

基于自由空间光的无人机集群通信载荷技术发展现状与趋势*

苏绍璟,童小钟,魏俊宇,吴鹏

(国防科技大学智能科学学院,湖南长沙 410073)

摘要:对基于自由空间光(Free Space Optical, FSO)的无人机集群通信载荷技术应用需求进行了归纳总结,论述了FSO通信技术及应用在无人机载荷的国内外发展现状,展望了高速移动通信环境下无人机集群FSO通信载荷技术的未来发展趋势,进一步深入分析了应用于无人机集群的FSO通信链路的关键技术。可以预见,基于FSO的通信载荷将广泛应用于未来无人机集群的大带宽通信组网。

关键词:自由空间光通信;无人机集群;发展现状与趋势

中图分类号:TN929.12 文献标志码:A 文章编号:1001-2486(2021)04-118-10

Current status and trend of UAV swarm communication payload technology based on free space optical

SU Shaojing, TONG Xiaozhong, WEI Junyu, WU Peng

(College of Intelligence Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The application requirements of UAV (unmanned aerial vehicle) swarm communication payload technology based on FSO (Free Space Optical) were summarized, and the current status of FSO technology and application at home and abroad UAV payloads was discussed. The development prospect of the payload technology of UAV swarm based on FSO communication in high-speed mobile communication environment was also analyzed. Furthermore, a profound analysis on the key technologies in FSO communication links applied to UAV swarm was conducted. Predictably, FSO-based communication payload will be used widely for wide-bandwidth communication networking of UAV swarm in the future.

Keywords: free space optical communication; unmanned aerial vehicle swarm; current status and trend

随着无人驾驶飞行器应用领域的扩大,无人机作为新时期的高科技装备,对改变作战样式、打赢未来战争起着至关重要的作用。传统的射频(Radio Frequency, RF)通信在高压线和通信基站等环境下易受磁场干扰影响,难以实时高效地通信,影响无人机集群的协同作战效能,此外,RF通信的广播特性容易产生同频干扰和安全问题,制约了无人机的隐身性能。而自由空间光(Free Space Optical, FSO)通信拥有大带宽,免许可证,隐秘安全且不易受干扰的优势,在安全和保密性能方面是传统的RF通信无法比拟的,因此非常适合军事通信^[1-3]。同时,无人机在商业领域的发展也非常迅速,已经广泛应用于搜索和救援^[4]、工农业检测^[5]、道路交通监控^[6]、地震灾区评估^[7]、地理信息三维测绘^[8]等领域。

近年来,无人机集群承担的任务向多元化方向发展。在军事方面,美国和俄罗斯等国家已经让其担负战场情报搜索、监视和侦察打击等任务,

任务复杂度对信息传输提出了低延时、大带宽和高保密性的要求,通信质量的好坏决定了其生存能力和任务成功与否。基于FSO的无人机集群通信仅需通过光强便可及时有效进行冲突检测和避免碰撞,有效提升其在复杂电磁干扰环境下通信抗干扰和任务执行能力,FSO通信能够满足4K视频回传等高速实时业务的需求,能够实现无人机集群通信隐身化,提高无人机集群协同作战效能。因此,基于FSO的无人机集群通信链路的研究已成为各国的热点^[9]。

本文研究内容和总体框架如图1所示。首先,对基于FSO的无人机集群通信载荷的应用需求进行了梳理归纳,认真分析了近几年国内外相关技术的研究现状;然后,深入探讨了FSO通信载荷中主要应用关键技术;最后,展望了FSO通信载荷技术的未来发展趋势,以期为提高基于FSO的无人机集群通信载荷技术提供借鉴与参考。

* 收稿日期:2020-03-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61374008)

作者简介:苏绍璟(1973—),男,江西南昌人,教授,博士,博士生导师,E-mail:ssjing@nudt.edu.cn

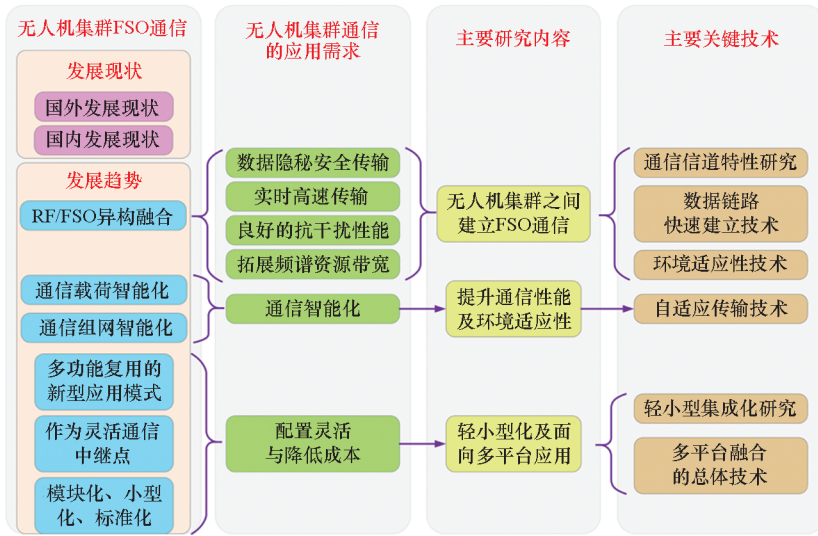


图1 本文研究内容和总体框架

Fig. 1 Content and general framework of article research

1 应用需求

现代战场环境日趋复杂,利用无人机进行情报搜集和侦察,实时图像回传等都需要大量的数据传输和信息快速交换,集群之间的通信要求低延时,宽带宽及高保密性来保证不易被拦截窃听。因此,无人机集群 FSO 通信存在诸多通信需求,具体有以下几个方面^[9-11]。

1)数据隐秘安全传输需求。目前,大多数无人机集群通信都是基于已有的 RF 无线电基站和协议基础上进行改进和优化后使用的。无人机集群参与诸如战场侦察监视,情报搜索和目标定位跟踪等隐秘任务时,传统 RF 通信因其传输信道具有广播特性,容易产生同频干扰及安全问题,这些都可能使无人机集群系统性能严重下降。此外,无人机集群 RF 通信使用的 WiFi 和 LORA 等无线通信网络在高压线、通信基站和金属设施多的工厂等复杂电磁环境容易受到磁场干扰,难以做到高效稳定通信,这将大大降低无人机集群协同作战和工程实际应用的能力。而 FSO 采用点对点定向通信,链路间干扰小且有效避免信息窃取,保密性高,因此,为了满足数据隐秘安全传输以及未来无人机集群多场景全天候的实战需求,需要深入研究基于 FSO 的无人机集群通信技术。

2)实时高速传输需求。无人机侦察打击要求实时数据传输,其通信链路的高速率对战场决策起着至关重要的作用,以无人机为节点构建高速传播的空中骨干节点网络,对构建空天一体化作战指挥体系实时通信具有关键作用。例如,利用无人机 FSO 通信链路转发指挥控制指令、监视

和感知战场态势等任务,需要快速共享指令或者各种传感器捕获的情报信息,只有实时高速的传输速率才能满足现代复杂战场环境下高质量的通信。若要构建人与无人机结合的作战体系,则需利用 FSO 通信实时信息传输来满足人-机一体化的要求,使其能够作为指挥员的“千里眼”和“顺风耳”,帮助指挥员实时掌握战场态势,提高战场决策和任务完成能力。

3)良好的抗干扰性能需求。复杂的战场环境下,无人机集群之间的通信质量直接决定了任务的成功与否,通信数据链路必将成为敌我双方电子侦察与干扰的重点。因此,数据链路的抗干扰性能是通信连接中值得关注的因素。传统的 RF 通信由于其安全性差,易被捕获和干扰,难以在复杂电磁环境下充分发挥效能。FSO 通信在发射和接收可见光时难以被敌方捕获和侦察识别,通信过程不易被破坏和窃听,具备强抗干扰特性,能够帮助无人机集群高效传输信息,从而提升战场任务执行能力和生存能力。

4)拓展频谱资源带宽的需求。无人机集群在战场上担负着越来越丰富且关键的角色,任务执行领域和范围都将有所增加。传统的 RF 通信无线电频谱在米到毫米范围,采用 6 ~ 60 GHz 范围的频率带宽^[12],日益增加的频谱带宽需求使得频谱资源(例如 13 GHz、15 GHz 和 23 GHz)正变得拥塞^[13],同时,RF 通信不可避免地存在频率干扰问题。而 FSO 激光束的波长在微米范围^[14],工作频段在全球不受管制,可以免费使用且无须申请审批,能够有效扩展无人机集群高动态通信的频谱资源,提高频谱资源利用率,并且其不易受到

频率和相邻频段带来的干扰,能够满足日益增长的频谱资源需求,有效解决频谱资源拥挤和冲突问题。

5) 无人机集群通信智能化需求。现代战场瞬息万变,作战时不同时间和空间的互联关系难以预先规划,通信连接具有高机动性,这就要求通信系统在建立连接时具备“高智能化”,即具备无中心自组织的智能组网通信特性,在应对复杂的电磁环境背景下遭遇干扰窃听时能够主动防御,通信被破坏之后能够利用系统智能算法主动修复,完成高质量的通信连接,保证战场通信的安全性、可靠性和持续性。智能化通信技术能够使无人机集群协同作战能力大大提升,增强系统的自适应以及抗打击能力,提供良好的人机交互性和多功能的信息处理,帮助指挥员快速决策,取得战场先机。同时,稍纵即逝的战机要求无人机集群主动判断和战场感知能力的智能化,从而实现先发制人,克敌制胜。

6) 配置灵活与降低成本需求。随着无人机集群执行任务的多样化,其作战环境和作战范围将发生巨大的变化。传统的 RF 通信无法在各种陌生恶劣的环境快速灵活配置通信,并且设备及维修费用高,通信功耗大,不能够满足未来全空域多场景的任务持续性需求。而 FSO 通信链路的功耗小,灵活性高,能够在各种环境灵活实现通信连接配置。同时,FSO 通信设备简单,仅需激光发射器和信号探测仪便可实现 FSO 通信,成本低廉并且易于维护。因此,FSO 通信载荷能够满足配置灵活和降低成本的需求,从而提升无人机集群任务广度和执行能力^[14]。

2 发展现状与趋势

2.1 国外发展现状

FSO 通信具有不易被拦截和窃听、不会对附近的射频造成干扰等多种战术优势^[15],不少发达国家早已从事飞机间的机载激光通信载荷及链路的理论和关键技术研究。早在 1984 年,美军资助的 HAVE LACE 项目就已经在两架 KC-135A 飞机间实现 160 km 通信距离、19.2 kbit/s 传输速率以及 10^{-6} 误码率的通信^[16]。1998 年,美国空军实验室在两架 T-39 飞机间实现 12 192 m 飞行高度、50~500 km 通信距离、1 Gbit/s 传输速率以及 10^{-6} 误码率的通信演示试验^[17]。1999 年,美国的 Thermo Trex 公司和 Lucent 公司相继进行了机载激光通信实验,并分别实现了 50~500 km 通

信距离、1 Gbit/s 传输速率以及 10^{-6} 误码率和 20 km 通信距离、波长为 1 550 nm 和 2.5 Gbit/s 传输速率的通信演示试验^[18-19]。2003 年,美国空军研究室研制实现了 100 km 通信距离、1~2.5 Gbit/s 传输速率以及 10^{-7} 误码率的通信原理样机,并于 2006 年完成搭载飞机的测试实验^[20]。2008 年,德国宇航中心完成了 Do-228 飞机与地面站间 10~85 km 通信距离、155 Mbit/s 通信速率的激光通信实验,并于 2013 年成功在“狂风”战斗机和地面移动站之间完成 50 km 通信距离、1.25 Gbit/s 传输速率的实验^[21]。2009 年,麻省理工学院进行了搭载在双獭飞机上激光终端的通信实验,并实现了 25 km 通信距离、2.5 Gbit/s 传输速率的目标^[22]。2010 年,美国空军实验室进行了 DC-3 飞机之间 94~132 km 通信距离、2.5 Gbit/s 传输速率以及 10^{-6} 误码率的双向激光通信实验^[23-25]。

在无人机载激光通信领域,近几年发展也十分迅速。2006 年,文献[26]首次提出在无人机集群之间应用 FSO 通信链路,并指出 FSO 通信在无人机集群中可能的应用场景和显著优势。2008 年,文献[27]进一步讨论了 FSO 通信在无人机集群中应用所具备的优势和带来的挑战。文献[28]指出 FSO 通信非常适合应用在需要高速数据连接的无人机集群中,并讨论使用 FSO 连接的对准以及由大气引起的光束衰减和波动等问题。文献[29]在基于 FSO 的无人机链路上进行了大容量通信,并讨论了实现这一技术潜在的困难和挑战。文献[30]研究了由于无人机位置和方向的随机波动而引起的 FSO 通道的几何损失并对 FSO 通道质量进行了量化。文献[31]研究了无人机的随机悬停波动对跟踪方法性能的影响,并基于无人机的不稳定性程度,分析推导了用于跟踪和误码率的封闭形式表达式。文献[32]提出了不同的基于深度学习的新型 FSO 系统,其中深度学习^[33]应用在检测器、联合信道估计器等方面,并考虑到大气湍流对所提出结构的符号误码率性能进行了研究,提出的结构不需要导频序列,能够实现低成本并且具有良好的性能。在无人机 FSO 通信工程实际应用方面,2014 年,美国通用原子公司提出的搭载在 MQ-9 无人机载激光通信载荷并于 2020 年 2 月已完成通信系统部分试验,该系统在 1.064 μm 和 1.550 μm 两个光波波长下工作,能够保证无人机通信链路的低可截获和低可检测概率^[34-35]。

2.2 国内发展现状

国内对 FSO 通信载荷技术研究是从点对点机载激光通信开始的^[36],对基于 FSO 的无人机集群通信研究则相对更晚,所以与国外相比,存在较大的差距。不过近几年发展十分迅速,取得了不少显著的成果^[37]。

2001 年,上海光机所开始研制点对点的机载激光通信样机,该通信样机可以实现 50 ~ 100 km 通信距离、1 Gbit/s 传输速率以及 10^{-6} 误码率的通信^[36,38];2006 年,武汉大学首次成功实现了 42 Mbit/s 的多业务机载激光通信试验,而且次年又成功地在国内进行了全空域的机载激光通信自动跟踪伺服系统试验^[36];2009 年,西安理工大学成功研制了基于以太网的大气激光视频传输系统,实现了 3 ~ 5 km 通信距离,24 小时全天候不间断实时视频网络数据通信^[36-37];2011 年,长春理工大学实现直升机之间的通信距离为 20 km 的动态激光通信野外实验^[36,39];2013 年,长春理工大学对无人机载激光通信的关键技术进行了详细分析,建立了机载激光通信原型研制并在两架运 12 型固定翼飞机之间进行了高速长距离通信测试,并实现了通信距离为 144 km,通信速率为 2.5 Gbit/s 的通信^[40];2016 年,中国科学院上海光学精密机械研究所实现了通信距离为 3 110 m 飞机-水下的无线光通信试验;2017 年,中电三十四研究所采用小型旋翼无人机平台实现了 6.7 km 通信距离、1.25 Gbit/s 通信速率前提下稳定的信号传输,对信号传输的质量进行了测试分析^[41]。然而,与国外相比,我国 FSO 通信技术工业应用发展相对滞后,尤其是在无人机领域存在较大差距。因此,加快推进国内基于 FSO 的无人机集群通信技术研究和应用具有重要意义。

综合国内外的研究现状发现,在 FSO 通信载荷机载应用方面,主要涉及有人机载激光通信载荷的点对点激光通信,暂未进行大规模集群间的 FSO 通信试验;而有关无人机集群的 FSO 通信载荷试验则更是鲜有报道。现阶段关于 FSO 通信研究主要存在以下几个方面的局限性:① FSO 通信系统是通信载荷发展的基础,而现有的 FSO 通信系统主要应用在卫星或中大型有人机,其功率和尺寸等都无法直接匹配无人机通信载荷。② 现阶段 FSO 通信载荷试验都是采取点对点通信,这种通信方式受大气环境的影响导致链路可靠性变差,影响网络拓扑的生成和优化,网络容错性差^[42],FSO 通信链路的状态随着网络环境的变化而发生改变,需要网络拓扑重置(包括光路逻辑

和物理拓扑的重置)来保证网络通信,这些因素都限制了 FSO 通信在无人机集群中的工程应用。③ 未能很好地解决无人机集群大规模网络接入进行超密集型业务造成网络中 FSO 链路(包括地面网络与无人机之间的链路,无人机与无人机之间的链路)的负载和链路利用率不均衡的问题。④ FSO 通信由于光束的方向性使得无人机集群面临通信链路难以快速建立的问题,FSO 链路的获取、跟踪和指向都是不小的挑战。此外,机载终端之间视线损失和大气影响等问题也限制了无人机集群 FSO 通信载荷的发展。

综上所述,尽管 FSO 通信在理论和应用上取得了一定程度的进展,并开展了机载激光通信载荷相关的仿真和试验,但仍然面临诸多问题和挑战,限制了基于 FSO 的无人机集群通信的发展,应该充分认识到当前试验的局限和不足,进行深入相关领域的研究。

2.3 发展趋势

结合国内外无人机集群 FSO 通信发展现状,可以总结以下几点主要发展趋势^[9,32,43-49]:

1) 无人机集群通信朝着 RF/FSO 异构融合方向发展。未来无人机集群通信将朝着 RF/FSO 混合通信发展,最大限度地发挥不同频段通信系统的优势。不同的频段均有各自的特点,无线电易受电磁干扰,难以实时高效通信,但其穿透云雾能力强;可见光抗干扰能力强,具有很高的方向性和安全性,但易受大气环境和天气因素影响。构建无线电和可见光的异构融合通信,能够最大限度地发挥各自的优势,可以有效拓展无人机集群高动态通信的频谱资源,提供更好的数据连接的安全性和可靠性,提高频谱资源利用率和数据传输速率,实现特定区域的无缝高速通信连接,为日益错综复杂的战场环境提供全天候、全方位的通信保障服务^[50]。

2) FSO 通信载荷智能化。近年来,机器学习飞速发展,其在智能识别、目标检测等各个领域的应用已经有了卓越的表现,将机器学习与 FSO 通信技术结合,有助于实现载荷智能化。一方面,机器学习的强大学习能力有利于实现载荷对通信环境的态势感知;另一方面,将机器学习应用于 FSO 通信链路中,有利于通信链路快速建立连接,提高通信传输速率和抗干扰、抗损衰的性能^[51]。机器学习与 FSO 通信技术构建的载荷智能化有助于提升无人机集群 FSO 通信性能,进一步减少成本、降低功耗和复杂性。因此,与机器学习深度融合的智能化载荷是未来无人机集群 FSO 通信应

用研究的热点。

3) FSO 通信组网智能化。目前,无人机集群主要采用基于基础设施和基于自组网(ad-hoc)的集群架构^[52]。基于基础设施通信架构虽可减少计算能力和无人机有效负载,但容易受到干扰,限制集群功效和规模的增加^[53-54]。基于自组网的通信架构不依赖于任何基础设施,临时建立适应动态变化节点的机器对机器(Machine to Machine, M2M)通信网络^[55],但仍需有一个节点连接地面基站或卫星。FSO 通信采取智能化组网策略有利于应对不同传感器采取不同传输策略,面对突发、隐秘和严峻任务时,主动构建无中心自组织的效能最大化通信网络,遭遇干扰和破坏时主动防御和自动修复,降低数据丢包率,维持高质量的通信连接,保证任务执行通信的可靠性,提升集群协同探测和规划性能^[56]。

4) FSO 通信载荷多功能复用的新型应用模式。无人机集群担负的任务更加多元后,不可避免的需要搭载更多的任务载荷,受制于无人机平台空间的尺寸和功耗,FSO 通信载荷将集成不同功能模块的任务载荷,这种具备多功能的 FSO 通信载荷将是新的应用模式。多功能集成化不仅能够降低载荷体积质量,而且有利于降低系统功耗和成本,进一步推动 FSO 通信载荷在机载平台的工程应用。利用激光测距的精确性,结合 FSO 安全高速的通信,在无人机集群间建立测距、通信与侦察成像多功能复合的 FSO 数据链以及共跟踪系统,采用成像与通信共用光学天线,通信与跟踪系统共光路,提高系统的高度集成化,丰富无人机集群 FSO 通信功能的同时扩大执行任务的领域。

5) 带有 FSO 通信载荷的无人机作为灵活通信中继点提升数据传输链路性能^[57-59]。随着 5G 技术进入商用化阶段,数据传输速率以及容量将会进一步扩大,而无人机集群将成为 5G 无线通信中的重要元素。在许多情况下,将使用 FSO 通信技术提供高速无线连接。一方面,可以将数据连接实体安装在多旋翼无人机集群中以提供蜂窝连接,它们具有固定基础结构中没的某些功能,例如易于部署,强大的视距连接以及具有受控移动性的自由度。另一方面,在中大型固定翼无人机集群间利用通信载荷作为空中骨干网络节点进行数据高速传输交换,覆盖大范围通信,提供远程机动作战通信保障,解决复杂环境数据资源需求。此外,基于 FSO 通信的无人机作为灵活通信中继点还具有多种用途,例如增强网络连接性、火灾检测、灾难应急服务、高速列车回传、安全和事故监

视、污染监视、停车监视等^[60-63]。

6) FSO 通信载荷朝着模块化、小型化和标准化方向发展。随着 FSO 通信技术的不断成熟,此项技术将会应用在更多的领域,对于不同的平台和不同的场景,模块化将有助于充分发挥 FSO 通信优势,拓宽其广阔的发展空间,便于与其他技术的融合;载荷轻小型化能够推动 FSO 通信载荷广泛应用于各类无人机型,低功率有助于提升无人机续航性能,进而提升无人机集群任务属性;标准化将有助于无人机配备兼容的系统体制和统一的标准接口,提高无人机集群的统一协调控制性能,提高通用性,降低系统的复杂度和维修成本,缩短维修周期,提升无人机集群战场通信性能^[43]。

3 关键技术研究

通过 FSO 通信系统的发展历史可以看出,尽管其已经有了较为漫长的研究历史,但仍然未能在无人机集群中广泛应用。这主要是由 FSO 的固有特性以及飞行环境的复杂性决定的。尤其是在无人机集群应用方面,还面临着平台的不稳定性,温度、气压的变化以及功耗的限制等方面的影响。为了推动 FSO 通信载荷技术工程应用,应该着力研究以下几个方面的关键技术。

1) 基于 FSO 的无人机集群通信信道特性研究^[64-68]。一体化作战背景下,无人机集群面临的战场环境日趋复杂,情报侦察、实时图像传输等都需要高保密、高速率的数据流,通信性能好坏直接影响其战术目的和技术性能。信道模型是评价通信系统性能的关键,信道特性对信号传输具有很大的影响。因此,建立适合无人机特点的信道模型对于改善数据链路性能具有重要作用^[69]。无人机集群 FSO 通信信道主要受到直射激光信号视距(Line Of Sight, LOS)对不准的几何损失和近地大气湍流中弱透镜涡旋随机分布构成的近地湍流信道非理想特性影响。对于 LOS 导致的通信信号损衰,主要通过捕获、对准、跟踪(Acquisition Pointing Tracking, APT)机载系统,完成运动中的无人机视轴快速、高概率的捕获对准以及高精度、高动态性的跟踪^[70-71];对于近地湍流损伤,现有基于 FSO 通信信道主要是按照随机分布湍流强度大小分类,按照从弱到强主要有三种模型:服从对数正态分布模型、伽马-伽马模型和负指数分布模型等^[72-74]。

完善信道估计是一项复杂的任务,具有较高的功耗,并且成本高昂,此外,传统的信道估计方

法还需要导频或者训练序列辅助,将导致传输有效数据速率降低。目前,部分学者已经提出基于深度学习的FSO通信信道估计器,将深度学习用作检测器、联合信道估计器。深度学习考虑了广泛的大气湍流(从弱到强)的影响后能够得到接近于理想的信道估计,并且其价格低廉、复杂度低。因此,在无人机集群通信中运用基于深度学习的FSO信道估计器对于提高FSO数据链路性能具有十分重要的意义^[32]。

2)高动态无人机集群FSO通信数据链路快速建立技术研究。高动态条件下快速建立FSO通信数据链路是无人机集群实现FSO通信的前提和关键。无人机集群FSO通信覆盖性能完全取决于视线的传播,略微依赖于仰角。然而,FSO通信由于光束的方向性,使得光学链路在大规模无人机集群的建立比RF通信更加困难,其对收发器对准高度敏感^[2],在网络建设中,冲突检测和避免碰撞将变得更具挑战;另外,机载平台的飞行速度快、航迹不确定等高动态特性对通信数据链路的快速建立带来了较大的挑战。此外,机载平台自身不稳定、天气状况和姿态变换等因素也对链路的精度产生严重的影响,从而加剧覆盖和连接问题。在执行任务过程中,如何在高航速和未知航迹的80 μrad 信标光波束宽度的激光链路进行高精度跟踪瞄准和快速捕获,使节点快速地从任意方向与其他节点建立光链路是无人机集群通信必须解决的关键问题^[75-76]。因此,为提升无人机集群快速反应能力必须深入高动态条件下快速建立通信的技术研究。

3)大规模无人机集群环境适应性技术研究^[77-78]。随着无人机集群任务执行逐渐向远、中、近程拓展,在无人机集群之间通过FSO进行数据传输和通信时,最大的挑战是指向误差、大气湍流和不利天气因素^[79]。由于存在指向误差,通信时获取和跟踪的要求随链路长度的增加而增加。阴雨天气条件下,提高链路的可靠性和可用性意味着需要缩短集群间的通信距离。雾和云在FSO通信链路上容易造成高衰减,而浓雾是光学链路的最坏情况;晴朗天气条件下,必须考虑由太阳加热和风引起的温度和大气压力的不均匀性引起的大气湍流运动。有研究表明,雾天情况下的功率消耗比晴天情况下的功率消耗相差两个数量级,所以还应考虑环境对其续航带来的影响。此外,大规模集群无人机还受到大气损失以及背景辐射等外部因素和机载平台振动等自身因素的影响,若FSO通信在不同环境背景下不能快速适

应,则难以实现高性能的FSO通信。因此,开展大规模无人机集群环境适应性技术研究有利于推动无人机集群FSO通信的工程应用。

4)FSO通信系统自适应传输技术研究。自适应传输技术早已广泛应用于传统RF通信,它根据通信信道在空间、时间和频率等变化,动态地调整系统参数,例如发射功率、调制大小、调制类型、码率或这些参数的组合,旨在保持传输质量的同时提高通信系统的信道资源和平均频带的利用率^[80]。在FSO通信系统中,面临大气湍流缓慢变化的衰落、路径损耗和天气状况等因素的影响,建立自适应传输技术有助于FSO通信系统显著地提升通信性能的同时维持传输质量。基于路径损耗或者最大化信道容量的条件下进行功率自适应研究,实现无人机集群FSO通信功率效用最大化;基于强大气湍流背景下进行自适应调制编码的研究,提升误码率性能和频谱效率,使FSO通信系统在时变信道上实现鲁棒和高效的频谱传输^[81];基于峰值功率的约束下,根据信道条件变化自适应调整传输功率或调制大小,从而实现频谱效率和平均功耗的优化^[82]。因此,深入研究自适应算法和FSO通信系统自适应传输技术,有利于提升通信链路可靠性和通信性能的同时推动无人机集群通信智能化发展。

5)FSO通信载荷轻小型集成化研究。受制于无人机搭载空间、承载能力和功耗,无人机集群通信载荷必须满足轻小型化和低功耗的要求。在保证无人机集群通信性能的前提下,进一步减小载荷体积和质量是推动FSO通信载荷应用于各类无人机平台的关键。深入FSO通信载荷轻小型集成化研究,从整机结构设计、光路设计以及材料选取等方面考虑通信载荷轻小型化设计,推动通信系统的光学、通信和跟踪等分系统的集成设计,完善通信载荷功能的同时进行光机电一体化设计,有助于减小通信载荷体积和质量,降低通信载荷的成本和功耗,使无人机集群FSO通信载荷的适用性更加广泛并且配置更加灵活,推动无人机集群FSO通信载荷的工程应用。

6)基于FSO通信多平台融合的总体技术研究。随着无人机、无人艇以及无人车等“无人化”装备逐步在战场上担负越来越重要的角色,在“无人化”装备之间建立机-艇、机-车和机-机通信将成为未来战争中的一种趋势。FSO通信载荷能否完美地融合于不同的平台,决定了未来“无人化”联合作战体系的效能。不同的平台之间涉及了不同的学科和领域,彼此之间存在不小

的跨度,这意味着应该牢牢抓住 FSO 通信多平台融合的总技术,将光学、通信和跟踪技术有效地结合到一起,综合考虑各平台的特征,选择性地应用一些新技术和新方法,努力推动 FSO 通信载荷不断向前发展,使其进入更多的领域,牢牢把握各个平台的核心技术,构建服务空天一体化作战体系的通信载荷。

4 结论

随着无人机集群在战场情报搜索、侦察监视和精确打击等方面扮演越来越重要的角色,FSO 通信载荷将广泛应用于各类无人机平台,提供高速率、高可靠的通信保障^[83]。我国应不断加强基础理论研究并推进相关工程领域建设,积累经验,充分借鉴国外成熟的 FSO 通信技术,推陈出新,发展具有独特优势的通信载荷技术,攻占 FSO 通信的制高点,为构建空天一体化作战体系提供通信保障,为打赢未来战争奠定坚实基础。

参考文献 (References)

- [1] CHAN V W S. Free-space optical communications [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, 24(12): 4750 – 4762.
- [2] KAADAN A, REFAI H H, LOPRESTI P G. Multielement FSO transceivers alignment for inter-UAV communications[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(24): 4183 – 4193.
- [3] 于志亮,周乃新,陈兴林,等. 星间激光通信系统粗精复合扫描技术[J]. *国防科技大学学报*, 2016, 38(5): 158 – 162.
YU Zhiliang, ZHOU Naixin, CHEN Xinglin, et al. Research on coarse-fine composite technology for scanning in inter-satellite laser communication [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2016, 38(5): 158 – 162. (in Chinese)
- [4] BEJIGA M B, ZEGGADA A, NOUFFIDJ A, et al. A convolutional neural network approach for assisting avalanche search and rescue operations with UAV imagery[J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(2): 1 – 22.
- [5] TAO L, PAN D, GOLSTON L, et al. UAV-based laser spectrometer to quantify methane from agricultural and petrochemical activities [C]//*Proceedings of Conference on Lasers and Electro-Optics*, 2015.
- [6] MENOVAR H, GUVENC I, AKKAYA K, et al. UAV-enabled intelligent transportation systems for the smart city: applications and challenges [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2017, 55(3): 22 – 28.
- [7] CHEN J H, LIU H T, ZHENG J C, et al. Damage degree evaluation of earthquake area using UAV aerial image[J]. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2016, 2016: 1 – 10.
- [8] NEX F C, REMONDINO F. UAV for 3D mapping applications: a review[J]. *Applied Geomatics*, 2014, 6(1): 1 – 15.
- [9] 闫鲁生,王峰,吴畏,等. 无人机激光通信载荷发展现状与关键技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(8): 40 – 48.
YAN Lusheng, WANG Feng, WU Wei, et al. Current status and key technologies of unmanned aerial vehicle laser communication payloads [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(8): 40 – 48. (in Chinese)
- [10] 杨海东. 无人机数据链的未来发展和组网通信关键技术[C]//*(第五届)中国无人机大会论文集*, 2014: 699 – 703.
YANG Haidong. Future development of UAV data link and key technologies for networking communication [C]//*Proceedings of the 5th China Drone Conference*, 2014: 699 – 703. (in Chinese)
- [11] 陈凌,梁加红,胡志伟,等. 无人飞行器 Ad Hoc 网络中容错节点移动控制算法[J]. *国防科技大学学报*, 2012, 34(1): 58 – 62.
CHEN Ling, LIANG Jiahong, HU Zhiwei, et al. Movement control algorithm of fault-tolerant UAVs Ad Hoc networks[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2012, 34(1): 58 – 62. (in Chinese)
- [12] ALZENAD M, SHAKIR M Z, YANIKOMEROGLU H, et al. FSO-based vertical backhaul/fronthaul framework for 5G + wireless networks [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2018, 56(1): 218 – 224.
- [13] SIDDIQUE U, TABASSUM H, HOSSAIN E, et al. Wireless backhauling of 5G small cells: challenges and solution approaches [J]. *IEEE Wireless Communications*, 2015, 22(5): 22 – 31.
- [14] 谷志群. 基于 FSO 的移动前传/回传网络拓扑优化技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2019.
GU Zhiqun. Research on topology optimization technology for FSO based mobile fronthaul/backhaul networks[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2019. (in Chinese)
- [15] 李日永,金芳,程芳. 气象条件对大气激光通信影响研究[J]. *舰船电子工程*, 2016, 36(6): 135 – 137.
LI Riyong, JIN Fang, CHENG Fang. Effect of atmosphere on laser communication[J]. *Ship Electronic Engineering*, 2016, 36(6): 135 – 137. (in Chinese)
- [16] FELDMANN R J, GILL R A. Development of laser crosslink for airborne operations [C]//*Proceedings of Military Communications Conference*, 1998.
- [17] ARNOLD R L, WOODBRIDGE E L, SMITH G, et al. 500 km 1 Gbps airborne laser link[C]//*Proceedings of Free-Space Laser Communication Technologies X*, 1998: 178 – 197.
- [18] JONO T, TAKAYAMA Y, SHIRATAMA K, et al. Overview of the inter-orbit and the orbit-to-ground laser communication demonstration by OICETS [C]//*Proceedings of Free-Space Laser Communication Technologies XIX and Atmospheric Propagation of Electromagnetic Waves*, 2007.
- [19] FLETCHER T M, CUNNINGHAM J A, BABER D, et al. Observations of atmospheric effects for FALCON laser communication system flight test [C]//*Proceedings of Atmospheric Propagation VIII*, 2011.
- [20] BISWAS A, PAGE N, NEAL J, et al. Airborne optical communications demonstrator design and pre-flight test results[C]//*Proceedings of Free-Space Laser Communication Technologies XVII*, 2005: 205 – 216.

- [21] GIGGENBACH D, HORWATH J, KNAPEK M. Optical data downlinks from earth observation platforms [C]//Proceedings of Free-space Laser Communication Technologies XXI, 2009.
- [22] WALTHER F G, MICHAEL S, PARENTI R R, et al. Air-to-ground lasercom system demonstration design overview and results summary [C]// Proceedings of Free-Space Laser Communications X, 2010.
- [23] CASEY C. Free space optical communication in the military environment [D]. Monterey: Naval Postgraduate School, 2014.
- [24] GANGL M E, FLETCHER T M, CUNNINGHAM J A, et al. Fabrication and testing of laser communication terminals for aircraft [C]//Proceedings of Enabling Photonics Technologies for Defense, Security, and Aerospace Applications II, 2006.
- [25] SHORTT K, GIGGENBACH D, MATA CALVO R, et al. Channel characterization for air-to-ground free-space optical communication links [C]//Proceedings of Free-Space Laser Communication and Atmospheric Propagation XXVI, 2014.
- [26] CHLESTIL C, LEITGEB E, SCHMITT N P, et al. Reliable optical wireless links within UAV swarms [C]//Proceedings of International Conference on Transparent Optical Networks, 2006.
- [27] MUHAMMAD S S, PLANK T, LEITGEB E, et al. Challenges in establishing free space optical communications between flying vehicles [C]//Proceedings of the 6th International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing, 2008.
- [28] MAJUMDAR A K. Free-space optical (FSO) platforms: unmanned aerial vehicle (UAV) and mobile [M]. New York: Springer, 2015: 203–225.
- [29] LI L, ZHANG R, ZHAO Z, et al. High-capacity free-space optical communications between a ground transmitter and a ground receiver via a UAV using multiplexing of multiple orbital-angular-momentum beams [J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 1–12.
- [30] NAJAFI M, AJAM H, JAMALI V, et al. Statistical modeling of FSO fronthaul channel for drone-based networks [C]// Proceedings of IEEE International Conference on Communications (ICC), 2018: 1–7.
- [31] SAFI H, DARGAHI A, CHENG J, et al. Spatial beam tracking and data detection for an FSO link to a UAV in the presence of hovering fluctuations [EB/OL]. [2020-01-12]. <https://arxiv.org/abs/1904.03774>.
- [32] AMIRABADI M A, KAHAEI M H, NEZAMALHOSSEINI S A, et al. Deep learning for channel estimation in FSO communication system [J]. Optics Communications, 2020, 459: 1–6.
- [33] LECUN Y, BENGIO Y, HINTON G, et al. Deep learning [J]. Nature, 2015, 521(7553): 436–444.
- [34] GRIETHE W, GREGORY M, HEINE F, et al. High-speed laser communications in UAV scenarios [C]//Proceedings of Airborne Intelligence, Surveillance, Reconnaissance (ISR) Systems and Applications VIII. International Society for Optics and Photonics, 2011.
- [35] General Atomics Aeronautical. GA-ASI successfully tests air-to-space laser communication system [EB/OL]. [2020-02-20]. <https://www.ga-asi.com/ga-asi-successfully-tests-air-to-space-laser-communication-system>.
- [36] 刘世涛. 机载激光通信的视轴指向技术研究 [D]. 重庆: 重庆理工大学, 2017.
- LIU Shitao. Research on optical axis alignment technique of airborne laser communication [D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [37] 费海荣. 基于大气激光通信的综合业务通信平台设计与实现 [D]. 南京: 南京邮电大学, 2016.
- FEI Hairong. Design and implementation of integrated services communication platform based on atmospheric laser [D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2016. (in Chinese)
- [38] 于思源, 谭立英, 马晶, 等. 激光星间链路中振动补偿技术研究 [J]. 光电子·激光, 2004, 15(4): 472–476.
- YU Siyuan, TAN Liying, MA Jing, et al. Study of vibration compensation technology in intersatellite laser links [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2004, 15(4): 472–476. (in Chinese)
- [39] 宋延高, 常帅, 佟首峰, 等. 航空激光通信系统的特性分析及机载激光通信实验 [J]. 中国激光, 2016, 43(12): 215–226.
- SONG Yansong, CHANG Shuai, TONG Shoufeng, et al. Feature analysis of aeronautical laser communication system and airborne laser communication experiment [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(12): 215–226. (in Chinese)
- [40] MENG L X, ZHANG L Z, LI X M, et al. Airborne laser communication technology and flight test [C]//Proceedings of the Photoelectronic Technology Committee Conferences, 2015.
- [41] 安建欣, 何晓垒, 杨乾远, 等. 小型无人机空地无线激光通信的应用研究 [J]. 光通信技术, 2017, 41(6): 10–13.
- AN Jianxin, HE Xiaolei, YANG Qianyuan, et al. Research on the application of the air to ground free space optical communication by small UAV [J]. Optical Communication Technology, 2017, 41(6): 10–13. (in Chinese)
- [42] TRUONG L D, PHAM H T T, DANG N T, et al. Topology design and cross-layer optimization for FSO mesh networks impaired by atmospheric turbulence and misalignment fading [J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2017, 9(12): 1097–1107.
- [43] 吴超宇, 王明珠, 张旭东, 等. 浅谈无人机集群组网通信技术 [J]. 信息通信, 2019(7): 128–130.
- WU Chaoyu, WANG Mingzhu, ZHANG Xudong, et al. A brief discussion on the communication technology of UAV cluster network [J]. Information & Communications, 2019(7): 128–130. (in Chinese)
- [44] 姜会林, 安岩, 张雅琳, 等. 空间激光通信现状、发展趋势及关键技术分析 [J]. 飞行器测控学报, 2015, 34(3): 207–217.
- JIANG Huilin, AN Yan, ZHANG Yalin, et al. Analysis of the status quo, development trend and key technologies of space laser communication [J]. Journal of Spacecraft TT & C Technology, 2015, 34(3): 207–217. (in Chinese)
- [45] AL-ERYANI Y F, SALHAB A M, ZUMMO S A, et al. Two-way multiuser mixed RF/FSO relaying: performance analysis and power allocation [J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2018, 10(4): 396–408.
- [46] MIKOŁAJCZYK J, SZABRA D, MATYSZKIEL R, et al. Possibilities of using FSO/RF technology in military communication systems [C]//Proceedings of New Trends in Signal Processing (NTSP), 2018: 1–4.
- [47] CHOWDHURY M Z, SHAHJALAL M, AHMED S, et al.

- 6 G wireless communication systems: applications, requirements, technologies, challenges, and research directions[EB/OL]. [2020-01-12]. <https://arxiv.org/abs/1909.11315v1>.
- [48] 王世练, 胡登鹏, 张智力, 等. MIMO 多径衰落信道下的多载波混沌键控混沌通信[J]. 国防科技大学学报, 2015, 37(2): 52-57.
WANG Shilian, HU Dengpeng, ZHANG Zhili, et al. Multi-carrier chaotic shift keying chaotic communications under MIMO multipath fading channels [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2015, 37(2): 52-57. (in Chinese)
- [49] 伍友利, 叶圣涛, 方洋旺, 等. 固定翼无人机群的集群和避障控制[J]. 国防科技大学学报, 2019, 41(5): 103-110.
WU Youli, YE Shengtao, FANG Yangwang, et al. Flocking and obstacles avoidance for fixed-wing unmanned aerial vehicle swarm[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2019, 41(5): 103-110. (in Chinese)
- [50] KUMAR K, BORAH D K. Quantize and encode relaying through FSO and hybrid FSO/RF links [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 64(6): 2361-2374.
- [51] FANG J, BI M, XIAO S, et al. Polar-coded MIMO FSO communication system over gamma-gamma turbulence channel with spatially correlated fading [J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2018, 10(11): 915-923.
- [52] 王祥科, 刘志宏, 丛一睿, 等. 小型固定翼无人机集群综述和未来发展[J]. 航空学报, 2020, 41(4): 15-40.
WANG Xiangke, LIU Zhihong, CONG Yirui, et al. Miniature fixed-wing UAV swarms: review and outlook[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(4): 15-40. (in Chinese)
- [53] BEKMEZCI I, SAHINGOZ O K, TEMEL S. Survey flying Ad-Hoc networks (FANETs): a survey [J]. Ad Hoc Networks, 2013, 11(3): 1254-1270.
- [54] SIVAKUMAR A, TAN C K Y. UAV swarm coordination using cooperative control for establishing a wireless communications backbone [C]//Proceedings of the 9th International Conference on Autonomus Agents and Multiagent Systems, 2010: 1157-1164.
- [55] GUPTA L, JAIN R, VASZKUN G. Survey of important issues in UAV communication networks[EB/OL]. [2020-01-12]. <https://arxiv.org/abs/1603.08462>
- [56] 卓琨, 张衡阳, 郑博, 等. 无人机自组网研究进展综述[J]. 电信科学, 2015, 31(4): 127-137.
ZHUO Kun, ZHANG Hengyang, ZHENG Bo, et al. Progress of UAV Ad Hoc network: a survey [J]. Telecommunications Science, 2015, 31(4): 127-137. (in Chinese)
- [57] WU D, SUN X, ANSARI N. An FSO-based drone assisted mobile access network for emergency communications [J]. IEEE Transactions on Network Science and Engineering, 2019, 7(3): 1597-1606.
- [58] KHALLAF H S, UYSAL M. UAV-based FSO communications for high speed train backhauling [C]//Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2019.
- [59] ANSARI N, WU D, SUN X. FSO as backhaul and energizer for drone-assisted mobile access networks[J]. ICT Express, 2020, 6(2): 139-144.
- [60] CHEN R, LONG W X, MAO G Q, et al. Development trends of mobile communication systems for railways [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2018, 20(4): 3131-3141.
- [61] VAN QUICKENBORNE F, DE GREVE F, DE TURCK F, et al. Managing ethernet aggregation networks for fast moving users[J]. IEEE Communications Magazine, 2006, 44(10): 78-85.
- [62] Fokum D T, Frost V S. A survey on methods for broadband internet access on trains [J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2010, 12(2): 171-185.
- [63] TAHERI M, ANSARI N, FENG J H, et al. Provisioning internet access using FSO in high-speed rail networks [J]. IEEE Network, 2017, 31(4): 96-101.
- [64] KHUWAJA A A, CHEN Y F, ZHAO N, et al. A survey of channel modeling for UAV communications [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2018, 20(4): 2804-2821.
- [65] HE J, WANG J Z, ZHU H L, et al. Resource allocation in drone aided emergency communications [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Communications, 2019: 1-6.
- [66] CHENG F, LI D D, JIANG F, et al. Learning-based user association in multi-UAV emergency networks with ground D2D [C]//Proceedings of International Conference on Communications, 2019: 1-5.
- [67] KHUWAJA A A, ZHENG G, CHEN Y F, et al. Optimum deployment of multiple UAVs for coverage area maximization in the presence of co-channel interference [J]. IEEE Access, 2019: 85203-85212.
- [68] MENG Z H, CHEN Y J, DING M, et al. A new look at UAV channel modeling: a long tail of LoS probability [C]//Proceedings of IEE 30th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2019.
- [69] 李冰, 陈自力, 邱金刚. 无人机通信信道模型研究[J]. 装备环境工程, 2009, 6(3): 25-29.
LI Bing, CHEN Zili, QIU Jingang. Research of the UAV communication channel model [J]. Equipment Environmental Engineering, 2009, 6(3): 25-29. (in Chinese)
- [70] YI W, LOPRESTI P G, REFAI H H, et al. Wavelength agile FSO transceiver [C]//Proceedings of International Communications, Navigation and Surveillance Conference, 2013.
- [71] 王明军, 魏亚飞, 柯熙政. 复杂大气背景下机载通信终端与无人机目标之间的激光传输特性研究[J]. 物理学报, 2019, 68(9): 140-148.
WANG Mingjun, WEI Yafei, KE Xizheng. Laser propagation transmission properties characteristics between airborne communication terminal and unmanned aerial vehicle target in complex atmospheric background [J]. Acta Physica Sinica, 2019, 68(9): 140-148. (in Chinese)
- [72] BING L. Study on modeling of communication channel of UAV [J]. Procedia Computer Science, 2017, 107: 550-557.
- [73] 李龙龙. 高速率激光大气湍流传输脉冲展宽特性研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2017.
LI Longlong. Research on the transmission characteristics of high-speed laser pulse broadening in atmospheric turbulence [D]. Changchun: Changchun University of

- Science and Technology, 2017. (in Chinese)
- [74] 李亚添. 时间误差对自由空间光通信影响的分析验证与补偿研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2019.
LI Yatian. Analysis and compensation of the influence caused by timing errors on free-space optical communication [D]. Changchun; Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2019. (in Chinese)
- [75] PETKOVIC M, NARANDZIC M. Overview of UAV based free-space optical communication systems [C]//Proceedings of International Conference on Interactive Collaborative Robotics, 2019: 270 - 277.
- [76] 史海庆, 徐胜. 外军机载激光/射频一体化通信技术研究进展[J]. 电讯技术, 2019, 59(8): 981 - 986.
SHI Haiqing, XU Sheng. Survey on foreign military forces' airborne free space optical/RF high speed communications[J]. Telecommunication Engineering, 2019, 59(8): 981 - 986. (in Chinese)
- [77] PLANK T, LEITGEB E, LOESCHNIGG M. Recent developments on free space optical links and wavelength analysis [C]//Proceedings of International Conference on Space Optical Systems and Applications, 2011.
- [78] PEZZEI P, HINTEREGGER M, PLANK T, et al. New evaluation method to maximize the permissible lateral and angular transmitter misalignments of collimated optical free space links [C]//Proceedings of the 17th International Conference on Transparent Optical Networks, 2015.
- [79] ZHALEHPOUR S, UYSAL M. Performance of multiuser scheduling in free space optical systems over atmospheric turbulence channels[J]. IET Optoelectronics, 2015, 9(5): 275 - 281.
- [80] 李长春. 自适应传输关键技术与应用研究[D]. 济南: 山东大学, 2011.
LI Changchun. Research on key technologies and applications of adaptive transmission [D]. Jinan; Shandong University, 2011. (in Chinese)
- [81] DJORDJEVIC I B. Adaptive modulation and coding for free-space optical channels [J]. IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, 2010, 2(5): 221 - 229.
- [82] KHALIGHI M A, UYSAL M. Survey on free space optical communication: a communication theory perspective [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2014, 16(4): 2231 - 2258.
- [83] 李晓楠. 基于大规模 MIMO 实测信道数据的机器学习研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2019.
LI Xiaonan. Machine learning research based on massive MIMO measured channel data [D]. Chengdu; University of Electronic Science and Technology of China, 2019. (in Chinese)