

混沌空间光通信研究进展

王超¹, 董怡泽¹, 王卉婷², 高冀¹, 田志新¹, 高建威¹, 江宁^{3*}

1. 中国空间技术研究院卫星应用总体部, 北京 100094;
2. 中国信息通信研究院安全研究所, 北京 100191;
3. 电子科技大学信息与通信工程学院, 四川成都 611731)

摘要: 随着空间通信技术的迅猛发展,人们对信息安全的需求愈发迫切。基于半导体激光器的空间激光通信凭借其终端体积小、功耗低、高带宽以及无电磁频谱约束等特点,已广泛应用于空间高速通信领域。激光混沌通信技术作为一种在物理层对空间光通信加密的安全技术手段,逐渐成为了空间光通信的研究热点。结合当前国内外自由空间光通信、混沌激光通信、混沌空间光通信的发展历程,介绍了近年来混沌空间光通信关键技术的研究进展,主要包括自由空间光通信快速跟瞄技术、混沌空间光通信大气湍流抑制技术和激光混沌空间同步技术。最后结合当前混沌空间光通信发展现状与不足,对混沌空间光通信的研究方向和可借鉴的关键技术进行了展望,旨在为该领域的进一步发展提供参考和借鉴。

关键词: 混沌空间光通信; 自由空间光通信; 大气湍流; 跟瞄; 混沌空间同步
中图分类号: TN929.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20220296

Research progress of chaotic free-space optical communication

Wang Chao¹, Dong Yize¹, Wang Huiting², Gao Ji¹, Tian Zhixin¹, Gao Jianwei¹, Jiang Ning^{3*}

1. Institute of Spacecraft Application System Engineering, China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China;
2. Security Research Institute, China Academy of Information and Communications Technology, Beijing 100191, China;
3. School of Information and Communication Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: With the rapid development of space communication technology, there is an urgent demand for information security. Free-space optical communication based on semiconductor laser, known for its terminal miniaturization, low power consumption, wide-spectrum and no electromagnetic spectrum constraints, has been widely used in high-speed space communication. As chaotic free-space optical communication technology can encrypt optical signal in physical layer, it becomes a research hotpot of space optical communication. Combined with the current development process of free-space optical communication, chaotic laser communication and chaotic free-space optical communication, this paper introduces the key technologies of chaotic free-space optical communication, and focuses on the research progress of laser beam's pointing, acquisition and tracking technologies, turbulence mitigation technologies of chaotic free-space optical communication and chaotic free-space optical synchronization technology. Besides, the future research directions and several key technologies that can be used for reference of chaotic free-space optical communication are also prospected, aiming to provide reference for the further development of chaotic free-space optical communication technology.

收稿日期:2022-04-27; 修订日期:2022-06-06

基金项目:国家自然科学基金(62171087, 41901292); 四川省科技计划(2021JDJQ0023)

作者简介:王超,男,工程师,硕士,主要从事混沌保密通信、卫星隐蔽通信、卫星应用体系设计等方面的研究。

通讯作者:江宁,男,教授,博士,主要从事物理层保密光通信、全光混沌保密通信、宽带随机信号产生技术、激光混沌雷达、光子储备池计算等方面的研究。

Key words: chaotic free-space optical communication; free-space optical communication; atmospheric turbulence; pointing, acquisition and tracking; chaotic free-space optical synchronization

0 引言

随着卫星通信技术迅猛发展,对大容量、高速率且安全性高的卫星通信需求也越来越迫切。目前,无线微波通信在通信容量、通信速率、频谱资源、电磁干扰、载荷体积及功耗等方面的瓶颈逐渐显露,社会民生、军事需求、环境监测等应用领域对信息容量的需求也逐渐超过现有无线电承载能力。在这种情况下,自由空间光通信(Free-Space Optical Communication, FSOC)技术正以其独特的优势发展壮大,成为构建大容量、高速率空天网络一体化的重要通信手段。

美国在 20 世纪 60 年代就开展了对空-地光通信系统的研究^[1-2]。1972 年美国航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)戈达德太空飞行中心开展了地-空激光通信试验,研究了大气湍流对系统通信性能的影响^[3]。2013 年, NASA 成功实施了月球激光通信演示验证项目,该项目是世界上首次月-地距离双向光通信试验^[4]。2021 年,美国 SpaceX 公司使用猎鹰-9 发射了新一代“星链”通信卫星,这批星链卫星配置了激光星间通信载荷,星间延迟大幅降低^[5]。

2008 年,德国和美国利用两国近地轨道(Low Earth Orbit, LEO)卫星(TerraSAR-X 与 NFIRE)开展了速率为 5.625 Gbit/s 的星间双向激光通信试验,误码率优于 10^{-9} ^[6]。2016 年,搭载了采用激光通信技术的中继载荷 EDRS-A 的欧洲通信卫星 Eutelsat9B 进入地球同步轨道(Geosynchronous Earth Orbit, GEO),实现了 LEO 与 GEO 上 EDRS 系统之间的中继传输^[7]。EDRS 系统完成全球组网后,会使欧洲空间信息传输得以独立,不再依赖他国第三方基站。

日本的星载激光通信研究最早开始于 1995 年搭载于 ETS-VI 卫星的 LCE 系统,主要进行激光通信捕获试验。2020 年,日本研制的中继卫星系统(Japanese Data Relay System, JDRS-1)发射升空^[8]。2021 年,日本先进激光仪器高速通信项目研制的采用波分复用技术的激光通信终端搭载在高通量卫星上进入 GEO,目标是实现 10 Gbit/s 的 GEO 至地面段的激光通信验证^[9]。

2011 年,我国开展了海洋二号卫星(HY-2)星-地激光通信试验,实现了通信距离 970 km 的星-地激光通信,传输速率最高达 504 Mbit/s,该试验为解决我国高分辨率对地遥感卫星超大容量数据回传提供了关键技术途径^[10]。2016 年发射的“墨子号”量子卫星实现了星-地相干光通信技术^[11]。2017 年的“实践十三号”卫星实现了通信距离 45 000 km 的双向 5 Gbit/s 激光通信^[12]。2019 年“实践二十号”GEO 卫星在海南文昌发射升空,其相干体制的通信速率高达 10 Gbit/s^[13]。

当前国内外卫星领域的 FSOC 技术愈发成熟,值得注意的是,关于 FSOC 物理层安全性增强技术的研究目前还处于起步阶段。半导体激光器中的混沌现象最早发现于 20 世纪 80 年代,一经发现,有关半导体激光器混沌系统的物理特性及实际应用便引发了极大的研究热潮^[14]。激光混沌信号具有的初值敏感、带宽大、类噪声波形、长期不可预测性等特性能够满足保密通信的基本要求,使其非常适用于保密通信应用场景,作为保密光通信载波对信息进行隐蔽传输^[15]。混沌空间光通信作为在 FSOC 基础上的物理层安全性增强的通信技术,在兼有 FSOC 技术高速率、高带宽优势的同时,还具备更高的安全性能,因而有着广阔的应用前景。

文中将重点介绍混沌空间光通信国内外的的发展状况,综述近年来该领域内几种关键技术的发展动态和进展,最后讨论混沌空间光通信未来需要开展的研究工作和工程实践中可借鉴的关键技术。

1 混沌空间光通信发展概况

1.1 激光混沌通信发展概况

目前,激光混沌通信研究主要是基于光纤传输信道的混沌通信。由于半导体激光器在光反馈、光注入等条件下产生的激光混沌信号具有高初值敏感性和高宽带特性,基于半导体激光器的混沌保密通信在近年来成为了光保密通信研究领域的一大热点。1998 年, Vanwiggeren 等第一次实现了基于掺铒光纤激光器的混沌激光保密通信^[16]。2005 年,在欧盟 OCCULT 项目的支持下, Argyris 等成功地实现了 1 Gbit/s、通信距

离大于 120 km、误码率优于 10^{-7} 的激光混沌保密通信试验,验证了激光混沌保密通信技术的可行性^[14]。2008 年, Bogris 等提出一种利用相位加密的方法,提高了混沌保密通信的安全性^[17]。2009 年, Argyris 等提出一种基于副载波调制技术的激光混沌保密通信系统,极大地提高了混沌光通信性能^[18]。

2013 年, 太原理工大学的王安帮等提出了一种平衡外差探测方案,获得了更加平滑的功率谱和更大的混沌有效带宽^[19]。2019 年, 上海交通大学的义理林等首次将基于深度学习的神经网络技术应用于混沌通信系统,实现了 32 Gbit/s 速率、20 km 的光纤传输^[20]。2019, 华中科技大学的刘德明团队为提高混沌半导体激光器的鲁棒性,引入了数模混合光电反馈环^[21]。2020 年, 北京邮电大学的忻向军等提出了一种在 OFDM-PON 中位级和符号级两级混沌加密的新型安全增强通信方案^[22]。2021 年, 西南交通大学的潘伟、闫连山团队, 太原理工大学的王安邦团队及广东工业大学的王云才团队等联合提出了一种盲极化跟踪混沌解密 (Polarization Tracking Chaotic Decryption, PTCD) 方案,成功实现了速率 112 Gbit/s、1040 km 单模光纤传输试验^[23]。近期, 电子科技大学课题组提出了一种基于频谱展宽的新型混沌加密通信方案,实现了 50 Gbit/s 高速多信道物理层混沌加密通信,并探讨了方案的安全性^[24-25]。

1.2 混沌空间光通信发展概况

在混沌空间光通信方面, 2002 年, 加州大学的 Rulkov 等搭建了基于混沌同步的激光混沌通信空间系统,并实现穿过 5 km 大气的激光通信^[26],这是混沌空间光通信系统的首次成功应用。2008 年, Annovazzi-Lodi 等提出了一种混沌空间光通信的方案,通过第三个激光器作为收发端激光器的驱动激光器,来增强混沌空间光通信系统的同步性^[27]。

2018 年, NASA 的 Mahmud 等提出了一种混沌空间光通信协议,首次将混沌空间光通信和量子密钥分发 (Quantum Key Distribution, QKD) 技术结合,通过量子信道实现收发端参数同步^[28]。2018 年及 2020 年, 南京大学的李密等分别研究了混沌空间光通信系统参数失配、大气湍流、空间辐射、参铟光纤放大器 (Erbium-Doped Fiber Amplifier, EDFA) 的自发辐射噪声 (Amplifier Spontaneous Noise, ASE) 等因素对混沌

空间光通信的影响^[29-30]。2020 年, 长春工业大学的郭锐强等采用差分混沌键控的 Gamma-Gamma 湍流模型建立了 FSOC 系统,并对系统的安全性进行了分析,分析结果表明该系统具有较好的保密性能^[31]。

2 混沌空间光通信关键技术

作为一个典型的 FSOC 系统,星-地下行混沌空间光通信系统结构如图 1 所示。星载激光混沌终端由主激光器 (Master Semiconductor Laser, MSL)、光耦合器 (Optical Coupler, OC)、光隔离器 (Optical Isolator, OI) 和反射镜 (Reflector, R) 构成。光调制器 (Modulator, M) 将信息 $m(t)$ 调制到由 MSL 输出的混沌载波中,经 EDFA 进行放大,通过由快速跟踪 (Pointing, Acquisition and Tracking, PAT) 系统控制的发射光学望远镜 L_1 发射。混沌载波依次穿过自由空间和大气信道,到达地面站接收终端,与从激光器 (Slave Semiconductor Laser, SSL) 产生混沌同步,经过光电探测器 (Photodiode, PD) 解析还原出 $m'(t)$ 。

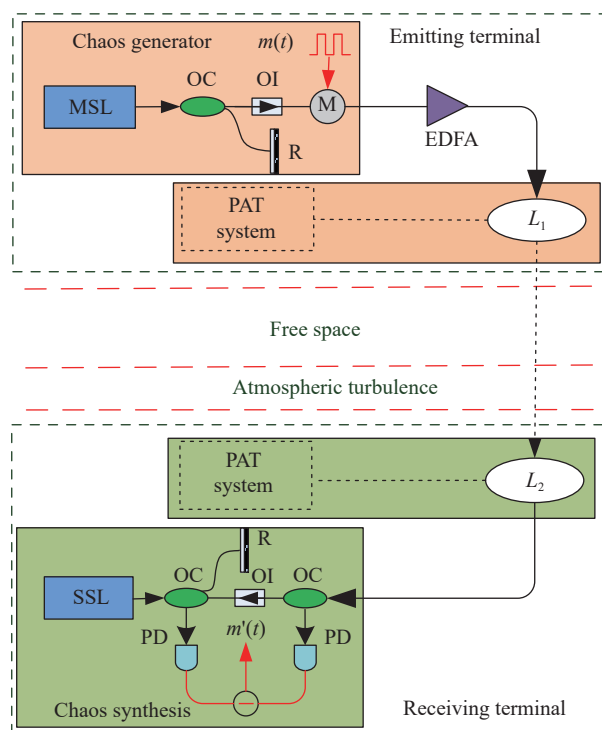


图 1 星-地混沌空间光通信系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of satellite-to-ground chaotic free-space optical communication system

混沌空间光通信系统收发终端的快速瞄准以及精确稳定的信标光跟踪是实现持续通信的前提。当前混沌空间光通信的 PAT 系统相关研究还较少,在此不做过多介绍。通信系统中信道引入的所有噪声都会引起混沌波形畸变,进而阻碍混沌系统的同步,最终导致混沌空间光通信的失败。因此,在对混沌空间光通信的研究中,不可避免地需要对大气湍流造成的光强闪烁、混沌同步参数失配等会造成信号畸变的因素做相应的研究。

2.1 大气湍流抑制技术

1999 年,美国斯坦福大学和加州大学受美国能源部和美国陆军研究办公室资助,开展了“基于半导体激光器的自由混沌空间通信”项目计划研究。在该计划的资助下,2002 年,加州大学的 Rulkov 等搭建了基于混沌脉冲位置调制 (Chaotic Pulse Position Modulation, CPPM) 的自由空间光通信试验系统,试验方案如图 2 所示,最终实现了误码率为 1.92×10^{-2} ,通信距离为 5 km^[26]。

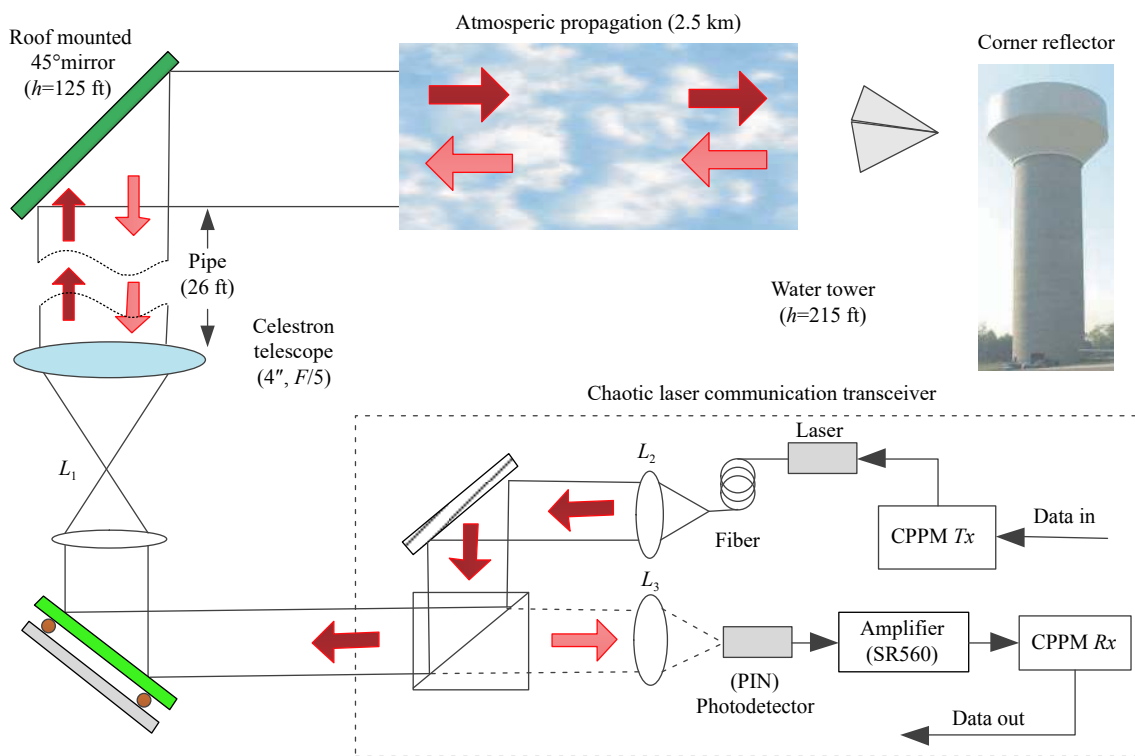


图 2 基于 CPPM 的自由空间光通信系统示意图^[26]

Fig.2 Schematic for the free-space optical communication system based on the chaotic pulse position modulation transceiver^[26]

试验中采用通信波长 $\lambda=690 \text{ nm}$ 、发射功率 $P=10 \text{ mW}$ 的半导体激光器,调制方式为 CPPM,激光光束经单模光纤,并通过透镜中继系统 (L_1, L_2) 和发射望远镜 (星特朗天文望远镜) 扩束到 4 in (1 in=2.54 cm) 直径,通过一个 26 ft (1 ft=30.48 cm) 的垂直密闭的管道,并经过水塔顶部 45°倾角的反射镜反射到大气中传播。光束在大气路径中传播约 2.5 km 后,经一个安装在水塔上的反射器反射,再经过约 2.5 km 的大气再次被 45°倾角的反射镜反射回密闭管道。激光光束接收系统利用发射系统中的同一个发射望远镜和透镜 L_1 ,并由透镜 L_3 接收光束到光电探测器中

进行光电转换,电信号经低噪声前置放大器 (型号 SR560,增益为 20 dB) 放大后进入 CPPM 接收端进行信息还原。试验结果表明, CPPM 调制方式对于实现混沌系统自同步具有良好的鲁棒性,虽然此次试验通信速率和通信质量相对不高,却是世界上首次开展的混沌空间光通信应用试验,证明了混沌空间光通信的可行性。

2016 年,El-Araby 等利用两个级联的离散小波变换 (Discrete Wavelet Transform, DWT) Haar 滤波器大幅降低大气信道光强闪烁带来的噪声对混沌空间光通信质量的影响^[32]。Haar 滤波器具有动态可调整的

中心频率,可根据混沌信号的动态误差进行调整,为克服加性噪声和乘性噪声(大气湍流造成的光强闪烁即是一种乘性噪声)提供有效手段。光通信系统架构如图 3 所示,结果表明信噪比在 40 dB 及以上时,误码率接近于零,引入级联的 Haar 滤波器组成的高阶 Haar DWT 带通滤波器的混沌空间光通信系统具有良好的鲁棒性,能够有效处理接收端接收到带有噪声的

混沌信号。

2020 年,南京大学的李密等探讨了双衍射结构(Diffractive Optical Elements, DOEs)对激光混沌上行空间通信中受强弱大气湍流及系统参数失配影响的改善情况^[30]。在高斯分布光束进入光学天线之前,通过引入的 DOEs 将高斯分布光束重塑为空心高斯分布光束,DOEs 结构如图 4 所示,最终使得实际发射功

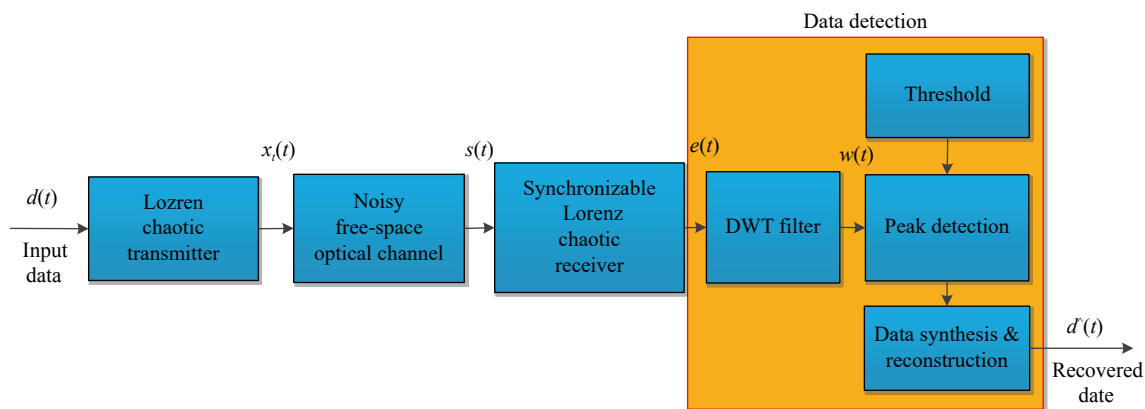


图 3 混沌自由空间光通信系统架构图^[32]

Fig.3 Architecture of the proposed chaotic free-space optical communication system^[32]

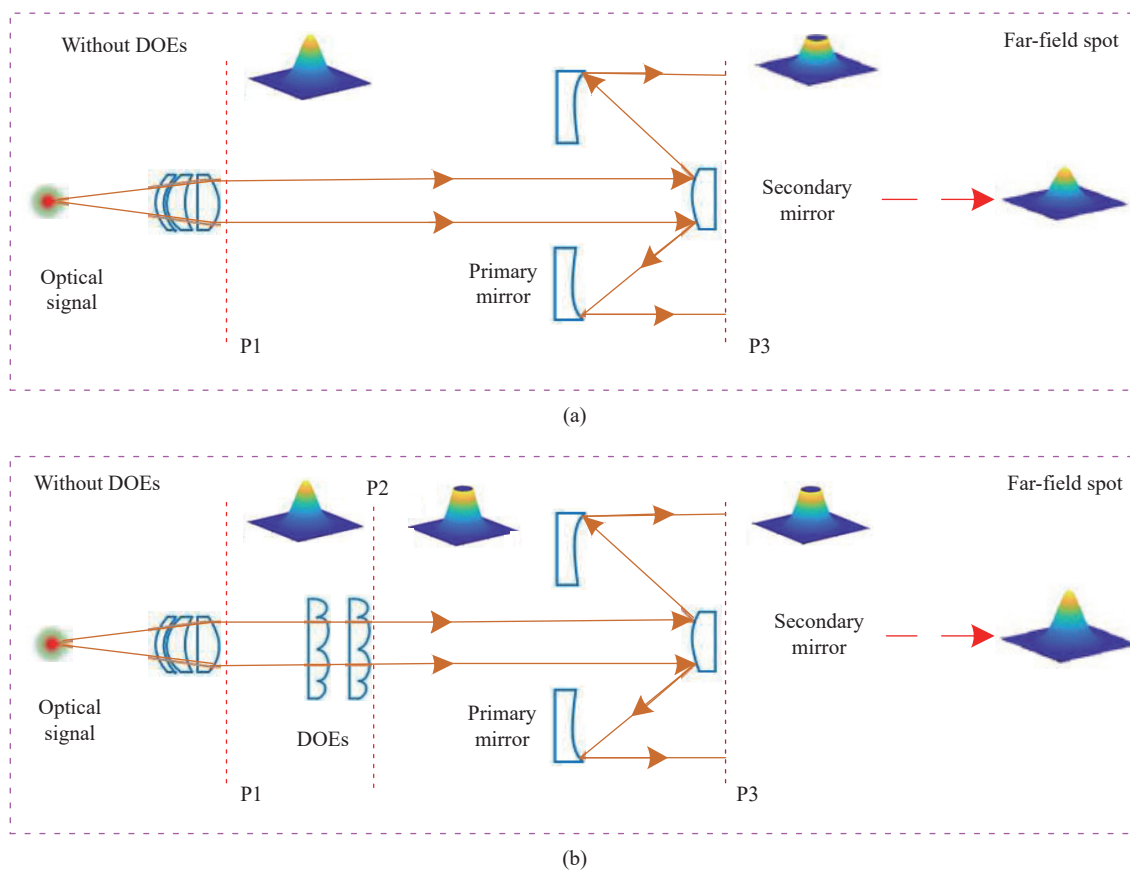


图 4 引入 DOE 前 (a) 后 (b) 的光学子系统^[30]

Fig.4 Optical subsystem before (a) and after (b) introducing the DOEs^[30]

率得到提高,理论传输功率可达 99% 以上,发射端发射功率的提高对误码率有明显的改善效果。该方案通过建立一套基于最小频移键控 (Minimum-Shift-Key, MSK) 的激光混沌上行空间通信 BER 模型,研究了 DOEs 结构对通信质量的影响。仿真结果表明,相比无 DOEs 结构的情况,引入的 DOEs 在强弱大气湍流和系统不同参数失配的情况下,对系统 BER 都有很好的改善效果,如在 1 Gbit/s 时引入 DOEs 结构,可以将误码率从 10^{-4} 降低到 10^{-5} 。DOEs 结构的引入还可以降低对发射功率或接收孔径的要求,这将有利于卫星终端设备的小型化,使得系统可以有更大的天顶角范围和更高的通信速率。

2.2 激光混沌空间同步技术

2008 年, Annovazzi-Lodi 等提出了一种混沌空间光通信方案,其结构如图 5 所示^[27]。发射端和接收端为结构参数相同的激光器,第三个激光器为驱动激光器,产生的激光信号通过星地下行传输链路到达地面的发射端和接收端光学接收天线,为收发端引入相同的驱动反馈光,从而使发射端和接收端激光器同步。接收端将收到发送端发送的带有实际信息的混沌信号与本地产生的混沌信号进行相减操作,从而还原出发射端发送的原始信息。进一步的研究发现,该系统的误码率对内外部参数失配都非常敏感,百分之几的

参数差异就会造成通信系统解码失败,这种敏感特性虽然增强了系统的安全性,但是也降低了通信系统的鲁棒性。

2018 年,南京大学的李密等为度量超长距离空地激光混沌通信链路的长时间通信性能,建立了受光强闪烁和指向误差影响的误码率计算模型,研究通信系统的可控参数失配情况对空地激光混沌下行通信系统误码率的影响^[29]。混沌空间光通信系统收发端结构相同且参数一致,采用光纤延迟环路、雪崩光电二极管 (Avalanche Photodiode, APD)、射频放大器 (Radio-Frequency Amplifier, RF Amplifier)、马赫-曾德尔 (Mach-Zehnder, MZ) 调制器产生混沌载波,如图 6 所示。

方案部分参数设置如下:天顶角 $\zeta=0^\circ$,发射终端和接收终端参数设置为高轨终端 $H=38000$ km、地面站高度 $h_0=100$ m、工作波长 $\lambda=1550$ nm、传播孔径 $W_0=0.1$ m、发散角 $\theta=30$ μ rad、发射功率 $P_1=3$ W、通信速率 1 Gbit/s、掩蔽效率 $a=0.2$ 、接收直径 $D_r=0.3$ m、功率损耗 $a_a=1$ 、量子效率为 0.75、APD 增益因子 $G=20$ dB。为了计算系统的失配噪声值,默认参数失配情况为:激光器反馈强度失配率 $\Delta\beta/\beta=0.002$ 、高截止响应时间失配率 $\Delta\tau/\tau=0.01$ 、APD 输出失配 $\Delta K=0.1$ μ A、反馈延时失配 $\Delta T=1$ ps, APD 偏置相位失配 $\Delta\phi=0.01$ rad。在考虑光强闪烁和指向误差情况下,通过数值仿真分

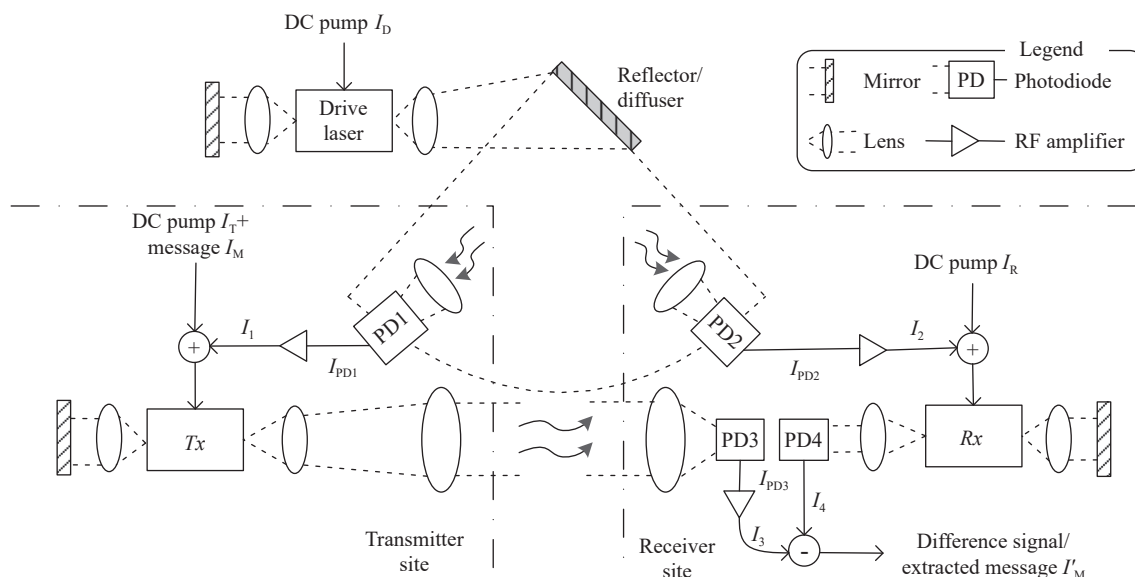


图 5 基于半导体激光器的安全数据传输结构图,收发端通过共同混沌驱动信号对称注入实现混沌同步^[27]

Fig.5 Configuration of secure data transmission with semiconductor lasers as Tx and Rx. The chaos synchronization between Tx and Rx is implemented in virtue of the symmetric injection from a common driving signal^[27]

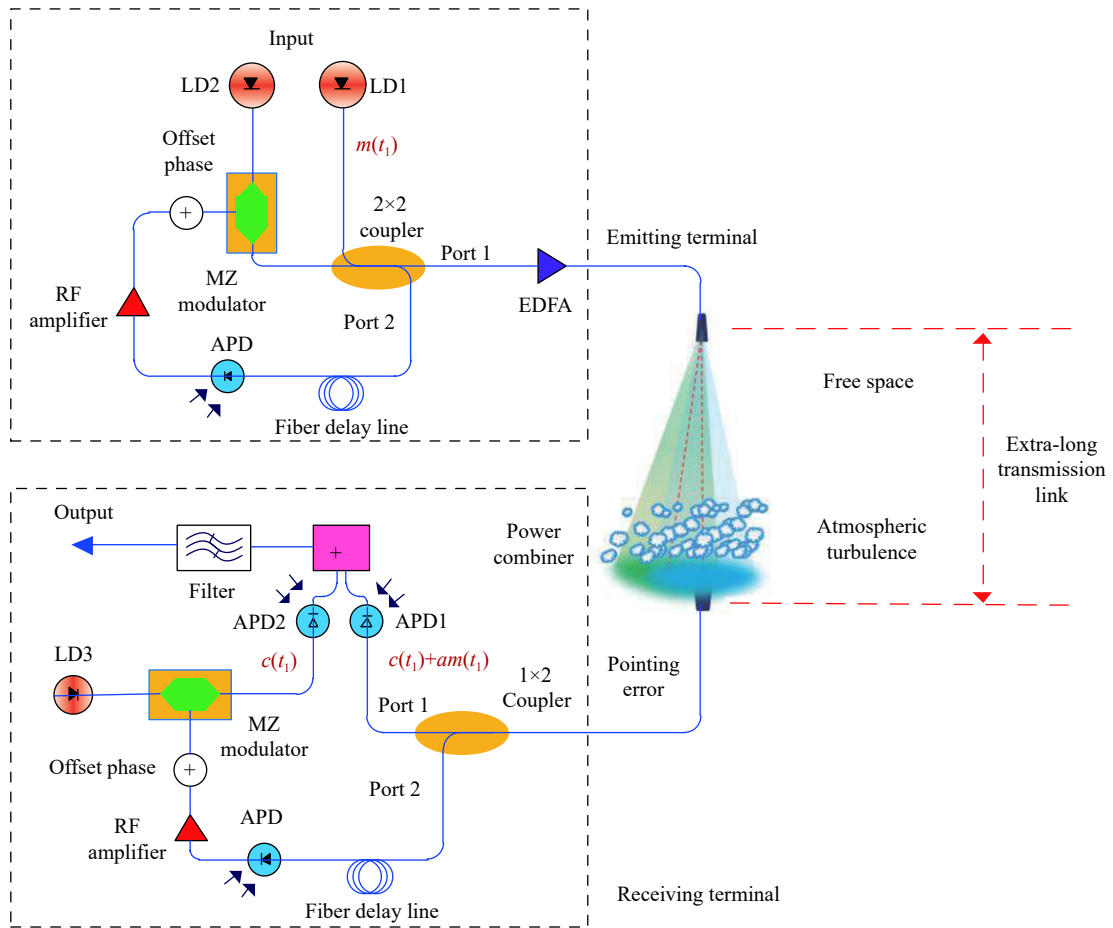


图 6 基于光电反馈的空-地混沌激光通信系统^[29]

Fig.6 Optoelectronic-feedback-based space-to-ground chaotic laser communication system^[29]

析了 ΔK 、 ΔT 、 $\Delta\phi$ 等三种可控失配参数对系统误码率的影响。

试验结论如下: (1) 在 APD 输出失配 ΔK 较小时, 参数 σ_s (用于衡量指向误差的抖动程度) 对系统误码率几乎没有影响; 在 APD 输出失配 ΔK 较大时, 参数 σ_s 对系统 BER 有较大影响。这意味着在相对微弱的抖动下, 对于空-地混沌空间光通信系统来说, 存在可接受的 ΔK 范围, 能够获得稳定的通信性能。(2) 在参数 σ_s 较大时, 误码率随延迟失配 ΔT 变化不大, 在参数 σ_s 较小时, 误码率对延迟失配 ΔT 的值变化更敏感。这意味着当参数 σ_s 较小时, 由于 BER 对 ΔT 的精度要求较高, 应该注意对延时时间同步的控制, 以获得良好的通信性能。(3) 即使 $\Delta\phi$ 较小, 系统 BER 对参数 σ_s 的变化已经很敏感。这意味着此时更应该注重 $\Delta\phi$ 失配的控制。结果表明: 如果能够对系统同步参数进行精确控制, 即使在强度闪烁和指向误差的影响下, 混沌空间光通信系统在超长传输链路上也有着

良好的通信性能。因此, 激光混沌通信系统适合作为下一代空-地激光通信的加密方法。

同年, 该课题组还建立了星间、星地两种混沌空间光通信模型, 分别探讨了星间混沌空间光通信信号光在外太空、大气信道传输时因光辐射造成的参数失配和因大气湍流造成的光强闪烁造成的信号畸变对系统通信性能的影响^[33]。仿真结果表明, 对于星间激光混沌通信系统, 辐射效应会造成巨大的参数失配影响; 对于星-地激光混沌通信系统, 光强闪烁会比光辐射效应对通信质量产生更严重的影响。

2018 年, Niaz 等采用 Optisystem14.0 和 MATLAB 进行了不同天气条件下, 波长 $\lambda=1550\text{ nm}$ 、调制方式为混沌遮掩 (Chaos Masking Scheme, CMS)、通信距离 $h=5\text{ km}$ 、发射功率为 5 dBm 、通信速率为 2.5 Gbit/s 的混沌空间光通信数值模拟仿真^[34]。为了探讨混沌空间光通信在各种天气条件下的可用性和通信效率, 建立的空间光通信模型如图 7 所示, 分别对小雨、大

雨、小雾、中雾、霾等天气下的混沌空间光通信性能进行测试。仿真结果表明,小雾和小雨条件下的混沌通信质量的衰减比霾天气混沌通信质量衰减小。另

外,指出利用混沌技术实现空间光通信加密后,激光混沌通信系统在不同天气条件下的通信性能都会有明显的下降。

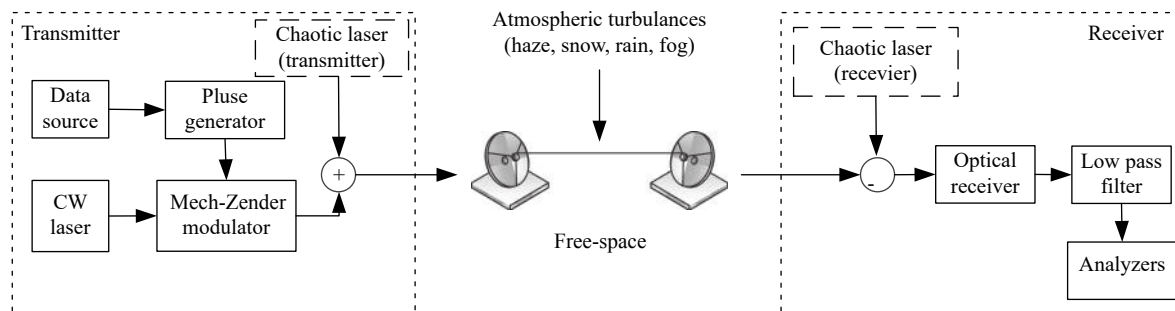


图 7 混沌自由空间光通信模型^[34]

Fig.7 Chaotic free-space optical communication model^[34]

2018 年, Mahmud 等提出了一种通信协议, 该协议集成了混沌空间通信系统和 QKD 技术^[28]。通过量子信道实现了收发端混沌激光器同步参数的共享。为了安全地共享密钥, 公钥密码系统通常使用 RSA 算法。共享密钥在量子信道传输时, 任何拦截都会破坏其中的数据, 暴露窃听者的存在。低密度奇偶校验 (Low Density Parity Check, LDPC) 和数字调制/解调技术 (如 QPSK) 也被应用在该方案中, 以减少信道噪声的影响, 降低通信系统的误码率。

2021 年, 南京大学的李密等研究了激光混沌卫星通信系统中 EDFA 的 ASE 对混沌通信系统通信性能的影响^[35]。在空间激光混沌通信中, 通过 EDFA 实现长距离传输不可避免地会引入 ASE, 为了研究 ASE 的影响, 建立了改进的误码率计算模型, 并在此基础上进行了数值仿真。结果表明: 大部分的 ASE 引入是接收端的 EDFA; 当 ASE 较小时, 同步失配的主要因素来自系统内部参数失配; 当 ASE 较大时, 同步失配则由外部失配噪声和内部失配噪声共同作用产生。该项研究对于混沌空间光通信系统设计具有很好的指导意义。

3 结 论

综上, 混沌空间光通信技术是一项具有很大潜在优势和应用前景的新型空间安全光通信技术, 具有安全性高、终端体积小、质量轻、功耗低以及信息传输速率高等优点。虽然混沌空间光通信的相关技术研

究已经取得了一系列进展, 但在实际应用中还面临着诸多挑战, 总结如下:

- (1) 大气湍流效应中除光强闪烁外, 到达角起伏、相位起伏、光束扩展和光束漂移等效应对超高速混沌空间光通信通信性能影响的消除还有待进一步的理论及试验研究;
- (2) 全天候混沌空间光通信研究还相对较少, 对于全天候的混沌空间光通信通信性能的优化方案仍有待探索;
- (3) 目前对混沌空间光通信系统的安全性分析还是建立在光纤混沌保密通信技术的认知之上, 针对混沌空间光通信的攻击截获方案的安全性分析尚未见报道;
- (4) 混沌空间光通信系统相比于空间光通信虽然具有更高的安全性, 但同时带来工程实践系统复杂度的提升。混沌空间光通信系统在未来航天工程中的应用还需多方面的进一步工程验证。

FSOC 技术凭借其超大带宽、无电磁频谱约束等众多优势已得到飞速发展, 成为世界各国空间高速通信的重要方式。FSOC 领域的关键技术相对于混沌空间光通信技术有着更加成熟的应用。对于混沌空间光通信来说, 在 FSOC 中可尝试借鉴的关键技术还有待开展, 如:

- (1) 自由空间光通信中抑制大气湍流的关键技术, 如孔径平均技术、空间分集技术、自适应光学等在混沌空间光通信中的应用研究还尚未有所实践;

(2) 混沌空间光通信技术作为 FSOC 技术的一种, FSOC 中常用的快速瞄准、捕获及跟踪技术同样也适用于混沌空间光通信^[36]。混沌空间光通信成功的基本保证除了消除各种传输通道效应的不利影响外, 还需要保证发射端和接收端能够以较高的对准精度进行正确对接, 并保持稳定的对准状态, 才能够实现持续通信。星载终端的安装误差、指向误差及平台振动对混沌空间光通信系统的快速跟瞄影响试验还有待开展。因此, PAT 技术作为混沌空间光通信技术工程化的前提, 也是研制和设计的难点。

需要注意的是, 国外相关机构对混沌空间光通信的研究正快速发展, 但国内在该方面的研究还较少。文中对国内外混沌空间光通信研究与发展进行了系统论述, 对混沌空间光通信的混沌空间通信大气湍流抑制技术和激光混沌空间同步技术的国内外发展动态进行了分析介绍, 对未来需要开展的工作和可借鉴的关键技术作了初步分析, 为混沌空间光通信技术研究提供了一定的参考和借鉴。

参考文献:

- [1] Fried D L. Scintillation of a ground-to-space laser illuminator [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1967, 57(8): 980-983.
- [2] Gao Duorui, Xie Zhuang, Ma Rong, et al. Development current status and trend analysis of satellite laser communication (Invited) [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(4): 0406001. (in Chinese)
- [3] Minott P O. Scintillation in an earth-to-space propagation path [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1972, 62(7): 885-888.
- [4] Sans M, Sodnik Z, Zayer I, et al. Design of the ESA optical ground station for participation in LLCD [C]//Proc International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS 2012), 2012: 9-12.
- [5] Chaudhry A U, Yabikomeroglu H. Laser intersatellite links in a starlink constellation: A classification and analysis [J]. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 2021, 16(2): 48-56.
- [6] Fields R, Lunde C, Wong R, et al. NFIRE-to-TerraSAR-X laser communication results: Satellite pointing, disturbances, and other attributes consistent with successful performance [C]//Sensors and Systems for Space Applications III, SPIE, 2009, 7330: 73300Q.
- [7] Migliore R, Duncan J, Pulcina V, et al. Outlook on EDRS-C [C]//International Conference on Space Optics (ICSO 2016), SPIE, 2017, 10562: 105622S.
- [8] Chishiki Y, Yamalawa S, Takano Y, et al. Overview of optical data relay system in JAXA [C]//Free-Space Laser Communication and Atmospheric Propagation XXVIII, SPIE, 2016, 9739: 97390D.
- [9] Kubo-Oka T, Kunimori H, Suzuki K, et al. Development of "HICALI": High speed optical feeder link system between GEO and ground [C]//International Conference on Space Optics (ICSO 2018), SPIE, 2019, 11180: 1118060.
- [10] Zhang Qingjun, Zhang Jian, Zhang Huan, et al. The study of HY-2A satellite engineering development and in-orbit movement [J]. *Strategic Study of CAE*, 2013, 15(7): 12-18. (in Chinese)
- [11] Ren Jianying, Sun Huayan, Zhang Laixian, et al. Development status of space laser communication and new method of networking [J]. *Laser & Infrared*, 2019, 49(2): 143-150. (in Chinese)
- [12] 王旭. 实践十三号卫星成功发射开启中国通信卫星高通量时代[J]. *中国航天*, 2017(5): 13.
- [13] 崔岳, 唐勇. 实践二十号卫星在轨核心试验全部完成[J]. *国际太空*, 2020(7): 38-41.
- [14] Lang R, Kobayashi K. External optical feedback effects on semiconductor injection laser properties [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1980, 16(3): 347-355.
- [15] Argyris A, Syvridis D, Larger L, et al. Chaos-based communications at high bit rates using commercial fibre-optic links [J]. *Nature*, 2005, 438(7066): 343-346.
- [16] Vanwiggeren G D, Roy R. Communication with chaotic lasers [J]. *Science*, 1998, 279(5354): 1198-1200.
- [17] Bogris A, Rizomiliotis P, Chlouverakis K E, et al. Feedback phase in optically generated chaos. A secret key for cryptographic applications [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2008, 44(2): 119-124.
- [18] Argyris A, Bogris A, Giles I, et al. Subcarrier modulation boosts chaotic optical communication systems to error-free performance [C]//2009 Conference on Optical Fiber Communication, 2009: JWA45.
- [19] Wang A B, Yang Y B, Wang B J, et al. Generation of wideband chaos with suppressed time-delay signature by delayed self-interference [J]. *Opt Express*, 2013, 21(7): 8701-8710.
- [20] Ke J X, Yi L L, Yang Z, et al. 32 Gbs chaotic optical communications by deep-learning-based chaos synchronization [J]. *Opt Lett*, 2019, 44(23): 5776-5779.

- [21] Zhao Z X, Cheng M F, Luo C K, et al. Semiconductor-laser-based hybrid chaos source and its application in secure key distribution [J]. *Opt Lett*, 2019, 44(10): 2605-2608.
- [22] Song X M, Liu B, Zhang H X, et al. Security-enhanced OFDM-PON with two-level coordinated encryption strategy at the bit-level and symbol-level [J]. *Opt Express*, 2020, 28(23): 35061-35073.
- [23] Jiang L, Pan Y, Yi A L, et al. Trading off security and practicability to explore high-speed and long-haul chaotic optical communication [J]. *Opt Express*, 2021, 29(8): 12750-12762.
- [24] Jiang N, Zhao A K, Xue C, et al. Physical secure optical communication based on private chaotic spectral phase encryption/decryption [J]. *Opt Lett*, 2019, 44(7): 1536-1539.
- [25] Zhao A K, Jiang N, Liu S Q, et al. Physical layer encryption for WDM optical communication systems using private chaotic phase scrambling [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(8): 2288-2295.
- [26] Rulkov N F, Vorontsov M A, Lilling L. Chaotic free-space laser communication over a turbulent channel [J]. *Physical Review Letters*, 2002, 89(27): 277905.
- [27] Annovazzi-Lodi V, Aromataris G, Benedetti M, et al. Secure chaotic transmission on a free-space optics data link [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2008, 44(11): 1089-1095.
- [28] Mahmud N, El-Araby E, Shaw H, et al. Securing and auto-synchronizing communication over free-space optics using quantum key distribution and chaotic systems [C]//Quantum Communications and Quantum Imaging XVI, SPIE, 2018, 10771: 107710U.
- [29] Li M, Hong Y F, Song Y J, et al. Effect of controllable parameter synchronization on the ensemble average bit error rate of space-to-ground downlink chaos laser communication system [J]. *Opt Express*, 2018, 26(3): 2954-2964.
- [30] Li M, Chen Y, Song Y J, et al. DOE effect on BER performance in MSK space uplink chaotic optical communication [J]. *Chinese Optics Letters*, 2020, 18(7): 070601.
- [31] Guo Ruiqiang, Li Min, Wu Junpeng, et al. Space optical communication systems based on differential chaotic keying and its security analysis [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(S1): 20200207. (in Chinese)
- [32] El-Araby E, Namazi N. Chaotic architectures for secure free-space optical communication [C]//2016 26th International Conference on Field Programmable Logic and Applications (FPL), 2016: 1-5.
- [33] Li M, Hong Y F, Wang S, et al. Radiation-induced mismatch effect on performances of space chaos laser communication systems [J]. *Opt Lett*, 2018, 43(20): 5134-5137.
- [34] Niaz A, Qamar F, Ali M, et al. Performance analysis of chaotic FSO communication system under different weather conditions [J]. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 2018, 30(1): e3486.
- [35] Li M, Chen M W, Yang Y F, et al. Effect of amplifier spontaneous emission noise on performance of space chaotic laser communication systems [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2021, 57(4): 1-8.
- [36] Yu Huilong, Bao Zhikang, Wang Xuan, et al. XY-2 satellite laser communication equipment PAT test in orbit [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(5): 20200327. (in Chinese)