

西南科技大学

Southwest University of Science and Technology

本科毕业设计（论文）

题目名称：无人机辅助安全通信网络中的轨迹设计和资源分配

学院名称	计算机科学与技术学院
专业名称	信息安全
学生姓名	李凌宇
学号	5120188088
指导教师	张尚伟 副教授（校外）
	彭安杰 副教授
	曾辉 副研究员

二〇二二年六月

西南科技大学

本科毕业设计（论文）学术诚信声明

本人郑重声明：所呈交的毕业设计（论文），是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

作者签名：

日期： 年 月 日

西南科技大学

本科毕业设计（论文）版权使用授权书

本毕业设计（论文）作者同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权西南科技大学可以将本毕业设计（论文）的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本毕业设计（论文）。

保密☐，在____年解密后适用本授权书。

本论文属于

不保密☐。

（请在以上方框内打“√”）

作者签名：

指导教师签名：

日期： 年 月 日

日期： 年 月 日

无人机辅助安全通信网络中的轨迹设计和资源分配

摘要：基于无人机和终端直通技术（Device-to-Device, D2D）的空地协同通信是当今移动通信领域的热点研究问题。由于无线信道以及空地视距通信链路的开放性，使得无人机和 D2D 通信链路面临着被动窃听以及隐私泄露等安全传输问题，受到了国内外研究学者的广泛关注。为了增强空地协同网络数据传输安全性，本文从物理层安全角度着手，研究无人机辅助通信网络中用户调度、无人机发射功率以及飞行轨迹的联合优化问题，以最大化整个通信系统的最小保密率。为了更加贴近真实场景，本文在系统模型中同时考虑了无人机移动性及窃听者位置的不确定性等因素。然而，基于该模型所形成的优化问题是非凸的，无法对其直接进行求解。为此，本文使用了连续凸近似法来对原问题进行简化和分解，将优化问题划分为用户调度子问题、功率分配子问题和无人机轨迹设计子问题，并通过交替迭代法对优化问题进行求解。最后，仿真的结果进一步地证明了提出方法的有效性，即在窃听者位置不确定的情况下能够有效提升系统保密通信性能。

关键词：无人机；飞行轨迹优化；D2D 通信；凸优化

Trajectory design and resource allocation in UAV aided safety communication network

Abstract: Cooperative air-ground communication based on device-to-device (D2D) technology is a hot research problem in the field of mobile communication today. Due to the openness of wireless channels and air-ground line-of-sight communication links, the UAV and D2D communication links face security transmission problems such as passive eavesdropping and privacy leakage, which have received extensive attention from domestic and foreign researchers. In order to enhance the data transmission security of air-ground cooperative network, this thesis studies the joint optimization problem of user scheduling, UAV transmitting power and flight trajectory in UAV-assisted communication network from the perspective of physical layer security to maximize the minimum secrecy rate of the whole communication system. In order to be closer to the real scenario, the system model in this thesis considers both the UAV mobility and the uncertainty of the eavesdropper's location. However, the optimization problem formed based on this model is non-convex and cannot be solved directly. In this thesis, we use the successive convex approximation method to simplify and decompose the original problem, divide the optimization problem into user scheduling subproblem, power allocation subproblem and UAV trajectory design subproblem, and solve optimization problem by alternating iteration method. Finally, the simulation results further demonstrate the effectiveness of the proposed method, i.e., it can effectively improve the system's confidential communication performance under the uncertainty of the eavesdropper's location.

Key words: unmanned aerial vehicle; flight trajectory optimization; D2D communication; convex optimization

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 国内外研究现状	2
1.3 主要研究内容	4
1.4 本文组织结构	5
第 2 章 基于 D2D 和无人机的空地协同安全通信相关技术	6
2.1 基于 D2D 和无人机的空地协同网络	6
2.1.1 D2D 通信技术	6
2.1.2 无人机通信	8
2.1.3 空地协同网络的物理层安全通信	9
2.2 凸优化	10
2.2.1 凸优化基本理论	10
2.2.2 连续凸近似法	10
2.3 本章小结	11
第 3 章 无人机中继网络下行安全通信方案研究	12
3.1 引言	12
3.2 下行网络系统模型与优化问题的形式化定义	12
3.2.1 下行网络模型	12
3.2.2 下行信道模型	14
3.2.3 优化问题的形式化定义	16
3.3 无人机下行网络安全通信方案设计	17
3.3.1 用户调度方案设计	18
3.3.2 无人机发射功率分配方案设计	18
3.3.3 无人机飞行轨迹方案设计	19
3.4 本章小结	21
第 4 章 安全通信方案数值仿真及结果分析	22
4.1 实验设置	22

4.2 实验流程	23
4.3 仿真实验结果	25
4.4 实验结果分析	30
4.5 本章小结	32
结论	33
致谢	34
参考文献	35

第1章 绪论

1.1 研究背景及意义

在当今这个互联网时代,通信技术的发展日新月异,随着第五代移动通信技术(5G技术)的大规模商用以及基于移动通信的各种新兴应用场景的层出不穷,现有的移动通信系统不仅仅需要满足大量设备的联网需求,还需要满足高速率、低功耗和低时延的通信需求,以及更高的频谱效率要求^[1]。传统的移动通信网络依赖于基站这一基础设施,若由于自然灾害等原因导致电力供应中断或是基站损坏,相应区域的网络通信会受到影响甚至是瘫痪。而基站的建设和运行维护成本较高,在一些人口密度低的区域或是只是暂时有较高通信需求的区域建设基站不仅可能会造成成本大于收益的情况,还会造成一定程度的资源浪费。随着通信技术的发展,用户对服务质量和用户体验的要求也在日益提高,如何在保证服务质量和用户体验的前提下提供低成本、高效率的通信支持是一个值得思考的问题。

无人机在当今社会有着非常广泛的应用,在各行各业都有无人机“辛勤工作”的身影。具体来说,在军事方面,无人机可作为侦察机、靶机甚至是投放战略武器的“特种兵”使用,因此它已经成为现代战争中不可或缺的一部分。无人机不仅可以作为“特种兵”,还可以成为警察们的得力助手,警用无人机可以辅助警察执行边防检查、森林防火、交通监管以及人流控制等工作,为警员的工作提供了极大的便利。不仅如此,无人机也可以用来做电力巡检、喷洒农药、调查地形地貌、运送物品等工作,在生产生活的方方面面都有着广泛的应用场景。近年来,无人机通信网络引起了专家学者们的关注,将无人机作为网络中继的通信手段使得在一些特殊的紧急情况下快速搭建通信系统成为可能,例如发生地震、海啸等自然灾害时,电力可能无法正常供应,依赖电力运行的基站无法为用户终端提供服务,亦或是由于基站因自然灾害而损坏,导致了通信大面积瘫痪,严重影响救援工作的开展。此时使用无人机可以快速搭建临时基站,恢复受灾区域的通信,为搜救工作的开展提供帮助。

由此可见,无人机已经遍布我们生产生活中的方方面面,其强大的功能能够为我们带来许多便利,并且不难看出在大部分应用场景下我们需要和无人机进行实时通信来控制无人机以及和无人机交换信息。由无人机组成的高/低空通信平台作为一种新兴的无线接入手段,应用涉及军事、民用、应急通信等多个领域,是目前全球通信网络领域的研究热点。尽管无人机能够灵活地提供广覆盖、大容量、高可靠的通信服务,但在现实应

用中由于无线通信固有的开放性特征,通信过程容易遭到监听而导致信息泄露,面临着严重的安全威胁,针对无人机的安全攻击事件层出不穷^[2]。例如在 2011 年,美国的一架无人机在伊朗领空飞行,伊朗军方使用某种 GPS 欺骗手段使这架无人机直接降落在了伊朗东北部的区域,随后伊朗军方直接截获了这架无人机,并且从中获得了不少技术和军事机密。又如在 2013 年,美国一名黑客设计了一款名为“SkyJack”的无人机,它能够通过无线信号入侵其他无人机并进行破坏,成功入侵后可以接管其他无人机的摄像头和控制系统,这无疑对他人的隐私和财产安全造成了极大的威胁。视线转回到国内,在 2018 年,国内某地出现无人机“乱码”事件,1000 多架无人机同台演出,本计划给观众带来一场前所未有的视觉盛宴,但由于不明原因,约 500 台无人机没有按照预先制定好的路线飞行,甚至有些无人机出现了坠落的现象,这不仅令观众大失所望,更有可能威胁到观众的人身安全。后有专家分析该事件的成因,发现无人机定位系统可能受到了干扰,不排除恶意攻击的可能性。在第十三届全运会开幕式上也出现过“五环变四环”的类似事件。这些事件警示我们,无人机虽然有着丰富的应用场景,但是如果避无人机通信安全而不谈,那么无人机将会成为安全防护性十分脆弱的“薄壳鸡蛋”,它们一旦被成功攻击,不仅可能导致涉密信息泄露,严重的情况下还会威胁到人民的生命财产安全甚至是国家安全。因此,如何构建无人机安全通信网络,保障无人机的通信安全是一个亟待解决的问题。传统的提供数据保密性的方法是利用加密算法对要传递的信息进行加密,加密后的信息即使被攻击者截获,其也很难获取到密文中的有效信息。而传统的加密方法复杂度较高,无法大规模应用到能量和运算能力受限的无人机通信系统中,这已经成为限制无人机通信业务广泛开展的严重障碍。作为增强无线通信安全的新手段,物理层安全技术利用物理层信道特性来实现信息的保密传输,而空地视距(LoS)信道的存在和灵活的移动性使得无人机通信在物理层安全性能方面拥有巨大的潜力^[2]。因此,如何充分利用物理层安全技术特点以及无人机部署灵活的特性,充分发掘无人机辅助空地无线安全通信的更大潜力是目前国际研究的前沿热点问题。本研究拟通过合理设计规划无人机的飞行轨迹、优化用户调度以及调整无人机的发射功率分配来增强空地通信链路的保密容量,从而提升整个空地网络通信安全性。

1.2 国内外研究现状

由于广阔的区域覆盖性、能够快速部署、高灵活性和成本低廉等特征,无人机辅助通信在民用,商用和军用领域有着丰富的应用场景和广阔的发展空间^[3]。

近年来,很多研究都着眼于在无人机辅助通信网络中因窃听者的存在而引发的安全问题^[4]。具体来说,许多方法通过优化无人机的飞行轨迹和资源分配方案来增大合法信道和窃听信道之间的性能差距,从而提高了无人机的保密率^[5]。文献^[6]中的作者将无人机的飞行轨迹和资源分配进行联合优化来最大化无人机通信的累计保密率,在其中,无人机试图在窃听者存在的情况下将保密信息从源位置传递到目标位置。为了在多用户存在的网络环境下最大化最小保密率,文献^[7]中的作者提出了一个对无人机飞行轨迹和功率分配进行联合优化的算法。文献^[8]中的作者提出了一个在无人机网络中最大化保密能效的最优轨迹方案。

目前无人机通信安全领域已有丰富的研究成果。但上述研究成果均来自于外文文献,我国对无人机通信安全领域的理论研究起步较晚,研究成果相对较少。文献^[9]提出了一种基于 Q-learning 算法的保障无人机通信系统安全的飞行轨迹在线优化方法,通过持续优化无人机飞行轨迹来增强无人机应对通信环境变化的能力。文献^[10]联合地面用户调度、无人机运动轨迹以及传输功率分配因子,同时引入了人工噪声辅助的方式来建立安全通信方案。文献^[11]从单输入单输出(SISO)和多输入多输出(MIMO)考虑了无人机中继通信系统物理安全性的改善问题,提出基于凸优化理论的无人机中继节点发射功率与飞行轨迹联合优化方案。文献^[12]的作者研究了关于无人机通信安全的物理层关键技术,提出了基于 Q-learning 算法中继选择策略、两种安全波束成形方案以及优化了系统的隐蔽通信性能。可见目前已有许多关于通过优化无人机飞行轨迹和资源分配来提高无人机通信保密性能的研究成果。

D2D 通信技术允许在一定范围内的用户通信设备之间进行直接的通信,不仅有利于降低服务基站的负荷、能够对无线通信系统频谱资源匮乏的问题有一定的缓解作用,还能提高通信网络的服务质量和用户体验。它是 4G 技术中的一项关键技术,并且也将在 5G 时代得以普及。作为一个通信技术方面的研究热点,关于 D2D 通信的研究成果非常丰富。文献^[13]将 D2D 通信技术和解码转发模式结合,提出了一种能够显著提高系统通信性能的结合解码转发和中继的 D2D 通信模式。文献^[14]的作者分析了在蜂窝网络中存在多 D2D 用户组情况下的网络通信效率,提出了通过优化频谱和功率分配来最大化网络平均可达率的方法。文献^[15]引入人工噪声,通过在 D2D 网络下对通信信号和噪声功率的联合优化来最大化系统的保密率总和。文献^[16]提出了一种智能超表面辅助 D2D 通信的资源分配方案,并创新性地提出了一种能够显著提高系统保密率的基于并行卷积神经网络辅助 D2D 保密通信系统资源分配算法。文献^[17]提出了一种基于斯坦伯格博弈的

信道和功率联合优化算法以及其他两种算法使得 D2D 网络能效获得显著提升。可见在网络技术迅猛发展的今天,在当前通信系统的发展形势下,D2D 通信技术已经占据了一席之地。在通信系统中引入 D2D 技术能够给研究带来更多的现实意义和实用价值。

物理层安全是本研究的理论基础。其提出主要源于功率受限而对安全性又有较高要求的设备的出现与发展。由于计算能力的不断提高,需要有更加复杂的加密算法被提出来保证加密信息不容易泄露,但由于能源受限,这些复杂的加密算法很难应用于一些移动设备上。那么能不能不引用加密算法,而是通过信道本身的性质来保障保密信息的安全传输呢?这就是物理层安全的首要问题。随着无人机、星载设备等移动设备在生产生活中的应用日趋增加,物理层安全的地位也在通信安全领域迅速上升,针对物理层安全的研究也如雨后春笋般涌现出来。文献^[18]用物理层安全的方法分析了如何保障卫星和空中接收器之间的通信安全。文献^[19]在多跳中继网络中引入全双工中继,允许中继用户在收到信息的同时向窃听者发射干扰信号,并证明这种方法能够显著增强无线物理层的安全性。文献^[20]提出了一种基于双基站的物理层安全方案,该方案能够确保数据流只在合法用户所在特定位置正确解调,从而提升了系统的安全性。文献^[21]基于多阶迭代干扰对齐提出了一种抵御被动式恶意攻击的物理层安全防范方案,该方案与传统的半双工 D2D 通信相比能够提供两倍的系统容量。文献^[22]的作者提出了一种无人机中继辅助的认知无线电网络安全传输方案,通过优化中继无人机的飞行轨迹、发射功率来实现保密率最大化。

综上所述,国内外在无人机通信安全领域、D2D 通信领域和物理层安全领域都已具有丰富的研究成果存在,但将 D2D 通信技术和无人机辅助通信技术结合,并在物理层安全角度考虑上述无人机辅助通信网络方面的研究较少。

1.3 主要研究内容

虽然无人机具有通信覆盖范围广,部署方便灵活,维护成本低廉等优势,但是其缺点也非常明显,其中最显著的缺点在于无人机载荷有限,导致其作正常工作续航时间较短,很难覆盖整个服务范围。现有研究大多是针对无人机空地网络的带宽分配、部署位置和飞行轨迹等开展研究工作。并且现有的研究工作存在以下显著特点:地面用户的角色较为单一,在大多数现有研究中地面用户仅仅作为一个被动接收无人机信息的被服务的角色。

本研究在此基础上拟考虑将终端直通技术(D2D 技术)集成到空地网络中,通过

D2D 通信建立直接通信链路来进一步扩大覆盖范围,从而提高整个网络的灵活性。引入 D2D 通信技术不仅使得一些地面用户能够承担中继的角色,将保密信息传递给临近的 D2D 用户,使地面用户的角色更加多样化的同时,也提高了通信网络的灵活性,同时引入 D2D 通信技术的通信网络也更加符合当今通信大环境的要求,更加贴合实际的情况。针对该网络,拟在基于用户调度、无人机功率控制和轨迹设计的基础上开展安全通信性能优化研究。首先建立无人机辅助的下行安全通信系统模型,在增加对窃听者位置的不确定性的考虑下,给出优化问题和优化目标,在此基础上通过交替迭代法将问题转化为用户调度子问题、无人机功率优化子问题和无人机轨迹优化子问题,并通过连续凸近似方法对问题进行求解。最后通过仿真实验验证并说明所提优化算法在提高无人机空地通信网络安全性方面的先进性和有效性。

1.4 本文组织结构

本文对无人机辅助安全通信网络中的轨迹设计和资源分配的研究分为以下四个章节:

第一章:介绍无人机辅助安全通信的研究背景和意义、国内外研究现状以及不足之处,并介绍了本文的改进和研究内容。

第二章:介绍了基于 D2D 和无人机的空地协同安全通信的相关技术,对 D2D 通信、无人机通信、空地协同网络物理层安全通信以及凸优化理论进行了简单的介绍。

第三章:对基于 D2D 技术和无人机的空地协同安全通信网络中的下行安全通信进行了研究,提出了最大化系统最小保密率的优化问题,给出了问题的形式化定义,并运用连续凸近似方法将优化问题转化为可解的凸优化问题。

第四章:对优化问题进行了实验仿真,给出了实验参数、实验流程以及仿真结果,并通过对实验结果的分析验证了本文提出方案的有效性。

第 2 章 基于 D2D 和无人机的空地协同安全通信相关技术

2.1 基于 D2D 和无人机的空地协同网络

2.1.1 D2D 通信技术

在传统的蜂窝移动通信网络中,终端设备与终端设备之间的通信只能通过核心网络,简单来说,即使两个设备之间的距离非常小,它们之间的通信也必须经过基站的中继,这种方式限制了通信的灵活性,造成了用户之间数据交换能力的瓶颈,因此需要应用新的通信技术来突破这一瓶颈,D2D 通信技术能够很好地解决这一问题^[23]。不难想象,在现实的通信网络中,终端设备往往呈现集聚性特征,而 D2D 通信技术则可以利用通信设备的物理邻近性使得环境中蜂窝网络的覆盖范围增大,可以很好地补充传统蜂窝网络的不足之处,因而可以在车联网、物联网等新兴热门领域得到广泛的应用。图 2-1 和图 2-2 分别展示了在存在集聚分布的通信用户的情况下,传统蜂窝网络和引入了 D2D 技术的通信网络的简单模型示意图。

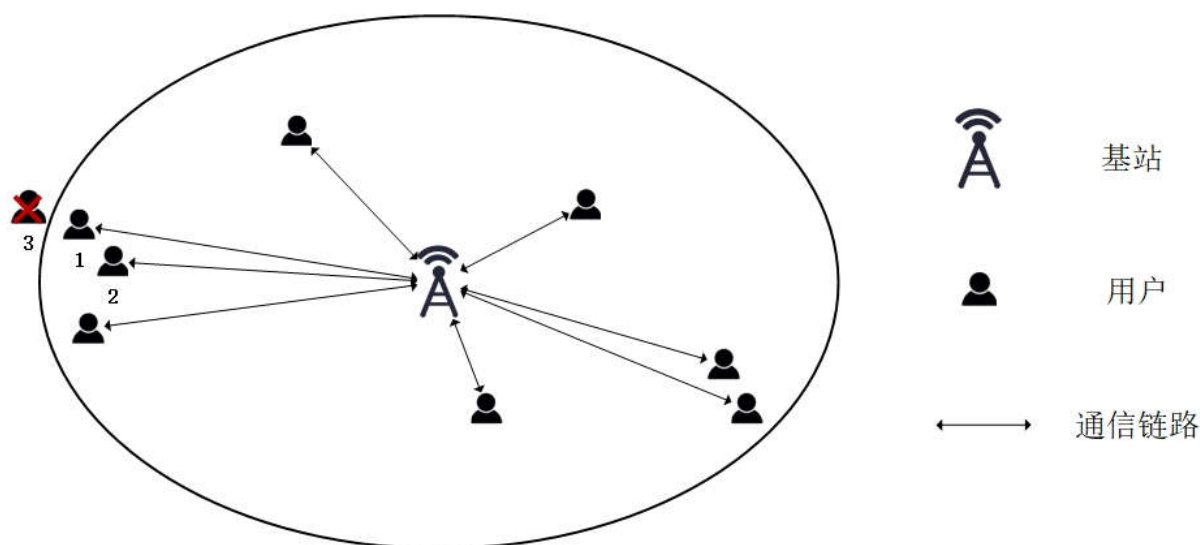


图 2-1 传统蜂窝网络模型示意图

图中的椭圆表示基站信号的覆盖范围,位置在此范围内的用户可以与基站进行通信,反之则无法进行通信。对比分析图 2-1 和图 2-2,我们不难发现,当用户 1 和用户 2 之间需要通信时,在传统蜂窝网络模型下,其中一个用户需要先将数据发送给基站,再由基站转发给另一用户,这种方式效率较低,同时也造成了基站负担的增加。而在引入了 D2D 通信技术后,距离较近的用户 1 和用户 2 可以直接建立 D2D 信道进行通信,这样的通信方式能够降低通信过程中信号由于建筑物等障碍物的遮挡而衰落的可能性,能够

提高通信质量,同时还能够降低基站的负担。不仅如此,D2D 通信还能够扩大蜂窝网络的覆盖范围。如图 2-1 所示,用户 3 在传统蜂窝网络下,其位置不在基站服务范围内,因此无法接入通信网络,也就无法和其他用户进行通信,但在图 2-2 中,由于引入了 D2D 技术,用户 3 可以和距离其较近的用户 1 建立 D2D 链路,经过用户 1 的中继,用户 3 也能够接入该蜂窝网络实现通信,这相当于是扩大了蜂窝网络的覆盖范围。图中用虚线绘制的圆圈表示可与用户 1 建立 D2D 通信链路的范围,而该圆未与实线椭圆相交的部分就表示引入 D2D 技术可以扩大的蜂窝网络覆盖范围,当然这只是对用户 1 而言的。同时当用户 1 需要和距离较近的用户 2 进行通信时,可以直接与用户 2 建立 D2D 链路,通过该链路直接和用户 2 进行数据交换,而无需通过基站进行中继,这样不仅能够提高通信的质量,还有利于提高通信网络的灵活性。

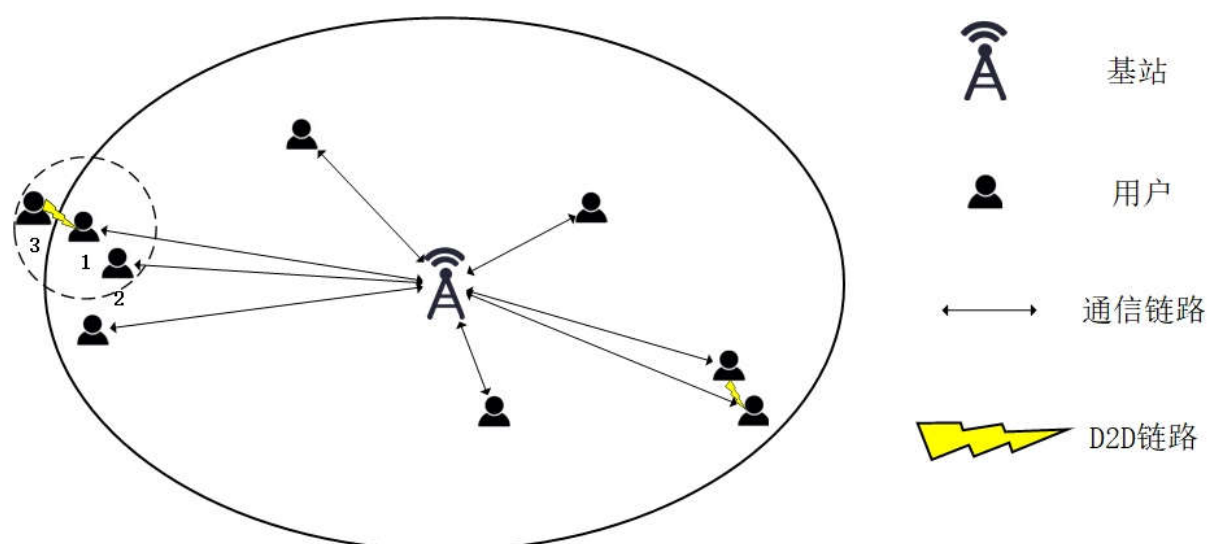


图 2-2 引入 D2D 技术的通信网络模型示意图

简单来说,D2D 通信技术是一种允许两个设备间的通信不依赖基站进行中继,而是能够直接进行通信的技术^[24]。具体来说,D2D 技术具有以下几个显著的特点^[23-25]。第一个特点是短距离通信。D2D 技术允许在物理位置上相近的两个设备之间建立直连通信信道,能够有效地降低由于障碍物阻挡造成的阴影衰落,因此可以提高通信服务的质量,提供更高的传输速率和更低的时延。第二个特点是低成本。D2D 技术可以使用 ZigBee、WiFi-Direct、Bluetooth 等多种轻量级短距离通信技术,实现近距离设备的直连通信。蓝牙技术目前已经得到了非常广泛的使用,使用蓝牙可以方便地在设备之间传输文件、音频等信息,现在市面上的蓝牙耳机价格低至百元以下,蓝牙模块低成本的优点显而易见,而这些短距离通信技术和 D2D 通信技术相辅相成,也造就了 D2D 通信技术低成本的特

征。第三个特点是低能耗。与传统的基站通信方式相比,位置接近的设备之间的直连通信所需要的传输功率更低,因此使用 D2D 通信方式能够很好地提高系统的能源效率,能够减少不必要的资源浪费。第四个特点是可扩展性好。D2D 技术除了允许位置接近的设备之间建立直连通信链路,还能够支持两跳甚至是多跳的通信网络,也能够支持全部的单播、多播、组播和广播这几种网络节点间的通讯方式,能够很好地弥补现有网络的不足之处,综合上述的分析,D2D 技术也能够有效地降低蜂窝网络的负担以及扩展蜂窝网络的覆盖范围。

2.1.2 无人机通信

作为一种在近年来异军突起的新兴通信技术,无人机通信网络突破了传统移动通信网络的局限性,以其具有的高机动性,低成本,广覆盖,可快速按需部署等优点,得到了学术界和工业界的广泛认可,同时也吸引了不少专家学者的目光。并且无人机通信网络的身影也开始更经常地在我们的生产生活中出现。

与传统的地面蜂窝通信网络相比,无人机通信网络具有下述几个特点。一是高灵活性和高机动性^[26]。由于无人机可以灵活移动,利用无人机作为基础搭建的无人机通信网络就可以根据无线通信系统的需求,悬停在某一位置或是按照既定路线在某一区域进行巡航来为该区域的用户提供服务,同时还可以根据通信需求的变化动态地调整无人机的运行,让通信网络更加契合用户的通信需求。二是按需和快速部署^[27]。利用无人机通信网络可以在各种紧急或是特殊情况,例如发生自然灾害或是其他险情的情况下快速地搭建其通信基础设施,替代可能由于电力等原因无法正常工作的基站来为该区域的用户提供通信服务。三是更高质量的 LoS 信道^[28]。LoS 即 Line of Sight,可以译为视距信道。不难想象,比起与地面基站进行通信的地面信道,用户和无人机进行通信时所建立的 A2G 信道被障碍物遮挡的可能性更小。四是受限制的资源^[28]。无人机所搭载的电池容量往往非常有限,这直接对无人机的通信能力、计算能力以及续航时间等性能因素造成了限制。同时这也是我们不直接使用传统的加密手段来保证通信过程保密性的原因。目前在无人机通信领域待解决的关键技术问题主要有以下几方面。第一是网络性能解析问题^[29-31]。提到搭建通信系统,如何考量这个通信系统的网络性能一定是一个无法逃避的话题。在无人机通信网络中,为了考量网络的性能指标,需要综合考虑无人机的飞行高度、飞行速度、飞行角度以及 LoS 和 NLoS 信道的差异等因素,对网络覆盖率、吞吐量、时延、丢包率等指标进行分析。第二是信道建模问题。在传统蜂窝网络中,虽然用户位

置实时变化，但基站位置一般是固定的，因此信道情况的变化相对较小。而在无人机通信网络中，无人机的位置可能随时发生改变，也就相当于基站的位置也是灵活可变的，这样会给信道状态带来较大的不稳定性，因此如何建立一个既更加贴近现实情况又便于仿真计算的通信系统模型是一个很重要的问题。

2.1.3 空地协同网络的物理层安全通信

本研究中拟使用物理层安全技术来保障无人机下行中继网络中的数据安全传输。本文中涉及的物理层安全技术，简单来说就是利用无线信道的固有特性，研究如何能够保证合法链路的信道质量比窃听链路的信道质量更优，从而为无线网络带来更好的安全保障。本文选取在安全传输设计中较具代表性的指标——保密容量来对通信系统的安全性进行分析。

要计算保密容量，首先需要计算信道容量。根据香农信息论，信道容量可由以下公式计算得出

$$C = B \log_2(1 + SNR) \quad (2-1)$$

其中， B 为信道带宽（以 Hz 作为单位）， SNR 为信噪比，信噪比又可表示为

$$SNR = \frac{S}{n_0 B} \quad (2-2)$$

其中， S 为信源平均发射功率（以 W 作为单位）， n_0 为噪声功率谱密度（以 W/Hz 作为单位）。信道容量又称可达率。从公式（2-1）和公式（2-2）可以看出，一连续信道能够传输信息量的极限值与信道带宽 B 、信源平均发射功率 S 和噪声功率谱密度 n_0 有关。

而保密容量则可以被理解为是通信系统中要传输的信息被合法接收端接收并且其他接收端无法从中获得有效信息的最大速率。因此，如果定义合法信道的信道容量为 C_A ，窃听信道的信道容量为 C_E ，则保密容量可以表示为以下形式

$$C_s = [C_A - C_E]^+ \quad (2-3)$$

其中 $[x]^+ \triangleq \max(x, 0)$ 。可以看出，当 $C_A > C_E$ 时，即合法信道的信道质量较窃听信道的信道质量好时， $C_s > 0$ ，此时系统可以实现安全通信，否则系统将无法保证信息的安全传输。

2.2 凸优化

2.2.1 凸优化基本理论

凸优化问题是数学规划领域中一个非常经典的问题^[32]。如果能将一个优化问题定义或是转化为凸优化问题，那么就可以使用块坐标下降法等经典凸优化方法对其进行求解。本文中涉及到的优化问题原本是非凸的，就需要对该问题进行转化，使之成为凸优化问题后再运用凸优化方法进行求解。本节对凸优化问题的基本知识——凸集、凸函数等内容进行介绍^[32]。

(1) 凸集：若对任意集合 C 中的任意两点 a, b 以及实数 ω ($0 < \omega < 1$)，有

$$\omega a + (1 - \omega)b \in C \quad (2-4)$$

则称集合 C 是凸集。换句话说，若将集合表示为图，若集合中任意两点间的连线都包含在集合内，则集合为凸集，否则集合为非凸集。

(2) 凸函数：如果函数 f 的定义域为凸集 C ，并且对于属于其定义域内的任意两点 a, b 和满足 $0 < \omega < 1$ 的实数 ω 都有

$$f(\omega a + (1 - \omega)b) \leq \omega f(a) + (1 - \omega)f(b) \quad (2-5)$$

则称函数 f 为凸集 C 上的凸函数。

(3) 凸优化问题：若 $f(x)$ 为定义域为凸集 C 的凸函数，则称形如以下形式的优化问题为凸优化问题

$$(P2.1) : \min f(x) \quad (2-6)$$

$$s.t. \quad x \in C \quad (2-7)$$

2.2.2 连续凸近似法

从理论上说，如果我们能够将一个问题形式化地表示为一个凸优化问题，那么该问题就能够得到解决。但实际上大多数优化问题原本都是非凸的，要解决这样的优化问题就需要对其进行转化后再求解。连续凸近似法是将非凸优化问题转化为凸优化问题的典型方法。该方法通过对非凸的目标函数或者是约束条件进行转化的方式，将整个优化问题转化为凸优化问题。常见的方法有以下几种：

(1) 变形：在不对原表达式进行改变的前提下通过拆分和组合的方式将其变为凸函数或是其他能够进行求解的函数。

(2) 引入松弛变量：在目标函数中引入新变量，并通过对新变量进行限制使目标

函数的新形式与原目标函数等价。

(3) 近似: 通过泰勒展开等方式得到函数的上界或下界, 利用这种方式对原函数进行近似处理。

2.3 本章小结

本章节中的内容是对本论文中涉及到的一些技术原理的概述, 对 D2D 通信技术、无人机通信以及物理层安全通信的基本理论进行了介绍, 最后还介绍了凸优化的基本概念以及本文需要使用到的连续凸近似方法的基本知识, 为本研究后续的模型构建和优化问题的形式化构建以及处理做了铺垫。

第3章 无人机中继网络下行安全通信方案研究

3.1 引言

基于 D2D 通信技术和无人机的空地协同通信网络具有灵活部署、位置可移动、低成本等优点,能够很好地弥补传统蜂窝移动网络的局限性。但由于无线信道的开放特性,通信过程容易遭到窃听,又由于无人机能源受限的特点,传统加密算法无法应用在无人机通信网络的通信过程中以保证数据的保密性,因此数据信息的安全传输成为了在该通信网络中一个新的亟待解决的问题。本章讨论的主要问题就是如何在基于 D2D 通信技术和无人机的空地协同通信网络中保证下行通信过程的安全。在该通信网络中无人机作为移动中继,起到了分发数据信息的作用。任何一个用户可以直接与无人机进行通信,也可以通过 D2D 通信链路来从其他用户处间接获得中继无人机分发的信息。本研究以最大化无人机中继网络的下行通信过程中的最小保密率为优化目标,通过对无人机的飞行轨迹、无人机的功率分配以及用户调度方案进行设计优化来确保下行网络的安全通信。

3.2 下行网络系统模型与优化问题的形式化定义

3.2.1 下行网络模型

图 3-1 为本研究中构建的无人机下行中继网络的系统模型图。该网络中包含一台用作中继设备的通信无人机, M 个地面用户和一个窃听者。该网络中的地面用户可以分为三种角色,分别是无人机用户、混合中继用户和 D2D 用户,每个用户可能不只有一个角色,这也体现了 D2D 通信网络中用户的灵活性。其中,我们定义直接和中继无人机进行通信的用户为无人机用户。另外两种用户则是在 D2D 通信的过程中被定义的,当一个地面用户可以和其位置接近的另一个地面用户建立 D2D 信道并进行数据转发时,将从无人机处接收到的信息转发给另一用户的用户称为混合中继用户,而接收经由 D2D 信道传递的来自无人机的保密数据的用户则称为 D2D 用户。因此,从用户角色的角度看,任何一个用户均可可是直接与无人机进行通信的无人机用户,也可以是与其他用户建立 D2D 链路并将从无人机处获取的保密信息转发给其他用户的混合中继用户,还可以是从混合中继用户处获取保密信息的 D2D 用户。换句话说,在该无人机中继网络中,任一用户不仅可以从中继无人机处获取保密信息,还可以从混合中继用户处获取保密信息。而该通信网络中有一个窃听者存在,该窃听者将尝试从任何合法的通信过程中窃取

在发送方和接收方之间传递的保密信息。

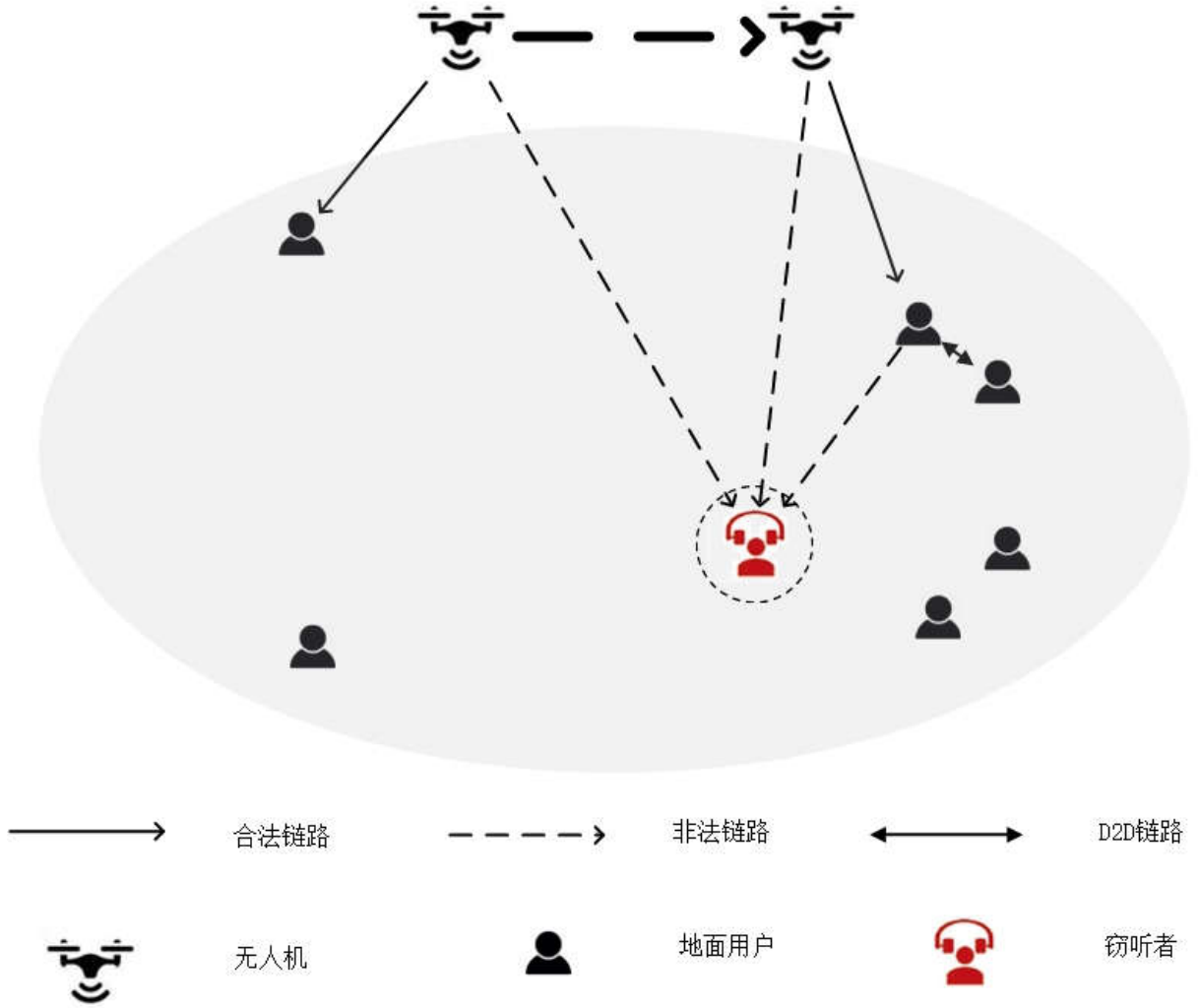


图 3-1 无人机下行中继网络系统模型

如图 3-1 所示，无人机在整个服务区域以飞行周期 T 秒进行周期性的飞行，并在此过程中利用时分多址协议（TDMA）将保密信息分发给 M 个地面用户。较长的飞行周期使得中继无人机有足够的时间缩短与其服务的地面用户的距离以提供更好的通信质量和更高的保密率，但同时也将导致其他用户的等待时间增加，因此应该在综合考虑传输速率和时延等因素的情况下合理地选择飞行周期 T 。在每个飞行周期中，无人机均以固定高度 H 进行飞行，该高度为大于等于最小安全飞行高度的合适高度。为了便于研究和计算，我们进一步地将飞行周期 T 均等地划分为 N 个时间间隙，每个时间间隙的长度为 δ_t 秒，则有

$$T = N\delta_t \quad (3-1)$$

此时时间间隙的数量 N 足够大，则时间间隙的长度 δ_t 足够小，在这一前提下可以假

设无人机在任意一个时间间隙 n ($n \in \{1, 2, \dots, N\}$) 中是静止的，因此在时间间隙 n 时，无人机的位置坐标可以表示为 $q[n], q[n] = (x[n], y[n], H)$ 。定义无人机的最大飞行速度为 V_{max} ，定义在一个时间间隙中无人机的最大飞行距离为 D_{max} ，则有

$$D_{max} = V_{max} \delta_t, \forall n \quad (3-2)$$

假定无人机在每个飞行周期内都是从起点位置出发最终又返回起点的位置开始下一个周期的飞行，综上所述，在任意的时间间隔内无人机的位置需要满足如下的约束条件

$$q[1] = q[N] \quad (3-3)$$

$$\|q[n+1] - q[n]\| \leq D_{max}, \forall n \quad (3-4)$$

其中 $\|q[n+1] - q[n]\|$ 表示在相邻的两个时间间隙内无人机的位置变化，有

$$\|q[n+1] - q[n]\| = \sqrt{(x_{q[n+1]} - x_{q[n]})^2 + (y_{q[n+1]} - y_{q[n]})^2} \quad (3-5)$$

另外，我们将任意一个地面用户 i 的位置坐标表示为 $L_i = (x_i, y_i, 0)$ ，其中 $i \in \{1, 2, \dots, M\}$ 。为了便于表示，定义用户调度为

$$x_i[n] \in \{0, 1\}, \forall n, i \in M \quad (3-6)$$

$x_i[n]$ 表示在时间间隙 n 内无人机和地面用户 i 之间的连接状态。也就是说，如果在时间间隙 n 内无人机为地面用户 i 服务，则 $x_i[n] = 1$ ，否则 $x_i[n] = 0$ 。假设无人机在每个时隙内只能为一个用户提供服务，则 $x_i[n]$ 需要满足如下的约束条件

$$\sum_{i=1}^M x_i[n] \leq 1, \forall n \quad (3-7)$$

因为无人机无法获取到窃听者的准确位置，这里我们引入一个误差半径 Q 来表示所能获得的部分窃听者的位置信息。分别将窃听者的准确位置和估计位置表示为 $(x_e, y_e, 0)$ 和 $(\hat{x}_e, \hat{y}_e, 0)$ ，并将窃听者的准确位置用 L_e 表示，则有

$$x_e = \hat{x}_e + \Delta x, y_e = \hat{y}_e + \Delta y, \Delta x^2 + \Delta y^2 \leq Q^2 \quad (3-8)$$

其中， $(\Delta x, \Delta y) \in \Omega$ 分别是在 x 轴方向和 y 轴方向上的窃听者位置的估计误差。也就是说，窃听者的位置可以用一个圆心为 $(\hat{x}_e, \hat{y}_e, 0)$ ，半径为 Q 的圆形区域来表示。

3.2.2 下行信道模型

从文献^[28]中可以得知，当通信无人机飞行于较高的高度时，通信系统中的 A2G 和 D2D 通信链路均由 LoS 链路主导。因此本章节研究的 A2G 信道主要为 LoS 链路并且遵循自由空间损耗模型。在任意的时间间隙 n 内，将通信无人机到地面用户 i 之间的信道增益表示为 $g_{ui}[n]$ ，则有

$$g_{ui}[n] = \frac{\rho_0}{(x[n]-x_i)^2+(y[n]-y_i)^2+H^2} \quad (3-9)$$

其中 ρ_0 表示距离为 1 米时的 A2G 信道参考功率增益。与此同时，将无人机和窃听者之间的信道增益表示为 $g_{ue}[n]$ ，则有

$$g_{ue}[n] = \frac{\rho_0}{(x[n]-x_e)^2+(y[n]-y_e)^2+H^2} \quad (3-10)$$

同理，可以将地面用户 i 和地面用户 j 之间的信道增益表示为 $g_{ij}[n]$ ，则有

$$g_{ij}[n] = \frac{\rho_d k_{ij}[n]}{[(x_i-x_j)^2+(y_i-y_j)^2]^{\frac{3}{2}}} \quad (3-11)$$

其中， $k_{ij}[n]$ 表示服从指数分布的衰落系数， ρ_d 表示距离为 1 米时的地面信道参考功率增益。注意在这里窃听者虽然不是合法用户，但其窃听合法用户通信的过程应与合法地面用户之间通信的过程相一致，因此可以认为 $g_{ie}[n]$ 形如 $g_{ij}[n]$ 。

若使用 $P[n]$ 来表示无人机在时隙 n 内的发射功率，使用 σ^2 来表示高斯白噪声功率。在任意时隙 n 内，将无人机到地面用户 i 之间的可达率表示为 $R_{ui}[n]$ ，则有

$$R_{ui}[n] = \log_2 \left(1 + \frac{P[n]g_{ui}[n]}{\sigma^2} \right) \quad (3-12)$$

注意混合中继用户也是合法地面用户的一种，所以可以说无人机到混合中继用户间的可达率 $R_{ur}[n]$ 是与 $R_{ui}[n]$ 等同的。

同样地，可将无人机与窃听者之间的可达率表示为 $R_{ue}[n]$ ，将地面用户 i 和地面用户 j 之间的可达率表示为 $R_{ij}[n]$ ，则

$$R_{ue}[n] = \log_2 \left(1 + \frac{P[n]g_{ue}[n]}{\sigma^2} \right) \quad (3-13)$$

$$R_{ij}[n] = \log_2 \left(1 + \frac{P_d g_{ij}[n]}{\sigma^2} \right) \quad (3-14)$$

其中 P_d 为混合中继用户的发射功率。

由于中继无人机的能量受限，无人机的发射功率 $P[n]$ 需要满足如下的约束条件

$$\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N P[n] \leq P_{avg} \quad (3-15)$$

$$0 \leq P[n] \leq P_{max} \quad (3-16)$$

综上所述，在该无人机中继通信网络中存在着两种通信方式，一种是无人机直接和地面用户 i 进行通信，在此情况下无人机和地面用户 i 之间的通信保密率可表示为

$$R_1^s[n] = [R_{ui}[n] - R_{ue}[n]]^+ \quad (3-17)$$

其中 $[x]^+ \triangleq \max(x, 0)$ 。

另一种通信方式则是能够建立 D2D 通信链路的情况。首先，无人机与混合中继用户进行通信，将保密信息先传递给混合中继用户，然后混合中继用户再通过建立的 D2D 链路将保密信息传递给 D2D 用户。在此过程中的保密率可表示为^[33,34]

$$R_2^s[n] = \left[\frac{1}{2} \min(R_{ui}[n], R_{ij}[n]) - \frac{1}{2} \log_2(1 + \gamma_{ue}[n] + \gamma_{re}[n]) \right]^+ \quad (3-18)$$

其中

$$\gamma_{ue}[n] = \frac{P[n]g_{ue}[n]}{\sigma^2} \quad (3-19)$$

$$\gamma_{re}[n] = \frac{P_d g_{re}[n]}{\sigma^2} \quad (3-20)$$

这里的 $g_{re}[n]$ 表示混合中继用户和窃听者之间的信道增益，可视作等同于两个地面用户之间的信道增益，因此可以用和类似公式（3-11）的方式来表示。

总结起来，在该基于无人机和 D2D 技术的下行无人机中继网络中，系统的保密率可以表示为 R^s

$$R^s = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x_i[n]R_1^s[n] + x_{ij}[n]R_2^s[n]) \quad (3-21)$$

$$x_{ij}[n] = x_i[n]y_{ij}[n] \quad (3-22)$$

其中， $y_{ij}[n]$ 为地面用户 i 和地面用户 j 之间能否建立 D2D 信道的标志位。 $x_{ij}[n]=1$ 表示无人机正在服务的地面用户 i 为混合中继用户，并且该用户已经和 D2D 用户 j 成功建立了 D2D 信道。

3.2.3 优化问题的形式化定义

假设用户调度为 S ，无人机的发射功率为 P ，无人机的飞行轨迹为 O 。综合上述分析，本研究的具体目标就是对用户调度 S 、发射功率 P 和飞行轨迹 O 进行联合优化，以设计一个在该无人机中继网络中的保密数据安全传输方案。因此，该优化问题可以被形式化的定义为

$$(P3.1): \max_{S,P,O} v \quad (3-23)$$

$$s. t. \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x_i[n]R_1^s[n] + x_{ij}[n]R_2^s[n]) \geq v \quad (3-24)$$

$$x_i[n] \in \{0,1\}, \forall n \quad (3-25)$$

$$\sum_{i=1}^M x_i[n] \leq 1, \forall n \quad (3-26)$$

$$\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N P[n] \leq P_{avg} \quad (3-27)$$

$$0 \leq P[n] \leq P_{max} \quad (3-28)$$

$$q[1] = q[N] \quad (3-29)$$

$$\|q[n+1] - q[n]\|^2 \leq D_{max}^2, \forall n \quad (3-30)$$

分析该优化问题，发现由于约束条件中有存在 $[x]^+$ 的形式，目标函数在零点处是非光滑的，并且约束条件中存在二进制约束，这都会对问题的求解造成困难。另外可以明显地看出约束条件中有个别约束条件是非凸的，因此该形式的优化问题难以被求解，需要进一步地对其进行分析。

3.3 无人机下行网络安全通信方案设计

本节将针对上节最后提出的优化问题提出解决方案。我们将优化问题（P3.1）划分为能够被逐一解决的三个子问题，分别是用户调度子问题、功率分配子问题和无人机轨迹设计子问题。

首先需要解决问题的非光滑性。当 $R_1^s[n]$ 和 $R_2^s[n]$ 为负时，为了最大化系统的最小保密率， $x_i[n]$ 将等于 0，进而 $x_{ij}[n]$ 也将等于 0。换句话说，当发现通信过程可能不安全，保密信息可能泄露时，就中断通信过程。因此，在任意的时隙 n 中，保密率必须是非负的。所以这里的 $[x]^+$ 可以被省略，继而 $R_1^s[n]$ 和 $R_2^s[n]$ 就可以被重写为

$$R_1^s[n] = R_{ui}[n] - R_{ue}[n] \quad (3-31)$$

$$R_2^s[n] = \frac{1}{2} \min(R_{ui}[n] - R_{ij}[n]) - \frac{1}{2} \log_2(1 + \gamma_{ue}[n] + \gamma_{re}[n]) \quad (3-32)$$

同时为了解决二进制约束给问题求解带来的困难，这里将二进制约束（3-31）松弛为连续变量约束，此时优化问题可以被重写为

$$(P3.2): \max_{S,P,O} v \quad (3-33)$$

$$s. t. \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x_i[n]R_1^s[n] + x_{ij}[n]R_2^s[n]) \geq v \quad (3-34)$$

$$0 \leq x_i[n] \leq 1, \forall n \quad (3-35)$$

$$(3-26) - (3-30)$$

通过以上的处理，函数的非光滑性以及二进制约束给优化问题带来的求解困难已经

被解决，但是可以看到该问题针对 S 、 P 、 O 仍然是非凸的。本章接下来的部分将使用凸优化理论对该优化问题进行求解。

3.3.1 用户调度方案设计

本节针对无人机下行中继网络安全通信提出用户调度方案。假定无人机发射功率 P 和无人机飞行轨迹 O 已经给定，此时用户调度子问题可以被形式化定义为

$$(P3.3): \max_S v \quad (3-36)$$

$$s.t. \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x_i[n]R_1^s[n] + x_{ij}[n]R_2^s[n]) \geq v \quad (3-37)$$

$$0 \leq x_i[n] \leq 1, \forall n \quad (3-38)$$

$$\sum_{i=1}^M x_i[n] \leq 1, \forall n \quad (3-39)$$

由于该子问题中的三个约束条件均为线性约束，因此用户调度子问题是一个标准的线性规划问题，可以直接使用凸优化工具进行求解，本研究中使用 CVX 工具箱对凸优化问题进行求解。

3.3.2 无人机发射功率分配方案设计

本节针对无人机下行中继网络安全通信提出无人机发射功率分配的方案。假定无人机的用户调度 S 和无人机飞行轨迹 O 已经给定，此时发射功率分配子问题可以被形式化定义为

$$(P3.4): \max_P v \quad (3-40)$$

$$s.t. \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x_i[n]R_1^s[n] + x_{ij}[n]R_2^s[n]) \geq v \quad (3-41)$$

$$0 \leq P[n] \leq P_{max} \quad (3-42)$$

$$\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N P[n] \leq P_{avg} \quad (3-43)$$

由于问题 (P3.4) 存在非凸约束，导致优化问题难以求解。为了解决这个问题，我们应用连续凸近似的方法来对其进行转化。首先我们引入引理 3-1。

引理 3-1: 定义一个函数

$$f(x) = -\log_2(1 + ax) \quad (3-44)$$

其中 $a > 0$, $x \geq 0$ 。则函数 $f(x)$ 的 Hessian 矩阵为

$$^2 f(x) = \begin{bmatrix} X & X \\ X & X \end{bmatrix} \geq 0 \quad (3-45)$$

其中

$$X = \frac{a^2}{(1+ax)^2 \ln 2} > 0 \quad (3-46)$$

Hessian 矩阵的半正定性决定了 $f(x)$ 是关于 x 的凸函数。根据凸函数的性质，我们可以通过将函数 $f(x)$ 在给定点 x_k 进行一阶的泰勒展开的方式来得到函数的凸下界。根据这一理论，我们可以得到如下的不等式

$$\log_2(1 + ax) \leq \log_2(1 + ax^k) + \frac{a}{(1+ax^k)\ln 2} (x - x^k) \quad (3-47)$$

根据引理 3-1，运用连续凸近似法将约束条件进行转换，则可以将 $R_1^s[n]$ 等价地表示为

$$\begin{aligned} R_1^s[n] \geq R_1^k[n] \triangleq & \log_2 \left(1 + \frac{P[n]g_{ui}[n]}{\sigma^2} \right) - \log_2 \left(1 + \frac{P^k[n]g_{ue}[n]}{\sigma^2} \right) \\ & - \frac{g_{ue}[n]}{(\sigma^2 + P^k[n]g_{ue}[n])\ln 2} (P[n] - P^k[n]) \end{aligned} \quad (3-48)$$

使用同样的方式对 $R_2^s[n]$ 进行处理，则可以将 $R_2^s[n]$ 等价地表示为

$$\begin{aligned} R_2^s[n] \geq R_2^k[n] \triangleq & \frac{1}{2} \min \left(\log_2 \left(1 + \frac{P[n]g_{ui}[n]}{\sigma^2} \right), \log_2 \left(1 + \frac{P_d g_{ij}[n]}{\sigma^2} \right) \right) \\ & - \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{P^k[n]g_{ue}[n]}{\sigma^2} + \frac{P_d g_{ie}[n]}{\sigma^2} \right) \\ & - \frac{g_{ue}[n]}{(\sigma^2 + P^k[n]g_{ue}[n] + P_d g_{ie}[n])2\ln 2} (P[n] - P^k[n]) \end{aligned} \quad (3-49)$$

将上述处理后得到的 $R_1^k[n]$ 和 $R_2^k[n]$ 代入到问题 (P3.4) 的非凸约束中，即可将优化问题重写为如下的形式

$$(P3.5): \max_p \quad v \quad (3-50)$$

$$s. t. \quad \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x_i[n]R_1^k[n] + x_{ij}[n]R_2^k[n]) \geq v \quad (3-51)$$

$$0 \leq P[n] \leq P_{max} \quad (3-52)$$

$$\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N P[n] \leq P_{avg} \quad (3-53)$$

经过上述处理过程，由包含非凸约束，无法直接被求解的问题 (P3.4) 经过一系列转化得到的问题 (P3.5) 已经可以运用凸优化理论进行求解。

3.3.3 无人机飞行轨迹方案设计

本节针对无人机下行中继网络安全通信提出了无人机飞行轨迹的设计方案。假定无人机的用户调度 S 和无人机发射功率 P 已经给定，此时无人机飞行轨迹子问题可以被形式化定义为

$$(P3.6): \max_{\nu} \quad (3-54)$$

$$s. t. \quad \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x_i[n]R_1^s[n] + x_{ij}[n]R_2^s[n]) \geq \nu \quad (3-55)$$

$$q[1] = q[N] \quad (3-56)$$

$$\|q[n+1] - q[n]\|^2 \leq D_{max}^2, \forall n \quad (3-57)$$

由于问题 (P3.6) 存在非凸约束，导致优化问题难以求解。为了解决这个问题，我们应用连续凸近似的方法来对其进行转化。首先我们引入引理 3-2。

引理 3-2: 定义一个函数

$$g(x) = \log_2 \left(1 + \frac{Y}{h+x} \right) \quad (3-58)$$

其中 $Y, h > 0, x \geq 0$ 。则函数 $g(x)$ 的 Hessian 矩阵为

$$^2 g(x) = \begin{bmatrix} X & X \\ X & X \end{bmatrix} \geq 0 \quad (3-59)$$

其中

$$X = \frac{(2h+2x^k+Y)Y \log_2 e}{((h+x^k+Y)(h+x^k))^2} > 0 \quad (3-60)$$

Hessian 矩阵的半正定性决定了 $g(x)$ 是关于 x 的凸函数。根据凸函数的性质，我们可以通过将函数 $g(x)$ 在给定点 x_k 进行一阶的泰勒展开的方式来得到函数的凸下界。根据这一理论，我们可以得到如下的不等式

$$\log_2 \left(1 + \frac{Y}{h+x} \right) \geq \log_2 \left(1 + \frac{Y}{h+x^k} \right) - \frac{(x-x^k)Y \log_2 e}{(h+Y+x^k)(h+x^k)} \quad (3-61)$$

根据引理 3-2, $R_{ui}[n]$ 和 $R_{ue}[n]$ 关于 $q[n]$ 是非凸的，但关于 $\|q[n] - L_i\|^2$ 与 $\|q[n] - L_e\|^2$ 则具有凸函数性质。为了对问题 (P3.6) 中的非凸约束进行处理，这里引入两个松弛变量

$$Z_i[n] = \|q[n] - L_i\|^2 \quad (3-62)$$

$$Z_e[n] = \|q[n] - L_e\|^2 \quad (3-63)$$

则可以将 $R_1^s[n]$ 等价地表示为

$$R_1^s[n] = \log_2 \left(1 + \frac{\phi[n]}{Z_i[n]+H^2} \right) - \log_2 \left(1 + \frac{\phi[n]}{Z_e[n]+H^2} \right) \quad (3-64)$$

其中

$$\phi[n] = \frac{P[n]\rho_0}{\sigma^2} \quad (3-65)$$

为了使得引入松弛变量以后的目标函数的解能够与原本的目标函数的解一致，松弛变量 $Z_i[n]$ 和 $Z_e[n]$ 分别需要满足如下的约束条件

$$Z_i[n] \leq \|q^k[n] - L_i\|^2 + 2(q^k[n] - L_i)^T (q[n] - q^k[n]) \quad (3-66)$$

$$Z_e[n] \leq \|q^k[n] - L_e\|^2 + 2(q^k[n] - L_e)^T (q[n] - q^k[n]) \quad (3-67)$$

显然只有当上述两个约束条件取到等号时，目标函数才有可能达到最大值。但此时问题（P3.6）中仍然存在非凸约束，这里继续运用连续凸近似方法对其进行转换。根据引理 3-2 可知， $R_1^s[n]$ 是关于 $\|q[n] - L_i\|^2$ 的凸函数，因此这里可以使用以下的方式来对 $R_1^s[n]$ 进行转化

$$R_1^s[n] \geq R_1^k[n] \triangleq \log_2 \left(1 + \frac{\phi[n]}{Z_i^k[n] + H^2} \right) - \log_2 \left(1 + \frac{\phi[n]}{Z_e[n] + H^2} \right) - \frac{\phi[n]}{\left((Z_i^k[n] + H^2)^2 + \phi[n](Z_i^k[n] + H^2) \right) \ln 2} (Z_i[n] - Z_i^k[n]) \quad (3-68)$$

使用同样的方式对 $R_2^s[n]$ 进行处理，则可以得到 $R_2^s[n]$ 的等价表示，这里不再赘述。

接下来将上述处理后得到的 $R_1^k[n]$ 和 $R_2^k[n]$ 代入到问题（P3.6）的非凸约束中，即可将优化问题重写为如下的形式

$$(P3.7): \max_{\mathbf{Q}} \mathbf{v} \quad (3-69)$$

$$s. t. \quad \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x_i[n] R_1^k[n] + x_{ij}[n] R_2^k[n]) \geq \mathbf{v} \quad (3-70)$$

$$q[1] = q[N] \quad (3-71)$$

$$\|q[n+1] - q[n]\| \leq D_{max}, \forall n \quad (3-72)$$

$$Z_i[n] \leq \|q^k[n] - L_i\|^2 + 2(q^k[n] - L_i)^T (q[n] - q^k[n]) \quad (3-73)$$

$$Z_e[n] \leq \|q^k[n] - L_e\|^2 + 2(q^k[n] - L_e)^T (q[n] - q^k[n]) \quad (3-74)$$

经过上述处理过程，由包含非凸约束，无法直接被求解的问题（P3.6）经过一系列转化得到的问题（P3.7）已经可以运用凸优化理论进行求解。

3.4 本章小结

本章首先建立了基于无人机下行中继网络的网络模型和信道模型，再根据建立的模型提出了通过优化用户调度、无人机发射功率以及无人机飞行轨迹来最大化系统最小保密率的优化问题。由于提出的优化问题具有非凸性，难以直接进行求解，因此本章中还将总体的优化问题划分为了用户调度、发射功率分配和飞行轨迹优化三个子问题，并利用连续凸近似法对子问题进行转化，使其可以被求解。

第 4 章 安全通信方案数值仿真及结果分析

4.1 实验设置

本章主要针对上文提出的优化问题的可解形式进行求解，给出了基于 MATLAB 的仿真实验结果。本文实验使用的软件为 MATLAB R2018a，运行实验的机器所运行的操作系统为 Windows 10 家庭中文版 64 位版本，中央处理器为 Intel® Core™ i7-7700HQ @ 2.80Hz，图形处理器为 NVIDIA GeForce GTX 1060 6G，运行内存大小为 16GB。在仿真实验中，具体涉及到的实验参数设置如下：地面上的窃听者估计位置为 $(200, 0)$ m，估计误差半径为 Q 。设计的场景中总共包含 12 个地面用户，他们的坐标分别为 $(-250, 200)$ 、 $(350, 300)$ 、 $(-100, -100)$ 、 $(220, -200)$ 、 $(-250, 250)$ 、 $(-280, 200)$ 、 $(320, 310)$ 、 $(400, 310)$ 、 $(-70, -120)$ 、 $(-120, -90)$ 、 $(175, -150)$ 、 $(190, -190)$ 中继无人机的最大飞行速度 $V_{max}=50$ m/s。无人机的平均发射功率 $P_{avg}=0.1$ W，最大发射功率 $P_{max}=4P_{avg}=0.4$ W。无人机的服务周期 $T=200$ s，每个时隙的长度为 $\delta_t=2$ s，在任意一个服务周期内无人机飞行的起点和终点是一致的，即满足 $q[1]=q[N]=(-500, 0)$ m。地面用户的发射功率 P_d 为一个固定值， $P_d=0.1$ W。建立 D2D 链路的极限距离 $S_{max}=100$ m，即当两用户间距离小于等于 100 m 时它们之间才能够建立 D2D 信道，并且当在 100 m 范围内有多个其他地面用户时，会选择与距离最近的用户建立 D2D 信道。另外，距离为 1 m 时的 A2G 信道参考功率增益 $\rho_0=-60$ dB，距离为 1 m 时的地面信道参考功率增益 $\rho_d=-60$ dB，高斯白噪声功率 $\sigma^2=-110$ dBm。

本文中设置的实验仿真场景相对简单，地面用户只有 12 个，并且用户分布模拟了现实场景下用户集中分布在某一区域的情况，呈现了一定的集聚性特征。定义无人机的初始飞行轨迹为一个椭圆形，在此轨迹的基础上进行优化。

在以上基础参数设置下，本文共设计以下两种实验方案，在每个实验方案中又设计了若干个实验场景作为对比：

实验方案 1：

在地面用户支持 D2D 通信技术，D2D 配对方式为最优配对，以及仅考虑空对地(A2G)链路优化的前提条件下设计了以下六种场景：

场景 1：无人机飞行高度 $H=50$ m，窃听者位置不确定，存在误差半径 $Q=100$ m。

场景 2：无人机飞行高度 $H=50$ m，窃听者位置确定，不存在误差半径 Q 。

场景 3：无人机飞行高度 $H=100$ m，窃听者位置不确定，存在误差半径 $Q=100$ m。

场景 4: 无人机飞行高度 $H=100\text{m}$, 窃听者位置确定, 不存在误差半径 Q 。

场景 5: 无人机飞行高度 $H=150\text{m}$, 窃听者位置不确定, 存在误差半径 $Q=100\text{m}$ 。

场景 6: 无人机飞行高度 $H=150\text{m}$, 窃听者位置确定, 不存在误差半径 Q 。

实验方案 2:

在地面用户支持 D2D 通信技术, D2D 配对方式为最优配对, 以及仅考虑空对地(A2G)链路优化, 无人机飞行高度固定为 $H=100\text{m}$ 的前提条件下设计了以下四种场景:

场景 1: 窃听者位置确定, 不存在误差半径 Q 。

场景 2: 窃听者位置不确定, 存在误差半径 $Q=50\text{m}$ 。

场景 3: 窃听者位置不确定, 存在误差半径 $Q=100\text{m}$ 。

场景 4: 窃听者位置不确定, 存在误差半径 $Q=150\text{m}$ 。

4.2 实验流程

本文采用交替迭代法进行优化问题的求解。简单来说, 就是按照一定的顺序交替地解决三个子问题, 从而不断接近优化问题的最优解。本文实验中采用的优化顺序是首先在假定已知无人机发射功率和飞行轨迹的基础上对用户调度进行优化, 再在假定已知用户调度和无人机飞行轨迹的基础上对无人机发射功率进行优化, 最后在假定已知用户调度和无人机发射功率的基础上对无人机飞行轨迹进行优化。若上述三个优化过程均未出现问题, 则一轮交替迭代完成, 随后对保密率的变化情况进行计算, 如果保密率的变化率小于预先设定的阈值, 则优化过程结束, 将轨迹图和保密率变化图绘制完成后, 程序将退出, 否则将继续进行下一轮的迭代优化。如果解决三个子问题中的某个子问题时出现了优化失败的情况, 则程序将直接退出。综上, 本文的下行网络安全传输策略求解算法流程如图 4-1 所示。

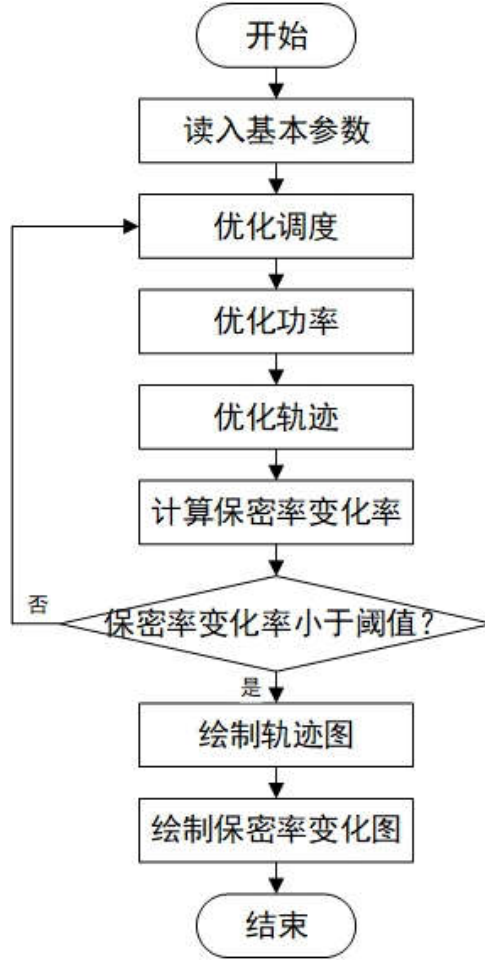


图 4-1 下行网络安全传输策略求解流程图

也可使用表 4-1 的方式对下行网络安全传输策略求解算法进行描述。

表 4-1 下行网络安全传输策略求解算法

Algorithm 4.1 Algorithm for Secure Downlink Transmission Strategy

- 1: **Initialize** user scheduling \mathbf{S}^k , UAV transmit power \mathbf{P}^k and UAV trajectory \mathbf{O}^k . Set $k = 0$ and the threshold $\varepsilon = 10^{-3}$
 - 2: **repeat**
 - 3: Given $\{\mathbf{P}^k, \mathbf{O}^k\}$, solve the subproblem (P3.3) and then get the optimal solutions as \mathbf{S}^{k+1} .
 - 4: Known \mathbf{S}^{k+1} , Given \mathbf{O}^k , solve the subproblem (P3.5) and then update the solution as \mathbf{P}^{k+1} .
 - 5: Known $\{\mathbf{S}^{k+1}, \mathbf{P}^{k+1}\}$, solve the subproblem (P3.7) and then update the solution as \mathbf{O}^{k+1} .
 - 6: Update $k = k + 1$.
 - 7: **until** The rate of change is less than the seted threshold ε , i.e., $\frac{v^{k+1} - v^k}{v^k} \leq \varepsilon$.
-

4.3 仿真实验结果

实验方案 1:

图 4-2 中, 黑色空心点表示地面用户位置, 红点实心点表示窃听者位置, 红点周围的圆表示窃听者位置的误差范围。椭圆形曲线表示优化前无人机的初始飞行轨迹, 不规则的曲线则表示优化后无人机的飞行轨迹。其中实线表示窃听者位置确定的三个场景下优化后无人机的飞行轨迹, 虚线则表示窃听者位置不确定的三个场景下优化后的无人机飞行轨迹。并且最靠内侧的带有正方形标记的实线和虚线表示在场景 1 和场景 2 下优化后无人机的飞行轨迹, 最靠外侧的带有菱形标记的实线和虚线表示在场景 5 和场景 6 下优化后的无人机飞行轨迹, 而带有圆圈标记的实线和虚线则表示在场景 3 和场景 4 下优化后的无人机飞行轨迹。

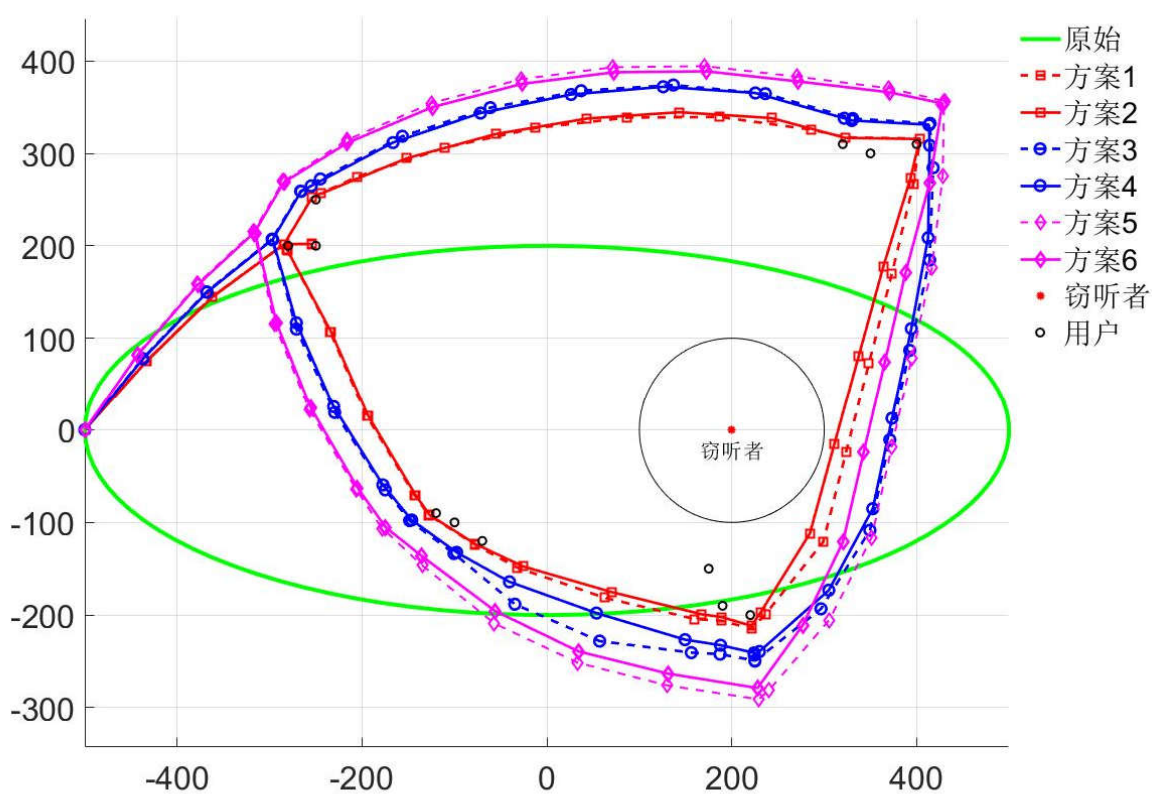
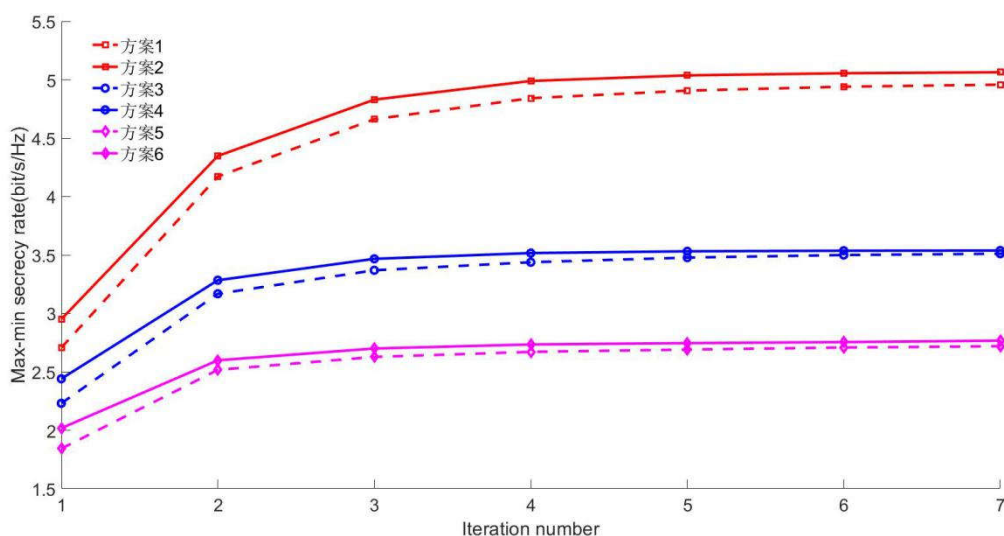


图 4-2 实验方案 1 各场景优化前后轨迹示意图

图 4-3 则是随优化迭代次数的增加, 系统最小保密率的变化图。和轨迹图中的一样, 这里的实线表示窃听者位置确定的三个场景优化过程中的保密率变化, 虚线则表示窃听者位置不确定的三个场景优化过程中的保密率变化。其中位置最高的带有正方形标记的

实线和虚线分别表示场景 1 和场景 2 优化过程中的保密率变化,位置最低的带有菱形标记的实线和虚线分别表示场景 5 和场景 6 优化过程中的保密率变化,位置在上述两组线中间的带有圆圈标记的实线和虚线则分别表示场景 3 和场景 4 优化过程中的保密率变化。

图 4-3 实验方案 1 各场景优化过程中保密率随迭代次数变化图



注意这里采用六个方案进行优化时迭代次数均不相同,因此这里截取了前七次迭代的变化作为对比。

下面的图 4-4 到图 4-9 是实验方案 1 中 6 个场景优化后无人机飞行速度和发射功率随时间的变化图。其中实线表示无人机速度,虚线表示发射功率。

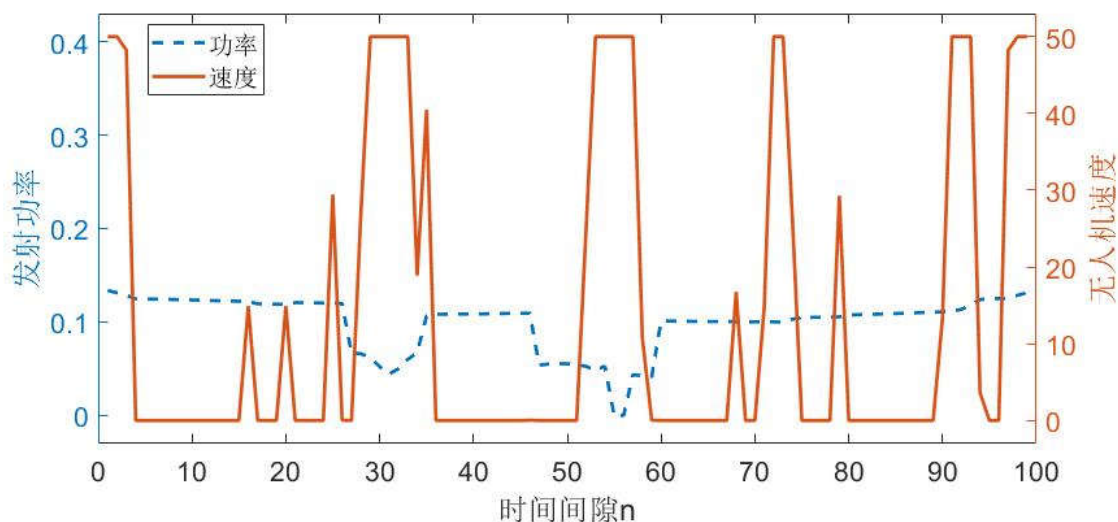


图 4-4 实验方案 1 场景 1 无人机飞行速度和发射功率随时间的变化图

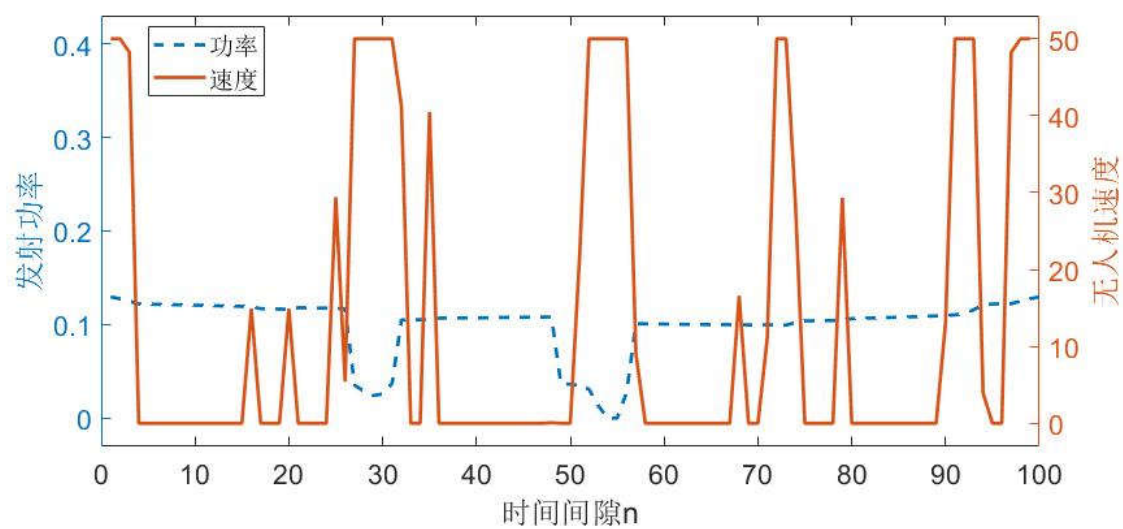


图 4-5 实验方案 1 场景 2 无人机飞行速度和发射功率随时间的变化图

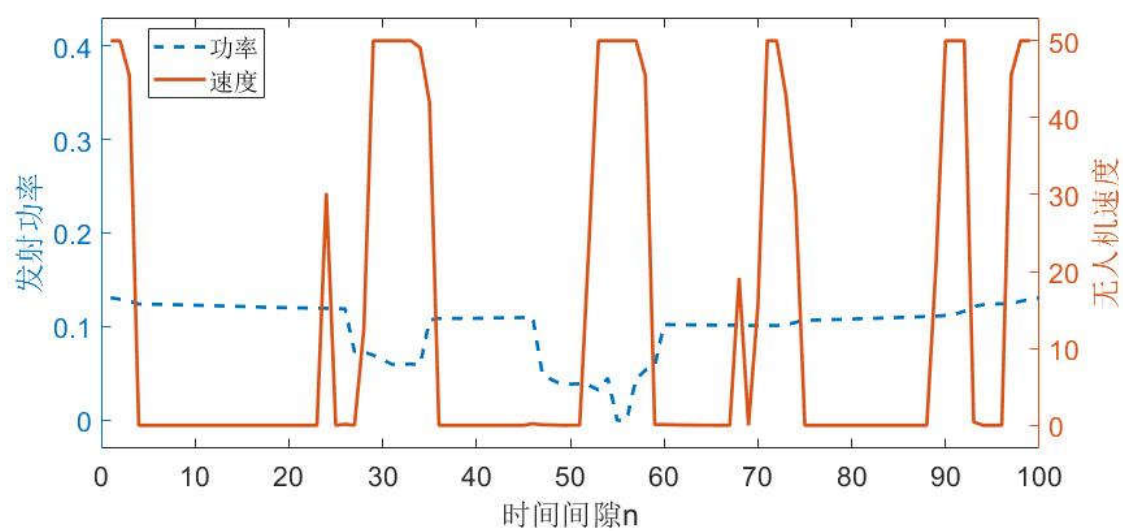


图 4-6 实验方案 1 场景 3 无人机飞行速度和发射功率随时间的变化图

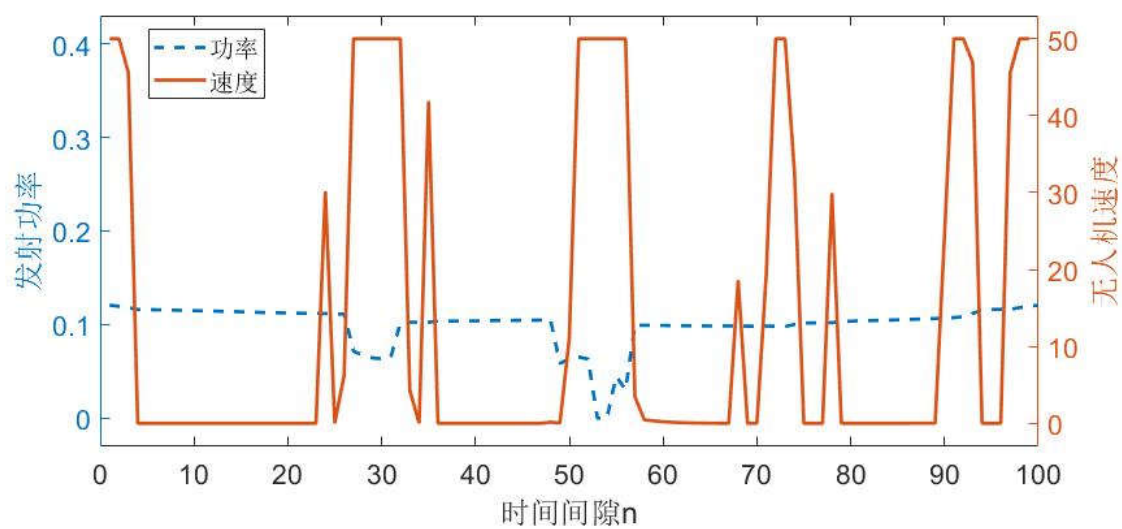


图 4-7 实验方案 1 场景 4 无人机飞行速度和发射功率随时间的变化图

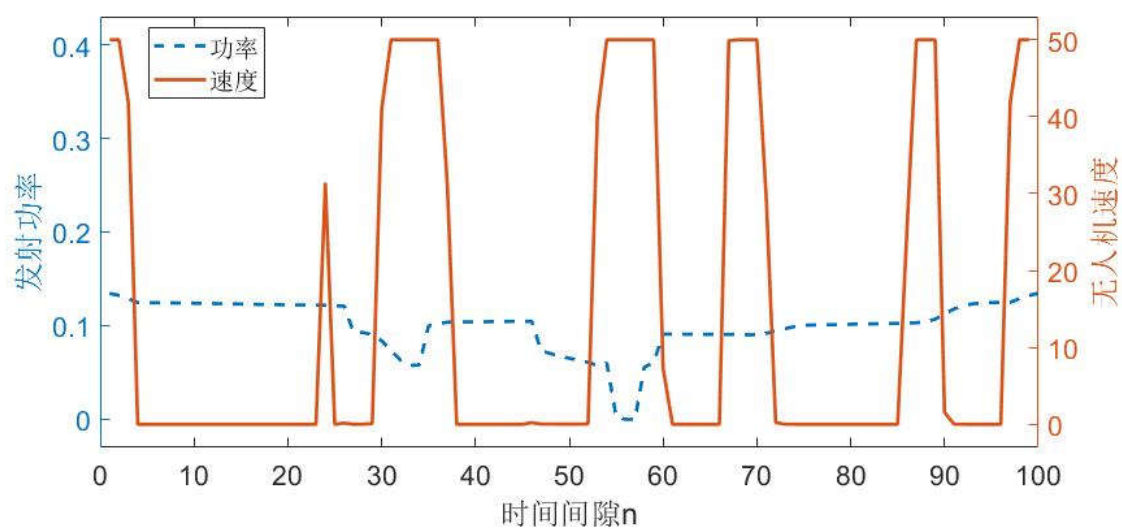


图 4-8 实验方案 1 场景 5 无人机飞行速度和发射功率随时间的变化图

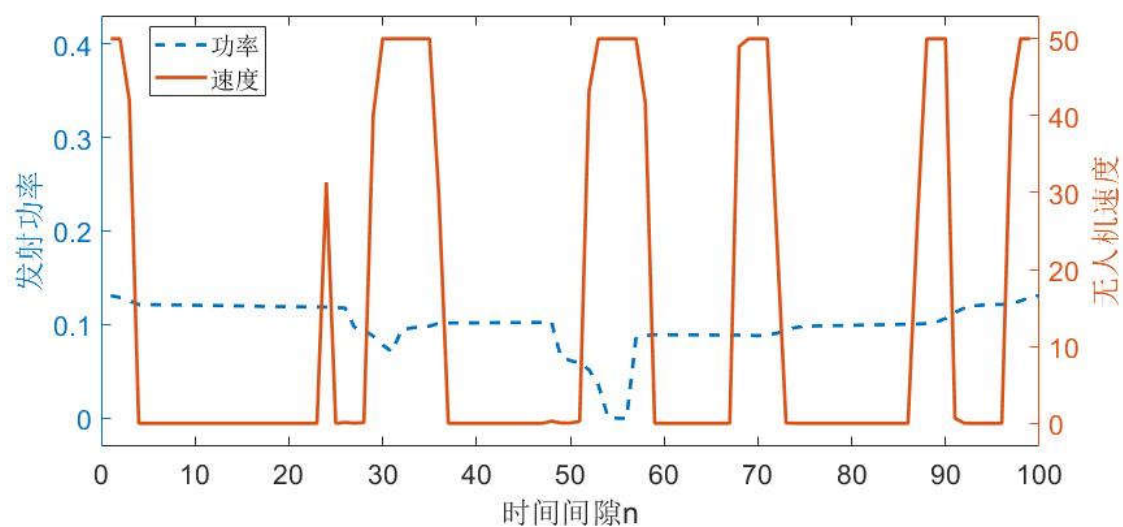


图 4-9 实验方案 1 场景 6 无人机飞行速度和发射功率随时间的变化图

实验方案 2:

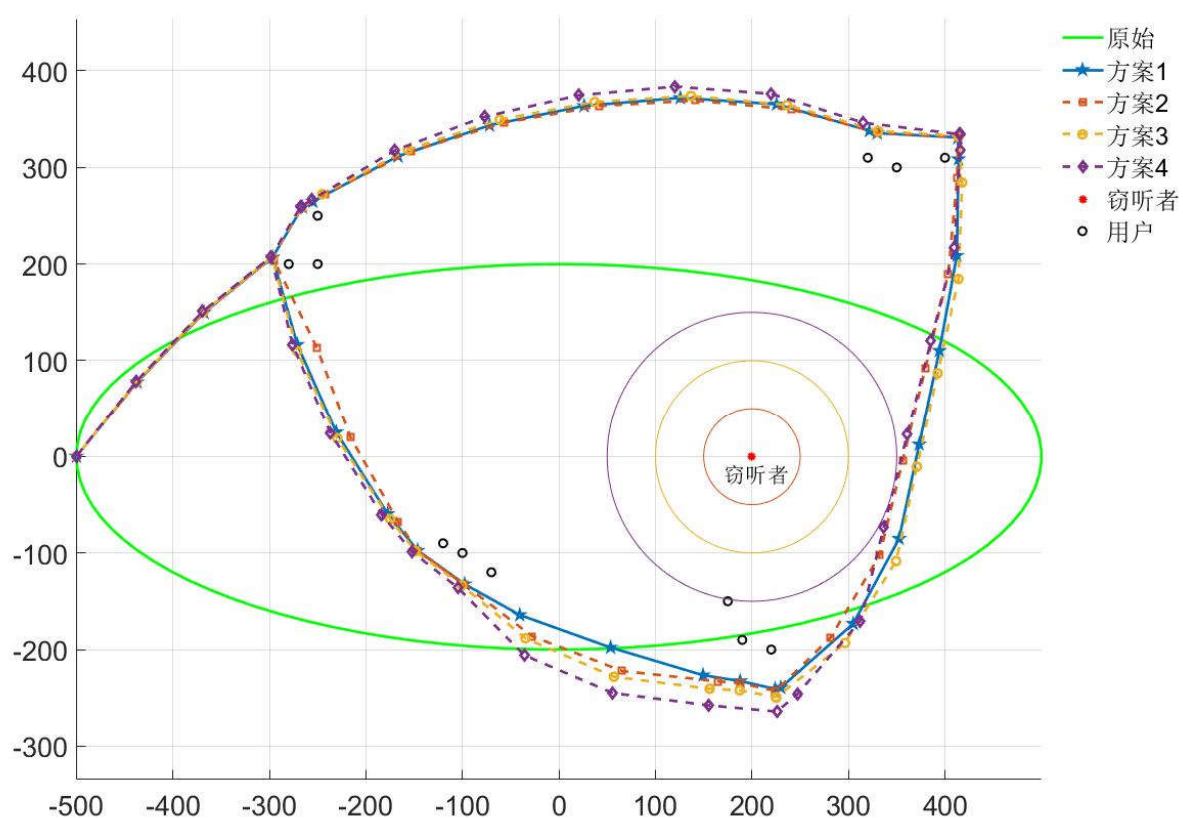


图 4-10 实验方案 2 各场景优化前后轨迹示意图

图 4-10 中的标记和图 4-2 中的类似，黑色空心点表示地面用户位置，红点实心点表

示窃听者估计位置,红点周围的圆表示窃听者位置的误差范围,其中不同颜色的圈则表示不同场景设置的窃听者误差范围。椭圆形曲线表示优化前无人机的初始飞行轨迹,不规则的曲线则表示优化后无人机的飞行轨迹。其中实线表示窃听者位置确定的场景 1 下优化后无人机的飞行轨迹,虚线则表示窃听者位置不确定的三个场景下优化后的无人机飞行轨迹。并且带有五角星标记的实线表示场景 1 下优化后无人机的飞行轨迹,带有正方形标记的虚线表示场景 2 下优化后无人机的飞行轨迹,带有圆形标记的虚线表示场景 3 下优化后无人机的飞行轨迹,带有菱形标记的虚线表示场景 4 下优化后无人机的飞行轨迹。

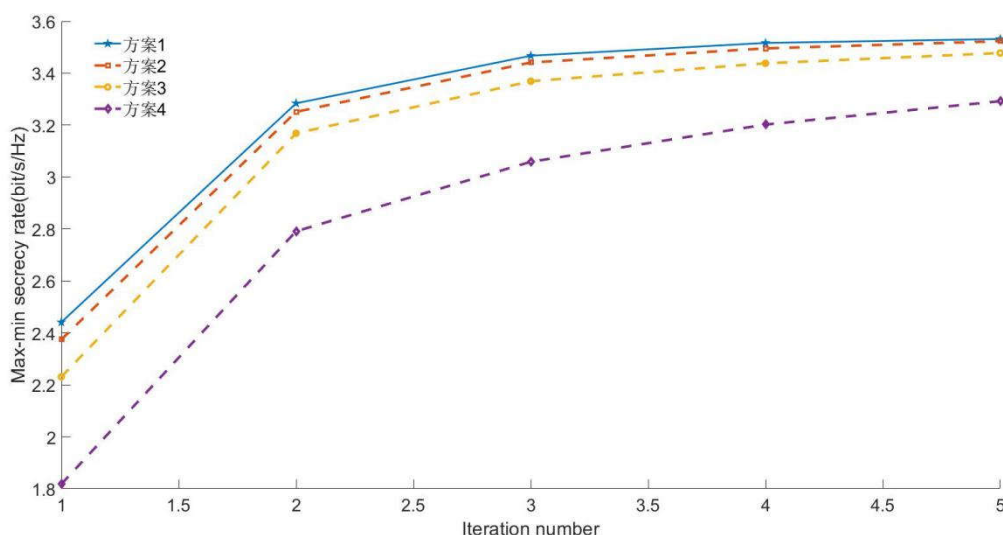


图 4-11 实验方案 2 各场景优化过程中保密率随迭代次数变化图

图 4-11 中,带有五角星标记的实线表示场景 1 下优化过程中保密率的变化,带有正方形标记的虚线表示场景 2 下优化过程中保密率的变化,带有圆形标记的虚线表示场景 3 下优化过程中保密率的变化,带有菱形标记的虚线表示场景 4 下优化过程中保密率的变化。

4.4 实验结果分析

实验方案 1:

观察图 4-2,可以明显地看出,相较于初始轨迹,优化后的无人机飞行轨迹均有在尽量靠近地面用户位置的同时远离窃听者位置的趋势。并且不难发现,相较于未考虑窃听者位置不确定性的几个场景,在考虑了窃听者位置不确定性的几个场景中,无人机在和窃听者位置接近的过程中有更明显的远离窃听者估计位置的趋势,而在离窃听者位置

较远时考虑与不考虑窃听者位置不确定性的场景下优化后产生的无人机飞行轨迹则区别较小。

观察图 4-3, 可以看出无人机的飞行高度对系统整体的最小保密率有显著的影响。仅从这三个高度设置来看, 无人机飞行高度越低, 系统最小保密率越高。并且可以看出虽然表示窃听者位置不确定方案的虚线位置始终位于表示窃听者位置确定场景的实线位置的下方, 并且在经过第一轮迭代优化后两者区别较为明显, 但随着迭代次数的增加, 两者位置呈现不断靠近的趋势, 即两种场景的保密率差距在逐渐缩小, 这种趋势在无人机飞行高度 $H=100\text{m}$ 时最为明显。这说明在提出的优化算法下, 窃听者位置的不确定性对系统整体的保密率影响较小, 即在窃听者位置不确定的情况下提出的优化方案也能保证系统具有较高的保密性能, 并且该优化方案可适用于多种不同的无人机飞行高度。

结合图 4-2 以及图 4-4 到图 4-9, 不难看出在实验方案 1 提出的 6 个实验场景中, 当达到最优保密状态时, 无人机将会悬停在地面用户附近的位置为地面用户进行服务, 此时无人机飞行速度为 0m/s 。并且可以发现无人机悬停的位置往往不是地面用户的正上方, 这说明无人机在降低窃听者窃听信道质量以达到系统最优保密状态的同时也牺牲了一定的合法用户的信道质量, 也就是说无人机的位置选择是一个折衷的问题。另外还可以看到在有些时隙中, 无人机将以最大的速度进行飞行, 结合轨迹图可以看出此时无人机距窃听者位置较近, 此时无论和哪个地面用户进行通信都无法获得良好的保密性能, 因此无人机将快速飞行以寻找下一个地面用户进行服务。除此之外, 从功率角度来看, 6 个场景中无人机发射功率最小的时刻均出现在无人机以其最大速度飞行的时候, 结合前面的分析可知, 此时无人机距离窃听者位置较近, 无法保证通信过程具有较好的保密性能, 因此无人机降低发射功率, 待无人机逐渐移动到离窃听者位置较远的位置时, 其又会提高发射功率来恢复与地面用户间正常的通信。

实验方案 2:

观察图 4-10, 可以发现在较接近窃听者位置时, 窃听者位置的误差半径 Q 越大, 无人机越有远离窃听者估计位置的趋势。可以看到当 $Q=150\text{m}$ 时, 已有一地面用户的位置非常接近窃听者位置的误差范围, 但即使在这种情况下提出的优化方案依然能够给出无人机飞行轨迹的优化方案。

观察图 4-11, 这里截取了前五次迭代的保密率变化作为对比。可以看到在第一次迭代优化后, 每个考虑了窃听者位置不确定性的场景其保密率均和不考虑的场景有一定的差距, 尤其是 $Q=150\text{m}$ 的场景 4 下差距尤为明显。但是经过了五轮的迭代优化后, 二者

的差距得到了显著的缩小,这进一步地说明了提出的优化算法在窃听者位置不确定的情况下也能给系统提供较好的保密性能。

4.5 本章小结

本章主要描述了仿真实验的参数设置、方案设计和结果分析等相关内容。首先给出了基本的实验参数,并在这些参数的基础上设置了两种不同的实验方案,随后采用 MATLAB 软件进行了仿真实验。实验结果进一步表明,本文所提出的优化方案能够显著地提升无人机下行中继网络系统的安全通信性能,并在窃听者位置具有不确定性的情况下也能够给系统提供较高的保密性能。同时也表明了在传统蜂窝移动网络中引入 D2D 通信技术能够实现保密信息的安全分发。

结论

本研究构建了一个无人机下行网络通信模型。为提高网络的灵活性并使得模型更加贴近实际情况，在模型中引入了在 4G 和 5G 时代使用非常广泛的 D2D 通信技术，同时也考虑了窃听者位置的不确定性。

在构建的网络模型的基础上，通过公式的推导我们得到了优化问题的原始形式，但由于原始的优化问题是非凸的，难以被求解，因此我们使用了连续凸近似法将优化问题转化为一个凸优化问题。

最后，通过设计不同的实验方案，将不同方案得到的实验结果进行对比，提出算法的有效性得以验证。随着迭代次数的增加，即对用户调度、无人机发射功率和无人机飞行轨迹的联合优化的次数增加，系统整体的最小保密率将获得明显的提升。

本研究的主要创新点在于增加了对窃听者位置不确定性的考虑。通过对比实验可以得到，经过多轮迭代优化后，窃听者位置不确定性对系统保密率的影响将较小。也就是说在提出的优化方案下，经多轮优化后窃听者位置不确定的场景的系统最小保密率将会很接近窃听者位置确定的场景，它们的保密率差距将随着优化过程的推进而逐渐减小。这证明了提出算法的健壮性，即在窃听者位置不确定的情况下也能给通信系统提供较高的保密性能。

致谢

光阴似箭，转眼间本科四年的学习生活已经接近尾声。在撰写这部分的内容时我不禁感慨时光流逝之快，仿佛昨日还在军训，今天就已经将要毕业离开学校了。四年时间说长也长，说短也短，遇到困难时会想时间是否能快些，而现在回想起这四年就犹如是弹指一挥间。

非常感谢西南科技大学四年的培养，学校优越的条件和浓厚的学习氛围促使着我不断进步。蜀山巍峨俊秀，涪水神韵含章，西南科大给了我追求真理、探索更广阔世界的机会。同时也非常感谢四川省互联网健康服务融合工程实验室，在实验室中我收获了很多宝贵的经验，收获了老师和学长学姐的帮助与关怀，也收获了一群共同奋进的朋友。

正所谓“一日为师，终生为父”。在大学里，我有幸从很多位优秀的老师身上学到了知识，提升了自己的专业素养和实践能力。我衷心地感谢每一位给我上过课，帮助过我的老师。另外还要感谢彭安杰老师和曾辉老师，这两位指导老师帮我批阅论文，给我提出修改意见，同时也在我完成毕业设计的过程中给予我指引，在我完成毕业设计的过程中给了我指导和帮助。我尤其要感谢张尚伟老师，张老师是我研究生阶段的导师，他在我的整个毕业设计的过程中都给予了我帮助，每当我遇到问题时张老师都非常耐心地给予我指导，没有张老师的帮助我可能根本无法顺利完成我的毕业设计。今后我将再接再厉，争取在研究生生涯中用丰富的成果来回馈张尚伟老师的辛勤指导。

感谢同学朋友和帮助过我的学长学姐。一个人的力量终究是有限的，他们总能在遇到困难时给我提供帮助，在我情绪不佳时陪伴我，正是因为有他们才有了今天的我。

感谢父母和亲人，他们对我的付出是不计回报的。常言道滴水之恩当以涌泉相报，那么父母的养育之恩当属涌泉之恩了，该何以为报？我深知父母在把我们养育成人的过程中需要花费大量的心血和财力，他们的恩情我将用往后余生来报答。

最后也感谢自己。感谢自己能够勇敢地背井离乡，一个人到千里之外的陌生城市求学。四年的求学生活并非一帆风顺，但我没有在任何时候选择放弃，而是以迎难而上的勇气直面困难，解决困难。有时候我会觉得其实自己就是“孤勇者”。

有人说生命中的每段相遇都有其必然性和意义。有些人的出现为我带来了温暖和陪伴，而有些人的出现则教会了我成长。不论是哪类人，我都感谢他们曾出现在我的生命中。无论得到的是温暖亦或是成长，我都将欣然地接受它们，并带着它们毅然走在前进的道路上。

参考文献

- [1] Cisco. Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2010-2015[J]. Cisco white paper, 2011.
- [2] 张尚伟, 刘家佳, 许铁鑫. 无人机辅助的蜂窝数据流量卸载及保密传输方案[J]. 西安交通大学学报, 2021, 55(2):8.
- [3] Mozaffari M , Saad W , Bennis M , A Tutorial on UAVs for Wireless Networks: Applications, Challenges, and Open Problems[J]. Communications surveys & tutorials, 2019, 21(3):2334-2360. DOI:10.1109/COMST.2019.2902862.
- [4] Wenyue Wang, Shangwei Zhang, and Jiajia Liu, Robust 3D Trajectory Optimization for Secure UAV-Ground Communications[C]. IEEE GLOBECOM 2021, Dec 7-11, 2021, Madrid, Spain.
- [5] A, D, Wyner. The Wire-Tap Channel[J]. Bell System Technical Journal, 1975, 54(8):1355-1387.
- [6] Sun X, Shen C, Chang T H, et al. Joint resource allocation and trajectory design for UAV-aided wireless physical layer security[C]//2018 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps). IEEE, 2018: 1-6.
- [7] Li Z, Chen M, Pan C, et al. Joint trajectory and communication design for secure UAV networks[J]. IEEE Communications Letters, 2019, 23(4): 636-639.
- [8] Wang Q, Chen Z, Li H. Energy-efficient trajectory planning for UAV-aided secure communication[J]. China Communications, 2018, 15(5): 51-60.
- [9] 郑思远, 崔苗, 张广驰. 基于强化学习的无人机安全通信轨迹在线优化策略[J]. 广东工业大学学报, 2021, 38(4): 59-64.
- [10] 张文静. 基于轨迹优化和资源分配的无人机对地安全通信策略[D]. 南昌大学, 2020.
- [11] 方晓钰. 无人机中继保密通信系统航迹规划方法研究[D]. 中国民航大学, 2019.
- [12] 汪萧萧. 无人机通信物理层安全关键技术研究[D]. 南京邮电大学, 2021.
- [13] Melki L, Najeh S, Besbes H. System performance of two-way decode-and-forward relaying assisted D2D communication underlying cellular networks[C]//2016 International Symposium on Signal, Image, Video and Communications (ISIVC). IEEE, 2016: 270-275.
- [14] Lee J, Lee J H. Performance analysis and resource allocation for cooperative D2D communication in cellular networks with multiple D2D pairs[J]. IEEE Communications Letters, 2019, 23(5): 909-912.
- [15] Hyun S H, Yoon Y J, Kim S C. Physical layer security using artificial noise in d2d underlay network[C]//2019 IEEE VTS Asia Pacific Wireless Communications Symposium (APWCS). IEEE, 2019: 1-5.

- [16] 朱政宇, 侯庚旺, 黄崇文, 等. 基于并行 CNN 的 RIS 辅助 D2D 保密通信系统资源分配算法[J]. 通信学报, 2022, 43(3): 172-179. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2102.TN.20220306.1839.002.html>
- [17] 顾雯莹. NOMA-D2D 通信系统中的资源分配算法研究[D].南京邮电大学, 2021.
- [18] Gao Y, Ao H, Zhou Q, et al. Modeling of satellite communication systems design with physical layer security[C]//2017 International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET). IEEE, 2017: 1680-1683.
- [19] Lee J H. Full-duplex relay for enhancing physical layer security in multi-hop relaying systems[J]. IEEE communications letters, 2015, 19(4): 525-528.
- [20] Chen Z, Jiang T, Zou W. A novel physical layer security communication method based on dual base station[C]//2017 17th International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT). IEEE, 2017: 1-4.
- [21] 马蓓.面向 6G 的全双工 D2D 通信物理层安全策略[J/OL]. 武汉大学学报(工学版):1-6[2022-06-02].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1675.T.20211117.2007.002.html>
- [22] 曹胜男,贾向东,郭艺轩,牛春雨,万妮妮.基于认知无人机移动中继网络的物理层安全通信研究[J/OL].信号处理:1-8[2022-03-13]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2406.TN.20210730.1459.004.html>
- [23] Haus M, Waqas M, Ding A Y, et al. Security and privacy in device-to-device (D2D) communication: A review[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 19(2): 1054-1079.
- [24] Lin Y D, Hsu Y C. Multihop cellular: A new architecture for wireless communications[C]//Proceedings IEEE INFOCOM 2000. Conference on Computer Communications. Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (Cat. No. 00CH37064). IEEE, 2000, 3: 1273-1282.
- [25] Jameel F, Hamid Z, Jabeen F, et al. A survey of device-to-device communications: Research issues and challenges[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2018, 20(3): 2133-2168.
- [26] Hayat S, Yanmaz E, Muzaffar R. Survey on unmanned aerial vehicle networks for civil applications: A communications viewpoint[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016, 18(4): 2624-2661.
- [27] Gupta L, Jain R, Vaszkun G. Survey of important issues in UAV communication networks[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015, 18(2): 1123-1152.
- [28] Matolak D W, Sun R. Air-ground channel characterization for unmanned aircraft systems—Part III: The suburban and near-urban environments[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(8): 6607-6618.
- [29] Liu X, Li Z, Zhao N, et al. Transceiver design and multihop D2D for UAV IoT coverage in disasters[J].

IEEE Internet of Things Journal, 2018, 6(2): 1803-1815.

[30] Liu X, Gui G, Zhao N, et al. UAV coverage for downlink in disasters: Precoding and multi-hop D2D[C]//2018 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC). IEEE, 2018: 341-346.

[31] Chen Y J, Liao K M, Ku M L, et al. Mobility-aware probabilistic caching in UAV-assisted wireless D2D networks[C]//2019 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). IEEE, 2019: 1-6.

[32] Stephen Boyd, Lieven Vandenberghe.凸优化[M]. 清华大学出版社, 2013.

[33] Mo J, Tao M, Liu Y. Relay placement for physical layer security: A secure connection perspective[J]. IEEE Communications Letters, 2012, 16(6): 878-881.

[34] Sun X, Yang W, Cai Y, et al. Secure transmissions in millimeter wave SWIPT UAV-based relay networks[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2019, 8(3): 785-788.