

## 空基激光通信研究进展和趋势以及关键技术

郑运强<sup>1,2</sup>, 刘欢<sup>1,2\*</sup>, 孟佳成<sup>1,2</sup>, 王宇飞<sup>1,2</sup>, 聂文超<sup>1,2</sup>, 武军霞<sup>1,2</sup>,  
蔚婷婷<sup>1,2</sup>, 魏森涛<sup>1,2</sup>, 袁站朝<sup>1,2</sup>, 汪伟<sup>1,2</sup>, 谢小平<sup>1,2</sup>

- (1. 中国科学院西安光学精密机械研究所 光子网络技术研究室, 陕西 西安 710119;
2. 中国科学院西安光学精密机械研究所 瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 陕西 西安 710119)

**摘要:** 激光通信以其带宽大、保密性好、无频谱限制等特点成为构建空天地海全域网络高速通信有效技术途径。相较天基而言, 搭载在气球、飞艇、无人机、飞机等平台的空基激光通信系统以其灵活性好、成本低、可维修等特点, 成为高保密军用战术网络、救灾应急网络、商用低成本网络的首选。详细介绍了美国、德国、法国、中国等空基激光通信技术最新研究进展和主要项目的参数指标, 总结了一对多、轻量化、高带宽等发展趋势和面临的大气信道复杂、背景噪声严重等技术挑战, 提出了高动态捕跟、高密度集成、高灵敏度接收等关键技术措施, 为空基激光通信技术研究和工程项目研制提供参考。

**关键词:** 空基激光通信; 机载激光通信; 自由空间光通信; 大气激光通信

**中图分类号:** TN929.12 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20210475

## Development status, trend and key technologies of air-based laser communication

Zheng Yunqiang<sup>1,2</sup>, Liu Huan<sup>1,2\*</sup>, Meng Jiacheng<sup>1,2</sup>, Wang Yufei<sup>1,2</sup>, Nie Wenchao<sup>1,2</sup>, Wu Junxia<sup>1,2</sup>,  
Yu Tingting<sup>1,2</sup>, Wei Sentao<sup>1,2</sup>, Yuan Zhanchao<sup>1,2</sup>, Wang Wei<sup>1,2</sup>, Xie Xiaoping<sup>1,2</sup>

- (1. Laboratory of Photonics and Network, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China;
2. State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

**Abstract:** Laser communication, with its wide bandwidth, good confidentiality and no electromagnetic spectrum constraints, has become an effective means to construct high-speed communication in the air, space, earth and sea integrated communication networks. Compared with space-based, the air-based laser communication system, which is carried on balloon, airship, unmanned aerial vehicle aircraft and other platforms, has become the first choice for high security military network, disaster relief emergency network and commercial low-cost network due to its good flexibility, low cost and good maintainability. The latest research progress and main parameters of air-based laser communication system in USA, Germany, France and China are introduced in detail. The trend of one-to-many, lighter weight, wider bandwidth and the challenges of complex atmospheric channel and serious background noise are summarized, and key technical method, such as high dynamic capturing and tracking, high density integration and high sensitivity reception are proposed, which can provide references for air-based laser communication research.

**Key words:** air-based laser communication; airborne laser communication; free space optical communication; atmospheric laser communication

收稿日期: 2021-07-13; 修订日期: 2021-08-20

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFC0803909)

作者简介: 郑运强, 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事机载激光通信、卫星激光通信、卫星总体技术等方面的研究。

通讯作者: 刘欢, 女, 工程师, 硕士, 主要从事机载激光通信系统、卫星激光通信等方面的研究。

## 0 引言

空间激光通信无频谱资源限制,具有带宽大、传输速率高、保密性好、抗干扰能力强、体积小、质量轻、功耗低等优点。特别适合复杂电磁环境、无线电静默等条件下抗干扰、高保密高速数据传输。激光通信是实现星间、星地、星空、空空、空地、空海等链路大容量保密通信的重要途径之一<sup>[1]</sup>。

空间激光通信终端一般由光通信子系统、跟瞄子系统、光学天线子系统组成。光通信子系统完成对激光信号的调制和解调、光信号的高功率发射和接收、业务数据收发和纠错等。跟瞄子系统完成扫描、跟踪和捕获,确保通信的双方能建立通信链路。天线子系统完成光束的缩放和光信号的隔离<sup>[2]</sup>。

空基激光通信系统是搭载在气球、飞艇、无人机、飞机等平台的激光通信终端,其具有灵活性好、成本低、一定的可维修性等优点,更适合军用隐蔽通信、救急救灾应急通信、偏远地区低成本通信等场景。近十几年来,空基激光通信的速率和链路稳定性逐步提高,已经由关键技术攻关和演示验证逐步发展

为高可靠性军事应用和低成本商业应用。

文中详细介绍了国内外空基激光通信领域的技术指标和最新进展。在此基础上总结了发展趋势和技术挑战,并对解决途径和措施进行了深入分析。

## 1 国内外研究现状

### 1.1 国外研究现状

自 1980 年美国在世界上首次实现了通信速率为 19.2 kbps 的飞机对地激光通信试验后,空基激光通信技术取得了长足的进步。美国空军研究实验室 (Air Force Research Laboratory, AFRL)、德国宇航中心 (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, DLR)、美国国防部高级研究项目局 (Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)、喷气推进实验室 (Jet Propulsion Laboratory, JPL)、美国航空航天局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA)、法国国防采购总局 (Générale de l'Armement, DGA) 相继开展了不同链路、不同距离和不同通信制式 (OOK、QPSK、BPSK) 以及节点组网等飞行试验<sup>[3-15]</sup>。各国空基激光通信试验情况如表 1 所示。

表 1 美国、欧洲等典型空基激光通信研究项目

Tab.1 Major air-based laser communication programs in united space and europe

Type	Project	Organization	Year	Platform	Communication rate	Distance/km	Others
Air-ground	HAVE LACE	AFRL/SN	1980	KC-135 Airplane	19.2 bps (uplink)/ 1 Gbps (downlink)	100	532 nm/1 064 nm
		AFRL/SN	1983	KC-135 Airplane	19.2 bps (uplink)/ 1 Gbps (downlink)	160	
		AFRL/SN	1996	T-39 Fighter	1 Gbps	30	
	OCD-2	NASA/JPL	2005	UAV	2.5 Gbps	50	1 550 nm, 67 kg, 650 W
	STROPEX	DLR/Vialight	2005	H-A-P (stratospheric)	1.25 Gbps	64.15	OOK, 1 550 nm, 17.54 kg, 75 W
	FOCAL	MIT/LL	2009	Twin Otter Aircraft	2.66 Gbps	25	OOK
	ARGOS	DLR/Vialight	2010	Do-228 Aircraft	1.25 Gbps	100	OOK, 1 550 nm/1 590 nm
	FOENEX	DARPA	2012	Aircraft	8.5 Gbps	130	52.2 kg
	DoD fast	DLR/Vialight	2013	Tornado Fighter	1.25 Gbps	50	OOK, 5 kg
	Facebook	Facebook&Mynaric	2017	Cessna310 Aircraft	10 Gbps	9	
Air-air	HAVE LACE	AFRL/SN	1998	T-39 Fighter	1 Gbps	500	
	ORCA	DARPA	2009	Aircraft	5 Gbps	200	OOK, 1 550 nm
	FALCON	AFRL	2010	DC-3 Aircraft	2.5 Gbps	132	OOK, 1 545 nm /1 555 nm
	FOENEX	DARPA	2012	Aircraft	6 Gbps	230	52.2 kg
	Loon	Google	2015	H-A-P (stratospheric)	130 Mbps	100	OOK, 1 550.12 nm/ 1 556.50 nm, 6.3 kg, 20 W
Air-GEO	Aquila	Facebook	2016	Aquila UAV	100 Gbps	250	QPSK, 1 562 nm/ 1 542 nm, 5 kg, 150 W
	LOLA	DGA	2006	Falcon20 Fighter	2 Mbps (uplink)/ 50 Mbps (downlink)	36 000	848 nm
	ALCoS	NASA/GA-ASI	2021	MQ-9 RPA UAV	1.8 Gbps	36 000	1 064 nm, 1 550 nm
	ScyLigh	ESA	2022	Airbus Aircraft	1.8 Gbps	36 000	

2005 年,美国喷气推进实验室 (JPL) 实施的第二代光学通信演示系统项目 (Second Generation Optical Communications Demonstrator, OCD-2) 在 50 km 距离上实现了 2.5 Gbps 空-地通信,为工程化应用奠定坚实基础。此后,激光通信在美国军事和商业领域中得到显著快速应用,从单一的点对点激光通信,发展为两个方向:(1) 高可靠性军用战术网络系统,(2) 低成本高带宽商业网络系统。前者以光纤射频混合通信组件项目 (Optical RF Communications Adjunct, ORCA) 和自由空间光学实验网络项目 (Free Space Optical Experimental Network Experiment, FOENEX) 为代表,表现出网络节点动态自组织、激光/射频混合组网等特点;后者以谷歌气球网络 (Google Loon) 和脸谱无人机网络 (Facebook Aquila) 为代表,表现出轻量化、低成本、覆盖偏远地区等特点。

2005 年,德国宇航中心 (DLR) 实施的平流层光学下行链路试验项目 (STRatospheric Optical Downlink EXperiment, STROPEX) 基于飞艇在平流层 64.15 km 距离上,实现了 1.25 Gbps 高速对地通信。此后,DLR 实施了多次基于战斗机平台的机载激光通信试验,链路的稳定性和通信距离有了一定的提升。

2006 年,法国国防部采购总局 (DGA) 实施的机载大气激光链路项目 (Airborne Atmospheric Laser Link, LOLA) 基于战斗机实现了 2 Mbps (上行)/50 Mbps (下行) 对 GEO 卫星通信。2021 年,空客公司牵头欧洲各研究机构开展了基于空客客机的机载激光通信项目,以加速激光通信技术创新,特别是民用市场的发展。

### 1.1.1 美国

#### (1) 光学射频融合通信项目 (ORCA)

光学射频融合通信项目 (Optical RF Communications Adjunct, ORCA) 是由 DARPA 在 2007 年启动的项目,意在建立一个由射频和激光构成的混合军用战术网络系统以实现战场各类型信息的高速可靠传输。如图 1 所示,系统包括静止/移动地基节点和空基节点,空基节点高度 7.62 km,最远空空链路和空地链路距离是 200 km 和 50 km<sup>[16-18]</sup>(图中,1 ft=0.3048 m)。

ORCA 终端采用带宽达 kHz 的波前校正自适应光学 (AO)、自动功率控制、前向误码纠正 (FEC)、重传、回放和重路由等方法提高了链路稳定性。主要指标为:波长 1550 nm,通信制式 IM/DD,射频通信速率 274 Mbps,激光通信速率 5 Gbps<sup>[16-18]</sup>。激光终端采用 AO 补偿效果如图 2 所示。

#### (2) 自由空间光学实验网络项目 (FOENEX)

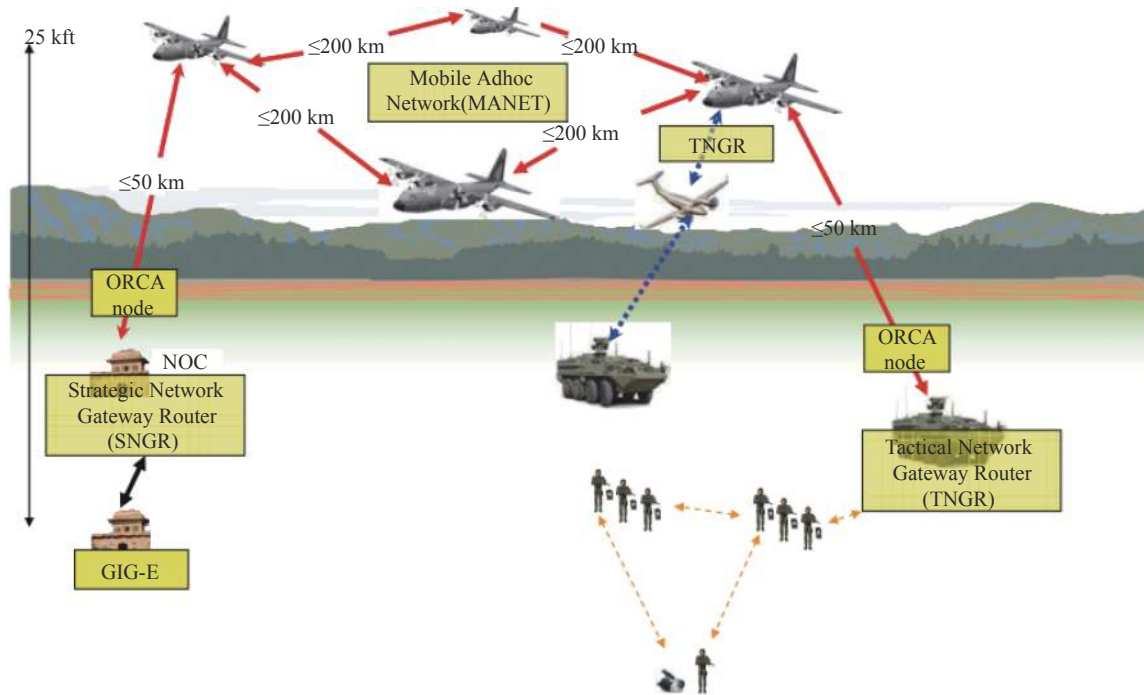


图 1 ORCA 系统总体框架图

Fig.1 Overall framework of the ORCA system

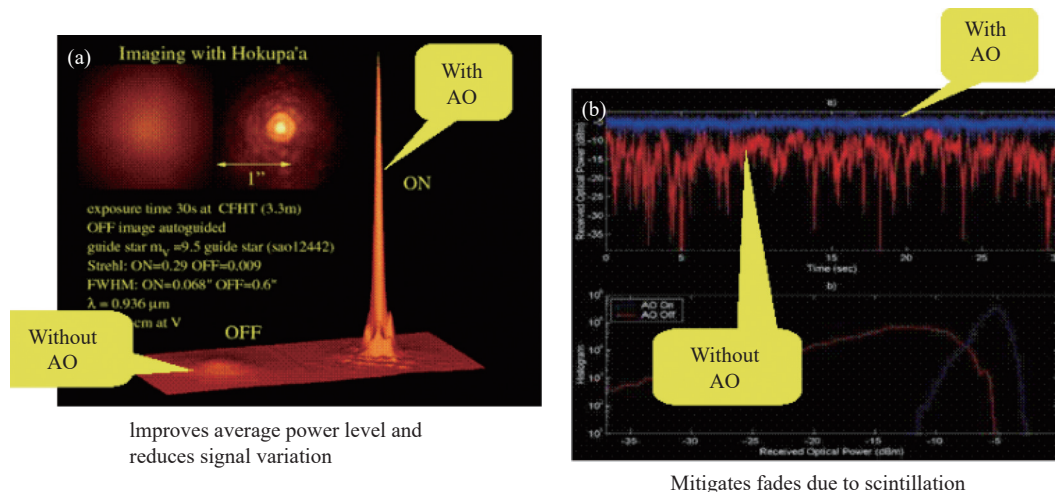


图 2 采用 AO 补偿对比效果

Fig.2 Compensation effect with and without AO

自由空间光学实验网络项目 (Free Space Optical Experimental Network Experiment, FOENEX) 由 DARPA 在 2010 年启动。如图 3 所示系统由空基节点、地基节点和水面节点等多个节点构成动态自组织网络, 具备激光和射频链路自主切换、网络节点动态切换和自组织等功能。机载终端光学天线口径为 100 mm, 激光通信终端总重 52.2 kg<sup>[19]</sup>。

在 2012 年开展了两阶段试验, 第一阶段测试了

点对点通信性能, 在 130 km 距离上实现了信息速率为 8.5 Gbps 对地高速通信、在 230 km 距离上实现了信息速率 6 Gbps 飞机间高速通信。基于波分复用 (WDM) 技术可进一步提升至 100 Gbps。第二阶段主要测试节点间混合链路组网性能。试验中设置了 3 个空基激光链路节点和 1 个地基激光/射频混合链路节点, 每节点都安装了多套通信终端 (图 4、图 5), 各节点间进行了高清视频传输。在飞行高度 4.6 km

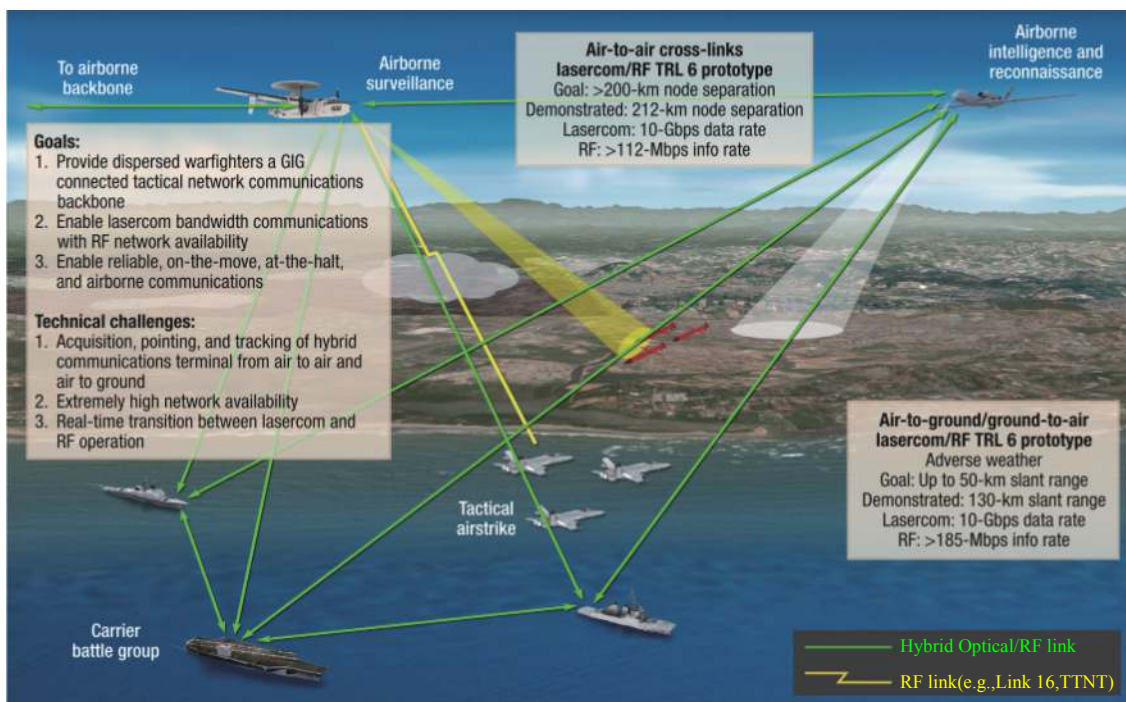


图 3 FOENEX 系统总体构架图

Fig.3 Overview chart of FOENEX



条件下,实现了相距 116 km 的空中 3 个节点和相距 68 km 的 1 个地基节点间混合链路通信<sup>[20-21]</sup>(图 6)。



图 4 FOENEX 链路地基节点(安装了 2 套激光终端,1 套射频终端)

Fig.4 FOENEX link ground station node(shown are the two lasercom and one RF terminals)



图 5 FOENEX 链路空基节点,有 2 套激光终端,分别在机翼和机鼻处各安装了 1 套)

Fig.5 FOENEX link aircraft node. There are two lasercom terminals, one overwing and one beneath the aircraft nose

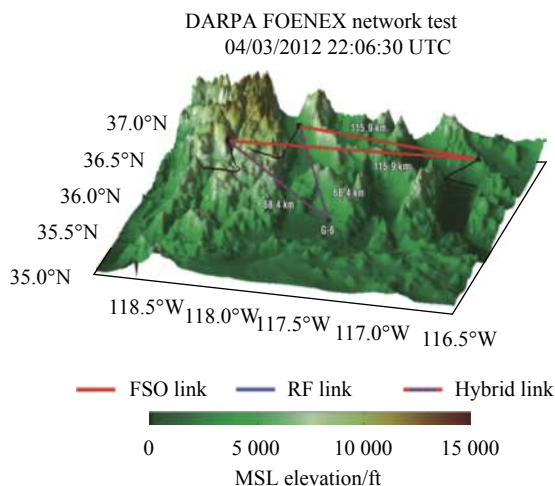


图 6 四节点激光/微波混合网络链路配置和范围

Fig.6 Data showing link configuration and ranges of the four-node hybrid FSO/RF network

### (3) Google (Loon) 项目

地面网络建设成本低,最适合的应用场景是密集城市区和具有较高密度的乡村。相对而言,卫星网络成本高、延时大,适合人口稀少地区和特定行业应用。而无人机和浮空气球等空基网络恰恰是两者的互补,适合中等人口密度和突发情况通信应用。

美国谷歌公司 (Google) 在空基激光通信商用化方面取得了显著的进展。2013 年,谷歌开展了 Loon 项目以期以较低的成本实现偏远地区的高带宽网络接入(图 7)。在满足性能要求下,易制造、可重复利用、批量采购、流程控制等低成本设计原则成为首要考虑因素。高空超压气球被释放到 20 km 平流层组成了空中无线网,向地面网络无法覆盖的地区提供高速互联网接入服务。空激光终端主要参数为:信号光波长 1550.12 nm 和 1556.50 nm、通信制式 IM/DD、发射光功率 0.1 W、发散角 280  $\mu$ rad。该激光终端基于轻量化设计,其质量仅为 6.3 kg、功耗 20 W。

2015 年,谷歌在距离 100 km 的两气球间稳定实现了 130 Mbps 速率的激光通信试验,稳定工作时长 3 天之久,并具备空中系留超过 100 天的能力<sup>[22-23]</sup>。2017 年,飓风玛丽亚过后,谷歌向波多黎各部署了 Loon 气球实现了信息连接。2019 年,为地震后的秘鲁同样部署了该气球。同时,该项目部分成果已应用在 Google [X] 子项目 Taara 中,并于 2020 年在撒哈拉以南非洲在 200 km 距离上实现了 20 Gbps 的高速通信<sup>[24]</sup>。

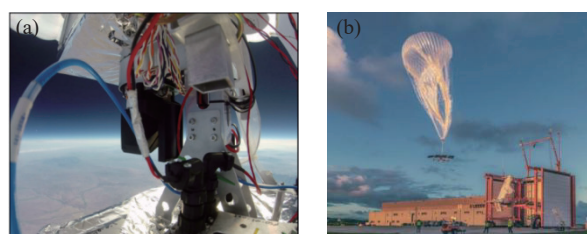


图 7 浮空平台和激光通信终端 (Loon)

Fig.7 Floating platform and laser communication terminal (Loon)

### (4) Facebook 项目

与谷歌 Loon 项目类似,Facebook 公司也开展了低成本轻量化的空基激光通信终端商业应用。2016 年,Facebook 公司的 Aquila 太阳能无人机搭载了空基激光通信终端,实施了无人机之间、无人机对地面的高速通信网络项目试验。无人机通信终端主要指标为:口径 75 mm、QPSK 调制、功率 150 W、发射光功率 1 W、信标波长 1552 nm、信号光波长 1562 nm

和 1542 nm, 轻量化设计的终端总重 5 kg。试验中无人机飞行高度 18~25 km, 在距离 250 km 的空空链路上实现了 100 Gbps 高速通信, 并达到了 4 光子/bit 超高灵敏度<sup>[25-27]</sup>, 如图 8、图 9 所示。

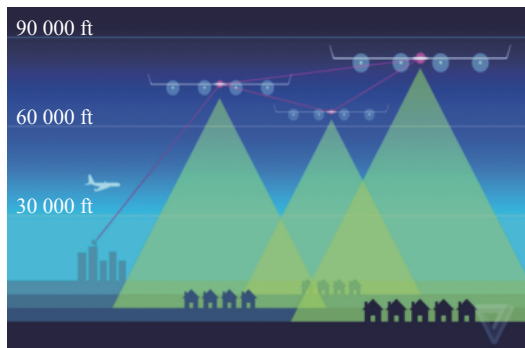


图 8 Aquila 无人机之间/无人机对地激光通信拓扑图

Fig.8 Topology of laser communication of the Aquila UAV-UAV and the UAV-ground



图 9 Aquila 机载终端实物和搭载图

Fig.9 Diagram of Aquila airborne terminal physical and payload<sup>[26]</sup>

2017 年, Facebook 公司联合德国 Mynaric 公司开展了空地激光链路测试。Cessna310 飞机上搭载的激光终端口径为 70 mm, 地面站激光终端口径为 200 mm。该次试验中, 飞机飞行速度 206 km/h, 该速度是 2016 年试验中飞行速度的 1.8 倍。受到飞机速度、振动以及大气湍流的影响, 试验通信速率为 10 Gbps, 但通信距离较近, 仅为 9 km<sup>[28]</sup>。

(5) 空基激光通信系统演示项目 (ALCOS)

2014 年, 美国通用原子公司开展了空基激光通信系统演示项目 (Airborne Laser Communication System Demonstration, ALCOS)。该项目分为两个阶段, 第一阶段是 GEO-地通信演示, 第二阶段是 GEO 和无人机通信演示<sup>[29]</sup>。项目采用 MQ-9“死神”无人机作为机载平台, 通信波长为 1064 nm 和 1550 nm。原计划 2016 年开展的无人机和 GEO 卫星通信演示因故延期。2020 年 1 月完成地面原理演示试验, 机载终端正

在进一步集成和研制中, 预计 2021 年将开展无人机与 GEO 卫星间高速激光通信<sup>[30]</sup>。

1.1.2 欧洲

(1) 法国 LOLA 项目

法国国防部 (DGA) 于 2003 年开展了机载大气激光通信 (Airborne Atmospheric Laser Link, LOLA) 项目, 目标是在 40000 km 超远距离上实现 GEO 卫星 (ARTEMIS) 与飞机之间的激光链路。2006 年 12 月成功进行了链路建立和演示验证。项目主要指标为: IM/DD 通信体制、飞行高度 9 km、飞行时速 300 km/h、机载平台 Falcon20、波长 848 nm, 光功率 0.1 W, 通信速率 50 Mbps (下行) 和 2 Mbps (上行), 见图 10<sup>[31]</sup>。

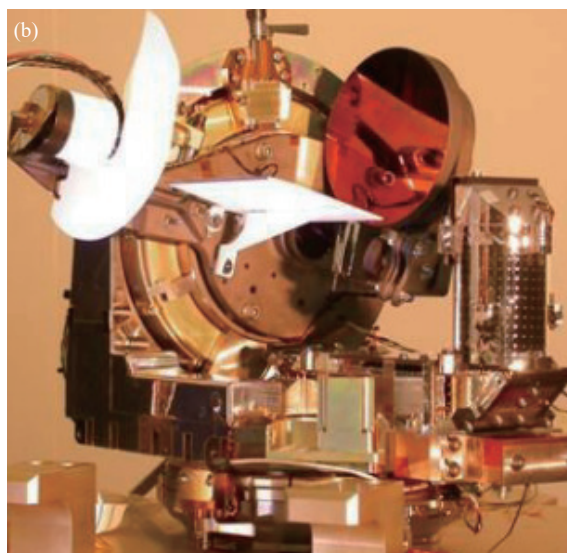
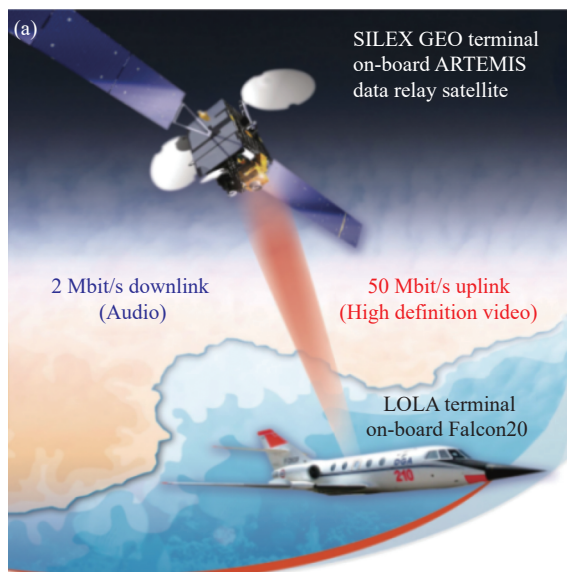


图 10 LOLA 项目 GEO-飞机间激光链路和终端实物

Fig.10 Laser link and terminal physical between GEO-aircraft(LOLA)



(2) 德国机载广域高空监测系统项目 (ARGOS)

针对光学遥感和 SAR 载荷的大数据实时传输难题,德国宇航中心 (DLR) 开展了机载广域高空监测系统项目 (Airborne Wide Area High Altitude Monitoring System, ARGOS)。2008 年,实现了飞行高度为 3 km 的 Do-228 飞机与地面站之间的激光通信。试验中信号波长 1550 nm 和 1590 nm,光功率为 0.1 W (下行) 和 2×5 W (上行)。系统采用了 IM/DD 通信体制,在 10~85 km 距离上实现了 155 Mbps 的激光空地链路试验。2010 年,下行光功率提升为 1 W,在 10~100 km 距离上实现的 1.25 Gbps 高速通信试验<sup>[32-33]</sup>,见图 11、图 12。



图 11 ARGO 机载激光终端图

Fig.11 The terminal on the aircraft(ARGO)



图 12 ARGO 地面站激光终端图

Fig.12 Laser terminal on the ground station(ARGO)

(3) 德国高速光学链路演示项目 (DoD fast)

2013 年,德国宇航中心 (DLR) 和空客公司以及 Via-light 公司开展了快速光数据链路演示项目 (Demonstration of Optical Data link fast, DoD fast),完成了“狂风”战斗机与地面移动站之间的激光通信实验,如图 13 所示。飞行高度 7 km 的战斗机搭载了质量为 5 kg 的

激光通信终端。系统采用了 IM/DD 通信体制,在 50 km 距离上实现了 1.25 Gbps 激光通信,试验中跟瞄系统的稳定跟踪距离达到 79 km<sup>[34-35]</sup>。

(4) 基于 Ultra Air 的机载激光通信项目

为了进一步提高激光通信技术的创新并加速培育激光通信的市场,欧空局 ESA 于 2016 年 12 月启动安全激光通信技术 (Secure and Laser Communication Technology, ScyLight) 项目。项目中将采用液晶相控阵、大规模光子集成光开关等新技术,以期望实现通信终端轻量化、小型化,并最终在量子密钥分发和高保密通信以及产业化等领域进行应用等<sup>[36]</sup>。

2021 年 4 月,空客公司和荷兰应用科学研究组织共同发起了 ScyLight 的子项目——Ultra Air 的机载激光通信项目。研究团队期望在 36000 km 的 GEO 轨道上实现卫星和飞机间激光通信,如图 14 所示。空基平台包括大型客机、战斗机和无人机等,通信速率为 1.8 Gbps。该子项目将重点解决:(1) 飞机振动隔离和主动补偿技术;(2) 飞机姿态主动补偿技术;(3) 开环跟瞄高精度补偿技术;(4) 强大气流流下建链技术。整个项目将在 2022 年之前搭载在飞机上开展试验<sup>[37-38]</sup>。

(5) 天空网络 (NFTS) 项目

2018 年 7 月,空客 (Airbus Defence and Space) 公布了其军用安全网络通信解决方案“天空网络 (Network for the Sky, NFTS)”项目。该项目是空客公司的“未来空军军力倍增计划 (Future Air Power Project)”的一部分,与欧洲未来空中作战系统 (European Future Combat Air System) 体系一致。项目将建设一个覆盖全球的安全混合网络,该网络中整合了不同类型的链路 (星间链路、空-地链路、星-空链路、空-空链路) 和不同频段的网络 (语音网络、5G 网络、激光网络)<sup>[39]</sup>,激光通信将为该项目提供高速通信链路支持。天空网络系统构架如图 15 所示,2019 年 8 月,该项目开展了空客 A330 与地面部队、战斗机、地面联合作战中心的混合链路演示试验,试验中双向通信速率达到了 Mbps 的<sup>[40]</sup>。天空网络项目期望在 2022 年具备全面的作战使用能力,项目建成后将为为航空器、无人机、卫星、地面指挥中心、移动终端 (地面或海中) 建立全球覆盖、随遇接入、按需服务的高速网络连接。

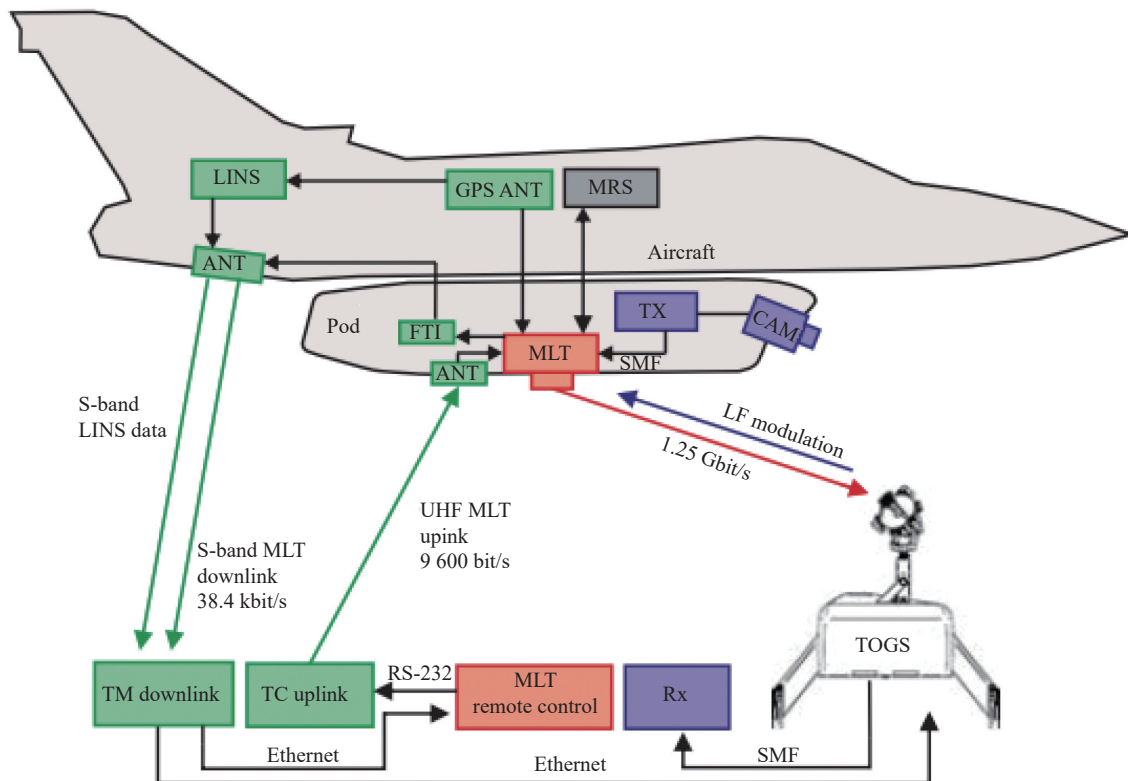


图 13 DoD fast 激光通信系统框图

Fig.13 System overview of the DoD fast laser communication system

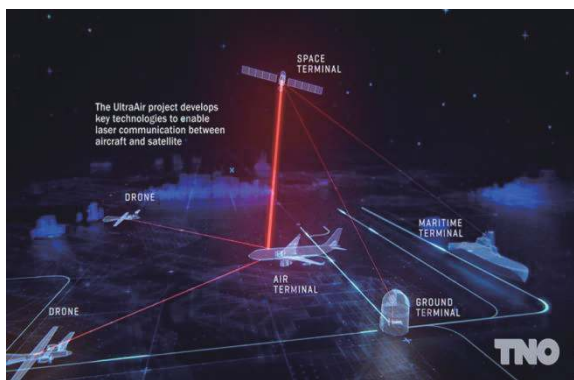


图 14 基于 Ultra Air 的机载激光通信项目系统图

Fig.14 System diagram of laser communication based on Ultra Air project

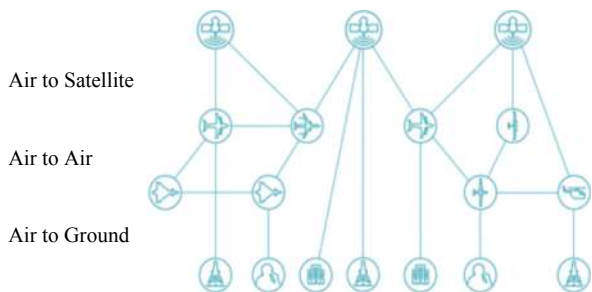


图 15 空客公司的天空网络系统构架

Fig.15 Sky network system of Airbus

### 1.2 国内研究现状

我国也积极开展空基激光通信的相关研究工作。长春理工大学于 2011 年 7 月在 20 km 距离实现了 1.5 Gbps 飞机对海面航行器的高速激光通信<sup>[41-42]</sup>, 9 月在 700 m 飞行高度上实现了 1.5 Gbps 的空空链路高速激光通信, 通信距离达到了 17.5 km。2013 年, 在 4.5~5 km 的飞行高度上实现了 2.5 Gbps 空空链路高速激光通信, 距离达到了 144 km<sup>[41-42]</sup>。2021 年 1 月开展了“面对空间平台的多节点间同时激光高速信息传输系统”演示验证试验。该试验中飞艇飞行高度 200 m, 在 2 km 距离上实现了 2.5 Gbps 的一对多高速激光通信<sup>[43]</sup>。验证了一对多激光通信终端的设计, 建立了按需组网与动态接入、异构信息一体化处理的网络结构。

中国电子科技集团第 34 研究所 2018 年基于 8 旋翼无人机研制了质量 7 kg 的小型化机载激光通信终端, 在距离 6.7 km 上实现了 100 Mbps 通信速率。

中华人民共和国科学技术部在 2019 年启动了“科技创新 2030-重大项目”-天地一体化信息网络项目, 该项目将构建高轨卫星、低轨卫星、浮空节点、地



面节点的立体通信网络,浮空气球作为空基节点,将实现与 GEO 卫星节点间 5 Gbps 高速激光通信,以期增加星地激光通信链路的可用度,从而提升天地一体化网络整体的可靠性<sup>[44]</sup>。

## 2 空基激光通信系统发展趋势

### 2.1 一对多通信、自组织网络、多制式兼容

早期的激光通信大多是单点对点链路,当前空基激光通信向着—对多通信、多制式兼容、网络自组织等方向发展。

一对多目标激光通信在高保密局域网通信、预警机群通信等有重要的应用。美国空军开展的“多通路激光空间终端(MALST)计划”基于液晶相控阵实现了一个卫星节点对三个空基节点间的 10 Gbps 高速激光通信。西北工业大学开展了基于多路快反镜实现了一对多的激光通信研究。长春理工大学在 2021 年实现了一对多同时激光通信。这些研究和试验验证为后续工程应用提供了强有力的支撑。

网络自组织具有动态网络特点,使各节点构成了具备移动通信功能,可以在任意时刻、任意地点快速构建移动通信网络。美国的 FOENEX 已验证了空中和地面的多个混合网络节点间的自组织组网等技术。

多制式兼容通信终端可兼容相干、非相干通信体制,在异构网络中实现融合通信。未来的空间信息网络将由天基网络、空基网络、地面固定网络、地面移动网络等多种异构网络互联、融合而成<sup>[45]</sup>,形成全球覆盖、随遇接入、按需服务、安全可信的空天地海一体化网络。

### 2.2 轻量化、低功耗和高密度集成

激光通信空基平台依次经历了客机、战斗机到无人机和浮空平台的变化,空基激光通信质量也从几十千克降低到几千克,功耗从几百瓦降低为十几瓦。特别是随着无人机、浮空气球、微纳卫星等小型化航空航天平台的广泛应用,对激光通信终端提出了更小体积、更轻质量以及更低功耗的要求。谷歌 LOON 和脸谱 Aquila 等低成本轻量化激光通信终端的质量减轻到了 5 kg 量级、功率降低到了 20 W 量级(最小)。

同时,轻量化的激光通信终端能大幅提高平台的姿态调整效能,低功耗的激光通信终端能降低供电和热控等要求,能适应更多样化特别是小型化平台搭

载,将进一步促进激光通信载荷的工程化应用。

### 2.3 高带宽、高可靠性链路

受限于探测器和激光器、捕获技术和大气信道影响,早期成功演示验证的空基激光通信终端速率较低、链路可靠性不高。随着超光谱类、合成孔径雷达类等大数据量载荷的大量应用,数据的实时传输对通信带宽提出了更高的要求。随着大面积探测器、快速跟踪技术、自适应光学技术、相干技术、WDM 技术以及轨道角动量(OAM)技术的突破和发展,空基激光通信已经实现了几十 Gbps 量级的稳定通信<sup>[46-47]</sup>。脸谱 Aquila 项目在 2016 年的飞行试验中,激光通信速率达到了 100 Gbps 速率,充分展示了激光通信的高带宽的未来应用前景。

未来空间信息网络是由激光/微波混合链路构成的高速、可靠网络,交换节点应同时满足激光/微波混合交换功能,通信速率可达到几百 Gbps。美国的 FOENEX 项目已演示验证了激光/微波混合链路。欧洲 NFTS 项目正在开展激光/微波混合链路验证工作。激光通信链路带宽高、射频通信链路可靠,激光/射频一体化通信技术的互补融合应用,既解决了突发数据的高速传输,又实现了稳定可靠的链路通信。

## 3 空基激光通信系统技术难题和解决途径

空基激光通信系统面临的困难如下:

(1) 大气信道复杂。大气对激光的作用表现为大气衰减、大气湍流、多路径效应。其中,大气衰减是由于大气中大粒子的吸收、小粒子的瑞利散射、大颗粒气溶胶的米氏散射等引起的光能量的衰减。大气湍流会造成光强的起伏、相干退化、光束漂移、波前失真。多路径效应表现为大气中各种粒子会对激光信号产生多次散射造成的脉冲时间延时和接收光脉冲变宽等。大气衰减和湍流以及多径效应具有随机性、易变性等特点,已成为跟踪精度变差和通信性能下降的主要因素<sup>[48-50]</sup>。因此,抑制和补偿大气信道对激光链路的影响是空基激光通信工程应用面临的难题。

(2) 振动条件恶劣。机载平台具有机动性强和覆盖范围广的特点,其振动条件恶劣,表现为指向精度和姿态稳定度较差,以无人机平台为例,振动姿态扰动一般在 0.1 Hz 时达到了 100 mrad,在 1 Hz 时为

1 mrad<sup>[1]</sup>。指向精度是瞄准误差的主要来源,影响终端捕获时间、通信链路建立和保持;姿态稳定度是跟踪误差的主要来源,影响跟踪精度,特别是长时间的跟踪误差。前述两个误差补偿是提高空基激光通信跟瞄性能的关键。同时,恶劣的振动条件对发射光路、接收光路等的光轴设计和加工以及同轴度标校提出了很大挑战。

(3) 移动速度快。不同于同轨星间终端之间相对速率较小,飞机与LEO卫星和地面站之间相对速度较大,多普勒效应明显。加之战斗机、无人机等航空器使用较为灵活,其航迹和相对位置不确定,造成激光终端初始指向和扫描范围存在较大不确定性,这将给建链和维持时间带来一定难题。

(4) 背景噪声严重。背景噪声来自地面背景噪声、恒星天体发光、天空背景光等,严重的天空和地面背景噪声对信噪比带来较大挑战。空基激光通信受到的天空背景光影响远远大于天基终端,两者相差约 $10^5$ 量级<sup>[51]</sup>。当空间高度达到100 km的太空之后,天空背景光的辐射强度仅为地面的背景光的万分之一。

针对上述几个影响因素,以下关键技术可抑制或消除上述影响,有助于实现空基激光通信系统的工程化应用。

#### (1) 快速、高精度、高动态捕跟技术

根据不同飞行平台振动环境的特点,有针对性地提高跟踪精度、捕获概率以及实现捕获/探测优化,实现高精度、高动态瞄准、捕获和跟踪是建立和维持激光链路以及实现光通信可靠组网的关键。

解决途径: 1) 采用大视场或扫描步数较少的矩阵-螺旋扫描方式,实现快速扫描和捕获,并提高捕获概率。2) 采用高平稳控制转台技术,扰动隔离技术,实现低频大幅度粗跟踪。3) 采用快速振镜进行粗精跟踪的两级复合轴控制策略和变结构控制技术抑制残余误差,提高动态跟踪精度<sup>[52]</sup>。

#### (2) 轻量化、小型化、高密度集成技术

激光通信系统复杂、功能组件较多。在保证性能和指标前提下,减低对平台的资源需求,实现轻量化、小型化、高密度集成是实现激光通信载荷工程化应用必经之路。

解决途径: 1) 采用光子集成技术等高密度集成。光子集成技术可实现将激光器、调制器、解调器等器

件的单片集成,其质量和功耗将会有显著的降低,可减少到1/10! 2) 采用地面和空基终端非对称设计。通过提高地面设备的口径和灵敏度,降低对空基终端的口径和光功率要求,以实现空基终端的小型化和轻量化。3) 采用液晶光学相控阵等非机械式跟瞄技术,对波束角的方向和形状进行调整,可一定程度上替换机械式转台,大幅度降低终端重量和功耗。4) 打破光学、通信和跟瞄子系统的分割,进行光机电一体化集成设计。5) 降低终端对热控的需求,以降低主动热控的重量。

#### (3) 大气信道补偿技术

大气信道复杂是空基激光通信系统的显著特点。大气信道作用使得激光通信跟踪精度降低、光功率下降、通信误码率升高。

技术途径: 1) 适当增加光学天线口径,抑制大气湍流引起的光信号闪烁。2) 发射端采用光学自动增益控制,弥补各不同距离上信道引起的功率衰减。3) 采用自适应光学技术对信号波前畸变进行补偿。

#### (4) 高功率发射和高灵敏度接收技术

提高发射光功率和效率有助于增加通信速率和传输距离;提高接收灵敏度能在既定的链路功率和衰减下增加链路裕度,提高通信质量。

技术途径: 1) 采用高功率放大技术。高功率EDFA在光域直接放大,无电子学速率瓶颈限制,极大提高了光信号功率。2) 采用相干探测等高灵敏技术。相较非相干调制,BPSK/DPSK相干通信技术能提高系统灵敏度10 dB左右,PPM调制所需单位光子数量更少,适合长距离超高灵敏度通信。3) 采用前向纠错编码技术(FEC),能实现3 dB以上的灵敏度增益。4) 采用光纤相干阵列接收、光纤章动耦合等技术提高耦合效率和接收信号质量,实现高灵敏度接收。

## 4 结束语

当前空基激光通信已经呈现出了一对多、网络化、轻量化以及高速化特点,应用领域由军事单一用途正逐步走向军民融合和大规模商业化应用。可以预见,进一步发展的空基激光通信技术必将对构建高速空间立体网络起到推动作用。文中介绍了国内外空基激光通信的研究现状,重点介绍了近几年基于飞机和气球平台的激光通信,总结了发展趋势并分析了

关键技术及解决途径。该文有助于及时了解空基激光通信最新发展和顶层系统和应用规划, 希望对空基激光通信技术发展和项目建设有所帮助。

#### 参考文献:

- [1] Yan Lusheng, Wang Feng, Wu Wei, et al. Current status and key technologies of unmanned Aerial [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53: 080005. (in Chinese)
- [2] Jiang Huilin, Tong Shoufeng, Zhang Lizhong. The Technologies and Systems of Space Laser Communication[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010. (in Chinese)
- [3] Feldmann R J, Gill R A. Development of laser crosslink for airborne operations[C]//Military Communications Conference, 1998. MILCOM 98. Proceedings of IEEE, 1998.
- [4] Moore C I, Burris H R, Rabinovich W S, et al. Lasercomm demonstration during US Navy Trident Warrior 06 Forcenet exercise[C]//2007 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, 2007: 17-20.
- [5] Biswas A, Mecherle G S, Page N, et al. Airborne optical communications demonstrator design and pre-flight test results[C]//Proceedings of SPIE, 2005, 5712: 205.
- [6] Milner S, Davis C C, Llorca J. Control and prediction in hierarchical wireless networks[C]//Computer Communications Workshops. IEEE, 2011.
- [7] Ortiz G G, Lee S, Monacos S P, et al. Design and development of a robust ATP subsystem for the Altair UAV-to-ground lasercomm 2.5-Gbps demonstration[C]//Free-Space Laser Communication Technologies XV. International Society for Optics and Photonics, 2003, 4975: 103-114.
- [8] Walther F G, Nowak G A, Michael S, et al. Air-to-ground lasercom system demonstration design overview and results summary[C]//Free-space Laser Communications X. International Society for Optics and Photonics, 2010.
- [9] Fletcher T M, Cunningham J, Baber D, et al. Observations of atmospheric effects for FALCON laser communication system flight test[C]//Proceedings of SPIE, 2011, 8038: 80380F.
- [10] Grinch D S, Cunningham J A, Fisher D S. Laser system for cooperative pointing & tracking of moving terminals over long distance[C]//Conference on Acquisition, Tracking, and Pointing XX, 2006, 6238: 623803.
- [11] Casey C. Free space optical communication in the military environment[C]//20th International Command & Control Research & Technology Symposium, 2015.
- [12] Gangl M E, Fletcher T M, Cunningham J A, et al. Fabrication and testing of laser communication terminals for aircraft[C]//Proceedings of SPIE, 2006, 6243: 624304.
- [13] Giggenbach D, Horwath J. Optical free-space communications downlinks from stratospheric platforms - Overview on STROPEX, the optical communications experiment of capanina[C]//14th IST Mobile & Wireless Communications Summit, 2005.
- [14] Vigneshwaran S, Muthumani I, Raja A S. Investigations on free space optics communication system[C]//Proceedings of the International Conference on Information Communication & Embedded Systems (ICICES '13), IEEE, 2013: 819-824.
- [15] Fuchs C, F Moll, Schmidt C. Optical communication links for aeronautical- and space-applications[C]//Photonische Netze, 2014.
- [16] Stotts L B, Stadler B, Graves B, et al. Optical RF communications adjunct[C]//Proceedings of SPIE, 2008, 7091: 709102.
- [17] Wu Yingming, Liu Xing, Luo Guangjun, et al. Research progress and structure system of space optical communication network technology [J]. *Optical Communication Technology*, 2017, 41(11): 46-49. (in Chinese)
- [18] Stotts L B, Andrews L C, Cherry P C, et al. Hybrid optical RF airborne communications [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2009, 97(6): 1109-1127.
- [19] Juarez J C, Goers A J, Malowicki J E, et al. Evaluation of curvature adaptive optics for airborne laser communication systems[C]//Proceedings of SPIE, Laser Communication and Propagation through the Atmosphere and Oceans VII, 2018, 10770: 107700U.
- [20] Mottini S, Bonino L. Optical Links for Fast and Secure Communications on Ground and in Space[C]//Considerations for Space and Space-Enabled Capabilities in NATO Coalition Operations, 2016, 20: 2018.
- [21] Young D W, Hurt H H, Sluz J E, et al. Development and demonstration of laser communications systems [J]. *Johns Hopkins APL Technical Digest*, 2015, 33: 122-138.
- [22] Moision B, Erkmen B, Keyes E, et al. Demonstration of free-space optical communication for long-range data links between balloons on Project Loon[C]//Free-Space Laser Communication and Atmospheric Propagation XXIX. International Society for Optics and Photonics, 2017, 10096: 100960Z.
- [23] Google laser-beams the film real genius 60 miles between balloons[EB/OL]. [2016-02-24]. <https://www.wired.com/2016/02/google-shot-laser-60-miles-just-send-copy-real-genius/>.
- [24] Econet group and X's project Taara to deploy new high-speed



- internet technology to communities across Sub Saharan Africa[EB/OL]. [2020-11-10].[https://www.liquid.tech/about-us/news/Econet\\_Group\\_and\\_Xs\\_Project\\_Taara\\_to\\_deploy\\_new\\_highspeed\\_internet\\_technology\\_to\\_communities\\_across\\_Sub\\_Saharan\\_Africa](https://www.liquid.tech/about-us/news/Econet_Group_and_Xs_Project_Taara_to_deploy_new_highspeed_internet_technology_to_communities_across_Sub_Saharan_Africa).
- [25] Facebook takes flight inside the test flight of facebook's first internet drone[EB/OL]. [2019-7-10].<https://www.theverge.com/a/mark-zuckerberg-future-of-facebook/aquila-drone-internet>.
- [26] Chen C, Grier A, Malfa M, et al. High-speed optical links for UAV applications[C]//Free-Space Laser Communication and Atmospheric Propagation XXIX. International Society for Optics and Photonics, 2017, 10096: 1009615.
- [27] Chen C, Grier A, Malfa M, et al. Demonstration of a bidirectional coherent air-to-ground optical link[C]//Free-Space Laser Communication and Atmospheric Propagation XXX. 2018, 105240G.
- [28] Horwath J, Gonzalez D D, Navajas L M, et al. Test results of error-free bidirectional 10 Gbps link for air-to-ground optical communications[C]//Free-Space Laser Communication and Atmospheric Propagation XXX. International Society for Optics and Photonics, 2018, 10524: 105241F.
- [29] Gangl M E, Fisher D S, Jeramiah Z, et al. Airborne laser communication terminal for intelligence, surveillance and reconnaissance[C]//Proceedings of SPIE, 2004, 5550: 92-103.
- [30] GA-ASI performs ground tests with airborne laser communication system[EB/OL]. [2020-02-21]. <https://www.air-force-technology.com/news/ga-asi-airborne-laser-communication-system/>.
- [31] Vaillon L, Planche G, Chorvalli V, et al. Optical communications between an aircraft and a geo relay satellite: Design and flight results of the LOLA demonstrator[C]//International Conference on Space Optics-ICSO 2008. International Society for Optics and Photonics, 2017, 10566: 1056619.
- [32] Giggenbach D, Horwath J, Knapek M. Optical data downlinks from earth observation platforms[C]//Proceedings of SPIE, Free-Space Laser Communications Technologies XXI, 2009, 7199: 719903.
- [33] Fuchs C, Moll F, Schmidt C. Optical communication links for aeronautical-and space-applications[C]//Photonic Networks, 15. ITG Symposium, 2014: 1-8.
- [34] Moll F, Horwath J, Shrestha A, et al. Demonstration of high-rate laser communications from a fast airborne platform [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2015, 33(9): 1985-1995.
- [35] Moll F, Mitzkus W, Horwath J, et al. Demonstration of high-rate laser communications from fast airborne platform: flight campaign and results[C]//Unmanned/Unattended Sensors and Sensor Networks X. International Society for Optics and Photonics, 2014, 9248: 92480R.
- [36] Hauschildt H. ARTES ScyLight SeCure and laser communication technology-preparing the future of optical communications[C]//23rd Ka-Band Broadband Communications Conference Panel on Optical Technology and Systems, 2017.
- [37] Airbus reveals its network for the sky military communications solution[EB/OL]. [2018-07-18]. <https://armadainternational.com/2018/07/airbus-reveals-its-network-for-the-sky-military-communications-solution/>.
- [38] Next step of the network for the sky[EB/OL]. [2019-08-21].<https://euro-sd.com/2019/08/news/14348/next-step-of-the-network-for-the-sky/>.
- [39] Hauschildt H, Elia C, Moeller H L, et al. ScyLight-ESA's secure and laser communication technology framework for SatCom[C]//2017 IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS). IEEE, 2017: 250-254.
- [40] Airbus and TNO to develop aircraft laser communication terminal[EB/OL]. [2021-04-08]. <https://www.tno.nl/en/about-tno/news/2021/4/airbus-and-tno-to-develop-aircraft-laser-communication-terminal/>.
- [41] Li Xiaoming, Zhang Lizhong, Meng Lixin. Airborne space laser communication system and experiments[C]//Selected Papers of the Photoelectronic Technology Committee Conferences. International Society for Optics and Photonics, 2015, 9795: 97950G.
- [42] 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): 1206004. (in Chinese)
- [43] 重磅!长春理工大学完成"一对多点"同时激光通信动态试验![EB/OL]. [2021-01-21]. [https://www.sohu.com/a/445937795\\_100034932](https://www.sohu.com/a/445937795_100034932)
- [44] Wang Kaiwei, Wang Shuo. Design of laser relay for space-ground integration information network based on floating platform [J]. *Telecom World*, 2019, 26(9): 32-33.
- [45] Li Fenghua, Yin Lihua, Wu Wei, et al. Research status and development trends of security assurance for space-ground integration information network [J]. *Journal on Communications*, 2016, 37(11): 156-168. (in Chinese)
- [46] Gao Duorui, Li Tianlun, Sun Yue, et al. Latest developments and trends of space laser communication [J]. *Chinese Optics*, 2018,

- 11(6): 30-42. (in Chinese)
- [47] Zeng Fei, Gao Shijie, San Xiaogang, et al. Development status and trend of airborne laser communication terminals [J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(1): 66-73. (in Chinese)
- [48] Malik A, Singh P. Free space optics: Current applications and future challenges [J]. *International Journal of Optics*, 2015, 2015: 1-7.
- [49] Jiang Huilin, Liu 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(S): 299-302. (in Chinese)
- [50] Meng Lixin, Zhao Dingxuan, Zhang Lizhong, et al. Boundary layer effect and compensation in airborne laser communication [J]. *Opt Precision Eng*, 2014, 22(12): 3231-3238. (in Chinese)
- [51] Xie Xinkun, Zhang Lei, Tong Shoufeng, et al. Influence of sky background light for floor space laser communication system performance[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2016. (in Chinese)
- [52] Song Yansong, Tong Shoufeng, Jiang Huilin, et al. Variable structure control technology of the fine tracking assembly in airborne laser communication system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(5): 934-938. (in Chinese)