11]。移动无人机中继车联网在中继管理上具有一定的研究意义，在不同的通信场景和工作模式下，通过设计合理的联合优化算法可以进一步提升车联网性能。

## 1.2 国内外研究现状

随着网联汽车数量的与日俱增和5G无线通信技术的发展，车联网用户追求更好的服务体验，在网络覆盖范围、车辆通信距离、信息传输速率、通信可靠性等方面提出了更高的要求。面对这些挑战，中继技术得到了进一步的发展，与传统的蜂窝网络相比，中继网络具有诸多的优点，可以扩大基站信号的覆盖范围，增加通信节点数量；可以进行资源调度，分摊基站的负载压力，提升频谱利用率；可以为终端的接入提供更多的自由度，降低发射功率，节约资源；中继可以方便的布设在通信网络中，运维成本低[12]。由于车辆的密集性和快速移动性以及复杂的道路环境，所以会使得信道条件不断的变化从而造成一定程度上的信道衰落和路径损耗，通信质量变差，用户体验降低，传统的固定中继不足以应对车联网中快速变化的拓扑结构，所以引入移动中继主动适应信道条件的变化逐步成为一种主流技术[13]。由于无人机具有灵活的移动性，可以部署为空中中继进行无障碍飞行，相对于车辆中继，无人机中继不容易受道路条件的影响，所以移动无人机中继辅助的车联网模式已经成为大多数学者研究的方向。早在2012年，移动中继的研究便被应用于高铁，在服务静止用户和非静止用户时，在提升吞吐量的同时降低通信中断概率，改善了用户体验。为了使移动中继在无线通信网络中发挥最大作用，对于移动中继研究的主要关键技术有信道建模与估计、功率控制、轨迹优化、中继选择[14]。其中，信道建模与估计对于移动中继来说是需要首要解决的问题，这是由于其移动性特点决定的，主要包括回程链路和接入链路的建模，一般考虑网络节点的转发模式、移动中继的转发模式和运动模型，其具体分析体现在实际场景的应用中[15]。针对本文的研究，接下来对移动中继网络的功率控制、轨迹优化、中继选择进行详细介绍。

### 1.2.1 无线协作网络功率控制

随着物联网的快速发展，接入的节点数量呈爆发式增长，无线通信资源面临巨大的挑战，然而用户对于通信质量的要求不断提高，如何在满足用户体验的情况下合理的分配无线资源成为关键技术。在绿色发展的背景下，减少通信能耗推动无线通信技术可持续发展是重中之重，在保证通信质量的前提下，如何通过合理的功率控制实现能源的节约是很多学者研究的热点问题，功率控制研究对象主要包括信道功率分配，节点间功率分配，全双工节点的双向功率分配[16][17]。

文献[18]提出并分析了一种放大转发中继方案，使得目标节点接收信号功率总是有界的，从而限制使用相同频谱的相邻小区的干扰，推导了功率约束下的最小化均方误差的最优中继因子，其等效于最大化信噪比。文献[19]提出了一个多用户协作通信网络的分布式博弈理论框架，在不了解CSI的情况下实现最优功率分配。采用两级Stackelberg博弈来联合考虑源节点和中继节点的利益，证明了博弈收敛到唯一的最优均衡，实现比集中式资源分配方案更好的性能。文献[20]考虑了一种移动车载中继在各种网络拓扑中的分布式资源分配方案，其以Cucker-Smale模型为基础，可以通过自适应的调整发射功率有效的减少干扰，提供更好的可实现带宽。文献[21]研究了联合无人机3D定位和发射功率控制，以适应具有多个移动用户的中继网路，通过交替下降框架和连续凸逼近方法开发了一个有效的算法。文献[22]研究了一种无人机中继全双工系统，通过波束形成和功率分配的联合设计最大化瞬时数据传输速率，利用松弛技术，提出了一种基于块坐标下降的实现高信噪比的算法。文献[23]研究了中继辅助无线蜂窝网络的两跳中继广播信道，进行基站和中继处的线性波束和功率控制的联合优化，在信噪比和服务质量的约束下最小化加权和能耗，提出了确保收敛的迭代信噪比平衡算法和联合信道反演算法，该方案提供了显著的功率节省。文献[24]提出了一种用于无线移动网络双向中继的动态联合资源分配和功率控制方案，通过双向中继信道对网络进行建模，利用中继协作和网络编码自适应选择最佳传输策略，实现更高传输速率。文献[25]研究了一种双向中继网络，其中分布式时空码以放大转发模式跨多个中继终端构建。每个中继发送其接收符号及其共轭的缩放线性组合，缩放因子基于自动增益控制选择，考虑瞬时状态信息的情况下的最优功率分配策略，等效利用广义线性分式程序，通过Dinkelbach法解决。文献[26]通过博弈论方法研究了认知中继网络的离散功率控制问题，提出了集中式迭代算法和分散式随机学习算法，实现接近最优的速率性能。文献[27]考虑了中继可以获取射频能量的移动中继网络，通过纳什讨价还价法，以平衡信息传输速率和中继收获的能量，提出一种交流功率控制和时分算法。

### 1.2.2 无人机中继轨迹优化

在无人机中继辅助网络中，为了进一步提升系统性能，无人机中继已经不再满足于固定轨迹和随机游走模型。无人机中继的引入可以适应通信网络拓扑结构和信道条件的变化，以抵抗衰落带来的负面影响，随着技术的革新，用户对于通信快速性和可靠性提出了更高的要求。为了应对这一挑战，使用功率更高的通信设备虽然是一种解决办法，但是会造成资源的浪费，所以很多研究将重点放在对于无人机中继的轨迹优化上，不但要适应信道条件的变化，更要充分利用其灵活的移动性主动构建有利的信道条件，在适当的位置转发数据。

文献[28]研究了一种面向吞吐量的高空太阳能无人机实时路径规划方法，基于空间分布、信道状态信息和场势理论设计了信道感知辅助无人机中继，它可以自适应的改变位置，从而最大化通信系统吞吐量，引入合作博弈模型，通过调整权重因子进一步提高通信性能。文献[29]研究了一种无人机中继辅助下的窃听网络，提出了基于人工噪声波束形成的安全传输方案，在一定的服务质量和任务时间约束下，最大化平均系统保密率，通过无模型强化学习算法找到最佳无人机轨迹。文献[30]研究了一种旋翼无人机中继网络，通过优化无人机轨迹最小化总能耗，使用路径离散法和连续凸逼近技术进行求解，将经典的拾取和交付问题与飞行悬停通信协议相结合，提出了一种新的轨迹初始化方法。文献[31]研究了一种无人机无障碍飞行中继网络，通过联合优化三维无人机轨迹、用户调度和资源分配以最大化吞吐量，通过约束连续凸逼近和交替方向乘法器算法求解，可以扩展到多无人机场景。文献[32]研究了一种安全无人机辅助移动中继系统，无人机除了充当中继外还充当一个潜在的窃听者，为了保护端到端通信，提出了一种协作干扰的安全两阶段传输策略，设计了一种保密能效优化框架，通过贪婪/顺序块连续凸逼近和非线性分式规划技术优化无人机轨迹。文献[33]中无人机被以分时的方式为多对地面用户中继数据，通过时隙分配和无人机轨迹优化最大化每个通信对的最小平均信息速率，提出了一种迭代算法，通过交替求解来逼近最优解。文献[34]解决了海上通信环境中固定翼无人机辅助全双工移动中继的节能优化问题，联合优化无人机轨迹和节点间的发射功率以最大化能量效率，轨迹优化问题利用Dinkelbach法，功率分配问题利用拉格朗日法，通过交替迭代联合求解。文献[35]研究了多个通信对的全双工中继系统，提出了一种利用时分多址技术的调度协议，通过联合优化用户调度和无人机轨迹最大化系统吞吐量，利用块坐标下降法和连续凸优化技术迭代求解。

### 1.2.3 中继选择与聚类算法

在移动中继协作网络中，如果中继选取不合适可能会造成传输速率低、信号质量差甚至通信中断，如何选取适合的中继从而保证通信性能也是研究的关键问题。中继的选取标准是多方面的，一般可以分为：(1)从参数指标上，中继的选取策略主要基于物理距离、路径损耗和瞬时状态等；(2)从通信质量上，信噪比可以作为中继选取的依据；(3)从系统性能上，主要考虑吐吞量、中断概率等优化目标；(4)通过聚类技术选取合适的簇头进行信息转发也是中继选择的一种方式，在移动中继协作网络中，聚类技术最主要的关注点就是如何形成稳定的集群，因此集群重构和集群维护是主要挑战。

文献[36]为基站选择中继节点以帮助广播提供了一种基于K-means聚类算法的无监督学习方法，基站可以研究车辆的分布并对其进行分类，以获得有效的广播策略，该方法比随机选择方法显示出更好的性能。文献[37]提出了一种在网络中引入中继节点的聚类算法，该中继节点有助于保持网络中的高效集群，剩余能量和节点位置是创建和维护簇和选择簇头的因素，所提出的算法能够有效地使用任何可用的路由技术。文献[38]提出了基于贪婪聚类方案的中继选择技术，该方案在中继选择过程中考虑了中继负载和意愿，由于移动环境中的动态选择势在必行，该技术旨在通过监测中继的当前状态来优化节点所选中继的数量。文献[39]评估了存在自干扰的全双工解码转发中继集群的情况下，在Nakagami-衰落信道上中继选择的性能，推导了端到端信干噪比的精确累计分布函数，提升了系统吞吐量。文献[40]考虑了簇头和中继节点选择对于无线传感网络能耗的影响，利用固定聚类算法提出了能量有效的最小平均距离算法和能量有效的中继和最小距离算法，以提高无线传感网路的能效。文献[41]提出了一种用于随机部署的无线传感网络的三层架构，而不需要对节点的位置和移动性进行任何假设，设计了一种基于启发式的中继节点选择算法。文献[42]提出了一种计算效率高的次优无人机中继选择方案，通过拉格朗日乘数法将功率分配给选定的无人机中继，通过元启发式教学的的优化算法实现有效的解决方案。文献[43]提出了一种基于移动社交网络的中继选择算法，根据用户移动位置确定中继候选集，利用社交关系和集群关系进一步减少候选节点，这样可以降低检测成本，保证中继节点的安全性和可靠性，提高系统的吞吐量。

## 1.3 研究动机

从国内外的研究现状可以发现，目前对于移动中继协作网络的功率控制、轨迹优化和中继选择的研究已经奠定了广泛的基础，并提出了丰富的算法。其中对于功率控制的研究主要包括博弈法、模型法、松弛技术、块坐标下降法、反演算法、集中式迭代法和分散式随机学习算法；对于轨迹优化的研究主要包括博弈法、强化学习法、路径离散法、动态规划法、连续凸逼近技术、交替迭代法；对于中继选择的研究主要考虑参数指标、通信质量、系统性能，所使用的方法有聚类算法、无监督学习算法、启发式算法。相关文献研究的多是基于用户随机分散的场景，对于车联网道路交通中用户分布相对规则且集中的场景的研究较少；优化变量考虑不全面，系统性能的提升还有很大空间；未充分考虑终端用户的移动性，忽略了其带来的信道条件的变化，不利于实际场景的应用。算法复杂度较高，在车辆网道路交通中适用性较低；系统工作模式以单向信号传输为主。所以在各种不同的车联网道路交通场景中，设计算法复杂度较低的联合优化方案，进一步提升系统的可靠性、稳定性和快速性是很有研究意义的。综上，本文研究在考虑车辆用户移动性的前提下，旨在解决车辆非密集网络通信快速性问题，车辆密集网络通信可靠性问题，双工车联网的可靠性和快速性均衡问题。

### 1.3.1 车辆非密集网络通信快速性

由于本文的研究均考虑了车辆用户的移动性，所以需要引入移动中继来适应拓扑结构的变化，可以考虑将网络中原有的车辆作为移动中继，但是车辆中继的移动很容易受到路况条件的限制，所以需要引入一种可以进行无障碍移动的空中中继作为补充。无人机在无线通信领域的应用具有诸多优点，无人机可以作为移动中继、移动边缘服务器或空中基站接入到车联网中从而提升其通信性能。文献[44]中无人机作为中继为距离基站较远的用户提供了信息转发的服务，提升了通信质量。文献[45]中无人机作为移动边缘服务器可以帮助用户设备计算其任务，每个用户的计算任务一部分在本地处理，其余部分卸载到无人机进行计算，实现高性能、低延迟与高带宽的车联网服务环境。文献[46]中无人机作为空中基站，通过结合使用双工技术，最大化包括上下行链路容量在内的总系统容量。引入无人机作为移动中继，不但可以解决基站小区边缘的车辆用户由于通信距离过远导致的路径损耗过大问题，还能增加可视路径，从而减少由于障碍物遮挡导致的阴影衰落[47]。

在车辆非密集的网路中，由于用户数量少，所以带宽充足，用户之间不容易发生频谱资源抢占，由于车辆之间距离较远，所以不容易产生信道干扰，那么通信的可靠性是可以得到保证的，在这种情况下通信快速性更应该被关注。文献[26]以博弈论为基础，通过集中式迭代算法和分散式随机学习算法来进行中继网络的离散功率控制以实现系统速率性能的提升，但是算法复杂度较高。文献[28]研究了一种基于空间分布、信道状态信和场势理论的无人机中继网络，设计了一种自适应算法，引入合作博弈模型，通过调整权重因子自适应调整无人机轨迹以最大化系统吞吐量，但是对于用户移动性的适应能力较差。针对以上文献的不足，本文第2章提出了车辆非密集网络的吞吐量最大化问题，充分考虑车辆用户移动性造成的信道条件的改变，在保证算法复杂度较低的情况下，通过联合无人机轨迹优化和信道功率分配提升通信快速性。

### 1.3.2 车辆密集网络通信可靠性

在车辆密集的网络中，由于用户数量多，拓扑结构复杂，很容易造成无线通信资源的匮乏，引起带宽和功率资源的抢占，使得通信质量严重降低甚至中断。为了保证通信的可靠性，对网络中的节点进行合理的功率分配是非常有必要的。同时据研究表明，在车辆密集的网络中对车辆进行分簇，通过簇头车辆中继信息可以优化带宽利用率和向簇内车辆分配资源，从而避免重传[48]。文献[21]研究了联合无人机3D定位和发射功率控制，通过交替下降框架和连续凸逼近方法开发了一个有效的算法，但是未考虑移动用户分簇。文献[31]通过联合优化三维无人机轨迹、用户调度和资源分配提升系统性能，通过约束连续凸逼近和交替方向乘法器算法求解，但是算法复杂度较高。文献[33]通过时隙分配和无人机轨迹优化最大化每个通信对的最小平均信息速率，通过交替迭代来逼近最优解，但是优化变量不够全面，系统性能还有很大的提升空间。文献[36]提供了一种基于K-means聚类算法的无监督学习方法，基站可以研究车辆的分布并对其进行分类从而获得有效的广播策略，但是传统的K-means聚类算法对于用户移动性导致的拓扑结构的变化的适应能力较差。针对以上文献的不足，本文第3章提出了车辆密集网络中的中断概率最小化问题，充分考虑车辆用户移动导致的集群重构问题和网络节点间的资源抢占问题，通过联合中继选择和无人机轨迹优化与节点间功率分配提升通信可靠性。

### 1.3.3 双工车联网的可靠性和快速性均衡

全双工通信技是提升车联网性能的关键技术，在同信道同时接收和发送信号，理论上可以使得频谱效率翻倍，不但可以提升通信速率还可以节约频谱资源[49]。目前移动中继网络中的双工技术主要主要应用在中继和基站上，它们可以在同一个信道上同时为通信对提供收发服务，由于双工通信系统的复杂性，如何同时保证通信的可靠性和快速性成为一大挑战[50]。文献[22]研究了一种无人机中继全双工系统，通过联合优化波束形成和功率分配以最大化瞬时数据传输速率，但是未考虑通信可靠性。文献[25]研究了一种双向中继网络，设计了一种广义线性分式程序，通过Dinkelbach法进行功率分配以实现最优瞬时状态信息，但是优化变量单一，系统性能还有很大的提升空间。文献[34]解决了海上通信环境中固定翼无人机辅助全双工移动中继的节能优化问题，通过基于Dinkelbach法和拉格朗日法的交替迭代算法联合优化无人机轨迹和节点间的发射功率以最大化能量效率，但是未考虑系统的通信性能。文献[35]研究了多个通信对的全双工中继系统，通过联合优化用户调度和无人机轨迹最大化系统吞吐量，利用块坐标下降法和连续凸优化技术迭代求解，但是为考虑系统的通信中断概率。针对以上文献的不足，本文第4章提出了移动中继辅助的双工车辆网的通信可靠性和快速性均衡问题，充分考虑车辆用户移动性和双工节点不完全的自干扰消除，通过联合无人机轨迹优化和无人机双向功率分配，在保证吞吐量下限的前提下，最小化系统通信中断概率。

## 1.4 论文结构安排

本文以移动无人机中继辅助的车联网为背景，在可视路径下充分体现了车辆用户的移动性，分别研究了车辆非密集网络、车辆密集网络、双工通信网络三个通信场景，在考虑了功率约束、无人机移动性约束、信息因果约束、阈值约束、不完全自干扰消除等条件下，以吞吐量、中断概率为指标，对中继选择、无人机轨迹、功率控制进行联合优化，通过聚类法、注水法、拉格朗日法、极值法、松弛技术、连续迭代法、连续凸优化法、交替近似法等方法进行解决以提升无线通信系统的可靠性和快速性。本文的整体结构流程如图1-1所示。

第2章中针对车辆非密集通信网络提出了联合优化无人机轨迹和信道功率分配以实现系统吞吐量最大化的方案，将其拆分为功率分配和轨迹优化两个子问题，再进行交替求解。对于功率分配，通过拉格朗日对偶法进行处理从而简化问题，利用求和变换法则与其它数学手段将整体的拉格朗日函数从形式上拆分为两条链路的拉格朗日函数，采取信息论中最基本的注水算法将功率分配到各并行子信道当中。对于无人机轨迹优化，为了跟随源车辆的移动性，提出了一种基于时隙的迭代算法，连续更新相邻时隙的源车辆位置和无人机位置。最后设计了一种基于时隙分配的求解信道功率和无人机位置的迭代算法。仿真结果表明，提出的联合优化无人机轨迹和信道功率分配方案能够显著的提升系统的吞吐量，并且能够更好的适应拓扑结构的变化，表现出更强的稳定性。

第3章针对车辆密集通信网络提出了基于中断概率最小化的移动中继车联网联合优化方案，通过联合车辆分簇和无人机轨迹优化与各节点功率分配以实现优化目标，由于优化变量具有耦合性，所以将目标问题其拆分为车辆分簇、轨迹优化和功率分配三个子问题。首先利用最小-最大距离准则，通过改进的K-means聚类算法实现车辆分簇并动态的确定簇头车辆的位置。然后利用拉格朗日法和梯度上升法，通过交替迭代的方式联合求解无人机位置和各个节点的功率。仿真结果表明，提出的联合车辆分簇和轨迹优化与功率分配的方案（J-CTOPA）在实现低通信中断概率的同时，具有更快的计算收敛速度和较强的稳定性。

图1-1 本文结构

第4章针对双工通信车联网提出了一种兼顾可靠性和快速性的联合无人机轨迹优化和双向功率分配的方案，仍然采用子问题拆分，再进行交替优化的求解方式。在建立数学模型时，充分考虑了不完备的自干扰消除和无人机处理延迟造成的信息因果约束。对于功率分配子问题，通过松弛技术和其它数学手段将信息因果约束转化为功率限制，再利用极值法在所有功率约束范围内找到次优解。对于轨迹优化子问题，由于相邻时隙无人机位置的限制，所以利用连续凸优化技术进行迭代求解。最后设计了一种连续逼近无人机双向功率和轨迹的迭代算法。仿真结果表明，提出的联合无人机轨迹优化和双向功率分配方案在保证信息传输速率的同时可以显著的提升通信可靠性。

第2章的应用场景中，车辆用户位于基站的服务范围之外，车辆与基站不能直接进行通信，引入无人机作为中继提升基站的服务范围，由于车辆非密集网络通信快速性差，所以通过联合无人机轨迹优化和信道功率分配实现系统的吞吐量最大化；第3章的应用场景中，车辆用户位于基站的服务边缘，信号质量差，引入无人机作为中继提升基站的服务能力，由于车辆密集网络通信可靠性差、频谱资源不充足，所以通过联合车辆分簇和无人机轨迹优化与节点功率分配实现系统的中断概率最小化；第4章的应用场景中，车辆用户位于基站的服务范围内，但是存在建筑物群的遮挡，不同路段的车辆之间无法进行通信，所以引入双工无人机中继实现可视链路通信，由于双工网络中存在信道干扰，所以通过联合无人机轨迹优化和上下行功率分配实现系统的可靠性与快速性均衡。这三章功率分配的对象不同，第2章将各节点自身的功率分配到各个信道中，第3章将总功率分配到各个节点，第4章将无人机的额定功率分配到上下行链路，其主要联系是算法结构的普适性，验证了不同场景下无人机辅助车联网的可行性。

最后，总结全文，并对移动无人机中继辅助的车联网进行展望。

# 基于吞吐量最大化的无人机轨迹优化与 信道功率分配

## 2.1 引言

在车辆网系统中，路侧基站单元的服务能力是有限的，引入移动无人机中继可以提升无线通信网络的覆盖范围，从而满足用户车辆的通信需求。在车辆的快速移动下信道状态也会随之发生相应的改变，对无人机中继进行合理的功率控制从而适应信道状态的变化具有一定的研究意义。无人机中继相比于传统的静态中继具有灵活的移动性，可以通过位置调整主动构建有利的信道条件，那么联合无人机功率控制和轨迹优化可以进一步提升车联网性能。

文献[51]研究了一种功率最优移动中继节点数据传输模型，中继节点按照一定的移动性模型随机移动，根据中继移动的统计特性，通过调整各个节点间的功率分配来最大化系统的吞吐量。文献[52]中设计了一种自适应算法，通过对无人机中继的部署与移动性管理来提升网络的连通性。文献[53]研究了一种无人机辅助的地面终端与网络基站通信系统，通过调整无人机的航向角来最大化系统的总传输速率。以上文献都没有考虑源节点的移动性，而现实中网络节点普遍不是固定位置的，忽略它们的移动往往会造成信道状态信息的不准确，为网络优化带来负面影响。同时，这些文献考虑的都是对单一变量的优化，在实际的车联网中需要控制的变量是多种的，仅对单一变量的优化无法大幅度的提升网络性能。

针对以上文献的不足之处，本章提出了一种联合无人机轨迹优化与信道功率分配方案来最大化系统吞吐量。由于功率和轨迹的耦合关系，将优化问题拆分为功率分配和轨迹优化两个部分。对于功率分配子问题，为了降低运算复杂度，通过链路拆分的形式将其转换为信息论中基本的功率分配问题，利用注水算法将总功率分配到并行的子信道当中。对于轨迹优化子问题，为了跟随源车辆的移动性，提出了一种基于时隙的迭代算法，连续更新相邻时隙的源车辆位置和无人机位置。最后，设计了一种基于时隙分配的迭代算法联合求解各个信道的功率和无人机的轨迹。

## 2.2 系统模型与问题描述

### 2.2.1 车辆非密集网络系统模型

如图2-1所示，考虑了车辆单行路段的安全信息转发的无线通信场景，其中包含若干正常行驶的车辆（配备全球定位装置和通信车载单元），一架移动无人机中继，具有固定位置的基站。所考虑的场景中，认为基站的服务能力是有限的，基站信号不能完全覆盖路段上的所有车辆，设基站信号覆盖范围的半径为，所以基站小区边缘之外的车辆无法与基站建立直接的通信链路，这些车辆无法向基站发送请求信号，设这些车辆的行驶速度为。无人机的引入可以有效的解决这一问题，它可以将无法连接的链路变为可以通信的两条链路进而增加基站的服务范围。无人机还可以作为空中中继避免地面障碍物的遮挡，使得通信过程变成可视链路传播从而提升基站的服务质量，设无人机在距离地面高度平行于道路方向进行无障碍飞行。与此同时，由于无人机的高移动性和部署的灵活性，可以为进一步增强通信质量提供更多的自由度。



图2-1 基于吞吐量最大化的移动用户端车联网系统模型

无人机中继采用时分复用的工作模式，根据车辆信息的重要程度来决定服务优先级，在某一时段内仅完成对于优先级最高的车辆信息的中继任务，忽略无人机的起飞和降落阶段，始终处于飞行状态。为了对过程量进行更好的表示，假设该通信过程被离散的划分为足够多等间隔的个时隙，每个时隙被认为是足够小的，即。通过进行合理的移动无人机中继轨迹优化可以构建更加有利的信道条件，所以无人机应配备数据缓冲器，在接收到来自车辆的数据信息后并不是瞬时转发出去，而是随着时隙的进行在某个适合的位置转发数据信息。由于无人机的引入是为了解决基站服务范围之外的车辆的通信问题，所以认为无人机的初位置是随机且已知的，根据接收到车辆信息的位置而定。

由于考虑的是车辆单行路段，那么认为车辆、无人机、固定基站的位置在水平面上的投影是共线。为了描述方便，以固定基站为原点建立笛卡尔坐标系，设基站的左侧为轴的正方向，所以基站位置的坐标为。那么在时隙，基站信号覆盖范围外的通信车辆的位置坐标为，其中表示基站信号覆盖范围外车辆标号的集合，无人机的位置坐标为。在时隙，通信车辆与无人机之间的距离为，无人机与基站之间的距离为。设无人机的初位置为，无人机每个时隙的最大飞行距离为，。在时隙，无人机的实际飞行距离为，那么。在时隙，设通信车辆的发射功率为，无人机的发射功率为，考虑实际情况，发射功率应该满足如下限制，，，其中表示通信车辆的最大发射功率，表示无人机的最大发射功率。

考虑通信车辆到无人机和无人机到基站的通信链路被分配了相等带宽的情况，移动无人机中继的引入使得整个通信过程均为可视链路，认为通信车辆和无人机移动带来的多普勒效应得到了完美的补偿。所以在时隙，通信车辆到无人机和无人机到基站的通信链路的信道增益分别服从如下自由空间路径损耗模型：

 (2-1)

 (2-2)

其中，表示参考距离为时的信道功率。

在时隙，从通信车辆到无人机的最大传输速率（）为：

 (2-3)

其中，表示噪声功率，表示参考距离为时的信噪比（SNR），即。

同理，在时隙，从无人机到基站的最大传输速率（）为：

 (2-4)

### 2.2.2 吞吐量最大化数学模型建立

本章的研究目标是通过通信车辆和无人机的发射功率分配以及无人机的轨迹优化来最大化通信过程的吞吐量，从式(2-3)可以看出，当无人机位置随时隙增大时，有利于通信车辆到无人机链路的传输速率最大化；从式(2-4)可以看出，当无人机位置随时隙减小时，有利于无人机到基站链路的传输速率最大化。所以，对于无人机轨迹的优化需要考虑两条链路传输速率的折中。

移动无人机中继与传统的静态中继相比具有灵活的移动性，可以主动构建有利的信道环境，通过配备的数据缓冲装置处理接收到的信息，然后在合适位置转发信息。虽然移动无人机中继不能像传统的静态中继一样做到瞬时信息转发，产生了一部分处理时延，但是在提升通信吞吐量方面更具优势。

由于无人机上数据缓冲装置的存在，所以无人机只能转发已经从通信车辆接收到的信息，假设无人机的处理延迟为一个时隙，应该满足以下的信息因果约束：

 (2-5)

无人机不应该在第个时隙转发信息，通信车辆不应该在第个时隙发送信息，所以可以得到，。

最大化端到端吞吐量可以转化为最大化最小吞吐量[54]，所以对于通信车辆到基站的吞吐量最大化，可以根据信息因果约束转化为无人机到基站链路的吞吐量最大化，通过对于无人机的位置优化以及通信车辆发射功率和无人机发射功率实现该目标，那么问题可以表示为如下形式：

 (2-6a)

 (2-6b)

 (2-6c)

 (2-6d)

 (2-6e)

 (2-6f)

 (2-6g)

其中式(2-6b)为信息因果约束，式(2-6c)至(2-6f)分别为通信车辆和无人机的发射功率约束，式(2-6g)为无人机轨迹约束。问题(2-6)是非凸的，无法直接求解，将其拆分为功率分配和轨迹优化两个子问题，即固定轨迹求解功率和固定功率求解轨迹。最后通过交替迭代的方式联合求解功率和轨迹。

## 2.3 问题求解

### 2.3.1 信道功率分配

在每个时隙，给定无人机的位置，设表示无人机的轨迹矩阵，矩阵的每一行对应每个时隙无人机的位置，设表示功率矩阵，矩阵的每一行对应每个时隙各个节点的发射功率。由于式(2-6c)表示的信息因果约束非凸，尽管给定了的值，功率分配子问题仍然是非凸的。设表示无人机到基站的信息传输速率，因为，所以可以作为松弛变量，那么功率分配子问题可以表示为：

 (2-7a)

 (2-7b)

 (2-7c)

 (2-7d)

 (2-7e)

 (2-7f)

 (2-7g)

由于问题(2-7)满足Slater强对偶条件，所以可以通过解决(2-7)的对偶问题来获得最优解。在式(2-7b)中，通信车辆的发射功率和无人机的传输速率通过信息因果关系耦合在了一起，可以构造包含该约束的部分拉格朗日函数（Lagrangian）进行解耦，设每个时隙对应的朗格朗日乘子为，那么包含式(2-7b)的部分拉格朗日函数为：

 (2-8)

设，，那么式(2-4)可以重新表示为：

 (2-9)

由于表示的部分拉格朗日函数仅包含式(2-7b)这个约束条件，所以问题(2-7)的拉格朗日对偶函数中应以原有的约束条件进行限制，表示如下：

 (2-10)

那么问题(2-7)的对偶问题可以表示为：

 (2-11a)

 (2-11b)

因为由加号连接的两部分组成，加号左侧描述的为通信车辆到无人机之间的链路，加号右侧描述的为无人机到基站之间的链路，所以可以将对偶拉个朗日函数拆分为两部分，即，其中，通信车辆到无人机链路的拉格朗日对偶子函数为：

 (2-12)

无人机到基站链路的拉格朗日对偶子函数为：

 (2-13)

从以上处理可以看出端到端吞吐量最大化问题从数学形式上拆分成了两个独立链路的研究，对于每个链路可以根据时隙拆分为个并行信道子问题，并将总功率分配到每一个信道当中，为研究多中继通信提供了新的思路，即可以从数学形式拆分为多个独立的链路分别展开研究。

下面解决(2-12)，根据解决功率分配问题的注水方法，当时，可以使得总的通信速率最大，设，为拉格朗日乘子，根据KKT条件可以得到：

 (2-14a)

 (2-14b)

 (2-14c)

 (2-14d)

 (2-14e)

联立式(2-14d)和(2-14e)：

 (2-15)

解得：

 (2-16a)

 (2-16b)

在式(2-14e)中，为松弛变量，可以进行消除，得到：

 (2-17)

当时，能够保证式(2-16b)和(2-17)同时成立；当时，不能使式(2-16b)成立，违背了互补松弛条件，所以。可以得到：

 (2-18)

设，所以：

 (2-19)

其中，表示在时隙所在区域的水平线，对每个时隙所在区域进行注水，使得其达到的水位高度为，可以注入的总水量为，那么每个区域的水深即为最优的功率分配。设，为(2-13)的拉格朗日乘子，同理可得：

 (2-20a)

 (2-20b)

从整个通信过程看，，是为了保证各个节点能够利用其全部发射功率的约束参数，将式(2-19)，(2-20a)，(2-20b)代入到式(2-9)中可以得到完全意义上的拉格朗日对偶函数，那么问题(2-7)的对偶问题可以重新表示为：

 (2-21a)

 (2-21b)

由于，，所以，。通过梯度下降法找到使取得最小值的记为，将代入到(2-19)，(2-20a)中可以得到对偶最优解，。算法2-1总结了信道功率分配方案。

|  |
| --- |
| 算法2-1 信道功率分配方案 |
| Step1：开始。 |
| Step2：输入轨迹矩阵。 |
| Step3：初始化，令，。 |
| Step4：根据拉格朗日法和求和变换进行链路拆分，根据注水算法求得，，的表达式分别为式(2-19)，(2-20a)，(2-20b)。 |
| Step5：将式(2-19)，(2-20a)，(2-20b)代入到式(2-9)求得对偶拉格朗日函数。 |
| Step6：计算的梯度。 |
| Step7：在满足，的情况下，根据步长更新的梯度。 |
| Step8：重复执行Step4至Step7，直到的梯度满足要求。 |
| Step9：将对应的代入到式(2-19)，(2-20a))得到最优解，。 |
| Step10：输出最优功率矩阵。 |
| Step11：结束。 |

### 2.3.2 无人机轨迹优化

给定各个节点的发射功率分配，优化无人机的轨迹，这在实际情况中具有重要的应用，因为常见的无线通信设备多以恒定的功率发射信号，这就需要中继设备进行合理的位置和速度调节来补偿信道的衰落，无人机轨迹优化子问题可以表示为：

 (2-22a)

 (2-22b)

 (2-22c)

由于问题(2-22)是非凸的，为了保障该问题的可解性，根据时隙将其解耦为个子问题分别求解。通过式(2-22a)可以看出，为了满足最大化目标函数，无人机的位置坐标应该随着时隙逐渐减小，求和符号并不影响其趋势，这也说明解耦为个子问题分别求解是可行的。通过式(2-22c)可以发现无人机在时隙的位置受无人机在时隙的位置的影响，那么相邻子问题之间会有制约，求得的为一定可行的次优解，问题(2-22)近似的改写为以下形式：

 (2-23a)

 (2-23b)

 (2-23c)

由于外层的对数函数为增函数，所以整体函数的性质由内层函数决定，那么通过数学分析，问题(2-23)可以进一步写成：

 (2-24a)

 (2-24b)

 (2-24c)

由于(2-24)满足Slater条件，所以可以通过解决问题(2-24)的对偶问题进行求解，设拉格朗日乘子为，，所构建的拉格朗日函数为：

 (2-25)

求对的偏导数得：

 (2-26)

令，可以得到：

 (2-27)

其中，

 (2-28a)

 (2-28b)

 (2-28c)

式(2-27)是关于的四次方程，可以利用相关的求根公式进行求解，那么可以得到关于，的表达式为：

 (2-29)

其中，

 (2-30a)

 (2-30b)

 (2-30c)

其中，

 (2-31a)

 (2-31b)

将式(2-29)代入式(2-25)中可以得到拉格朗日对偶函数为，其中表示拉格朗日函数对的下界，所以问题(2-24)的对偶问题为：

 (2-32a)

 (2-32b)

通过梯度上升法进行求解，设表示任意一组拉个拉格朗日乘子值，设表示第次迭代获得的值，对应的梯度为，设步长因子为，那么按照以下规则进行更新：

 (2-33)

当时，迭代终止，其中表示误差容忍参数，对应的即为对偶最优解，将其代入(2-29)可以得到最优解。算法2-2总结了基于固定信道功率分配的无人机轨迹优化方案。

|  |
| --- |
| 算法2-2 基于固定信道功率分配的无人机轨迹优化方案 |
| Step1：开始。 |
| Step2：输入功率矩阵。 |
| Step3：初始化，，无人机的初始位置。 |
| Step4：初始化，迭代次数，拉格朗日乘子，步长因子为，容忍参数。 |
| Step5：计算梯度。 |
| Step6：执行。 |
| Step7：执行。 |
| Step8：重复执行Step5至Step7，直到。 |
| Step9：将对应的代入到式(2-29)得到最优解。 |
| Step10：执行。 |
| Step11：重复执行Step4至Step10，直到时隙结束。 |
| Step12：输出最优轨迹矩阵。 |
| Step13：结束。 |

### 2.3.3 基于时隙分配的联合优化

最后给出基于时隙分配的联合优化方案。首先划分时隙，其中功率求解需要分配整体时隙，每个时隙对应不同的子信道。由于无人机的移动性约束，所以其轨迹优化需要分配相邻的连续时隙。任意给定无人机的初始位置和的原始轨迹矩阵，执行算法2-1得到车辆用户和无人机在各个信道内的原始功率分配。将对应时隙的功率分配和无人机位置代入算法2-2得到无人机的在下一时隙的位置，如此迭代直到时隙结束，从而得到完整的无人机轨迹。然后交替执行算法2-1和算法2-2，直到无人机的轨迹和各个信道的功率分配均不再发生改变，对应的无人机轨迹和信道功率分配情况即为所求。算法2-3总结了基于时隙分配的联合优化方案。

|  |
| --- |
| 算法2-3 基于时隙分配的联合优化方案 |
| Step1：开始。 |
| Step2：初始化，迭代变量，无人机初位置，原始轨迹矩阵。 |
| Step3：将代入算法2-1得到信道功率分配矩阵。 |
| Step4：初始化，时隙。 |
| Step5：将，，代入算法2-2得到。 |
| Step6：执行。 |
| Step7：重复执行Step4-Step6直到时隙结束，即。 |
| Step8：执行。 |
| Step9：重复执行Step3-Step8直到无人机轨迹和信道功率分配不再发生变化。 |
| Step10：结束。 |

## 2.4 仿真验证与性能分析

本节评估了联合优化无人机轨迹和信道功率分配方案（J-TOPA）的性能，并与其他两种方案进行了比较：具有固定中继位置的等功率方案（FR-EP）；具有中继巡航轨迹的功率分配方案（CT-PA）。其中主要参数的设置如表2-1所示。

表2-1 仿真参数设置

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 符号 | 含义 | 参数值 |
|  | 无人机飞行高度 |  |
|  | 每个时隙无人机最大飞行距离 |  |
|  | 每个时隙源车辆平均功率限制 |  |
|  | 每个时隙无人机平均功率限制 |  |
|  | 源车辆速度 |  |
|  | 划分的时隙数量 |  |
|  | 参考信噪比 |  |
|  | 步长因子 | 0.1 |

由于算法求解的随机性，所以每组仿真验证进行了10次，选取平均值进行图像绘制，并且该原则在第3章和第4章中仍然适用。

如图2-2所示，描述了源车辆和无人机的发射功率随时隙的变化情况。可以发现源车辆的发射功率随着时隙不断减小，无人机的发射功率随着时隙不断增大。这是因为在无人机朝向基站飞行的过程中，源车辆与无人机之间信道条件变差，无人机与基站之间信道条件变好，为了实现吞吐量最大化，信道条件越好分配的功率越多。还可以发现源车辆发射功率的变化趋势比无人机发射功率的变化趋势平缓，这是因为源车辆可以和无人机同向移动，使得信道变化趋势平缓。



图2-2 源车辆与无人机发射功率变化情况



图2-3 无人机位置变化情况

如图2-3所示，描述了无人机位置随时隙的变化情况。可以发现无人机到基站的距离越来越近，这是因为无人机的发射功率越来越大，为了适应无人机到基站之间更好的信道条件，无人机不断朝着基站飞行。还可以发现无人机飞行速率越来越快，这是因为无人机发射功率变化越来越快，无人机主动构建更加有利的信道条件。

图2-4将提出的J-TOPA方案和FR-EP方案及CT-PA方案的吞吐量变化进行了对比。J-TOPA方案吞吐量增加最明显，这是由于无人机轨迹和信道发射功率相互促进调节；CT-PA方案次之，这是因为仅发射功率适应无人机轨迹的变化。FR-EP方案最差，其吞吐量的增加是源车辆移动引起的。



图2-4 三种方案吞吐量变化对比



图2-5 三种方案吞吐量受源车辆速度的影响

图2-5描述了三种方案吞吐量受源车辆速度的影响，可以发现源车辆速度越快吞吐量就越大，这是因为源车辆速度越快，获取基站信号的能力就越强，那么信息传输速率就越快。还可以发现提出的J-TOPA方案吞吐量变化趋势最平稳，这由于无人机轨迹和信道发射功率共同调节可以很好的抵消一部分干扰。综上，提出的联合优化无人机轨迹和信道功率分配方案可以显著提升系统吞吐量，并且能够更好的适应拓扑结构的变化，表现出更强的稳定性。

## 2.5 本章小结

本章针对车辆非密集通信网络提出了联合优化无人机轨迹和信道功率分配以实现系统吞吐量最大化的方案，将其拆分为功率分配和轨迹优化两个子问题，再进行交替求解。对于功率分配，通过拉格朗日对偶法进行处理从而简化问题，利用求和变换法则与其它数学手段将整体的拉格朗日函数从形式上拆分为两条链路的拉格朗日函数，采取信息论中最基本的注水算法将功率分配到各并行子信道当中。对于无人机轨迹优化，为了跟随源车辆的移动性，提出了一种基于时隙的迭代算法，连续更新相邻时隙的源车辆位置和无人机位置。最后设计了一种交替逼近功率和无人机位置的迭代算法。仿真结果表明，提出的联合优化无人机轨迹和信道功率分配方案能够显著的提升系统的吞吐量，并且能够更好的适应拓扑结构的变化，表现出更强的稳定性。

# 第3章 基于中断概率最小化的中继选择和轨迹优化与 节点功率分配

## 3.1 引言

在车联网中，无线通信的可靠性很容易受到大尺度衰落的影响，这是源车辆与基站通信距离远或障碍物阴影区引起的路径损耗造成的，通过引入移动无人机中继可以很好的解决这一问题[55][56]。与允许路段上的所有车辆广播信息相比，对车辆进行分簇并通过簇头车辆中继信息具有多个优势[57][58]。由于多跳中继协作通信也是一种减少衰落效应的有效方法[59]，所以通过簇头车辆和无人机中继进行协作的方式来转发簇成员车辆的信息可以高效利用功率，以提升无线通信系统的可靠性。

文献[60]将无人机作为放大转发中继来辅助两个地面节点间的通信，利用梯度下降法优化无人机轨迹，利用极值法进行源节点和无人机功率分配，通过交替优化轨迹和功率以实现端到端中断概率最小化。文献[61]提出了一种基于归一化信噪比约束中断概率的功率控制法，通过Perron-Frobenius理论和几何算法降低中断概率和用户发射功率。文献[62]研究了两个固定节点距离很远的多跳无人机中继系统，通过构建四时隙双向多跳中继协议联合多无人机轨迹优化和功率分配来最小化通信中断概率。以上文献研究的应用场景多局限于固定源节点和固定目标节点的通信网络中，忽略了节点移动性带来的影响。这些文献体现的协作性较差，不能全方位的提升无线通信可靠性，并且对于功率分配和轨迹优化的研究，设计的算法的复杂度较高。

在本章中推导了中断概率的一般表达式，通过联合簇头车辆选择和无人机轨迹优化与各个节点功率分配使得总通信中断概率最小化。由于三组变量是耦合在一起的，所以将其解耦为车辆分簇、轨迹优化和功率分配三个子问题。对于车辆分簇和簇头选择，通过基于物理距离的改进的K-means聚类算法实现。对于轨迹优化与功率分配两个子问题，通过拉格朗法分别化简为三次方程和四次方程的问题，然后利用梯度上升法以交替迭代的方式进行联合求解。由于车辆分簇的引入，使得中继网络的协作能力进一步增强，能够更好的适应网络拓扑结构的变化，同时所设计的联合控制算法具有线性级的计算复杂度，更有利于在实际通信场景中的应用。

## 3.2 系统模型与问题描述

### 3.2.1 车辆密集网络系统模型

如图3-1所示，考虑了城市单向路段的安全信息转发的通信场景，包含若干个车辆（配备全球定位装置和通信车载单元），移动无人机中继，固定位置的基站。由于城市交通系统中车辆用户数量庞大，导致基站的通信压力过大，所有采用集群通信以分散流量负载。由于基站小区覆盖范围边缘的车辆用户通信质量较差，所以将移动无人机中继引入到基站小区的拓扑结构中，进而提升通信能力和服务质量，有效的利用频谱资源。设表示车辆集群的集合，所考虑路段上的车辆被划分为个集群，簇头车辆根据信息的重要程度采用时分复用的方式将簇内的车辆信息转发给无人机中继。通过对无人机轨迹的优化和对各个节点发射功率的分配从而获得上行链路通信过程的最小化的中断概率。



图3-1 基于中断概率最小化的移动中继车联网系统模型

簇头车辆和无人机中继均采用解码转发（Decode Forward, DF）的工作模式，忽略车辆与基站之间的直接通信链路，采用多跳中继的形式转发数据。设基站小区边缘的簇头车辆每次的通信过程由个时隙组成，记时隙的集合为，每个时隙完成两个不同阶段的任务，第一个阶段簇头车辆将接收的簇内信号解码并重新编码后，发送信号至移动无人机中继，第二个阶段无人机对接收到的信号进行解码和重新编码后，发送信号至固定基站。

假设所考虑的路段长度为，由于其为单行道，所以认为车辆近似在同一直线上，为了视距链路通信，设无人机始终在道路上方高度处进行无障碍飞行。在时隙，簇内车辆与簇头车辆之间的距离为，簇头车辆与无人机之间的距离为，无人机与固定基站之间的距离为，为了便于描述，我们以固定基站为原点建立笛卡尔坐标系，则固定基站的位置坐标为，车辆的位置坐标为，簇头车辆的位置坐标为，无人机的位置坐标为。设为无人机在时隙到的轨迹矩阵，矩阵的每一行对应无人机在每一个时隙的位置。

定理3-1 无人机轨迹在水平方向的投影与车辆和基站的共线时，能够使得系统的中断概率更小[60]。

根据定理定理3-1，在时隙，无人机的位置坐标可以重新表示为，那么簇内车辆与簇头车辆之间的距离为，簇头车辆与无人机之间的距离为，无人机与基站之间的距离为。设无人机在每个时隙的最大飞行距离为，在时隙，无人机的实际飞行距离为，则。

在时隙，簇内车辆的发射功率为，簇头车辆的发射功率为，无人机的发射功率为。设为时隙到的各个节点的功率矩阵，矩阵的每一行对应各个节点在每一个时隙的发射功率。为了减少能耗和实现更高的功率效率，我们假设时隙的总发射功率受限制，即。

我们假设信道是服从瑞利衰落的，其中的信道增益包括路径损耗和小尺度衰落。因此在时隙，簇头车辆、无人机和基站接收到的信号分别为：

 (3-1)

 (3-2)

 (3-3)

其中，，分别表示相互独立的小尺度衰落系数，均值为、方差为。，，分别表示对应节点发射的单位能量信号。，，分别表示对应节点接收的噪声信号，服从均值为、方差为的高斯分布。

在时隙，簇头车辆、无人机和固定基站处的信噪比（SNR）分别表示为：

 (3-4)

 (3-5)

 (3-6)

### 3.2.2 中断概率最小化数学模型建立

通信链路的中断概率定义为接收到的信噪比（SNR）低于预定阈值的概率。因此在时隙内，簇内车辆到簇头车辆之间，簇头车辆到无人机之间、无人机到固定基站之间的通信链路的中断概率分别为：

 (3-7)

 (3-8)

 (3-9)

如果所有节点间的信息传输都成功，则从簇内车辆到固定基站的通信是成功的。那么，在时隙内，通信优先级最高的车辆进行上行链路通信的总中断概率为：

 (3-10)

定理3-2 在时隙内，通信优先级最高的车辆进行上行链路通信的总中断概率为：

 (3-11)

证明：根据式(3-5)和(3-8)，我们可以得到簇头车辆到无人机之间通信链路的中断概率，即

 (3-12)

由于的概率密度函数（PDF）为，所以，我们可以将式(3-12)进一步表示为：

 (3-13)

同理，无人机到固定基站之间通信链路的中断概率为：

 (3-14)

簇内车辆到簇头车辆之间通信链路的中断概率为:

 (3-15)

在时隙内，通信优先级最高的车辆进行上行链路通信的总中断概率为：

 (3-16)

为了量化每次上行链路通信的整体性能，将遍历个时隙的中断概率之和作为评估标准。目标是通过联合簇头车辆选择和无人机轨迹的优化与各节点发射功率的分配以实现最小化中断概率之和，问题可以表示为如下形式：

 (3-17a)

 (3-17b)

 (3-17c)

 (3-17d)

其中，式(3-17b)和(3-17c)为功率约束，式(3-17d)为无人机的可移动性约束。

## 3.3 问题求解

由于问题(3-17)关于是非凸的，为了更有效的处理这个问题，提出了一种联合车辆分簇和轨迹优化与功率分配方案（J-CTOPA），将问题(3-17)解耦为车辆分簇、轨迹优化与功率分配三个子问题，首先通过聚类算法进行车辆分簇并选择出簇头车辆，然后通过交替迭代联合解决轨迹优化和功率分配子问题，最后给出了J-CTOPA的总体方案。

### 3.3.1 基于车辆分簇的中继选择

K-means聚类算法参数少、原理简单、收敛速度快、聚类效果好，能够将某些方面近似的数据进行分类，非常符合簇头车辆位置的实际情况。采用改进的K-means聚类算法对所考虑的路段上的车辆进行分簇并进行簇头车辆的选择，通过采用最大-最小距离准则来初始化个聚类中心[63]。而传统的K-means算法需要随机初始化个聚类中心，相比而言，改进的K-means算法对于个初始聚类中心的选择更契合车辆分布的拓扑结构，有利于算法的快速收敛，提升车辆分簇的计算速度，从而实现动态分簇。

首先分别选取距离道路两端最近的车辆作为两个初始聚类中心，分别记为和，那么和之间的距离近似为。再计算剩余车辆到现有初始聚类中心的距离：

 (3-18)

固定一组的取值，从中选取出最小值，然后对于每一组的取值，再从所有最小值中选取出最大值，即：

 (3-19)

其中，表示现有初始聚类中心的标记，记的最大值为。如果满足以下条件，则相应的车辆成为下一个初始聚类中心，即：

 (3-20)

 (3-21)

其中，表示聚类的临界值，表示权重值。当不满足式(3-20)的条件时，，即完成对于个初始聚类中心的选取。为了减少簇头车辆间的通信干扰，需要控制集群的数量，预设初始聚类中心数目的阈值为，当时，也会完成对于个初始聚类中心的选取，的取值如式(3-22)所示：

 (3-22)

其中，表示取整函数，为每个簇内的平均车辆数目，表示路段上的车辆数目的期望，假设路段的车辆数目服从泊松分布，那么：

 (3-23)

其中，表示车辆的到达率，表示车辆的平均瞬时速率，那么路段上车辆数目的期望为：

 (3-24)

如上所述，即可完成对于初始聚类中心的选择，接下来需要为每一辆车分配簇标记，选取距离最近的聚类中心对应的标记值作为该车辆的簇标记，即：

 (3-25)

|  |
| --- |
| 算法3-1 基于改进的K-means聚类算法的车辆分簇方案 |
| Step1：开始。 |
| Step2：初始化，对，，，，，，赋值，取，。 |
| Step3：重复执行式(3-18)，(3-19)，(3-21)，，直到或者停止。 |
| Step4：执行。 |
| Step5：重复执行式(3-25)，(3-26)，直到，收敛停止。 |
| Step6：执行式(3-27)。 |
| Step7：结束。 |

所有车辆分配了簇标记以后，对具有同一簇标记的车辆进行聚类中心的更新，即求取平均坐标,如式(3-26)所示：

 (3-26)

其中，为指示函数，用来判断簇标记为的车辆是否属于第个簇，当等号成立时，其值为，否则，其值为。

重复式(3-25)和(3-26)，直至和均不再发生变化，便完成了对路段上车辆的分簇，由于聚类中心并不一定为车辆所在位置，所以选择距离聚类中心距离最近的车辆作为簇头车辆，即：

 (3-27)

式(3-27)表示在的条件下，即在同一个簇内，找到距离聚类中心最近的车辆作为簇头车辆。算法3-1总结了基于改进的K-means聚类算法的车辆分簇方案。

### 3.3.2 无人机轨迹优化

在车辆分簇的基础上，给定每一个时隙各个节点的发射功率，那么问题(3-17)可以表示为：

 (3-28a)

 (3-28b)

由于问题(3-28)仍然是非凸的，为了有效的解决问题(3-28)，我们将其解耦为个子问题并在每个时隙中依次求解以最小化中断概率。根据式(3-28b)，由于无人机的移动性约束，时隙内无人机的位置会影响时隙内无人机的位置，所有每个时隙的子问题是不完全等价的，所求得的解是次优的。时隙的子问题可以表示为如下形式：

 (3-29a)

 (3-29b)

根据式(3-11)，可以表示为，这是一个复合函数，其中外层函数为，其中，内层函数为：

 (3-30)

因为是单调递增的，所以最小化相当于最小化，则问题(29)可以改写为：

 (3-31a)

 (3-31b)

由于问题(3-31)是凸的且满足Slater条件，因此问题(3-31)的最优值与其对偶问题的最优值之间的差距为零。因此可以通过解决问题(3-31)的对偶问题来解决问题(3-31)。设为无人机可移动约束(3-31b)的拉格朗日乘子，因此问题(3-31)的拉格朗日函数为：

 (3-32)

则问题(3-31)可以表示为：

 (3-33a)

 (3-33b)

所以问题(3-31)的对偶问题为：

 (3-34a)

 (3-34b)

然后求，根据文献[60]，，那么拉格朗日函数可以表示为：

 (3-35)

求对的微分：

 (3-36)

其中，

 (3-37a)

 (3-37b)

 (3-37c)

令，解得：

 (3-38)

其中，

 (3-39a)

 (3-39b)

|  |
| --- |
| 算法3-2 基于固定节点功率分配的无人机轨迹优化方案 |
| Step1：开始。 |
| Step2：输入功率矩阵和车辆分簇信息。 |
| Step3：令，对，，，赋值。 |
| Step4：初始化，令，对，，赋值。 |
| Step5：重复执行以下步骤，计算梯度，，，直到停止。 |
| Step6：将代入到式(3-38)得到。 |
| Step7：执行。 |
| Step8：重复执行Step4至Step7，直到停止。 |
| Step9：输出轨迹矩阵。 |
| Step10：结束。 |

将式(3-38)代入到式(3-35)即可得到，问题(34)可以重写为：

 (3-40a)

 (3-40b)

采用梯度上升法进行求解，梯度上升法就是通过对函数上当前点对应梯度的正方向的规定步长进行迭代搜索，则会接近函数的局部极大值，由于对偶问题(3-40)是凸的，所以局部极大值即为全局最大值，从而可以获得全局最优解。设表示第次迭代获得的值，对应的梯度为，设步长因子为，则按照以下规则进行更新：

 (3-41)

当时，迭代终止，其中表示误差容忍参数。

设第一个时隙无人机的初始位置为，并在每一个时隙给定各个节点的发射功率，即可求解在无人机在下一个时隙的最优位置，通过连续迭代即可得到无人机最优轨迹。算法3-2总结了基于固定节点功率发分配的无人机轨迹优化方案。

### 3.3.3 节点功率分配

给定每一个时隙无人机位置，那么问题(3-17)可以表示为：

 (3-42a)

 (3-42b)

 (3-42c)

由于每个时隙的中断概率只与对应时隙的各个节点的发射功率相关，并且功率约束也是相互独立的，所以问题(3-42)可以分解为个子问题进行并行求解。时隙的分解子问题可以表示为：

 (3-43a)

 (3-43b)

 (3-43c)

根据式(3-11)，可以表示为，这是一个复合函数，其中外层函数为，其中，内层函数为：

 (3-44)

定理3-3 在问题(3-43)中，对于任意时隙，当中断概率最小时，各个节点的发射功率满足[60]。

将代入(3-44)得：

 (3-45)

因为是单调递增的，所以最小化相当于最小化，那么问题(3-43)可以改写成：

 (3-46a)

 (3-46b)

 (3-46c)

通过解决问题(3-46)的对偶问题来解决问题(3-46)，设为功率约束的拉格朗日乘子，则问题(3-46)的拉格朗日函数为：

 (3-47)

则问题(3-46)可以表示为：

 (3-48a)

 (3-48b)

所以问题(3-46)的对偶问题可以表示为：

 (3-49a)

 (3-49b)

然后求，仍然设路径损耗指数，拉格朗日函数可以进一步表示为：

 (3-50)

求对的微分，并令结果为零：

 (3-51)

求对的微分，并令结果为零：

 (3-52)

由式(3-51)和(3-52)可得：

 (3-53)

将式(3-53)代入式(3-51)或(3-52)可得：

 (3-54)

其中，

 (3-55a)

 (3-55b)

 (3-55c)

 (3-55d)

 (3-55e)

解得：

 (3-56)

其中，

 (3-57a)

 (3-57b)

 (3-57c)

其中，

 (3-58a)

 (3-58b)

 (3-58c)

 (3-58d)

 (3-58e)

|  |
| --- |
| 算法3-3 各个节点功率分配方案 |
| Step1：开始。 |
| Step2：输入轨迹矩阵和车辆分簇信息。 |
| Step3：初始化，令。 |
| Step4：初始化，令，对，，赋值。 |
| Step5：重复执行以下步骤，计算梯度，，，直到停止。 |
| Step6：将代入到式(3-46)得到。 |
| Step7：将代入到式(3-43)得到。 |
| Step8：执行。 |
| Step9：执行。 |
| Step10：重复执行Step4至Step9，直到停止。 |
| Step11：输出功率矩阵。 |
| Step12：结束。 |

将式(3-56)带入式(3-50)即可得，问题(3-49)可以进一步表示为：

 (3-59a)

 (3-59b)

采用梯度上升法进行求解，由于对偶问题(3-59)是凸的，所以局部极大值即为全局最大值，从而可以获得全局最优解。设表示第次迭代获得的值，对应的梯度为，设步长因子为，则按照以下规则进行更新：

 (3-60)

当时，迭代终止，其中表示误差容忍参数。

在每一个时隙给定无人机的位置，即可求解各各节点的发射功率，通过连续迭代即可得到系统的最优功率分配。算法3-3总结了各个节点功率分配方案。

### 3.3.4 基于交替迭代的联合优化

最后给出基于交替迭代的联合优化方案。在时隙开始前，首先通过算法3-1求得簇头车辆的位置，在时隙，初始化无人机的位置和各各节点的发射功率，在时隙，将这些初始值代入轨迹优化算法3-2求解无人机的最优位置，然后将无人机最优位置代入功率分配算法3-3求解各个节点的最优发射功率。将上一个时隙求得的的位置和功率依次交替迭代至下一个时隙，直至时隙结束。算法3-4总结了基于交替迭代的联合优化方案，算法3-4的计算复杂度为，可以简化为，这是线性级的计算复杂度,其中为算法3-1的收敛次数，为算法3-2的收敛次数，为算法3-3的收敛次数。

|  |
| --- |
| 算法3-4 基于交替迭代的联合优化方案 |
| Step1：开始。 |
| Step2：执行算法3-1得到。 |
| Step3：初始化，令，对，，，赋值，取。 |
| Step4：将，，，，代入算法3-2得到。 |
| Step5：将，代入算法3-3得到，，。 |
| Step6：执行。 |
| Step7：重复执行Step4至Step6，直到停止。 |
| Step8：结束。 |

## 3.4 仿真验证与性能分析

本节评估了联合车辆分簇和轨迹优化与节点功率分配方案（J-CTOPA）的性能，并与其他两种方案进行了比较：具有固定中继位置的等功率方案（FR-EP）；具有中继巡航轨迹的功率分配方案（CT-PA）。其中主要参数设置如表3-1所示。

如图3-2所示，为距离基站的边缘车辆用户的分簇情况。假设有辆车随机分布在该区域，考虑实际情况，每两辆车之间的距离不小于，车辆到达率为，车辆的平均瞬时速度为，每个簇内的平均车辆数目为，权重值为。根据算法3-1可以将他们分为三个簇，如图中椭圆所示，由于该算法是基于物理距离进行分簇的，可以看出分簇情况是合理的。选择靠近聚类中心距离最近的车辆作为簇头车辆，如图中“”所示，其近似为每一个簇的几何中心，符合实际要求。

表3-1 仿真参数设置

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 符号 | 含义 | 参数值 |
|  | 所考虑的路段长度 |  |
|  | 无人机飞行高度 |  |
|  | 每个时隙无人机最大飞行距离 |  |
|  | 每个时隙的功率阈值 |  |
|  | 噪声方差 |  |
|  | 信噪比阈值 |  |
|  | 路径损耗指数 |  |
|  | 划分的时隙数量 |  |
|  | 算法3-2中梯度上升法的容差 |  |
|  | 算法3-2中梯度上升法的搜索步长 |  |
|  | 算法3-3中梯度上升法的容差 |  |
|  | 算法3-3中梯度上升法的搜索步长 |  |



图3-2 边缘车辆用户分簇情况

如图3-3和3-4所示，簇头车辆位置为，无人机初始位置为，各个节点的初始功率分配为，分别描述了无人机轨迹，各个节点的功率分配与时隙的关系。在图3-3中，首先无人机以接近最大飞行速度朝向目标基站飞行，然后飞行速度有所下降，最后在最优位置悬停。在图3-4中，首先簇内车辆的发射功率快速下降到低水平，簇头车辆和无人机的发射功率快速上升，这是因为簇内通信距离很近，功率需求很低，所以将更多的功率分配给簇头车辆和无人机；然后各个节点的发射功率进行小范围调整，最后保持稳定。对比图3-3和3-4可以发现无人机轨迹和各节点功率的调整具有同步性，验证了该算法交替迭代的正确性。



图3-3 无人机位置与时隙的关系



图3-4 各节点功率与时隙的关系

图3-5描述了三种不同方案的中断概率与时隙的关系。J-CTOPA方案与FR-EP方案相比，能够达到更低的中断概率，这是因为J-CTOPA方案的无人机位置和各节点功率可以动态调整从而使得中断概率逐步降低，FR-EP方案的中继位置和各节点功率均是固定的使得中断概率仅受到参数选择的影响。J-CTOPA方案与CT-PA方案相比，虽然两个方案都能达到较低的中断概率，但是J-CTOPA方案的收敛速度更快，这是因为无人机轨迹和各节点发射功率可以交替的快速调整，而CT-PA方案的轨迹呈线性变化，所以功率调整速度相对缓慢。综上，J-CTOPA方案相对于传统方案具有一定的优势，不但能够实现更低的中断的概率而且具有更快的收敛速度。



图3-5 中断概率与时隙的关系



图3-6 最优中断概率与功率阈值的关系

图3-6描述了三种方案的最优中断概率与功率阈值的关系。三种方案的中断概率均随着功率阈值的增加而降低，这是因为功率阈值的增加允许了各节点更高的发射功率，而中断概率与各个节点的发射功率呈负相关。J-CTOPA方案与另外两种方案相比，具有更低的中断概率，随着功率阈值的增加，三种方案的中断概率的差距越来越小，当功率阈值受限时，体现了J-CTOPA方案的优越性。



图3-7中断概率与簇头车辆和基站之间距离的关系

图3-7描述了三种方案的中断概率与簇头车辆和基站之间距离的关系。在图3-7中，随着簇头车辆与基站之间距离的增加，路径损耗增大，使三种方案的中断概率均增加。J-CTOPA方案与另外两种方案相比具有更低的中断概率，说明在一定通信范围内，J-CTOPA方案的调节能力更强。

## 3.5 本章小结

本章针对车辆密集网络通信可靠性差的问题，提出了联合车辆分簇和无人机轨迹优化与各个节点功率分配方案以实现通信过程的中断概率最小化。由于变量间的耦合关系，将目标问题拆分为三个子问题分别求解。对于车辆分簇子问题，利用改进的K-means聚类算法进行车辆分簇和簇头车辆选择。对于轨迹优化和功率分配子问题，利用拉格朗日法分别将它们转化为三次和四次方程问题，并利用梯度上升法，以交替迭代的方式进行联合求解。仿真结果表明，提出的J-CTOPA方案相比于FR-EP方案和CT-PA方案，能够实现更低的中断概率并且能够使系统快速收敛。此外，在功率阈值受限时，J-CTOPA方案使系统表现出更强的稳定性。

# 第4章 基于可靠性和快速性的无人机轨迹优化与 双向功率分配

## 4.1 引言

在车联网中，车辆与车辆之间的通信和车辆与基站之间的通信很容易受到高大建筑群的遮挡，会造成严重的大尺度衰落从而引起通信的中断，通过无人机中继辅助可以增加可视链路，从而建立起正常的通信。随着5G时代的到来，网联车辆用户将会大规模增加，传统的单工通信模式将不能满足通信的快速性要求，同时通信设备的延迟限制和移动中继有限的存储容量阻碍了移动中继辅助车联网的实际应用，将全双工技术应用到无人机中继上可以很好的解决这些问题。

文献[64]将全双工无人机作为小区网络的空中基站，在不完美的自干扰消除下，在同频带同时为上行用户下行用户提供服务，通过差分凸优化技术联合优化用户功率、无人机功率和无人机位置，在保证上行用户服务质量的同时，最大化下行用户信息传输速率和。文献[65]将多个固定位置的双工无人机作为空中基站为多个小区网络服务，以增强无线网络的覆盖范围、容量和传输速率。研究了三种场景（最大化上行和速率、最大化下行和速率、最大化上下行和速率之和）下的资源分配问题，通过利用凸函数的差分编程求得次优解。文献[66]将双工无人机部署位飞行基站，通过联合优化带宽、功率分配和无人机轨迹，在无人机有限存储量下最大化服务的联网设备的数量。利用二进制松弛连续变量法和非凸函数内逼近法，开发了一种连续迭代算法。以上文献均考虑了双工无人机作为空中基站时的通信场景，对于双工无人机作为中继的研究不足，所考虑的服务用户均为固定位置，并且忽略了对于双工模式下的通信可靠性研究。

针对以上文献的不足，提出了一种双工无人机移动中继辅助车辆用户之间通信的模式，无人机可以在同一个信道同时为上下行设备服务，考虑不完善的自干扰消除和信息因果约束，联合无人机上下行功率分配和无人机轨迹优化，在保证通信速率的同时实现总中断概率最小化。对于功率分配子问题，将非凸的信息因果约束进行松弛转化为功率限制，利用极值法在所有功率约束范围内求得次优解。对于轨迹优化子问题，由于相邻时隙无人机位置的限制，所以利用凸优化技术，基于连续时隙进行迭代求解。最后设计了一种连续逼近算法联合求解无人机上下行功率和轨迹。

## 4.2 系统模型与问题描述

### 4.2.1 双工通信车联网系统模型

如图4-1所示，考虑两条车辆同方向行驶的单向路段，将路段分别记为和，两个路段分别包含若干个车辆（配备全球定位装置和通信车载单元），记路段上的车辆为，记路段上的车辆为。路段上的某车辆需要与路段上的某车辆建立安全通信，其中，分别表示两个路段上车辆标号的集合。由于两个路段之间存在高大的建筑群，所以车辆与车辆无法进行V2V通信，那么两车之间的通信需要借助固定基站进行信号处理和转发。由于建筑物的遮挡，车辆和基站之间及基站和车辆之间均无法进行直接链路通信，所以引入无人机中继将原本无法直接通信的链路变为多跳的可视链路。



图4-1 基于可靠性与快速性均衡的双工车联网系统模型

设车辆对车辆的通信周期为，为了方便描述和离散化表示，将通信时间拆分为足够多的个相等的时隙间隔，即，其中表示足够大的正整数。认为在时隙内，通信系统处于近似不变的状态。由于固定基站具有强大信号处理能力，所以认为其对接收信号的处理延迟为零，可以做到信息的瞬时转发。移动无人机中继与传统的静态中继相比，不但可以创造可视链路，还可以利用其灵活的移动性主动构建有利的信道条件，在适当的位置转发信息，所以无人机配备了数据缓存和处理装置，设无人机的数据处理延迟为一个时隙。设无人机采用解码转发（DF）的双工通信模式，整个通信过程可以描述为，在时隙，车辆向无人机发送请求信号；在时隙，无人机将解码处理后的上行信号发送给基站，基站进行瞬时处理将信号回传给无人机，于此同时车辆向无人机发送请求信号；在时隙，无人机将处理后的下行信号发送给车辆，上行信号发送给基站，与此同时车辆发送信号给无人机，基站进行瞬时处理将信号回传给无人机，除了第一个周期和最后一个周期，在每一个时隙无人机同时接收来自车辆的信号和来自基站的信号，并同时发送下行信号给车辆和上行信号给基站，其中红色实线箭头表示上行链路，蓝色虚线箭头表示下行链路，紫色实线箭头表示干扰链路。

设车辆的固定发射功率为，基站的固定发射功率为，无人机的额定发射功率为，无人机的上行发射功率可以随着时隙进行调整，将其设为，同理无人机的下行发射功率设为，那么在同一个时隙无人机上下行发射功率应该满足如下要求，。根据上述系统的工作模式可以发现，车辆不应在最后两个时隙给无人机发送信号，即当，；无人机不应该在第一个时隙和最后一个时隙给基站发送信号，即当，；同理，基站不应该在第一个时隙和最后一个时隙给无人机发送信号，即当，；无人机不应该在前两个时隙给车辆发送信号，即当，。那么，，整个通信系统处于正常的工作状态。

为了描述方便，在固定基站处建立笛卡尔三维坐标系，设基站的左侧为轴的正方向，基站的右侧为轴的正方向。那么，固定基站的位置坐标为，车辆的位置坐标为，其中表示车辆与基站在轴方向上的距离，认为同一路段上的车辆共线，的位置坐标为，无人机的位置坐标为。设车辆与无人机之间的距离为，设无人机基站之间的距离为，设表示无人机与车辆之间的距离为。设无人机在在每个时隙的最大飞行距离为，在时隙，无人机的实际飞行距离为，则。

假设信道是服从瑞利衰落的，其中的信道增益包括路径损耗和小尺度衰落。当时隙，无人机接收车辆的信号与无人机发射对车辆信号占用信道1，无人机发射对基站的信号与无人机接收基站的信号占用信道2。所以，当时隙，信道1中无人机处和车辆处的信干噪比为（SINR）：

 (4-1)

 (4-2)

当时隙，信道2中无人机处和基站处的信干噪比为（SINR）：

 (4-3)

 (4-4)

其中，，表示两个相互独立的小尺度信道衰落系数，均值为0，方差为1；表示噪声，表示干扰系数。

### 4.2.2 通信可靠性与快速性均衡数学模型建立

当时隙时，设车辆到无人机之间的通信速率为，根据香农定理可得，，同理，当时隙时，无人机到车辆之间的通信速率为。

由于无人机具有处理延迟，所以车辆接收到的信息全部来自无人机接收到的信息，应满足相应的信息因果约束，即。

设信干噪比阈值为，当时隙，各个节点之间对应的通信链路中断概率为：

 (4-5)

 (4-6)

 (4-7)

 (4-8)

其中，车辆到无人机之间的通信中断概率可以写成：

 (4-9)

由于的概率密度函数为，所以：

 (4-10)

同理，其它节点间的通信中断概率可以写成：

 (4-11)

 (4-12)

 (4-13)

在时隙，若果所有节点间的信息都传输成功，那么认为在该时隙的通信是成功的[67]，所以时隙内的通信中断概率为：

 (4-14)

式(4-14)是一个复合函数，其内层函数为：

 (4-15)

为了量化系统正常工作时的性能，将遍历的总中断概率作为评估标准。通过联合无人机的上下行功率分配和无人机的轨迹优化来最小化系统的总中断概率，该问题的数学模型如下：

 (4-16a)

 (4-16b)

 (4-16c)

 (4-16d)

 (4-16e)

 (4-16f)

 (4-16g)

 (4-16h)

其中，式(4-16b)-(4-16f)表示无人机的上下行功率约束，式(4-16g)为无人机的移动性约，式(4-16h)为信息因果约束，其中表示信息传输速率阈值，以满足系统通信的快速性要求。

## 4.3 问题求解

问题(4-16)中无人机的位置和上下行发射功率是耦合的，无法进行直接求解，所以将其拆分为功率分配和轨迹优化子问题，即固定轨迹求解上下行功率和固定上下行功率求解轨迹。

### 4.3.1 无人机双向功率分配

复合函数(4-14)的外层为增函数，该复合函数的性质由内层函数决定。由于目标函数(4-16a)的非凸性，可以将其转化为求解每个时隙的最小中断概率，式(4-16g)表明上一个时隙的无人机位置会影响下一个时隙的无人机位置，所以这种转化是不完全等价的，只能求得次优解。式(4-16h)为一个非凸约束，为了适应新的目标函数，将其关于时隙进行离散处理，通过适当的松弛转为凸约束，式(4-16h)可以改写为：

 (4-17)

其中，

 (4-18a)

 (4-18b)

 (4-18b)

和

 (4-19)

所以，功率分配子问题可以表示为如下形式：

 (4-20a)

 (4-20b)

 (4-20c)

 (4-20d)

 (4-20e)

 (4-20f)

 (4-20g)

 (4-20h)

在功率分配子问题中，无人机的轨迹为给定值，所以可以写成：

 (4-21)

其中，

 (4-22a)

 (4-22b)

 (4-22c)

 (4-22d)

当无人机将额定功率全部投入到上下行链路通信时，即，可以获得更小的通信中断概率，将代入到式(4-21)中可以得到：

 (4-23)

其中，

 (4-24a)

 (4-24a)

可以通过极值法求解，令=0可以得到：

 (4-25)

其中，

 (4-26a)

 (4-26b)

 (4-26c)

 (4-26d)

式(4-25)为关于的四次方程，通过求根公式（费拉里法）可得：

 (4-27)

其中，

 (4-28a)

 (4-28b)

 (4-28c)

其中，

 (4-29a)

 (4-29b)

 (4-29c)

 (4-29d)

 (4-29e)

将式(4-27)和(4-20b)-(4-20h)代入式(4-23)中，在每个时隙中，符合约束条件且使得取得最小值的即为所求，那么。算法4-1总结了无人机双向功率分配方案。

|  |
| --- |
| 算法4-1 无人机双向功率分配方案 |
| Step1：开始。 |
| Step2：给定每个时隙的无人机位置。 |
| Step3：执行(4-17)和(4-19)确定无人机下行发射功率的限制。 |
| Step4：执行(4-27)求得无人机下行发射功率极值点。 |
| Step5：将极值点和所有约束代入(4-23)，使得取得最小值的即为最优的无人机下行发射功率，执行求得最优的上行发射功率。 |
| Step6：重复执行Step3至Step5，直到时隙结束。 |
| Step7：结束。 |

### 4.3.2 无人机轨迹优化

给定无人机上下行功率分配，求解无人机的轨迹。设，对于式(4-16h)仍然可以利用松弛方法将其改写成：

 (4-30a)

 (4-30b)

其中，，，。

同理，轨迹优化子问题可以表示为如下形式：

 (4-31a)

 (4-31b)

 (4-31c)

 (4-31d)

由于在轨迹优化子问题中功率是给定的，所以可以表示为：

 (4-32)

其中，

 (4-33a)

 (4-33b)

 (4-33c)

 (4-33d)

由于问题(4-31)满足Slater强对偶条件，因此可以通过求解其对偶问题来解决问题(4-31)，设，，为拉格朗日乘子，问题(4-31)的拉格朗日函数为：

 (4-34)

令和可以分别得到：

 (4-35a)

 (4-35b)

将式(4-35a)和(4-35b)代入到式(4-34)可以得到，那么问题(4-31)的对偶问题可以表示为如下形式：

 (4-36a)

 (4-36b)

 (4-36c)

 (4-36d)

通过梯度上升法求解最优的拉格朗日乘子，通过连续迭代法将和代入(4-34)，将代入(4-35)即可求得每个时隙最优的无人机位置，即。算法4-2总结了固定双向功率分配的无人机轨迹优化方案。

|  |
| --- |
| 算法4-2 固定双向功率分配的无人机轨迹优化方案 |
| Step1：开始。 |
| Step2：给定每个时隙无人机上下行发射功率。 |
| Step3：初始化，，无人机在前两个时隙的位置和。 |

算法4-2（续）

|  |
| --- |
| Step4：初始化，迭代次数，拉格朗日乘子，步长因子为，容忍参数。 |
| Step5：计算梯度。 |
| Step6：执行。 |
| Step7：执行。 |
| Step8：重复执行Step5至Step7，直到。 |
| Step9：将对应的分别代入到(2-35a)和(2-35b)得到最优解。 |
| Step10：执行。 |
| Step11：重复执行Step4至Step10，直到时隙结束。 |
| Step12：结束。 |

### 4.3.3 基于连续逼近的联合优化

最后给出基于连续逼近的联合优化方案。首先给定无人机在前两个时隙的位置，将其代入算法4-1可以得到当前时隙的无人机双向功率分配，将该结果和连续两个时隙无人机的位置代入算法4-2可以得到无人机在下一个时隙的位置。然后交替执行算法4-1和算法4-2直到时隙结束。算法4-3总结了基于连续逼近的联合优化方案。

|  |
| --- |
| 算法4-3 基于连续逼近的联合优化方案 |
| Step1：开始。 |
| Step2：初始化，时隙，前两个时隙无人机的位置，。 |
| Step3：将代入算法4-1得到无人机的双向功率，。 |
| Step4：将，，，代入算法4-2得到下一时隙的位置。 |
| Step5：执行。 |
| Step6：重复执行Step3至Step5，直到时隙结束，即。 |
| Step7：结束。 |

## 4.4 仿真验证与性能分析

本节评估了联合优化无人机轨迹和双向功率分配方案（J-TOSPA）的性能，并与其他两种方案进行了比较：具有双向等功率的轨迹优化方案（SEP-TO）；具有中继巡航轨迹的双向功率分配方案（CT-SPA）。由于干扰系数的大小会影响信干噪比，所以选取合适的干扰系数有助于仿真的准确性，干扰系数过大会使通信质量太差，无法体现通信的有效性，干扰系数太小不能明显的体现系统的抗干扰能力，本节中选取干扰系数为，其它主要参数的设置如表4-1所示。

图4-2描述了无人机轨迹，可以发现无人机从源车辆所在路段的某一位置出发驶向目标车辆，但这一过程并不是直线行驶，而是以弧线先驶向基站，飞过基站上方后再以弧线驶向目标车辆。根据第2章的研究，无人机驶向基站的过程是为了满足系统对于吞吐量的要求，根据第3章的研究，无人机从基站驶向目标车辆的过程是为了降低系统的中断概率，所以该无人机轨迹有利于实现通信可靠性和快速性均衡。

表4-1 仿真参数设置

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 符号 | 含义 | 参数值 |
|  | 无人机飞行高度 |  |
|  | 每个时隙无人机最大飞行距离 |  |
|  | 无人机额定功率 |  |
|  | 源车辆发射功率 |  |
|  | 基站发射功率 |  |
|  | 步长因子 |  |
|  | 噪声方差 |  |
|  | 信噪比阈值 |  |
|  | 吞吐量阈值 |  |



图4-2 无人机轨迹

如图4-3所示，描述了无人机的双向发射功率与时隙的关系。无人机与基站之间的上行发射功率先减后增，无人机与目标车辆之间的下行发射功率先增后减。这是因为无人机驶向基站的过程中，无人机与基站之间的信道条件越来越好，需要的无人机上行发射功率越来越少，无人机驶离基站的过程则相反。



图4-3 无人机双向功率分配情况



图4-4 吞吐量与迭代次数的关系

如图4-4所示，描述了吞吐量与迭代次数的关系，在系统初始化阶段，吞吐量随着迭代次数逐步增加，在5次迭代后吞吐量趋于收敛并达到了设定的吞吐量阈值，这说明系统通信的快速性是可以保证的。

图4-5将提出的J-TOSPA方案与CT-SPA方案和SEP-TO方案进行对比，可以发现J-TOSPA方案能够实现更低的中断概率，CT-SPA方案和SEP-TO方案虽然也能降低中断概率，但是效果不够明显并且很容易受外部因素影响。这说明在双工通信系统中，仅依靠功率或轨迹调节已经不能满足系统对于通信可靠性要求，这是由于其通信的复杂性导致的。



图4-5 三种方案中断概率变化对比



图4-6 三种方案中断概率受额定功率的影响

如图4-6所示，描述了三种方案的最小中断概率受无人机额定功率的影响。三种方案的最小中断概率均随着无人机额定功率的增加而降低，这是由于中断概率和发射功率呈负相关。提出的J-TOSPA方案可以实现更低的通信中断概率，不易受额定功率的影响，表现出更强的通信稳定性。

## 4.5 本章小结

本章针对双工通信车联网提出了一种兼顾可靠性和快速性的联合无人机轨迹优化和双向功率分配的方案，仍然采用子问题拆分，再进行交替优化的求解方式。在建立数学模型时，充分考虑了不完备的自干扰消除和无人机处理延迟造成的信息因果约束。对于功率分配子问题，通过松弛技术和其它数学手段将信息因果约束转化为功率限制，再利用极值法在所有功率约束范围内找到次优解。对于轨迹优化子问题，由于相邻时隙无人机位置的限制，所以利用连续凸优化技术进行迭代求解。最后设计了一种交替迭代算法联合求解无人机双向功率和轨迹。仿真结果表明，提出的联合无人机轨迹优化和双向功率分配方案在保证信息传输速率的同时可以显著的提升通信可靠性。

# 结 论

本文以移动无人机中继辅助的车联网为背景，在可视路径下充分体现了车辆用户的移动性，分别研究了车辆非密集网络、车辆密集网络、双工通信网络三个通信场景，在考虑了功率约束、无人机移动性约束、信息因果约束、阈值约束、不完全自干扰消除等条件下，以吞吐量、中断概率为指标，对中继选择、无人机轨迹、功率控制进行联合优化，通过聚类法、注水法、拉格朗日法、极值法、松弛技术、连续迭代法、连续凸优化法、交替近似法等方法进行解决以提升无线通信系统的可靠性和快速性。本文的研究工作可以总结为：

(1)针对车辆非密集网络通信快速性差的问题，提出了联合无人机轨迹优化和信道功率分配以实现系统吞吐量最大化的方案。利用拉格朗日法与求和变换及其它数学手段进行链路拆分，通过注水算法进行信道功率分配，提出了基于时隙的迭代算法进行无人机轨迹优化，设计了一种基于时隙分配的求解信道功率和无人机位置的迭代算法。仿真结果表明，提出的联合无人机轨迹优化和信道功率分配方案能够显著的提升系统的吞吐量。

(2)针对车辆密集网络通信可靠性差的问题，提出了联合中继选择和无人机轨迹优化与节点功率分配以实现中断概率最小化的方案。利用改进的K-means聚类算法实现车辆的动态分簇并进行中继选择，基于拉格朗日法和梯度上升法设计了一种交替优化无人机轨迹和各个节点功率分配的联合算法。仿真结果表明，提出的联合中继选择和轨迹优化与功率分配的方案（J-CTOPA）在实现更低通信中断概率的同时，加快了系统的收敛速度，提升了系统的稳定性。

(3)针对双工通信车联网提出了一种兼顾可靠性和快速性的联合无人机轨迹优化和双向功率分配的方案。在考虑不完备自干扰消除的情况下，通过松弛技术将信息因果约束转化为功率限制，利用极值法进行双向功率分配，通过连续凸优化技术进行无人机轨迹优化，设计了一种连续逼近无人机双向功率和轨迹的迭代算法。仿真结果表明，提出的联合无人机轨迹优化和双向功率分配方案在保证信息传输速率的同时可以显著的提升系统通信可靠性。

然而，本文对于移动无人机中继辅助的车联网系统的研究还存在一些不足，已经忽略和尚未考虑的不确定性条件需要在后续的阶段中进一步研究：

(1)在拓扑结构方面，本文所研究的场景虽然考虑了车辆用户的移动性，但是认为车辆是沿直线行驶的，而在实际场景中，车辆会因为超车和变道等行为造成行驶轨迹的变化，这仍然会引起信道条件的变化；在考虑无人机轨迹时，认为无人机在固定高度进行无障碍飞行，但在实际中难免会遇到障碍物起伏的情况，这时需要对无人机进行三维轨迹设计从而达到避障的要求。

(2)在优化变量方面，本文仅考虑了中继选择、轨迹优化和功率控制，为各个信道分配了相等的带宽，这难免造成频谱资源的浪费，在后续的研究中要充分考虑频谱资源的调度问题。同时，本文只研究了引入单无人机中继的情况，在更复杂的网络结构中，显然单个中继不足以满足对通信性能的要求，在后续的研究中要考虑多无人机中继辅助的通信场景。

# 参考文献

1. 夏俊. 物联网与车联网的技术展望[J]. 集成电路应用, 2021, 38(08): 42-44.
2. R. Han, J. Wang, L. Bai, J. Liu and J. Choi. Age of Information and Performance Analysis for UAV-Aided IoT Systems[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(19): 14447-14457.
3. H. Hu, K. Xiong, G. Qu, Q. Ni, P. Fan and K. B. Letaief. AoI-Minimal Trajectory Planning and Data Collection in UAV-Assisted Wireless Powered IoT Networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(2): 1211-1223.
4. F. Yang, S. Wang, J. Li, Z. Liu and Q. Sun. An overview of Internet of Vehicles[J]. China Communications, 2014, 11(10): 1-15.
5. J. Wang, C. Li, H. Li and Y. Wang. Key Technologies and Development Status of Internet of Vehicles[C]//2017 9th International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA), Changsha, China, 2017: 29-32.
6. D. Kombate and Wanglina. The Internet of Vehicles Based on 5G Communications[C]//2016 IEEE International Conference on Internet of Things (iThings) and IEEE Green Computing and Communications (GreenCom) and IEEE Cyber, Physical and Social Computing (CPSCom) and IEEE Smart Data (SmartData), Chengdu, China, 2016: 445-448.
7. H. A. U. Mustafa, M. A. Imran, M. Z. Shakir, A. Imran and R. Tafazolli. Separation Framework: An Enabler for Cooperative and D2D Communication for Future 5G Networks[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016, 18(1): 419-445.
8. J. Zhang, Y. Zeng, and R. Zhang. UAV-enabled radio access network: multi-mode communication and trajectory design[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2018, 66(20): 5269–5284.
9. B. Li, Z. Fei, and Y. Zhang. UAV communications for 5G and beyond: Recent advances and future trends[J]. IEEE Internet Things 2019, 6(2): 2241–2263.
10. 卞慧. 无人机辅助车联网无线通信系统的功率分配与飞行轨迹优化[D]. 东南大学, 2020: 1-19.
11. A. Khalili, E. M. Monfared, S. Zargari, M. R. Javan, N. M. Yamchi and E. A. Jorswieck. Resource Management for Transmit Power Minimization in UAV-Assisted RIS HetNets Supported by Dual Connectivity[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2022, 21(3): 1806-1822.
12. U. Uyoata, J. Mwangama and R. Adeogun. Relaying in the Internet of Things (IoT): A Survey[J]. IEEE Access, 2021, 9(6): 132675-132704.
13. Y. Sui, J. Vihriala, A. Papadogiannis, M. Sternad, W. Yang and T. Svensson. Moving cells: a promising solution to boost performance for vehicular users[J]. IEEE Communications Magazine, 2013, 51(6): 62-68.
14. 李小兵, 张庭园, 宋涛, 李靖. 移动中继通信技术综述[J]. 电子科技, 2014, 27(11): 185-188.
15. J. Kokkoniemi, J. Ylitalo, P. Luoto, S. Scott, J. Leinonen and M. Latva-aho. Performance evaluation of vehicular LTE mobile relay nodes[C]//2013 IEEE 24th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC), London, UK, 2013: 1972-1976.
16. J. Xu et al.. Robust Optimal Power Control and Subcarrier Allocation in Uplink OFDMA Network With Assistance of Mobile Relay[J]. IEEE Access, 2021 9(6): 57475-57485.
17. N. Nomikos, M. S. Talebi, T. Charalambous and R. Wichman. Bandit-Based Power Control in Full-Duplex Cooperative Relay Networks With Strict-Sense Stationary and Non-Stationary Wireless Communication Channels[J]. IEEE Open Journal of the Communications Society, 2022, 3(6): 366-378.
18. A. S. Behbahani and A. M. Eltawil. Amplify-and-Forward Relay Networks Under Received Power Constraint[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(11): 5422-5426.
19. B. Wang, Z. Han and K. J. R. Liu. Distributed Relay Selection and Power Control for Multiuser Cooperative Communication Networks Using Stackelberg Game[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2009, 8(7): 975-990.
20. J. Park, H. H. Choi and J. R. Lee. Flocking-Inspired Transmission Power Control for Fair Resource Allocation in Vehicle-Mounted Mobile Relay Networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(1): 754-764.
21. Z. Xue, J. Wang, G. Ding and Q. Wu. Joint 3D Location and Power Optimization for UAV-Enabled Relaying Systems[J]. IEEE Access, 2018, 6(6): 43113-43124.
22. Q. Song, F. C. Zheng, Y. Zeng and J. Zhang. Joint Beamforming and Power Allocation for UAV-Enabled Full-Duplex Relay[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(2): 1657-1671.
23. R. Zhang, C. C. Chai and Y. C. Liang. Joint Beamforming and Power Control for Multiantenna Relay Broadcast Channel With QoS Constraints[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2009, 57(2): 726-737.
24. H. Halabian, A. Zainaldin and I. Lambadaris. Optimal Joint Resource Allocation and Power Control in Bidirectional Relaying Networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2014, 63(9): 4520-4535.
25. W. Wang, S. Jin, X. Gao, K. K. Wong and M. R. McKay. Power Allocation Strategies for Distributed Space-Time Codes in Two-Way Relay Networks[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2010, 58(10): 5331-5339.
26. W. Zhong, G. Chen, S. Jin and K. K. Wong. Relay Selection and Discrete Power Control for Cognitive Relay Networks via Potential Game[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2014, 62(20): 5411-5424.
27. Z. Zheng, L. Song, D. Niyato and Z. Han. Resource Allocation in Wireless Powered Relay Networks: A Bargaining Game Approach[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(7): 6310-6323.
28. Z. Yuan, Y. Yang, Y. Hu and X. Ma. Channel-Aware Potential Field Trajectory Planning for Solar-Powered Relay UAV in Near-Space[J]. IEEE Access, 2020, 8(6): 143950-143961.
29. M. T. Mamaghani and Y. Hong. Intelligent Trajectory Design for Secure Full- Duplex MIMO-UAV Relaying Against Active Eavesdroppers: A Model-Free Reinforcement Learning Approach[J]. IEEE Access, 2021, 9(6): 4447-4465.
30. Z. Sun, D. Yang, L. Xiao, L. Cuthbert, F. Wu and Y. Zhu. Joint Energy and Trajectory Optimization for UAV-Enabled Relaying Network With Multi-Pair Users[J]. IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, 2021, 7(3): 939-954.
31. Q. Hu, Y. Cai, A. Liu, G. Yu and G. Y. Li. Low-Complexity Joint Resource Allocation and Trajectory Design for UAV-Aided Relay Networks With the Segmented Ray-Tracing Channel Model[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2020, 19(9): 6179-6195.
32. M. T. Mamaghani and Y. Hong. Terahertz Meets Untrusted UAV-Relaying: Minimum Secrecy Energy Efficiency Maximization via Trajectory and Communication Co-Design[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2022, 71(5): 4991-5006.
33. X. Jiang, Z. Wu, Z. Yin, W. Yang and Z. Yang. Trajectory and Communication Design for UAV-Relayed Wireless Networks[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2019, 8(6): 1600-1603.
34. L. Guo, X. Ji and S. Zhang. Energy-efficient full-duplex UAV relaying with trajectory optimization and power control in maritime communication environments[J]. China Communications, 2022, 19(12): 216-231.
35. B. Li, R. Zhang and L. Yang. Joint User Scheduling and UAV Trajectory Optimization for Full-Duplex UAV Relaying[C]//ICC 2021 - IEEE International Conference on Communications, Montreal, QC, Canada, 2021: 1-6.
36. W. Song, F. Zeng, J. Hu, Z. Wang and X. Mao. An Unsupervised-Learning-Based Method for Multi-Hop Wireless Broadcast Relay Selection in Urban Vehicular Networks[C]//2017 IEEE 85th Vehicular Technology Conference (VTC Spring), Sydney, NSW, Australia, 2017: 1-5.
37. N. Gupta and S. Jain. Dynamic Relay Assisted Clustering in WSN[C]//2018 Global Wireless Summit (GWS), Chiang, Rai, Thailand, 2018: 33-36.
38. R. Mukhopadhyay, S. Neogy and S. Chattopadhyay. Dynamic Relay Selection using a Greedy Cluster Strategy[C]//2020 IEEE International Conference on Advanced Networks and Telecommunications Systems (ANTS), New, Delhi, India, 2020: 1-4.
39. M. G. Khafagy, M. S. Alouini and S. Aïssa. On the performance of future full-duplex relay selection networks[C]//2015 IEEE 20th International Workshop on Computer Aided Modelling and Design of Communication Links and Networks (CAMAD), Guildford, UK, 2015: 11-16.
40. Y. F. Huang, H. C. Chen, L. M. Wang and J. W. Guo. Performance of Energy Efficient Relay and Minimum Distance Clustering for Wireless Sensor Networks[C]//2011 Fifth International Conference on Innovative Mobile and Internet Services in Ubiquitous Computing, Seoul, Korea (South), 2011: 408-413.
41. N. Aslam, W. Robertson, W. Phillips and S. C. Sivakumar. Relay Node Selection in Randomly Deployed Homogeneous Clustered Wireless Sensor Networks[C]//2007 International Conference on Sensor Technologies and Applications (SENSORCOMM 2007), Valencia, Spain, 2007: 418-423.
42. S. Mirbolouk, M. Valizadeh, M. C. Amirani and S. Ali. Relay Selection and Power Allocation for Energy Efficiency Maximization in Hybrid Satellite-UAV Networks With CoMP-NOMA Transmission[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2022, 71(5): 5087-5100.
43. Z. Peng and X. Li. Relay Selection Based on Mobile Social Networks Integrated with Cluster Relationship for Device to Device Communications[C]//2019 12th International Congress on Image and Signal Processing, BioMedical Engineering and Informatics (CISP-BMEI), Suzhou, China, 2019: 1-6.
44. J. Ji, K. Zhu, D. Niyato and R. Wang. Joint Trajectory Design and Resource Allocation for Secure Transmission in Cache-Enabled UAV-Relaying Networks With D2D Communications[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(3): 1557-1571.
45. J. Ji, K. Zhu, C. Yi and D. Niyato. Energy Consumption Minimization in UAV-Assisted Mobile-Edge Computing Systems: Joint Resource Allocation and Trajectory Design[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(10): 8570-8584.
46. M. Hua, L. Yang, C. Pan and A. Nallanathan. Throughput Maximization for Full-Duplex UAV Aided Small Cell Wireless Systems[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2020, 9(4): 475-479.
47. Y. J. Chen, W. Chen and M. L. Ku. Trajectory Design and Link Selection in UAV-Assisted Hybrid Satellite-Terrestrial Network[J]. IEEE Communications Letters, 2022, 26(7): 1643-1647.
48. S. Shuanglong et al.. Study on Group Control Charging System and Cluster Control Technology of Electric Vehicle[C]//2018 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), Beijing, China, 2018: 1-8.
49. K. Tian, B. Duo, S. Li, Y. Zuo and X. Yuan. Hybrid Uplink and Downlink Transmissions for Full-Duplex UAV Communication With RIS[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2022, 11(4): 866-870.
50. S. M. Park, D. Y. Kim, K. W. Kim and J. W. Lee. Joint Antenna and Device Scheduling in Full-Duplex MIMO Wireless-Powered Communication Networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(19): 18908-18923.
51. K. Zhou and T. M. Lok. Optimal Power Allocation for Relayed Transmission through a Mobile Relay Node[C]//2010 IEEE 71st Vehicular Technology Conference, 2010: 1-5.
52. Z. Han, A. L. Swindlehurst and K. J. R. Liu. Optimization of MANET connectivity via smart deployment/movement of unmanned air vehicles[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(7): 3533-3546.
53. P. Zhan, K. Yu and A. L. Swindlehurst. Wireless Relay Communications with Unmanned Aerial Vehicles: Performance and Optimization[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2011, 47(3): 2068-2085.
54. Y. Zeng, R. Zhang and T. J. Lim. Throughput Maximization for UAV-Enabled Mobile Relaying Systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 2016, 64(12): 4983-4996.
55. A. A. Khuwaja, Y. Chen, and G. Zheng. Effect of user mobility and channel fading on the outage performance of UAV communications[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2020, 9(3): 367–370.
56. Z. Zhao, G. Xu, N. Zhang and Q. Zhang. Performance Analysis of the Hybrid Satellite-Terrestrial Relay Network With Opportunistic Scheduling Over Generalized Fading Channels[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2022, 71(3): 2914-2924.
57. S. Sennan, S. Ramasubbareddy, S. Balasubramaniyam, A. Nayyar, C. A. Kerrache and M. Bilal. MADCR: Mobility aware dynamic clustering-based routing protocol in Internet of Vehicles[J]. China Communications, 2021, 18(7): 69-85.
58. B. Zhu, E. Bedeer, H. H. Nguyen, R. Barton and J. Henry. Joint Cluster Head Selection and Trajectory Planning in UAV-Aided IoT Networks by Reinforcement Learning With Sequential Model[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(14): 12071-12084.
59. N. Nasaruddin, E. D. Meutia and R. Adriman. Outage Probability and Power Efficiency of Quantize-and-Forward Relay in Multi-hop D2D Networks[C]//2020 2nd International Conference on Broadband Communications, Wireless Sensors and Powering (BCWSP), 2020: 183-188.
60. S. Zhang, H. Zhang, Q. He, K. Bian and L. Song. Joint Trajectory and Power Optimization for UAV Relay Networks[J]. IEEE Communications Letters, 2018, 22(1): 161-164.
61. D. H. Ho and T. A. Gulliver. Power Allocation in Cellular Networks Based on Outage Probability and Normalized SINR[J]. IEEE Transactions on Green Communications and Networking, 2020, 4(3): 783-793.
62. B. Li, S. Zhao, R. Zhang, H. Zhang, H. Wang and L. Yang. Joint Transmit Power and Trajectory Optimization for Two-Way Multi-Hop UAV Relaying Networks[C]//2020 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops), 2020: 1-5.
63. H. Xiao, Y. Chen, Q. Zhang, A. T. Chronopoulos, Z. Zhang and S. Ouyang. Joint Clustering and Power Allocation for the Cross Roads Congestion Scenarios in Cooperative Vehicular Networks[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2019, 20(6): 2267-2277.
64. A. H. Gazestani, S. A. Ghorashi, Z. Yang and M. Shikh-Bahaei. Joint Optimization of Power and Location in Full-Duplex UAV Enabled Systems[J]. IEEE Systems Journal, 2022, 16(1): 914-921.
65. A. Hajihoseini Gazestani, S. A. Ghorashi, Z. Yang and M. Shikh-Bahaei. Resource Allocation in Full-Duplex UAV Enabled Multismall Cell Networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2022, 21(3): 1049-1060.
66. D. H. Tran, V. D. Nguyen, S. Chatzinotas, T. X. Vu and B. Ottersten. UAV Relay-Assisted Emergency Communications in IoT Networks: Resource Allocation and Trajectory Optimization[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2022, 21(3): 1621-1637.
67. B. Mahboobi and M. Ardebilipour. Joint Power Allocation and Routing in Full-Duplex Relay Network: An Outage Probability Approach[J]. IEEE Communications Letters, 2013, 17(8): 1497-1500.

# 攻读硕士学位期间承担的科研任务与主要成果

**(一)参与的科研项目**

1. 参与，国家自然科学基金项目

**(二)发表的学术论文**

1. Zhixin Liu, Qiulai Tian, Yuanai Xie, and Kit Yan Chan. Outage probability minimization for vehicular networks via joint clustering, UAV trajectory optimization and power allocation[J]. Ad Hoc Networks, 2023, 140: 103060-103070.(中科院SCI三区)

# 致 谢

随着毕业论文的完成，三年的硕士生涯也步入了尾声，忆往昔，酸甜苦辣，悲喜交加。感慨科研道路之辛酸、学有所获之甘甜、攻坚克难之苦涩、美好经历之热辣，悲的是分离，喜的是成长，千思万绪化作无尽的感激。

首先，感谢导师刘志新教授对我学业上巨大的支持。刘教授对学术一丝不苟的精神、对科研敏锐的洞察力和对工作认真负责的态度令学生十分敬佩。对于研究生培养，刘教授经常毫不吝啬的指导我们学习，聆听我们的想法、发现我们的不足、提出新的见解。对于每周例行的组会，不论疫情不论风雪，刘教授总能以线上和线下的形式准时参加，与我们开展积极的讨论，营造了良好的学术氛围。在撰写论文方面，刘教授反复的帮我审阅，从格式到内容都为我提供了可行的修改意见，使我能够顺利发表小论文和完成毕业论文。

其次，感谢家人为我提供坚实的后备保障，能够让我心无旁骛的投入到学习中去，正是家人的关心和照顾才能让我一次次的克服困难。感谢女朋友张伟一为我带来的情绪价值，能够让我以心平气和的态度应对学习中的压力，以热情饱满的状态迎接生活中的挑战，正是她的陪伴才能让我百折不挠。

再次，感谢好友李晨生、赵军、顾清、孙明昊、郝晓楠、耿绍宸等对我生活上的关心，并为我带来了很多的快乐。感谢课题室同一届的队友李晨生、高杰、张嘉元、齐峻霄、陈熙、祝犇、金小曹与我共同面对学习上的困难。感谢师兄谢元艾、李晓频、孟祥云对我论文上的帮助。感谢师兄高磊、祝珩、王永康、苏佳伟、张心哲、赵松晗、刘子健、杨红磊、袁瑞贺、师姐李亚萍、刘沫彤等对我的照顾。感谢师弟魏建帅、仵元梓、梁自强、李博、郑晓阳、师妹李彩月等带来的温暖。

然后，感谢电气工程学院，电气工程学院的老师有着很强的专业素养，他们在各自的领域发光发热，在科研上精益求精，在工作上高度负责，在生活上关爱同学，感谢每一位曾经帮助过我的老师。

最后，感谢燕山大学，是燕山大学让我有了这段硕士生涯，感谢在这里经历的每一件事，感谢在这里遇到的每一个人。