



燕山大学
YANSHAN UNIVERSITY

硕士学位论文

MASTER'S DISSERTATION

(学 术 学 位)

论文题目 高动态环境下车联网通信资源联合优化分配的研究

作者姓名 魏建帅

学科专业 控制科学与工程

指导教师 刘志新 教授

2023 年 6 月

中图分类号：O226

UDC：517

学校代码：10216

密级：公开

学术学位硕士学位论文

高动态环境下车联网通信资源联合优化分配 的研究

硕 士 研 究 生：魏建帅

导 师：刘志新 教授

申 请 学 位：工学硕士

学 科 专 业：控制科学与工程

所 属 学 院：电气工程学院

答 辩 日 期：2024 年 6 月

授予学位单位：燕山大学

A Dissertation in Control Science and Engineering

**RESEARCH OF JOINT OPTIMAL ALLOCATION OF
COMMUNICATION RESOURCES FOR VEHICLE
NETWORKING IN HIGHLY DYNAMIC
ENVIRONMENTS**

by Wei Jianshuai

Supervisor: Professor Liu Zhixin

Yanshan University

June, 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《高动态环境下车联网通信资源联合优化分配的研究》，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： 年 月 日

燕山大学硕士学位论文使用授权书

《高动态环境下车联网通信资源联合优化分配的研究》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 年解密后适用本协议书。

本学位论文属于

不保密 ☐。

（请在以上对应方框内打“✓”）

作者签名： 日期： 年 月 日

导师签名： 日期： 年 月 日

摘 要

近年来，5G 技术逐步商用化，无线通信技术的快速发展和应用为车联网通信的研究带来了巨大的机遇和挑战。5G 移动技术可有效满足车联网的需求，为车联网的发展带来更好的解决方案。但与此同时，由于 5G 技术信道状态的复杂性以及车联网中移动用户的随机性使得诸多不确定因素共存于系统之中，如用户数量、信道状态、拓扑切换、可用信息以及用户信息安全等方面。可见这种高动态环境对于车联网无线可靠传输提出了新的挑战。本项目将针对 5G 车联中的干扰管理与资源分配以及多种服务指标保证，围绕上述三个学术问题展开研究。重点关注如何克服车联网中不确定因素对网络资源管理效率的影响，提高系统鲁棒性。本项目研究将为建立适应复杂高动态，高密度网络环境的资源管理协议奠定基础，对于提高无线频谱资源利用效率，优化网络性能，推动 5G 网络技术发展具有重要的促进作用。本项目侧重研究通信网络节能优化管理，研究成果可服务于信息产业无线通信领域，符合湖北省产业升级、绿色崛起的发展需求。

关键词： 无人机通信；吞吐量；中断概率；边缘计算；轨迹优化；任务卸载

Abstract

This is the abstract of your paper and it should be ...

This is the abstract of your paper and it should be This is the abstract of your paper and it should be ...

Keywords: Photonic crystal fiber; dispersion; birefringence; genetic algorithm; finite element method; terahertz UAV relay; Throughput; Outage probability; Relay selection; Power control; Trajectory optimization

目 录

摘 要	I
ABSTRACT	II
第 1 章 绪论	1
1.1 课题的研究背景及意义	1
1.2 国内外研究现状	1
1.2.1 无线协作网络功率控制	2
1.2.2 无人机中继轨迹优化	2
1.2.3 中继选择与聚类算法	2
1.3 研究动机	2
1.3.1 车辆非密集网络通信快速性	2
1.3.2 车辆密集网络通信可靠性	2
1.3.3 双工车联网的可靠性和快速性均衡	3
1.4 论文结构安排	3
第 2 章 车联网技术的网络资源优化理论基础	4
2.1 相关技术的理论基础	4
2.1.1 NOMA 技术的理论基础	4
2.1.2 CR 技术的理论基础	4
2.1.3 MEC 技术的理论基础	4
2.2 相关优化理论概述	4
2.2.1 凸优化理论	4
2.2.2 博弈论	5
2.3 本章小结	6
第 3 章 云辅助的车辆网络功率控制与任务卸载	7
3.1 引言	7
3.2 系统模型与问题描述	7
3.2.1 通信模型	7
3.2.2 车辆计算模型	7
3.2.3 问题的定义	7
3.3 问题的求解	8
3.3.1 目标方程中的连续凸逼近方法	8

3.3.2 中断概率的近似	8
3.3.3 优化功率问题	9
3.3.4 计算资源分配	9
3.4 仿真结果和性能分析	9
3.5 本章小结	9
3.6 表格的引用	10
3.7 本章小结	10
第 4 章 联合无人机轨迹优化和定价的鲁棒功率控制方法.....	11
4.1 引言	11
4.2 系统模型	11
4.2.1 通信模型与能耗模型	12
4.2.2 问题的定义	13
4.3 能效最大化问题求解	14
4.3.1 概率约束的近似与车辆发射功率优化问题.....	14
4.3.2 无人机飞行轨迹规划问题	16
4.3.3 总体算法设计	17
4.4 算法与仿真验证	17
4.5 本章小结	17
结 论	19
参考文献.....	20
攻读硕士学位期间承担的科研任务与主要成果	21
致 谢	22

第 1 章 绪论

可以不写

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，随着道路交通过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]。

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]。

1.2.1 无线协作网络功率控制

打开 chap-intro.tex 文件。该文件对应论文的第一章“绪论”。然后输入如下内容：

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。

1.2.3 中继选择与聚类算法

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。

1.3 研究动机

论文的框架分为：章节条款等，分别由下列一些命令生成。由\chapter{}生成章标题，由\section{}生成节标题，由\subsection{}生成条标题，由\subsubsection{}生成款标题。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

1.3.1 车辆非密集网络通信快速性

论文的框架分为：章节条款等，分别由下列一些命令生成。由\chapter{}生成章标题，由\section{}生成节标题，由\subsection{}生成条标题，由\subsubsection{}生成款标题。

1.3.2 车辆密集网络通信可靠性

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。

1.3.3 双工车联网的可靠性和快速性均衡

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。其中的参数 “[width=\textwidth]” 指定图形的宽度 0.6 倍页宽。最后的效果如图1-1所示。

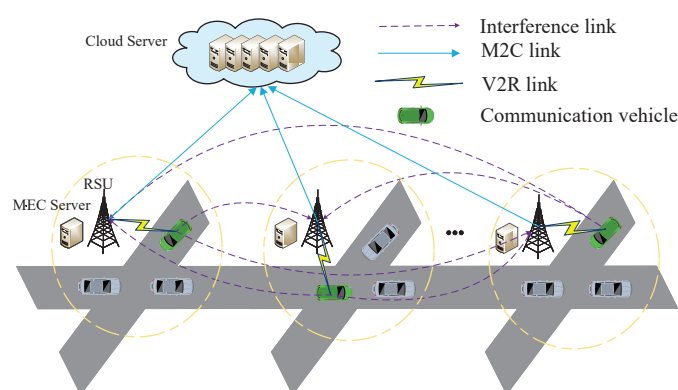


图 1-1 单个居中图形

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。

注意！第一章不要有“本章小结”!!!

第2章 车联网技术的网络资源优化理论基础

插图主要涉及到：单个居中图形；两个并排图形；两个以上的并排或者堆叠的图形；图题；图形的引用；

2.1 相关技术的理论基础

2.1.1 NOMA 技术的理论基础

大多数情况下，需要插入的图形是单个的时候可以使用如下环境：

```
\begin{figure}[hptb!]  
  \centering\small  
  \includegraphics[width=0.6\textwidth]{ysulogo}  
  \Figcaption{单个居中图形}\label{ysulogo}  
\end{figure}
```

2.1.2 CR 技术的理论基础

其中的参数 “[width=\textwidth]” 指定图形的宽度 0.6 倍页宽。最后的效果如图2-1所示。



图 2-1 单个居中图形

2.1.3 MEC 技术的理论基础

2.2 相关优化理论概述

2.2.1 凸优化理论

下列代码在文中插入两个并排的图形。它使用了一个称作 `minipage` 的环境。在同一行插入两个并排的 `minipage`，每个 `minipage` 包含一个图形。图中 `minipage` 的参数 “[0.5\linewidth]” 指定 `minipage` 的宽度是当前正文页面的 0.5 倍（一半）。而插图命令中的参数 “[width=\textwidth]” 则是指定插图的宽度为当前 `minipage` 的宽度。如

果这个插图命令是在 `minipage` 环境外边的话，参数中的“`\textwidth`”的宽度为当前正文页面的宽度。

```
\begin{figure}[hptb!]
  \centering\small
  \begin{minipage}[t]{0.5\linewidth}
    \centering
    \includegraphics[width=\textwidth]{chp-2_bessel_j}
    (a) 子图a图题子图a图题子图a图题
  \end{minipage}%
  \begin{minipage}[t]{0.5\textwidth}
    \centering
    \includegraphics[width=\textwidth]{chp-2_bessel_k}
    (b) 子图b图题子图b图题子图b图题
  \end{minipage}
  \Figcaption{两个并排图形}\label{fig-dbfig}
\end{figure}
```

2.2.2 博弈论

最终结果如图2-2所示。

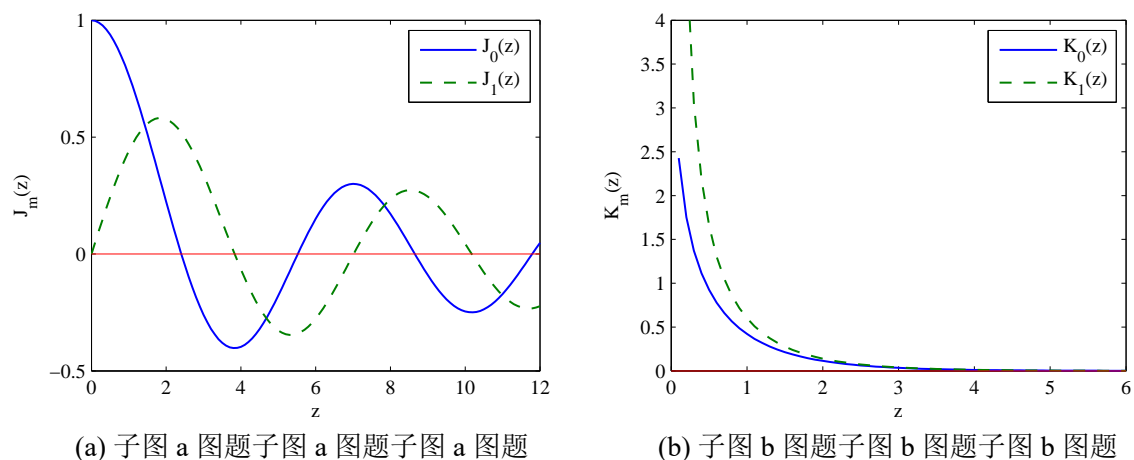


图 2-2 两个并排图形

2.3 本章小结

同样是使用 `minipage` 的方法，只不过排列的方式不同。例如 4 幅堆叠排列的图形。

第3章 云辅助的车辆网络功率控制与任务卸载

3.1 引言

移动边缘计算和云计算作为 5G 中的两个新兴技术，被越来越多的提出被用于低延时高可靠性的物联网设备，尤其是车联网系统中。边缘服务器位于网络的边缘，可以减少传输时延并且这也是本模板要解决的问题。

科技文献中常用的三线表：

3.2 系统模型与问题描述

在本研究中，C-MEC 车辆网络如图 1 所示

3.2.1 通信模型

由于车辆移动的快速性

3.2.2 车辆计算模型

3.2.3 问题的定义

表 3-1 燕山大学硕士学位论文参考文献规则

论文版本	参考文献标准	实施年份（年）
旧版	BF7714-87	1987
新版	GBT7714-2005	2005

实现代码如下：

```
\begin{table}[htbp!]
\centering\small
\Tablecaption{燕山大学硕士学位论文参考文献规则}\label{tab:ysubof}
\begin{tabular}{llr}
\toprule
论文版本      & \& 参考文献标准      & \& 实施年份（年）      & \\\
\midrule
旧版          & \& BF7714-87          & \& 1987                  & \\\
新版          & \& GBT7714-2005       & \& 2005                  & \\\
\bottomrule
\end{tabular}
```

```
\end{tabular}
\end{table}
```

3.3 问题的求解

合并列通常见于表格的第一行，在适当的位置使用`\multicolumn`命令即可。

3.3.1 目标方程中的连续凸逼近方法

表 3-2 带有合并列的三线表

Item		
Animal	Description	Price (\$)
Gnat	per gram	13.65
	each	0.01
Gnu	stuffed	92.50
Emu	stuffed	33.33
Armadillo	frozen	8.99

3.3.2 中断概率的近似

该表格是采用如下代码实现的：

```
\begin{table}[htbp!]
\centering\small
\Tablecaption{带有合并列的三线表}\label{tab:test}
\begin{tabular}{llr} \toprule
\multicolumn{2}{c}{Item} \\\cmidrule(r){1-2}
Animal & Description & Price (\$)\\\midrule
Gnat & per gram & 13.65 \\
& each & 0.01 \\
Gnu & stuffed & 92.50 \\
Emu & stuffed & 33.33 \\
Armadillo & frozen & 8.99 \\\bottomrule
\end{tabular}
\end{table}
```

3.3.3 优化功率问题

3.3.4 计算资源分配

3.4 仿真结果和性能分析

```

\begin{table}[htbp!]
\centering\small
\Tablecaption{The relation of  $E(\{L\}_q)$  with  $\{p\}_2$  and  $\theta$ \label{tab.2}
\begin{tabular*}{\columnwidth}{@{\extracolsep{\fill}}@{~}cccccccc@{~}}
\toprule
\multicolumn{7}{c}{\hspace{2cm} The expected waiting queue length}
 $E(\{L\}_q)$ \\
\cline{2-8}
\raisebox{1ex}[0pt]{ $\theta$ } &  $p_2=0.1$  &  $p_2=0.15$  &  $p_2=0.2$  &  $p_2=0.25$  &  $p_2=0.3$  &  $p_2=0.35$  &  $p_2=0.4$ \\
\midrule
0.3 & 16.4830 & 5.1232 & 2.9232 & 1.9704 & 1.4339 & 1.0886 & 0.8479\\
0.5 & 9.0488 & 3.7848 & 2.2906 & 1.5839 & 1.1723 & 1.9035 & 0.7146\\
0.7 & 7.4321 & 3.3256 & 2.0528 & 1.4338 & 1.0686 & 0.8291 & 0.6607\\
\bottomrule
\end{tabular*}
\end{table}

```

生成

表 3-3 The relation of $E(L_q)$ with p_2 and θ

θ	The expected waiting queue length $E(L_q)$						
	$p_2 = 0.1$	$p_2 = 0.15$	$p_2 = 0.2$	$p_2 = 0.25$	$p_2 = 0.3$	$p_2 = 0.35$	$p_2 = 0.4$
0.3	16.4830	5.1232	2.9232	1.9704	1.4339	1.0886	0.8479
0.5	9.0488	3.7848	2.2906	1.5839	1.1723	1.9035	0.7146
0.7	7.4321	3.3256	2.0528	1.4338	1.0686	0.8291	0.6607

3.5 本章小结

在本章中，我们提出了一个新颖的鲁棒功率控制算法，优化方法针对于保证车辆通信的 QoS 的同时最大化效用。由于信道不确定性的存在，其实上边的例子中已

经包含了表题的引用命令`\Tablecaption`。例如表3-1中：

```
\Tablecaption{燕山大学硕士学位论文参考文献规则}\label{tab:ysubof}
```

为当前的表格添加中文图题“燕山大学硕士学位论文参考文献规则”。同时添加标签“tab:ysubof”。对表格的引用就是通过标签来实现的。

3.6 表格的引用

表格的引用同样也是使用`\ref{}`命令实现的。例如“表`\ref{tab:ysubof}`”输出的结果为：表3-1。 \LaTeX 会自动将其替换为表格的编号。例如：

燕山大学硕士学位论文参考文献规则的表格如表`\ref{tab:ysubof}`所示。

的效果如下：

燕山大学硕士学位论文参考文献规则的表格如表3-1所示。

3.7 本章小结

注意！从第二章开始应有“本章小结”，主要总结本章所做的主要研究工作，研究成果等内容!!!

第4章 联合无人机轨迹优化和定价的鲁棒功率控制方法

4.1 引言

在前一个章节中，主要研究了车联网的地面通信网络，然而随着城市化建设的加深，道路网络越来越复杂，车辆的地面通信网络容易受到建筑物的遮挡，同时地面基站也难以覆盖越来越多的通信车辆。因此本章研究了作为前沿通信技术的无人机作为空中基站辅助车联网通信，并着重考虑了更加实际的双向车道的场景。无人机具有灵活与高机动性的特性，可以更好地解决如今越来越复杂的通信网络。由于本文考虑的车辆环境均为高速移动场景，固定轨迹的无人机难以适应实时变化网络拓扑环境，因此实时优化无人机的飞行的航迹有助于提高辅助车辆通信的服务质量。此外，无人机飞行与作为空中基站时均为耗能设备，所以整个系统的能量效率也应备受关注。

综上所述，本章研究了一个双向车道下无人机辅助车辆网络能效最大化的场景，在这个网络中，车辆高速行驶于双向的高速公路上，地面基站位于道路的一侧，随着对向行驶的车辆的高速移动，向右行驶的车辆会逐渐驶出当前通信小区，无法与地面基站进行通信，此时，无人机可作为空中基站以接收车辆通信信号。无人机以固定的高度平行于道路进行无障碍飞行，我们提出的算法可以实时的判断当前时隙车辆如何选择通信对象使得系统的能量效率最大化。本章的贡献可以做出如下总结：首先，本章提出了一种无人机辅助双向车道场景下规划无人机航迹的系统模型，为了提高整个网络系统的能量效率，我们采用丁克尔巴赫方法与定价机制使得系统在最小的能耗下可以最大化总吞吐量，为了保证地面车辆用户的服务质量，在优化问题中建立了时变的车辆移动模型下的概率约束，尽可能地描述信道的不确定性。

4.2 系统模型

本章考虑了一个天地一体化网络，其中车辆行驶于双向的高速公路上，无人机从基站附近起飞，缓存基站提供的资源供道路上的车辆下载，因为是双向车道，基站位于坐标原点，高度为 h_0 ，路边单元 RSU 的位置我们规定向右为正方向，定义车道索引 $L = 1$ 为车辆向右行驶， $L = -1$ 为向左行驶，由于基站位置固定，随着时间的推移，不可避免地存在一个方向的车辆会远离基站，势必影响其通过基站获取信息，此时，无人机向着基站的右方飞去，进而帮助远离基站的车辆获取需要的信息。

为了决策道路上的车辆需要从无人机还是基站获取信息，我们根据由一阶马尔可夫过程预测到车辆到基站的信道状态信息与车辆与空中基站无人机视距链路得到的信道状态信息分别得出车辆与两个数据中中心通信的信噪比，车辆会选择信噪比较大的一方请求资源， $x_m[t] = 1$ 为车辆选择无人机进行通信，反之车辆选择基站进行通信。

在时隙 t 内，无人机的水平坐标为 $q_U[t] = \{x_u[t], y_u[t]\}$ 无人机在距离路面高度为 H 进行无障碍飞行，其飞行最大速度为 V_{max} ，车辆 M 的初始水平位置为 $q_M[0] = \{x_0, y_0\}$ ，假设车辆以速度 v 匀速直线行驶，根据之前定义的车道索引可以得出车辆 M 在第 t 时刻的水平位置变化为 $x_m[t] = x_0 + lvt$ ，车辆 M 的水平位置 $q_M = \{x_m[n], y_0\}$ 根据位置信息我们可以得到在第 t 时刻的距离信息车辆 M 在 t 时隙与路边单元的距离为 $d_{m,R}[t] = \|q_M[t] - q_R\| = \sqrt{x_m[t]^2 + y_0^2 + H^2}$ ，车辆 M 在 t 时隙与无人机的距离为 $d_{m,U}[t] = \|q_M[t] - q_U[t]\| = \sqrt{(x_m[t] - x_u[t])^2 + (y_m[t] - y_u[t])^2 + H^2}$ 。系统模型如图4-1所示。

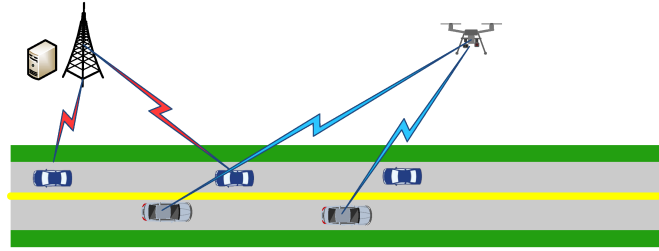


图 4-1 无人机的系统模型

4.2.1 通信模型与能耗模型

由于车辆移动的快速性,对于车辆与路边单元的 V2I 通信,构建类似于前一张的一阶马尔可夫过程,在第 t 时刻的信道状态信息由前一时刻的状态预测得出,即

$$h_m = \widetilde{h}_m^2 + \widehat{h}_m^2, \quad (4-1)$$

这里的 \widetilde{h}_m 是一个观测值, \widehat{h}_m 是一个服从参数为 $a = \frac{1}{L_{i,j}^k (1 - \epsilon_{i,j}^k)}$ 的指数分布。在第 t 个时隙,地面基站收到的第 m 辆车的信噪比 (SNR) 可以表示为:

$$\gamma_{m,R}[t] = \frac{p_m[t] h_{m,R}[t]}{\sigma^2} \quad (4-2)$$

根据香农容量定理,车辆向地面基站的传输速率可以表示为:

$$R_{m,R}[t] = \log_2 (1 + \gamma_{m,R}[t]) \quad (4-3)$$

车辆向地面基站传输的数据量可以表示为,

$$L_{m,R} = B_0 \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T x_m[t] R_{m,R}[t], \quad (4-4)$$

其中 B_0 表示带宽, $x_m[t] = 1$ 表示车辆当前时刻选择向地面基站传输数据, $x_m[t] = 0$ 反之。车辆向空中基站无人机通信时的传输能耗计算如下:

$$E_{m,R} = \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T x_m[t] p_m[t] \quad (4-5)$$

对于车辆与无人机之间的通信中间没有障碍物遮挡, 属于视距链路, 构建了空中射频链路模型, 在第 t 个时隙, 第 m 个车辆到无人机的信道增益为

$$h_{m,U}[t] = \frac{\varsigma_0}{d_{m,U}[t]^2} \quad (4-6)$$

这里的 ς_0 为单位距离 1 米下的功率增益, 通过以上信息, 无人机到车辆的传输速率为

$$R_{m,U}[t] = \log_2(1 + \gamma_{m,U}[t]), \quad (4-7)$$

其中

$$\gamma_{m,U}[t] = \frac{p_m[t] h_{m,U}[t]}{\sigma^2}, \quad (4-8)$$

表示车辆到无人机通信的信噪比, 车辆向无人机空中基站传输的数据量可以表示为

$$L_{m,U} = B_0 \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T x_m R_{m,U}[t], \quad (4-9)$$

其中 B_0 表示带宽, 车辆向空中基站无人机通信时的传输能耗计算如下:

$$E_{m,U} = \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T y_m[t] p_m[t] \quad (4-10)$$

4.2.2 问题的定义

在本节中, 我们为无人机辅助的双向车道车辆制定了能效最大化问题。我们的目的是通过联合优化双向车道上的车辆的发射功率以及无人机的轨迹来使得系统的总能效最大化。首先, 该网络通信系统的能效定义为

$$EE(\mathbf{P}, \mathbf{Q}) = \frac{L_m(\mathbf{P}, \mathbf{Q})}{E_m(\mathbf{P})} \quad (4-11)$$

式中的 $L_m = L_{m,R} + L_{m,U}$ 是车辆向地面基站与空中基站发送的总的数据量, $E_{m,R}$ 与 $E_{m,U}$ 分别是车辆与地面基站空中基站的能量消耗。由于无人机飞行过程中会有能量

的消耗, 因此我们会更加关注车辆与无人机通信时的能耗问题, 并考虑空中基站通信与地面基站通信的能量权衡, 因此系统的总功耗表示为 $E_m = (1 - \theta)L_{m,R} + \theta L_{m,U}$, 其中 $0 \leq \theta \leq 1$ 是车辆与无人机通信时的能量成本的权重系数。当 θ 较大时意味着我们更加关注无人机的能耗成本。最终的系统能效最大化问题如下表述:

$$\max_{\mathbf{P}, \mathbf{Q}} EE(\mathbf{P}, \mathbf{Q}) \quad (4-12)$$

$$\text{s.t. } \Pr \{x_m[t] \gamma_{m,R}[t] + y_m[t] \gamma_{m,U}[t] \geq \gamma_{th}\} \geq 1 - \varepsilon_3, \forall m, t \quad (4-12-1)$$

$$q_U^{n+1} - q_U^n \leq t V_{max}, \forall m \quad (4-12-2)$$

$$x_m[t] + y_m[t] = 1, \forall m \quad (4-12-3)$$

$$0 \leq p_m[t] \leq p_{max}, \forall m \quad (4-12-4)$$

上式子中的(4-12-1)表示了保证车辆通信的中断概率约束来保证服务质量, 无人机的飞行轨迹受到(4-12-2)的约束, 式子(4-12-3)给出了车辆最大最小发射功率的约束, γ_{th} 是信噪比的阈值为一个固定值。

4.3 能效最大化问题求解

在本节中, 上一章节的能效最大化问题会分解为两个子问题进行求解。对于难以求解的分式规划, 可以使用丁克尔巴赫方法将其转化为易于求解的减式规划进行求解。首先固定车辆的发射功率后求解无人机的飞行轨迹, 然后固定无人机的飞行轨迹再求解车辆的发射功率, 如此进行交替迭代优化, 直至算法收敛。注意到前一节中问题(4-12)是一个非凸的问题, 我们提出了一种联合功率分配与无人机轨迹规划的方案来有效地处理这个问题, 将问题(4-12)解耦成两个子问题。

4.3.1 概率约束的近似与车辆发射功率优化问题

在前一节的式(4-12-1)中我们发现车辆的功率功率在概率约束中存在较为复杂的耦合关系, 是难以直接求解的, 针对这种情况, 我们将采用积分变换的方式将复杂的概率约束问题转化为较为简单的形式。

定理: 对于(4-12-1), 车辆用户的中断概率约束

$$\Pr \{x_m[t] \gamma_{m,R}[t] + y_m[t] \gamma_{m,U}[t] \geq \gamma_{th}\} \geq 1 - \varepsilon_3$$

等价于:

$$p_m[t] x_m[t] \ln(1 - a\varepsilon_3) + (\gamma_{th} - y_m[t] \gamma_{m,U}[t]) a\sigma^2 \leq a p_m[t] x_m[t] \widehat{h}_m[t] \quad (4-13)$$

证明:

$$\begin{aligned} \frac{x_m[t] p_m[t] h_{m,R}[t]}{\sigma^2} &\geq \gamma_{th} - y_m[t] \gamma_{m,U}[t] \\ \Leftrightarrow p_m[t] \widetilde{h}_m[t] &\geq \frac{(\gamma_{th} - y_m[t] \gamma_{m,U}[t]) \sigma^2}{x_m[t]} - p_m[t] \widehat{h}_m[t] \end{aligned} \quad (4-14)$$

因此车辆用户的中断概率约束做出重新表述如下:

$$\begin{aligned} \Pr \{x_m[t] \gamma_{m,R}[t] + y_m[t] \gamma_{m,U}[t] \geq \gamma_{th}\} &\geq 1 - \varepsilon_3 \\ \Leftrightarrow \Pr \left\{ \widetilde{h}_m[t] \geq \frac{(\gamma_{th} - y_m[t] \gamma_{m,U}[t]) \sigma^2}{p_m[t] x_m[t]} - \widehat{h}_m[t] \right\} &\geq 1 - \varepsilon_3 \end{aligned} \quad (4-15)$$

由于随机变量 \widetilde{h} 的概率密度函数为 $f_x = e^{-ax}$, 通过积分变换可得:

$$\int_0^{\frac{(\gamma_{th} - y_m[t] \gamma_{m,U}[t]) \sigma^2}{p_m[t] x_m[t]} - \widehat{h}_m[t]} e^{-ax} dx \leq \varepsilon_3 \quad (4-16)$$

$$\Leftrightarrow p_m[t] x_m[t] \ln(1 - a\varepsilon_3) + (\gamma_{th} - y_m[t] \gamma_{m,U}[t]) a \sigma^2 \leq a p_m[t] x_m[t] \widehat{h}_m[t]$$

为了表达方便, 我们定义 $\gamma_{m,U}[t] = p_m[t] \eta_{m,U}[t]$, 其中 $\eta_{m,U}[t] = h_{m,U}[t] / \sigma^2$, 将式子(4-16)改写为:

$$p_m[t] x_m[t] \ln(1 - a\varepsilon_3) + (\gamma_{th} - y_m[t] p_m[t] \eta_{m,U}[t]) a \sigma^2 \leq a p_m[t] x_m[t] \widehat{h}_m[t] \quad (4-17)$$

在求解车辆发射功率的过程中, 需要每个时隙都要进行功率分配与无人机轨迹规划并进行多次迭代, 关于车辆发射功率 $p_m[t]$ 的子问题如下描述:

$$\max_{\mathbf{P}} = \frac{L_m(\mathbf{P})}{(1 - \theta)E_{m,R}(\mathbf{P}) + \theta E_{m,R}(\mathbf{P})} \quad (4-18)$$

$$\text{s.t. (4-12-1), (4-12-4)} \quad (4-18-1)$$

注意到问题(4-18)是一个分式规划问题, 为了将其转化为减式规划问题, 拟采用丁克尔巴赫方法求解。

$$\begin{aligned} F(\chi) = \max_{\mathbf{P}} \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M B_0 x_m^{\{l\}}[t] \log_2 \left(1 + p_m[t] \eta_{m,R}^{\{l\}}[t] \right) \\ + \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M B_0 x_m^{\{l\}}[t] \log_2 \left(1 + p_m[t] \eta_{m,U}^{\{l\}}[t] \right) \end{aligned} \quad (4-19)$$

$$- \chi \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M (1 - \theta) x_m^{\{l\}}[t] p_m[t] + \theta y_m^{\{l\}}[t] p_m[t]$$

$$\text{s.t. (4-12-1), (4-12-4)} \quad (4-19-1)$$

上式中的 $\eta_{m,R}^{[l]}[t] = h_{m,R}[t]/\sigma^2$, $\eta_{m,U}^{[l]}[t] = h_{m,U}[t]/\sigma^2$ 在每 l 次迭代时视为常数, 对于凸问题(4-19), 我们可以构建拉格朗日函数并运用拉格朗日对偶法进行求解:

$$\begin{aligned}
 L(\mathbf{p}, \lambda) & \quad (4-20) \\
 &= \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M B_0 x_m^{[l]}[t] \log_2 \left(1 + p_m[t] \eta_{m,R}^{[l]}[t] \right) + \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M B_0 x_m^{[l]}[t] \log_2 \left(1 + p_m[t] \eta_{m,U}^{[l]}[t] \right) \\
 &\quad - \chi \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M (1 - \theta) x_m^{[l]}[t] p_m[t] + \theta y_m^{[l]}[t] p_m[t] \\
 &\quad - \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M \lambda_{m,t} \left((\gamma_{th} - y_m[t] p_m[t] \eta_{m,U}^{[l]}[t]) a \sigma^2 - a p_m[t] x_m[t] \widehat{h}_m[t] + p_m[t] x_m[t] \ln(1 - a \varepsilon_3) \right)
 \end{aligned}$$

其中的拉格朗日乘子 $\lambda_{m,t} \geq 0$, 则(??)的拉格朗日对偶函数表示为:

$$D(\lambda) = \max_{0 \leq p_m[t] \leq P_{\max}} L(\mathbf{p}_m, \lambda) \quad (4-21)$$

其中(??)的对偶问题为:

$$\min_{\lambda_{m,t} \geq 0} D(\mathbf{p}_m, \lambda) \quad (4-22)$$

4.3.2 无人机飞行轨迹规划问题

通过前一节求得车辆功率的分配时, 对于无人机轨迹的优化问题可以如下求解: 当每次迭代的车辆发射功率 $\{P_m^{[l]}\}$ 和无人机的轨迹 $\{Q^{[l]}\}$ 给定后, 关于无人机的轨迹的优化描述如下:

$$\max_{\mathbf{Q}} = \frac{L_{m,R} + L_{m,U}(\mathbf{Q})}{(1 - \theta)E_t^{R,\{l\}} + \theta E_t^{U,\{l\}}} \quad (4-23)$$

$$\text{s.t. (4-12-2)} \quad (4-23-1)$$

其中,

$$L_{m,U}(\mathbf{Q}) = \log_2 \left(1 + \frac{\varphi_{m,U}^{[l]}[t]}{\|q_M[t] - q_U[t]\| + H^2} \right) \quad (4-24)$$

这里的 $\varphi_{m,U}^{[l]}[t] = \frac{p_m^{[l]}[t] \zeta_0}{\sigma^2}$, 我们注意到问题(4-23)目标函数的分子部分是非凹问题, 拟采用连续凸逼近方法对目标函数进行近似。在 $q^{[l]}[t]$ 的局部点处, 对式(4-23)的分

子部分的对数形式进行一阶泰勒展开，过程如下：

$$\begin{aligned} & \log_2 \left(1 + \frac{\varphi_{m,U}^{(l)}[t]}{\|q_M[t] - q_U[t]\| + H^2} \right) \\ & \geq \left(\omega_m^{(l)}[t] \|q_M[t] - q_U[t]\|^2 - \|q_M[t] - q_U^{(l)}[t]\|^2 + \rho_m^{(l)}[t] \right) \\ & \triangleq R_{m,U}^{(l)}(\mathbf{q}[t]) \end{aligned} \quad (4-25)$$

其中，

$$\omega_m^{(l)}[t] = \frac{-\varphi_{m,U}^{(l)}[t]}{\ln 2 \left(\|q_M[t] - q_U^{(l)}[t]\|^2 + H^2 \right)} \cdot \frac{1}{\|q_M[t] - q_U^{(l)}[t]\|^2 + H^2 + \varphi_{m,U}^{(l)}[t]} \quad (4-26)$$

并且，

$$\rho_m^{(l)}[t] = \log_2 \left(1 + \frac{\varphi_{m,U}^{(l)}[t]}{\|q_M[t] - q_U^{(l)}[t]\| + H^2} \right) \quad (4-27)$$

问题(4-23)进一步转化为：

$$\begin{aligned} \max_{\mathbf{Q}} &= \frac{L_{m,R} + \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M B_0 y_m^{(l)}[t] R_{m,U}^{(l)}(\mathbf{q}[t])}{(1 - \theta) E_t^{R,\{l\}} + \theta E_t^{U,\{l\}}} \\ \text{s.t.} & \text{ (4-12-2)} \end{aligned} \quad (4-28)$$

(4-28-1)

至此，问题(4-23)的非凸问题部分转化成了凸的可解的形式，可以使用凸优化工具箱 CVX 求解。

4.3.3 总体算法设计

4.4 算法与仿真实验

在本章中，我们提出了一个新颖的鲁棒功率控制算法，优化方法针对于保证车辆通信的 QoS 的同时最大化效用。由于信道不确定性的存在，其实上边的例子中已经包含了表题的引用命令`\Tablecaption`。例如表4-1中：为当前的表格添加中文图题“燕山大学硕士学位论文参考文献规则”。同时添加标签“`tab:ysubof`”。对表格的引用就是通过标签来实现的。

4.5 本章小结

表格的引用同样也是使用`\ref{}`命令实现的。例如“表`\ref{tab:ysubof}`”输出的结果为：表4-1。 \LaTeX 会自动将其替换为表格的编号。例如：4的效果如下：

表 4-1 系统仿真参数

参数	数值
无人机高度	100
地面基站高度	5
地面基站高度面基站高度面基站高度面基站高度	5

注意！从第二章开始应有“本章小结”，主要总结本章所做的主要研究工作，研究成果等内容!!!

燕山大学硕士学位论文参考文献规则的表格如表4-1所示。

结 论

结论作为学位论文正文的组成部分，单独排写，不加章标题序号，不标注引用文献。结论内容一般在 2000 字以内。

结论应是作者在学位论文研究过程中所取得的创新性成果的概要总结，不能与摘要混为一谈。结论应包括论文的主要结果、创新点、展望三部分，在结论中应概括论文的核心观点，明确、客观地指出本研究内容的创新性成果（含新见解、新观点、方法创新、技术创新、理论创新），并指出今后进一步在本研究方向进行研究工作的展望与设想。对所取得的创新性成果应注意从定性和定量两方面给出科学、准确的评价，分 (1)、(2)、(3)……条列出，宜用“提出了”、“建立了”等词叙述。此外，结论的撰写还应符合以下基本要求：

(1) 结论具有相对的独立性，不应是对论文中各章小结的简单重复。结论要与引言相呼应，以自身的条理性、明确性、客观性反映论文价值。对论文创新内容的概括，评价要适当。

(2) 结论措辞要准确、严谨，不能模棱两可，避免使用“大概”、“或许”、“可能是”等词语。结论中不应有解释性词语，而应直接给出结果。结论中一般不使用量的符号，而宜用量的名称。

(3) 结论应指出论文研究工作的局限性或遗留问题，如条件所限，或存在例外情况，或本论文尚难以解释或解决的问题。

(4) 常识性的结果或重复他人的结果不应作为结论。

参考文献

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.
- [2] 参与，河北省自然科学基金重点项目.

(二) 发表的学术论文

- [1] 第二作者 [J]. Computer Networks, 2024.

致 谢

时光荏苒，岁月如梭，这是我在燕山大学的第三个年头首先衷心感谢导师 ××× 教授对本人的精心指导。他的言传身教将使我终生受益。

感谢 ××× 教授，以及实验室全体老师和同窗们的热情帮助和支持！

本课题承蒙 ×××× 基金资助，特此致谢。感谢评审专家抽出宝贵的时间…