

无人机机载光无线通信研究进展

丁举鹏^{1*}, 易芝玲², 王劲涛³, 李亚平⁴, 张志军⁴, 解鹏⁴, 郭学让⁵, 陈习锋¹

¹新疆大学信息科学与工程学院信号检测与处理新疆维吾尔自治区重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830046;

²中国移动通信研究院, 北京 100053;

³清华大学电子工程系北京信息科学与技术国家研究中心, 北京 100084;

⁴国网新疆电力有限公司电力调度控制中心, 新疆 乌鲁木齐 830001;

⁵国网新疆电力有限公司电力科学研究院电网技术中心, 新疆 乌鲁木齐 830001

摘要 综述了面向无人机(UAV)领域光无线通信(OWC)的主要研究进展,分别阐述了借助光无线技术在无人机与陆上终端间、无人机与无人机之间以及无人机与卫星之间,实现稳健、宽带通信链路的诸多研究进展与关键使能技术。重点阐述了不同无人机光无线链路配置下的链路建模、参数优化、实验测试。同时,也初步讨论了高速、高可靠无人机机载光无线通信技术在模块化实现、高空平台应用等方面的发展趋势。

关键词 光通信; 无人机; 自由空间光; 可见光通信; 光通信链路

中图分类号 TN929.12

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.230003

Recent Advances of UAV Airborne Optical Wireless Communications

Ding Jupeng^{1*}, I Chih-Lin², Wang Jintao³, Li Yaping⁴, Zhang Zhijun⁴, Xie Peng⁴,
Guo Xuerang⁵, Chen Xifeng¹

¹Key Laboratory of Signal Detection and Processing in Xinjiang Uygur Autonomous Region,
School of Information Science and Engineering, Xinjiang University, Urumqi, Xinjiang 830046, China;

²China Mobile Research Institute, Beijing 100053, China;

³Beijing National Research Center for Information Science and Technology,
Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

⁴Power Dispatch and Control Center, Xinjiang Electronic Power Company, Urumqi, Xinjiang 830001, China;

⁵Electric Power Research Institute Grid Technology Center, Xinjiang Electronic Power Company, Urumqi,
Xinjiang 830001, China

Abstract In this paper, recent research progress of optical wireless communications in unmanned aerial vehicles (UAVs) was reviewed. By means of wireless optical technology, technical challenges and key enabling technologies were also surveyed for implementing robust and wideband communication links between UAV and satellite, UAV and UAV, and UAV and terrestrial terminals. The mechanisms and schemes of modeling, parameter optimization, and experimental testing under different UAV optical wireless link configurations were described in detail. Additionally, the key development trends of high-speed and high-reliability UAV-based wireless optical communication technology in modular implementation, high altitude platforms applications, and others were discussed.

Key words optical communications; unmanned aerial vehicle; free space optics; visible light communications; optical communications link

OCIS codes 060.2605; 060.4510; 060.4250

收稿日期: 2020-04-07; 修回日期: 2020-04-17; 录用日期: 2020-04-20

基金项目: 新疆维吾尔自治区自然科学基金面上项目(2019D01C020)

*E-mail: jupeng7778@163.com

1 引言

光无线通信技术,也经常被称为自由空间光通信技术,是一类以自由空间作为传输媒介的光通信技术的总称。此类技术具备传播定向性高、传输容量大、保密性强、无需频谱授权、抗干扰能力突出等诸多优点^[1-2]。在多样的室内场景下,光无线技术也演进出新的技术形态,不再局限于使用传统的激光器(LD)光源,也可以依托发光二极管(LED)光源基础设施,通过定制的驱动电路为分布式LED光源加载无线数据,为室内用户同时提供绿色照明,实现高速无线覆盖^[3-7]。国际上将这一新型光无线技术形态称为可见光通信(VLC),也有与企业联系紧密的欧洲研究团队将其命名为光保真(LiFi)技术。显而易见,这种命名方式借鉴了目前已广泛使用的无线保真(WiFi)技术,通过提升用户接收度,以期进一步加速产业化进程。截至目前,可见光通信获得了来自产业界和学术界的广泛关注,欧洲、美国、中国、日本都分别成立了专门的研究机构和研究组织。日本的可见光通信联盟和美国电气与电子工程师协会(IEEE)分别整合各自产业力量,开展了可见光通信技术的产业标准。与此同时,光无线通信技术在室外场景也取得了长足的进展,并在无线回传、卫星互联、应急保障、临时链路等诸多应用领域,发挥着难以替代的独特作用^[8-10]。

在另一方面,无人机(UAV)技术已经从传统的军事领域延伸到农业、安防、监控以及商品投递等诸多民用领域。考虑到无人机常常需要进行高速数据交互,传统的射频(RF)通信链路已无法独立满足上述应用的要求。特别是在应急救援等特种场景下,无人机借助传统无线链路同地面终端(包括:有人驾驶及无人驾驶车辆、爬行机器人、手持设备等)进行分组协作,通过将无人机基于全局视野获得的信息转化为对地面目标的分析判断,动态地指引地面终端跨越障碍,实施精准的施救与抢修。必须指出,传统链路受制于容量、干扰、保密性、频谱资源等因素,无法充分满足空地无人机异构系统的通信需求^[11-15]。

基于上述考虑,业界人士提出将光无线通信技术引入到无人机领域,通过挖掘丰富的光谱资源,大幅提升了无人机的无线传输容量。在原有无人机与卫星间链路、空中无人机之间链路、无人机与陆上终端间链路的基础上,通过将光无线模块及子系统分别集成到各类无人机及地面终端,构建了基于光波的高速率、高保密、定向链路^[16-20]。上述技术思路

基本上是借助特性互补的无线光与射频技术,高效增强无人机与空中或地面系统在完成复杂关键任务时的整体表现。

本文将简述基于无人机平台光无线通信技术的研究现状与前沿进展。分类分析了无人机与地面终端之间、空中无人机之间、无人机与卫星之间实现可靠、高速光无线链路所面临的诸多技术挑战。同时,阐述了产业学术界内已开展的一系列有针对性的研究工作,以期为无人机领域光无线通信技术的后续深入研究与实用化发展提供有价值的参考。

2 无人机与地面终端间的光无线通信

目前,产业界对无人机技术应用的关注正从传统军用领域向非军用领域倾斜。与此同时,可供选用的无人机范围正在进一步扩大,基本可以分为固定翼型、倾斜翼型、直升机型、多旋翼型几大类,如图1所示。固定翼型无人机具备出色的续航能力和飞行范围,但是必须通过水平起飞的方式完成升空,对周边自由飞行的空间要求较高,适用于高空应用场景。倾斜翼型无人机因其在机翼上的混合设计,在继承固定翼无人机传统优势的同时,支持垂直起降操作。必须指出,过高造价与过高技术复杂度是其广泛商用化的主要制约因素。直升机型无人机也能够支持垂直起降,同时可兼顾高可操作性和较高的载荷能力。类似地,相对高的造价和维护成本也阻碍其成为无人机平台的首选。多旋翼型(也有称为多转子)无人机因其在低造价、易起落、低质量上的出色表现,成为绝大多数低空无人机应用的首选。目前,研

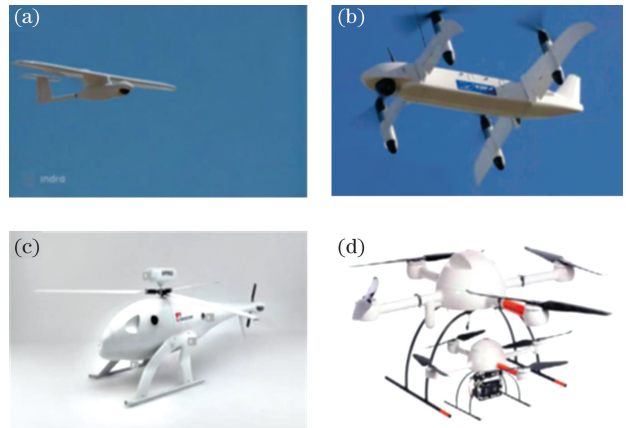


图1 无人机的主要类型。(a)固定翼型;(b)倾斜翼型;
(c)直升机型;(d)多旋翼型

Fig. 1 Main types of for UAV. (a) Fixed-wing UAV;
(b) tilt-wing UAV; (c) unmanned helicopter;
(d) multicopter

究人员针对光无线通信技术在无人机领域的研究讨论更多地集中于多旋翼型无人机。

光无线通信技术与无人机飞行平台的融合,首先要面向无人机平台与地面终端之间通信链路的需求,业界通常将其简称为“空对地”(A2G)问题。一方面,面向此类需求的融合方案可以同时发挥无人机空间自由度高、部署时间短、光无线技术定向性强、容量高的综合优势。通过构建空中移动中继,在位置固定的地面终端之间实现了高容量传输链路的快速建立。另一方面,在救灾、安防、交通等应用领域,无人机常常需要与车辆、机器人等移动终端完成高速数据传递与指令下达^[13-23]。针对此类场景,必须充分考虑无人机与地面终端的移动特点,提出适用度高、可用性强的解决方案,以切实释放此类融合技术的潜力与效能。

2.1 无人机与位置固定终端互联

在重大自然灾害面前,包括基站及电力传输线在内的移动网络基础设施,将经受巨大的考验,常常要面对严重的破坏及损伤,甚至会出现网络瘫痪与链路中断的紧急情况。快速恢复通信对于受灾信息的快速传递、救灾工作的高效开展具有至关重要的作用。目前,国际上已提出多种策略用于恢复灾区通信。较为常见的方法是在受灾区域部署可移动的车载基站,从而为移动用户提供临时通信,协助完成移动用户与邻近未受损宏基站之间的数据转发。虽然,车载可移动基站可以改变自身的地理位置,但仍要面对诸多限制因素。首先,很可能出现道路已经遭到灾害破坏,车载基站无法抵达目的地的情况;此

外,车载基站一般被部署于灾区,靠近移动用户但又远离附近的宏基站。因而车载基站与宏基站之间经常性处于非直射链路条件,这就极大地限制了车载移动基站的流量回传容量。为了同时应对上述两类关键问题,美国新泽西理工学院的研究人员提出了一种基于无人机载及光无线技术的移动接入网架构。一方面,不同于车载基站,无人机或者说无人机基站可以在空中自由移动,因而可以被高效灵活地部署于灾区,不受地面路况的影响。另一方面,借助光无线链路实现无人机与邻近宏基站间的点对点回传手段,可以充分利用光无线技术的高吞吐能力,满足回传的容量需求。此外,在满足用户速率需求的前提下,为最大限度地提升所服务移动用户数,该团队提出了一种有针对性的联合优化算法,以实现无人机基站的三维空间位置、移动用户关联以及链路间带宽分配的动态调整^[17]。

来自哈萨克斯坦纳扎尔巴耶夫大学的研究团队,则具体评估了各种天气条件对无人机与地面站间垂直光无线链路的影响。研究结果显示,相比降雨,降雪对垂直光无线链路的影响更为显著。此外,量化结果显示,随着无人机具体面高度的增加,几何损耗作用进一步加剧,链路速率表现进一步下降。通过比较,研究人员发现在提升链路速率方面,调整光波束发散角相比增大接收器面积可以提供更高的增益^[18]。面向 5G 及后 5G 无线网络在成本、造价及可伸缩性上的需求,卡尔顿大学的研究人员提出了基于光无线技术的垂直回传与前传框架,如图 2 所示^[15]。仿真结果显示,上述框架可以作为陆地解

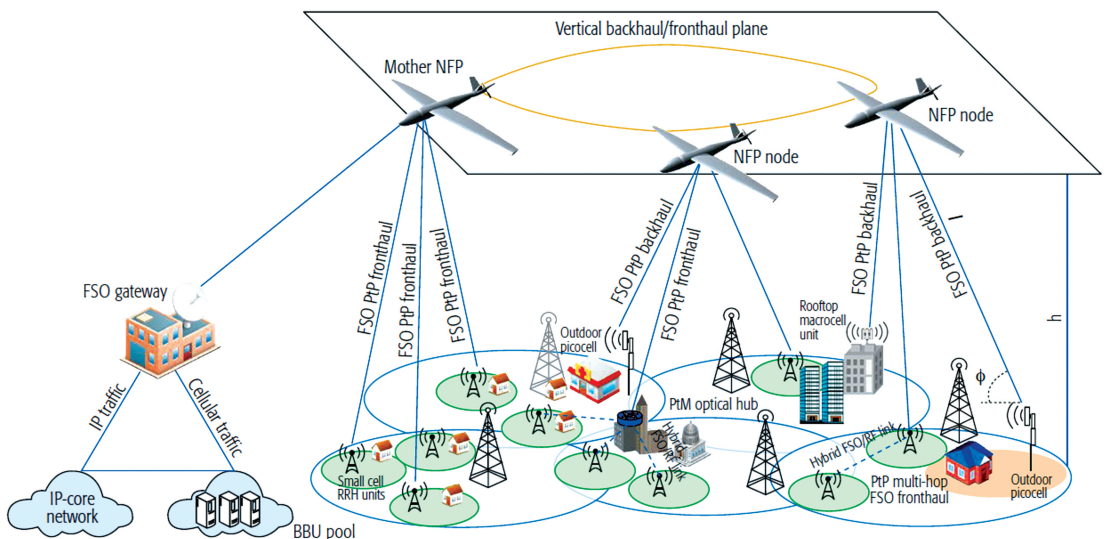


图 2 无人机 5G 及后 5G 光无线网络结构示意图^[15]

Fig. 2 Illustration of for UAV 5G and beyond 5G wireless optical network architecture^[15]

决方案的互补解决方案,通过降低光源的发散角,可以显著提升链路吉比特级的传输表现,增加系统的链路余量。研究人员同时指出,相比陆地回传及前传网络的成本,垂直网络的成本仍是较高的;但是,可预期的是,随着光无线技术及网络化飞行平台的成熟,垂直网络的成本必将迅速降低。

2.2 无人机与位置可变终端互联

新墨西哥大学的研究人员则将研究重点聚焦于小型无人机与地面无人车之间的光无线协作链路。所针对的场景为灾后搜索场景,如图3(a)所示。通过量化模拟无人机光无线发射器与地面无人车之间的直射链路关系,研究人员发现为了增强空地终端间的可靠链路速率,必须始终保持空地无人平台之间的相对位置^[19]。具体地,通过定义地面无人车车载光无线接收器的连接锥来量化评估上述相对位置关系。该连接锥的确定准则为:当无人机光无线发射器(一般来说,假定该场景下发射器朝向为垂直指向地面)处于连接锥之内,可以满足收发端所需的最

低数据链路,具体如图3(b)所示^[19]。通常来说,无人机与无人车有各自的运动自由度,故无人机会不可避免地偏离连接锥空间区域。为便于简化分析,上述研究人员首先假设地面无人车在一开放区域移动,同时无人机光无线发射器始终能获知无人车的状态与行进线速度,进而提出了一种控制算法,使得无人机能够发现并驻留于连接锥以内,进而确保链路始终不发生中断。该算法的核心思想是首先确定连接锥上与无人机位置关联的位置参考点,进而根据位置参考点与无人机之间的相对位置矢量以及相对速度矢量更新无人机当前时刻的运动方向。在下一时刻,重复上述过程,直至无人机运动到连接锥以内,此后不再根据收发两端位置关系调整无人机运动方向,只根据已掌握的地面无人车的运动状态信息更新自身运动方向和速度,进而使得无人机与无人车之间保持相对静止的运动状态。换言之,无人机始终保持在连接锥以内,并维持所需的点对点光无线链路不发生中断。

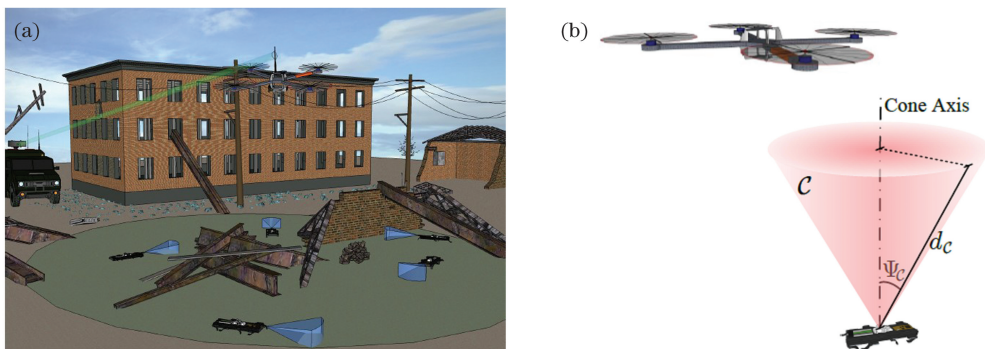


图3 无人机与地面车辆的光无线通信。(a)微型 UAV 与地面车辆组成灾区搜索小队;(b) UAV 与地面车辆之间形成的连接角锥参数^[19]

Fig. 3 Optical wireless communication between UAVs and ground vehicle. (a) A team of micro unmanned aerial and ground vehicles deployed to a disaster area; (b) connectivity cone C with its parameters^[19]

在位置参考点的确定过程中,可以分三类情况进行讨论。第一种情况,当收发端距离大于连接锥的倾斜高度且无人机的俯仰角小于接收端视场角的余角时,根据空间几何关系,可以判定出此时参考点高度就是连接锥的完整高度,参考点的俯仰角就是接收端视场角的余角;第二种情况,当收发端距离大于连接锥的倾斜高度但无人机的俯仰角大于接收端视场角的余角时,参考点高度就是连接锥的完整高度,参考点的俯仰角就是无人机的俯仰角;第三种情况,当收发端距离小于连接锥的倾斜高度但无人机的俯仰角大于接收端视场角的余角时,参考点高度就是无人机高度,参考点的俯仰角就是接收端视场角的余角。在其他空间几何关系条件下,无人机只会出现在连接锥

内部,因而能够满足所需光无线链路条件,也就是无须依据位置参考点来调整无人机的相对位置。

在智能交通应用场景中,低空无人机通常不是面对一辆车,而是要应对一个车辆簇中众多车辆的多址接入。已有研究工作显示,无人机与车辆相对位置对两者间光无线链路的容量有着深刻的影响:车辆越接近,无人机所能实现的链路容量越高^[20]。在上述工作中,研究人员通过对不同车辆位置加权求和来确定位置优化后无人机的位置。在上述系统中,不同车辆是按照时分复用的方式接入系统的,因此天然消除了用户间的共信道干扰问题。在不同车辆位置权值的获取上,研究人员进一步将用户所需速率乘以校正因子,进而代入香农公式求得无人机

与车辆之间的链路间距。通过将链路间距作为车辆位置权值,建立了车辆所需下行速率与车辆位置权值之间的联系。显然,该算法的计算复杂度与车辆簇中的车辆数目呈正比例关系。在上述根据用户速率需求调整无人机位置的过程中,随着车辆簇中车辆数量的不断增长,上述多址接入系统的吞吐容量并不会不断增加。量化结果显示,上述优化系统在实现吞吐最大化的同时,可以最多实现4辆车同时与无人机互联。随着车辆数量的增多,位置优化所引入的容量增益将逐次递减。必须指出,上述研究工作所设定的环境因素仍过于理想,尚未考虑雾、雨等天气条件以及道路与环境表面反射效应对空地之间信道条件的影响。未来的工作应该综合考虑上述不利因素对链路表现的影响。

2.3 实验原型及测试活动

目前,研究人员已经着手开展无人机与地面终

端间光无线链路的实验测试工作。韩国电子与电信研究院的研究人员设计了面向无人机与地面终端间共用路径的光学终端,见图4^[24]。通过移除独立的信标系统,该设计方案借助集成光学组件来同时支持发送光波束与信标光波束。初始实验结果显示,该终端可以支撑1.25 Gb/s的全双工无差错链路,静态传输距离可以达到50 m^[19]。

国内中国电子科技集团等几家单位也开展了初步的实验工作。小型旋翼无人机平台在6.7 km外的固定位置,通过光无线链路将高清图像成功地传送到地面接收端。据相关文献,可知上述工作的传输速率最高可达1.25 Gb/s^[23]。必须指出,虽然上述实验收发端的一端为无人机平台,但是在具体光无线通信过程中,收发两端始终被限定于固定位置。换言之,无人机处于飞行状态下的链路表现仍有待进一步研究。

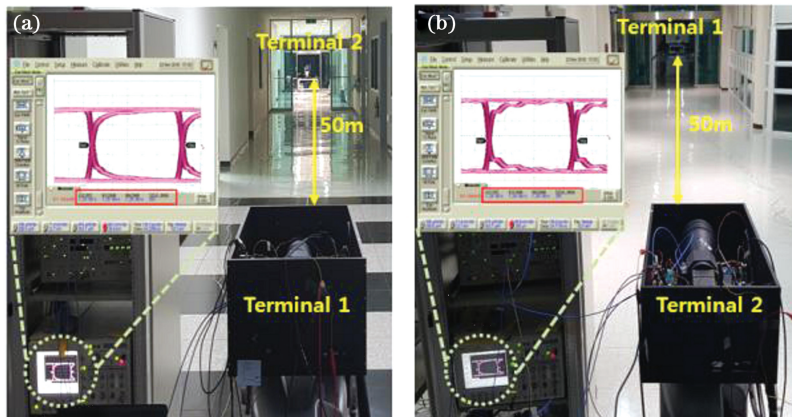


图4 UAV与地面站之间光无线链路BER测量实验^[24]。(a)从UAV到地面站链路测量;(b)从地面站到UAV链路测量
Fig. 4 BER measurement of the optical wireless link for UAVs (Terminal 1) and GCSs (Terminal 2)^[24]. (a) From terminal 1 to terminal 2; (b) from terminal 2 to terminal 1

研究人员也尝试使用摄像头作为光无线链路的接收元件。日本冈山的研究团队尝试在直升机型无人机上加装摄像头,借助摄像头来捕获LED显示屏上的二维码信息。所涉及的二维码信息主要包括快速响应(QR)码、增强现实(AR)标记码^[21]。通过提取二维码信息中所包含的空间位置信息,可以辅助无人机按照所需的位置运行。该团队认为上述方案将作为自动飞行系统的一部分。此外,美国南加州大学的研究人员尝试将轨道角动量技术(OAM)和多输入多输出(MIMO)均衡技术引入到无人机与地面站之间光无线链路的设计中。实验结果显示,借助飞行器上调制逆反射器,可以实现双通道40 Gb/s的空地间传输表现,逆向调制链路的往返距离可达100 m。对比实验显示,MIMO均衡可以

显著缓解湍流效应对光无线链路劣化的影响,将误比特率(BER)降至 3.8×10^{-3} ^[22]。可以预见,更多使能技术将被引入到空地光无线链路领域,可进一步提升无人机的无线数据吞吐能力。

3 无人机之间光无线通信

随着无人机领域光无线技术研究的深入,越来越多的研究人员认识到:为了进一步提升无人机技术的覆盖范围和组网灵活性,必须借助无人机之间的协作,甚至是无人机机群的协作^[25-26]。因此,需要在最基础层面解决无人机之间的光无线通信链路问题,业界通常简称为“空对空”(A2A)问题^[27-34]。围绕这一问题,研究人员在空对空信道建模及参数优化、空对空链路性能增强技术、模块化设计与实验

测试方面开展一系列工作。

3.1 信道建模及参数优化

伊朗与英国的研究人员合作开展了无人机间光无线信道建模的相关工作。针对弱湍流条件,研究了一种更为简单的更易使用的对数正态湍流环境信道模型,进而给出了弱湍流条件下链路中断概率的闭合表达式。与此同时,对于中湍流或强湍流条件,文献[27]推导出伽马-伽马湍流信道的新型闭式统计信道模型。这一模型考虑了接收器视场、空间位置、无人机指向偏差等链路配置因素的影响,并将模型结果与传统蒙特卡罗仿真结果进行比较,验证了新颖模型的准确性。在该模型中,收发端无人机都悬停在空中;同时假设由于众多随机参量的影响,无人机的瞬时位置、方位朝向都会与预期的位置发生随机偏离。与此同时,在构想的点对点通信场景中,收发端的链路距离应该远大于无人机在三个空间方位瞬时偏离程度的绝对值。研究人员考虑了影响接收端信号强度的4种效应:大气衰减、大气湍流、几何损耗以及信号抵达角度波动所造成的链路中断。光无线信号的抵达角度是指接收端入射信号与接收器轴向的夹角。根据空间几何关系,该抵达角度与收发端的随机空间指向直接相关,且可以通过瑞利分布表征其概率分布函数。在此基础上,考虑到链路中断判决只有两种状态:当信号抵达角度在接收端视场角之内时,链路不发生中断,链路状态取值为1;当信号抵达角度在接收端视场角之外时,链路发生中断,链路状态取值为0。综合上述瑞利分布以及链路状态取值,研究人员给出了与上述无人机之间光无线通信场景相符合的链路中断状态概率分布函数,并在此基础上综合考虑大气湍流等效应,给出了完整的基于无人机的光无线信道概率分布函数表达式,初步实现大气无线光信道模型从传统陆地到空中的延伸。该模型可以为不同信道或者无人机不稳定性条件下获得无人机光无线链路的最优参数设定提供比较基准。此外,上述伊朗研究人员还针对悬停状态的旋翼无人机间光无线链路进行了参数优化,通过收发端可调参数(包括光束腰、接收器视场角)的优化,获得了中断概率上的最优表现。相关数值结果显示,所获的最优参数高度依赖于信道条件,主要包括:链路距离、湍流强度、载荷抖动、发送功率以及背景噪声功率。图5给出了UAV之间典型空对空链路示意图^[28]。

为了在无人机,特别是旋翼无人机之间构造空中光无线链路,必须对其独特飞行动态、稳定性、尺

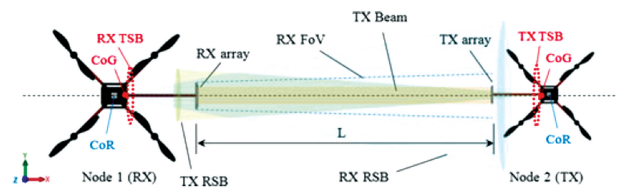


图5 UAV之间典型的空对空链路^[28]

Fig. 5 A typical A2A FSO link^[28]

寸及功耗等特性进行表征。美国俄克拉荷马大学的研究人员首次给出了悬停旋翼无人机的开环对准及稳定度分析,初步证实了光无线链路的可用性和吞吐能力,并通过对准平均比率(APA)这一指标进行评价^[28]。仿真分析显示,旋转偏差对链路表现的影响远高于平移偏差的影响;通过模拟实际多转子行为,研究人员展示了短距离条件下无人机之间对准平均比率在16%~30%时系统的表现结果。

3.2 链路性能增强技术

在军用及民用领域,为更有效地发挥无人机的效用,迫切需要在无人机之间建立高速数据链路。在空中无人机之间建立自由空间光链路极具挑战性,需要研发有针对性的增强技术。国内研究人员尝试将正交频分复用(OFDM)技术引入到无人机光无线通信系统中。在综合考虑大气湍流以及无人机之间指向误差的基础上,量化分析发射端光束发射角、符号速率等对系统误码率的影响^[29],进而确定无人机之间存在弱湍流条件下,实现最优链路误码性能的光束发射角,研究表明湍流强度的改变对该最优光束角的影响较为有限。

在短距离无人机间通信场景下,伴随收发端相对位置的改变,链路间距通常处于动态之中。针对这一现象,南洋理工大学 Heng 等^[30]提出了发端波束发散改变机制,具体包括四种方法。方法一是借助 N 个可移动透镜构成的透镜组来实现,即从透镜组中选中一个透镜,将其移入发射光路径后构造所需的输出波束瞄准直径,因此该方法可以提供 N 种波束发散选择。方法二是将机动光束扩展器整合到光源波束的发射光路径上。该方法在光束扩展器的扩展比率内,可实现输出波束直径的增加和降低。此外,方法三是将光开关引入到光信号的发送路径,即基于光纤的激光器光源与一个 $1 \times N$ 的光开关相连,光开关的 N 个输出端口进而分别与 N 个透镜组相连。通过控制光开关可将输出光波束切换到任意一个端口,进而通过相关联的固定透镜组来控制输出波束的发散程度。最后一种方法是将方法二和

方法三结合起来,即用方法二中波束扩展器替代方案三中的透镜组来构造 N 种候选的波束直径扩展,以提升波束发散的自适应能力。数值仿真显示,该波束发散改变机制可以显著提升无人机之间链路的传输距离。

在固定翼无人机集群的组网架构方面,奥地利格拉茨技术大学的研究团队讨论并给出了三种候选方案,具体包括:环型、星型以及网状型。在环形结构中,全部无人机具备双向链路,每个无人机仅与前后相邻无人机相连,如图 6 所示^[31]。因此,如果两架无人机之间连接中断,仍然有备用连接可供使用。当无人机上发射器与地面站接收器之间没有视线路

径时,需要将中间多架无人机作为中继器才能与地面站之间建立链路。显而易见,该方案事实上是一种复杂的技术选择。在星型架构中,位于机群中心的无人机被称之为光多点单元(OMU),负责提供与地面之间的链路。其他位于周边位置的无人机通过各自装配的光收发器与 OMU 保持永久性连接。这一方案的最大优势在于实现了任意两架无人机之间链路距离的最小化,不足之处在于引入了负责复用功能的单片机(MCU)的单点失效问题。较之于前两种方案,网状型架构具备高可靠性,可以在两架无人机间构建多重连接。同时也必须承认,多重连接也导致复杂度增加,为选路算法和堵塞处理增加了难度。

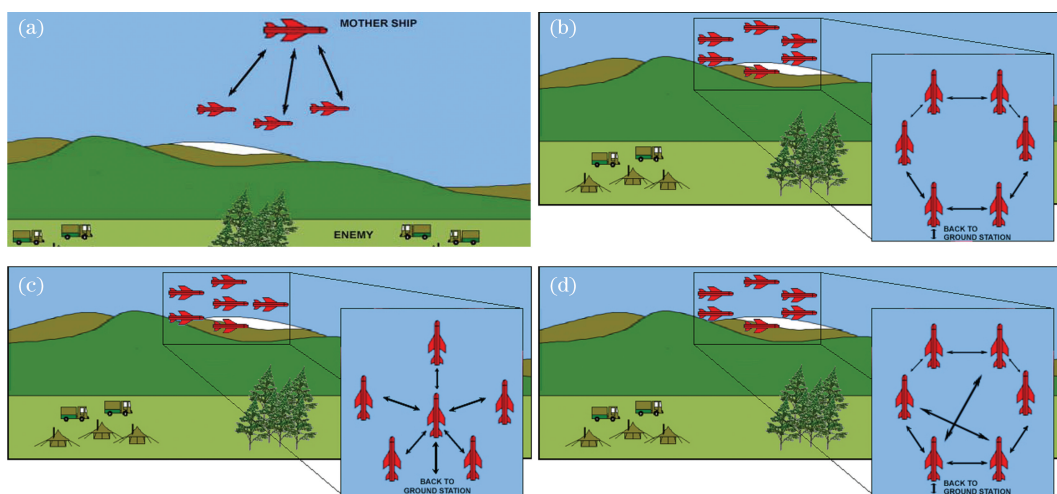


图 6 UAV 机群^[31]。(a)与侦察机交换数据;(b)环形架构;(c)星型架构;(d)网状架构

Fig. 6 UAV swarm^[31]. (a) Exchanging data with surveillance plane; (b) ring architecture; (c) star architecture; (d) meshed architecture

3.3 模块设计及实验测试

为了进一步提升无人机间链路表现,研究人员开展了光无线元件的模块化设计。俄克拉荷马大学的研究团队实现并展示了平面形、半球形、球形光学阵列模块。借助小尺寸智能光学模块,该团队搭建了一系列具有更大尺寸的光无线结构,所给出的设计结构具有质量小、造价低以及视场角宽等诸多优点,适用于用户追踪、宽带连接、多输入多输出等光无线通信设定^[32]。为便于直观展示,图 7 给出了模块化光无线组件以及由 10 个模块组件组成的测试接收器实例。为了应对无人机光无线链路的对准与追踪需求,上述团队利用实验表征了机械常平架在捕获及追踪表现上所能提供的准确性与可重复性。

在上述工作基础上,研究人员进一步将小尺寸的光纤束分别引入到无人机的光发射器、光接收器部分^[34]。光纤束的直接作用是实现空间分集,增大

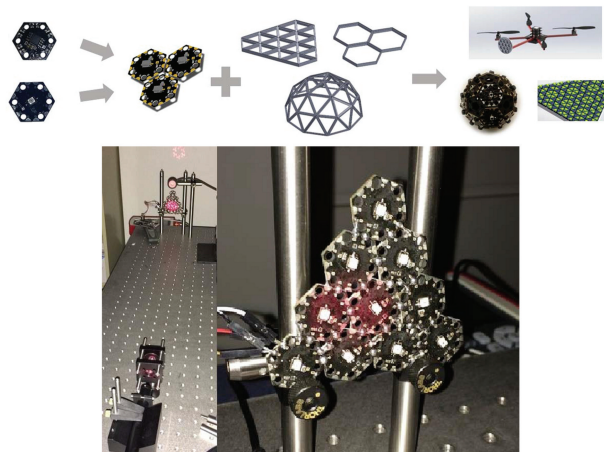


图 7 模块化的光无线组件以及由 10 个模块组件组成的平面型接收器^[32]

Fig. 7 Modular wireless optical elements and 10-module flat receiver array under test^[32]

接收视场角。光纤束中的光纤需要分别与无人机上的多元透镜系统相对接,以实现光路的耦合。为实现无人机收发端光学系统的紧凑化,多元透镜系统可以由圆形、三角形以及六边形光学元件分别组成,从而实现平面或曲面的定制化设计。

与此同时,德国不莱梅大学的研究人员也开展了收发端模块化的相关工作^[35]。在已经完成的实验原型中,他们将高功率红外 LED、光电探测器以及辅助电路焊接到同一六边形印刷电路板,进而将多块同样的六边形光收发器电路板组合拼接成半球形状。该设计方案可以为无人机机载无线光链路提供更为多样化空间收发角度,从而在一定程度上提升链路的稳健性。

4 无人机与卫星间光无线通信

目前,国内外的研究人员正积极探索无人机与人造卫星之间宽带光无线通信链路的构建^[36]。与此同时,高空平台(HAP)作为高空无人机,或者说高空无人系统的特殊形态,得到了广泛的关注和讨论^[37-38]。相应地,如何在高空平台与人造卫星之间建立高可靠的光无线通信链路,如何有效控制甚至克服吸收、散射、波束展宽、相前畸变以及各类天气现象对链路性能的不利影响,如何构建空天地一体的光无线网络正逐步成为研究关注的重点。

4.1 链路建模及特性分析

目前,与无人机和人造卫星间光无线通信直接相关的研究工作仍然集中于链路的建模与特性分析。无人机在高空对制定区域进行观察和传感时,需要拍摄大量的高清图片,为及时开启新一轮的拍摄任务,需要适时释放机载数据存储空间。考虑到无人机与地面站之间大气湍流存在长时间停留的现象,无人机如果直接将携带图片的光无线信号发回地面站,将必须经历过长的湍流信道。针对这一问题,南京大学 Li 等^[36]提出在无人机与卫星之间构造光无线链路,首先将数据发送至中继卫星,继而通过中继卫星发送至地面站,以此提升数据的整体回传表现。已有工作指出,设计此类链路必须重点考虑多普勒效应、指向误差以及大气湍流效应这三类关键问题。首先,不同于地面站终端所具备的高稳定性,无人机作为通信终端时会不可避免地引入不同程度的指向误差。其次,当无人机作为通信终端时,无人机与人造卫星之间无法保持相对静止,研究者必须充分考虑两者之间的相对运动所引入的多普勒效应。在上行链路方面, Li 等通过卷积方法获得了由指向误差与波束漂移效应所导致的波束中心偏移的联合概率分布。在下行链路方面,提出了与传统空地链路类似的数学模型。图 8 给出了无人机与人造卫星间光下行链路、上行链路以及多普勒效应的示意图^[36]。

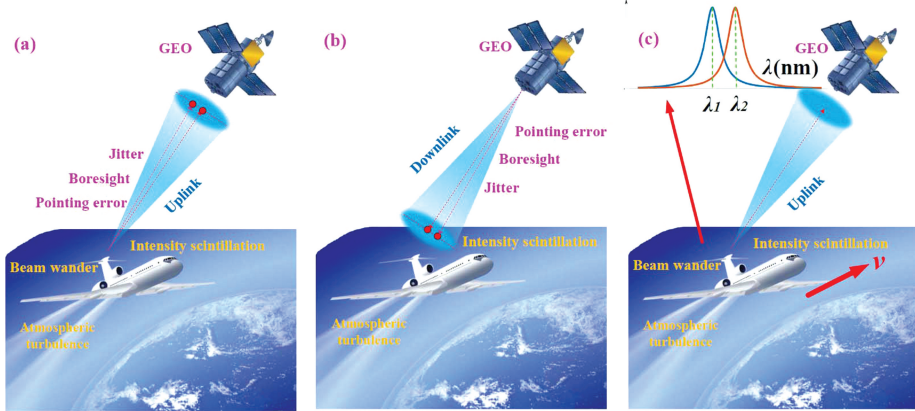


图 8 无人机与人造卫星间光下行链路、上行链路以及多普勒效应的示意图^[36]

Fig. 8 Illustrations of the optical uplink, optical downlink and the Doppler effects between UAV and satellite^[36]

在实验测试上,早在 2006 年,Cazaubiel 等就开展了有针对性的验证试验。据相关文献,可知在高度为 4×10^7 m 的无人机与卫星间光无线链路条件下, Li 等^[36]实现了 2 Mb/s 的上行链路,同时实现了 50 Mb/s 的下行链路。上述实验初步证实了无人机与卫星间光无线链路的可用性。

4.2 高空平台类无人系统

HAP 是指类似于飞艇的准静态飞行器,此类飞行器,其内部通常由氦气进行填充,持续运行于平流层。高空平台所在的高度要明显高于民航航线喷射气流以及云层所在的高度,同时又远低于在轨人造卫星所在的高度。一般来说,在远端或自动遥控下, HAP 会逆风或者遵循环形路径飞行,因此也被认为

是一种广义上的无人机系统。相较于常规意义上的无人机, HAP 具备更为突出的载荷能力和可用动力, 分别可以达到 2000 kg 和 10~15 kW; 而受制于移动性的约束, 即便是高性能无人机, 其载荷容量也被限制在 50~300 kg, 可用动力也仅为 3 kW。基于 HAP 的通信系统整合了传统陆地通信和卫星通信的各自优点。一方面, 避免了地面阴影效应的影响, 可以同时为直径 200~500 km 的区域范围提供信号; 另一方面, 在部署周期、技术难度以及成本造价上又远优于卫星通信^[36]。图 9 给出了 HAP 激光通信场景示意图。在具体研究进展上, Perlot 等^[38]开展了 HAP 与人造卫星之间光信道特性的研究, 考虑了大气湍流以及云层遮挡对链路所引入的影响。

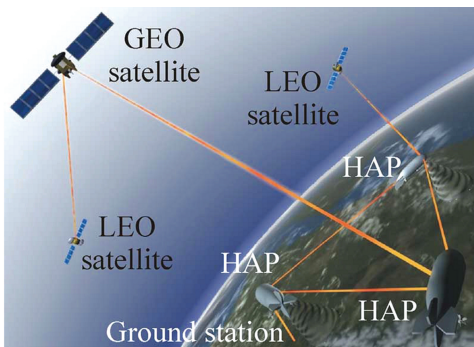


图 9 HAP 激光通信场景^[36]

Fig. 9 Laser communication scenarios from HAPs^[36]

在具体实现上, Fidler^[39]讨论了速率达到 10.7 Gb/s 情况下, 借助 1550 nm 波长实现此类光通信链路的灵活性。结果显示, 所提出的系统方案借助外调制归零开关控 (RZOOK) 以及 10 W 输出功率的掺铒光放大器可使链路中断概率优于 10^{-12} , 同时使误比特率维持在 10^{-9} 左右。此外, HAP 作为人造卫星与地面终端间的中继节点, 可以

显著降低人造卫星上的处理负担, 降低发射功率以及接收器灵敏度指标, 为整体链路预算带来增益。

5 比较分析与趋势展望

目前, 国内外的研究人员相继开展了机载光无线通信链路的性能仿真及实验实现。表 1 给出了典型无人机机载光无线链路的指标参数比较。通过比较表 1 中的内容可知, 目前空对空型链路以及空对卫星 (A2S) 型链路的工作还相对有限, 绝大多数研究工作中的链路类型为空对地链路, 选用最多的光波长为 1550 nm, 信道类型也多为自由空间光 (FSO) 信道。在传输速率上, 固定翼型无人机由于其在载荷上的优势, 通常能实现 Gb/s 级别的传输表现。在米级别短距离 A2G 链路方面, 综合考虑飞行灵活性、造价、尺寸、功耗等因素, 研究人员更倾向于选择多转子无人机作为基础机载平台。同时由于链路距离显著缩短, 发端所发出的光信号不再需要经历大气湍流、大气散射、波束漂移等传统长距离衰落效应。因此, 为降低安全风险, 增大链路覆盖, 研究人员将此类链路发端光源也替换为红外或者可见光 LED。在此类链路的数值仿真中, 相应的信道类型也通常被替换为朗伯型光无线通信 (LOWC) 信道。

同时, 必须指出现有的研究工作尚存在明显的局限性。一些制约机载光无线链路的关键问题以及潜在解决方案还有待深入的讨论。在链路容量上, 现有的研究范式很大程度上仍然局限在单波长链路的配置上, 对丰富的光谱资源有待充分挖掘。在传统光纤通信以及陆地 FSO 通信系统中, 波分复用 (WDM) 通过在同一光信道中传输不同光载波的光信号, 成倍地提升了链路容量。在兼顾无人机载荷能力的前提下, 此类多波长的链路配置可以引入机载光无线领域, 以期获得显著的容量增益。

表 1 无人机机载光无线链路指标参数比较

Table 1 Comparison of performance & parameters for UAV airborne optical wireless links

UAV type	Link type	Distance	Channel	Wavelength	Data rate	Work type	Reference
Fixed-wing	A2G	1~20 km	FSO	1550 nm	multi Gb/s	Simulation	[15]
Fixed-wing	A2G	300 m	FSO	850 nm	—	Simulation	[14]
—	A2G	50 m	FSO	1590 nm	1.25 Gb/s	Experiment	[24]
Multi-rotor	A2G	100 m	FSO	1550 nm	40 Gb/s	Experiment	[22]
—	A2G	6.76 km	FSO	940 nm	1.25 Gb/s	Experiment	[23]
Multi-rotor	A2G	~10 m	LOWC	White light	10 Mb/s	Simulation	[19]
Multi-rotor	A2G	~20 m	LOWC	White light	~10 Mb/s	Simulation	[20]
Multi-rotor	A2G	20 km	FSO	1550 nm	1.13 Gb/s	Simulation	[18]
Multi-rotor	A2A	500 m	FSO	1550 nm	~1 Gb/s	Simulation	[33]
Multi-rotor	A2A	4~5 m	LOWC	850 nm	3 Mb/s	Experiment	[32]
Fixed-wing	A2S	~36000 km	FSO	1550 nm	1.8 Gb/s	Simulation	[36]

另一方面,可以尝试引入 MIMO 技术,来提升链路的可靠性及频谱效率。目前,现有的研究工作中通常采用单输入单输出(SISO)的收发端配置,即仅有一个光源发射器,一个光电探测器。一旦收发端链路受到湍流、波束漂移、遮挡等不利因素的影响,传输表现将会急剧劣化甚至出现链路中断。通过在发端引入多个光源发射器,在接收端引入多个光电探测器,在收发端之间可以客观地构建起多条空间链路。即便某一条链路出现表现劣化,由于其他链路的存在,整体传输表现仍然是相对可靠的,故在很大程度上可以避免链路中断情况的出现。与此同时,通过引入空时编码、奇异值分解等空间复用算法,可以在不同收发链路上传输不同内容的数据流,从而提升 MIMO 机载无线光链路的频谱效率。

在光源的选取和表征方面,现有的短距离机载无线光技术仍沿用传统光无线通信的光波束模型,即将光源简单地表征为传统 LED 朗伯光源。实际上,很多 LED 厂商借助封装、加装二次光学透镜等技术,已经能够对 LED 所发出的光波束进行二次塑形,从而获得非朗伯,甚至是定制化的光波束效果。介于上述产业基础,在机载无线光链路设计过程中,可以尝试引入非朗伯光源,从而在光波束维度构造多样化的链路选项,以期通过波束切换技术,提升链路的传输能效。

在现阶段,部分链路数值仿真中的假设条件还过于理想化。研究人员对于一些主导机载无线光链路表现的实际因素,缺少充分的表征。特别是在 A2G 短距离光无线链路中,一些研究人员假设无人机能够调整机载光源的空间朝向,使光源始终指向地面接收端的空间方位。实际上,无人机必须通过实时测量或者上行链路反馈,才能获知地面接收端的位置信息或者信道的状态信息。通过何种方式进行测量,采用何种上行链路进行反馈、测量,以及如何提高反馈的实时性及准确性等都有待深入地讨论。在接下来研究中,上述问题解决方案的合理化程度将极大地影响此类系统的实用化进程。

6 结束语

光无线通信技术具有可用光谱资源丰富、定向性强、传输容量高以及抗射频电子干扰等诸多优点。将光无线通信技术引入到无人机领域,可显著提升各类无人机数据传递的承载能力。随着学术界及产业界对该领域研究的深入,针对无人机与卫星之间、无人机与无人机之间以及无人机与陆上终端间的信

道模型和链路特性被针对性地提出和讨论。特别地,随着更多使能技术研究和实验验证工作的开展,光无线通信在无人机领域的应用潜能必将得到史无前例地释放。可以预见,在低空无人机机群协作和突发应急通信领域,无人机光无线通信技术在空间位置灵活性和吞吐回传能力上将发挥难以替代的独特效用。

参 考 文 献

- [1] Li X, Zhang R, Hanzo L. FSO-based vertical backhaul/fronthaul framework for 5G + wireless networks [J]. IEEE Transactions on Communications, 2015, 63(4): 1319-1329.
- [2] Hanzo L, Haas H, Imre S, et al. Wireless myths, realities, and futures: from 3G/4G to optical and quantum wireless [J]. Proceedings of the IEEE, 2012, 100: 1853-1888.
- [3] Song X Q, Wang M Y, Xing S, et al. Progress of orthogonal frequency division multiplexing based on visible light communication[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(12): 120008.
宋小庆, 王慕煜, 邢松, 等. 基于可见光通信的正交频分复用技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(12): 120008.
- [4] Jia K J, Zhang S Q. Influence of multiuser interference on performances of direct-current-biased optical orthogonal frequency division multiplexing code division multiple access system for visible light communication [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(11): 110604.
贾科军, 张守琴. 多用户干扰对可见光通信直流偏置光正交频分复用码分多址系统性能的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(11): 110604.
- [5] Yang Y F, Jiang M Z, Zhang Y, et al. Design of full duplex visible light communication system based on single light source [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(1): 010603.
杨玉峰, 蒋明争, 张颖, 等. 基于单光源的全双工可见光通信系统设计[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(1): 010603.
- [6] You C X, Hu Q S, Li S D, et al. Light source distribution for visible light communication in coal mine working face based on position and power co-optimization[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(4): 0406001.
游春霞, 胡青松, 李世党, 等. 基于位置和功率协同优化的煤矿工作面可见光通信光源分布[J]. 中国激

- 光, 2019, 46(4): 0406001.
- [7] Chen Y, Shen Q X, Liu H L. Optimization algorithm of receiver optical power uniformity in indoor visible light communication [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(5): 0506003.
陈勇, 沈奇翔, 刘焕淋. 室内可见光通信中接收光功率均匀性优化方法[J]. 中国激光, 2018, 45(5): 0506003.
- [8] Haas H, Yin L, Wang Y L, et al. What is LiFi? [J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(6): 1533-1544.
- [9] Ding J, Chih-Lin I, Xu Z. Indoor optical wireless channel characteristics with distinct source radiation patterns [J]. IEEE Photonics Journal, 2016, 8(1): 1-15.
- [10] Ding J, Chih-Lin I, Zhang C, et al. Evaluation of outdoor visible light communications links using actual LED street luminaries [M] // Zhou J. Biometric Recognition. CCBR 2018. Cham: Springer, 2018, 10996: 572-579.
- [11] Zhao Z P, Zhang Z K, Tan J, et al. 200 Gb/s FSO WDM communication system empowered by multiwavelength directly modulated TOSA for 5G wireless networks [J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10(4): 1-8.
- [12] Huang X J, Zhang J A, Liu R P, et al. Airplane-aided integrated networking for 6G wireless: will it work? [J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2019, 14(3): 84-91.
- [13] Yang Y, Chen M Z, Guo C L, et al. Power efficient visible light communication (VLC) with unmanned aerial vehicles (UAVs) [EB/OL]. (2019-05-10) [2020-04-27]. <https://arxiv.org/abs/1905.04200>.
- [14] Dong Y J, Hassan M Z, Cheng J L, et al. An edge computing empowered radio access network with UAV-mounted FSO fronthaul and backhaul: key challenges and approaches [J]. IEEE Wireless Communications, 2018, 25(3): 154-160.
- [15] 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.
- [16] Yokota N, Yasaka H, K. Sugiyasu, et al. Motion tolerance for dynamic object recognition using visible light IDs [C] // IEEE 7th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE), October 12, 2018, Nara, Japan. New York: IEEE Press, 2018: 702-703.
- [17] Wu D, Sun X, Ansari A N. An FSO-based drone assisted mobile access network for emergency communications [J]. IEEE Transactions on Network Science and Engineering, 2020, 7(3): 1597-1606.
- [18] Dautov K, Kalikulov N, Kizilirmak R C. The impact of various weather conditions on vertical FSO links [C] // 2017 IEEE 11th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT), September 20-22, 2017, Moscow, Russia. New York: IEEE Press, 2017: 1-4.
- [19] Cruz P J, Fierro R. Towards optical wireless communications between micro unmanned aerial and ground systems [C] // 2015 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), June 9-12, 2015, Denver, CO, USA. New York: IEEE Press, 2015: 669-676.
- [20] Amantayeva A, Yerzhanova M, Kizilirmak R C. UAV location optimization for UAV-to-vehicle multiple access channel with visible light communication [C] // 2019 Wireless Days (WD), April 24-26, 2019, Manchester, United Kingdom. New York: IEEE Press, 2019: 1-4.
- [21] Ukida H, Miwa M, Tanimoto Y, et al. Visual UAV control system using LED panel and on-board camera [C] // 2013 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), May 6-9, 2013, Minneapolis, MN, USA. New York: IEEE Press, 2013: 1386-1391.
- [22] Li L, Zhang R Z, Liao P C, et al. MIMO equalization to mitigate turbulence in a 2-channel 40-gbit/s QPSK free-space optical 100-m round-trip orbital-angular-momentum-multiplexed link between a ground station and a retro-reflecting UAV [C] // 2018 European Conference on Optical Communication (ECOC), September 23-27, 2018, Rome, Italy. New York: IEEE Press, 2018: 1-3.
- [23] An J X, He X L, Yang Q Y, 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.
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.
- [24] Yeo C I, Heo Y S, Kang H S, et al. Common-path optical terminals for Gbps full-duplex FSO communications between a ground and UAVs [C] // Laser Congress 2019 (ASSL, LAC, LS&C), Vienna. Washington, D. C.: Optical Society of

- America, 2019: 1-2.
- [25] Ramdhan N, Sliti M, Boudriga N. Codeword-based data collection protocol for optical Unmanned Aerial Vehicle networks [C] // 2016 HONET-ICT, October 13-14, 2016, Nicosia, Cyprus. New York: IEEE Press, 2016: 35-39.
- [26] Ramdhan N, Sliti M, Boudriga N. A tree-based data collection protocol for optical unmanned aerial vehicle networks [J]. *Computers & Electrical Engineering*, 2018, 66: 80-97.
- [27] Mohammad T D, Seyed M S, Imran S A, Tractable optical channel modeling between UAVs [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68 (12): 11543-11550.
- [28] Kaadan A, Refai H H, Lopresti P G. Multi-element FSO transceivers alignment for inter-UAV communications [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32 (24): 4785-4795.
- [29] Chen Y, Wang X, Zhao S H, et al. Research on the performance of UAV aerial OFDM optical communication link [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2018, 39(6): 853-857, 862.
陈阳, 王翔, 赵尚弘, 等. 无人机空中 OFDM 光通信链路性能研究 [J]. *半导体光电*, 2018, 39(6): 853-857, 862.
- [30] Heng K H, Zhong W D, Cheng T H, et al. Beam divergence changing mechanism for short-range inter-unmanned aerial vehicle optical communications [J]. *Applied Optics*, 2009, 48(8): 1565-1572.
- [31] Chlestil C, Leitgeb E, Schmitt N P, et al. Reliable optical wireless links within UAV swarms [C] // 2006 International Conference on Transparent Optical Networks, June 18-22, 2006, Nottingham, UK. New York: IEEE Press, 2006: 39-42.
- [32] Kaadan A, Refai H H, LoPresti P G. On the development of modular optical wireless elements (MOWE) [C] // 2015 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps), December 6-10, 2015, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2015: 1-7.
- [33] Dabiri M T, Sadough S M S, Khalighi M A. Channel modeling and parameter optimization for hovering UAV-based free-space optical links [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2018, 36(9): 2104-2113.
- [34] Kaadan A, Zhou D Y, Refai H H, et al. Modeling of aerial-to-aerial short-distance free-space optical links [C] // 2013 Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference (ICNS), April 22-25, 2013, Herndon, VA, USA. New York: IEEE Press, 2013: 1-12.
- [35] Sanchez C, Paul S, Sebald J. Lower power antenna design for free space optical communications inside the ariane 5 VEB [C] // IEEE International Conference on Wireless for Space and Extreme Environments (WISEE), October 16-18, 2019, Ottawa, ON, Canada. New York: IEEE Press, 2019: 19222355.
- [36] Li M, Hong Y F, Zeng C, et al. Investigation on the UAV-to-satellite optical communication systems [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2018, 36(9): 2128-2138.
- [37] Fidler F, Knapek M, Horwath J, et al. Optical communications for high-altitude platforms [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2010, 16(5): 1058-1070.
- [38] Perlot N, Duca E, Horwath J, et al. System requirements for optical HAP-satellite links [C] // 2008 6th International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing, July 25-25, 2008, Graz, Austria. New York: IEEE Press, 2008: 72-76.
- [39] Fidler F. Optical backhaul links between HAPs and satellites in the multi-gigabit regime [C] // 2008 IEEE Globecom Workshops, November 30 - December 4, 2008, New Orleans, LA, USA. New York: IEEE Press, 2008: 1-5.