

基于 5G 网络的无人机通信方案研究

孙 鹏¹,魏克敏²,王 钦¹,夏小松¹,章 跃¹

(1.中国移动通信集团设计院有限公司江苏分公司,江苏南京 210013;2.中国移动通信集团设计院有限公司,北京 100000)

摘要:近年来我国随着科技进步的发展,无人机在商用领域以及个人领域都呈井喷式发展,而 5G 网络技术的发展无疑为无人机行业的发展提供了新的机遇。文章提出了基于 5G 网络的无人机通信方案,具体包括无人机的信道建模、通信基站的信号增强方案、干扰抑制方案以及搭建系统仿真平台,以期为各行业的无人机通信部署提供参考。

关键词:5G 网络;无人机;通信方案;干扰抑制

中图分类号:TN929.5

文献标识码:B

文章编号:2096-9759(2021)12-0033-04

0 引言

无人机(UVA)隶属飞行器范畴,最早于上世纪开始投入应用,发展历史迄今已近百年。其原理在于通过无线遥控装置或计算机编程实现半自主或完全自主的飞行功能。无人机伴随着技术的发展而不断升级,在历经更新迭代后如今已成为商业、政府、消费领域中的重要载体,其作用也愈加凸显。

近年来我国通信技术的提升,加之无人机应用范围的扩大,行业级无人机以此为契机持续实现“井喷式”增长,得益于 5G 通信技术的商用发展,无人机行业的应用范围得到较大范围的拓展,越来越多的普通消费者均能享受到 5G 与无人机结合带来的优质体验。无人机通信技术融合了网络通信、飞行控制、图像识别等多种技术,在电力巡检、环境保护、气象监测等领域中应用已初步成效,尤其是在 5G 网络的助推下开始大放异彩,但诸如易受外界干扰、覆盖能力弱等问题同样不容忽视。为此本研究基于 5G 网络提出无人机的通信方案,主要围绕天线与基站覆盖方案、抗干扰抑制方案以及无人机系统仿真平台进行深入分析。

1 5G 网络及无人机概述

1.1 无人机概述

无人机自诞生以来在军事方面被用于侦察、监视、通信等^[1],近年来随着技术的发展,无人机形成由飞行控制、网络通信、电源功能等多项技术所结合的智能飞行器。经过不断地探索与技术升级,无人机如今已在农林、交通、气象等民用领域方面开始广泛应用。无人机的主要特点有三点,一是智能化。无

人机依据周边环境的特点作出对应决策,充分发挥自动寻路与识别目标的能力,不同的无人机之间借助网络能够实现实时信息共享,无人机也因此由直接控制转向监测控制的方向发展;二是低成本、模块化。无人机在不断发展的进程中沿用新材料、新技术以实现重量、续航、控制的全面降低,无人机还能根据任务的不同更换不同的模块,实现多种场景的应用,进一步降低使用成本;三是朝向多无人机协同发展,以往的无人机通常是单枪匹马执行任务,但同时也面临着故障损毁的风险,多无人机协作执行任务既能够降低难度,又能便于在发生故障时重新分配,也正是由于这个特点,无人机可以通过将信息共享进行配合,以实现执行任务效率的提升。

1.2 5G 网络概述

第五代移动通信技术(5G 网络)相较 4G 网络的优势在于高速率、低延时与广连接,也正是因为如此,5G 网络将推动社会各个行业的进一步发展,如医疗、驾驶、工业等领域。在无人机通信中,5G 网络中的多项关键技术为项目的发展提供更多的可能性。一是大规模天线阵列技术(MIMO),通过合理分配天线以实现频谱效率的大幅度提升。此外 MIMO 技术还能应对毫米波频段的大幅衰落问题,使终端的通信质量与续航时间实现不同程度的提升及延长;二是移动边缘计算技术(MEC),其技术核心在于将云计算中心平台分散为多个边缘云以优化用户使用体验,在无人机中应用该技术一方面通过将无人机中的复杂计算业务转移以实现飞行器的能耗下降及续航提升,另一方面通过降低无人机通信的时延以便于更好的完成敏捷控制;三是非正交多址技术(NOMA),从某种程度

收稿日期:2021-11-08

作者简介:孙鹏(1995-),男,江苏建湖人,硕士,职务:项目经理,主要从事通信网络规划与设计工作,研究方向为无线宏站。

[38] 李振福,陈霄,赵梓州.基于 AIS 数据的“21 世纪海上丝绸之路”航行安全风险评估[J].水利水电技术(中英文),2021,52(05):1-12.

[39] 梁建平,刘雷霆.大数据技术在舰船导航模式识别中的应用[J].舰船科学技术,2021,43(16):103-105.

[40] 史兆光,邢文利,苏澜昕.生态文明维度的海洋运输与海洋环境保护[J].南京林业大学学报(人文社会科学版),2012,12(03):73-77.

[41] Damien Le Guyader, Cyril Ray, Fran oise Gourmelon, et al. Defining high-resolution dredge fishing grounds with Automatic Identification System (AIS) data [J]. Aquatic Living Resources, 2017, 30:39-48.

[42] Wielgosz Mirosław, Malyszko Marzena. Multi-Criteria Selection of Surface Units for SAR Operations at Sea Supported by AIS Data [J]. Remote Sensing, 2021, 13(16): 3151-3151.

[43] 石浩,乔继潘,季盛.一种基于 AIS 数据的船舶航线自动规划方法[J].上海船舶运输科学研究所学报,2021,44(01):25-30.

[44] 李晓恩,周亮,肖杨,等.基于渔船 AIS 数据的南海北部海洋渔业捕捞强度空间特征挖掘[J].地球信息科学学报,2021,23(5):850-859.

[45] 陆万安.基于 AIS 数据挖掘的船舶碳排放预测研究[D].大连海事大学,2019.

[46] 郑海林,王帅军,刘虎.基于 AIS 数据的船舶碳排放量分析研究[J].中国水运,2014,14(03):157-158.

上看用户之间会产生一定的干扰,但借助连续干扰抵消(SIC)技术,整体性能要优于正交多址(OMA)技术,在无人机中合理应用该技术能够实现频谱效率与性能的双重提升。

1.3 应用场景与性能指标

1.3.1 应用场景

无人机因其特有的优势在各个场景都得到了广泛应用。一是遥感航拍,通过航拍检测区域获取实时影像数据,掌握情况变化;二是环境监测,即由无人机进行生态环境如土壤、植被、海洋等数据采集工作;三是抗震救灾,以 2008 年汶川大地震为例,无人机在救灾中充当通信中继站与计算受灾面积发挥重要作用;四是农林巡视,无人机在农业中往往用以施药喷雾,林业系统中担负防火巡视任务;五是配送服务,国外电商巨头亚马逊与国内的京东、顺丰等都在陆续尝试进行无人机配送业务。

1.3.2 性能指标

一是速率,无人机在不同的服务目的下对速率指标的要求也不尽相同,如需满足信令传输要求,上行速率应大于 200Kbps,若是传输 8K 高清视频,则上行速率应大于 120Mbps;二是时延,随着网络的发展,时延的要求自然是越低越好,以远程操控为例,其对于无线网络段的时延要求为 20ms,其要求之高可见一斑;三是覆盖,传统的农业无人机要求覆盖高度仅需 10m 即可,而随着应用范围的扩大,无人机的覆盖范围要求也随着其应用场景的丰富而增加,对于通信网络也提出了更高的要求;四是定位,无人机对定位需求随着业务的发展而上升,范围从几十米到几米不等。

2 5G 网络下无人机通信技术关键问题

随着全球卫星定位等新技术的涌现与我国制造业的高速发展,无人机生产规模急速扩张,截至 2019 年我国无人机产量已达到 40 万架,市场规模约 250 亿元。我国以 2006 年为分界岭,大疆科技责任有限公司成立,专注于研发消费级无人机,此后无人机市场迅速发展,时至今日消费级无人机已进入人们的视野中成为消费电子。无人机也凭借其独有的优势在各行各业中得到广泛应用,但行业对网络的需求亦是关键要素。然而纵观当前形势,无人机通信面临着易受干扰、无法大范围覆盖等问题的威胁,只能维持在恒定高度与指定环境范围内进行操作。如何确保无人机通信系统的稳定,从始至终是亟需研究解决的重要问题。综合来看,无人机通信技术的主要影响因素分为以下三点:一是抗干扰能力较差,城区基站密集,无人机在保持一定高度飞行的情况下除了受附近小区的用户影响外,还容易受远处小区基站信号的干扰,当前无人机在抗干扰能力这一块还是有所欠缺,未能将空中干扰与地面干扰全面纳入考量范围当中去;二是网络覆盖能力弱,因选用频段不同,4G 与 5G 的最大不同之处在于基站覆盖范围,前者大约 1 至 3 公里,而后者仅 100 至 300 米,而 5G 尚未全面推广,仍有很多区域成为信号覆盖弱区甚至是盲区,因此离全面覆盖还有一定差距;三是数据通信能力低,尽管无人机伴随着迭代更新推出了诸多新功能,但完全适应匹配 5G 网络还需要一定的投入研发时间,当前绝大部分无人机还不具备与 5G 网络完全同步的功能。

2.1 覆盖高度

无人机的覆盖范围根据业务所需而不同,详细数据见表 1。但值得注意的是,当前在 5G 推广形势下,仍有部分高海拔

地区与偏远农村地区尚未建立基站,部分地区基站之间形成的干扰,加之无人机飞行高度的提升将超出当下基站覆盖的范围。因此若想实现无缝覆盖,必须要通过建立新基站来达到目的。

表 1 应用领域对无人机无线信号覆盖高度需求

序号	应用领域	业务属性	覆盖高度/m	
1	物流	自动飞行	100	城区、城郊、农村
2	物流	基于视频的人工接管	100	城区、城郊、农村
3	物流	高清视频人工接管	100	城区、城郊、农村
4	农林作业	喷洒农药	10	农村
5	农林作业	农业土地勘测	200	农村
6	直播	4K 视频回传	100	安防覆盖城市
7	巡检、安防、救援	1080p 视频回传	100	巡检覆盖基础设施
8	测绘	激光测绘	300	城区、农村
9	编队飞行	无人机编队飞行	200	城区、农村
10	未来云端 AI	无人机云端自主飞行	300	城区、农村

2.2 信道环境

无人机在高空的无线通信环境与地面截然不同,这也导致在城区环境中,无人机用于数据传输的 LOS 径链路有一定几率因城区建筑被遮挡,但总的来说 LOS 径链路往往会因为无人机的飞行高度增加而变多。正是由于无人机的通信环境与地面不同,无人机通信的研究面临着特有的机会与风险。一方面是 LOS 径链路构建单独属于基站与无人机之间的信道环境,另一方面 LOS 径链路也容易给非主服务基站加大了干扰因素的产生几率。因此针对无人机的特质进行通信信道建模能够有效应对无线通信环境带来的差异。

2.3 信号干扰

信号干扰始终是无人机通信绕不过去的一个坎,以某城区市中心为例,无人机的飞行对于相邻周边小区的业务形成干扰,而无人机与主服务基站之间又形成 LOS 径链路,最后造成的结果就是无人机系统收到多种干扰影响通信。无人机在与基站的下行 LOS 链路受非主服务基站的干扰,往往就容易造成下行链路性能较差的局面。不仅如此,无人机在与基站的上行链路连接过程中还会对周边的基站产生强烈干扰,若是有多架无人机的情况下则容易交叉影响。鉴于上述因素,研究无人机的干扰抑制方案势在必行。

2.4 上下行业务需求不对称

5G 网络同蜂窝网络相比,无人机通信更侧重于无人机到主服务基站的上行链路,尤其是部分图像传输要求较高的业务如 4K 以上视频传输与航空成像等。为此尝试通过评估分析研判 5G 环境下无人机上下行业务需求不对称的业务具有深刻的现实意义。除此以外,通过技术手段的更新亦能够符

合此类特殊需求, 具体方案为上下行链路选用不同频率的波段, 如下行链路选用小于 6GHz 的常规频谱, 上行链路选用 5G 毫米波频谱。

3 无人机通信方案研究

3.1 无人机信道建模

无线信道的环境本质上决定了无人机通信的性能优劣与否, 为此特选用 3GPP 标准化组织通过的无人机信道模型进行建模操作, 建模内容涵盖坐标系转换、天线模型构建、基站与用户之间的衰弱、信道模型计算参考信号接收功率等。具体流程步骤如下: ①配置基站、用户、仿真场景参数; ②利用概率公式判定基站与用户之间是否属于 LOS 径链路, 由参数配置确定是否室外(内); ③计算路径损耗; ④计算大尺度参数(时延、角度扩展、莱斯因子 K); ⑤计算信道子径链路时延; ⑥计算各簇功率; ⑦计算信道中各条子径链路的到达角与离开角; ⑧径链路内随机配对; ⑨计算交叉极化比参数; ⑩形成随机初始相位; 计算信道相关因子; 计算信道系数与参考信号接收功率 RSRP。

3.2 无人机覆盖增强与性能评估

无人机市场尤其是民用无人机近年来处于高速发展阶段, 无论是观赏性亦是实用性, 无人机在各个领域的应用也趋于广泛, 但在应用中生成的各类数据对覆盖范围与业务质量提出了一定的要求。当下的 4G 蜂窝网络在无人机中已初步实现了低延时与高速率数据传输, 单项空中接口延迟在 10ms 至 20ms 之间, 系统内小区切换的响应时间在 50ms 内, 通常情况下用户对于网络延迟的接受范围在 200ms 左右。从速率方面上看, 4G 蜂窝网络的下行峰值速率达到 100Mbps 左右, 而上行峰值速率在 10Mbps 以上, 足以完成无人机部分业务需求(如航拍、喷洒农药等)。此外 5G 网络主要面向 eMBB(增强移动宽带)、mMTC(海量机器类通信)和 uRLLC(超可靠低时延通信)三大应用场景, 从移动互联朝向万物互联转变。

5G 的性能指具体为六个层面, 即用户体验速率、连接数密度、端到端时延、移动性、流量密度、用户峰值速率。在 5G 网络通信技术助理下, 无人机的各类高尖端功能如图传、精准定位等得以实现, 赋能通信数据链路。然而当前推广 5G 网络主要是为了满足地面用户的需求, 对于无人机而言并不适用, 当高度超过 300 米范围时, 5G 基站无法覆盖, 故关于 4G 蜂窝网络是否能达成无人机的业务需求还有待进一步商榷。也正是因为如此, 根据地面用户的网络通信与无人机的业务需求情况来制定 5G 网络覆盖增强与性能评估方案具有一定的现实意义。

3.2.1 基站与 3D-MIMO 覆盖

MIMO 技术通俗来讲就是多输入与多输出, 通过多天线同时收发数据达到增强传输速率的效用, 同时还不增加占用带宽。在过去的研究中, MIMO 技术受成本等客观因素限制, 仅停留在二维层面。在 2D-MIMO 中仅在水平维度区分用户, 所能服务的用户数量也因此受到限制。而无人机在建筑上方中收到来自水平维度与垂直维度基站的信号, 因此其收到的信号强度由基站天线旁瓣的信号强度与 MIMO 增益所共同决定。在现有网络基础上即使是天线旁瓣发射的信号也难以覆盖到此区域, 无人机飞行达到一定高度则会超出基站覆盖范

围即弱覆盖问题。

为使无人机的覆盖范围与传输速率维持在稳定的水平用以保障业务顺利进行, 可以采取建立天线向上辐射的专用基站方案。通过改变天线朝向使信号传输阵地从地面指向天空, 在减少来自地面的干扰的同时还能扩大波束宽度以提升水平与垂直维度层面的扫描范围。但是这种方案需要占用基站设施与频段, 但两者又都属于宝贵资源, 一方面频段对通信行业而言是稀缺资源, 另一方面建造基站成本耗资巨大, 因此该方案可行性有待进一步论证。因此综合成本因素考量, 选用 3D-MIMO 技术能够有效解决上述问题。

3.2.2 大规模天线阵列与检测算法

MIMO 技术因能够在相同的带宽下提升容量而在无人机中加以研究并广泛应用。对于 5G 网络而言, MIMO 是关键技术之一, 能够通过多天线技术实现信号的重复利用, 继而提升网络传输速率, 但与之对应的是更大的挑战。在此基于 MIMO 系统对几种检测算法逐项分析。

(1) 最大似然检测。在所有信号图中寻找最大概率的信号矢量 s , 经信道矩阵 H 变换后与接收信号的欧式距离最小。

(2) 破零检测法。该算法将发射信号矢量 s 经信道矩阵 H 变换后与初始发射信号矢量的误差的平方和最小。

(3) 最小均方误差检测。由于破零检测法在抗噪声方面稍有欠缺, 故选用最小均方误差检测以达到克服噪声以及消除天线干扰等问题。

3.3 干扰抑制方案设计

3.3.1 基于功率控制的干扰抑制方案

通过功率控制可以使基站在不同链路中接收到的功率维持在适宜水平, 而根据反馈信息的又可以将功率控制分为开环与闭环两类功率控制, 因此基于功率控制的干扰抑制方案可也具备一定的现实意义。一是传统功率控制方案, 该方案目的在于控制小区内所有用户的 SINR 均保持在相同值。具体公式如下:

$$PSD_{TX} = \min(SINR_{target} + I_{serving} + PL_{serving}, PSD_{max}) \quad (1)$$

PSD_{TX} 即发射功率谱密度, $SINR_{target}$ 即目标 SINR 值, $I_{serving}$ 主服务小区受到干扰强度, $PL_{serving}$ 即主服务基站到用户的距离损耗, PSD_{max} 用户最大发射功率谱密度。

而对于无人机改进的功率控制方案旨在通过控制无人机的功率以减少其对地面的干扰, 在此侧重于对无人机飞行高度实施功率控制方案进行介绍。具体公式如下:

$$P(i) = \min\{P_{max}, 10\log(M(i)) + P_0 + \alpha \times PL\} \quad (2)$$

$M(i)$ 即子帧 i 上分配给用户的 PRB 个数, P_0 即预期 PUSCH 接收功率, α 即部分补偿因子, PL 即终端估计的下行路径损耗。

3.3.2 基于定向天线的干扰抑制方案

无人机在高空与基站产生 LoS 径链路造成小区之间基站的相互干扰, 也间接影响了地面用户业务。为解决干扰问题, 特指定无人机配置定向天线, 以信号的指向性减少对周边小区的干扰。在该方案中, 一是干扰检测, 基站在无人机与地面业务并存的条件下, 需要判断无人机是否造成了周边小区的干扰水平上升, 以及周边小区的无人机是否对本区域形成干扰, 而判断机制则包括 RSRP 与 CSI-RSRP; 二是波束宽度与 LOS 径方向追踪, 即通过无人机发射指向性波束来抑制其对周边小区形成的干扰, 波束方向与运动方向抑制, 借

此形成加强与主服务基站之间的联系与最大限度减少干扰的目的。

3.3.3 基于协作多点传输的干扰抑制方案

该方案 (CoMP) 通过多用户检测与干扰抑制合并等形式将干扰信号转化为有用信号, 从而提高接收信号的信噪比, 可以有效提高小区边缘用户的性能。对于无人机可以应用 CoMP 技术降低无人机对邻小区造成的干扰。

按照 CoMP 协作集中的小区是否归属于同一个基站进行区分可以将 CoMP 方案分为 Intra-Sitecomp 和 Inter-SiteCoMP 两大类。Intra-Sitecomp 是指参与 CoMP 协作的小区均归属于同一个基站, 小区内的用户由属于同一基站的不同 RRU (射频拉远模块) 服务, 在协作时需要基站内的小区之间交互各自小区内用户的数据与控制信息, 这种信息交换是及时且准确的。Inter-Sitecomp 是指协作的小区不是都属于同一个基站, 在协作时需要通过 X2 接口进行用户数据的交互, 时延相比 Intra-SiteCoMP 更大, backhaul 容量也会影响协作效果。

4 无人机仿真平台设计

4.1 无人机系统级仿真平台架构

基于 5G 的无人机系统级仿真平台架构如图 1 所示, 平台主要由参数配置、信道、用户、基站、链路级接口、程序控制、数据统计等数个模块构成, 各模块之间相互连接。平台基于 5G 网络下实现无人机在多小区多用户场景下进行仿真验证与评估, 进而模拟分配流程。其中参数配置模块选用 Lua 与 C++ 两种语言交互设计, 程序控制模块选用 Shell 语言设计, 便于维持平台服务器自动运行的均衡性, 提升开发与维护的效率。

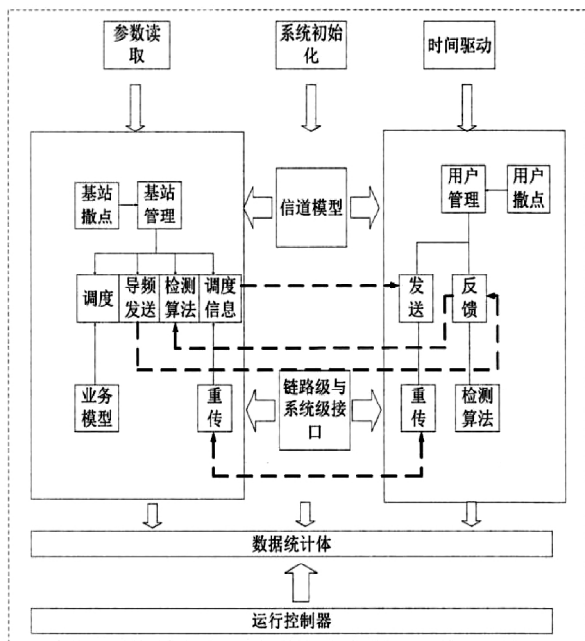


图 1 5G 网络下无人机系统及仿真平台模块构架图

4.2 系统仿真流程与模块功能

平台系统仿真流程如图 2 所示, 系统在读取初始参数后进行初始化操作, 随着流程图推进, 若仿真未结束则亟需下一个循环。其中各模块功能如下: ①用户调度模块: 配合基

站、用户、链路级接口等模块一并完成数据传输工作。②信道模块: 负责无人机的信道更新工作。③用户模块: 计算信道矩阵的更新并将状态通过子模块 (CQI) 向主服务基站反馈。④链路级接口模块: 借助该模块实现终端对于接收数据的判断, 以防复杂的解码运算。⑤基站模块: 主要承担数据的接受与解调, 判断是否需要重传数据。⑥数据统计模块: 负责系统中的数据统计与输出工作, 储存系统中所有的数据信息。

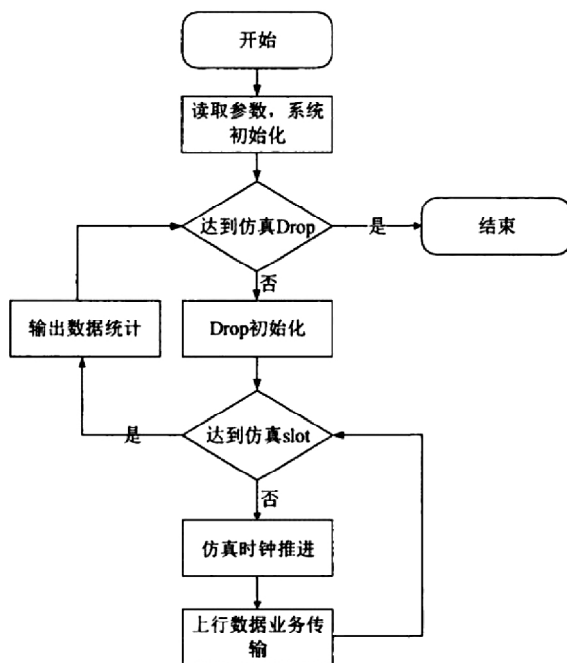


图 2 无人机仿真平台系统流程图

5 结语

综上所述, 5G 通信技术在无人机行业发展中承载着举足轻重的作用, 而各类实际应用场景中无人机仍然面临诸多严峻挑战。本研究提出了基于 5G 网络的无人机通信方案, 具体包括无人机的信道建模、通信基站的信号增强方案、干扰抑制方案以及搭建系统仿真平台等。相信今后随着 5G 通信技术的不断推广, 无人机的应用领域前景将会更加广阔, 在现有的无人机通信方案的基础上加强抗干扰性能与移动性能并辅以优化仍是当下重点所在, 其也必将有益于国家经济建设的发展。

参考文献:

- [1] 黄泽满, 刘勇, 周星, 等. 民用无人机应用发展概述[J]. 赤峰学院学报(自然科学版), 2014, 000(024):30-32.
- [2] 徐珉, 胡南. 基于蜂窝网络的无人机通信研究[J]. 移动通信, 2017(22):27-32.
- [3] 付道繁. 兼顾民用无人机通信的 5G 网络部署方案探讨[J]. 电信快报:网络与通信, 2020:6-11.
- [4] 陈瑞瑞, 张海林. 基于 Ricean 因子的无人机自适应 MIMO 通信方案[J]. 武汉大学学报(工学版), 2017:142-146.
- [5] 牛明亮. 基于 5G 网络的无人机通信方案研究[D]. 北京邮电大学, 2019.
- [6] 许娅. 无线蜂窝网中基于基站休眠和多点合作通信的能效研究[D]. 华中科技大学, 2015.