

空天地一体化无线光通信网络关键技术 及其发展趋势

赵雄文^{1,2}, 张 钰^{1,2}, 秦 鹏^{1,2}, 王晓晴^{1,2}, 耿绥燕^{1,2}, 宋俊元^{1,2}, 刘 瑶^{1,2}, 李思峰^{1,2}

(1. 华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206;
2. 华北电力大学河北省电力物联网技术重点实验室, 河北保定 071003)

摘 要: 构建空天地一体化信息网络是第六代通信系统(the Sixth Generation, 6G)的重要目标, 无线光通信相较于射频(Radio Frequency, RF)通信技术具有容量大、速率高、抗干扰能力强等优势, 已成为建立全球无缝覆盖空间网络的重要技术. 本文综述了基于自由空间光通信(Free Space Optical Communication, FSOC)的空天地一体化网络国内外建设及相关标准化现状, 相较于现有综述文献, 涵盖了更多最新研究工作, 并针对物理层和上层指出一体化FSOC网络设计需要关注的重要因素, 对大气信道建模、“捕获、瞄准和跟踪”(Acquisition Pointing and Tracking, APT)、拓扑控制、路由、资源分配、可靠传输协议、微波协作传输几种重要通信技术进行总结和分析, 并指出其未来发展趋势和面临的挑战.

关键词: 空天地一体化自由空间光通信网络; 信道建模; APT; 拓扑控制; 路由; 资源分配; 可靠传输协议; 微波协作传输

中图分类号: TN929.12 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112(2022)01-0001-17
电子学报URL: <http://www.ejournal.org.cn> DOI: 10.12263/DZXB.20210690

Key Technologies and Development Trends for a Space-Air-Ground Integrated Wireless Optical Communication Network

ZHAO Xiong-wen^{1,2}, ZHANG Yu^{1,2}, QIN Peng^{1,2}, WANG Xiao-qing^{1,2}, GENG Sui-yan^{1,2}, SONG Jun-yuan^{1,2},
LIU Yao^{1,2}, LI Si-feng^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. Hebei Key Laboratory of Power Internet of Things Technology, North China Electric Power University, Baoding, Hebei 071003, China)

Abstract: Space-air-ground integrated information network has become a key target of building the six generation(6G) communication system. Compared to radio frequency(RF) technology, wireless optical communication has the advantages of large capacity, high data rate and strong anti-interference ability, which makes it becomes an indispensable technology to establish a global seamless coverage network. In this paper, the research progress and standardization for free space optical communication(FSOC) based space-air-ground integrated information networks were presented, which cover more recent research work compared with the existing literature reviews. The critical factors of physical and upper layer in designing integrated FSOC networks were also discussed. Several important communication technologies such as atmospheric channel modeling, APT(Acquisition, Pointing and Tracking), topology control, routing, resource allocation, reliable transmission protocol, and microwave cooperative transmission were summarized and analyzed, and their future development trends and challenges were pointed out.

Key words: space-air-ground integrated free space optical communication network; channel modeling; acquisition, pointing and tracking(APT); topology control; routing; resource allocation; reliable transmission protocol; microwave cooperative transmission

收稿日期: 2021-05-29; 修回日期: 2021-08-05; 责任编辑: 王天慧

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(No.61931001); 国家自然科学基金(No.61771194); 新能源电力系统国家重点实验室开放课题(No. LAPS21018); 中央高校科研基金(No.2021MS002)

1 引言

空天地一体化信息网络是实现信息全球覆盖、高速传输、自由互联的必由之路^[1],是未来6G网络架构研究的核心方向之一^[2].一体化网络需承担骨干网、接入网等宽带信息的传输,最高传输宽带需求达到40~100 Gbps^[3].在此背景下,传统射频(Radio Frequency, RF)通信技术难以满足空天地一体化信息网络对更大传输容量、更高传输速率、更远传输距离及更高等级信息安全等的要求,而无线光通信具有信息容量大、传输速率高、无需频谱执照、抗干扰能力强、安全性高、光学元件体积小功耗低、施工简单等优势,已逐渐成为建设空天地一体化信息网络的重要技术手段,引起了世界范围内的广泛关注^[4].

构建空天地一体化全光信息网是无线光通信技术的发展趋势.由卫星组成的基于激光链路的骨干网络使得地球上的用户可以随时随地享受高速宽带无线接入服务.卫星光链路通常具有10 Gbps以上的传输速率,可以克服距离障碍,实现包括地面、高空平台在内的任意两点之间的高速通信,达到全球无缝覆盖,并可与成熟的地面有线光纤网络互连互通,构成空天地一体化全光通信系统.此外,天基和陆基光网络可互为备份,当二者之一因外部攻击或自然灾害等损毁时,可由另一方提供连接通路进行数据传输,增强了网络的鲁棒性与抗毁性.当无人机、飞艇等远离地面独立执行任务时,通过天基光网络的中继,可以克服传统射频通信不稳定和易受干扰的问题,实现移动节点之间以及节点和地面网络之间的稳定可靠通信.

无线光通信可分为室内和室外两类,其中室外无线光通信又被称作自由空间光通信(Free Space Optical Communication, FSOC)^[5],包括建筑物到建筑物、卫星到地面、卫星到卫星、卫星到机载平台(无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)或气球)等链路.由于空天地一体化网络中的链路多暴露于室外环境,因此本文重点研究基于FSOC的空天地一体化网络(以下简称“空天地一体化FSOC网络”).部署空天地一体化FSOC网络,首先要确保物理层单跳链路的性能.大气湍流和波束对准是影响无线光链路可靠性的两个重要因素.文献[6]研究发现天气湍流强烈影响FSOC通信链路的质量.收发机之间光束同步对准采用捕获、瞄准和跟踪(Acquisition, Pointing and Tracking, APT)技术实现,而无线光信号的窄波束特性以及卫星、机载平台等节点的高速移动都对APT技术提出了很大的挑战.其次需重点关注上层关键技术.空天地一体化FSOC网络结构组成复杂、拓扑动态变化、跨越空间尺度大,无法直接沿用传统无线RF网络中的上层通信技术,需重新设计,提出拓扑控制、路由选择等技术方案,最大限度弥

补FSOC链路特性的不足,适应空天地一体化组网架构.目前,大量研究工作集中于提升FSOC单跳链路性能,FSOC网络上层关键技术的研究工作多数着眼于地面光网络或者卫星光网络,尚未形成针对空天地一体化FSOC网络的解决方案.

本文综述了空天地一体化FSOC网络的研究现状、标准化情况、设计因素以及关键挑战,讨论了物理层和上层的关键通信技术及其未来的发展趋势与挑战.在已发表的FSOC综述性论文中,文献[7]分析了FSOC信道在时间和空间上的局限性,总结了相关缓解方案;文献[8]讨论了FSOC系统视距与非视距场景中各类APT技术;文献[9]对FSOC室内、室外、深空、水下等链路进行了细致的分类,提出了一套分类架构,为FSOC系统标准化工作提供参考.以上工作均集中于物理层,本文相较于现有综述文献涵盖了最新的研究工作,且着重从物理层之上审视空天地一体化FSOC网络建设面临的主要挑战,将有助于研究人员发现新的网络问题,为空天地一体化FSOC网络开发有效的解决方案.

本文其余部分组织如下.第2节给出了空天地一体化FSOC网络整体架构,梳理了国内外研究现状和自由空间激光通信典型代表试验及参数,分析了通信及宇航届对FSOC网络的标准化现状,并讨论了一体化FSOC网络应用场景.第3节研究了空天地一体化FSOC网络中的关键设计因素.第4节讨论了空天地一体化FSOC网络的物理层及上层关键技术,指出了各项技术面临的挑战及其发展趋势.第5节对全文进行了总结.

2 空天地一体化FSOC网络发展现状

空天地一体化FSOC网络系统架构如图1所示,包括卫星骨干网络、平流层通信网、地面网络以及各层网络之间的信息传输链路.其中地面用户终端可以通过平流层网络或卫星骨干网接入空天地一体化网络,获取信息服务.平流层网络由UAV、飞机、飞艇等各种飞行器构成,可在地面网络出现故障或网络繁忙时,自行组网编队进行应急通信,也可在战时对飞行器、导弹等进行精准监控.卫星骨干网由多颗分布在不同轨道的卫星节点和星间链路组成,集数据网、管理网、通信网功能于一体,能够对各类数据进行处理、储存、交换、传输,并管理空天地一体化网络中的各个子网,实现子网之间的通信.本节针对空天地一体化FSOC网络的国内外发展现状和相关标准化情况进行了总结与分析.

2.1 国内外研究现状

美国、欧洲、俄罗斯、日本等国家对于空天地一体化FSOC技术的研究起步较早.其中美国是最早启动该领域研究的国家,主要研究机构包括美国宇航局

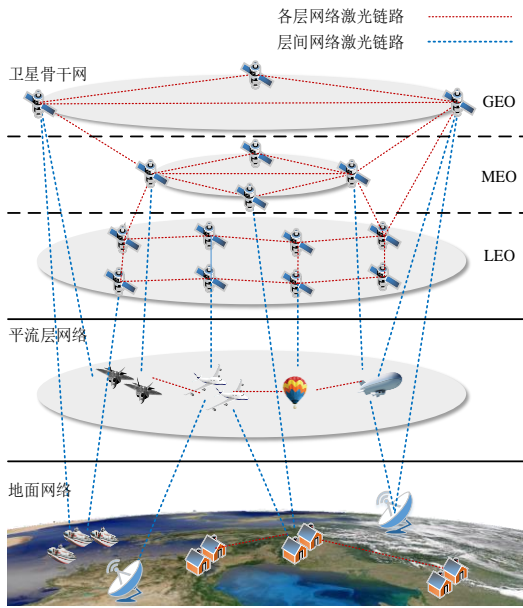


图1 空天地一体化FSOC网络架构

美国空军研究实验室 (Air Force Research Laboratory, AFRL) 和战略导弹防御组织 (Ballistic Missile Defense Organization, BMDO) 等, 提出了 Iridium 铱星系统、Globalstar、WGS (World Geodetic System)、AEHF (Advanced Extremely High Frequency)、OneWeb、Kuiper 等主要空间信息网络建设项目^[10]. 欧洲主要研究机构包括欧洲航天局 (European Space Agency, ESA)、德国航空航天中心 (Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt, DLR)、法国国防部采办局 (Direction Générale de l'Armement, DGA) 等, 在空天地一体化的仿真和测试方面取得了一系列突破性成果. 日本在该领域起步稍晚, 但研究速度快, 投入力度大, 在星地、星间通信方面取得了令人瞩目的成果, 主要研究机构包括日本宇宙航空研究开发机构 (Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA)、通信综合研究所 (Communications Research Laboratory, CRL) 等^[11]. 自 20 世纪 70 年代以来, 国外相继对空间中各种通信链路展开了激光通信试验, 涵盖空天地一体化架构中各层网络及层间的通信链路, 典型代表试验及参数指标统计如表 1 所示^[10-15].

(National Aeronautics and Space Administration, NASA)、

表 1 国外自由空间激光通信典型代表试验及参数指标统计

链路类型	项目	搭载终端	国家或地区	时间	通信速率	通信距离
星地	LCE ^[11]	ETS-VI 卫星-地面站	日本	1995 年	1.024 Mbps	/
	LCTSX ^[10]	TerraSAR-X 卫星-夏威夷地面站	德国	2009 年	5.65 Gbps	>500 km
	SLS ^[10]	ISS 空间站-北高加索地面站	俄罗斯	2012 年	125~622 Mbps	1000 km
	OPALS ^[10]	ISS 空间站-怀特伍德地面站	美国	2014 年	50 Mbps	>400 km
	OCSD ^[12]	OCSD-2(1.5U)卫星-地面站	美国	2017 年	上行 10 kbps, 下行 5~200 Mbps	/
星间	SILEX ^[10,11]	Artemis 卫星-SPOT4 卫星	欧洲	2001 年	50 Mbps	40000 km
	LCTSX ^[10]	TerraSAR-X 卫星-NFIRE 卫星	德国、美国	2008 年	5.65 Gbps	5000 km
	EDRS ^[12]	EDRS-A 卫星-LEO 卫星	欧洲	2016 年	1.8 Gbps	45000 km
星空	LOLA ^{[10],[13]}	Artemis 卫星-神秘 20 飞机	法国	2006 年	50 Mbps	38000 km
	ALCOS ^[13,14]	GEO 卫星-MQ-9 Reaper“死神”无人机	美国	2017 年	1.8 Gbps	36000 km
空空	HAVE LACE ^[13]	T39 飞机-飞机	美国	1998 年	1 Gbps	50~500 km
	FALCON ^[10,13]	DC-3 飞机-飞机	美国	2010 年	2.5 Gbps	132 km
空地	HAVE LACE ^[13]	T39 飞机-地面站	美国	1996 年	1 Gbps	20~30 km
	FOCAL ^[13]	Twin Otter 飞机-地面端机	美国	2009 年	2.5 Gbps	25 km
	ARGOS ^[10,13]	Do-228 飞机-地面站	德国	2010 年	1.25 Gbps	10~100 km
地地	LLCD ^[15]	山顶-山顶	美国	2000 年	400 Mbps	45 km
	/ ^[10]	La Palma 岛-Tenerife 岛	德国	2005 年	5.6 Gbps	/

我国空天地一体化 FSOC 技术的研究起步于 21 世纪初, 主要研究机构包括武汉大学、长春理工大学、西安理工大学、中科院等^[16]. 2002 年, 中科院成都光电所率先推出了一款无线激光通信系统样机, 可实现 10 Mbps 的传输速率^[17]. 2008 年, 以文献^[18]为代表的高速大气激光通信课题组开发出一款 FSOC 试验原型机, 实现了 16 km 传输距离与 2.5 Gbps 速率的高速地面激

光通信. 2011 年, “海洋二号”成功开展星地之间高速激光通信试验, 并实现了 504 Mbps 的传输速率, 标志着我国 FSOC 取得了实质性进展^[19]. 2017 年, “实践十三号”卫星成功发射, 其通信总容量高达 20 Gbps, 标志着我国卫星通信进入高通量时代^[20]. 中国航天科技集团和科工集团分别提出“鸿雁”和“虹云”未来星座规划. 其中“鸿雁”由 300 颗低轨道小卫星组成, 计划实现“沟通

连接万物、全球永不失联”,并于2018年成功将首颗试验星送入预定轨道;“虹云”星座计划发射156颗卫星,并于2018年在酒泉卫星发射中心成功发射首星进入预定轨道.表2总结了国内主要自由空间光通信试验及相关参数^[10,21,22].

综上所述,国内外对星地、星间、空地、地地等链路

开展了一系列激光通信实验,积累了大量的理论技术方法和工程实现手段,为未来空天地一体化FSOC链路组网提供了支持.但目前国内外的空天地一体化FSOC网络仍处于发展阶段,整体架构尚未成型,一体化组网涉及的物理层和上层关键技术有待研究.

表2 国内自由空间激光通信典型代表试验及参数指标统计

链路类型	搭载平台	单位	时间	速率	通信距离
星地	空间站-地面	武汉大学	2016年	1.6 Gbps	400 km
	墨子号-地面	中国科学院上海光学精密机械研究所	2016年	5.12 Gbps	2000 km
	实践13-地面	哈尔滨工业大学	2017年	4.8 Gbps	40000 km
	实践20-地面	中国航天科技集团有限公司五院	2020年	10 Gbps	/
空潜	船-水下	中国科学院上海光学精密机械研究所	2010年	10 kbps	125 m
	飞机-水下	中国科学院上海光学精密机械研究所	2016年	/	3110 m
空地	飞艇-船	长春理工大学	2011年	1.5 Gbps	20.8 km
	无人机-地面	中国电子科技集团第三十四研究所	2017年	1.25 Gbps	6.7 km
空空	直升机-直升机	长春理工大学	2011年	1.5 Gbps	17.5 km
	两运12飞机之间	长春理工大学	2013年	2.5 Gbps	144 km
地地	地-地	中国电子科技集团第三十四研究所	2000年	155 Mbps	26 km
	船-地	长春理工大学	2007年	300 Mbps	20.4 km
	地-地	武汉大学	2010年	7.5 Gbps(三路波分复用)	40 km
	地-地	中国电子科技集团第三十四研究所	2014年	2.5 Gbps	5 km
	地-地	西安理工大学	2017年	/	5.2 km

2.2 标准化现状

国际电信联盟(International Telecommunication Union, ITU)以及宇航机构联盟空间数据系统咨询委员会(Consultative Committee for Space Data Systems, CCSDS)等组织针对FSOC制定了相关标准,但主要面向空、天、地各层网络中的点到点链路,很少涉及跨层组网. ITU对地地、星地链路给出了设计建议,其中,ITU-T G. 640^[23]提供了FSOC系统并置纵向兼容接口串音防卫度的计算方法;ITU-R P. 1814^[24]和ITU-R P. 1817^[25]提供了大气吸收、散射等衰减因素及FSOC功率的计算方法;ITU-R F. 2106^[26]针对固定业务的FSOC系统,从系统参数、链路参数、链路余量等角度给出了设计方案;ITU-R P. 1621^[27]和ITU-R P. 1622^[28]提供了工作在

20~375 THz空地链路大气相干长度的计算方法.

2012年,NASA、ESA等宇航局组织的机构间业务咨询小组(Interagency Operations Advisory Group, IOAG)旗下光链路研究小组(Optical Link Study Group, OLSG)发布了IOAG. T. OLSG. 2012. V1^[29]报告书,主要涵盖了FSOC链路的人体安全、运营商共享、天气预测、航天器干扰与躲避、重传控制、链路设计、调制编码以及捕获、APT等技术,并向CCSDS提出了制定标准化文件的建议.基于OLSG的系列报告,CCSDS发布了CCSDS 141. 0-B-1^[30]以及CCSDS 142. 0-B-1^[31],分别对物理层及数据链路层中的同步及编码问题进行规范.此外,OLSG的报告^[32]指出,必须为物理层建立新的标准,而网络层、传输层、应用层等以重用现存标准为主.表3总结了FSOC相关的报告、标准化文件情况.

表3 FSOC相关标准化文件建议情况

文件	链路类型	波长/频率	信道	系统共存	最大功率	调制	编码	同步
ITU-T G. 640	/	√	√	√				
ITU-R P. 1814&P. 1817	地面		√					
ITU-R F. 2106	/		√					
ITU-R P. 1621&P. 1622	星地		√					
IOAG. T. OLSG. 2012. V1& V1A	星间/星地	√	√	√	√	√	√	
CCSDS 141. 0-B-1	星间/星地	√				√		
CCSDS 142. 0-B-1	星间/星地						√	√

2.3 应用场景

空天地一体化FSOC网络具有广泛的应用场景,主要包含以下几种情况。

(1)应急通信. 自然灾害中,地面网络极易损毁,导致通信中断无法及时救援. 空天地一体化组网架构是保障应急通信的有效手段. 卫星通信覆盖面广,UAV、气球等空中平台组网灵活,受地理环境影响小,可在地面网络中断时为抢险救灾提供快速调度通道,及时恢复灾区通信。

(2)军事通信. 应对未来信息化战争,必须将海、陆、空、天连为一体,FSOC固有的窄波束、高定向性以及抗电磁干扰能力使其非常适用于高保密性要求的军事通信系统. 中电34所采用FSOC系统为我国首次海上发射火箭提供了通信保障^[33]. 广州军区试装适用于野战机动通信的大气激光通信机,揭开了野战激光通信的序幕^[34]. 文献[4]搭建了天地一体化光网络的分析验证仿真平台,实现了在战时子系统下卫星与地面的快速组网及业务低阻塞率传输。

(3)行业生产管控. 利用空天地一体化FSOC网络,可以实现诸如海上钻井平台、远洋货船和偏远地区的矿区等光纤不可到达地区的生产管控,为跨国生产基地提供低时延境外数据通信服务,将境外生产基地的数据回传到国内集团统一管理,并为生产企业提供整体化网络解决方案。

3 空天地一体化FSOC网络设计关键因素

本节探讨构建空天地一体化FSOC网络需考虑的关键因素,分析这些因素对网络性能的影响,并指出相应的技术研发、算法和协议设计需求。

3.1 大气信道特性

星地、空地、空空、地地链路中,激光信号经过大气信道会产生吸收、散射损耗和湍流效应. 吸收、散射由光子与气体分子或气溶胶相互作用导致,大气的温度、气溶胶浓度、随高度变化的压强都会影响光信号衰减程度. 吸收和散射损耗与光波长有关,当波长低于 $1\ \mu\text{m}$ 时,散射损耗更加明显,可通过合理选择传输窗口减少光信号在大气中传播的损耗. 大气湍流是指大气温度和压强的微小变化引起的折射率的随机变化,产生大小和折射率不同的涡流. 当光束通过这些涡流时会产生光强起伏(闪烁)、光束随机漂移、光束扩展、到达角起伏等大气湍流效应^[35],严重影响通信性能. 大气湍流是限制FSOC链路性能最主要的因素^[36]. 因此,准确认知大气湍流规律,建立大气信道模型,对充分了解光信号在大气中的传播特性十分重要。

3.2 链路可靠性

窄光束、收发端快速移动、收发设备精度、障碍物、

天空辐射和背景噪声等都会降低FSOC链路可靠性. 窄光束增大了收发机对准难度,加之光束本身具有发散特性,接收机的视场又有限,会引起链路损耗甚至中断. 收发端的移动性增大了FSOC链路的预测难度. 星间链路不受大气和天气的影响,但也面临着卫星站稳定性、多普勒频移等关键挑战. 此外,光束在传输过程中易受固定或移动障碍物阻挡而导致链路中断. 上述FSOC链路特点对相干检测、信道编码、APT、大孔径接收等物理层技术提出了很高要求。

3.3 网络生存性

根据美国卡纳基梅隆大学软件工程研究所提出的定义,网络生存性指遭受攻击、故障或意外事故时,系统能够及时完成其关键服务的能力^[37]. 空天地一体化FSOC网络环境复杂易变,潜在威胁多,而网络节点(如卫星、UAV、飞艇等)有限的能量、计算和存储能力使其检测威胁和故障恢复能力受限,亟须通过拓扑控制、生存性路由等技术^[38]提高网络生存性. 拓扑控制包括拓扑构建与拓扑重构两部分^[39],前者在网络初始阶段形成满足优化目标的拓扑结构,后者在网络传输出现故障或节点间的连接发生中断时,对网络进行重构,保障通信服务. 生存性路由技术能在节点状态变化或者失效时,对数据传输路径进行重构. 考虑到大量高速移动节点,路由策略应支持路由频繁更新,并具备开销低、抗毁性强、灵活性高的特点。

3.4 网络QoS保证

空天地一体化FSOC网络规模大、拓扑结构变化频繁,网络节点间需要快速交换信息以维持网络连通性、保障数据有效传输,对传输带宽提出了很高要求;业务负载的不平衡易导致较高的丢包率;长距离传输使网络对端到端传输延迟和时延抖动敏感性变高^[40];多样化用户应用场景对用户公平性也提出了较高要求. 针对上述问题,可通过合理设计路由、资源分配策略及可靠传输协议以满足用户QoS需求. 路由策略应实现最优路径传输与流量均衡分布,降低端到端传输延迟、时延抖动与丢包率. 资源分配方案需重点关注用户公平性. 传输控制协议(Transmission Control Protocol, TCP)中的拥塞控制机制与FSOC网络不兼容,甚至会恶化吞吐量性能,因此需要为一体化FSOC网络开发新的协议。

3.5 FSOC/X混合传输

FSOC与RF、光纤技术混合组网是提高通信系统可靠性及弥补FSOC链路不足的有效方案. FSOC/X混合传输,一是要考虑终端协议栈^[41],构建适用于FSOC等多种技术的通用数据链路层统一表达,使混合系统能够结合FSOC与RF、光纤等技术的优势,提供大带宽、能有效抵御大气影响及指向误差的高效网络;二

是要设计适用的网络层路由协议,标准化路由学习、路由更新、路由管理方法.根据当前信道情况以及网络设备情况动态分配系统资源、选择传输链路,构建空天地三层 FSOC/X 网络的动态拓扑和路由,完成数据的有序转发,最终实现兼容并包的空天地一体化网络.

3.6 激光安全

长时间暴露于高功率激光束会造成严重的眼部组织损伤^[42].国际电工委员会(International Electrotechnical Commission, IEC)60825-1 根据激光器的功率、波束宽度等将其分为四等,其中 class1 和 class2 一般情况下可认为无害, class3 和 class4 则较为危险^[43].美国标准学会(American National Standards Institute, ANSI)也限制 850 nm 波长的激光功率为 160 mW, 1550 nm 则为 8 W^[44].因此,建立空天地一体化 FSOC 网络需要根据空间各层的通信环境特性与通信设备特点,合理地选用激光波长并调整激光器发射功率.

4 空天地一体化 FSOC 网络关键技术及发展趋势

基于上一节提出的关键设计因素,本节首先对物理层及上层关键通信技术发展现状进行分析与总结,并将设计因素与关键技术的联系总结在图 2 中;其次,提出各项技术未来发展的趋势以及面临的挑战,并将其总结在表 4 中.

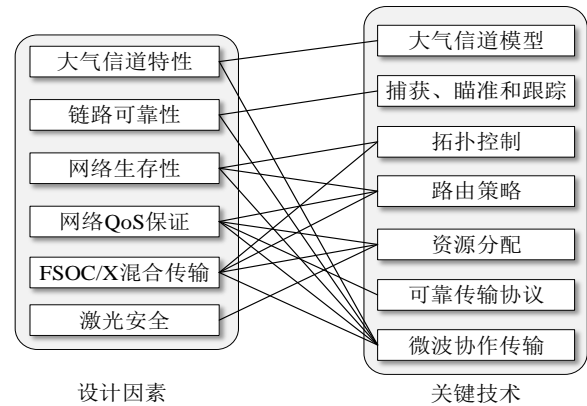


图 2 空天地一体化 FSOC 网络设计因素与关键技术联系图

4.1 大气信道模型

受大气湍流和衰减效应的影响,大气信道具有高度变化、难以预测的特性,沿传播路径上大气折射率的变化和多次散射会造成接收机处光信号幅值和相位的波动,导致系统性能严重下降.为描述这种波动,研究者提出了不同的统计信道模型^[45-51],包括负指数分布模型^[46]、 K 分布模型^[47]、 $I-K$ 分布模型^[48]、Log-normal 模型^[49]、Lognormal-Ricean 模型^[50]、Gamma-Gamma 分布模型^[51]等.

根据闪烁指数 σ_I^2 的大小,可将大气湍流划分为弱、中强、强三种程度, $\sigma_I^2 < 1$ 表示弱湍流环境, $\sigma_I^2 \cong 1$ 表示中强度湍流环境, $\sigma_I^2 > 1$ 表示强湍流环境. 负指数分布模型适用于 $\sigma_I^2 \geq 1$ 的强大气湍流环境. K 分布模型适用于

表 4 空天地一体化 FSOC 网络发展趋势与挑战

关键技术	现存问题	发展趋势与挑战
大气信道模型	现有模型未能涵盖空天地一体化架构中多种链路类型	信道测量与建模工作应向更多链路类型延伸
	仅考虑大气湍流影响因素	综合考虑指向误差、障碍物移动性等多种因素,提升模型精准性
捕获、瞄准和跟踪	硬件体积过大、复杂度高	开发小型、低硬件复杂度的 APT 方案
	收发端高速移动情况下很难保证光束即时对准	带有预测机制的 APT 方案,能够对收发端运动轨迹和速度进行高精度预测
	缺乏适配软件	引入机器学习的思想,实现收发端的自动同步与跟踪
拓扑控制	拓扑频繁重新配置导致成本、时延、误码率增加	按需自适应的拓扑控制机制
	基于单一 FSOC 链路的系统可靠性不高	基于 FSOC/X 设计拓扑控制方案
	拓扑变化的实时处理较复杂,拓扑控制不灵活	利用 SDN 和深度强化学习制定拓扑策略
路由策略	缺乏空间多层网络架构路由算法研究	基于 FSOC/X 设计适用于多层网络架构的高可靠路由算法
	缺乏路由协议研究	基于 FSOC/X 合理修改现有协议或开发新协议
资源分配	现有资源分配方案难以实现多类资源的统一调整	引入深度神经网络实现资源统一调度
	网络资源按需分配实时性差	结合软件定义网络/网络功能虚拟化实现动态资源分配
可靠传输协议	没有适用于空天地一体化 FSOC 网络的 TCP 协议	修改现有协议或开发新的 TCP 传输协议
微波协作传输	链路切换判断机制不精准导致资源浪费或链路中断	研究高效的判断机制确定切换时机以降低时延
	RF 通信数据承载能力有限,安全性低,单一的 FSOC/RF 协作方式不能适应所有场景	引入 FSOC/光纤、FSOC/可见光通信等协作传输方式以适应多样化场景

描述 $3 \leq \sigma_I^2 \leq 4$ 的强湍流信道模型^[56,57], 然而, 该模型的表达式十分复杂, 很难用于分析误码率、吞吐量等通信性能. 为此人们开展了 K 分布近似的相关工作, 如文献^[58]提出了负指数变量混合近似分布, 并取得较好的效果. $I-K$ 分布模型是 K 分布的一种广义形式, 可适用于所有强度的大气湍流. 然而, 该模型很难用闭式表达式表示. Log-normal 模型适用于描述 $\sigma_I^2 < 1$ 的弱湍流下接收光强的衰落情况^[59], 该模型虽然具有易于计算的表达式, 但其光强起伏对数正态曲线与光强均值的偏差值会随大气湍流强度增加而变大, 因此不适用于描述强湍流环境下的光强起伏. Lognormal-Rician 模型在弱/中强/强湍流环境均适用^[60], 其仿真结果和实验数据十分接近. 然而, 由于该模型的概率密度函数是积分形式, 很难求得闭式解. 此外, 该模型在计算过程中存在许多近似运算, 误差较大. Gamma-Gamma 模型因其计算方式简单且在弱/中强/强湍流环境均适用^[61], 成为实际应用最广泛的模型, 但只有在接收端孔径小的情况下, 才与实验数据较好地吻合^[51]. 对此, 文献^[55]提出了 Exponentiated Weibull 模型, 能够在孔径较大时很好地模拟辐照度波动, 且适用于所有强度的湍流环境. 表 5 总结了现有统计信道模型及其适用范围.

现阶段 FSOC 大气信道模型尚未能覆盖空天地一体化架构中全部链路类型, 大多数模型只考虑大气湍流对信道的影响, 在未来以下两方面值得进一步研究.

(1) 全面涵盖一体化网络链路类型. 现有 FSOC 信道测量和建模工作多集中于地面网络, 而星地、空地等链路信道特性与地面网络信道存在显著差异. 未来信道测量与建模工作仍需向空基、天基网络延伸, 构建健全的信道模型.

(2) 全面考虑各种干扰因素. 影响大气信道特性的因素包括大气湍流、指向误差、链路遮挡、障碍物移动性等, 但现有研究工作通常只考虑大气湍流对信道的影响. 未来建模工作应综合考虑上述因素, 提升模型的精准性.

4.2 捕获、瞄准和跟踪技术

FSOC 使用束散角较小的激光进行通信, 需要 APT 技术来建立和保持通信链路. 空天地一体化架构中, 长距离的通信链路、终端的流动性和平台振动都对 APT 技术提出了更高的要求, 不同层网络链路和层间链路的差异较大, 对 APT 方案的要求也不同. 现有方案主要包括以下几种(表 6).

(1) 基于跟踪架的 APT 方案

该方案通过电机实现对跟踪万向架的控制, 使其进行旋转和倾斜运动^[63]. 跟踪架可分为两轴、三轴、四轴结构, 其中两轴式跟踪架结构简单、易于控制, 应用

表 5 大气信道模型及其适用范围

大气信道模型	适用湍流强度
负指数分布	强
K 分布	强
$I-K$ 分布	弱/中强/强
Log-normal	弱
Lognormal-Rician	弱/中强
Gamma-Gamma	弱/中强/强
M 分布	弱/中强/强
Double Weibull	中强/强
Double Generalized Gamma	弱/中强/强
Exponentiated Weibull	弱/中强/强

较为普遍. 两轴跟踪架 APT 方案的优点是跟踪视场及跟踪范围大, 适合需要大角度偏转范围的收发器^[64], 如星地、空地和星间通信. 然而, 跟踪架的旋转速度较慢、角度分辨率较低, 难以达到较高的动态精度, 且万向转台重量大, 不适用于有轻量要求的移动型终端, 比如小型 UAV.

(2) 基于反射镜的 APT 方案

该方案使用快速控制反射镜 (Fast Steering Mirror, FSM) 来执行光束的捕获、瞄准、跟踪, 通过驱动反射镜使目标光摄入探测器并处于探测器中心^[65]. 根据驱动方式的不同, FSM 可分为机械、压电 (Piezoelectric, PZT) 和微机电系统 (Micro-Electromechanical Systems, MEMS)^[64]. 反射镜相对于万向架来说重量轻、转动惯量小、响应频率高、角度分辨率大, 适合高精度的目标跟踪, 但其跟踪视场及跟踪范围较小.

(3) 复合轴 APT 方案

为克服上述两种方案的不足, 该方案在旋转机架上安装可微调的快速反射镜, 构成复合轴系统, 由主 APT 系统对运动目标进行捕获和粗跟踪, 从 APT 系统根据主系统的跟踪残差进行精跟踪, 实现大范围的快速高精度跟踪^[66].

(4) 基于自适应光学系统的 APT 方案

自适应光学 (Adaptive Optics, AO) 技术利用波前传感器和波前校正器对大气湍流引起的光束波前畸变进行校正^[67]. 最广泛使用的波前校正器是变形镜 (Deformable Mirrors, DM), 可以实现低阶光束的像差校正和纳米级的光束控制. 此外, 该校正器可与倾斜镜相结合, 以校正高阶光束像差. 该方案可以实现 n-rad 级的跟踪精度, 但由于对 DM 的高集成度要求, 该方案的硬件成本与计算量较高.

(5) 基于液晶的 APT 方案

该方案采用液晶/液晶空间光调制器 (Liquid Crystal-Spatial Light Modulator, LC-SLM) 实现光束控制, LC-SLM 由许多个液晶分子在空间上排列成阵列然后分层

叠加构成,每一单元都能够独立地通过光学信号或者电信号进行控制,实现对光束幅度和相位的操纵^[68].该方案具有成本低、功耗小、重量轻的优点,可以实现较高的跟踪精度,但其偏转控制范围有限、跟踪视场偏窄.

(6) 基于混合FSOC/RF的APT方案

FSOC链路极易受到云层、鸟、树木等障碍物遮挡而导致链路中断,此时可采用混合FSOC/RF的APT机制^[69],利用RF模块代替信标光在链路断开时发送定位消息,实现目标快速重新捕获,将链路中断时间降至最低.此外,当光链路因环境恶劣而中断时,可采用RF链路作为备用链路维持光终端之间的通信.该方案可以显著减少链路中断时间,有效提高链路可靠性,然而,RF通信会降低数据传输速率,额外的RF模块也会增加系统的成本和硬件复杂度.

现有APT方案仍存在一些软硬件设计上的问题,在未来以下三方面值得进一步研究.

(1)降低硬件复杂度.目前APT方案普遍存在硬件体积过大、复杂度高的问题.开发小型APT方案,实现更小重量、更小尺寸以及更低的硬件复杂度是APT技术的重要发展方向之一.

(2)带有预测功能的APT方案.针对卫星、UAV等高速移动型终端,保证光束即时对准,实现APT时间同步是一个很大的挑战.未来的研究工作需重点关注带有预测机制的APT方案^[70],通过预测运动轨迹和速度估计终端在下一时刻的位置,减少信标光对准时间,确保光束快速指向目标.提高预测精度,减少因预测速度和实际速度不匹配而导致的捕获失败,是该技术亟待解决的核心问题.

(3)开发适配软件.现有软件缺乏对实时情况自动同步和跟踪的能力.在空天地一体化FSOC网络中,卫星、UAV等移动终端的运动轨迹具有规律性,可利用机器学习通过边学习、边预测的方式实现自动同步与跟踪.

表6 不同APT方案特点和适用终端类型

APT方案	角度分辨率	跟踪视场	角旋转速度	适用终端类型
基于跟踪梁的APT方案	μrad	宽	缓慢	无重量限制、大运动角度范围
基于反射镜的APT方案	sub- μrad	窄	快速	相对静止、运动角度范围很小
复合轴APT方案	sub- μrad	宽	快速	任意
基于AO的APT方案	nrad	窄	快速	运动角度范围较小
基于液晶的APT方案	sub- μrad	窄	快速	运动角度范围较小
基于混合FSOC/RF的APT方案	sub- μrad	宽	缓慢	通信链路易受障碍物遮挡或移动性终端

4.3 拓扑控制

空天地一体化FSOC网络拓扑控制应最大限度弥补FSOC链路特性带来的不足,并能快速感知拓扑变化,实现链路切换,保证网络的连通性.表7总结了现有FSOC网络拓扑控制方案及其特点.

目前,针对空天地一体化高度动态特性的FSOC拓扑控制研究很少,大多研究工作集中于空间单层FSOC网络.地面FSOC网络节点和连接边规模较大,拓扑结构呈现出整体稀疏且局部密集的特点^[71].文献[72]按照可靠性、容量(公平性)、传输功率、误码率的排序依次优化求解FSOC收发器的位置和数量,实现拓扑结构优化,有效降低部署成本.考虑到节点的移动性,文献[73]以最小化网络拥塞为目标设计了拓扑生成算法,并提出拓扑快速重置算法以应对链路故障,平衡节点间的流量负载.平流层FSOC网络易受到大气湍流的影响,已有研究工作根据功耗、吞吐量^[74]或网络可靠性^[69]等确定拓扑结构.卫星骨干网络中星间FSOC链路不受大气的影响,但由于卫星高速运转,星间链路断开与重连,拓扑体现出极高的动态性.文献[76]针对星间FSOC链路,以网络时延和链路空间位置精度因子(反映卫星网络中星间链路的几何结构,由星座构型与

天线波束角共同决定,值越小,测量精度越高)作为通信性能和高精度测量的量化指标,将星间链路拓扑规划问题建模为多约束条件下的多目标函数优化问题,求出全局最优拓扑结构,并验证了所提算法能够提高拓扑动态切换时的链路利用率.

针对空间多层FSOC网络的拓扑控制方案大多着眼于空地应用场景.文献[77]建立空地FSOC移动拓扑架构,采用修正狄洛尼三角剖分(Modified Delaunay Triangulation, MDT)方法形成平流层移动节点的拓扑,并考虑大气影响提出拓扑重构算法和一种多点对点访问的动态管理算法,解决地面节点与平流层节点的动态连接问题,实现网络的高连通度.文献[39]首先基于节点接入度生成上层空间节点的拓扑结构,再根据地面节点移动的规律性,利用机器学习技术对链路的状态和数据业务量进行学习和预测,对网络拓扑进行智能控制.文献[78]在空地FSOC网络拓扑控制中采用主动(根据无人机与地面间的平均流量需求和各时间段无人机的功耗状态等主动调整网络拓扑)和被动(在链路故障或流量需求爆发情况下的拓扑重构)相结合的方式优化网络拓扑,有效保障了系统的性能.文献[79]针对空天架构,在收发信机数量有限的情况下,设计了一

表 7 不同网络拓扑控制方案及特点

参考文献	网络架构	优化目标	主要贡献
文献[72]	地面网络	可靠性	实现收发机最优布局;提高网络容量与公平性
文献[73]	地面网络	网络拥塞	有效降低网络拥塞度;实现动态拓扑重构
文献[74]	平流层网络	功耗、吞吐量	根据给定流量需求生成最优拓扑;生成拓扑可以同时降低功耗、提升吞吐量
文献[75]	平流层网络	可靠性	适用于不同规模的网络;有效提升网络拓扑抵御故障的能力
文献[76]	卫星网络	网络时延、位置精度因子	同时兼顾高速通信与高精度测量;大幅改善拓扑切换时的链路利用率
文献[77]	空地	代数连通度	拓扑结构连通性高;实现动态多点接入
文献[39]	空地	节点接入度	有效避免节点过载问题;拓扑可自动重构
文献[78]	空地	功耗、吞吐量	适用于不同规模的网络;在链路故障或紧急流量需求时适应性强
文献[79]	星空	能量、流量	动态调节节点功率;在雾天的链路稳定性高

种动态能量与流量平衡(Dynamic Energy and Traffic Balance, DETB)的拓扑控制算法,根据节点剩余能量和流量变化动态调整拓扑,使平均网络吞吐量保持相对稳定,避免链路过载。

现阶段FSOC网络的拓扑控制研究工作大多集中在单层和跨双层的网络架构,针对空天地一体化网络的拓扑架构和动态控制算法研究较少,在未来以下三方面值得进一步研究。

(1)按需自适应拓扑控制.空天地一体化FSOC网络各层拓扑呈现不同特性,且具有高度动态性,频繁重新配置网络拓扑会增加系统控制成本、误码率、传输延迟以及计算复杂度^[5].能够权衡各性能因素,按需自适应的拓扑控制方法,是未来重要的研究方向。

(2)FSOC/X混合传输中拓扑控制.FSOC/X系统中拓扑控制方案的设计需要重点关注不同类型链路的选择和切换,确保切换的实时性和稳定性。

(3)基于软件定义的拓扑控制.软件定义网络(Software-Defined Networking, SDN)技术可实现空天地一体化网络灵活组网,适应不同场景的需求,承载各动态节点的连接请求^[80],实时处理动态拓扑变化.结合深度强化学习等人工智能算法可有效解决拓扑优化问题,制定拓扑策略,提升网络性能。

4.4 路由策略

空天地一体化FSOC网络架构中,不同层网络的通信设备及信道情况差异显著.例如,GSO(Geostationary Earth Orbit Satellite,对地静止地球轨道卫星)位置相对固定,而低轨卫星(Low Earth Orbit, LEO)高速运动,星间FSOC信道几乎可看作自由空间,而平流层内需考虑大气湍流等影响.因此,空天地一体化FSOC网络跨层路由策略关键在于如何充分利用不同层的网络特性实现数据的高效转发与传输.文献[81]利用中地球轨道(Medium Earth Orbit, MEO)较高、覆盖面较广、运动速度相对较慢的特点,提出HR-SFCN(Hierarchical Routing for LEO/MEO Satellite RF/FSOC Communication Networks)分层FSOC混合网络架构,将MEO卫星作为LEO

的中继节点,并使LEO卫星分簇连接到MEO卫星,实现满足体验质量(Quality of Experience, QoE)要求的路由算法.文献[79]针对FSOC空天融合网,在DETB拓扑控制算法基础上提出一种分层的路由策略,通过卫星实现低空平台(Low Altitude Platforms, LAPs)、高空平台(High Altitude Platforms, HAPs)等的中继路由。

空天地一体化FSOC网络各层的路由协议存在较大差异,目前卫星层面主要采用空间IP协议体系、国际空间数据系统咨询委员会CCSDS协议体系以及容忍延迟网络(Delay Tolerant Network, DTN)协议体系^[82],而地面移动通信及Internet网多采用TCP/IP协议.根据ITU的报告^[83],当前没有任何协议可在网络节点不断移动的同时计算其最佳路径.然而,利用卫星运动规律性较强的特性,可以很好地预测未来某一时段的卫星连接,计算路由.基于此,文献[84]搭建了软件定义卫星网络(Software-Defined Satellite Network, SDSN)平台OpenSatNet,利用未来某一时段的全局拓扑信息,通过Dijkstra算法计算最短路径,再分发到卫星实现卫星网络的动态路由控制.对于地面及平流层FSOC网络,一些研究针对基于FSOC的无线移动自组网(FSOC-MANET)提出了支持节点低速移动的最短路径路由算法^[85]、以中心度与连接概率为花费函数的Spray路由策略^[86]以及考虑了QoS的定向路由技术^[87].此外,一些研究工作基于Ad-hoc网和Internet网路由的思想,结合FSOC系统拓扑变化较快、收发机方向性强等特点,针对FSOC-MANET开发了考虑网络QoS的AODV-QoS-FSOC算法^[88]、基于位置预测的UAV-EDCAR(Enhanced Distributed Coding-Aware Routing)路由算法^[89]以及QDRP(Quality of Service-Directional Routing Protocol)路由算法^[90]等。

现阶段缺乏适用于空天地一体化无线光网络多层网络架构的路由算法和路由协议.在未来以下两方面值得进一步研究。

(1)FSOC/X混合传输路由算法.空天地一体化网络不同层的设备终端在通信能力、能耗、处理复杂度、

通信覆盖、移动性等方面均存在显著差异. 路由算法需结合路径预测、信道预测方法, 考虑各设备的实时情况, 以保障网络的 QoS 需求.

(2) FSOC/X 混合传输路由协议. 空天地一体化 FSOC/X 混合网络的路由协议需综合考虑拓扑构建方法、路由算法等, 构建多设备间路由信息协商交换机制, 实现路由信息互联互通.

4.5 资源分配

庞大的网络规模和复杂的拓扑结构使得空天地一体化 FSOC 网络极易出现部分区域通信业务过载或业务拥塞而其他区域资源空闲的现象, 资源利用率低. 设计合理的资源分配方案, 实现功率、带宽、链路、信道、接口等网络资源的有效利用, 是解决网络拥塞并提高网络 QoS 的关键. 目前涉及空天地一体化 FSOC 网络资源分配的相关研究工作较少, 且主要针对功率和带宽两种资源. 针对天地一体化网络, 文献[91]提出了一种基于次梯度的功率分配方案, 在总功率和峰值功率的约束下最大化网络容量. 基于 FSOC-UAV 辅助移动接入网络架构, 文献[92]设计了一种基于 QoS 唤醒基站位置和移动用户关联的带宽分配方案, 为不同带宽需求的用户进行资源分配并关联基站, 以保证服务用户数量的最大化. 针对空天地一体化网络, 文献[93]考虑 GSO-HAPs-地面站通信场景, 将混合 FSOC/RF 网络用于回程传输, 并对功率和带宽进行联合分配, 实现吞吐量和能量效率的提升.

目前, 空天地一体化 FSOC 网络资源分配的研究处于起步阶段, 现有方案存在考虑因素不全面、计算复杂度高、实时性差等问题. 在未来以下两方面值得进一步研究.

(1) 基于深度神经网络的资源分配. 引入深度神经网络 (Deep Neural Networks, DNN) 实现模块化设计, 利用深度学习的逻辑抓取能力实现多种资源的统一调度.

(2) 基于 SDN/NFV 的资源分配. 利用 SDN 可解耦网络设备的控制部分与数据部分, 实现网络节点与移动设备的实时控制^[94]. 利用网络功能虚拟化 (Network Function Virtualization, NFV) 可通过软件化的方法实现网络功能, 完成对资源服务的动态部署^[95]. 二者相结合, 能够实现网络资源实时动态分配, 避免业务过载或业务拥塞, 有效提高资源利用率.

4.6 可靠传输协议

TCP 协议应用在空天地一体化 FSOC 网络时, 高误码率、长往返时延、非对称信道、间歇性链路中断等问题会使其性能严重降低^[96], 其面临的主要挑战如下.

(1) 在高速、长时延的网络中如何有效避免拥塞

TCP 协议是基于反馈应答的协议, 通过慢启动、拥

塞避免、快速重传和恢复来控制拥塞, 然而长时延链路环境下反馈时延非常大, 高传输速率会导致竞争业务快速占用网络缓冲资源, 因此 TCP 很难避免拥塞.

(2) 在高丢包率的网络中如何设计重传机制

受湍流、障碍物遮挡和光束跟踪误差的影响, 空天地一体化 FSOC 网络很容易出现链路中断, 导致数据包频繁丢失^[97], TCP 无法区分链路误码和网络拥塞, 当有数据包因为传输出错而丢弃, 即使没有发生拥塞, TCP 也会缩减发送窗口, 导致 TCP 协议的发送速率降低, 链路闲置. 另外, 丢失数据包反复重传会引起端到端传输时延剧烈变化、吞吐量严重降低、链路带宽浪费的情况. 因此, 需要引入自动重传请求机制使 TCP 能够区分当前快速重传是否必要, 减少传输层不必要的重传, 提高其在高误码率环境下的性能. 停等式 ARQ (Stop-and-wait Automatic Repeat Request), 回退 n 帧 ARQ (Go-back- n ARQ), 选择性重传 ARQ (Selective Repeat ARQ, SR-ARQ) 在空天地一体化 FSOC 网络中均表现不佳. 混合 ARQ (Hybrid ARQ)^[98] 在强大气湍流条件下中断概率和误码率均有较好的表现, 但其时延较大且链路带宽利用率很低. 协作分集 ARQ (Cooperative Diversity ARQ, C-ARQ) 能够有效缓解强大气湍流引起的信号衰落, 并且其改进方案 MC-ARQ (Modified C-ARQ)^[99] 能够实现更低的传输时延和更高的能量效率.

(3) 非对称链路带宽

TCP 传输过程会产生大量 ACK (Acknowledge character) 包, 由于双向链路带宽的不对称性, 带宽较低的链路上 ACK 吞吐量很容易超过链路容量, 缓冲区很快被填满, 导致 ACK 报文排队时延增加甚至会被丢弃, 使响应时间变长, 吞吐量降低. 尤其当存在双向数据传输时, 带宽的不对称性将会使得 TCP 协议的性能下降更加严重.

目前针对 FSOC 网络的传输协议的研究工作多集中于地面网络和卫星网络^[96,97,100,101], 并且处于早期研究阶段, 还没有适用于空天地一体化 FSOC 网络的协议. 为增强传输协议在空天地一体化 FSOC 网络中的性能, 可对现有 TCP 协议进行改进, 调整优化 TCP 的一些运行参数或者直接修改其控制机制. 此外, 可研发专门针对该环境的传输协议, 但这种方式需要对现有 TCP 进行全面修改, 难以推广和部署.

4.7 微波协作传输

FSOC/RF 混合传输是提升恶劣天气条件下一体化网络性能的有效解决方案. 文献[102]提出利用 FSOC 链路连接 HAPs 与卫星, 由于地面用户具有移动性, 且用户间的视距路径很容易被建筑物和树木等障碍物阻挡, 规定用户通过 RF 访问平流层. 文献[103]及文献[104]仿真结果均证明在雾天条件下, 混合 FSOC 与 RF

链路可以显著提高系统性能。

利用微波 RF 链路作为 FSOC 备份也是一个重要的研究方向。文献[106]提出利用 RF-FSOC 链路作为备份,通过切换主要 FSOC 链路和次要 RF-FSOC 链路,实现不间断和可靠的网络连接,当主要链路受到大气湍流影响时,利用 RF-FSOC 次要链路保持连通性;当存在明确的视距路径时,利用主 FSOC 链路以获得更高的数据速率。文献[79]构建了一个由卫星、飞艇和

悬停无人机组成的星空一体化网络。其中平流层飞艇负责空间遥感和天气观测,并利用数据挖掘将收集到的气象数据进行处理,精确预测大气条件,从而提前将 FSOC 链路切换为 RF 链路,克服恶劣天气引起的信号衰减问题,并有效降低切换延迟。但是以上两种方案均采用双链路并行传输方式,导致传输资源严重浪费。表 8 总结了现有跨层一体化网络混合传输方式及其特点。

表 8 跨层一体化网络混合传输方式及特点

网络架构	文献	混合传输方式	主要贡献
空地	文献 [107]	高空平台(气球、飞艇、飞机)-低空平台-FSOC 低空平台-地面-FSOC/RF 混合	在恶劣天气条件下,RF 通信作为 FSOC 的备份,可根据天气条件切换
	文献 [108]	低空平台-低空平台-FSOC 低空平台-地面-RF	低空平台的最佳高度对系统性能有显著影响;指向误差对性能的影响大于 RF 路径损失
星空	文献[79]	卫星-平流层飞艇、悬停无人机-FSOC/RF 切换	基于大气条件感知的 RF/FSOC 切换机制,保证射频 RF 和 FSOC 传输的优势互补
天空地	文献 [102]	卫星-高空平台-FSOC,高空平台-地面-RF	具有更强的连续通信能力
	文献 [103]	卫星-航空-FSOC 链路-经历 Gamma-Gamma 衰落,航空-地面-RF 链路-服从瑞利衰落	考虑到 FSOC 链路中指向误差以及不完美信道状态信息的影响
	文献 [104]	卫星-无人机-FSOC 链路-经历 Gamma-Gamma 衰落,无人机-地面-RF 链路-服从瑞利衰落	实现系统容量和服务公平性之间的折中;解决无人机难以获得完美信道状态信息的问题
	文献 [105]	卫星-高空平台-FSOC,高空平台-地面-RF/FSOC 混合	与现有的基于 FSOC 的卫星通信架构相比,具有更高的可靠性和数据速率

目前,FSOC 与微波协作传输的研究还停留在架构设计阶段,缺乏拓扑、路由、资源分配、协议制定等解决方案。在未来以下两方面值得进一步研究。

(1) 链路高效切换。由于探测值和切换门限值的相对偏差,目前广泛采用的阈值比较法会造成 FSOC 链路信道容量的浪费或短暂链路中断。未来需研究更高效、准确的判断机制以保证链路的可用性,降低切换时延。

(2) 多元 FSOC/X 混合传输。RF 通信频谱资源拥挤,数据承载能力有限,且对环境非常敏感,安全性低。除 FSO/RF 混合传输方式外,还可以将 FSOC 与其他通信方式结合,如 FSOC/光纤、FSOC/可见光通信^[109],以适应多样化的应用场景。

5 结论

FSOC 作为一种室外无线光通信技术,是构建空天地一体化信息网络的重要手段。国内外针对卫星、平流层及地面网络各层内链路及层间链路进行了大量激光通信实验,并提出了 Iridium 铱星系统、OneWeb、Kuiper、鸿雁、虹云等多项空间网络建设项目,为空天地一体化 FSOC 网络建设奠定了坚实的基础。然而 FSOC 相关标准化文件仅限于物理层及数据链路层,缺乏上层的标

准化工作,FSOC 特殊的链路特性和一体化网络架构对物理层及上层关键通信技术也提出了很大的挑战。为充分了解光信号在大气中的传输特性,需要提高大气信道建模精度,为网络算法设计和协议优化提供准确的底层模型;APT 是确保 FSOC 链路稳定性的重要前提,需要进一步减小体积和硬件复杂度,提高在终端高速移动时的性能;拓扑控制、路由和资源分配等技术还需要投入大量研究工作,以匹配一体化 FSOC 网络特性,优化网络性能;传统 TCP 协议不能适应高速、长时延、高丢包率的网络,必须针对空天地一体化 FSOC 网络研发专门的传输协议或改进现有 TCP 协议;单一的 FSOC 传输性能受到链路特性的制约,应考虑 FSOC/X 的混合传输方式以适应多样化的应用场景。

基于 FSOC 的空天地一体化网络仍处于建设阶段,急须突破和改进物理层及上层通信关键技术,充分利用其高带宽、高速率、高保密性的优势,加快我国一体化空间信息网络建设的步伐。

参考文献

- [1] 张平,秦智超,陆洲.天地一体化信息网络天基宽带骨干互联系统初步考虑[J].中兴通讯技术,2016,22(4):24-28.
ZHANG P, QIN Z C, LU Z. The space wideband back-

- bone interconnected system in the integrated space and terrestrial information network[J]. ZTE Technology Journal, 2016, 22(4): 24-28. (in Chinese)
- [2] ITU-T. ITU-T Y. 3000-series-Representative Use Cases and Key Network Requirements for Network 2030: ITU-T Y Suppl. 67[S]. 2020.
- [3] 王天枢, 林鹏, 董芳, 等. 空间激光通信技术发展现状及展望[J]. 中国工程科学, 2020, 22(3): 92-99.
WANG T S, LIN P, DONG F, et al. Progress and prospect of space laser communication technology[J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(3): 92-99. (in Chinese)
- [4] 邓晓磊. 一体化光网络分布式仿真平台研究及实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2013.
DENG X L. Research and Implementation of a Distributed Simulation Platform for Integrated Optical Networks[D]. Chengdu, China: University of Electronic Science and Technology of China, 2013. (in Chinese)
- [5] KAUSHAL H, KADDOUM G. Optical communication in space: Challenges and mitigation techniques[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 19(1): 57-96.
- [6] VAVOULAS A, SANDALIDIS H, VAROUTAS D. Weather effects on FSO network connectivity[J]. IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, 2012, 4(10): 734-740.
- [7] RAJ D A, MAJUMDAR A. Historical perspective of free space optical communications: From the early dates to today's developments[J]. IET Communications, 2019, 13(6): 2405-2419.
- [8] KAYMAK Y, ROJAS-CESSA R, FENG J, et al. A survey on acquisition, tracking, and pointing mechanisms for mobile free-space optical communications[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2018, 20(2): 1104-1123.
- [9] HAMZA A S, DEOGUN J S, ALEXANDER D R. Classification framework for free space optical communication links and systems[J]. Communications surveys & Tutorials, 2019, 21(2): 1346-1382.
- [10] 姜会林, 付强, 赵义武, 等. 空间信息网络与激光通信发展现状及趋势[J]. 物联网学报, 2019, 3(2): 1-8.
JIANG H L, FU Q, ZHAO Y W, et al. Present situation and trend of space information network and laser communication[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2019, 3(2): 1-8. (in Chinese)
- [11] 周航. 天地一体化网络传输与接入技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2016.
ZHOU H. Research on Transmission and Access Technology of Space-Ground Integrated Network[D]. Beijing, China: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2016. (in Chinese)
- [12] 任建迎, 孙华燕, 张来线, 等. 空间激光通信发展现状及组网新方法[J]. 激光与红外, 2019, 49(2): 143-150.
REN J Y, SUN H Y, ZHANG L X, et al. Development status of space laser communication and new method of networking[J]. Laser & Infrared, 2019, 49(2): 143-150. (in Chinese)
- [13] 闫鲁生, 王峰, 吴畏, 等. 无人机激光通信载荷发展现状及关键技术[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(8): 40-48.
YAN L S, WANG F, WU W, et al. Current status and key technologies of unmanned aerial vehicle laser communication payloads[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(8): 40-48. (in Chinese)
- [14] 安建欣, 何晓垒, 杨乾远, 等. 小型无人机空地无线激光通信的应用研究[J]. 光通信技术, 2017, 41(6): 10-13.
AN J X, HE X L, YANG G 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. (in Chinese)
- [15] BISWAS A, WRIGHT M W, SANII B, et al. 45-km horizontal path optical link demonstration[J]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2001, 4272: 60-71.
- [16] MA J, FU Y, TAN L, et al. Channel correlation of free space optical communication systems with receiver diversity in non-kolmogorov atmospheric turbulence[J]. Journal of Modern Optics, 2018, 65(9): 1063-1071.
- [17] LU Z, WU Z. Closed-form sub-optimal maximum likelihood sequence detection for free space optical communications [J]. Applied Optics, 2012, 51(27): 6441-6447.
- [18] 冯剑锋. 陆地自由空间光通信系统性能分析[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
FENG J F. Performance Analysis of Terrestrial Free Space Optical Communication Systems[D]. Changchun, China: Jilin University, 2017. (in Chinese)
- [19] 吴从均, 颜昌翔, 高志良. 空间激光通信发展概述[J]. 中国光学, 2013, 6(5): 670-680.
WU C J, YAN C X, GAO Z L. Overview of space laser communications[J]. Chinese Optics, 2013, 6(5): 670-680. (in Chinese)
- [20] 古月. 实践十三号/中星 16 号卫星[J]. 卫星应用, 2017, 4: 74.
GU Y. Practice 13/zhongxing 16 satellite[J]. Satellite Application, 2017, 4: 74. (in Chinese)

- [21] 毛晨盛. 用于机载激光通信的小型激光扫描系统[D]. 天津: 天津大学, 2018.
MAO C S. Small Laser Scanning System for Airborne Laser Communication[D]. Tianjin, China: Tianjin University, 2018. (in Chinese)
- [22] 柯熙政, 严希, 杨雅淇, 等. 5.2km 距离无线激光通信跟踪实验[J]. 计算机测量与控制, 2018, 26(11): 233-237.
KE X Z, YAN X, YANG Y Q, et al. 5.2km distance wireless laser communication tracking experiment[J]. Computer Measurement & Control, 2018, 26(11): 233-237. (in Chinese)
- [23] ITU-T. Co-location longitudinally compatible interfaces for free space optical systems: ITU-T G.640[S]. 2006.
- [24] ITU-R. Prediction methods required for the design of terrestrial free-space optical links: ITU-R P.1814-0[S]. 2007.
- [25] ITU-R. Propagation data required for the design of terrestrial free-space optical links: ITU-R P.1817-1[S]. 2012.
- [26] ITU-R. Fixed service application using free-space optical links: ITU-R F.2106-1[S]. 2007.
- [27] ITU-R. Propagation data required for the design of Earth-space systems operating between 20 THz and 375 THz: ITU-R P.1621-2[S]. 2015.
- [28] ITU-R. Prediction methods required for the design of Earth-space systems operating between 20 THz and 375 THz: ITU-R P.1622-0[S]. 2003.
- [29] IOAG. Optical Link Study Group Final Report: IOAG.T. OLSG.2012.V1[S]. 2012.
- [30] CCSDS. Optical Communications Physical Layer: CCSDS 141.0-B-1 [S]. 2019.
- [31] CCSDS. Optical Communications Coding and Synchronization: CCSDS 142.0-B-1[S]. 2019.
- [32] CCSDS. Optical Link Study Group Report CCSDS Optical Communications BOF[R/OL]. (2013-10-01)[2021-01-20]. <https://slideplayer.com/slide/6032799>.
- [33] 陈民安. 基于神经网络的无线光波前校正理论与实验研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2020.
CHEN M A. Theoretical and Experimental Study on Neural Network-Based Wavefront Correction for FSO Systems[D]. Hefei, China: University of Science and Technology of China, 2020. (in Chinese)
- [34] 折宏图. 野战大气激光通信系统分析及应用[D]. 长沙: 国防科技大学, 2006.
SHE H T. The analysis and application of field atmosphere laser communication system[D]. Changsha, China: National University of Defense Technology, 2006. (in Chinese)
- [35] 陈牧, 柯熙政. 大气湍流对激光通信系统性能的影响研究[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(8): 115-121.
CHEN M, KE X Z. Effect of atmospheric turbulence on the performance of laser communication system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(8): 115-121. (in Chinese)
- [36] SONB I K, MAOA S. A survey of free space optical networks[J]. Digital Communications & Networks, 2016, 3(2): 67-77.
- [37] MEAD N R, ELLISON R J, LINGER R C, et al. Survivable network analysis method[R]. Pennsylvania, USA: Carnegie-Mellon university, CMU/SER-2000-TR-013, 2000.
- [38] 石琼. 无人值守无线传感器网络系统可生存性关键技术研究[D]. 太原: 中北大学, 2020.
SHI Q. Research on Key Technologies of Survivability in Unattended Wireless Sensor Networks System[D]. Taiyuan, China: North University of China, 2020. (in Chinese)
- [39] 赵培. 用于无线光网络拓扑控制的机器学习算法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019.
ZHAO P. Research on Topology Control Algorithm Based on Machine Learning in Free Space Optical Communications[D]. Xi'an, China: Xidian University, 2019. (in Chinese)
- [40] CHAN V W S. Free-space optical communications[J]. Journal of Lightwave Technology, 2006, 24(12): 4750-4762.
- [41] CAILEAN A, DIMIAN M. Current challenges for visible light communications usage in vehicle applications: A survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 19(4): 2681-2703.
- [42] SEEBER F. Light Sources and Laser Safety[M]. New York, USA: Wiley-Interscience, 2008: 39-72.
- [43] IEC. Safety of laser products - Part 1: Equipment classification and requirements: IEC 60825-1[S]. 2014.
- [44] ANSI. American national standard for safe use of lasers: ANSI Z136.1[S]. 2014.
- [45] 陈丹, 雷雨, 柯熙政. 无线光自适应副载波 MDPSK 调制系统特性分析[J]. 电子学报, 2018, 46(7): 1748-1753.
CHEN D, LEI Y, KE X Z. Performance analysis of wireless optical adaptive subcarrier MDPSK modulation system[J]. Acta Electronica Sinica, 2018, 46(7): 1748-1753 (in Chinese)
- [46] BROWN R G W. Optical channels. Fibers, clouds, water and the atmosphere[J]. Optica Acta International Journal of Optics, 1989, 36(4): 552-552.

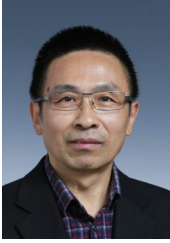
- [47] ANDREWS L C, PHILLIPS R L, HOPEN C Y. Laser Beam Scintillation with Applications[M]. Bellingham, Washington, USA: The International Society for Optical Engineering, 2001.
- [48] ANDREWS L C, PHILLIPS R L. Mathematical genesis of the I - K distribution for random optical fields[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1986, 3(11): 1912-1919.
- [49] OSCHER G R. Optical Detection Theory for Laser Applications[M]. New York, USA: Wiley Interscience, 2002.
- [50] YANG L, CHENG J, HOLZMAN J F. Maximum likelihood estimation of the lognormal-rician FSOC channel model[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(15): 1656-1659.
- [51] AL-HABASH M A, ANDREWS L C, PHILLIPS R L. Mathematical model for the irradiance probability density function of a laser beam propagating through turbulent media[J]. Optical Engineering, 2001, 40(8): 1554-1562.
- [52] JURADO-NAVAS A, GARRIDO-BALSELLS J M, PARIS J F, et al. A Unifying Statistical Model for Atmospheric Optical Scintillation[M]. New York, USA: InTechopen, 2011: 181-206.
- [53] CHATZIDIAMANTIS N D, SANDALIDIS H G, KARAGIANNIDIS G K, et al. New results on turbulence modeling for free-space optical systems[C]//Proceedings of the International Conference on Telecommunications. Doha, Qatar: IEEE, 2010: 487-492.
- [54] KASHANI M A, UYSA M, KAVEHRAD M. A novel statistical channel model for turbulence-induced fading in free-space optical systems[J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(11): 2303-2312.
- [55] BARRIOS R, DIOS F. Exponentiated weibull model for the irradiance probability density function of a laser beam propagating through atmospheric turbulence[J]. Optics & Laser Technology, 2013, 45: 13-20.
- [56] JAKEMAN E, PUSEY P N. Significance of K distributions in scattering experiments[J]. Physical Review Letters, 1978, 40(9): 546-550.
- [57] XU G, SONG Z. Effects of solar scintillation on deep space communications: Challenges and prediction techniques[J]. IEEE Wireless Communications, 2019, 26(2): 10-16.
- [58] SINGH R K, KUMA R S, KARMESHU. New approximation for pdf of K-distribution: Analytical study of QoS parameters in free space optical communication[J]. IET Communications, 2018, 12(14): 1703-1708.
- [59] JURADO-NAVAS A, GARCÍA-ZAMBRANA A. Efficient lognormal channel model for turbulent FSOC communications[J]. Electronics Letters, 2007, 43(3): 178-180.
- [60] CHURNSIDE J H, FREHLICH R G. Experimental evaluation of log-normally modulated Rician and IK models of optical scintillation in the atmosphere[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1989, 6(11): 1760-1764.
- [61] FARID A A, HRANILOVIC S. Outage capacity optimization for free-space optical links with pointing errors[J]. Journal of Lightwave Technology, 2007, 25(7): 1702-1710.
- [62] LEE I E, GHASSEMLOOY Z, NG W P, et al. Performance analysis of free space optical links over turbulence and misalignment induced fading channels[C]//Proceedings of the International Symposium on Communication Systems, Networks & Digital Signal Processing. Poznan, Poland: IEEE, 2012: 1-6.
- [63] MAJUMDAR A K. Advanced Free Space Optics (FSOC): A Systems Approach[M]. New York, USA: Springer, 2015.
- [64] CAHOY K, KINGSBURY R W, NGUYEN T, et al. Fast-steering solutions for cubesat-scale optical communication [C]//Proceedings of the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers Conference. Tenerife, Canary Islands, Spain: SPIE, 2017: 4-10.
- [65] MORI K, TERADA M, NAKAMURA K, et al. Fast handover mechanism for high data rate ground to-train free-space optical communication system[C]//Proceedings of the 2014 IEEE Globecom Workshops. Austin, TX, USA: IEEE, 2014: 499-504.
- [66] VISWANATH A, SINGH S, JAIN V, et al. Design and implementation of MOEMS based ground to satellite free space optical link under turbulence condition[J]. Procedia Computer Science, 2015, 46: 1216-1222.
- [67] WEYRAUCH T, VORONTOV M A. Free-space laser communications with adaptive optics: Atmospheric compensation experiments[J]. Journal of Optical & Fiber Communications Reports, 2004, 1(4): 355-379.
- [68] WANG X, WANG B, POUCH J, et al. Liquid crystal on silicon (LCOS) wavefront corrector and beam steerer[C]//Proceedings of the Advanced Wavefront Control: Methods, Devices, and Applications. San Diego, USA: SPIE, 2003: 51-62.
- [69] EPPLER B, HENNIGER H. Free-space optical transmis-

- sion improves land-mobile communications[J]. SPIE Newsroom, 2007, 1: 1-3.
- [70] 王汝言, 王卓, 吴大鹏, 等. 基于训练序列与数据叠加的 ACO-OFDM 无线光通信系统时间同步方法[J]. 电子学报, 2012, 40(1): 162-166.
WANG R Y, WANG Z, WU D P, et al. A timing synchronization method for ACO-OFDM optical wireless communications based on superposition of training and data[J]. Acta Electronica Sinica, 2012, 40(1): 162-166. (in Chinese)
- [71] 童红明. 天地一体化网络拓扑可视化系统设计与实现[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019.
TONG H M. Design and Implementation of Space-Ground Integrated Network Topology Visualization System[D]. Xi'an, China: Xidian University, 2019. (in Chinese)
- [72] GHAZY A S, HASABELNABY M A, SELMY H A I, et al. Optimal transceiver placement and resource allocation schemes in cooperative dynamic FSOC networks[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2019, 11(12): 599-599.
- [73] DESAI A, MILNER S. Autonomous reconfiguration in free-space optical sensor networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2005, 23(8): 1556-1563.
- [74] GU Z, ZHANG J, JI Y. Topology optimization for FSOC-based fronthaul/backhaul in 5G+ wireless networks[C]// Proceedings of the IEEE International Conference on Communications Workshops. Kansas City, MO, USA: IEEE, 2018: 1-6.
- [75] GU Z, ZHANG J, JI Y. Topology Optimizing in FSOC-based UAVs relay networks for resilience enhancement [J]. Mobile Networks and Applications, 2019, 25(5): 350-362.
- [76] 董明佶, 林宝军, 刘迎春, 等. 基于多目标模拟退火算法的导航卫星激光星间链路拓扑动态优化[J]. 中国激光, 2018, 45(7): 217-228.
DONG M J, LIN B J, LIU Y C, et al. Topology dynamic optimization for inter-satellite laser links of navigation satellite based on multi-objective simulated annealing method[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(7): 217-228. (in Chinese)
- [77] SHANG T, YANG Y, REN G, et al. Topology control algorithm and dynamic management scheme for mobile FSOC networks[J]. IEEE/OSA Journal of Optical Communications & Networking, 2015, 7(9): 906-917.
- [78] GU Z, ZHANG J, JI Y, et al. Network topology reconfiguration for FSOC-based fronthaul/backhaul in 5G+ wireless networks[J]. IEEE Access, 2018, 6: 69426-69437.
- [79] QI W, HOU W, SONG Q, et al. Topology control and routing based on adaptive RF/FSOC switching in space-air integrated networks[C]//Proceedings of the IEEE Global Communications Conference. Washington, DC, USA: IEEE, 2016: 1-6.
- [80] QU H, LUO Y, ZHAO J, et al. An LBMRE-OLSR routing algorithm under the emergency scenarios in the space-air-ground integrated networks[C]//2020 Information Communication Technologies Conference. Nanjing, China: IEEE, 2020: 103-107.
- [81] HOU W, LI R, NING Z, et al. A hierarchical routing algorithm for satellite networks considering FSOC communication[C]//Proceedings of the International Symposium on Pervasive Systems, Algorithms and Networks & 2017 11th International Conference on Frontier of Computer Science and Technology & 2017 Third International Symposium of Creative Computing. Exeter, UK: IEEE, 2017: 278-284.
- [82] 陈利. 低轨卫星 DTN 网络路由研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.
CHEN L. Routing for Low-Earth-Orbit Satellite Delay Tolerant Networks[D]. Wuhan, China: Huazhong University of Science and Technology, 2018. (in Chinese)
- [83] ITU-T. Network 2030 architecture framework[R]. Geneva, Switzerland: ITU, FG-NET2030-Focus Group on Technologies for Network 2030: 434-WP3, 2020.
- [84] FEI C, ZHAO B, YU W, et al. A research platform for software defined satellite networks[C]//Proceedings of the International Conference on Optical Communications and Networks. Wuzhen, China: IEEE, 2017: 1-2.
- [85] 刘桂芬. 自由空间光通信网络拓扑形成及路由算法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2011.
LIU G F. Research on Topology Formation and Routing Algorithm of Free Space Optical Communication Network [D]. Xi'an, China: Xidian University, 2011. (in Chinese)
- [86] LUO Y, GAO Z, DANG A, et al. Routing algorithm based on DTN protocols for free-space optical MANET [C]//Proceedings of the Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim. Hong Kong, China: IEEE, 2018: 1-2.
- [87] FAUZIA S, FATIMA K. Routing in FSOC MANETs-QoS and directionality[C]//Proceedings of the Eleventh International Conference on Wireless and Optical Communications Networks. Vijayawada, India: IEEE, 2014: 1-5.
- [88] FAUZIA S, FATIMA K. QoS-based routing for free space optical mobile ad hoc networks[J]. International Journal of Vehicle Information and Communication Sys-

- tems, 2020, 5(1): 1-10.
- [89] QI W, SONG Q, GUO L, et al. EDCAR: Enhanced distributed coding-aware routing for optical flying Ad-hoc networks[C]//Proceedings of the Asia Communications and Photonics Conference (ACP). Guangzhou, China: IEEE, 2017: 1-3.
- [90] FAUZIA S, FATIMA K. Routing in optical mesh networks - A QoS perspective[J]. International Journal of Ad hoc, Sensor & Ubiquitous Computing, 2018, 9(2): 1-14.
- [91] KAPSIS T T, PANAGOPOULOS A D. Optimum power allocation based on channel conditions in optical satellite downlinks[J]. Wireless Personal Communications, 2021, 116(2): 2997-3013.
- [92] WU D, SUN X, ANSARI N. An FSO-based drone assisted mobile access network for emergency communications[J]. IEEE Transactions on Network Science and Engineering, 2019, 7(3): 1597-1606.
- [93] ALSHAROA A, ALOUINI M S. Facilitating satellite-airborne-terrestrial integration for dynamic and infrastructure-less networks[EB/OL]. (2019-12-9)[2021-1-20]. <https://arxiv.org/pdf/1912.03819.pdf>.
- [94] QIU C, YAO H, YU F, et al. Deep Q-learning aided networking, caching, and computing resources allocation in software-defined satellite-terrestrial networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(6): 5871-5883.
- [95] 徐媚琳. SDN/NFV 架构下的空间网络资源调度技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- XU M L. Research on Space Network Resource Scheduling Technology Based on SDN / NFV Architecture[D]. Harbin, China: Harbin Institute of Technology, 2020. (in Chinese)
- [96] 张连连, 刘锋, 孙杰, 等. 卫星网络中的 TCP 跨层技术研究[J]. 现代电子技术, 2021, 44(1): 1-4.
- ZHANG L L, LIU F, SUN J, et al. Research of TCP based on cross-layer technology in satellite network[J]. Modern Electronics Technique, 2021, 44(1): 1-4. (in Chinese)
- [97] HASEGAWA Y A. Transmission control protocol for free-space optical communications[C]//Proceedings of the IEEE Global Communications Conference. Singapore, Singapore: IEEE, 2017: 1-7.
- [98] 谢伟良, 汤俊雄, 刘璐. 无线光通信中 RCPT/ARQ 自适应差错控制机制的研究[J]. 电子学报, 2004, 32(2): 223-226.
- XIE W L, TANG J X, LIU LU. Study on the adaptive rate compatible punctured Turbo-Coded ARQ scheme in optical wireless communication[J]. Acta Electronica Sinica, 2004, 32(2): 223-226. (in Chinese)
- [99] AGHAJANZADEH S M, UYSAL M. Information theoretic analysis of hybrid-ARQ protocols in coherent free-space optical systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 2012, 60(5): 1432-1442.
- [100] URKE A R, BRITEN L E, OVSTHUS K. TCP challenges in hybrid military satellite networks; measurements and comparison[C]//Proceedings of the IEEE Military Communications Conference. Orlando, FL, USA: IEEE, 2012: 1-6.
- [101] LE H D, PHAM A T. TCP over Satellite-to-unmanned aerial/ground vehicles laser links: Hybla or cubic?[C]//Proceedings of the IEEE Region 10 Conference. Osaka, Japan: IEEE, 2020: 720-725.
- [102] HUANG Q, LIN M, ZHU W P, et al. Uplink massive access in mixed RF/FSO satellite-aerial-terrestrial networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2021, 69(4): 2413-2426.
- [103] LIU X, LIN M, ZHU W P, et al. Outage performance for mixed FSO-RF transmission in satellite-aerial-terrestrial networks[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2021, 32(21): 1349-1352.
- [104] KONG H, LIN M, ZHU W P, et al. Multiuser scheduling for asymmetric FSO/RF links in satellite-UAV-terrestrial networks[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2020, 8(9): 1235-1239.
- [105] SWAMINATHAN R, SHARMA S, VISHWAKARMA N, et al. HAPS-based relaying for integrated space-air-ground networks with hybrid FSO/RF communication: A performance analysis[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2021, 57(3): 1581-1599.
- [106] BAG B, DAS A, ANSARI I S, et al. Performance analysis of hybrid FSO systems using FSO/RF-FSO link adaptation[J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10(3): 1-17.
- [107] ERDOGAN E, ALTUNBAS I, KABAOGLU N, et al. A cognitive radio enabled RF/FSO communication model for aerial relay networks: Possible configurations and opportunities[J]. IEEE Open Journal of Vehicular Technology, 2021, 2: 45-53.
- [108] YANG L, YUAN J, LIU X, et al. On the performance of lap-based multiple-hop RF/FSO systems[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2019, 55(1): 499-505.
- [109] HUANG Z, WANG Z, HUANG M, et al. Hybrid optical wireless network for future SAGO-integrated communi-

ation based on FSO/VLC heterogeneous interconnection[J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(1): 1-10.

作者简介



赵雄文 男,1964年生,陕西清涧人. 中国电子学会会士,华北电力大学教授,博士生导师,通信工程国家一级专业负责人,信息与通信工程学科责任教授. 主要研究方向为无线通信与电力系统通信等.

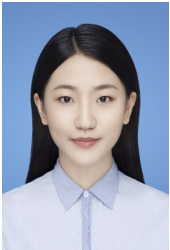


张钰(通信作者) 女,1995年生,安徽六安人. 华北电力大学电气与电子工程学院博士研究生. 主要研究方向为5G,B5G无线通信技术.

E-mail:zhyu@ncepu.edu.cn



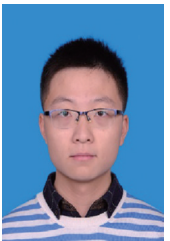
秦鹏 男,1987年生,河南商丘人. 华北电力大学副教授. 主要研究方向为空天地一体化网络通信技术等.



王晓晴 女,1998年生,青海西宁人. 华北电力大学电气与电子工程学院硕士研究生. 主要研究方向为无线通信网络资源优化等.



耿绥燕 女,1966年生,陕西绥德人. 华北电力大学副教授. 主要研究方向为短距离无线通信技术等.



宋俊元 男,1997年生,贵州凯里人. 华北电力大学电气与电子工程学院硕士研究生. 主要研究方向为B5G高频段通信技术等.



刘瑶 女,1997年生,天津人. 华北电力大学电气与电子工程学院研究生. 主要研究方向为B5G/6G网络通信新技术.



李思峰 男,1998年生,北京人. 华北电力大学电气与电子工程学院硕士研究生. 主要研究方向为B5G无线通信信道建模、机器对机器通信等.