

面向低空经济的无人机通信频谱管理政策、标准与技术

陈勇, 杨健, 张余, 乔晓强

(国防科技大学第六十三研究所, 南京 210007)

摘要: 随着“低空经济”被写入政府工作报告, “低空经济”成为2024年度热点词汇。无人机(Unmanned aerial vehicles, UAVs)以其高效、灵活、低成本及多载荷等优势, 成为“低空经济”的主要产业形态。作为飞行安全和通信安全的重要保障, 无人机通信电磁频谱管理是助力“低空经济”蓬勃发展不可或缺的重要因素。本文从2015~2023年无人机电磁频谱管理政策的更迭分析入手, 深入探讨了无人机通信频谱管理政策、标准与技术, 包括无人机通信的操作频段和飞行监管; 进一步综述了以世界电信联盟(International Telecommunication Union, ITU)、美国电气电子工程师学会(Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE)和第3代合作伙伴计划(The 3rd Generation Partnership Project, 3GPP)等国际组织为代表的标准规范, 以及与无人机通信电磁频谱管理关系密切的信道模型和干扰减轻策略; 最后展望了无人机通信电磁频谱管理的当前挑战和未来研究方向。

关键词: 低空经济; 无人机通信; 频谱管理政策; 频谱管理标准; 频谱管理技术

中图分类号: TN92 **文献标志码:** A

Spectrum Management Regulations, Standards, and Technologies of Unmanned Aerial Vehicle Communication for Low Altitude Economy

CHEN Yong, YANG Jian, ZHANG Yu, QIAO Xiaoqiang

(The Sixty-Third Research Institute, National University of Defense Technology, Nanjing 210007, China)

Abstract: As “low altitude economy” is included in the government reports, it became the hot topic in 2024. Due to the advantages of high efficiency, flexibility, low cost, and multi payload, unmanned aerial vehicles (UAVs) are regarded as the main form of “low altitude economy”. As the key factor to guarantee flight safety and communication security, the spectrum management of UAV communication is an indispensable factor in promoting the vigorous development of the “low altitude economy”. This paper starts with the changes of UAV spectrum management policies from 2015 to 2023, and then deeply explores the regulations, standards and technologies of UAV communication, including the operating frequency bands and flight supervision, as well as standard specifications represented by international organizations, such as International Telecommunication Union (ITU), Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) and The 3rd Generation Partnership Project (3GPP). The subjects of channel models and interference mitigation strategies that closely related to UAV communication spectrum management are also discussed. Finally, current challenges and future research directions of UAV

communication spectrum management are presented.

Key words: low altitude economy; UAV communication; spectrum management regulations; spectrum management standards; spectrum management technologies

引 言

2023年底召开的中央经济工作会议提出,要“打造生物制造、商业航天、低空经济等若干战略性新兴产业”^[1]。低空经济正成为越来越多省市看准的“新赛道”^[1]。2024年3月,“低空经济”被写入政府工作报告,提出要“积极打造生物制造、商业航天、低空经济等新增长引擎”^[2]。2024年堪称低空经济元年,据业内预计,到2025年,低空经济对中国国民经济的综合贡献值将达3万亿至5万亿元^[3]。

2024年2月27日,上海峰飞航空科技有限公司的电动垂直起降航空器(Electric vertical take-off and landing, eVTOL)“盛世龙”深圳首飞,原本3h的车程缩短到20min^[4]。2024年4月,集齐无人驾驶载人航空器系统生产许可证、型号合格证和标准适航证的广州亿航智能技术有限公司开始其旗下EH216-S无人驾驶载人航空器的规模化生产,开启我国低空经济产业的规模商业化^[5]。2024年11月18日,中国航空运输协会通航业务部、无人机工作委员会主任孙卫国明确,中央空管委即将在合肥、杭州、深圳、苏州、成都和重庆开展eVTOL试点,将600m以下空域授权给6个城市的地方政府^[6]。与此同时,中国民用航空局将300m以下空域划设为非管制空域,助力低空经济蓬勃发展^[7]。

在低空经济如火如荼发展的同时,低空经济的代表性产品——无人机(Unmanned aerial vehicles, UAVs)及无人机群的飞行安全问题也不断引发民众关切。电磁频谱是贯穿无人机安全飞行的关键纽带,从起飞到着陆,平台控制、载荷感知、数据传输、导航定位及通信中继等功能的实现均需使用电磁频谱。2023年12月29日,工业和信息化部划分1430~1444、2400~2476、5725~5829MHz频段用于无人机的遥控、遥测和信息传输功能^[8]。其中,1430~1444MHz频段仅用于民用无人驾驶航空器遥测与数据传输下行链路,而1430~1438MHz频段又专用于警用无人机,仅1438~1444MHz频段可用于民用无人机(Civilian UAV, CUAV),按2MHz带宽划分信道,实际只有3个信道;2400~2476MHz和5725~5829MHz频段参照地面公众移动通信终端管理,不受保护。可以看出,无人机频谱容量十分受限,加之使用1430~1444MHz频段需取得频率使用许可和无线电台执照,并缴纳无线电频率占用费。实际上,无人机面临在2400~2476MHz和5725~5829MHz频段不受保护使用的局面,常见的蓝牙、WiFi、无绳电话、无线遥控模型等皆云集于此,必须时刻承受这些系统带来的有害干扰,无人机安全用频面临严峻考验,如不审慎对待,可能对“低空经济”相关产业造成不利影响。

无人机通信主要涉及两种场景:一是以无人机作为空中基站或者中继节点满足应急通信或广域覆盖的需求;二是将无人机作为空中终端连接地面控制器(地面基站)满足物流配送或数据采集的需求^[9-10]。低空经济涉及的无人机通信或通信网络主要以无人机为载体,面向物流配送或数据采集业务,需在作业过程中保持通信链路(包括无人机载荷通信链路和非载荷测控链路)的稳健可靠。因此,本文面向低空经济,以无人机通信中无人机连接地面控制器(地面基站)为主要场景,探讨无人机载荷通信频谱资源和非载荷测控的频谱管理问题(无人机导航涉及频段为窄带且固定^[11-12],不在本文讨论之列)。本文从无人机国内电磁频谱管理政策入手,洞悉2015~2023年政策变化凸显的监管趋势,进一步梳理世界主要国家对无人机使用电磁频谱资源的政策走向、操作频段和监管方式;在此基础上,探讨无人机电磁频谱管理的标准规范、信道模型、干扰减轻策略等低空物联网无人机通信电磁频谱管理关注点;最后,讨论了当前挑战和未来研究热点。

1 无人机通信频谱管理概述

1.1 无人机通信监管趋势

2015年3月10日,工业和信息化部发布了《关于无人驾驶航空器系统频率使用事宜的通知》,将840.5~845、1 430~1 444、2 408~2 440 MHz规划用于无人驾驶航空器系统^[13]。2023年12月29日,工业和信息化部发布了《民用无人驾驶航空器无线电管理暂行办法》^[8],将1 430~1 444、2 400~2 476、5 725~5 829 MHz分配给无人驾驶航空器系统使用,同时废止了2015年发布的通知。

从规划使用的频谱资源来看,1 430~1 444 MHz频段保持不变,删去了840.5~845 MHz频段,将原有的2 408~2 440 MHz扩展至2 400~2 476 MHz,并新增了5 725~5 829 MHz频段,频谱资源由原先的50.5 MHz扩展至194 MHz。新政策虽然将2 408~2 440 MHz扩展至2 400~2 476 MHz,并新增了5 725~5 829 MHz频段,但2 400~2 476 MHz(简称2.4 GHz频段)和5 725~5 829 MHz频段(简称为5.8 GHz频段)均为用于工业、科学及医疗(Industrial, scientific and medical, ISM)的开放频段,汇集了蓝牙、WiFi、无绳电话和无线遥控模型等众多业务和系统^[14],使用时无需取得无线电频率使用许可,参照地面公众移动通信终端管理,无需取得无线电台执照。相应代价是不得对其他合法无线电业务造成影响,也不能寻求无线电干扰保护。同时,对于1 430~1 444 MHz频段,不仅频段划分保持不变,使用模式也保持不变:(1)1 430~1 444 MHz频段仅用于民用无人驾驶航空器遥测与信息传输下行链路;(2)1 430~1 438 MHz频段专用于警用无人驾驶航空器通信系统或警用直升机,1438~1444 MHz频段用于其他单位和个人民用无人驾驶航空器通信系统;(3)使用1 430~1 444 MHz频段频率需向频率使用地省(自治区、直辖市)无线电管理机构申请取得无线电频率使用许可和无线电台执照,并按规定缴纳无线电频率占用费(即“频占费”)。需要注意的是,新政策要求以直连通信方式使用1 430~1 444、2 400~2 476、5 725~5 829 MHz频段频谱资源进行无人机的遥控、遥测和信息传输,而通过地面公众移动通信系统频率实现无人机的遥控、遥测和信息传输功能则要求安装用户识别卡(即SIM卡)。

上述政策的变化可总结为:(1)无人机使用1 430~1 438 MHz频段频谱资源需办理台站执照并缴纳频占费;(2)无人机只能以次要用户身份使用2 400~2 476、5 725~5 829 MHz频段频谱资源,不受保护,需忍受该频段内其他用户造成的干扰;(3)无人机使用地面公众移动通信系统频率需安装SIM卡便于监管。推测监管部门逐步将无人机视为地面公众移动通信终端的一种形态,鼓励其使用地面公众移动通信系统频率,以无人机连接地面公众移动通信基站(即“地面基站”)的形式进行遥控、遥测和信息传输。

1.2 无人机通信操作频段

虽然在2015年的无人机电磁频谱管理政策中840.5~845 MHz频段被划分给无人机上下行测控链路使用^[13],但是最新的无人机电磁频谱管理政策已将该频段收回^[8],直传链路的频谱资源使用以2.4 GHz和5.8 GHz频段为主。众所周知,通信频率越高,信号功率衰减越快,传输距离越近,但传输带宽可选择余地更大,往往能够支持更高的传输速率。当无人机通信直传链路使用的频谱资源从840.5~845 MHz变成2.4 GHz和5.8 GHz以后,信号传播功率衰减得更快,传输范围进一步缩小,在城区环境飞行还要承受WiFi、蓝牙等业务带来的干扰,但也应注意到其直传链路可使用的频谱资源从50.5 MHz扩展到194 MHz,与WiFi、蓝牙等业务做好兼容,则可以支撑视频业务的流畅传输。高楼林立的城市环境是低空经济无人机通信的主要场景之一,一方面要应对高楼等障碍物遮挡导致的大尺度衰落,另一方面也要注意与WiFi、蓝牙等业务的兼容性设计,上述涉及到无人机通信信道模型和干扰减轻方面的设计考虑,将在本文后续部分加以阐述,本节重点讨论其他国家为无人机通信划分的操作频段。

美国联邦通信委员会(Federal Communications Commission, FCC)将5 030~5 091 MHz频谱资源划分给无人机系统使用,且要求在上述频段中已划分的一个10 MHz带宽内进行无人机系统与地面终端的所有非载荷测控信息交互^[15]。随着无人机市场蓬勃发展, FCC意识到5 030~5 091 MHz的61 MHz频谱资源显然已无法满足无人机数据传输速率和带宽需求,已着手开发专用的动态频率管理系统(Dynamic frequency management system, DFMS)^[16]。

英国通信管理局(Office of communications, Ofcom)对于使用2.4 GHz(2 400~2 483.5 MHz)和5.8 GHz(5 725~5 875 MHz)共用频段的无人机免于颁发执照,对于使用1 880~1 920 MHz和5 030~5 091 MHz专用频段的无人机则要求申请飞行执照,费用为每证每年75 £^[17]。

法国内政部要求无人机使用2.4 GHz的WiFi频段和5 GHz的802.11n频段进行测控和数据传输,以多输入多输出-正交频分复用(Multiple input multiple output-Orthogonal frequency division multiplexing, MIMO-OFDM)为无人机信号的调制方式^[18]。因此,在法国使用无人机,必须要承受来自于WiFi无处不在的干扰。

日本国土安全省对于无人机的监管较为细致,要求民用无人机只能在150 m以下空域飞行,不仅规定了无人机的使用频段,而且规定了各个频段的最大发射功率:(1)无需颁发飞行执照的有73 MHz频段(测控信道,最大发射功率200 μ V/m)、920 MHz频段(测控信道,最大发射功率20 mW)、2.4 GHz频段(测控及数传信道,10 mW/MHz);(2)需要申请飞行执照的有1.2 GHz频段(数传信道,最大发射功率1 W)、169 MHz频段(测控及数传信道,最大发射功率10 mW)、2.4 GHz频段(测控及数传信道,最大发射功率1 W)、5.7 GHz频段(测控及数传信道,最大发射功率1 W)^[19]。

中国民用无人机的频谱资源使用归口工业和信息化部进行管理,同样较为细致,除规划1 430~1 444、2 400~2 476、5 725~5 829 MHz三个频段用于无人机通信之外,对于1 430~1 444 MHz还规定了其信道带宽和发射功率限值,对于参照微功率短距离设备管理^[20]的无人机限定其使用2.4 GHz和5.8 GHz共用频段以及在各频段的发射功率限值,对于不参照微功率短距离设备管理的无人机关定了其在2.4 GHz和5.8 GHz频段工作时的等效全向辐射功率限值、等效全向辐射功率谱密度限值、频率容限以及无用发射限值等技术参数^[8]。

其他发展中国家也紧跟“低空经济”的发展潮流。2019年,巴西就与其他I区国家一起(阿尔及利亚、沙特阿拉伯、巴林、埃及、阿拉伯联合酋长国、约旦、科威特、黎巴嫩、摩洛哥、阿曼、卡塔尔、阿拉伯叙利亚共和国、苏丹、南苏丹和突尼斯除外),将5 150~5 250 MHz确定为无人机遥测频段^[21]。同时规定,5 030~5 091 MHz亦可用于无人机系统的视距控制和非载荷通信,但不得要求运行在5 150~5 250 MHz和5 030~5 091 MHz频段的其他无线电系统提供保护。

综上所述,虽然受限于国际电信联盟(International Telecommunication Union, ITU)对于所在无线电区域的频段和业务划分(例如,美国属于第二区,英国、法国属于第一区,中国、日本属于第三区),各国对于授权频段的规划各有不同(例如,美国FCC将5 030~5 091 MHz频段划分给航空移动、卫星航空移动、航空无线电导航等无人机相关业务),但是对于2.4 GHz和5.8 GHz非授权共用频段的使用基本保持一致^[22]。

1.3 无人机飞行监管

中国对于民用无人机的日常飞行监管归口在中国民用航空局(Civil Aviation Administration of China, CAAC),主要依据2023年5月31日颁布的《无人驾驶航空器飞行管理暂行条例》^[23]进行管理,主要监管政策包括:无人机所有者应实名登记、小/中/大型无人机应投保责任险、无人机操作员应取得飞行执照等。

美国联邦航空管理局(Federal Aviation Administration, FAA)负责对无人机飞行进行监管,要求所

有质量在0.55 b(1 b \approx 0.454 kg)以上的无人机都需注册,通过“无人机通用-小型”的航空知识考试,获得无人机飞行员证书,并要求无人机飞行员每24个月完成一次复训^[24]。

俄罗斯联邦航空运输管理局(Federal Air Transport Authority, FATA)负责对民用无人机飞行进行监管。自2014年8月起,俄罗斯航空运输法规要求无人机飞行必须获得FATA或当地分支机构的许可,并附有详细的飞行计划,如果不遵守相关规定进行无人机飞行,可能会被处以最高13 800美元的罚款^[25]。

考虑到英国已于2020年1月31日退出欧盟,欧盟对于无人机的监管政策对英国不再适用。英国民用无人机的监管由英国民航局(Civil Aviation Authority, CAA)负责,要求超过250 g的无人机和操作人员均需取得执照(如果无人机带有拍照或摄像功能,则无论质量是否超过250 g,均需取得无人机执照),且只能在120 m净高以下空域飞行。其中,无人机执照每5年需重新审核、操作人员执照每年都需重新审核。对于飞行质量超过10 kg的无人机,无人机和操作人员都需要经过更加严格的审核以取得相关执照^[26]。

欧盟其他国家,如法国、德国,主要遵从欧盟航空安全局(European Union Aviation Safety Agency, EASA)2022年4月更新的监管政策,主要限制条款包括:最大飞行高度为150 m、只允许在白天飞行、只允许视距飞行、无人机和操作人员必须取得执照以及无人机飞行必须购买保险等^[27]。

对于其他发展中国家,泰国规定无人机及无人机驾驶员需提前完成注册、购买保险、申请飞行许可,完成上述步骤需15个工作日,许可具有2年有效期;马来西亚规定在机场及120 m以上空域禁飞无人机,20 kg以上的无人机才需注册,消费级无人机则无需此步骤;波兰规定250 g以上的无人机均需注册,120 m以上空域禁飞,与欧盟规定相比更加严格,其他与欧盟统一规定保持一致^[28]。

总的来说,中国与世界其他国家的监管政策保持一致,如无人机操作员应当取得飞行执照、无人机应当办理保险等,有些方面则较为宽松,如,虽然规定了120 m以下为无人机适飞空域,但同时亦明确:小型无人机(空机质量 \leq 15 kg、最大起飞质量 \leq 25 kg等)、轻型无人机(空机质量 \leq 4 kg、最大起飞质量 \leq 7 kg、最大平飞速度 \leq 100 km/h)可经空中交通管理机构批准后,在300 m以下空域与有人驾驶航空器(简称“有人机”)进行融合飞行;又如,微型无人机(空机质量 \leq 0.25 kg、最大飞行高度 \leq 50 m、最大平飞速度 \leq 40 km/h,无线电发射设备符合微功率短距离技术要求)、轻型无人机在120 m以下适飞空域飞行的,无需批准,相比之下标准放宽不少。加之为促进“低空经济”的发展,CAAC在2023年12月21日发布《国家空域基础分类方法》^[7],将300 m以下划分为非管制空域,又对合肥、杭州、深圳、苏州、成都和重庆这6个城市试点开放600 m以下空域。可以说,在无人机飞行监管政策方面,中国先行先试,走在了世界前列。

2 无人机通信相关标准

自无人机凭借其优秀的移动性、高空视角和不断攀升的载荷能力,在搜索救援、遥感探测、无线通信、物流配送及交通运输等方面不断展现其特有优势时,围绕无人机连接地面控制器(地面基站)的这种应用场景,世界主要通信组织及电信产业联盟也不断制定与时俱进的行业标准,促进无人机及其相关产业的发展,主要包括ITU^[22]、美国电气电子工程师学会(Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE)^[29]和第3代合作伙伴计划(The 3rd Generation Partnership Project, 3GPP)^[30]等,下面分别阐述。

2.1 ITU 相关标准

ITU是联合国的重要专门机构,也是联合国机构中历史最长的国际组织,主管信息通信技术事务,负责分配和管理全球无线电频谱与卫星轨道资源,制定全球电信标准,向发展中国家提供电信援助,促

进全球电信发展等。ITU总部设在瑞士日内瓦,包括194个成员国和700多个部门成员、部门准成员和学术成员。ITU早在2009年就以ITU-R报告的形式开始了无人机通信及电磁频谱管理方面的专门研究,陆续形成了以下报告:

(1)ITU-R M.2171报告书:无人机系统的特点以及支持其在非隔离空域安全运行的频谱要求^[31]。通信是确保无人机飞行安全的关键因素之一,据估算,当无人机连接地面网络时,确保其安全飞行的最大频谱需求为34 MHz;当无人机连接卫星网络时,确保其安全飞行的最大频谱需求为56 MHz。

(2)ITU-R M.2204报告书:无人机系统感知和避让系统的使用特性和频谱考虑^[32]。无人机系统感知和避让系统主要用于机载雷达和地面雷达,以及其他感知和避让系统。其中,适用于规划无人机机载雷达系统的频谱资源有4 200~4 400、5 350~5 470、8 750~8 850、9 300~9 500、13 250~13 400 MHz;适用于规划无人机地面雷达系统的频谱资源有1 215~1 240、1 240~1 300、1 300~1 350、1 350~1 370、2 700~2 900、9 000~9 200 MHz;适用于规划无人机其他感知和避让系统的频谱资源有190~285、325~405、415~435、510~535 kHz,以及74.8~75.2、108~117.95、328.6~335.4、960~1 215、5 000~5 030 MHz。

(3)ITU-R M.2205报告书:对960~1 164 MHz和5 030~5 091 MHz频段的航空移动业务划分研究结果,以支持无人机的控制和非有效载荷通信链路(控制链路)^[33]。对于960~976 MHz和1 151~1 156 MHz频段,尽管大部分频谱资源已用于航空无线电导航系统,但仍可规划10.4 MHz频谱资源用于无人机控制链路,以无人机连接地面基站的方式控制无人机;微波着陆系统和卫星航空移动系统共享5 030~5 091 MHz频谱资源,需在频段内满足-130 dBm/150 kHz的条件,以避免干扰微波着陆系统,则可将该频段频谱资源以无人机连接卫星的方式用于无人机控制链路。

(4)ITU-R M.2229报告书:为支持15.4~15.5 GHz频段无人机的视距控制和非有效载荷通信链路(控制链路)而提出的兼容性研究^[34]。无人机视距控制链路需要与15.4~15.5 GHz频段上运行的无线电定位系统保持400 km的距离,以免干扰该系统的System-6型接收机;无人机视距控制链路需要与15.4~15.5 GHz频段上运行的空管雷达保持827 km的距离,以免被其干扰;无人机视距控制链路需要与15.4~15.5 GHz频段上运行的航空无线电导航系统保持903 km,以免干扰航空无线电导航系统;无人机视距控制链路无法与15.4~15.5 GHz频段上运行的射电天文业务系统兼容。因此,在15.4~15.5 GHz频段上,无法规划无人机控制链路频谱资源,并与在该频段上运行的其他系统保持兼容。

(5)ITU-R M.2230报告书:无人机系统在13.25~13.40、15.4~15.7、22.5~22.55、23.55~23.60 GHz频段超视距控制和非有效载荷通信链路(控制链路)与现有业务之间的频谱共享分析^[35]。在13.25~13.40 GHz运行的航空雷达系统比无人机控制链路接收机噪底高出至少23.6 dB,无法规划无人机超视距控制链路;在15.4~15.7 GHz运行的卫星通信系统比无人机控制链路接收机噪底高出至少10 dB,也无法规划无人机超视距控制链路;如在22.5~22.55、23.55~23.60 GHz频段规划无人机控制链路,则需与在该频段内运行的固定业务接收机保持38.5~331 km的距离,考虑到固定业务接收机的部署密度,同样无法规划无人机超视距控制链路。因此,在13.25~13.40、15.4~15.7、22.5~22.55、23.55~23.60 GHz频段内,无法规划无人机超视距控制链路。

(6)ITU-R M.2233报告书:无人机控制和非有效载荷通信链路(控制链路)技术特性案例^[36]。案例1:对于960~1 164 MHz频段,提供了以无人机连接地面基站方式规划视距控制链路的链路预算方法;对于5 000~5 150 MHz频段,提供以无人机连接卫星方式规划视距控制链路的2组参数,分别对应ITU-R M.2237报告书^[37]的2种架构。案例2:对于1 545~1 555 MHz频段(空间到地球)、1 610~1 626.5 MHz频段(空间到地球和地球到空间)和1 646.5~1 656.5 MHz频段(地球到空间),提供了以无人机连接卫星方式的超视距控制链路特性。案例3:对于5 030~5 091 MHz频段,提供了以无人机连接

卫星方式的视距控制链路特性。案例4:提供了在12/14 GHz和20/30 GHz频段,以无人机连接卫星方式超视距控制无人机的实际案例。

(7)ITU-R REP-M.2236报告书:面向5 000~5 010 MHz和5 010~5 030 MHz的无人机视距控制和非有效载荷通信链路的频谱兼容性研究^[37]。在5 000~5 010 MHz频段,大中型无人机与无人机控制站之间的传输不可行,因为无法与导航卫星频谱兼容;小型无人机向无人机控制站传输,且保证小型无人机的等效全向辐射功率(Effective isotropic radiated power, EIRP)低于-4.5 dBW、4 990~5 000 MHz的带外EIRP \leq -106 dBW/MHz、5 010~5 030 MHz的带外EIRP \leq -75 dBW/MHz,则无人机视距控制链路和导航卫星可实现频谱兼容。在5 010~5 030 MHz频段,无人机视距控制链路和导航卫星无法实现频谱兼容。

(8)ITU-R REP-M.2237报告书:面向5 030~5 091 MHz的无人机视距控制和非有效载荷通信链路的频谱兼容性研究^[38]。无人机视距控制链路和航空导航业务系统可在5 030~5 091 MHz频段实现频谱兼容,只需避免与微波着陆系统的占用带宽(150 kHz)冲突即可。

(9)ITU-R REP-M.2238报告书:面向5 091~5 150 MHz的无人机视距控制和非有效载荷通信链路的频谱兼容性研究^[39]。考虑到地面控制站天线将不可避免地指向非静止轨道卫星,因此在5 091~5 150 MHz频段无法实现地面控制站向无人机控制链路和运行在该频段的非静止轨道卫星的频谱兼容;在5 091~5 150 MHz频段可以有条件地实现无人机向地面控制站链路和运行在该频段的非静止轨道卫星的频谱兼容,但需要避免无人机对非静止轨道卫星波束范围内地面接收机的干扰。

综上所述,自2009年开始,ITU陆续开展了多项频谱兼容性分析研究,既包括960~1 164、5 030~5 091、5 000~5 010、5 010~5 030、5 091~5 150 MHz等无人机以视距或非视距方式连接地面基站(地面控制站)的场景,也包括15.4~15.5、13.25~13.40、15.4~15.7、22.5~22.55、23.55~23.60 GHz等无人机以视距或非视距方式连接卫星的场景,目的就是即将到来的无人机市场爆发预先规划好频谱资源,涉及无人机的有效载荷通信链路和非有效载荷通信链路(控制链路)。通过对上述ITU研究报告的分析可见,在5 030~5 091 MHz频段规划无人机有效载荷通信链路和非有效载荷通信链路(控制链路)遇到的干扰最小,所需的干扰减轻或者干扰规避措施最简单,这也为后期将5 030~5 091 MHz频段作为无人机有效载荷通信和非有效载荷通信的频谱资源做了技术上的充分准备和规划上的前期铺垫,进而,《无线电规则》也以5.443D脚注的形式对涉及的干扰规避措施进行了明确^[40]。

此后,一方面因ITU-R研究报告不具有强制性,另一方面在规划无人机通信潜在频谱资源之后,亟需开展通信方式、通信服务和通信组网等一系列研究。因此,自2019年开始,ITU开始陆续公布相关标准化建议书,主要包括:

(1)ITU-T REC-F.749.10标准化建议书:民用无人机通信服务要求^[41]。该建议书给出了民用无人机的通信服务要求,包括有效载荷通信要求、非有效载荷通信要求、飞行控制系统的通信要求、飞行数据传输要求以及有效载荷的通信服务要求,给出了民用无人机的5种通信场景,如图1所示。

场景1:手持式控制器与无人机之间通信。一种方式是接入ISM频段(即2.4 GHz频段或5.8 GHz频段)以直连方式控制无人机以及与无人机进行数据交互;另一种方式是借助地面基站为中继实现对无人机的控制和数据交互。

场景2:地面控制站与无人机之间通信。与场景1类似,可以通过接入ISM频段或借助地面基站中继的方式对无人机进行控制和数据交互。

场景3:无人机与地面基站(宏蜂窝)之间通信。依托4G/5G地面公众移动通信网络,以视距或非视距方式连接无人机,并进行控制和数据传输。

场景4:无人机之间的通信。如距离较近,一般接入ISM频段以直连方式通信;如距离较远或超出视距范围,一般借助4G/5G地面公众移动通信网络实现机间通信。当无人机群编队飞行时,可将其中一个无人机设置为WiFi热点,通过它来协调和控制群内其他无人机。

场景5:无人机与地面基站(微蜂窝)之间通信。与场景3类似,依托4G/5G地面公众移动通信网络,以视距方式连接无人机,并进行控制和数据传输。

该标准化建议书提到,无人机监管部门可要求无人机安装SIM卡,并在无人机起飞前将地面公众移动通信用户识别码(即IMSI码)通过地面基站发给监管部门,在监管部门数据库中查询到认证信息后,无人机方可解锁或准起飞,该表述符合前文“推测监管部门逐步将无人机视为地面公众移动通信终端”的判断。

(2)ITU-T REC-F.749.11 标准化建议书:民用无人机实现移动边缘计算的要求^[42]。该建议书认为,移动边缘计算(Mobile edge computing, MEC)将算力和存储配置到移动网络的边缘,显著降低了传输延迟和能耗,在搜索和救援、大型集会临时热点部署、灾害导致地面基站受损等现实场景下,无人机可作为空中基站和中继节点,扩展移动网络的覆盖范围,并具有极强的机动性、自主性和灵活性,因此需要对无人机实现移动边缘计算(UAV-MEC)的要求予以明确。该建议书提出了UAV-MEC场景的系统架构、对无人机的功能要求、对UAV-MEC网络的功能要求,以及UVA-MEC场景下的安全要求。

(3)ITU-T REC-F.749.12 标准化建议书:民用无人机通信应用框架^[43]。该建议书给出了民用无人机通信应用的框架,包括飞行控制、飞行数据传输、有效载荷数据传输和视频/图像传输等。最后,还给出了基于4G/5G基站对无人机飞行安全进行监测监管的案例,如图2所示,具体流程为:

- ① 用户将用户和无人机信息发送至民用航空管理机构登记。
- ② 民用航空管理机构保存用户和无人机信息,将用户信息、无人机信息与通信模块绑定后,发送至民用无人机飞行监管机构。
- ③ 民航管理机构向无人机飞行监管机构实时发送通告和禁飞区信息。
- ④ 用户进行无人机起飞准备,依托4G/5G基站上报飞行计划。
- ⑤ 无人机在线发起授权请求,无人机飞行监管机构验证用户信息、无人机信息,确定是否授权起飞。

⑥ 如授权起飞,将验证码通过4G/5G网络发送给无人机,无人机起飞并将飞行数据实时上报至无人机飞行监管机构。如无人机接近禁飞区,无人机操作员将收到警告。

⑦ 如无人机飞入禁飞区,无人机飞行监管机构将强制无人机返航/着陆。

(4)ITU-T REC-F.749.13 标准化建议书:使用人工智能的民用无人机飞行控制框架和要求^[44]。该建议书给出了民用无人机使用人工智能进行飞行控制的框架和功能要求。

(5)ITU-T REC-F.749.14 标准化建议书:民用无人机的协同需求^[45]。鉴于无人机以机群模式应用



图1 民用无人机通信场景^[39]

Fig.1 Communication scenarios of CUAVs^[39]

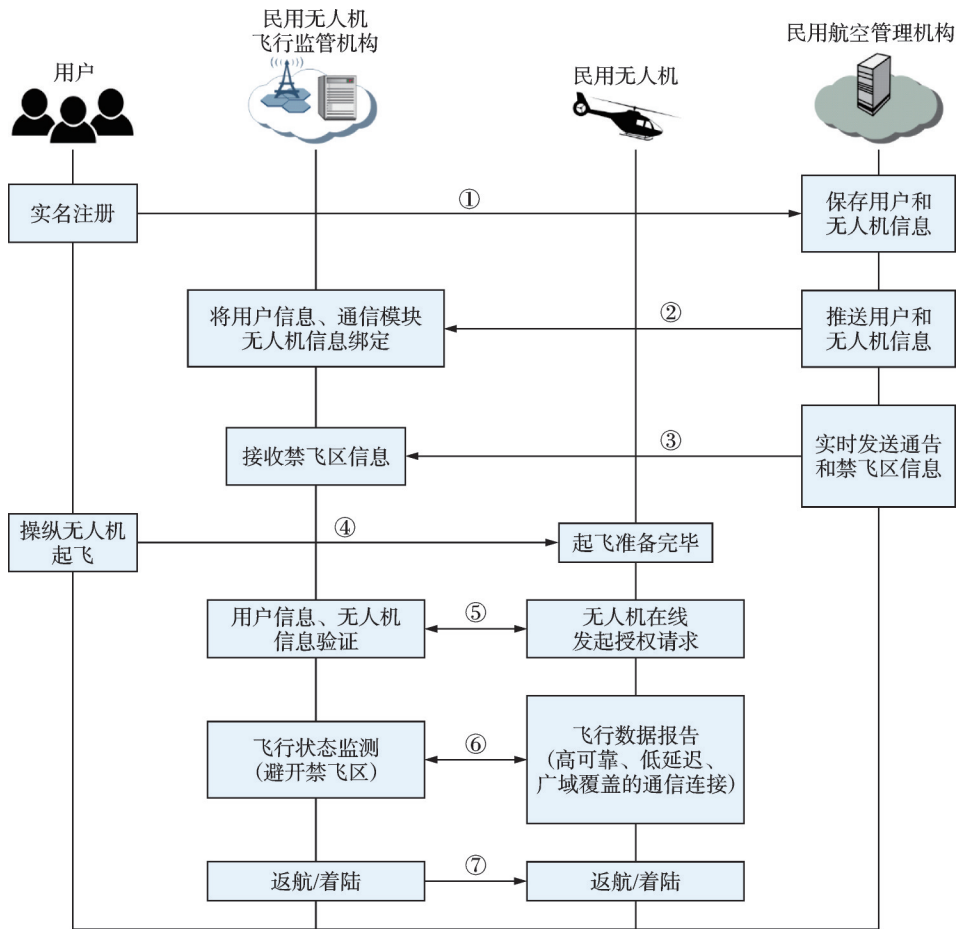


图2 基于4G/5G基站对无人机飞行安全的监测监管^[43]

Fig.2 UAV security flight monitoring based on 4G/5G cellular network^[43]

的场景越来越多,该建议书给出了无人机之间的协同需求,包括协同框架、无人机间网络连接需求、无人机间数据传输需求、无人机群协同任务执行需求,如图3所示。

(6)ITU-T REC-F.749.15 标准化建议书:使用民用无人机进行检查和检验业务的要求^[46]。对绵延数百公里的电力线或输油管道等进行检查检验以确定其是否存在老化、损坏、腐蚀或泄漏,是其主管部门的重要职责,这项工作不仅耗时耗力,而且危险系数高,不适合人类完成。带有高清摄像头的无人机为开展此项业务带来了极大的便利,该建议书给出了使用民用无人机开展高清或虚拟现实检查和检验业务的要求。

(7)ITU-T REC-F.749.16 标准化建议书:基于民用无人机的物流快递的要求^[47]。利用民用无人机进行物流配送是未来无人机的典型应用场景之一,完整的航空物流快递服务包括大型载人运输机运

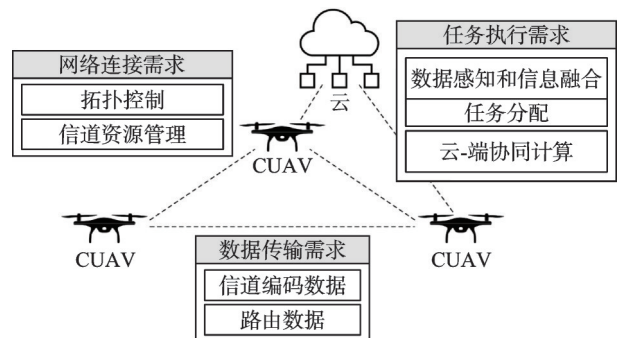


图3 民用无人机之间的协同框架^[43]

Fig.3 Framework of CUAV coordination^[43]

输、中型支线民用无人机运输和末端小型无人机运送,该建议书给出了利用民用无人机进行物流快递的要求,包括路线规划要求、飞行控制要求和网络通信要求。

(8)ITU-T REC-F.749.18 标准化建议书:使用民用无人机的应急服务的框架和要求^[48]。民用无人机在应急救援领域具有不可替代的优势。灾害发生后,应急救援的任务主要是找到幸存者并减少损失,救援人员进入地震、洪水等灾害现场既危险又困难,而集成了高清摄像头的无人机则为应急救援服务提供了极大的便利。该建议书给出了使用民用无人机进行应急服务的框架、要求和用例。

上述ITU 标准化建议书聚焦无人机通信业务,既有关于无人机通信总体框架的ITU-T REC-F.749.10、ITU-T REC-F.749.12、ITU-T REC-F.749.14 建议书,也有涉及无人机具体应用场景的ITU-T REC-F.749.15、ITU-T REC-F.749.16、ITU-T REC-F.749.18 建议书,还注重与人工智能、移动边缘计算等新兴技术结合,如ITU-T REC-F.749.11 和ITU-T REC-F.749.13 标准化建议书。可以说,上述ITU 标准化建议书的公布为无人机通信相关标准政策的制定提供了指南,助力了无人机相关产业发展。

2.2 IEEE 相关标准

IEEE 总部位于美国纽约,是一个国际性的电子技术与信息科学工程师的协会,也是全球最大的非营利性专业技术学会,其在全球拥有43万多名会员。作为全球最大的专业技术组织,IEEE 在电气及电子工程、计算机、通信等领域发表的技术文献数量占全球同类文献的30%。IEEE 引领着信号和信息处理、电力、电子、计算机、通信、控制、遥感、生物医学、智能交通和太空等技术领域的最新发展方向;在太空、计算机、电信、生物医学、电力及消费性电子产品等领域已制定了1300多个行业标准,现已发展成为具有较大影响力的国际学术组织。IEEE 从2020年起陆续公布无人机通信领域相关标准:

(1)IEEE Std-1937.1 标准:无人机有效载荷设备的接口需求和性能特征^[49]。该标准介绍了无人机有效载荷的通用接口需求和性能特征,无人机有效载荷接口分为3类:机械接口、电气接口和数据接口。机械接口描述如何将载荷固定在无人机上;电气接口包括电源接口和双向通信接口;数据接口指的是通信协议。

(2)IEEE Std-1939.1 标准:为无人机操作构建低空空域框架^[50]。该标准定义了一种进行无人机高效空中交通管理的低空空域架构,从网格技术、遥感数据、通信组网、航路规划和运营管理5个方面阐述了基于无人机低空空域架构。

(3)IEEE Std-1936.1 标准:无人机应用框架^[51]。该标准中构建了支持无人机应用的框架,规定了典型的无人机应用类别、应用场景和所需的应用环境。列举了无人机应用的一般设施要求,包括飞行平台、飞行控制系统、地面控制站、有效载荷、控制链路和数据链路以及起降系统等。无人机安全管理要求包括适航性、空域和空中交通要求、操作员资格人员资格、保险以及安全保密等,详细说明了具体操作流程,并定义了操作记录和操作报告的格式,包括数据分类、数据采集和处理、数据记录和分析以及数据参考格式。

(4)IEEE Std-1937.11 标准:基于无人机系统的极坐标摄影测量技术要求^[52]。该标准描述了使用极坐标摄影测量方法获取、组织、存储和显示无人机系统获取图像数据的方法。

(5)IEEE Std-1936.2 标准:面向民用轻小型无人机摄影测量架空输电线路标准^[53]。随着民用轻型、小型无人机系统在工程测量中的广泛应用,无人机已广泛用于架空输电线路工程的测绘。为了统一要求,该标准规定了利用轻型、小型无人机进行架空输电线路测绘、测量、注记和数据处理的技术要求,还规定了轻型、小型无人机航空摄影测量在架空输电线路测量中各作业环节的关键技术指标。

(6)IEEE Std-1937.3标准:基于短消息机制的民用无人机飞行数据传输^[54]。该标准规定了基于全球导航卫星系统(Global navigation satellite system, GNSS)短消息机制的无人机飞行监管数据的内容、传输协议和传输方法。

(7)IEEE Std-1937.8标准:推荐无人机蜂窝通信终端功能和接口规范^[55]。该标准介绍了安装在无人机上的蜂窝通信终端的接口和功能规范。规范分为4类:终端的接口和功能规范、数据传输规范、环境和可靠性规范以及安全实践。终端的功能规范包括电源管理、蜂窝网络通信、飞行数据和有效载荷数据的收集、处理和传输、设备管理和安全管理。终端接口规范为电气接口和机电接口规范,电气接口又包括电源接口、通信接口、人机接口和天线接口,数据传输是飞行数据和有效载荷数据传输协议以及终端的有效载荷数据安全实践。最后,介绍了终端的接口环境、可靠性和电磁兼容性。

可见,与ITU研究报告和标准化建议书相比,IEEE标准更加具体,更加聚焦于无人机通信的某一方面,虽然不及ITU研究报告和标准化建议书的体系性和规范性,但在某一方面仍不失为一本极具指导性的手册,如IEEE Std-1937.3标准详细规定了以短消息发送的民用无人机飞行数据收发格式,IEEE Std-1936.2标准详细给出了利用轻、小型无人机进行架空输电线路测量测绘的方法和标准规范。这些标准对于从事相关工作的工程师来说具有相当大的参考价值。

2.3 3GPP相关标准

3GPP是一个全球性通信技术组织,成立之初是为第3代移动通信系统制定全球适用的技术规范和技术报告。随后3GPP的工作范围得到了改进,增加了对移动通信长期演进系统的研究和标准制定。3GPP制定的标准规范以Release为版本进行管理,平均1~2年就会完成一个版本的制定,从建立之初的R99,之后到R4,目前已经发展到R20。3GPP工作组提供技术规范(Technical specifications, TSs)和技术报告(Technical reports, TRs),再交由技术规范组审批,经批准后会进入到标准化的处理流程。

(1)Release 19-TS 22.125:3GPP中的无人机系统支持^[56]。该技术规范给出了通过3GPP系统操纵无人机的要求,包括无人机的远程识别和跟踪、空中交通管制和公共安全需求,该技术规范主要就通过3GPP系统操纵无人机应当具备哪些功能进行了概括性的描述。

(2)Release 16-TR 22.825:无人机系统远程识别研究^[57]。该技术报告描述了通过3GPP系统对无人机系统进行远程识别的10个应用场景和相应的业务需求细节,可视为是对Release 19-TS 22.125技术规范中无人机远程识别需求的进一步深化。

(3)Release 19-TS 23.255:无人机系统的应用层支持-功能架构和信息流^[58]。该技术规范规定了由无人机系统应用驱动器组成的无人机应用层功能架构和信息流处理过程,以确保无人机系统在3GPP网络上的高效部署和运用。

(4)Release 19-TS 23.256:支持无人机系统的连接、识别和跟踪^[59]。该技术规范可视为是对Release 19-TS 22.125技术规范中无人机识别和跟踪方法的详细描述,包括无人机控制、无人机授权认证、无人机跟踪、无人机直连通信、无人机ID广播、无人机探测和避让、飞行前监测和飞行中监测等功能的详细描述和信息流处理细节。

(5)Release 18-TR 23.700-55:无人机应用增强架构研究^[60]。该技术针对无人机间直连通信、多无人机运营部署、多无人机直连通信链路的协同以及无人机监测避让等4种需求提出了5种解决方案。

(6)Release 18-TR 23.700-58:无人驾驶航空系统和城市空中机动的进一步架构增强研究^[61]。该技术报告针对无人机直连通信、无人机ID广播、无人机探测和避让等3种需求提出了7种解决方案,并对无人机ID广播和无人机探测避让的需求解决方案进行了评估。

(7)Release 19-TR 23.700-59:无人机系统、无人机对城市空中交通的增强架构研究^[62]。该技术报告针对无人机飞行前规划和飞行中监测、5G基站信息辅助无人机检测避让、无人机静默区等3种需求提出了17种解决方案。

(8)Release 17-TR 23.754:支持无人机系统连接、识别和跟踪研究^[63]。该技术报告针对3GPP系统支持无人机与地面授权第三方设备(如警方设备)进行连接、识别和跟踪的需求提出了27种解决方案。

(9)Release 17-TR 23.755:无人机系统应用层支持研究^[64]。该技术报告针对通过3GPP系统高效部署和无人机的10种需求提出了18种解决方案,并逐一进行了评估。

(10)Release 19-TS 24.257:无人驾驶航空系统应用使能层-协议方面^[65]。该技术规范针对无人机与无人机空中交通管制服务器、无人机之间的通信需求,给出了通信协议的消息格式、消息内容、错误处理和系统参数。

(11)Release 18-TS 29.256:无人驾驶航空系统网络功能-空管业务^[66]。该技术规范概略地给出了利用无人机网络实现空管业务的需求。

(12)Release 19-TS 29.257:无人机系统的应用层支持-应用程序驱动器服务^[67]。该技术规范定义了无人机应用程序驱动器的通信协议和数据模型,并针对性地给出了各项业务的应用程序接口。

(13)Release 18-TS 33.256:无人机系统的安全方面^[68]。该技术规范针对Release 19-TS 23.256中连接、识别和跟踪功能的实现,给出了安全流程。

(14)Release 19-TR 33.759:无人机系统安全增强研究^[69]。该技术报告指出了多无人机控制、多无人机授权认证、多无人机跟踪、多无人机直连通信、多无人机ID广播、多无人机探测和避让、多无人机飞行前监测和飞行中监测等功能实现过程中潜在的安全问题,并提供了9种解决方案。

(15)Release 17-TR 33.854:无人机系统安全问题研究^[70]。该技术报告研究了无人机系统在授权和认证、定位信息处理、隐私保护、身份鉴别和测控链路等环节的安全问题,并提供了16种解决方案,且逐一进行评估。

3GPP与无人机相关的技术报告和技术规范均围绕无人机连接3GPP系统的场景展开。其中,Release 19-TS 22.125技术规范可视为总体框架,Release 16-TR 22.825技术报告将通过3GPP系统操纵无人机细化为10个场景,Release 19-TS 23.255和Release 19-TS 23.256详细描述了涉及的无人机功能和信息处理流程。Release 18-TR 23.700-55、Release 18-TR 23.700-58、Release 18-TR 23.700-59、Release 17-TR 23.754、Release 17-TR 23.755对通过3GPP系统操纵无人机场景的各种需求提出了完善的解决方案。Release 19-TS 24.257给出了无人机与3GPP系统的完整通信协议,Release 19-TS 29.257进一步给出了通信协议的数据模型和应用程序接口。Release 18-TS 33.256、Release 19-TR 33.759、Release 17-TR 33.854对无人机飞行期间的安全问题进行了较为深入的研究,并提出解决方案。Release 18-TS 29.256给出了无人机空管的业务需求。由上可见,3GPP关于无人机通信的多个技术报告和技术规范之间呈逐渐递进、逐步深入的关系。与ITU相关报告和标准化建议书不同,3GPP技术报告和技术规范更加注重细节,相应技术文档已经完整地给出了相应的通信协议和应用程序接口,预期3GPP仍将按此思路继续无人机连接地面基站场景的研究。

表1给出了无人机通信相关标准概览。可见,ITU主要聚焦于无人机通信使用的频谱资源,通过对多个潜在频段进行频谱兼容性研究,确定无人机可在5 030~5 091 MHz频段规划其通信和控制链路使用的频谱资源;IEEE则聚焦于无人机通信的技术细节,如通信接口、基础设施、传输协议和传输方法等,侧重于给出推荐的技术指标;3GPP侧重于针对无人机部署、跟踪、识别及监测避让等需求给出技术规范 and 解决方案,且聚焦于依托地面基站连接无人机的通信场景,与3GPP的职责相符。

表1 无人机通信相关标准概览

Table 1 Overview of UAV communication standards

通信组织/ 产业联盟	类型	相关标准	主要内容/主要结论	讨论			
国际电信联盟	报告书	ITU-R M.2171 ^[31]	当无人机连接地面网络时,确保其安全飞行的最大频谱需求为 34 MHz;当无人机连接卫星网络时,确保其安全飞行的最大频谱需求为 56 MHz	通过频谱兼容性研究,发现 5 030~5 091 MHz 适合规划无人机视距控制和非有效载荷通信链路			
		ITU-R M.2204 ^[32]	适用于规划无人机地面雷达系统和其他感知、避让系统的频谱资源				
		ITU-R M.2205 ^[33]	960~976 和 1 151~1 156 MHz 频段可规划 10.4 MHz 频谱资源以无人机连接地面基站方式控制无人机;5 030~5 091 MHz 频段内通过卫星控制无人机需满足 -130 dBm/150 kHz 的功率控制条件,以避免干扰微波着陆系统				
		ITU-R M.2229 ^[34]	15.4~15.5 GHz 频段上,无法在与该频段运行的其他系统兼容的前提下,为无人机控制链路规划频谱资源				
		ITU-R M.2230 ^[35]	在 13.25~13.40、15.4~15.7、22.5~22.55、23.55~23.60 GHz 频段内,无法规划无人机超视距控制链路				
		ITU-R M.2233 ^[36]	无人机控制和链路技术特性案例				
		ITU-R REP-M.2236 ^[37]	在 5 000~5 010 和 5 010~5 030 MHz 频段,无人机视距控制和非有效载荷通信链路均无法与现有系统频谱兼容				
		ITU-R REP-M.2237 ^[38]	在 5 030~5 091 MHz 频段,无人机视距控制和非有效载荷通信链路可以与现有系统实现频谱兼容				
		ITU-R REP-M.2238 ^[39]	在 5 091~5 150 MHz 频段,无法实现无人机控制链路与该频段的非静止轨道卫星频谱兼容				
		标准化建议书	标准		ITU-T REC-F.749.10 ^[41]	给出了民用无人机的 5 种通信场景,明确了相应的有效载荷、非有效载荷、飞行控制系统通信要求,以及飞行数据传输要求和有效载荷通信服务要求	聚焦于无人机救援、无人机物流、无人机协同、无人机检查检验等无人机应用,分别给出相应技术要求
					ITU-T REC-F.749.11 ^[42]	无人机可作为空中基站和中继节点,扩展移动网络的覆盖范围。该建议书提出了 UAV-MEC 场景的系统架构、无人机功能要求、UAV-MEC 网络功能要求和安全要求	
					ITU-T REC-F.749.12 ^[43]	民用无人机通信应用框架,包括飞行控制、飞行数据传输、有效载荷数据传输、视频/图像传输等	
ITU-T REC-F.749.13 ^[44]	民用无人机使用人工智能进行飞行控制的框架和功能要求						
ITU-T REC-F.749.14 ^[45]	无人机集群种无人机之间的协同需求,包括协同框架、无人机间网络连接需求、无人机间数据传输需求、无人机群协同任务执行需求						
ITU-T REC-F.749.15 ^[46]	利用无人机对绵延数百公里的电力线或输油管道等进行检查检验的要求						
ITU-T REC-F.749.16 ^[47]	给出了利用民用无人机进行物流快递的要求,包括路线规划要求、飞行控制要求、网络通信要求。						
ITU-T REC-F.749.18 ^[48]	使用民用无人机进行应急服务的框架、要求和用例。						

续表

通信组织/类 产业联盟 型	相关标准	主要内容/主要结论	讨论
美国电气 电子工程 师学会	IEEE Std- 1937.1 ^[49]	无人机有效载荷设备的接口需求和性能特征	聚焦于无人机通信 的技术细节,给出 了通信接口、基础 设施、测量、摄影、 传输协议、传输方 法等的推荐技术指 标
	IEEE Std- 1939.1 ^[50]	无人机操作的低空空域框架	
	IEEE Std- 1936.1 ^[51]	无人机应用的一般设施要求,包括飞行平台、飞行控制系统、 地面控制站、有效载荷、控制链路和数据链路、起降系统等	
	IEEE Std- 1937.11 ^[52]	基于无人机系统的极坐标摄影测量技术要求	
	IEEE Std- 1936.2 ^[53]	民用轻小型无人机摄影测量架空输电线路标准	
	IEEE Std- 1937.3 ^[54]	基于全球导航卫星系统短消息机制的无人机飞行监管数据 的内容、传输协议和传输方法	
	IEEE Std- 1937.8 ^[55]	推荐的无人机蜂窝通信终端功能和接口规范	
第3代 合作伙伴 计划	Release 19-TS 22.125 ^[56]	给出了通过3GPP系统操纵无人机应当具备功能的技术 规范	针对无人机连接 3GPP系统进行部 署、识别、跟踪、监 测避让等需求,给 出技术规范
	Release 19-TS 23.255 ^[58]	为确保无人机系统在3GPP网络的高效部署和运用,规定了 无人机应用层的功能架构和信息流处理过程	
	Release 19-TS 23.256 ^[59]	对Release 19-TS 22.125技术规范中无人机识别和跟踪方法 进行详细描述	
	Release 19-TS 24.257 ^[65]	无人机系统的应用使能层协议	
	Release 18-TS 29.256 ^[66]	利用无人机网络实现空管业务的需求	
	Release 19-TS 29.257 ^[67]	定义了无人机应用的通信协议和数据模型,并给出各项业务 的应用程序接口	
	Release 18-TS 33.256 ^[68]	针对Release 19-TS 23.256的连接、识别和跟踪功能给出安 全流程	
	Release 16-TR 22.825 ^[57]	给出通过3GPP系统对无人机系统进行远程识别的10个应 用场景和相应的业务需求细节	
	Release 18-TR 23.700-55 ^[60]	针对无人机间直连通信、多无人机运营商部署、无人机监测 避让等需求提出解决方案	
	Release 18-TR 23.700-58 ^[61]	针对无人机直连通信、无人机ID广播、无人机探测避让等需 求提出解决方案	
技 术 报 告	Release 19-TR 23.700-59 ^[62]	针对无人机飞行前规划和飞行中监测、5G基站辅助无人机 检测避让、无人机静默区等需求提出解决方案	针对无人机连接 3GPP系统进行直 连通信、ID广播、探 测避让、飞行规划 等需求,提出解决 方案并进行评估
Release 17-TR 23.754 ^[63]	针对3GPP系统支持无人机与地面授权第三方设备(如警方 设备)进行连接、识别和跟踪需求提出解决方案		
Release 17-TR 23.755 ^[64]	针对依托3GPP系统高效部署无人机等需求提出解决方案		
Release 19-TR 33.759 ^[69]	指出无人机系统运行过程中的潜在安全问题,并给出解决 方案		
	Release 17-TR 33.854 ^[70]	研究了无人机系统在授权和认证、定位信息处理、隐私保护、 身份鉴别、测控链路等环节的安全问题,并提供解决方案	

3 无人机通信信道模型

信道模型是无人机通信电磁频谱管理不可避免的重要话题,对无人机通信载荷信号和非载荷信号的发射与接收均有重要影响。无人机通信主要涉及3种链路:无人机→地面控制站(地面基站)、地面控制站(地面基站)→无人机、无人机→无人机。考虑到无人机→无人机的通信链路一般都发生在距离较近的净空,因此可用自由空间传播模型进行简单描述^[71]。一方面,无人机的升空飞行使得无人机与地面控制站(地面基站)之间以视距(Line of sight, LoS)方式进行通信的概率较高;另一方面,无人机的飞行高度一般在120 m以下,且多数位于城市环境,高楼、树木的遮挡又使得无人机与地面控制站(地面基站)之间以非视距(Non LoS, NLoS)方式进行通信亦较为常见,有必要针对这两种特征进行无人机通信信道的专门研究。无人机通信示意图如图4所示。LoS通信链路被遮挡将发生严重的大尺度衰落,以 $\beta(d)$ 表示大尺度衰落因子,可表示为^[72]

$$\beta(d) = \begin{cases} \beta_0 d^{-\alpha} & \text{LoS环境} \\ \kappa \beta_0 d^{-\alpha} & \text{NLoS环境} \end{cases} \quad (1)$$

式中: α 为路径损耗因子,典型值为2~6,随着无人机飞行高度的递减,当无人机飞行高度足够高时,楼宇遮挡带来的大尺度衰落可忽略不计,此时 $\alpha \approx 2$ ^[73]; d 为无人机和地面控制站(地面基站)的距离; β_0 为LoS传输1 m路径损耗; κ 为NLoS传输时产生的额外路径损耗。则LoS传输概率可建模为仰角 θ 的函数,即

$$P_{\text{LoS}}(\theta) = \frac{1}{1 + a \exp[-b(\theta - a)]} \quad (2)$$

式中: a 和 b 为模型参数; θ 为无人机与地面控制站(地面基站)通信时,通信链路在地面的夹角。相应的,NLoS传输概率可表示为

$$P_{\text{NLoS}}(\theta) = 1 - P_{\text{LoS}}(\theta) \quad (3)$$

同时考虑无人机与地面控制站(地面基站)传输链路上的LoS小尺度衰落和NLoS大尺度衰落,则期望接收功率可表示为

$$\bar{g}(d_{2D}, H_U) = E[|g|^2] = P_{\text{LoS}}(\theta) \beta_0 d^{-\alpha} + (1 - P_{\text{LoS}}(\theta)) \kappa \beta_0 d^{-\alpha} \quad (4)$$

式中: d_{2D} 为地面控制站(地面基站)与无人机的地面投影距离; H_U 为无人机飞行高度。如图5所示,测试结果表明^[71],当无人机与地面控制站(地面基站)距离较近时(如 $d_{2D} = 200$ m),接收

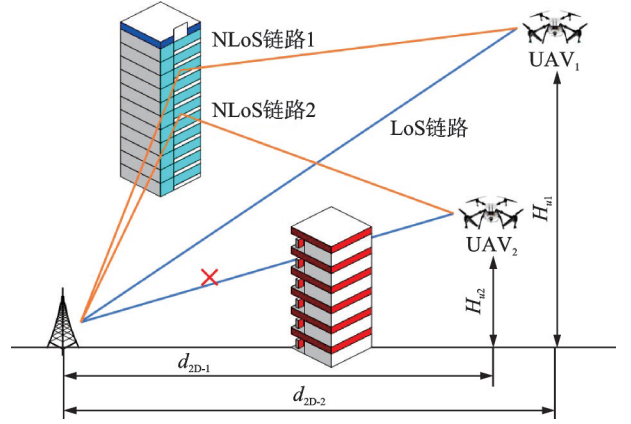


图4 城市环境下无人机地空通信示意图

Fig.4 Illustration of the UAV-ground propagation in urban environment

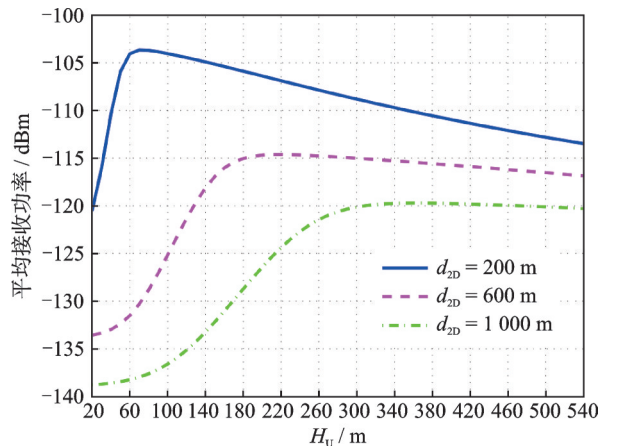


图5 LoS信道期望信道功率与无人机飞行高度的关系

Fig.5 Expected channel power versus UAV altitude in LoS channel model

功率会随 H_U 增加而快速增加至抵达峰值 ($g_{\max} = -104$ dBm); 之后, 接收功率随着无人机飞行高度进一步增加而降低, 这是因为当无人机与地面控制站(地面基站)距离较近时, 无人机升空会使得发生 LoS 传输的概率快速增加, 进而导致接收功率快速增加, 但当接收功率抵达峰值后, LoS 链路衰减占据主要因素, 接收功率缓慢降低。同时, 还可以观察到, 随着无人机与地面控制站(地面基站)距离的增大, 获得最大接收功率时无人的飞行高度越来越高, 这是因为随着距离的增大, 获得 LoS 的难度也越来越大, 要获得 LoS, 无人机需飞得更高以“跨越”最高的遮挡物。

3GPP 在 2017 年发布了 TR 36.777 研究报告^[74], 区分乡村宏蜂窝连接无人机(RMa-UAV)、城市宏蜂窝连接无人机(Uma-UAV)、城市微蜂窝连接无人机(Umi-UAV) 3 种场景, 给出了无人机在 1.5~300 m 的飞行高度下具有 LoS 链路的概率, 如表 2 所示。根据经验, 乡村环境下, 当无人机飞行高度 $H_U > 40$ m 时, 可 100% 以 LoS 方式连接宏蜂窝(RMa-UAV); 城市环境下, 当无人机飞行高度 $H_U > 100$ m 时, 可 100% 以 LoS 方式连接宏蜂窝(UMa-UAV)。

概率 LoS 链路模型是目前运用最广的无人机通信信道模型, 可用于在不同环境下, 无人机连接地面控制站(地面基站)时考虑 LoS 传输小尺度衰减和 NLoS 传输大尺度衰减。进一步, 针对前文提到的无人机连接地面控制站(地面基站)不同频段, 如 900 MHz 频段、2.4 GHz 频段、5.8 GHz 频段, 无人机通信链路可能呈现出更加细微的频段特征^[75-77], 对 960~970、5 000~5 150 MHz 无人机通信链路特性进行了测试, 得到了实测的路径衰减和延迟数据。

表 2 无人机与地面控制站(地面基站)通信具有 LoS 链路的概率

Table 2 Probability of LoS link for communication between UAVs and ground control stations (ground base stations)

场景	LOS 概率 (P_{LoS})	无人机飞行高度
RMa-UAV	$P_{\text{LoS,ter}}$	$1.5 \text{ m} \leq H_U \leq 10 \text{ m}$
	$P_{\text{LoS}} = \begin{cases} 1 & d_{2D} \leq d_1 \\ \frac{d_1}{d_{2D}} + \exp\left(\frac{-d_{2D}}{\rho_1}\right)\left(1 - \frac{d_1}{d_{2D}}\right) & d_{2D} > d_1 \end{cases}$	$10 \text{ m} < H_U \leq 40 \text{ m}$
	$P_1 = \max(15.021 \lg H_U - 16.053, 1.000)$ $d_1 = \max(1.350.8 \lg H_U - 1.602, 18)$	
	100%	$40 \text{ m} < H_U \leq 300 \text{ m}$
Uma-UAV	$P_{\text{LoS,ter}}$	$1.5 \text{ m} \leq H_U \leq 22.5 \text{ m}$
	$P_{\text{LoS}} = \begin{cases} 1 & d_{2D} \leq d_1 \\ \frac{d_1}{d_{2D}} + \exp\left(\frac{-d_{2D}}{\rho_1}\right)\left(1 - \frac{d_1}{d_{2D}}\right) & d_{2D} > d_1 \end{cases}$	$22.5 \text{ m} < H_U \leq 100 \text{ m}$
	$P_1 = 4.300 \lg H_U - 3.800$ $d_1 = \max(460 \lg H_U - 700, 18)$	
	100%	$100 \text{ m} < H_U \leq 300 \text{ m}$
Umi-UAV	$P_{\text{LoS,ter}}$	$1.5 \text{ m} \leq H_U \leq 22.5 \text{ m}$
	$P_{\text{LoS}} = \begin{cases} 1 & d_{2D} \leq d_1 \\ \frac{d_1}{d_{2D}} + \exp\left(\frac{-d_{2D}}{\rho_1}\right)\left(1 - \frac{d_1}{d_{2D}}\right) & d_{2D} > d_1 \end{cases}$	$22.5 \text{ m} < H_U \leq 300 \text{ m}$
	$\rho_1 = 233.98 \lg H_U - 0.95$ $d_1 = \max(294.05 \lg H_U - 432.94, 18)$	

注: $P_{\text{LoS,ter}}$ 为根据地面信道模型^[74]计算的 LoS 链路概率。

随着第5代移动通信系统的充分发展与广泛部署,毫米波(Millimeterwave, mmWave)凭借更短的波长,能够满足高速率、大容量的通信需求,但同时也具有更高的路径损耗和更低的散射特性,导致采用毫米波频段通信的无人机系统对视距传输具有更高的要求^[78]。与现有无人机通信信道模型相比,无人机毫米波通信信道特征主要体现为:(1)对无人机速度、飞行角度、位置高度等三维空间的考虑;(2)对无人机倾斜、翻转等三维姿态的考虑;(3)大规模阵列天线应用于无人机系统时,收发端俯仰角对信道模型的影响^[79]。文献[80]研究了无人机与地面基站之间俯仰角变化导致的毫米波信道的大尺度衰落效应。文献[81]建立了城市场景下无人机毫米波通信信道模型,并分析了无人机飞行高度对信道 SINR 的影响。文献[82]提出了一种支持多天线阵列的时变无人机毫米波通信信道模型。文献[83]考虑无人机飞行过程中俯仰角的变化,提出一种支持三维轨迹和机身姿态的几何统计信道模型。无人机飞行过程中高度与飞行姿态的捷变特性导致毫米波通信信道具有显著的非平稳特性,大规模天线阵列下对无人机通信信号的搜索、跟踪和对准是无人机毫米波信道模型的研究重点和难点。

时至今日,信道模型依然是无人机通信领域的热点研究方向,并且随着各种新兴技术应用于无人机通信,无人机信道建模也开始向细分领域发展。例如, MIMO 或大规模 MIMO 下的无人机通信信道模型^[84-85]、高速飞行状态下的无人机通信信道模型^[86]、叶片旋转对无人机通信信道的影响^[87]等。

4 无人机通信干扰减轻

随着民用无人机的日渐普及,以及“低空经济”的蓬勃发展,多个无人机共用同一空域的概率大大增加。同时,无人机通信范围也可能覆盖多个地面控制站或多个地面基站。加之无人机升空后,随着飞行高度的增加,无人机与地面控制站(地面基站)之间以视距方式通信的概率亦逐渐增加,导致无人机向地面控制站、控制站向无人机、无人机对地面基站上行链路、地面基站对无人机下行链路均面临被干扰的风险。无人机与地面基站之间的通信链路干扰尚可以通过先进的 OFDM 技术和信道调度技术加以缓解,而无人机与地面控制器之间的通信链路涉及频谱资源共享,无论是无人机还是地面控制器均可能受到严重干扰。对于无人机连接地面控制器和无人机连接地面基站这两种通信场景,干扰减轻均是无人机通信频谱管理需要面对的重要课题。

4.1 无人机连接地面控制器场景

无人机连接地面控制器时,可分为两种情况,一种是无人机向地面控制器传输数据,此时无人机为发射机,地面控制器为接收机,如图 6(a)所示;另一种是地面控制器向无人机传输数据,此时地面控制器为发射机,无人机为接收机,如图 6(b)所示。

假设无人机和地面控制器的天线均为全向天线,令 $\mathbf{Q} = \{\mathbf{q}_k\}_{k=1}^K$ 为 K 架无人机的空间位置, \mathbf{Q}_k^- 为除无人机 k 以外的无人机空间位置。当无人机 k 为发射机时,地面控制器 k 的接收信噪比为

$$\text{SNR}_k(\mathbf{Q}) = \frac{S(\mathbf{q}_k)}{I_{\text{ter}} + I_{\text{aer}}(\mathbf{Q}_k^-) + \sigma^2} \quad (5)$$

式中: I_{ter} 为其余 $K-1$ 个地面控制器的聚合干扰; $I_{\text{aer}}(\mathbf{Q}_k^-)$ 为其余 $K-1$ 架无人机的聚合干扰,其随 $K-1$ 架无人机的空间位置变化而变化; σ^2 为地面控制器 k 的噪声功率; $S(\mathbf{q}_k)$ 为对无人机 k 的接收信号功率,其随无人机 k 的空间位置变化而变化,可表示为

$$S(\mathbf{q}_k) = P_t G_t(\mathbf{q}_k) G_r(\mathbf{q}_k) \beta(\mathbf{q}_k) |g|^2 \quad (6)$$

式中: P_t 为发射功率; G_t 和 G_r 分别为发射天线增益和接收天线增益; β 为大尺度衰减; $|g|^2$ 为小尺度衰减。

当地面控制器 k 为发射机时,无人机 k 的接收信噪比为

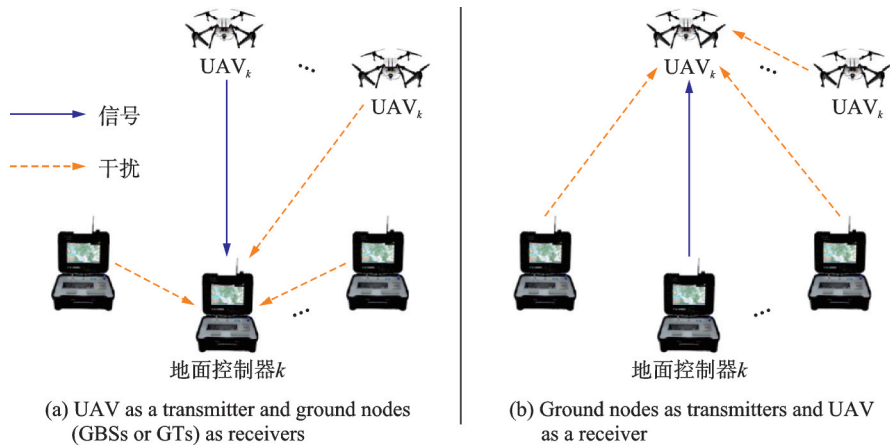


图6 无人机连接地面控制器示意图

Fig.6 Illustration of UAV connecting ground nodes

$$SNR_k(\mathbf{Q}) = \frac{S(q_k)}{I_{\text{ter}}(q_k^-) + I_{\text{acr}}(\mathbf{Q}_k^-) + \sigma^2} \quad (7)$$

区别在于,当无人机的发射机时,无人机 k 的空间位置变化而其余 $K-1$ 架无人机和 $K-1$ 个地面控制站位置不变时,仅影响无人机 k 到地面控制器 k 的链路,即 $S(q_k)$,计算相对简单;而当无人机为接收机时,无人机 k 的空间位置变化不仅影响地面控制器 k 到无人机 k 的链路,还影响其余 $K-1$ 架无人机到无人机 k 的链路,以及其余 $K-1$ 个地面控制器到无人机 k 的链路,计算较复杂^[9]。可通过以下方式减轻无人机连接地面控制器时的干扰:

(1) 功率控制。当无人机向地面控制器传输数据时,若干扰严重,地面控制器可操纵无人机增大发射功率;地面控制器向无人机传输数据时,若干扰严重,无人机可向地面控制器反馈该信息,地面控制器增大发射功率^[88]。

(2) 波束成型。波束成型技术已经越来越广泛地在无人机通信领域取得应用,无人机和地面控制器可根据相对位置进行波束成型,使天线主瓣始终对准无人机(地面控制器),提高对无人机(地面控制器)信号的接收质量^[89]。

(3) 模式切换。当无人机与地面控制器距离增大导致干扰超过阈值时,无人机可将与地面控制器的连接从直连模式切换为通过地面基站中继模式^[90],如图7所示。

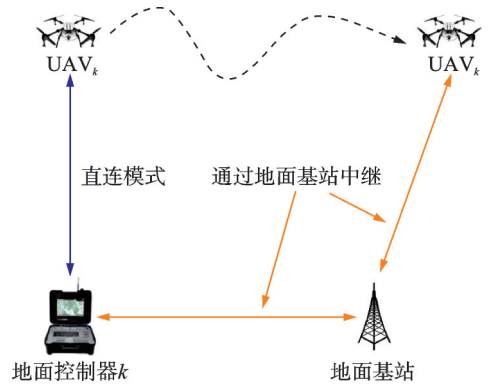


图7 通过模式切换的干扰减轻

Fig.7 Mitigating interference by mode switching

4.2 无人机连接地面基站场景

无人机连接地面基站也面临着严重的干扰。对于无人机到地面基站的上行链路,无人机升空具有的高概率LoS链路可能会干扰大量同信道的地面基站;对于地面基站到无人机的下行链路,无人机可能被大量非关联基站干扰。因此,无人机连接地面基站的干扰减轻策略亦是重要课题。下面列出了目前在减轻无人机连接地面基站方面较为成熟的技术。

(1) 3D波束成型。3D波束成型是在方位和俯仰上同时进行波束成型,从而提供了更精确的角度分辨率,使得地面基站的的天线最大辐射方向能够更加准确地对准无人机用户,不论是无人机到地面基站

的上行链路,还是地面基站到无人机的下行链路,均可通过3D波束成型显著改善抗干扰能力^[91]。

(2)大规模MIMO。将大规模MIMO技术与3D波束成型联系在一起,即地面基站的天线数量远大于所连接的空中无人机用户号数量,可以显著地提高地面基站到无人机下行链路的可靠性^[92]。需要注意的是,大规模MIMO和3D波束成型显著增加了系统复杂性,为了提高波束跟踪速度和跟踪精度,以匹配无人机的飞行,需要对此进行更加高效的设计。

(3)小区间干扰协调。对小区间的通信资源,如信道、功率、波束成型、关联基站,进行联合优化,以减轻无人机与地面基站之间的跨小区干扰^[93]。

(4)多小区协作。与小区间干扰协调相比,多小区协作可能是一种更为高效的技术,多个相互协作的地面基站共同与无人机传输数据,空中无人机用户得以获得更大的分集增益。为此,需要对参与协作的基站进行优化,以在性能和复杂度/传输延迟上进行权衡^[94]。

总之,干扰减轻是无人机通信电磁频谱管理的重要课题,需将层出不穷的新兴技术,例如机器学习^[95]和强化学习^[96]等运用于此课题。同时,亦致力于降低复杂度以满足无人机飞行速度下的时延要求。

5 当前挑战与未来方向

尽管无人机通信领域历经多年发展已臻于成熟,但随着国家发展“低空经济”产业政策的提出,预期将进一步引爆以无人机为代表的低空产业经济形态,新兴技术将进一步在无人机领域不断取得应用,从而催生更多的需求和研究热点。

5.1 无人机通信频谱资源的前瞻规划

随着合肥、杭州、深圳、苏州、成都和重庆6个城市开放600 m以下空域试点,将来会有更多的城市加入试点行列,目前已规划的1 430~1 444、2 400~2 476、5 725~5 829 MHz直连频谱资源以及地面公众移动通信频谱资源未必能够满足未来无人机电荷与非载荷通信数据吞吐量的旺盛需求。

如前所述,ITU在将5 030~5 091 MHz频段规划为无人机通信频谱资源之前(在《无线电规则》中,5 030~5 091 MHz频谱资源以主要业务划分给航空移动(R)、卫星航空移动(R)、航空无线电导航业务),已在其他频段进行大量前瞻性研究。国内相关研究由工业和信息化部无线电管理局牵头,随着国家发改委成立低空经济发展司^[97-98],为无人机通信前瞻性地规划频谱资源,包括直连通信频谱资源和地面公众移动通信频谱资源的需求预期将成为研究方向。

5.2 无人机在低空空域与地面基站的可靠连接

尽管地面基站的天线向下倾斜指向地面(面向地面公众移动通信终端),但在120 m以下空域,无人机依然可以与地面基站稳定可靠连接,但在150~300 m的飞行高度,无人机与地面基站的通联质量急剧下降^[99]。

随着国家逐步开放600 m以下空域,需在150~600 m低空空域保证无人机与地面控制器(地面基站)的稳定可靠连接。是改变地面基站的天线形态,还是增大地面基站的发射功率?公众移动通信运营商采取何种演进路线稳健且成本可控?这些均是亟待研究并加以解决的问题。

5.3 无人机在高速飞行状态下的信道模型

“低空经济”之所以受人瞩目,部分原因在于eVTOL变革人类出行方式的前景预期,以亿航智能的EH216-S电动垂直起降航空器为例,最大设计速度为130 km/h^[100],以eVTOL为代表的低空经济产业形态在高速飞行状态下的通信信道模型是怎样的?目前其主要利用4G/5G网络进行数据传输和飞行控制,当飞行高度为150~600 m,其利用哪些频谱资源进行数据传输和飞行控制?无人机在高温、低

温、高湿、盐雾、台风、沙尘及暴雨等恶劣天气条件下适用何种信道模型,以确保其在极端环境下依然具有稳健的地空通信链路。

5.4 基于人工智能技术的无人机通信干扰减轻策略

随着无人机飞行高度的增加,能够接收到信号的基站数量也在增加。研究表明,当无人机飞行高度为122 m时,能够接收到18个基站的信号,最远直线距离达18.5 km^[101-102]。无人机通信干扰主要包括3种类型:无人机到地面控制器(地面基站)的上行链路干扰、地面控制器(地面基站)到无人机的下行链路干扰、无人机间干扰。功率控制、波束成型、大规模MIMO已被证明是减轻干扰水平的有效策略,人工智能技术的广泛应用使得各种智能抗干扰方法闭环成为有特殊前景的研究方向^[103-105]。

5.5 无人机通信波束成型

波束成型技术可以增强网络覆盖和用户容量、降低干扰水平,从而允许用户以更小的空域隔离进行频谱复用。基于相控阵和预编码的波束成型设计是当前主流技术^[106],随着毫米波频谱资源用于无人机通信,无人机与地面控制器(地面基站)之间的通信可以更加精细地达成^[107-108],操作频段的变化对波束成型的设计框架,如几何形状、孔径尺寸、旁瓣特性及增益指标,带来全面影响。考虑到旁瓣水平将对无人机与地面基站通信干扰水平带来深刻影响,预期低旁瓣水平波束成型设计将成为毫米波频段无人机通信领域研究热点。

6 结束语

随着“低空经济”被写入政府工作报告以及低空经济发展司的成立,“低空经济”无疑是2024年度的热点词汇。无人机是低空经济的主要形态。作为飞行安全和通信安全的重要保障,无人机通信电磁频谱管理是助力“低空经济”蓬勃发展不可或缺的因素。本文从国家无线电管理局2015~2023年无线电管理政策的更迭入手,深入探讨了无人机通信的操作频段和飞行监管,以ITU、IEEE和3GPP等国际组织为代表的标准规范,以及与无人机通信电磁频谱管理关系密切的信道模型和干扰减轻。最后展望了无人机通信电磁频谱管理的当前挑战和未来方向,对无人机通信电磁频谱管理的发展和研究具有借鉴和参考意义。

参考文献:

- [1] 樊邦奎,吴启晖.“低空智联网”专栏序言[J].数据采集与处理,2024,39(1):1.
- [2] 中华人民共和国中央人民政府.政府工作报告——2024年3月第十四届全国人民代表大会第二次会议[EB/OL].(2024-03-12).https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202403/content_6939153.htm.
- [3] 新华网.低空经济布局热,万亿级产业蓄势“起飞”[EB/OL].(2024-02-28).<http://www.news.cn/fortune/20240228/3a34e19e35854a87ad1a906eed0acbb3/c.html>.
- [4] 央视网.“空中出租车”首飞成功!深圳→珠海仅需20分钟[EB/OL].(2024-03-01).https://content-static.cctvnews.cctv.com/snow-book/index.html?item_id=15770070791599384379.
- [5] 搜狐网.亿航智能拿下全球eVTOL行业首张生产许可证,低空经济迎来商业化元年[EB/OL].(2024-04-08).https://www.sohu.com/a/770111741_116132.
- [6] 新浪财经.低空经济重磅利好!6城将开展eVTOL试点[EB/OL].(2024-11-20).<https://finance.sina.com.cn/roll/2024-11-20/doc-incwsiqw2267933.shtml>.
- [7] 中国民用航空局.国家空域基础分类方法[EB/OL].(2023-12-22).<https://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/TZTG/202312/P020231222621680839714.pdf>.
- [8] 中华人民共和国工业和信息化部.《民用无人驾驶航空器无线电管理暂行办法》[EB/OL].(2023-01-29).https://www.miit.gov.cn/jgsj/wgj/wjfb/art/2024/art_1c3a092d3bcd4d41abe69c369ba7bab6.html.
- [9] ZENG Y, WU Q, ZHANG R. Accessing from the sky: A tutorial on UAV communications for 5G and beyond[J]. Proceedings

of the IEEE, 2019, 107(12): 2327-2375.

- [10] 田畅, 贾倩, 陈润丰, 等. 无人机集群网络资源优化综述[J]. 数据采集与处理, 2023, 38(3): 506-524.
TIAN Chang, JIA Qian, CHEN Runfeng, et al. Review on optimization of resources in UAV swarm networks[J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 2023, 38(3): 506-524.
- [11] USPENSKYI V B, SHYRIAIEVA N V. Relative navigation of UAV in a swarm[C]//Proceedings of 2023 IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek). Kharkiv, Ukraine: IEEE, 2023: 1-5.
- [12] NORHASHIM N, MOHD KAMAL N L, SAHWEI Z, et al. The effects of jamming on global positioning system (GPS) accuracy for unmanned aerial vehicles (UAVs)[C]//Proceedings of 2022 International Conference on Computer and Drone Applications (ICoNDA). Kuching, Malaysia: IEEE, 2022: 18-22.
- [13] 中华人民共和国工业和信息化部. 《工业和信息化部关于无人驾驶航空器系统频率使用事宜的通知》[EB/OL]. (2025-03-10). <http://219.143.231.70/Files/20150409015907352.pdf>.
- [14] 中华人民共和国工业和信息化部. 《中华人民共和国无线电频率划分规定》(中华人民共和国工业和信息化部第62号令)[EB/OL]. (2023-05-23). https://www.miit.gov.cn/jgsj/wgj/bmgz/art/2024/art_9f1a1845eebf4cc0ac2cbb32532bf0fc.html.
- [15] HELIOS VISION. FCC opens spectrum access for drones: What it means for the UAS industry[EB/OL]. (2024-09-09). <https://www.heliosvisions.com/2024/09/09/fcc-opens-spectrum-access-for-drones-what-it-means-for-the-uas-industry/>.
- [16] C-UAS Hub Staff. Dynamic frequency management system demonstrated[EB/OL]. (2023-05-10). <https://cuashub.com/en/content/dynamic-frequency-management-system-demonstrated/>.
- [17] OFcom. Spectrum for unmanned aircraft systems (UAS)[EB/OL]. (2022-06-10). <https://www.ofcom.org.uk/siteassets/resources/documents/consultations/category-1-10-weeks/238648-spectrum-for-unmanned-aircraft-systems-uas/associated-documents/secondary-documents/drone-condoc.pdf?v=328029>.
- [18] RÉPUBLIQUE FRANÇAISE. Arrêté définissant les caractéristiques techniques des dispositifs de signalement électronique et lumineux des aéronefs circulant sans personne à bord[EB/OL]. [2024-12-25]. <http://newsletter.ffam.asso.fr/nwlt/fichiers/projet-arrete-signalement.pdf>.
- [19] 日本国土安全省. 关于无人飞机(无人机、遥控飞机等)的飞行规定[EB/OL]. [2024-12-25]. <https://www.mlit.go.jp/common/001295661.pdf>.
- [20] 中华人民共和国工业和信息化部. 微功率短距离无线电发射设备相关公告[EB/OL]. (2019-11-28). <https://www.srrc.org.cn/article23975.aspx>.
- [21] International Telecommunication Union. TITU-R[M]. [S.l.]: ITU, 2019.
- [22] ITU. Committed to connecting the world[EB/OL]. [2024-12-25]. <https://www.itu.int/zh/Pages/default.aspx#zh>.
- [23] 中华人民共和国国务院/中华人民共和国中央军事委员会. 无人驾驶航空器飞行管理暂行条例[EB/OL]. (2023-05-31). https://www.gov.cn/zhengce/content/202306/content_6888799.htm.
- [24] Federal Aviation Administration. Drones[EB/OL]. [2024-12-25]. <https://www.faa.gov/uas>.
- [25] 俄罗斯联邦航空运输管理局. 无人驾驶航空机飞行监督条例[EB/OL]. [2024-12-20]. <http://www.favt.ru/>.
- [26] 英国民航局. 无人机和模型飞机代码[EB/OL]. [2024-12-25]. https://register-drones.caa.co.uk/drone-code/the_drone_code.pdf.
- [27] MERLOT. Global drone regulations database[EB/OL]. [2024-12-25]. <https://droneregulations.info/>.
- [28] 大疆. 全球各地区飞行安全法规合集[EB/OL]. [2024-12-25]. <https://support.dji.com/help/content?customId=zh-cn03400009861&spaceId=34&re=CN&lang=zh-CN>.
- [29] IEEE. The professional home for the engineering and technology community worldwide[EB/OL]. [2024-12-25]. <https://www.ieee.org/>.
- [30] 3GPP. Generations of mobile standards[EB/OL]. [2024-12-25]. <https://www.3gpp.org/>.
- [31] ITU. Characteristics of unmanned aircraft systems and spectrum requirements to support their safe operation in non-segregated airspace: ITU-R M.2171[R]. [S.l.]: ITU, 2009.
- [32] ITU. Characteristics and spectrum considerations for sense and avoid systems use on unmanned aircraft systems: ITU-R M.2204[R]. [S.l.]: ITU, 2010.
- [33] ITU. Results of studies of the AM(R)S allocation in the band 960—1 164 MHz and of the AMS(R)S allocation in the band

- 5 030—5 091 MHz to support control and non-payload communications links for unmanned aircraft systems: ITU-R M.2205[R]. [S.1.]: ITU, 2010.
- [34] ITU. Compatibility study to support line-of-sight control and non-payload communications links for unmanned aircraft systems proposed in the frequency band 15.4—15.5 GHz: ITU-R M.2229[R]. [S.1.]: ITU, 2012.
- [35] ITU. Frequency sharing between unmanned aircraft systems for beyond line of sight control and non-payload communications links and other existing and planned services in the frequency bands 13.25—13.40 GHz, 15.4—15.7 GHz, 22.5—22.55 GHz and 23.55—23.60 GHz: ITU-R M.2230[R]. [S.1.]: ITU, 2011.
- [36] ITU. Examples of technical characteristics for unmanned aircraft control and non-payload communications links: ITU-R M.2233[R]. [S.1.]: ITU, 2011.
- [37] ITU. Compatibility study to support the line of sight control and non-payload communication links for unmanned aircraft systems proposed in the frequency bands 5 000—5 010 and 5 010—5 030 MHz: ITU-R M.2236[R]. [S.1.]: ITU, 2011.
- [38] ITU. Compatibility study to support the line-of-sight control and non-payload communications link(s) for unmanned aircraft systems proposed in the frequency band 5 030—5 091 MHz: ITU-R M.2237[R]. [S.1.]: ITU, 2011.
- [39] ITU. Compatibility study to support the line-of-sight control and non-payload communications link(s) for unmanned aircraft systems proposed in the frequency band 5 091—5 150 MHz: ITU-R M.2238[R]. [S.1.]: ITU, 2011.
- [40] ITU. Radio regulations[EB/OL]. [2024-12-24]. <https://www.itu.int/hub/publication/r-reg-rr-2024/#/zh>.
- [41] ITU. Requirements for communication services of civilian unmanned aerial vehicles: ITU-T F.749.10[R]. [S.1.]: ITU, 2019.
- [42] ITU. Requirements for civilian unmanned aerial vehicles enabled mobile edge computing: ITU-T F.749.11[R]. [S.1.]: ITU, 2019.
- [43] ITU. Framework for communication application of civilian unmanned aerial vehicle: ITU-T F.749.12[R]. [S.1.]: ITU, 2020.
- [44] ITU. Framework and requirements for civilian unmanned aerial vehicle flight control using artificial intelligence: ITU-T F.749.13[R]. [S.1.]: ITU, 2021.
- [45] ITU. Requirements of coordination for civilian unmanned aerial vehicles: ITU-T F.749.14[R]. [S.1.]: ITU, 2021.
- [46] ITU. Requirements for inspection and examination services using civilian unmanned aerial vehicles: ITU-T F.749.15[R]. [S.1.]: ITU, 2022.
- [47] ITU. Requirements for logistics express delivery based on civilian unmanned aerial vehicles: ITU-T F.749.16[R]. [S.1.]: ITU, 2023.
- [48] ITU. Framework and requirements for emergency services using civilian unmanned aerial vehicles: ITU-T F.749.18[R]. [S.1.]: ITU, 2024.
- [49] IEEE. IEEE standard interface requirements and performance characteristics of payload devices in drones: IEEE Std 1937.1[S]. USA: IEEE Communications Society, 2020.
- [50] IEEE. IEEE standard for a framework for structuring low-altitude airspace for unmanned aerial vehicle (UAV) operations: IEEE Std 1939.1[S]. USA: IEEE Communications Society, 2021.
- [51] IEEE. IEEE standard for drone applications framework, access and core network standards committee: IEEE Std 1936.1[S]. USA: IEEE Communications Society, 2021.
- [52] IEEE. IEEE standard for technical requirements of polar coordinate photogrammetry based on unmanned aircraft systems, access and core network standards committee: IEEE Std 1937.11[S]. USA: IEEE Communications Society, 2023.
- [53] IEEE. IEEE photogrammetric technical standard for civil light and small unmanned aircraft systems for overhead transmission line engineering, access and core network standards committee: IEEE Std 1936.2[S]. USA: IEEE Communications Society, 2023.
- [54] IEEE. IEEE standard for flight data transmission of civil unmanned aerial vehicle based on short message mechanisms, access and core network standards committee: IEEE Std 1937.3[S]. USA: IEEE Communications Society, 2024.
- [55] IEEE. IEEE recommended practice for functional and interface specifications for unmanned aerial vehicle (UAV) cellular communication terminals, access and core network standards committee: IEEE Std 1937.8[S]. USA: IEEE Communications Society, 2024.
- [56] ETSI. Technical specification group services and system aspects; Unmanned aerial system (UAS) support in 3GPP: TS 22.125

- [S]. [S.1.]: ETSI, 2024.
- [57] ETSI. Technical specification group services and system aspects; Study on remote identification of unmanned aerial systems (UAS): TS 22.825[S]. [S.1.]: ETSI, 2018.
- [58] ETSI. Technical specification group services and system aspects; Application layer support for uncrewed aerial system (UAS); Functional architecture and information flows: TS 23.255[S]. [S.1.]: ETSI, 2024.
- [59] ETSI. Technical specification group services and system aspects; Support of uncrewed aerial systems (UAS) connectivity, identification and tracking: TS 23.256[S]. [S.1.]: ETSI, 2024.
- [60] ETSI. Technical specification group services and system aspects; Study on enhanced application architecture for UAS applications: TR 23.700-55[S]. [S.1.]: ETSI, 2022.
- [61] ETSI. Technical specification group services and system aspects; Study of further architecture enhancements for uncrewed aerial systems and urban air mobility: TR 23.700-58[S]. [S.1.]: ETSI, 2023.
- [62] ETSI. Technical specification group services and system aspects; Study on architecture enhancements of UAS, UAV and UAM:TR 23.700-59[S]. [S.1.]: ETSI, 2024.
- [63] ETSI. Technical Specification group services and system aspects; Study on supporting unmanned aerial systems (UAS) connectivity, identification and tracking: TR 23.754[S]. [S.1.]: ETSI, 2021.
- [64] ETSI. Technical specification group services and system aspects; Study on application layer support for unmanned aerial systems (UAS): TR 23.755[S]. [S.1.]: ETSI, 2021.
- [65] ETSI. Technical specification group services and system aspects; Uncrewed aerial system (UAS) application enabler (UAE) layer :TS 24.257[S]. [S.1.]: ETSI, 2024.
- [66] ETSI. Technical specification group services and system aspects; Uncrewed aerial systems network function (UAS-NF) aerial management services stage 3: TS 29.256[S]. [S.1.]: ETSI, 2024.
- [67] ETSI. Technical specification group services and system aspects; Application layer support for uncrewed aerial system (UAS) UAS application enabler (UAE) server services stage 3: TS 29.257[S]. [S.1.]: ETSI, 2024.
- [68] ETSI. Technical specification group services and system aspects; Security aspects of uncrewed aerial systems (UAS): TS 33.256[S]. [S.1.]: ETSI, 2024.
- [69] ETSI. Technical specification group services and system aspects; Study on security enhancements of uncrewed aerial systems (UAS) : TR 33.759[S]. [S.1.]: ETSI, 2024.
- [70] ETSI. Technical specification group services and system aspects; Study on security aspects of uncrewed aerial systems (UAS): TR 33.854[S]. [S.1.]: ETSI, 2021.
- [71] ZHAN C, ZENG Y. Energy minimization for cellular-connected UAV: From optimization to deep reinforcement learning[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2022, 21(7): 5541-5555.
- [72] ZENG Y, XU J, ZHANG R. Energy minimization for wireless communication with rotary-wing UAV[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2019, 18(4): 2329-2345.
- [73] AMORIM R, NGUYEN H, MOGENSEN P, et al. Radio channel modeling for UAV communication over cellular networks [J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2017, 6(4): 514-517.
- [74] ETSI. Technical specification group services and system aspects; Study on enhanced LTE support for aerial vehicles: TR 36.777[R]. [S.1.]: ETSI, 2017.
- [75] MATOLAK D W, SUN R. Air-ground channel characterization for unmanned aircraft systems: Part I: Methods, measurements, and models for over-water settings[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, 66(1): 26-44.
- [76] SUN R, MATOLAK D W. Air-ground channel characterization for unmanned aircraft systems: Part II : Hilly and mountainous settings[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, 66(3): 1913-1925.
- [77] 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.
- [78] ZHANG C, ZHANG W, WANG W, et al. Research challenges and opportunities of UAV millimeter-wave communications [J]. *IEEE Wireless Communications*, 2019, 26(1): 58-62.
- [79] 朱秋明, 华博宇, 毛开, 等. 无人机毫米波信道建模进展和挑战[J]. *数据采集与处理*, 2020, 35(6): 1049-1059.

- ZHU Qiuming, HUA Boyu, MAO Kai, et al. Advances and challenges of UAV millimeter-wave channel modeling[J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 2020, 35(6): 1049-1059.
- [80] AL-HOURANI A, KANDEEPAN S, JAMALIPOUR A. Modeling air-to-ground path loss for low altitude platforms in urban environments[C]//*Proceedings of 2014 IEEE Global Communications Conference*. Austin, TX, USA: IEEE, 2014: 2898-2904.
- [81] PEREZ A, FOU DA A, IBRAHIM A S. Ray tracing analysis for UAV-assisted integrated access and backhaul millimeter wave networks[C]//*Proceedings of 2019 IEEE 20th International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks*. Washington, DC, USA: IEEE, 2019: 1-5.
- [82] CHANG H, BIAN J, WANG C X, et al. A 3D non-stationary wideband GBSM for low-altitude UAV-to-ground V2V MIMO channels[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 70719-70732.
- [83] ZHU Q, WANG Y, JIANG K, et al. 3D non-stationary geometry-based multi-input multi-output channel model for UAV-ground communication systems[J]. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2019, 13(8): 1104-1112.
- [84] BAI L, HUANG Z, CUI L, et al. A non-stationary multi-UAV cooperative channel model for 6G massive MIMO mmWave communications[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2023, 22(12): 9233-9247.
- [85] CHANG H, WANG C X, BIAN J, et al. A novel 3D beam domain channel model for UAV massive MIMO communications [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2023, 22(8): 5431-5445.
- [86] BAI L, HAN R, LIU J, et al. Air-to-ground wireless links for high-speed UAVs[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2020, 38(12): 2918-2930.
- [87] MA Z, AI B, HE R, et al. Impact of UAV rotation on MIMO channel characterization for air-to-ground communication systems[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69: 12418-12431.
- [88] WANG H, DING G, CHEN J, et al. UAV anti-jamming communications with power and mobility control[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2023, 22(7): 4729-4744.
- [89] MAENG S J, DESHMUKH M A, GÜVENÇ İ, et al. Interference analysis and mitigation for aerial IoT considering 3D antenna patterns[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, 70(1): 490-503.
- [90] SHAKHATREH H, SAWALMEH A, HAYAJNEH K F, et al. A systematic review of interference mitigation techniques in current and future UAV-assisted wireless networks[J]. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 2024, 5: 2815-2846.
- [91] ZENG Y, LYU J, ZHANG R. Cellular-connected UAV: Potential, challenges, and promising technologies[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2019, 26(1): 120-127.
- [92] GERACI G, GARCIA-RODRIGUEZ A, GALATI GIORDANO L, et al. Understanding UAV cellular communications: From existing networks to massive MIMO[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 67853-67865.
- [93] MEI W, WU Q, ZHANG R. Cellular-connected UAV: Uplink association, power control and interference coordination[C]//*Proceedings of 2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*. Abu Dhabi, United Arab Emirates: IEEE, 2018: 206-212.
- [94] LIU L, ZHANG S, ZHANG R. Multi-beam UAV communication in cellular uplink: Cooperative interference cancellation and sum-rate maximization[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2019, 18(10): 4679-4691.
- [95] LOHAN P, KANTARCI B, AMINE FERRAG M, et al. From 5G to 6G networks: A survey on AI-based jamming and interference detection and mitigation[J]. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 2024, 5: 3920-3974.
- [96] CHIANG H L, CHEN K C, RAVE W, et al. Multi-UAV mmWave beam tracking using Q-learning and interference mitigation[C]//*Proceedings of 2020 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)*. Dublin, Ireland: IEEE, 2020: 1-7.
- [97] 国家发展和改革委员会. 低空经济发展司召开推动低空智能网联系统建设专题座谈会[EB/OL]. (2024-12-27). https://www.ndrc.gov.cn/fzggw/jgsj/dks/zygz/202412/t20241227_1395297.html.
- [98] 国家发展和改革委员会. 低空经济发展司召开推动低空基础设施建设座谈会[EB/OL]. (2024-12-27). https://www.ndrc.gov.cn/fzggw/jgsj/dks/zygz/202412/t20241227_1395298.html.
- [99] VAN DER BERGH B, CHIUMENTO A, POLLIN S. LTE in the sky: Trading off propagation benefits with interference

costs for aerial nodes[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2016, 54(5): 44-50.

- [100] 亿航智能. EH216-S电动垂直起降航空器最大设计速度为130 km/h[EB/OL]. [2024-12-27]. <https://www.ehang.com/cn/ehangaav/>.
- [101] NGUYEN H C, AMORIM R, WIGARD J, et al. How to ensure reliable connectivity for aerial vehicles over cellular networks[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 12304-12317.
- [102] ZHANG S, ZENG Y, ZHANG R. Cellular-enabled UAV communication: A connectivity-constrained trajectory optimization perspective[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2019, 67(3): 2580-2604.
- [103] KURUNATHAN H, HUANG H, LI K, et al. Machine learning-aided operations and communications of unmanned aerial vehicles: A contemporary survey[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2024, 26(1): 496-533.
- [104] CAO P, LEI L, CAI S, et al. Computational intelligence algorithms for UAV swarm networking and collaboration: A comprehensive survey and future directions[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2024, 26(4): 2684-2728.
- [105] JAVED S, HASSAN A, AHMAD R, et al. State-of-the-art and future research challenges in UAV swarms[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2024, 11(11): 19023-19045.
- [106] JASIM M A, SHAKHATREH H, SIAZI N, et al. A survey on spectrum management for unmanned aerial vehicles (UAVs)[J]. *IEEE Access*, 2021, 10: 11443-11499.
- [107] PENG J, WANG Y. Flexible beamforming for millimeter-wave UAV communications with power distribution[C]// *Proceedings of 2023 5th International Conference on Electronic Engineering and Informatics (EEI)*. Wuhan, China: IEEE, 2023: 493-496.
- [108] DONG R, WANG B, TIAN J, et al. Deep reinforcement learning based UAV for securing mmWave communications[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2023, 72(4): 5429-5434.

作者简介:



陈勇(1975-),男,博士,研究员,研究方向:无人机频谱管控、动态频谱管控等, E-mail:chy63s@126.com。



杨健(1984-),通信作者,男,博士,高级工程师,研究方向:电磁频谱管理、电磁态势、电磁空间安全等, E-mail:yangjian_njust@fox-mail.com。



张余(1983-),男,博士,副研究员,研究方向:无人机频谱管控、动态频谱管控等。



乔晓强(1981-),男,硕士,研究员,研究方向:电磁频谱安全与控制、电磁态势等。

(编辑:张黄群)