

面向航空骨干网的大型无人机光通信技术应用

薛凤凤, 赵尚弘, 李勇军, 田 琴, 付浩通

(空军工程大学信息与导航学院, 陕西 西安 710077)

摘要: 目前, 航空骨干网络各平台间采用射频技术, 存在传输速率较低、频带资源受限、易受电磁干扰等不足, 难以满足航空安全、作战指挥等军事和民用领域对航空数据安全高速传输的要求。而光通信在航空信息高速可靠传输方面具有显著优势, 具有超高速率、超大带宽、抗干扰能力强、保密性好等优点。为进一步提高航空骨干网络机间无线通信能力, 立足于大型无人机在航空领域的具体应用和机载光通信技术的发展, 首先在分析总结国内外机载光通信关键技术的研究现状、已进行试验情况的基础上, 针对大型无人机作为骨干网移动中继在当前航空领域的应用场景做出了设想与描述; 然后对航空大型无人机机载光通信的需求进行了深入分析; 最后系统总结了航空大型无人机激光通信的关键技术、未来发展趋势等。这为机载光通信技术在当前航空领域大型无人机上的应用与发展提供了一定的理论借鉴与依据。

关键词: 航空骨干网; 机载光通信; 大型无人机; 移动中继

中图分类号: TN929 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20220331

Application of optical communication technology of large-scale UAV based on aviation backbone network

Xue Fengfeng, Zhao Shanghong, Li Yongjun, Tian Qin, Fu Haotong

(College of Information and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract: At present, radio frequency technology is used between platforms in the aviation backbone network, which has shortcomings such as low transmission rate, limited frequency band resources, and susceptibility to electromagnetic interference. It is difficult to meet the requirements for safe and high-speed transmission of aviation data in military and civil fields such as aviation safety and combat command. While optical communication has significant advantages in high-speed and reliable transmission of aviation information, with the advantages of ultra-high speed, ultra-large bandwidth, strong anti-interference ability, and good confidentiality. In order to improve the capability of wireless communication between flight platforms of aviation backbone network, on the basis of analyzing and summarizing of the research status and experiments of key technologies of airborne optical communication at home and abroad, at first this thesis makes an assumption and description for the application scenario of domestic large UAV as backbone network mobile relay in the current aviation field, then analyzes deeply the airborne optical communication requirements of large UAV. At last systematically summarizes the key technologies and future development trend of laser communication of large aviation UAV, which provides a certain theoretical reference and basis for the application and development of airborne optical communication technology in large aviation UAV.

Key words: aviation backbone network; airborne optical communication; large-scale UAV; mobile relay

收稿日期: 2022-05-16; 修订日期: 2022-07-13

作者简介: 薛凤凤, 女, 副教授, 博士生, 主要从事航空通信、激光通信方面的研究。

导师简介: 赵尚弘, 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事空天光通信网络、微波光子技术等方面的研究。

0 引言

随着无人机技术的不断发展,作为现代航空领域高科技的先进装备,在未来作战样式和未来战争中将扮演着更加重要的角色^[1-2]。近年来,无人机已作为常态化武器在局部战争中普遍使用,更加彰显了其在国家航空战略中的优势与重要性。传统无人机采用射频技术,由于传输速率较低、频带资源受限、易受电磁干扰等不足,难以满足航空安全、作战指挥等军事领域对航空数据安全高速传输的要求。而机载光通信在航空信息高速可靠传输方面具有显著优势,具有超高速率、超大带宽、抗干扰能力强、保密性好等优点,不但可以降低对地面指控中心的依赖,有效改善传统飞行平台间射频数据链在带宽、抗干扰及安全传输等方面的不足,而且基于光通信技术的大型无人机可作为移动中继应用,其机动性好、成本低、部署速度快、抗毁能力强、安全隐蔽性好、不受地面上固定基础设施的约束,尤其在战场应急通信中作为固定卫星中继的必要补充,将成为建立柔性航空骨干网通信链路很有前途的解决方法^[3]。

因此,立足于大型无人机在航空领域的具体应用和光通信技术的发展,为了航空数据实现隐蔽安全、高速率、低时延的实时传输,以适应未来多场景全天候的实战化要求,急需深入研究基于航空大型无人机通信中继的机载光通信技术,构建基于大型无人机作为骨干网移动中继的航空通信系统,有效提升航空通信能力,保证信息有效且可靠传输。文中系统分析了国内外机载光通信关键技术的研究现状、已开展试验情况,并在此基础上针对我国大型无人机作为骨干网移动中继在当前航空领域的应用场景做出了设想与描述,对航空大型无人机的光通信需求进行了深入分析,并系统总结了航空大型无人机激光通信的关键技术、未来发展趋势等,以期对光通信技术在大型无人机上的应用与发展提供一定的理论借鉴与依据。

1 机载光通信技术的研究现状

机载光通信,又称为自由空间光通信(Free Space Optical, FSO),是利用光束作为信号载体,在长视距无遮挡的自由空间信道中实现信号传输的无线通信技术^[3-4]。机载光通信系统融合了传统射频数据链通信与光纤通信的优势,如高速率、大带宽、高保密、建网

快、无需授权等,可用于航空通信、卫星通信和海上通信等。机载光通信作为激光通信应用的一个主要方向,从 20 世纪 80 年代开始,美国、德国、法国等西方国家就已相继开展了大量基于各类航空飞行平台的机载光通信载荷和链路试验研究工作,并已获得了实质性突破。目前,国内也有许多单位先后进行了机载光通信关键技术和试验,主要有武汉大学、西安理工大学、长春理工大学、中国科学院上海光学精密机械研究所、桂林激光通信研究所、哈尔滨工业大学、海军航空大学等。

(1) 国外研究现状

1980 年,美国空军实验室(AFRL)在白沙基地开展了空-地之间 KC-135 机载飞机激光通信测试项目(AFTS),第一次证明了机载通信终端在空间通信系统中的可行性。1984 年,美国空军 HAVE LACE 项目中进行了两架飞机之间的激光通信试验^[5]。1995 年,美国 Thermo Trex 公司开展了机载激光通信装备 RILC 的研发;1996 年,飞机搭载了 RILC 终端,并完成了空-地之间的激光通信试验;1998 年,在两架 T-39 型飞机上搭载 RILC 激光通信载荷,进行了空-空激光通信试验;2004~2005 年,又先后开展了一系列的试验,完成了两架飞机在高空 40 000 ft、目标距离 100 km、数据速率 2.5 Gbps、误码率 $\leq 10^{-6}$ 的演示试验^[6]。2005 年,美国国家喷气动力实验室(JPL)进行了第二代激光通信终端(Optical Communications Demonstrator, OCD)系统的演示试验,并进行了空-地之间激光通信链路试验。2006 年,欧洲空间局(European Space Agency, ESA)的 LOLA 项目在静止轨道卫星 Artemis 和法国飞机“神秘 20”(搭载 ELAS 通信终端)之间建立了空-星双向激光通信链路。2008 年,德国宇航中心 ARGOS 项目完成了飞行高度 3 km、通信距离 10~85 km、传输速率 155 Mbps 的空-地激光通信试验;2010 年完成了通信距离 10~100 km、传输速率 1.25 Gbps 的空-地通信链路试验^[6]。2009 年,在麻省理工学院林肯实验室的 FOCAL 试验中完成了双机与地面端机之间的激光通信链路试验^[7]。2010 年,美国空军实验室与 ITT 企业联合进行了 FALCON 项目,共同研究了空基高速激光通信链路技术,并顺利实现了 DC-3 飞机之间的双向激光通信试验。2013 年,在德国的 DODfast 项目中完成了战斗机“狂风”和地面移动节点

间的空-地激光通信链路试验^[7]。2014 年,美国通用原子公司进行了空基激光通信系统演示项目 (ALCOS),提出了在 MQ-9 无人机平台上搭载激光通信载荷;2016 年,进行了地面试验;2017 年完成了飞机搭载测试的验证;并于 2020 年完成了通信部分试验,在 1.064 μm 和 1.550 μm 两个光波波长下实现了无人机低截获率和低检测率的通信链路^[8]。2017 年,日本 Facebook 公司尝试以飞行高度为 18 km 的 Aquila 高空太阳能无人机为空中激光节点,建设了空中无线网络基站,并试飞成功^[9]。近十年以来,美国、法国等先进国家还进行了 Gbps 量级的高速率无人机-卫星、无人机-地之间的激光通信试验,以及基于高空大型无人机的民用激光通信组网试验研究。

(2) 国内研究现状

2006 年,武汉大学成功进行了传输速率为 42 Mbps 的多业务机载激光通信试验;2007 年,完成了全空域的机载激光通信自动跟踪伺服系统测试并获得成功。2009 年,西安理工大学成功研发了大气激光视频传输系统,并完成了通信距离为 3~5 km 的全天候不间断实时视频网络数据通信。2011 年,长春理工大学

在新疆开展了飞艇和水面船舶的双向动态高速率激光通信试验;在黑龙江省某机场进行了低空双直升机之间激光通信试验;2013 年,在黑龙江省某机场开展了双固定翼飞机平台间激光通信试验。2016 年,中国科学院上海光学精密机械研究所成功进行了 3.11 km 高空对水下目标的机载激光通信试验。2016 年,桂林激光通信研究所的安建欣教授等利用小型旋翼无人机平台研制出了一套空-地激光通信系统,实现了在三种天气情况下的稳定通信;2017 年,研制了小型无人机在 1.7 km 的距离上实现空-地 2.5 Gbps 的通信试验。海军航空大学进行了机载蓝绿激光通信信道特性以及调制方式的相关研究,并进行了海上机载激光通信试验。2018 年至今,赵尚弘等对高空大气信道下航空平台端到端激光通信链路性能、FSO/RF 混合传输技术和航空组网进行了一系列理论研究和演示系统样式研制。此外,国内另有其他多家单位针对航空无人机激光通信的大气信道特性、机载光通信理论以及关键技术等进行了系统深入的研究^[10-11]。

国内外机载光通信试验开展情况如表 1 所示。由国内外研究现状可知:

表 1 国内外机载光通信试验

Tab.1 Domestic and foreign aviation wireless laser communication test

Country name	Project/Unit	Test time	Link type	Transmission rate	Transmission distance
America	AFTS	1980	Air-Ground	20 kb/s	20-30 km
		1984	Air-Air	19.2 kb/s	160 km
	HAVE LACE	1996	Air-Ground	1 Gb/s	20-30 km
		1998	Air-Air	1 Gb/s	50-100 km
	OCD	2005	Air-Ground	2.5 Gb/s	20-30 km
	FOCAL	2009	Air-Ground	2.5 Gb/s	25 km
	FALCON	2010	Air-Air	2.5 Gb/s	94-132 km
France	ALCOS	2017	GEO-Air	1.8 Gb/s	36 000 km
		LOLA	2006	GEO-Air	50 Mb/s
Germany	ARGOS	2008	Air-Ground	155 Mb/s	10-85 km
		2010	Air-Ground	1.25 Gb/s	10-100 km
	DOD fast	2013	Air-Ground	1.25 Gb/s	>50 km
China	Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences	2001	Air-Air	1 Gb/s	50-100 km
		2016	Air-Sea	-	3.1 km
		2011	Air-Sea	1.5 Gb/s	20.8 km
	Changchun University of Science and Technology	2011	Air-Air	1.5 Gb/s	5-20 km
		2013	Air-Air	2.5 Gb/s	136-144 km
Research Institute of Laser Communication in Guilin		2016	Air-Ground	1.25 Gb/s	6.7 km
		2017	Air-Ground	2.5 Gb/s	1.7 km

1) 机载光通信的国内外研究重点大多集中在增加通信距离、提高传输速率、可靠性和安全性、工程实现等几个方面,尤其是针对大型有人机的点对点激光通信试验研究。

2) 国内外大部分研究机构主要面向 5~15 km 高度的有人机/无人机进行机载光通信试验,近几年才逐渐开始朝着 17~25 km 的高空无人机平台发展,尝试大型无人机的光通信理论研究和演示试验。

3) 国外对机载光通信的研究和试验开始相对较早,在基础理论、试验和工程化技术方面比较完善。与国外相比较,国内在机载光通信系统的研制与演示试验方面尚有一些差距,目前正处于从理论研究逐步向工程实现转化、从航空平台点-点激光通信向航空组网验证转化的阶段。

因此,国内对机载光通信技术的研究和应用仍存在很大的发展空间,特别是加快推进大型无人机的光通信技术研究与实际应用具有重要意义。

2 航空大型无人机的应用场景设想及其机载光通信需求分析

(1) 航空大型无人机的应用场景设想

随着无人机技术的不断发展,其在军事和民用方面的应用日益广泛和关键。比如,航空子网中,有各类低空小型无人机编队;航空骨干网中,可利用大型无人机实现通信中继,从而协同有人机等进一步提供更为高效且灵活多样的通信服务。

传统以卫星作为航空通信骨干网固定中继节点,尽管具有覆盖范围广、信道相对稳定、频带资源丰富、通信容量大的优势,但它并不能始终处于最佳位置,尤其是战争条件下还存在着暴露的危险,但大型无人机可以作为移动中继节点应用,其机动性好、成本低、部署速度快、抗毁性强、隐蔽性好、使用简单,且不受地面固定基础设施的约束,尤其在应急通信中可以作为卫星中继方式的必要补充。目前,大型无人机已实现了在数千公里的高空上连续数月、乃至几年的连续工作,比如“天隼 2”型、“中翔 2”型等大型无人机可作为通信中继使用^[12]。因此,大型无人机作为航空通信骨干网移动中继,已成为建立柔性航空通信链路的很有前途的解决方法。

高空大型无人机平台通常位于距离地面 17~

25 km 的范围,由于该高度处于平流层,几乎没有云层的遮蔽,相应的大气湍流与衰减较弱,再加上飞行速度相对较慢,更利于光通信的捕获、跟踪和瞄准,使得大型无人机利于自由空间光信号进行通信成为可能,作为射频通信的必要补充,实现未来机间安全高速数据传输。大型无人机作为航空骨干网移动中继的应用场景设想如图 1 所示。

(2) 航空大型无人机机载光通信需求分析

现代战争态势和战场环境日趋复杂,对航空通信的要求愈来愈高,比如高速率、低时延、大带宽、高保密等,用来保证信息传输不被拦截窃听,保障信息有效而可靠地传输。航空大型无人机多用于战场态势感知和侦察、通信中继、应急通信保障等军事与民用特殊领域,对链路性能有较高的要求,所以机载光通信技术在航空大型无人机方向具有更加广阔的应用前景。针对航空大型无人机的机载光通信需求分析具体如下:

1) 数据的隐蔽安全传输需求

现今航空大型无人机通信是在现有射频无线电基站和通信协议基础上加以改进优化后使用的。在战场复杂电磁环境下,传统射频通信容易受到干扰,如磁场干扰、同频干扰等,存在较大的信息安全问题,从而削弱了无人机协同作战能力。机载光通信系统实行点-点定向数据传输,链路干扰较小,且发射光束具有很强的方向性,不容易被敌人捕获、识别。即使发射光束被敌方截获,链路也会立刻中断,被用户所察觉。因此,机载光通信具有较高的抗干扰能力、较好的保密性能和良好的空间传输隐身性能。

2) 高速率低时延的传输需求

无论有人机还是无人机,其预警侦察等信息都需要实时可靠地传输,且通信链路高速率、低时延的信息传输能力对战场决策极为重要。机载光通信相比射频数据链在频带资源上要高出四五个量级,相应的带宽资源更加充足,能够实现超高速率的数据传输,目前已验证的传输速率达到了几十个 Gbps,满足各种战场信息的传输。

3) 频谱资源拓展的需求

目前,航空平台间(包括有人机、无人机等)主要采用传统射频数据链实现通信,存在频带资源少、传输速率受限等不足。另外,在万物互联的时代,航空

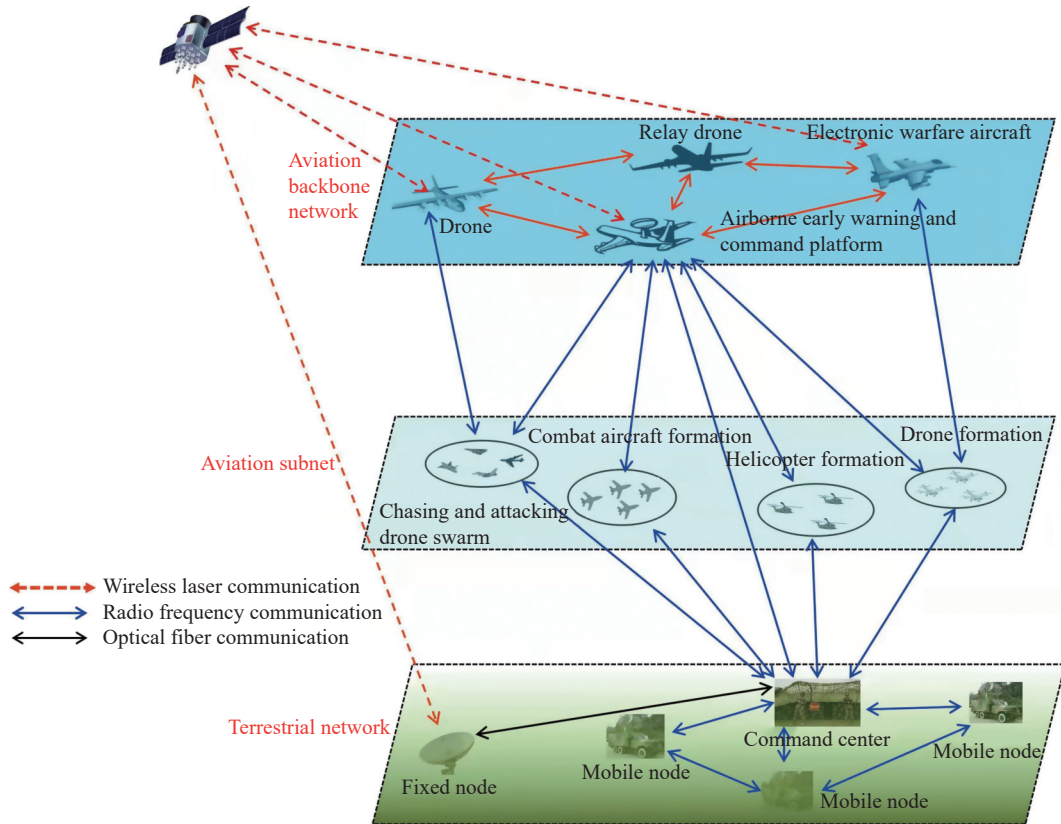


图 1 航空联合作战任务态势场景构想

Fig.1 Scenario concept of joint aviation combat mission situation

资源多域受限的情况下,不断增长的业务规模、类型与需求显著加剧了航空通信的服务难度,对信息传输速率、时延和资源利用率等提出极大挑战,急需进一步拓展频谱资源。

因此,为了航空大型无人机通信实现数据的隐蔽安全、高速率低时延的实时传输,有必要深入研究基于大型无人机的光通信技术,这是实现未来机间高速安全数据传输,建立互联互通、信息资源共享的航空信息网络的重要研究方向。

3 航空大型无人机光通信的关键技术

随着机载光通信技术的快速发展,使得航空大型无人机中继的光通信应用成为可能。通过对基于航空大型无人机中继的应用场景设想,可以预见其在军事领域的重要性。但光通信技术在大型无人机上的应用还需要攻克并掌握多项关键技术,主要有以下几个方面:

(1) 精准的 ATP 技术

捕获、跟踪和瞄准技术 (Acquisition Tracking and

Pointing, ATP) 是激光通信系统的核心和技术难点。如图 1 所示,航空骨干网由预警机等大型有人机和无人机平台组成,机间通信链路属于较为典型的“动中通”,其通信性能受大型无人机中继的运动姿势、轨迹和振动影响较大,且通信距离较远,易受复杂大气环境对信道特性的影响,导致光强衰减和抖动范围增大。因此,航空大型无人机机载光通信系统对实时动态的 ATP 技术要求较高,需要系统具备更高的动态指向性、稳定精度和抗振动能力等。实际应用中,可采用自适应跟踪系统及时调整发射装置的相对位置,保证发射机和接收机之间最佳的准直状态,克服光通信中漂移、振动等不利影响。

(2) 有效的湍流抑制技术

目前,有效抑制湍流的技术有孔径平均技术、多光束传输技术和自适应光学技术等。根据孔径平均效应 (Aperture Averaging, AA),即增大接收孔径可减小光强起伏方差的原理,采用大孔径接收可有效抑制光强起伏的影响,但会因此导致光接收装置尺寸和质量增加^[13]。多光束传输技术也可以在一定程度上抑

制大气湍流引起的光强闪烁,并对接收端的光功率起到平滑作用,从而有效提高通信质量^[14]。另外,可采用自适应光学技术消除大气湍流导致的负面影响,即接收端通过波前探测和重构方法产生“反波前畸变网络”,以此来抵消大气湍流引起的波前畸变,应对复杂大气环境对大型无人机光通信的性能影响,进一步提高航空通信的数据可靠传输。

(3) 智能选择调制方式

常用的光通信系统调制方式包括直接和间接调制两大类。直接调制是利用调制信号直接控制激光器的性能参数(如光强等),获得随调制信号变化的光信号。按照改变光束参量的不同,分为开关键控调制、脉冲位置调制和脉冲间隔调制。间接调制是用外调制对光载波的参数进行调制,光源自身的参数没有发生变化。间接调制分为副载波强度调制、偏振调制和逆向调制^[14]。近年来,根据具体应用场景和信道特性,智能选用调制方式来提高无人机激光通信链路传输性能的研究受到国内外的广泛关注。其中,西安理工大学柯熙政教授团队对十几种调制方式做了综合的性能分析比较,为不同信道条件下选择与之匹配的最佳调制方式提供了理论依据^[15]。

(4) 选择合适的编码技术

实验证明,大型无人机光通信系统采用编码处理后将具有更低的链路传输误码率。目前,广泛采用的编码方式分为纠错码(包括 Turbo 码、Read-Solomon 码、低密度奇偶校验码等)和非纠错码(包括基于信道估计的自适应编码、网格编码等)^[16-17]。除此之外,还有更为先进的新型编码技术产生,如时空编码和极化编码等。实际应用中,综合分析传输距离、湍流强弱、调制方式和分集技术等多方面因素,在优化体积、质量和开销的情况下,选择适宜的编码方案,提升激光通信系统性能,但是会随之带来功率和带宽的额外占用问题。

(5) 先进的分集技术,即在发射机到接收机之间采用多条(至少两条)同等的载波光束进行信息传输。因具有多个相对独立的传输信道,大型无人机机载光通信的闪烁强度和衰减得到减小^[18]。因此,采用分集技术可以有效抑制大气湍流、传输损耗、复杂大气环境、指向性误差等因素的影响。常用的分集方法有时间分集、波长分集、空间分集等。

1) 时间分集

时间分集是采用不同的时隙传输相同信息的方法。根据泰勒提出的“湍流冰冻假设”,Trisno 等人通过实际测量对比分析,得出了弱湍流情况下机载光通信采用时间分集技术可以提升系统性能的结论^[18-19]。

2) 波长分集

波长分集是采用不同波长的激光同时发送相同的信息,在接收端使用选择合并方案对信号进行接收,从而降低激光通信中断概率。实际应用中,当使用多路且波长各异的光束进行通信时,光束之间的相关性降低,随着波长间隔的增大,光强起伏方差减小^[18-19],但是较大的波长间隔也会增加机载光通信系统的设计难度。

3) 空间分集

根据机载光通信系统中发射机和接收机数量,空间分集有发射分集、接收分集、多输入多输出系统。为了达到较好的系统性能,接收端需要对多个接收信号进行合并输出。常用的合并方法有最大比值合并、等增益合并、最佳选择合并等。在接收端采用不同的加权系数和合并方式,对多路信号合并输出是提高机载光通信系统信噪比的关键^[20-21]。

4 基于航空大型无人机的光通信技术与网络发展趋势

(1) 从链路传输角度考虑

激光在大气信道传播过程中,大气吸收、散射、湍流效应、指向误差等严重影响大型无人机光通信系统的稳定性和可靠性。为增强链路性能,需要具备精准的 ATP 技术、有效的湍流抑制技术、先进的分集接收技术、智能选用调制方式和编码方式。目前大部分的研究都是基于其中某一两种影响因素,针对单一的链路增强技术研究通信系统性能,而多种改善方法有效融合将是大型无人机光通信系统未来发展的主流趋势。

基于大型无人机的光通信与射频数据链通信相比较,激光通信可提供高于几个量级的数据传输速率,但存在光电转换效率和光探测效率低、指向性误差、复杂大气环境等多重影响,导致接收光斑尺寸增加、光强变弱、链路衰减,使得激光通信的优势没有完全显现出来,无人机的机载光通信相比现有无人机

蜂群协调作战通信模式,传输效率得到有效提升,但并没有达到接近于理论极限值的范畴。另外,射频数据链通信依然能够为部队提供移动通信能力,因此机载光通信系统无法彻底替代射频数据链通信。射频系统和机载光通信系统均不能在任意天气条件下以及复杂战场环境下完全保持畅通,但是一个 RF/FSO 混合系统比任意单一系统的可靠性高,能做到优势互补^[22-23]。因此,大型无人机 RF/FSO 混合传输技术是当前的研究热点。

(2) 从航空组网角度考虑

航空无人机在实际应用中面临组网的需求,比如各类低空小型无人机编队组成的航空子网、大型无人机作为移动中继的航空骨干网等。但由于大气激光通信固有的定向传输特性,目前只能采用小束散角点对点通信模式。因此,在多无人机和有人机等共存的航空组网中还需要开展混合组网技术研究。一是在无人机上装载多个激光通信终端,研究机载光通信多跳网络拓扑控制和路由策略,结合无线信道特性感知和其他射频链路,比如短波、超短波、微波等,开展基于人工智能和 RF/FSO 混合的多信道跨层跨域航空组网研究;二是寻求新型航空网络架构,开展机载光通信组网研究,从而协同有人机等进一步提供更为高效且灵活多样的通信服务。

航空大型无人机的主要组网方法是基于基础设施和自组织的网络架构。基于基础设施的通信组网网络架构计算能力强大,无人机的有效载荷较小,但易受干扰,无法保证数据的隐蔽安全传输。基于自组织的航空网络架构能够迅速建立动态变化节点的 M2M (Machine to Machine) 通信网络,但必须有其中一个节点与卫星或者地面站相连^[24-25]。

软件定义网络 (Software Defined Network, SDN) 的灵活性、开放性、可编程性和创新性优势可以适应各种网络应用的需求^[26]。将 SDN 技术和深度强化学习思想融入航空组网中,构建逻辑集中控制的网络管理策略,能够实现灵活的网络配置和业务流量的优化调度。针对航空网络的大尺度分布、信道特性时变、业务规模和类型日益加剧等特点,建立控制器整体规划部署模型并提出基于深度强化学习的部署优化算法,当面对突发、隐蔽和严峻的作战任务时,实现智能选用传输策略,主动构建无中心自组网,进行主动防

御+自动修复,使通信效能达到最大化降低数据丢包率、链路中断概率,提高通信的有效性和可靠性。考虑到实际需求和工程实现的逐渐演进,新型网络架构可分两个阶段实现。基于软件定义数据中心的集中式网络架构:它能够在不改变现有航空体系架构的基础上,短期内实现系统间的协同;基于云的分布式处理网络架构:智能化的网络体系可在航空平台实现自主的信息处理和传输,该结构的实现需要经过长期的发展。

5 结束语

随着大型无人机在航空作战领域中的广泛应用以及人们对机载光通信技术的深入研究,未来大型无人机作为航空骨干网移动中继将成为战时卫星固定中继的有力补充。考虑到机载光通信和射频通信各自的优势,航空激光通信与传统射频数据链的混合应用^[27-28]将成为航空骨干网,甚至航空子网通信链路的主要方式,是实现安全可靠、高速稳定的航空链路的重要途径。在应急通信保障、灾难救援等民用领域方面,大型无人机同样具有激光通信能力和中继服务能力,用于提高救援和应急保障效率。

参考文献:

- [1] Liu Xiguo, Liu Min, Mao Zhongyang, et al. Application of wireless laser communication in large-scale marine unmanned aerial vehicles [J]. *Study on Optical Communications*, 2021(3): 59-63. (in Chinese)
- [2] Ji Haoran. Research on generation and visualization of netwar situation [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011. (in Chinese)
- [3] Xiong M, Han S, Liu Q, et al. Time-domain analysis for resonant beam charging and communications with delay-divide demodulation [EB/OL]. (2022-03-02) [2022-07-13]. <https://arxiv.org/abs/2203.01076>.
- [4] Maynard J A, Begley D. Airborne laser communications: past, present, and future [C]//Proceedings of SPIE, 2005, 5892: 58920A.
- [5] Wang Shuai. Research on local infrared laser broadcasting and communication system[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)
- [6] Zhao Shanghong. An advance in the field of aeronautical laser/RF communication network technology on research [J].

- Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition)*, 2020, 21(2): 1-15. (in Chinese)
- [7] 董玉辉, 刘向南, 周杨, 等. 空基激光通信技术研究进展与发展趋势 [C]//第三届航天电子战略研究论坛论文集(遥测遥控专刊), 2017: 27-31.
- [8] Zeng Fei, Gao Shijie, San Xiaogang, et al. Development status and trend of airborne laser communication terminals [J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(1): 65-73. (in Chinese)
- [9] An Jianxin, He Xiaolei, Yang Qianyan, 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)
- [10] Chen Yang, Wang Xiang, Zhao Shanghong, et al. Research on the performance of UAV aerial OFDM optical communication link [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2018, 39(6): 853-857. (in Chinese)
- [11] Zheng Huamei. Design and implementation of small UAV ground station software system[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2015. (in Chinese)
- [12] 李炳荣, 曲长文, 王红星. 国外无人机的军事应用与发展 [C]//第二届无人机发展论坛, 2006.
- [13] Nouri H, Uysal M. Experimental investigation on the effect of wavelength on aperture averaging in FSO communications [J]. *Optics Letters*, 2020, 45(11): 3063-3066.
- [14] Ke Xizheng, Wu Jiali, Yang Shangjun. Research progress and prospect of atmospheric turbulence for wireless optical communication [J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2021, 36(3): 323-339. (in Chinese)
- [15] Ke Xizheng, Liang Jingyuan, Xu Dongsheng, et al. Research progress of pulse position modulation technology in optical wireless communication [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2022, 49(3): 210387. (in Chinese)
- [16] Faishid F, Charles P M. Wavelength Division Multiplexing [M]//Keiser G. Fiber Optic Communications. Berlin: Springer, 2021: 383-435.
- [17] Cao Yang, Ren Fatao, Peng Xiaofeng, et al. Research on CRC-LT coding performance in free space optical communication [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(11): 1122003. (in Chinese)
- [18] He Fengtao, Li Jiaqi, Zhang Jianlei, et al. Performance analysis of wavelength diversity wireless optical communication system in ocean turbulence [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(12): 20210131. (in Chinese)
- [19] Tan Zhenkun. Effects of factors on the performance of heterodyne detection and experimental investigation in wireless optical communication[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019. (in Chinese)
- [20] Cahoy K, Serra P, Cierny O. Integrated track-and-receive system for free-space optical communications: US, 20210336697A1 [P]. 2021-10-28.
- [21] Xue Lunsheng. Research on multicarrier transmission technique for troposcatter communication systems[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2019. (in Chinese)
- [22] Zhou T. Performance analysis of hybrid radio frequency and free space optical communication networks with cooperative spectrum sharing [J]. *Photonics*, 2021, 8(4): 108.
- [23] Zheng A, Huang Y, Gao S. Modeling and spatial diversity-based receiving improvement of in-flight UAV FSO communication links [J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(14): 6365.
- [24] Nallagonda V R, Krishnan P. Performance analysis of FSO based inter-UAV communication systems [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2021, 53(4): 192.
- [25] Trung H D, Trung N H. Relay UAV-based fso communications over log-normal channels with pointing errors [C]//ISDA 2020: Intelligent Systems Design and Applications, 2021: 59-68.
- [26] Lv Na, Zou Xinqing, Chen Kefan, et al. Update strategy for software-defined airborne network of aviation swarm [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2020, 42(1): 206-216. (in Chinese)
- [27] Lohani S, Knutson E M, Glasser R T. Generative machine learning for robust free-space communication [J]. *Communications Physics*, 2020, 3(1): 177.
- [28] Ajam H, Najafi M, Jamali V, et al. Ergodic sum rate analysis of UAV-based relay networks with mixed RF-FSO channels [J]. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 2020, 1: 164-178.