

# 无人机激光通信载荷发展现状与关键技术

闫鲁生<sup>1</sup> 王峰<sup>1</sup> 吴畏<sup>1</sup> 刘向南<sup>2\*</sup> 湛明<sup>2</sup> 怀其武<sup>2</sup>

<sup>1</sup>中国人民解放军 91655 部队, 北京 100036

<sup>2</sup>北京遥测技术研究所, 北京 100094

**摘要** 对无人机(UAV)激光通信技术的应用需求进行了归纳总结, 阐明了发展无人机激光通信技术的重要性。对机载激光通信技术的国内外发展现状、性能指标特点进行了详细论述, 指出了无人机激光通信技术的发展趋势。在此基础上, 分析了无人机激光通信链路中的关键技术, 并提出了相应的解决途径及措施。论述了无人机激光通信载荷的应用方向以及所面临的挑战。可以预见, 无人机激光通信技术将在构建空天一体化通信网络中发挥重要作用。

**关键词** 光通信; 机载激光通信; 无人机; 载荷

**中图分类号** TN929.12 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP53.080005

## Current Status and Key Technologies of Unmanned Aerial Vehicle Laser Communication Payloads

Yan Lusheng<sup>1</sup> Wang Feng<sup>1</sup> Wu Wei<sup>1</sup> Liu Xiangnan<sup>2</sup> Chen Ming<sup>2</sup> Huai Qiwu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Unit No. 91655 of PLA, Beijing 100036, China

<sup>2</sup>Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100094, China

**Abstract** The application requirements of unmanned aerial vehicle (UAV) laser communication technology are summarized, and the importance of UAV laser communication is illustrated. The research status at home and abroad and the performance characteristics of airborne laser communication technologies are discussed in detail, and the development trend is pointed out. Based on the discussion, the key technologies of UAV laser communication payloads are analyzed, and the corresponding solutions are proposed. The application prospect and challenges about UAV laser communication payloads are discussed. Predictably, the UAV laser communication technology will play an important role in the air and space integrated communication networks.

**Key words** optical communications; airborne laser communication; unmanned aerial vehicle; payload

**OCIS codes** 060.4510; 010.1290; 010.3310

## 1 引言

现代战争的主战场已经发展为陆、海、空、天的立体空间, 作战模式也已经由平台中心战向网络中心战转变, 各平台或指挥中心之间传输的数据信息量日益增长, 对传输速率和信息安全性的要求也越来越高, 因此, 构建宽带、高速、安全、灵活的空天一体化联合作战通信网络是打赢未来战争的关键因素。激光通信链路具有通信容量大、传输速率高、隐蔽性好、抗干扰能力强、组网灵活以及终端体积小、重量轻、功耗低等优点, 是实现星间、星地、星-空、空-空、空-地、空-舰等链路大容量保密通信的重要途径之一, 也是构建高速、保密空天一体化通信网络的最佳方案之一<sup>[1-7]</sup>。

近年来, 美国、德国、日本以及俄罗斯等非常重视空间激光通信技术的研究, 先后制定了 30 余项自由空

**收稿日期:** 2016-04-06; **收到修改稿日期:** 2016-04-18; **网络出版日期:** 2016-07-23

**作者简介:** 闫鲁生(1959—), 男, 硕士, 研究员, 主要从事无线通信系统、信息网络和信息安全等方面的研究。

E-mail: 2899818761@qq.com

\* **通信联系人.** E-mail: liuxiangnan110@126.com

间激光通信研究计划,针对星载、机载、舰载以及地面等节点开展了不同链路的激光通信技术研究和载荷研制<sup>[1-7]</sup>。机载平台作为决定战争胜负的关键节点,其战场情报、监视和侦察任务执行能力的不断提升对信息传输提出了高保密、高速率和高实时性的要求。特别是最近几场高科技局部战争中,无人机在侦察、搜索、欺骗、干扰等方面的突出表现令全世界对其潜在的军事价值有了更深刻的认识,以无人机为节点的激光通信链路已成为研究热点。无人机激光通信技术将在现代战争中发挥越来越重要的作用。

本文对机载激光通信载荷的应用需求和研究现状进行了梳理和总结,分析了无人机激光通信载荷中的关键技术及面临的问题,以期自主研制无人机激光通信载荷提供参考。

## 2 应用需求

为适应未来无人机通信载荷的发展需要,满足空天一体化联合作战能力对不同功能、不同能力的无人机系统的信息快速交换、隐蔽安全通信的发展目标,各类无人机系统对海量数据传输、空间高速组网以及定向隐秘传输等需求十分迫切,主要表现在以下几个方面<sup>[1-7]</sup>。

### 1) 海量数据传输需求

目前的航空、航天等侦察平台正向高空间分辨率、高时间分辨率、高光谱分辨率和多传感器复合侦察等方向发展,迫切需要将海量原始数据以无损压缩方式从侦察平台直接传输或中继传输至指控节点,满足军事实时性要求。以典型的机载 SAR 为例,其数据传输速率在 3 Gb/s 以上。然而,目前微波传输的最高速率是吉比特每秒量级,受其限制这些图像和数据无法利用现有的微波系统进行实时传送,制约了无人机等新侦能力的提高,因此需要采用新型系统实时传送高速大容量信息。

激光载波比微波频率高 4~5 个量级,使得其带宽资源更丰富,能够支持高速传输,已经验证的单路传输速率达到 10 Gb/s,因此,采用激光通信可实现数据的高速率实时传输,满足空中骨干网、无人机高清侦察图像传输、多路高清视频传输等应用需求。

### 2) 定向隐秘传输需求

目前战场上使用的通信方式是无线电通信,其保密性差、易受干扰、波束宽度较宽,易被截获。而激光频率高,发散角小,使得激光载波信号几乎无法截获,具有极高的保密性。主要体现在以下两个方面:①激光的直线定向传播,其束散角仅为微弧度量级,不易被拦截;②用于通信的激光通常选择近红外光波段,为非可见光,不易被发现和截获。因此,激光通信符合定向隐秘传输要求,非常适合高速、安全、保密通信。

### 3) 空间高速组网需求

随着无人机成本的降低以及单机处理与应变能力的提高,以机群为基础的作战单元将有效提升任务执行能力。因此,未来战场的主要模式将是由无人机组成机群参与战斗或由有人/无人机组成混合机群协同执行各项任务。各类飞机之间信息交互的数据量越来越大,机群内外的飞机间组网运行的需求日益迫切。利用激光作为载体,是实现大容量高速组网运行的最佳手段。

### 4) 频谱资源需求

利用微波进行高速数据传输存在以下突出问题:①频带受限,传输速率难有较大突破,目前微波的传输带宽不能满足空间宽带组网的需求;②频谱拥挤和重叠,频谱协调难度大、频率干扰严重。若采用激光进行信息传输,则不受频谱资源限制,其频谱资源充足,并且无需申请即可使用。

### 5) 轻小型、低功耗需求

受机载平台,特别是无人机平台的限制,其对载荷重量和功耗的限制要求十分严格。激光通信载荷一般采用半导体激光器件,这类器件重量轻、功耗小、转换效率高;同时,其激光载波波长短,光学收发天线的几何尺寸小,大幅减小了载荷的体积和重量。因此,激光通信载荷符合无人机平台的轻小型和低功耗要求。

### 6) 技术发展推动需求

现代战争对无人机的需求和依赖性日益增长,随着态势感知能力和人工智能水平的不断发展,无人机将会在更多应用领域取代有人机。到目前为止,全球装备军队的无人机超过 200 种,总数达 2 万多架,约有 30 多个国家和地区从事军用无人机的研究和生产。以美国通用原子航空公司的统计数据为例,该公司在过去的 20 年里已经研发了 20 多种无人机,并且每一天内的每一秒约有 68 架 GA-ASI 无人机在全球飞行,如图

1 所示<sup>[8]</sup>。因此,开展无人机激光通信载荷关键技术研究,构建空天一体化联合作战通信网络,具有十分重要的军事意义。

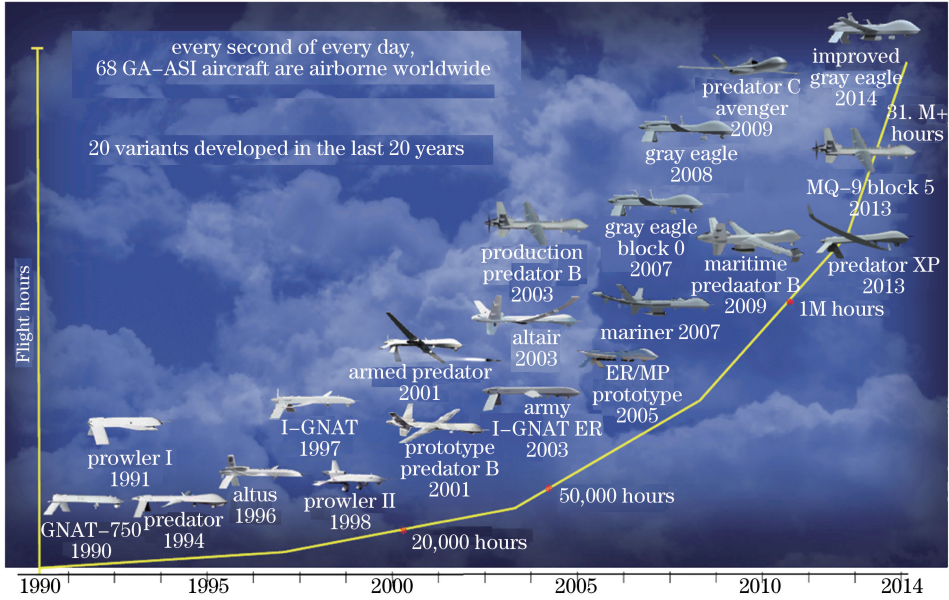


图 1 无人机统计数据示意图

Fig. 1 Statistic data diagram of UAVs

### 3 发展现状及趋势

#### 3.1 国外发展现状

美国、德国等发达国家相继开展了机载激光通信载荷及链路研究,典型的代表如表 1 所示<sup>[9-23]</sup>,并具体介绍国外机载激光通信载荷的发展历程。

表 1 国外机载激光通信典型事件

Table 1 Typical events of airborne laser communication abroad

Year	Project	Country	Link type	Aircraft type	Distance	Data rate
1996	HAVE LACE	America	Air-Ground	T39	20~30 km	1 Gb/s
1998	HAVE LACE	America	Air-Air	T39	50~500 km	1 Gb/s
2006	LOLA	France	GEO-Aircraft	Mystère 20	38000 km	50 Mb/s
2008	ARGOS	Germany	Air-Ground	Do-228	10~85 km	155 Mb/s
2009	FOCAL	America	Air-Ground	Twin Otter	25 km	2.5 Gb/s
2010	ARGOS	Germany	Air-Ground	Do-228	10~100 km	1.25 Gb/s
2010	FALCON	America	Air-Air	DC-3	132 km	2.5 Gb/s
2013	DODfast	Germany	Jetfighter-Ground	Panavia Tornado	50 km	1.25 Gb/s
2017	ALCOS	America	UAV-Satellite	MQ-9 Reaper	36000 km	1.8 Gb/s

1980 年,McDonnell Douglas 公司在美国空军实验室(AFRL)的机载飞行测试系统(AFTS)项目支持下,在白沙靶场利用 KC-135 飞机搭载激光通信载荷,首次成功演示了飞机对地激光通信实验。实验过程中,下行波长为 532 nm,上行波长为 1064 nm,调制体制为脉冲间隔调制,通信速率 20 kb/s,平均误码率小于  $10^{-6}$ ;测得的开环跟踪精度  $\pm 2^\circ$ ,闭环跟踪精度  $9\sim 12 \mu\text{rad}$ 。激光载荷放置在机舱内部,透过光学窗口与地面站进行通信。该激光通信实验的实施,成功验证了机载终端作为空间通信节点的可行性<sup>[9]</sup>。

1984 年,美国军方资助的 HAVE LACE 项目,实现了相距 160 km 的两架 KC-135A 飞机之间的激光通信实验,获得了通信速率为 19.2 kb/s,误码率优于  $10^{-6}$  的实验结果。飞机飞行高度为 20000~25000 ft (6096~7620 m)<sup>[10]</sup>。由于该实验采用手动执行捕获,导致两个移动飞行平台之间的初始捕获异常困难,但是一旦捕获成功,链路便保持稳定跟踪。

自1995年起,AFRL开始支持ThermoTrex公司研发新一代机载激光通信系统RILC。其目标是在12 km高空,实现飞机间50~500 km距离1 Gb/s的双向激光通信。RILC激光载荷采用球形转塔结构<sup>[11-12]</sup>,其信号光波长为810 nm,信标光波长为852 nm。1996年,ThermoTrex公司首次成功进行了飞机对地面站间的激光通信实验,飞机飞行高度11 km,飞机距地面站距离20~30 km,通信速率1 Gb/s<sup>[13]</sup>。

随后,AFRL也开展了机载激光通信链路研究,于1998年9月在美国佛罗里达州进行了飞机间的激光通信演示实验,两架T-39飞机上各安装了一套激光通信终端,通信距离为50~500 km,飞行高度约为40000 ft(12192 m),误码率为 $10^{-6}$ ,通信速率为1 Gb/s。激光载荷采用二维伺服转塔内,转塔安装在T-39航空飞机机翼的前方<sup>[14]</sup>。

1998年,美国海军实验室(NRL)开始研究调制反射镜(MRR)技术。由于MRR具有大视场且不使用激光器,具有体积小、重量轻的特点,适合于短距通信。配合MRR工作的是由NovSol公司研制的双模光学询问器(DMOI),但DMOI不具备搭载在无人机上的条件。因此NRL从2012年开始论证微型激光通信模块 $\mu$ DMOI。该模块安装在TASE300转台上,十分适合于无人机搭载<sup>[15]</sup>。机载 $\mu$ DMOI可以与地面DMOI进行25 km、155 Mb/s的通信,还可以与MRR进行1 km、2 Mb/s的通信。

此外,美国Laser Light Networks公司在海军SBIR计划的资助下开展了名为VISUAL的航母舰载机助降激光通信项目研究,要求舰载机在降落过程中能够与航母建立激光通信链路。该设备具有激光通信和激光雷达两种功能,可实时传输语音、飞行状态数据信息,并提供飞机与航母的实时距离和接近速度。舰载机通信设备中没有激光光源,其关键器件为全反射调制/解调器,它对航母设备发送的光束进行编码调制,利用角反射器对入射角不敏感的特点,将回馈信号传送给航母设备。该设备主要用于“大黄蜂”舰载机,技术成熟后将扩大到整个舰队范围。该助降系统的激光通信机载设备体积小、重量轻,采用的激光对人眼安全,并取消了光束跟踪系统,舰载机最小通信距离为3.7 km,测距精度为2 m,速度分辨率为 $\pm 1$  m/s,数据更新速率为10~20 Hz<sup>[16]</sup>。

2005年,美国喷气推进实验室(JPL)进行了第二代光通信演示(OCD)系统空对地激光通信演示验证实验,OCD-2系统主要技术指标为:高空无人机的飞行高度为18~23 km,跟踪精度为18  $\mu$ rad,通信速率为2.5 Gb/s,通信波长为1550 nm,发射功率为200 mW。该系统可应用到UAV与地面间激光通信<sup>[17]</sup>。

2006年,法国军方成功进行了LOLA演示实验项目,在阿蒂米斯地球同步轨道(GEO)卫星和神秘20飞机之间建立了50 Mb/s、38000 km的激光链路。飞机搭载了ELSA终端,飞行时速为300 km/h,飞行高度为6~10 km<sup>[18]</sup>。在有湍流的大气条件下,卫星-飞机激光链路成功传输了视频和音频信号。该实验验证了强度调制/直接探测(IM/DD)体制在较强大气湍流条件下工作的可行性<sup>[19]</sup>。

2008年,德国宇航中心(DLR)的ARGOS项目利用Do-228飞机与地面站之间进行了空间激光通信验证实验,通信距离为10~85 km,通信速率为155 Mb/s,飞机的飞行高度为3 km。2010年,进一步实现通信距离为10~100 km,通信速率为1.25 Gb/s的演示验证。发射光功率为1 W,天线口径为30 mm,通信波长为1550 nm。激光载荷安装位置如图2所示<sup>[20]</sup>。



图2 安装在Do-228飞机上的激光通信载荷

Fig. 2 Laser communication payload attached to the Do-228 aircraft

2009年9月,麻省理工学院林肯实验室进行了飞机与地面端机之间的激光通信链路演示(FOCAL)实验,激光终端搭载在双獭飞机上,飞行高度12 kft(3657 m),通信距离25 km,通信速率2.5 Gb/s。下一阶段

演示实验的目标是实现飞行高度 18 kft(5486 m)时,通信距离 37 km<sup>[21]</sup>。

此外,美国 Aoptix 公司也开展了机载激光通信技术研究,并首次将自适应光学(AO)技术引入激光通信载荷中,实现战场实时情报、监视和侦查信息传输,克服了目前无线电频率网络数据率的限制,提高了数据传输速率和实时性。作为空军研究实验室增强空对地激光通信系统(EAGLS)的一部分,2009年12月,完成了该项目第二阶段的飞行实验,验证了安装在P68式飞机上的R3.1激光终端和LCT-5地面固定激光终端之间进行瞄准、捕获和跟踪的能力,飞行高度约12000英尺(3657 m),斜程距离超过100 km,覆盖范围超过31000 km<sup>2</sup>,采用AO实时补偿大气扰动,完成了低功耗、安全和高速激光通信系统演示。在通信能力方面,具备2.5 Gb/s的多频道数据链路双向传输能力<sup>[22-23]</sup>。

美国空军实验室与ITT公司合作开展了快速空基激光通信节点(FALCON)项目,旨在发展快速空基激光通信链路技术。2010年,成功进行了DC-3飞机之间的双向激光通信实验,通信距离为94~132 km,通信速率为2.5 Gb/s,误码率为 $10^{-6}$ <sup>[24-26]</sup>。

2013年,DLR在DODfast项目的支持下,完成了“狂风”战斗机与地面移动站之间的激光通信测试实验,如图3所示<sup>[27]</sup>。其通信速率为1.25 Gb/s、通信距离大于50 km。该实验的稳定跟踪距离达到79 km。飞行时速0.7 Ma(238.21 m/s)<sup>[27-28]</sup>。



图3 “狂风”战斗机搭载终端

Fig. 3 Tornado with attached laser terminal

2014年美国通用原子公司展示了空基激光通信系统演示(ALCOS)项目中的无人机载激光通信载荷,该载荷计划搭载于MQ-9 Reaper“死神”无人机,采用机身安装方式将激光通信载荷集成到飞机的前部,载荷结构及安装如图4所示<sup>[29]</sup>,与GEO卫星进行高速激光通信。目前,该载荷已经完成研制,预计2016年完成地面测试,2017年进行搭载测试验证<sup>[29-30]</sup>。

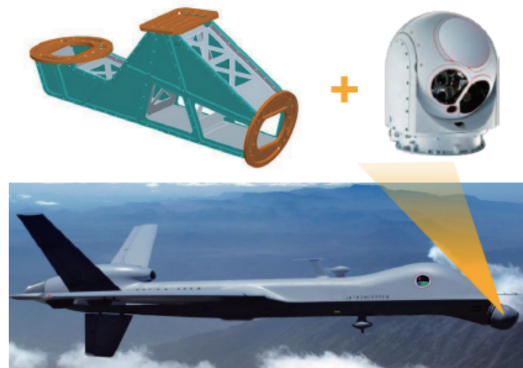


图4 无人机激光通信载荷及其安装

Fig. 4 UAV laser communication payload and its installation

### 3.2 国内发展现状

目前,国内有多家单位相继开展了机载激光通信的关键技术研究、样机研制以及动态实验。其中,长春理工大学于2013年完成了两运12飞机之间144 km、2.5 Gb/s的通信测试实验<sup>[31]</sup>。然而,与国际上相比,我国机载激光通信技术的实用化发展相对滞后,在载荷轻小型化设计方面经验不足,尤其在无人机激光通信

载荷应用方面尚属空白。因此,国内无人机激光通信的研究和应用具有较大的发展空间。

近年来,北京遥测技术研究所卫星激光通信系统总体设计、关键技术研究、系统集成演示验证与测试等方面开展了深入研究,已突破并掌握了高灵敏度零差/外差相干解调、精密激光测距与通信一体化等多项关键技术。依托卫星激光通信载荷研制经验,正在开展无人机激光通信技术研究与载荷设计方面的工作。

### 3.3 发展趋势

结合国内外机载激光通信载荷发展现状,可以总结出如下几点主要发展趋势:

1)激光通信载荷向高速率、轻小型方向发展,更适用于各类无人机平台搭载

国外激光通信载荷的机载平台依次经历了客机、战斗机和无人机的变化,通信速率经历了 50 Mb/s, 155 Mb/s 到 2.5 Gb/s 的提升;通信距离经历了几十千米、几百千米向几千千米的延伸,激光通信载荷重量由几十千克向几千克转变,因此,机载激光通信载荷将更适用于各类无人机平台进行搭载,无人机激光通信技术成为机载激光通信技术的主要发展方向之一。

2)激光通信链路成为构建空天一体化联合作战通信网络的重要组成部分,并向临近空间拓展和延伸

随着无人机技术的发展,目前已形成了高、中、低空,远、中、近程,大、中、小型,监视、侦察、监测等多层面、多梯次搭配的无人机体系,势必为构建空天一体化联合作战通信网络中的空-星、空-空、空-舰、空-地等激光链路提供重要节点和枢纽。此外,临近空间平台特性、环境特性与机载平台特性、环境特性具有较大的相似性,机载激光通信载荷中的多项关键技术适用于临近空间。因此,随着无人机技术的逐渐发展,无人机激光通信载荷将向临近空间拓展和延伸,并发挥更大的军事作用。

## 4 关键技术及解决途径

### 4.1 通信链路快速建立与稳定维持技术

激光链路快速建立与稳定维持是实现无人机激光通信的前提条件,尤其对于异构平台,如何快速建立激光通信链路并稳定维持是决定其通信成败的关键因素。然而,机载平台的飞行速度快、航迹不确定等特性对激光链路的快速建立造成了极大困难;此外,机载平台自身振动及姿态扰动、空间背景杂光和大气湍流等因素也会严重影响链路的跟踪精度。

在上述影响因素中,机载平台的振动姿态扰动一般在 0.1 Hz 时约为 100 mrad,在 1 Hz 时约为 1 mrad,在 10 Hz 时约为 10  $\mu$ rad,在 100 Hz 时约为 2  $\mu$ rad<sup>[1]</sup>。大气湍流将引起激光信号的闪烁和漂移,造成跟踪的不连续和不稳定。背景杂光的存在会降低接收信噪比,造成目标误判或跟踪失败。

主要解决途径:在充分研究大气、背景杂光及机载平台特性的基础上,采用复合姿态检测与捷联导航技术,提高平台姿态精度和指向精度,使其视轴稳定在 20~30  $\mu$ rad。分析并优化转台视轴指向精度、飞机定位误差及姿态误差等关键参数,将其开环捕获不确定区域缩减到 5~8 mrad。为了缩短捕获时间,可以采用大视场、大束散角凝视或扫描步数较少的方式实现快速捕获(捕获时间小于 10 s)、高概率捕获(捕获概率优于 98%)。为实现高精度动态稳定跟踪,采用粗精复合轴控制技术,通过宽带跟踪伺服单元(快速倾斜镜)对此残余误差进一步抑制,最终获得 2~3  $\mu$ rad (3 $\sigma$ )的动态跟踪精度<sup>[32]</sup>。此外,背景杂光的影响则可以通过超窄带滤光片减弱或消除;而对于大气湍流的影响,需要开展更加深入的系统性研究,最终加以校正和补偿。

### 4.2 轻小型化设计技术

无人机的承载能力和搭载空间十分有限,如何在压缩载荷体积和降低载荷重量的条件下,保证激光通信载荷的性能是无人机激光通信载荷能否应用的关键因素。目前,国外已报道的无人机激光通信载荷重量可达到 10 kg 以下,而国内的机载激光通信载荷只能达到 70 kg 左右,尚不能满足各类无人机激光通信载荷应用需求。因此,需探索激光通信载荷轻小型化设计技术,并加快轻小型化攻关进度。采用轻小型化设计不但为无人机节省下更多的搭载空间,而且由于激光通信载荷重量的减轻,大幅提高了无人机姿态调整的轻巧性,势必促进机载激光通信载荷的工程化应用。

主要解决途径:在总体方案设计上,需从整机结构设计、光路设计、结构材料选取以及器部件选型等方面考虑轻小型化设计因素,尽可能选用轻量化材料、小型化器部件。其次,可以将光学、通信和跟瞄等子系统进行一体化集成设计,有助于减小载荷的重量和体积,减少不必要的结构材料重量。此外,为了满足使用条件,

可以选择性地降低某些系统指标甚至省去某些系统功能。

### 4.3 大气信道补偿技术

对于机载激光通信载荷,大气信道对其影响主要表现为:大气的吸收和散射对激光信号功率产生衰减,从而导致激光通信链路传输距离的减少;大气抖动引起的激光散斑效应和光束偏折效应降低跟瞄系统的跟踪精度和视轴对准精度;大气湍流引起的激光功率起伏导致通信误码率上升。此外,随着机载平台飞行速度的提高,气动光学效应将引起远场接收端光斑的形状变化,导致激光通信跟踪精度降低和通信误码率的升高。

主要解决途径:为了克服大气信道对激光链路性能的影响,需加强机载大气信道特性的研究,掌握机载大气信道的动态特性,并开展机载平台大气校正方法研究,以校正和补偿大气效应的影响。此外,在方案设计上可以适当增大光学天线接收口径,利用孔径平滑效应抑制大气湍流引起的激光功率起伏;选用低密度奇偶校验码(LDPC)、循环冗余校验(CRC)和里德-所罗门码(RS)等纠错编码技术来降低激光通信的误码率;采用光纤章动耦合技术降低大气对跟踪精度的影响<sup>[33-34]</sup>。

### 4.4 空间环境适应性设计

无人机激光通信载荷所面对的环境因素包括来自机载平台的不利因素、外部严酷的空间环境因素和战场形态复杂多变导致的不利因素。其中,机载平台的不利因素,包括宽频振动,大过载、大机动和宽幅波动的供电环境;外部严酷的空间环境包括:从极冷到极热,从低气压到高压,风、雨、水汽、沙尘、烟雾、阳光暴晒和大气附面层等,而且这些因素往往是同时作用、综合影响,无疑给机载激光通信系统设计增加了许多难度;战场形态复杂多变方面的不利因素包括:距离远、运动快、机动大,光波传输通道的大气波动、散射等随时存在。无人机激光通信载荷必须在这些不利因素影响下实现良好的性能。

主要解决途径:为了在动态环境中保证光学系统精度和运动精度,需要设计精巧且具有良好刚度的机械结构;为了保证在平台强烈振动和机动的状况下光轴的稳定性,机载激光通信系统须考虑陀螺稳定系统和良好的减震系统;采用密闭结构设计来实现抗低气压特性;在整机结构上,采用球形转塔抑制高风速引起的风扰力矩;在安装方式上,通过选择和评估合理的安装位置、优化设计整流罩来抑制大气附面层效应的影响。

## 5 应用方向与面临挑战

无人机激光通信载荷的主要应用方向包括:

#### 1) 无人机情报侦察和战场监视

高空长航时侦察无人机具有续航时间长、飞行高度高、不易被敌方发现与攻击等特点。机上可搭载多种传感器,能够对可能发生武装冲突、局部战争的海域进行长时间的实时监视、侦察。一旦发生冲突或战争,可以实施多批量、大纵深、全天候和立体化的全向侦察,搜集敌方的作战情报,利用激光通信链路将侦察到的海量原始数据实时向己方中继通信卫星、中继航空平台和舰载或岸基指挥控制中心传输。

#### 2) 无人机激光中继通信、隐蔽通信、保密通信

激光通信载荷可应用于无人机中继通信、隐蔽通信和保密通信等领域。例如,利用舰载无人机激光通信链路转发情报、通信、导弹控制指令等信号,满足因现代海战作战区域广而产生的对信息传递、指挥控制、导弹攻击的更高要求,从而提高战场信息化水平。

#### 3) 空中骨干网节点之间的高速数据传输

空中骨干网节点,如预警机之间,或预警机与其他指挥中心节点之间的大容量信息交互,需采用高速数据传输技术,激光通信易实现 10 Gb/s 及以上的传输速率,适合骨干网型节点之间的高速数据传输。

#### 4) 海上联合执法及海上执法指挥通信系统

海上联合执法或海上执法指挥通信系统可以利用无人机激光通信载荷,构建无人机与军舰、船与舰之间的激光通信链路,从而加强海上执法能力。

此外,无人机激光通信载荷也可用于军用/民用应急信息传输、电磁干扰下的信息安全传输以及实时交通监控等领域。

无人机激光通信载荷应用所面临的挑战:

目前,我国在无人机激光通信载荷研制方面缺少经验积累,其工程应用尚不成熟。尤其在无人机与军舰通信链路方面,需重点解决海面湿汽、海浪杂光和海浪摇摆等对无人机-军舰激光通信链路性能的影响问题。

## 6 结束语

随着机载激光通信技术的不断发展和日益成熟,激光通信载荷将广泛应用于各类无人机作战平台,在战场情报、监视和侦察方面发挥至关重要的作用。我军应在现有的技术基础上,凭借所积累的研制经验,借鉴国外成熟的机载激光通信技术,发展我军的无人机激光通信技术,以抢占军事指挥通信的制高点,为打赢未来信息战争奠定坚实基础。

## 参 考 文 献

- Jiang Huilin, Zhang Zhigang, Tong Shoufeng, *et al.* Analysis for the environmental adaptation and key technologies of airborne laser communication system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(s1): 299-302.  
姜会林, 张志刚, 佟首峰, 等. 机载激光通信环境适应性及关键技术分析[J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(s1): 299-302.
- Liu Liren. Laser communications in space I optical link and terminal technology[J]. *Chinese J Lasers*, 2007, 34(1): 1-18.  
刘立人. 卫星激光通信 I 链路和终端技术[J]. *中国激光*, 2007, 34(1): 1-18.
- Liu Hongzhan, Sun Jianfeng, Liu Liren. Analyzing the trends of space laser communication[J]. *Optical Communication Technology*, 2010, 34(8): 39-42.  
刘宏展, 孙建锋, 刘立人. 空间激光通信技术发展趋势分析[J]. *光通信技术*, 2010, 34(8): 39-42.
- Zhao Xin, Song Yansong, Tong Shoufeng, *et al.* Dynamic demonstration experiment of acquisition, pointing and tracking system in space laser communications[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(3): 0305005.  
赵 馨, 宋延嵩, 佟首峰, 等. 空间激光通信捕获、对准、跟踪系统动态演示实验[J]. *中国激光*, 2014, 41(3): 0305005.
- Jiang Huilin, Jiang Lun, Song Yansong, *et al.* Research of optical and APT technology in one-point to multi-point simultaneous space laser communication system[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(4): 0405008.  
姜会林, 江 伦, 宋延嵩, 等. 一点对多点同时空间激光通信光学跟瞄技术研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(4): 0405008.
- Li Xiaofeng. The principle and technology of the satellite-to-ground laser communication links [M]. Beijing: National Defend Industry Press, 2007.  
李晓峰. 星地激光通信链路原理与技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- Wang Xiang, Zhao Shanghong, Zheng Guangwei, *et al.* Performance analysis of high altitude platform optical communication links with spatial diversity[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 34(1): 0106001.  
王 翔, 赵尚弘, 郑光威, 等. 基于空间分集的高空平台光链路性能研究[J]. *中国激光*, 2014, 34(1): 0106001.
- Robie D. Airborne laser communications for the warfighter[C]. Hilton Los Angeles Airport, Los Angeles, California, 2014.
- John A M, David B. Airborne laser communications: Past, present and future[C]. *SPIE*, 2005, 5892: 58920A.
- Feldmann R J, Gill R A. Development of laser crosslink for airborne operations[C]. *IEEE Military Communications Conference*, 1998, 2: 633-637.
- Borrello M. A multi stage pointing acquisition and tracking (PAT) control system approach for air to air laser communications[C]. *Proceedings of the 2005 American Control Conference*, 2005, 6: 3975-3980.
- Borrello M. Fine beacon pointing control system for the RILC (Recce/Intel Laser Crosslink) system[C]. *SPIE*, 2004, 5552: 159-170.
- Chan V J, and Arnold R L. Results of one GBPS aircraft-to-ground lasercom validation demonstration[C]. *SPIE*, 1997, 2990: 52-59.
- Arnold R L, Woodbridge E L, Smith G, *et al.* 500 kilometer 1 GBPS airborne laser link[C]. *SPIE*, 1998, 3266: 178-197.
- Vilcheck M J, Moore C I, Thomas S L, *et al.* Miniature lasercomm module for integration into a small unmanned aerial platform[C]. *SPIE*, 2012, 8380: 838003.
- Wonica D. Laser communication & tracking system for aircraft[Z/OL]. [2016-01-04] <http://www.laserlightnetworks>.



- com/Documents/MRR%20and%20DFT.pdf.
- 17 Biswas A, Wright M, Ortiz G G, *et al.* Airborne optical communications demonstrator design and preflight test results [C]. SPIE, 2005, 5712: 205-216.
- 18 Cazaubiel V, Planche G, Chorvalli V, *et al.* LOLA: A 40000 km optical link between an aircraft and a geostationary satellite[C]. ESA Special Publication, Noordwijk, The Netherlands, 2006.
- 19 Fu Qiang, Jiang Huilin, Wang Xiaoman, *et al.* Research status and development trend of space laser communication[J]. Chinese Optics, 2012, 5(2): 116-125.  
付 强, 姜会林, 王晓曼, 等. 空间激光通信研究现状及发展趋势[J]. 中国光学, 2012, 5(2): 116-125.
- 20 Giggenbach D, Horwath J, Knapek M. Optical data downlinks from earth observation platforms[J]. SPIE, 2009, 7199: 719903.
- 21 Walther F G, Michael S, Parenti R R, *et al.* Air-to-ground lasercom system demonstration design overview and results summary[C]. SPIE, 2010, 7814: 78140Y.
- 22 Campbell C. A Optix demonstrates free-space optics laser communications for airborne HD video [J]. Military & Aerospace Electronics, 2010, 21(2): 35.
- 23 Ancombe N. Adapting to change[J]. Nature Photonics, 2011, 5: 18-19.
- 24 Fletcher T M, Cunningham J, Baber D, *et al.* Observations of atmospheric effects for FALCON laser communication system flight test[C]. SPIE, 2011, 8038: 80380F.
- 25 Casey C. Free space optical communication in the military environment[D]. Monterey: Naval Postgraduate School, 2014.
- 26 Gang I M E, Fletcher T M, Cunningham J A, *et al.* Fabrication and testing of laser communication terminals for aircraft [J]. SPIE, 2006, 6243: 624304.
- 27 Shortt K, Giggenbach D, Mata-Calvo R, *et al.* Channel characterization for air-to-ground free-space optical communication links[C]. SPIE, 2014, 8971: 897108.
- 28 Moll F, Mitzkus W, Horwath J, *et al.* Demonstration of high-rate laser communications from fast airborne platform: flight campaign and results[C]. SPIE, 2014, 9248: 92480R.
- 29 Begg L. Airborne laser communication system (ALCOS) demonstration[C]. Hilton Los Angeles Airport, Los Angeles, California, 2014.
- 30 Lutz R. Optical free space communications status of the first commercial operational system[C]. 31st Space Symposium on Technical Track, Colorado, USA, 2015.
- 31 Meng Lixin, Zhao Dingxuan, Zhang Lizhong, *et al.* Boundary layer effect and compensation in airborne laser communication[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(12): 3231-3238.  
孟立新, 赵丁选, 张立中, 等. 机载激光通信中气动光学的影响及补偿[J]. 光学 精密工程, 2014, 22(12): 3231-3238.
- 32 Zhao Xin, Liu Yunqing, Tong Shoufeng. Line-of-sight initial alignment model and test in dynamic space laser communication[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(5): 0505009.  
赵 馨, 刘云清, 佟首峰. 动态空间激光通信系统视轴初始指向建模及验证[J]. 中国激光, 2014, 41(5): 0505009.
- 33 Zhao Jing, Zhao Shanghong, Li Yongjun, *et al.* Application of spatial diversity technology for airborne laser communication[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(8): 080603.  
赵 静, 赵尚弘, 李勇军, 等. 空间分集技术在航空激光通信中的应用研究[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(8): 080603.
- 34 Gao Duorui, Fu Qiang, Zhao Zhao. Optimal selection of receiving optical power in laser communication system in atmospheric turbulence[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(5): 050601.  
高铎瑞, 付 强, 赵 昭. 湍流大气中激光通信系统接收光功率的优化研究[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(5): 050601.