

卫星激光通信中的干扰及防护

劳陈哲, 孙建锋

(上海卫星互联网研究院有限公司, 上海 200120)

摘 要: 为了探究卫星激光通信中对于各种外部干扰的安全防护技术, 介绍卫星激光通信链路中存在的大气湍流、太空背景噪声、弱光干扰和强激光干扰等 4 种干扰源及其作用原理, 并给出前两种干扰在理论分析中常用的数值模型。其中弱光干扰和强激光干扰又被称为激光有源干扰, 是一种人为干扰手段。从通信体制维度出发, 分别分析这 4 种干扰源对于相干和非相干通信体制系统的影响, 给出不同体制下应对这 4 种干扰的当前主流的防护技术, 从通用性、成本以及易用性等角度, 比较各种防护手段的技术特点并说明它们在卫星激光通信中的主要应用场景。

关键词: 激光有源干扰; 大气湍流; 干扰防护

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2023016

Interference and Protection in Satellite Laser Communication

LAO Chenzhe, SUN Jianfeng

Shanghai Satellite Network Research Institute, Shanghai 200120, China

Abstract: In order to explore the safety protection technologies for various external interferences in satellite laser communication, four interference sources in the satellite laser communication link and their principles were introduced, included atmospheric turbulence, space background noise, weak light interference, and strong laser interference. And numerical models commonly used in theoretical analysis of the first two interferences were provided. Weak light interference and strong laser interference, also known as laser active interference, were artificial interference methods. From the scheme of communication, the impact of these four interference sources on coherent and incoherent communication systems was analyzed, and the current mainstream protection technologies for these four interferences under different systems were provided. The characteristics of various protection technologies were compared from versatility, cost, usability and their main application scenarios in satellite laser communication were explained.

Keywords: laser active jamming, atmospheric turbulence, defense measures of jamming

0 引言

与传统的微波通信不同, 卫星光通信是以激光作为载体直接在大气或者太空中传播, 来实现信息传递的。由于激光具备多个方面的优势: 激光通信可利用的频带宽度达 GHz 级, 使用频段不受限制; 激光卫星通信设备的尺寸和重量远低于微波卫星通信设备, 灵活性与可扩展性强; 激光光束发散角小、方向性好, 通信链路不易被截断, 具有较强的保密性^[1-3]。随着 6G 网络技术的发展, 网络的覆盖范围将从地面进一步往太空延伸, 对于网络传输速率也需要跨量级式的提升。

目前通用的卫星微波通信系统受到传输容量、功耗、重量、体积等方面的严格限制, 出现了 1 Gbit/s 以上通信的速率“瓶颈”, 难以适应未来高速、宽带通信的需求^[4], 同时微波通信难以再满足更加复杂的业务传输场景, 因此卫星激光通信势必会成为 6G 组网的关键技术之一。

卫星激光通信技术发展至今, 已逐渐从技术突破、试验验证等阶段迈向了产业化, 并且呈现加速发展趋势。目前, 美国、欧洲、日本以及中国的相关机构及企业具有较高的活跃度。2015 年美国 SpaceX 公司开始布局“星链”(Starlink)项目, 截止到 2022 年年底已发射 3 000 余颗星

链卫星，其中第二代星链卫星配备了激光通信功能。根据 SpaceX 公司在美国联邦通信委员会（Federal Communications Commission, FCC）申报的资料，SpaceX 公司计划 2024 年部署完成 4 425 颗卫星，2027 年部署完成 7 518 颗卫星，预备占位卫星 30 000 颗，共计 42 000 多颗卫星^[5]。如何提高卫星激光通信链路抗干扰能力是非常值得研究的课题。

结合上述分析，本文将主要归纳卫星激光通信链路中的干扰种类，分析不同通信体制下应对相关干扰的防护手段。一方面，为卫星激光通信系统设计提供参考；另一方面，可以关注到当前防护手段可能存在的不足。

1 卫星激光通信链路中的外部干扰源

对于卫星激光通信链路中的主要干扰，主要有星地链路的大气湍流、太空背景噪声以及光电对抗中的激光有源干扰。在目前已有的报道中对于卫星激光通信的激光有源干扰主要分为弱光干扰和强激光干扰。下面简要介绍各种干扰的作用原理。

（1）大气湍流

在卫星激光通信中的星地链路中，光束在大气信道中传播会受到各种大气因素的影响，主要包括大气分子及悬浮微粒对光束的吸收与散射引起的“大气衰减”，直接影响到终端的接收光功率，导致信噪比下降；当激光束在湍流大气中传输时，“大气湍流”效应造成的折射率起伏会破坏光束的相干性，削弱光束质量^[6-7]。随之引起的光强起伏、光束漂移、相位畸变等现象会给光通信系统的接收带来困难，从而影响大气激光通信系统的性能。由于大气衰减一定程度上不可避免，这里主要考虑大气湍流的影响。

大气湍流引起的接收光强度起伏符合对数正态分布，基于一阶 Rytov 近似，其概率密度分布函数表示为^[8]

$$p_I(I) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}I\sigma_I} \exp \left\{ -\frac{\left[\ln \left(\frac{I}{\langle I \rangle} \right) + \frac{1}{2}\sigma_I^2 \right]^2}{2\sigma_I^2} \right\} \quad (1)$$

式中， I 为信号辐照度， σ_I^2 表示光强起伏的闪烁系数^[9]，

其定义为 $\frac{\langle I^2 \rangle}{\langle I \rangle^2} - 1$ ，其数值可以采用雷托夫方法估算。

（2）太空背景噪声

由于空间环境中存在较多的背景辐射，主要包括太阳直接辐射，地球辐射和反射以及其他恒星的辐射。恒星是太空中分布最广的背景光源，且辐射强度随波长的增加而减小^[10]。对于星间激光通信链路，受到太空背景光噪声的影响会尤为严重。这里，探测器平均接收到的背景光电流可以表示为

$$I_b = P_b R_b \quad (2)$$

其中， P_b 为探测器接收到的背景光功率， R_b 为探测器响应度。进一步的， P_b 是来源于恒星和天体背景辐射通量、接收望远镜及其光学结构散射光能量甚至是发射天线及光学结构后向散射光能量。可写为

$$P_b = H_b \Omega_{\text{fov}} L_{\text{rec}} A_{\text{rec}} B_{\text{filter}} \quad (3)$$

当辐射源对于探测器的张角小于接收探测器的视场角时，

$$P_b = N_b L_{\text{rec}} A_{\text{rec}} B_{\text{filter}} \quad (4)$$

式（3）和式（4）中 H_b 和 N_b 分别是角度光源和点光源背景光辐射和照度能量密度，从式（3）可以看出 P_b 是接收立体角 Ω_{fov} 、有效接收面积 A_{rec} 、接收光学天线的传输损耗 L_{rec} 和接收带通滤波器的带宽 B_{filter} 的乘积^[11]。激光通信常用波段背景光辐照度见表 1。

表 1 激光通信常用波段背景光辐照度

波长/ μm	光辐照度/($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)					
	太阳	月亮	水星	金星	火星/木星	土星
0.53	1842	0.002 7	1.8×10^{-7}	1.8×10^{-6}	2.8×10^{-7}	8.4×10^{-8}
0.85	940	0.001 5	9.5×10^{-8}	9.0×10^{-7}	1.5×10^{-7}	4.6×10^{-8}
1.06	748	0.001	7.2×10^{-8}	7.1×10^{-7}	1.1×10^{-7}	3.2×10^{-8}
1.3	411	0.000 54	3.7×10^{-8}	3.6×10^{-7}	5.6×10^{-8}	1.7×10^{-8}
1.5	204	0.000 24	1.7×10^{-8}	1.6×10^{-7}	2.5×10^{-8}	7.5×10^{-9}

这些背景辐射随时都可能进入光通信终端的视域，在 CCD 探测面上成点像，此时系统将不能正确检测出信标光像点的中心位置造成光束指向控制误差，使整个系统性能下降，甚至会导致链路的中断。进一步地，如果该背景光噪声到达探测器，系统信噪比将会随之降低。可见恒星背景光对卫星光通信系统的稳定性、通信性能等影响很大。

（3）弱光干扰

弱光干扰是利用周围的物体反射或散射的方法让干扰光进入接收机视场，其所需的干扰光功率相对较小，具有更好的可行性，在实际对抗中更具有应用价值。为了实

现对无线激光通信的弱光干扰,需要干扰光的波长与通信光的波长相近,这样干扰光才能通过接收系统的窄带滤波片作用到光电探测器上,干扰光的调制频率在接收机带宽范围内,干扰光的功率在脉冲时间内要超过判决阈值,最终导致信号光的信噪比下降。近些年对于弱光干扰的报道较少,陈静等^[12]研究了在强度调制/直接探测的无线激光通信系统中弱光干扰的原理和条件,给出了弱光干扰在同步通信和异步通信中的差异,不过它们的主要表现均为误码率升高。由于异步通信中帧结构和编码都较为简单,因此与同步通信相比其更易受到干扰光的影响。

(4) 强激光干扰

强激光干扰又称为致盲式干扰,其强调使敌方的光电探测系统永久或暂时地失去光电探测能力。这种手段可破坏光学系统、光电传感器等,起到扰乱、封锁、阻碍或压制的作用,是一种非常有力的激光对抗方法^[13-14]。

2 不同通信体制和应用场景下的干扰及防护

由于上述各种干扰对于不同通信体制的作用结果不同,下面将按通信体制分类介绍不同干扰条件下的防护手段。而强激光防护手段不区分通信体制,这里仅介绍一种基于非线性光学原理的防护技术。

2.1 非相干通信体制下的干扰及防护

典型的非相干光通信系统采用开关键控(OOK)、光强调制/直接检测(IM/DD)的方式,是幅移键控(ASK)的一种特例。光强是干扰影响的唯一因素,其系统接收端的信号表达式为

$$y_t = \begin{cases} A \cos \omega_c + n(t), & \text{比特“1”} \\ n(t), & \text{比特“0”} \end{cases} \quad (5)$$

其中, A 为信号光强振幅, ω_c 为载波频率, $n(t)$ 为噪声信号。

(1) 大气湍流的防护方法

① 增加接收器孔径的大小,利用孔径的平滑效应可以消除由小涡流引起的相对快速的波动,并有助于减少信道损耗。

② 利用自适应光学(Adaptive Optics, AO)技术修正传输波前像差,提高光通信系统的耦合效率。典型的自适应光学系统就是对光束波前畸变进行实时补偿。如图 1 所示,光束波前的相位信息经波前传感器探测后传输至波前控制器,经过分析与计算后产生与探测波前共轭的波前控制信号,最后将控制信号传输至波前校正器来完成波前实时动态补偿^[15-17]。由于 AO 系统整体结构和重量较大,

一般在地基通信系统中配备。这里 AO 不仅可以在下行链路中使用,根据互易原理,也可以对上行光束进行预校正来抑制大气湍流效应。

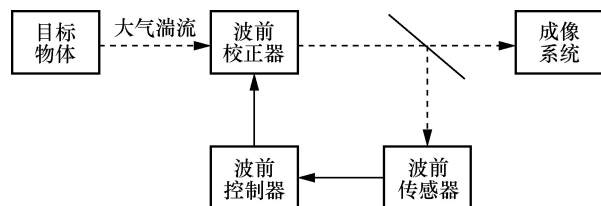


图 1 波前探测自适应光学系统工作原理

③ 分集技术包括时间分集、空间分集等。空间分集技术利用了信道的空间不相干性,其具体可以分为发射分集和接收分集。发射分集主要是为了抑制链路较大光束漂移的问题;而接收分集也就是常说的多孔径接收,它主要利用多个口径相对较小的接收望远镜组成接收阵列,来等效一个大口径的接收望远镜,小口径接收的一个好处就是空间光功率的耦合效率较高。同时,只要保证孔径之间的距离大于大气信道的相干长度,孔径之间的光强起伏将保持独立性,该方案就可以有效缓解大气湍流引起的光强闪烁。图 2 是美国月球激光通信地面终端(Lunar Lasercom Ground Terminal, LLGT)可用于演示验证将多个中小型尺寸望远镜孔径集成一个等效大口径望远镜进行光信号收发技术,设计采用了 4 个 15 cm 口径望远镜的分集发射方式,4 个 40 cm 口径望远镜分集接收的方式^[18]。对于非相干通信体制,分集接收只能使用电学合束,其原理是对各个接收孔径接收到的信号光分别进行探测,然后将多个探测器输出的多路模拟电信号合为一,最后再进行解码。



图 2 月球激光通信地面终端望远镜

与空间分集类似,时间分集则是利用了信道参量的时空不相干性,通过多次发射同一信号,当时间间隔应大于信道的相关时间时,各段信号中的光强起伏也相互独立,

通过合并信号可以有效地平缓大气湍流引起的衰弱。

(2) 背景噪声的防护方法

为达到抑制背景噪声的目的,一般采用的技术包括空间滤波和信号调制技术。空间滤波主要依靠潜望式粗指向机构(Coarse Pointing Assembly, CPA)、望远镜等的遮光罩和光阑来实现^[19]。图3为一种潜望式 CPA 结构外形示意。

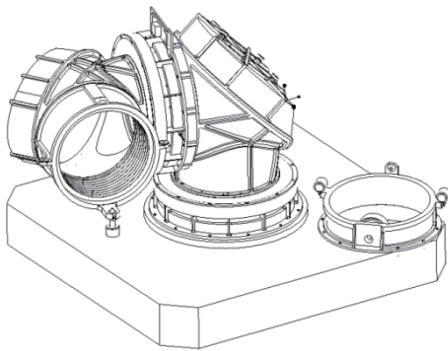


图3 潜望式 CPA 结构外形示意

多脉冲位置调制(MPPM)是最为常用的背景噪声抑制调制技术之一,在目前的技术发展阶段中常与其他调制方式混合使用以实现更高效率的传输。ELFIQI 等^[20]将正交振幅调制(QAM)和MPPM混合的调制方法应用于无湍流和伽马-伽马自由空间光学(FSO)通道中,相比于传统调制方式,此混合调制方式能够得到更好的误码率性能。NUMATA 等^[21]提出了一种多脉冲位置调制和脉冲间距调制(PSM)融合的方案,在仿真的噪声场景下进行误码率分析,验证其实现了高速率传输。

(3) 弱光干扰的防护方法

首先弱光干扰对于无线激光通信系统最本质的影响还是因为信噪比的下降导致的误码率升高,因此可以使用信道编码进行抑制,目前备受关注的有 Turbo 码、LDPC 码和 Polar 码。1993 年提出的 Turbo 码将卷积编码和随机交织器巧妙结合,实现了随机编码思想,其译码性能逼近香农极限。不仅如此, Turbo 码的译码思想也在信道估计、信道均衡等通信领域得到了广泛应用。受到 Turbo 码的启发,1996 年 MacKay 等对 LDPC 码进行重新研究,发现其性能也可逼近香农极限,甚至超过 Turbo 码性能,随后 LDPC 码在各通信系统中得到了广泛应用。2009 年 Arıkan 基于信道极化的思想提出了一种称为 Polar 码的信道编码方法,并在二进制离散无记忆信道中证明了其性能可以达到香农极限^[22]。另外,弱光干扰信号需要与信号光的本地

时钟频率和占空比接近,因此可以支持调制频率或占空比切换来避开干扰光调制频率,使干扰光无法突破接收机滤波器。

2.2 相干通信体制下的干扰及防护

相干激光通信可在发射端对光载波进行幅度、频率或相位调制,一般在接收端则需要一个本振光和一个光混频器来完成对信号光的检测和解调,采用零差或外差这两种相干检测的方式。也可采用差分相移键控(DPSK)调制,不需要本振光,也不需要频率锁定。

典型的 BPSK(相移键控)调制、外差差分探测方式的接收端的电流信号表达式为^[23]

$$I_s(t) = 2R\sqrt{P_s P_L} \cos[\omega_{IF}t + \theta_s(t) + \theta_n(t)]$$

其中, R 为探测器响应度, P_s 为信号光功率, P_L 为本振光功率, ω_{IF} 为外差频率, $\theta_s(t)$ 为信号的符号相位, $\theta_n(t)$ 为噪声相位。

(1) 大气湍流的防护方法

对于相干通信体制,大气湍流不仅会造成接收端强度的起伏,也会造成接收波前的严重畸变,对接收端信号光与本振光的混频产生影响。单纯的增大接收孔径可以减小光强闪烁,但是会增大相位波动,退化系统性能。这里可以使用自适应光学技术和空间分集提高光通信系统的耦合效率,减缓光强闪烁的影响。相干通信体制下的空间分集接收可以使用信噪比更高的光学合束方式^[24]。如图4所示,其原理是将多路接收光束通过光束相干合成的方法合为一束,然后进行相干探测将合束后的光信号转换为电信号,最后再进行解码。

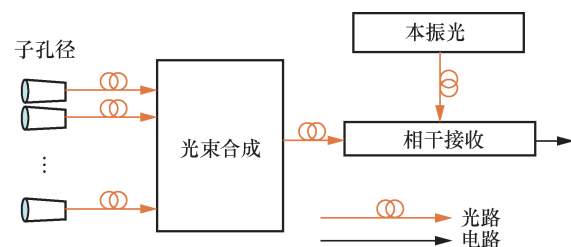


图4 多孔径光学相干合束后结构示意图

由于在高码率通信的情况下,大气扰动对前后码元信号光的波面影响基本相同,对于波前畸变引起的相位波动可以使用 DPSK 调制自差接收克服^[25]。DPSK 是一种相位调制模式,把信息加载在载波上相邻码元的相对相位变化中。相邻码元的相移为 0 或 π ,对应要传递的信息数据为 0 或 1。在接收端,两个连续码元通过非等臂的信号支路

和自相位延时 T 信号支路进行偏光干涉,解调得到数据信息,如图 5 所示。

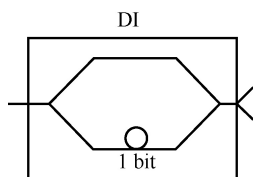


图 5 延时干涉仪原理

(2) 背景噪声的防护方法

对于影响跟瞄系统的背景光,同样需要空间滤波。而对于进入通信系统的背景噪声,在相干通信体制下,相干探测的频带宽度非常窄,即体制本身对于空间背景光有很好的免疫,此外还可以通过平衡探测的方式有效抑制此类共模噪声。

(3) 弱光干扰的防护方法

对于相干通信体制下的系统,传统的脉冲式弱光干扰无法与本振光干涉,在外差差分探测下会被直接消减,几乎不会对系统产生影响。而针对相干通信体制特定的弱光干扰技术未有相关报道。

2.3 强激光致盲干扰的防护措施

强激光致盲干扰主要倾向于一种破坏性手段,不再区分通信端的调制解调方式。这里重点介绍一种基于非线性光学原理的强光保护模块。该强光保护模块利用非线性定向耦合器(NLDC)的 Kerr 效应,构成具有亚皮秒开关速度的光学自开关,其工作原理如图 6 所示。当波导(1)中有低能量激光脉冲输入时,光信号由(4)端口输出;当输入高能脉冲时,由于非线性的作用,大部分光能量都由(3)端口输出。这样,在有强激光攻击时,放置在(4)端口的探测器就得到了保护^[26]。

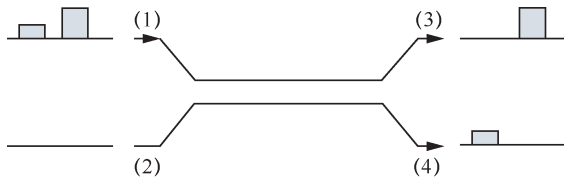


图 6 NLDC 光学开关

2.4 各抗干扰技术的主要优劣势及应用场景

以上介绍了多种抗干扰技术,可以看到各种防护手段在不同干扰下具有一定的通用性。以下重点说明每种防护手段的技术特点,以及其主要的应用场景。

(1) 信道编码

这种方式的主要特点是在有限的信噪比下,达到更低

的误码率,是一种后端处理手段。其通用性强,实现成本较低,但其需要牺牲一定的信道带宽,而对于卫星激光通信这种带宽余量较大的信道,其可以适用于大部分应用场景,且对干扰形式不敏感。

(2) 自适应光学

自适应光学主要用于对抗大气湍流引起的波前畸变,因此其主要应用场景是星地激光通信链路。由于目前的技术发展程度,其模块体积一般很大,且成本较高,因此会配备在地面站使用。由于波前畸变会严重影响相干探测效率,因此自适应光学主要应用于相干探测体制。自适应光学技术对于大气湍流引起的光强起伏抑制能力有限,所以一般会配合大孔径接收技术达到更优的对大气湍流抑制效果,其适用于所有的通信体制。

(3) 空间分集技术

空间分集技术主要用于对抗大气湍流,其成本较低,且系统整体结构较小,更适合搭载在卫星平台。但是空间分集对于各支路的等长要求会随着通信速率的上升而变得苛刻,因此在高速通信中鲜有应用。时间分集的特点与信道编码类似,通用性强,但其对有效带宽的影响很大,因此应用性也不强。

3 结束语

在调研中发现,当前在卫星激光通信弱光干扰中的研究场景几乎都围绕 IM/DD 通信体制,然而现阶段相干光通信体制已成为主流,后续可以就零差/外差相干探测的通信体制做一些理论仿真分析,给出有针对性的干扰手段及防护措施。同样的,未来的卫星激光通信干扰一定不会是单一形式的,可能会在主动探测后做出针对性的干扰。因此,对于干扰系统的模型设计也有一定的研究价值。

参考文献:

- [1] 崔潇. 卫星光通信关键技术及发展态势分析[J]. 信息通信技术与政策, 2021(11): 65-72.
CUI X. Analysis of key technologies and development trend of satellite optical communication[J]. Information and Communications Technology and Policy, 2021(11): 65-72.
- [2] MARSHALEK R G, JORDAN P. System-level comparison of optical and rf technologies for space-to-space and space-to-ground communication links circa 2000[C]//Photonics West '96. Proc SPIE 2699, Free-Space Laser Communication Technologies VIII, San Jose. [S.l.:s.n.], 1996, 2699: 134-145.
- [3] MAZURAY L, TOYOSHIMA M, WARTMANN R, et al. Compar-

- ison of microwave and light wave communication systems in space applications[J]. *Proc. SPIE*, 2005, 5296:1-12.
- [4] 王玲, 冯莹. 卫星相干光通信的研究进展及趋势[J]. *激光与光电子学进展*, 2007, 44(6): 49-53.
- WANG L, FENG Y. Progress and trend in satellite coherent optical communication[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2007, 44(6): 49-53.
- [5] 杨文翰, 花国良, 冯岩, 等. 星链计划卫星网络资料申报情况分析[J]. *天地一体化信息网络*, 2021, 2(1): 60-68.
- YANG W H, HUA G L, FENG Y, et al. Analysis of the Starlink satellite network filing application[J]. *Space-Integrated-Ground Information Networks*, 2021, 2(1): 60-68.
- [6] 饶瑞中. 光在湍流大气中的传播[M]. 合肥: 安徽科学技术出版社, 2005.
- RAO R Z. Light propagation in the turbulent atmosphere[M]. Hefei: Anhui Science & Technology Press, 2005.
- [7] CHURNSIDE J H, LATAITIS R J. Wander of an optical beam in the turbulent atmosphere[J]. *Applied Optics*, 1990, 29(7): 926-930.
- [8] VETELINO F S, YOUNG C, ANDREWS L, et al. Aperture averaging effects on the probability density of irradiance fluctuations in moderate-to-strong turbulence[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(11): 2099-2108.
- [9] AL-HABASH A, ANDREWS L C, PHILLIPS R L. Theory of optical scintillation: Gaussian-beam wave model[C]//*Proceedings of Eighth International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*, "SPIE Proceedings. SPIE, 2002.
- [10] 韩琦琦, 马晶, 谭立英, 等. 恒星背景噪声对星间激光链路跟瞄系统影响的仿真分析[J]. *光学技术*, 2006, 32(3): 444-448.
- HAN Q Q, MA J, TAN L Y, et al. Influences of stellar background noise on tracking and pointing subsystem of intersatellite optical communications[J]. *Optical Technique*, 2006, 32(3): 444-448.
- [11] 孙建锋, 许倩, 鲁伟, 等. 空间相干激光通信技术[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2022.
- SUN J F, XU Q, LU W, et al. Space coherent laser communication technology[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2022.
- [12] 陈静, 薛海中, 刘学文, 等. 无线激光通信系统弱光干扰技术[J]. *光学学报*, 2012, 32(1): 63-69.
- CHEN J, XUE H Z, LIU X W, et al. Low-power laser jamming techniques to free space optical system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(1): 63-69.
- [13] 刘松涛, 刘振兴. 激光有源干扰的防御措施[J]. *航天电子对抗*, 2014, 30(1): 40-43.
- LIU S T, LIU Z X. Review on defense measures for laser active jamming[J]. *Aerospace Electronic Warfare*, 2014, 30(1): 40-43.
- [14] 李海燕. 激光制导武器有源干扰对抗措施分析[J]. *激光杂志*, 2010, 31(6): 57-58.
- LI H Y. Countermeasure analysis of laser guidance weapon active jamming[J]. *Laser Journal*, 2010, 31(6): 57-58.
- [15] 王玉坤. 空间激光通信自适应光学系统的控制研究[D]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所). 2019.
- WANG Y K. Research on control of adaptive optical system for space laser communication[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences. 2019.
- [16] LIU C, CHEN M, CHEN S, et al. Adaptive optics for the free-space coherent optical communications[J]. *Optics Communications*, 2016, 361: 21-24.
- [17] LIU W, YAO K N, HUANG D N, et al. Performance evaluation of coherent free space optical communications with a double-stage fast-steering-mirror adaptive optics system depending on the Greenwood frequency[J]. *Optics Express*, 2016, 24(12): 13288-13302.
- [18] BOROSON D, ROBINSON B, MURPHY D. Overview and results of the lunar laser communication demonstration[J]. *Proc. SPIE*, 2014, 8971.
- [19] 夏方园. 卫星光通信系统的杂散光抑制研究[D]. 西安: 中国科学院大学(中国科学院西安光学精密机械研究所). 2020.
- XIA F Y. Research on stray light suppression in satellite optical communication system[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences. 2020.
- [20] ELFIQI A E, MORRA A E, KHALLAF H S, et al. Two-level MPPM-MDPSK modulation for free-space optical channels[C]//*Proceedings of 2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-6.
- [21] NUMATA T, HABUCHI H. An optical MPPM-PSM scheme for increasing data transmission rate[C]//*Proceedings of 2011 8th International Conference on Information, Communications & Signal Processing*. Piscataway: IEEE Press, 2012: 1-5.
- [22] 于清苹, 史治平. 5G 信道编码技术研究综述[J]. *无线电通信技术*, 2018, 44(1): 1-8.
- YU Q P, SHI Z P. Research of channel coding techniques in 5G communications[J]. *Radio Communications Technology*, 2018, 44(1): 1-8.
- [23] KIKUCHI K. Fundamentals of coherent optical fiber communications[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 34(1): 157-179.

- [24] 劳陈哲. 多孔径空间相干激光通信分集接收技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2020.

LAO C Z. Research on diversity receiving technology of multi-aperture spatial coherent laser communication[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2020.

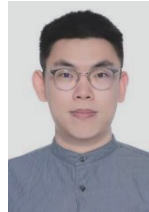
- [25] 马小平, 孙建锋, 职亚楠, 等. DPSK 调制/自差动零差相干探测技术克服星地激光通信中大气湍流效应的研究[J]. 光学学报, 2013, 33(7): 93-100.

MA X P, SUN J F, ZHI Y N, et al. Research of DPSK modulation and self-differential homodyne coherent detection technology to overcome atmospheric turbulence effect in the satellite-to-ground laser communication[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(7): 93-100.

- [26] 田佳峻, 姚勇, 赵新辉, 等. 自由空间光通信的抗干扰接收系统[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(1): 96-100.

TIAN J J, YAO Y, ZHAO X H, et al. Anti-jamming receiver system of free space optical communication[J]. Infrared and Laser Engineering, 2009, 38(1): 96-100.

[作者简介]



劳陈哲 (1992—), 男, 上海卫星互联网研究院有限公司高级工程师, 主要研究方向为空间激光通信技术, 包括光通信收发天线设计、分集接收技术、光学矢量相控阵技术等。

孙建锋 (1978—), 男, 上海卫星互联网研究院有限公司高级专家, 长期从事空间激光通信及检验技术研究工作。