

# 星地激光通信中克服大气湍流效应研究进展

马小平 孙建锋 侯培培 许倩 职亚楠 刘立人

中国科学院上海光学精密机械研究所空间激光通信与探测技术重点实验室, 上海 201800

**摘要** 星地激光通信的关键问题是克服大气湍流效应对激光载波信号传输的影响。信号光束经过长距离大气信道传输后, 相位不完整, 波面受到畸变, 导致接收端系统在解调信号过程中, 通信误码率降低。根据国内外星地激光通信的研究进展和实验情况, 介绍了几种克服大气湍流效应对高速率星地相干通信影响的方法及其原理。重点分析基于差分相移键控(DPSK)调制和干涉原理的相干探测技术在解调相位信息时克服大气湍流效应方面的优势, 并对其进行了总结和展望。

**关键词** 光通信; 大气湍流效应; 马赫-曾德尔干涉仪; 差分相移键控; 外差探测

**中图分类号** TN929.1 **文献标志码** A **doi**: 10.3788/LOP51.120002

## Research Progress on Overcoming the Atmospheric Turbulence Effect in Satellite-to-Ground Laser Communication

Ma Xiaoping Sun Jianfeng Hou Peipei Xu Qian Zhi Yanan Liu Liren

Key Laboratory of Space Laser Communication and Detection Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

**Abstract** The key problem in the satellite-to-ground laser communication is primarily to mitigate the effect of atmospheric turbulence. After propagating through the atmosphere with a long distance, the wave-front distortion of signal light brings about the degradation of bit error rate (BER). The experimental development of the satellite-to-ground laser communication based on the domestic and abroad research progress is described. Some effective methods and discusses to overcome the turbulence effect on the high rate communication are presented. Finally, coherent detection technology based on interference principle and differential phase shift keying (DPSK) modulation is emphatically analyzed in the phase demodulation, and the advantages are summarized. It is predictable that this technology will become more practical and play an important role in its application areas.

**key words** optical communications; atmosphere turbulence effect; Mach-Zehnder interferometer; differential phase shift keying; heterodyne detection

**OCIS codes** 060.4510; 060.2605; 060.1660; 080.1010; 010.1330

## 1 引言

自由空间激光通信技术<sup>[1]</sup>区别于光纤通信, 包括深空、同步轨道(GEO)、中轨道(MEO)、低轨道(LEO)卫星之间以及与地面站之间的远距离激光通信, 并且与地面上的光纤通信相结合, 组成一个天地一体化的实时高速光通信网络<sup>[2-3]</sup>。和微波通信相比, 自由空间激光通信具有通信容量大、传输速度快、光束方向性好、保密性高、终端体积小、质量轻以及功耗低<sup>[4]</sup>等特点, 适合于高速率的自由空间数据传输。自20世纪80年代以来经过了充分的理论论证和全面的地面验证, 并在2001年11月由欧洲航天局(ESA)首次成功实现SILEX计划<sup>[5-6]</sup>——在高轨道通信卫星ARTEMIS和低轨道地面观测卫星SPOT-4之间实现远场激光通信链路, 验证了自由空间星际激光通信的可行性。

收稿日期: 2014-04-14; 收到修改稿日期: 2014-06-12; 网络出版日期: 2014-11-20

基金项目: 国家自然科学基金(61108069, 61377004, 61275110)

作者简介: 马小平(1985—), 男, 博士研究生, 主要从事星地激光通信、激光雷达等方面的研究。

E-mail: maxiaoping@siom.ac.cn

导师简介: 孙建锋(1978—), 男, 研究员, 主要从事空间激光通信、激光雷达等方面的研究。

E-mail: sunjianfengs@163.com

星地激光通信是空间激光通信<sup>[7]</sup>的一部分,是自由空间激光通信技术在卫星、飞机与地面之间信息传输的最新应用,是连接星间光网和地面光纤网络的中枢纽带。因此,星地激光通信是自由空间激光通信的关键环节,相应的链路终端技术<sup>[8]</sup>和地面检测验证技术<sup>[9]</sup>已经得到一定程度的发展。但是在星地激光通信中,近地面区域的非均匀大气层是光通信信道的一部分。大气层的实时动态变化引起大气折射率随机起伏变化,这种湍流效应进一步改变光束光场的随机变化,宏观上表现为光场空间相干性退化、光束漂移起伏、到达角起伏<sup>[10]</sup>;大气信道中的气溶胶对激光传输的吸收和散射作用以及大气湍流导致信号光的强度闪烁,都将严重降低信号光功率,导致接收端信号光的光束质量变差,从而降低星地激光通信系统的通信性能和通信链路的可靠性,因此,克服大气湍流效应对通信载波光束传播的影响是研究星地激光通信系统中必不可少的部分。

本文首先对星地激光通信过程,大气信道中湍流特性的物理研究进行了分析。针对湍流效应对信号光的影响,详细介绍了几种克服大气湍流效应的方法和原理,并适当进行分析讨论,最后对星地激光通信技术发展进行了展望。

## 2 大气信道中湍流效应的光学特性研究

星地激光通信是集成的卫星通信和地基光纤网络组成的全球互联通信网络的中枢环节。但是近地面大气湍流层对星地激光通信链路中光束质量有着严重的破坏作用,相关的激光在大气传输物理量都会产生相应的线性或者非线性变化。

大气湍流引起的光学特性变化表现在大气折射率的随机变化,使得光波的振幅和相位产生随机起伏,造成传输中的光波闪烁、扩展、弯曲和空间相干性降低等一系列光学现象<sup>[11]</sup>。大气湍流变化随时间、空间和波长而变化,湍流长度具有一定的尺寸,从几毫米到几十米,称为湍流尺度。大气湍流对光束传播的影响根据湍流尺度的不同可以分为三种:1)当湍流尺度大于光束直径时,激光光束通过同一个湍流漩涡,从而导致光束在传播方向上发生随机偏折,宏观上主要表现为接收端的光束漂移。由于大气湍流扰动的是随机的、不确定的,光束在传播一定距离后,在垂直传播方向的平面内光束的中心位置将随机变化,所以采用光束位移的统计方差表示光束漂移效应,但是其中心位置的随机移动距离仍旧无法实时仿真;2)当湍流尺度几乎等于光束直径时,光束也会发生随即偏折,主要表现为到达角起伏。光波在湍流大气中传输时,由于光束截面内不同部分的大气折射率起伏将导致光束波前的不同部位具有不同的相移,这些相移又导致光波等相面的随机起伏、光束波前到达角的起伏,从而导致像点的抖动。到达角起伏指的是光束在大气中传播时波阵面上各点法线方向相对于接收平面间夹角的随机倾斜;3)当湍流尺度小于光束直径时,激光光束截面内有大量大气湍流的小湍涡旋,照射在每个小湍窝的光束都产生独立的衍射和散射,宏观上表现为光束衍射,造成接收光功率起伏变化、光束相干性下降,称之为光束扩展。所谓光束扩展是指接收到的光斑半径或面积的变化,光束扩展会导致单位面积上光强减弱,光束扩展分为短期光束扩展和长期光束扩展。

20世纪90年代开始至今,Miller等<sup>[12-14]</sup>学者致力于大气湍流<sup>[15]</sup>对星地激光通信传输影响的理论研究。文献[16]指出水平传输的会聚光在星地上行链路中传统的Rytov理论,只是建立了上行链路中考虑展宽引入对准误差的闪烁指数理论模型,仿真验证因没有考虑光束展宽而有缺陷。文献[17]详细分析了水平路径传输的高斯光束在展宽效应下的理论,仿真验证结论与理论相符。此外,Ishimaru<sup>[18]</sup>对平面波、球面波在湍流大气中传输的闪烁功率谱进行了研究,Wang<sup>[19]</sup>开发了一种应用于大气湍流波前发生器的新的随机相位屏时间序列模拟算法,利用该算法研究大气湍流时间以及时间统计规律,得到了点接收下光束功率的解析式。饶瑞中<sup>[20]</sup>运用数值模拟计算方法分析了在一定孔径接收下的光斑特征变化。Walter等<sup>[21]</sup>为了证明光束漂移和波前畸变引入的扰动改变光束的聚焦特性,引入修正项对链路方程进行修正,并对该模型进行了测试,验证了该模型的正确性。Jose等<sup>[22]</sup>做了关于在光束扩展和光学扰动的影响下光通信系统的可靠性研究,着重仿真分析了对准误差、链路距离、接收孔径、衰落阈值等因素对通信可靠性的影响。

但是目前为止,针对复杂的湍流介质以及湍流效应对光束波面的变化,仍然没有统一的理论模型来分析,而且相关的模型研究多数停留在理论阶段,需要新的方法来解决大气湍流对通信系统的影响问题。

### 3 克服大气湍流效应的方法研究

目前为止,克服大气湍流效应对星地激光通信影响的方法主要有以下五种。

#### 3.1 减小接收口径

在地面接收端,减小接收望远镜的接收口径<sup>[23]</sup>是克服大气湍流效应最简单的一种方法,即保证接收口径小于表征大气湍流强度的Fried参数,简称 $F_r$ 数

$$F_r = \left[ 0.432 \cdot k^2 \cdot \sec \xi \cdot \int_{\text{path}} C_n^2(z) dz \right]^{-3/5}, \quad (1)$$

该数值取决于光束路径中穿过大气湍流强度的距离,其中 $C_n^2$ 表征湍流的大气折射率结构常数(在气象学上由平流层气球测得), $z$ 表征接收端高度, $\xi$ 为到达角, $k=2\pi/\lambda$ 是波数。当接收口径尺寸小于或者等于 $F_r$ 数时,接收系统的最高分辨率由系统的衍射极限决定;当接收口径大于 $F_r$ 数时,接收望远镜的精度都受限于湍流强度。这意味着,信号光的波前形变将在接收口径的限制范围内。当接收口径尺寸小于 $F_r$ 数时,波前畸变将相对较小,大气湍流引起的波前畸变将导致到达角起伏波动,可以通过倾斜振动控制系统来校正,所以需要采取尽可能小的接收口径。但是,当接收口径过小时,由湍流引起的波面畸变反而导致通信光束到达角产生较大波动,且该波动无法通过接收器件来补偿和控制;而且由光束闪烁或抖动引起的强度波动无法通过孔径的平均效应来得到补偿。另外一方面,较小的接收口径尺寸降低了接收端接收到的光功率,使得功率的动态范围变大,超过相干接收系统的接收范围,进而增大误码率。因此,这种方法要求大气湍流强度较小,仅适用于天气状况比较好的大气环境。2007年,ESA在光学地面站采用60 mm的小口径相干接收装置,成功实现了星地激光通信链路实验<sup>[24]</sup>。目前,关于减小接收口径克服大气湍流效应的研究进展较少。

#### 3.2 自适应光学

自适应光学<sup>[25]</sup>始于20世纪50年代,在70年代应用于军事成像领域<sup>[26]</sup>,逐渐发展成熟。自90年代初期以来,随着自适应技术的成本降低和计算机性能、计算速度的提高,自适应光学广泛应用于航天领域。

ESA和德国宇航中心(DLR)开展了自适应光学相关的研究工作。自适应光学通过利用变型镜,实时检测、校正畸变了接收波面,提高了耦合效率。需要注意的是,波前矫正仅在试场角(即等晕角 $\theta_0$ )非常小时才可以实现。但是如果等晕角太小,又无法满足星地激光通信中超前对准角 $\phi_0$ 的要求: $\phi_0 = \frac{2 \cdot \Delta v}{c}$ ,其中,超前对准角 $\phi_0$ 是指在横向移动的激光通信终端(LCT)在发射激光时,对准目标所需的角度提前量, $\Delta v$ 指两台激光通信终端移动的横向相对速度, $c$ 指光速。

$$\theta_0 = \left[ 2.91 \cdot k^2 \cdot (\sec \xi)^{3/8} \cdot \int_{\text{path}} C_n^2(z) \cdot z^{5/3} dz \right]^{-3/5}. \quad (2)$$

在星地或者机载通信中,自适应光学首先产生一个与畸变传输光束相对应的附加预失真波面,当传输激光通过大气湍流产生畸变后,预失真波面抵消波面畸变部分,进而到达矫正波面的目的<sup>[27]</sup>。波前矫正的次数由接收望远镜直径和 $F$ 数比值的平方来决定,对于大口径的接收望远镜,需要矫正多次。波前矫正速度一定要比大气中湍流变化速率快十倍以上,不过在具有高速处理芯片计算机的今天,这个问题已经解决。定义大气湍流变化的速率称为Greenwood频率<sup>[25]</sup>,有

$$f_T = 2.31 \cdot \lambda^{-6/5} \cdot \left[ \sec \xi \cdot \int_{\text{path}} C_n^2(z) \cdot v_w(z)^{5/3} dz \right]^{3/5}, \quad (3)$$

式中 $v_w(z)$ 代表风速。

图1是ESA在西班牙特纳利夫岛光学地面站接收光信号的自适应光学(OGS)接收装置<sup>[28]</sup>的基本原理结构图,信号光进入该结构前需要通过快反镜(FSM)和控制环结构消除信号光在接收端到达角的波动。其中,望远镜由两个共焦的4F透镜组构成,入瞳位于图1中的可变形镜(DM)处,出瞳位于由透镜阵列组成的哈特曼(S-H)波前传感器<sup>[29]</sup>。从卫星端发出激光束是圆偏振光,通过大气信道后达到接收端。经过四分之一波片(QWP1)后变为水平线偏振光,全部通过偏振分束器(PBS1),又分别经过QWP2、可变形镜(DM)和QWP2,偏振方向旋转90°,水平偏振光转换为垂直偏振光,先后通过偏振分束器(PBS1)反射、共焦的4F透镜组和偏

振分束器 PBS2。通过旋转偏振分束器 PBS2 前的 QWP3 来控制光束在哈特曼传感器和校正波前的输出的光场强度分布。

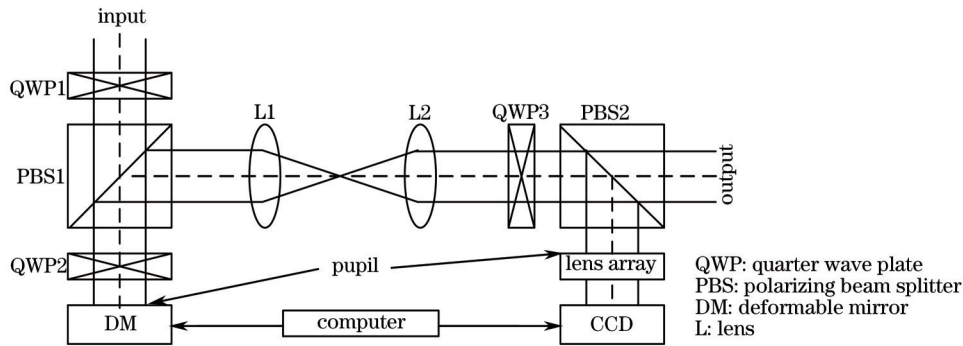


图1 自适应光学系统结构原理图

Fig.1 Schematic drawing of the adaptive optics system in the OGS

该光学地面站采样的可变形镜型号为 MEMS[图 2(a)],其表面镀金,尺寸为 40 mm×40 mm。在可变形镜反射镜中,望远镜出瞳范围内的尺寸为 4.9 mm×4.9 mm,包含 140 个电驱制动器[图 2(b)]。哈特曼传感器另外一部分是 CCD 相机,在尺寸为 20 mm×20 mm 的区域内包含 640 mm×512 mm 的像素点,帧率达到 1740 Hz。综合控制部分采用惠普公司的四核计算机,运行 LINUX 系统。

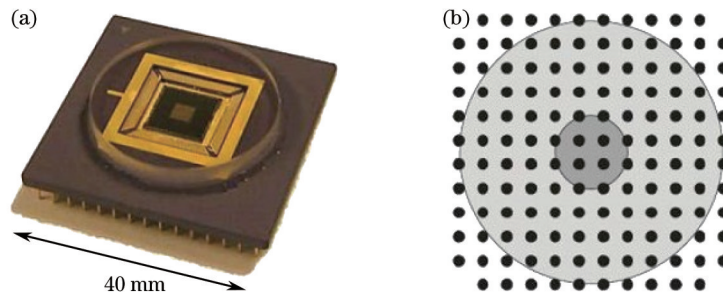


图2 ESA 采用的(a)可变形镜和(b)望远镜出瞳范围内电驱制动器分布示意图

Fig.2 (a) Deformable mirror used by ESA and (b) distribution of 140 actuators over the telescope pupil

自适应光学系统在克服大气湍流效应对光束相位的破坏方面有一定作用,但是其结构复杂,对器件的有一定要求,可变形镜和 CCD 相机的成本较高,造价昂贵。

### 3.3 相移键控调制外差探测接收技术

采用相移键控(BPSK)机制的原理进行信号调制和解调,载波的幅值和频率不变,相位通常取 0 和  $\pi$  两个值,电脉冲为“0”码时,光脉冲为 0 相,电脉冲为“1”码时,光脉冲为  $\pi$  相。因为直接检测信号光将导致信号丢失,所以 BPSK 调制方式必须使用相干检测。BPSK 调制外差接收的实现需要科斯塔斯锁相环(PPL)<sup>[30]</sup>和平衡探测来实现,如图 3 所示。

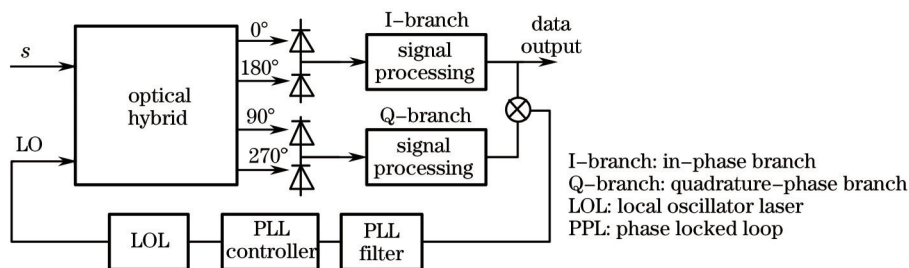


图3 BPSK 调制外差探测接收机的结构示意图

Fig.3 Block diagram of the BPSK modulation heterodyne receiver

信号光包括 90°光混频器<sup>[31]</sup>、同相支路、正交支路和相位探测器。探测器的输出端要经过二级的锁相环,由带控制器的锁相滤波器构成,最好由本征激光器来控制本振光。

2007 年,在卫星 TerraSAR-X 的通信终端和 DLR 地面光学站进行了星地激光通信实验<sup>[32]</sup>,采用 BPSK 调

制的相干检测技术,最高通信速率达到了5.625 Gb/s,首次实现了星地相干光通信链路。

由于需要接收波面的相位完整,又因在探测端信号与本振光混频后的干涉条纹对比度将下降,为保证一定的误码率,准确的信号解调需要在天气能见度状况极好、湍流很弱的情况下才可以采用BPSK调制机理。此外,在通信速率大于10 Gb/s且前置放大器达到一定灵敏度需求情况下,湍流效应导致的波前畸变将增大通信误码率,所以基于BPSK调制的外差探测接收技术无法满足星地激光通信链路的要求。

### 3.4 基于低密度等检编码的轨道角动量调制技术

1992年,Allen等<sup>[33]</sup>证实了轨道角动量(OAM)之后,就迅速推动了非线性光学、量子光学、原子光学和天文学等多个学科的新发展。与自旋角动量不同的是,OAM与螺旋形相位波前联系在一起。在理论上,可取值是无穷的且彼此正交。2012年,加州的王健教授<sup>[34]</sup>将物理学里的OAM引入到自由空间光通信中,与波长、时隙和偏振等自由度类似,将轨道角动量视为一个新自由度并作为数据信息载体,开展了利用OAM进行光通信的基础理论和关键技术研究。利用OAM信息复用、解复用实现了Tbit/s传输容量,获得了95.7 bit的高光谱效率,原理图如图4所示。

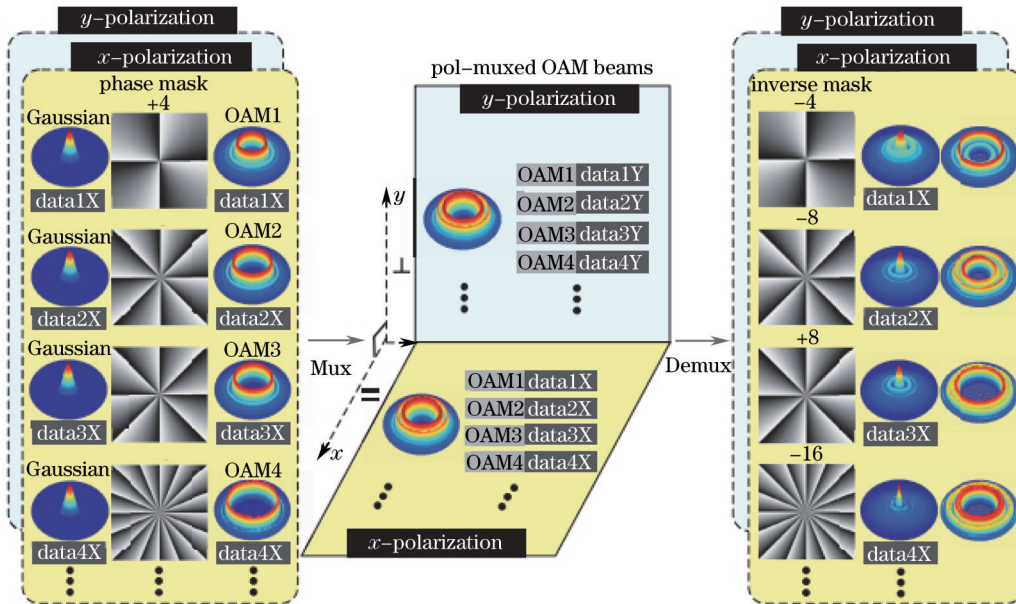


图4 偏振正交的多个轨道角动量的信息复用/解复用

Fig.4 Multiplexing/demultiplexing of information-carrying OAM beams together with polarization

基于OAM调制的低密度等检(LDPC)编码方式,适合于强大气湍流情况下的自由空间激光通信,利用10 Gb/s的通信器件就可以实现100 Gb/s的光通信链路<sup>[35-36]</sup>。LDPC编码分为二进制编码和非二进制编码。其中非二进制LDPC编码OAM调制在误码率为 $10^{-9}$ 情况下提供了9.3 dB的增益。进一步,采用多维度LDPC编码OAM调制的通信系统结构如图5所示。

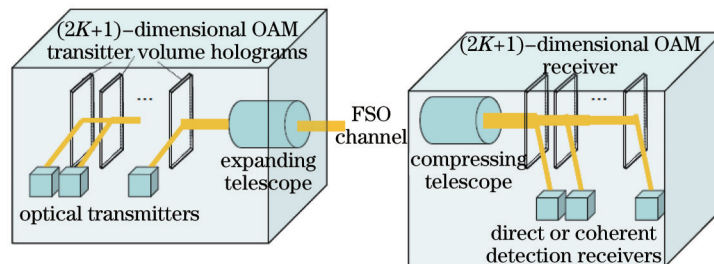


图5 多维度LDPC编码轨道角动量调制的通信系统图

Fig.5 Multidimensional LDPC-coded OAM modulation scheme

基于多维( $N$ -dimensional)OAM编码的调制方式可以有效地提高电子效率和光谱效率。这里, $N=2K+1$ ,与 $(2K+1)$ 个OAM相对应。利用分阶段的LDPC编码可以确保较高的通信速率,但是仍然可以通过增加维度(即 $N$ 的值),或者增加标准正交积的数量,使得系统的集成通信速率保持在一个较高的水平。

图6显示了基于二进制LDPC编码的OAM系统结构图。发射端结构如图6(a)所示,加载 $(2K+1)$ 个独立数据的载波(TEM<sub>00</sub>)模式激光束照射在体全息图上,每一个体全息图都被编码为一个轨道角动量模式,调整该模式光束的衍射角,使得出射的轨道角动量光束能够满足同轴传输的条件。 $N$ 个不同比特信息流从不同信息源发出,都经过二进制LDPC编码。这种编码方式采用比特间隔的LDPC编码OAM调制(BI-LDPC-OAM),即编码器输出的是经由 $N \times n$ 块间隔的LDPC码。映射器决定着 $M$  ( $M = 2^N$ )进制的信号星座点。然后,光束经过体全息图之后经过望远镜发出信号。

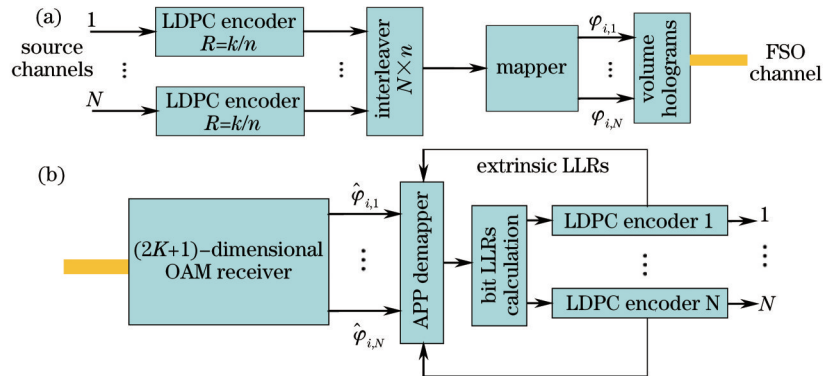


图6 基于二进制LDPC编码的轨道角动量系统结构图。(a)  $T_x$ 和(b)  $R_x$ 结构

Fig.6 OAM system configuration based on binary LDPC-coded. (a)  $T_x$  and (b)  $R_x$  configurations

在自由空间信道中,轨道角动量光束受到大气湍流效应的扰动。在接收端,自由空间通信的接收链路是基于不同方位角模式数、拉盖尔-高斯光束的正交特性。如图6(a)所示,用同一组体全息图来分离轨道角动量光束。光束经过轨道角动量解调和探测后,解调器 $N$ 个支路的输出以一定的符号率采样,相应的采样结果直接经过后验概率映射器。该映射器提供迭代LDPC译码所需要的对数似然比。因此可以看出,系统具有伸缩性,可以适合于任何维度的LDPC编码调制。

LDPC编码的轨道角动量调制方式的特点在于:1) 到终端用户的通信传输具有超高速的特性,无线电通信和光通信的良好互通性;2) 减少安装成本,减少使用时间,提高自由空间光通信的能量效率;3) 此外,虽然非二进制的LDPC编码轨道角动量调制的误码率性能要好于二进制LDPC编码轨道角动量调制方式,减小了解码的复杂性,但是较难施行,需要进一步的实验室开放和商业应用。

### 3.5 差分相移键控调制相干探测技术

另外一种新型的、有效的方法是采用差分相移键控(DPSK)<sup>[37]</sup>调制原理来调制和解调信号。这种加载信息到激光相位变化的调制方式,不需要波前补偿技术,不需要本振光,也不需要频率锁定<sup>[38]</sup>。该调制技术在地面光纤通信网络中已经得到成熟的应用。

DPSK调制形式把要传递的信息加载在载波上相邻码元的相对相位变化中,称为相对调相,即对数字基带信号 $a_n(t)$ 进行差分编码, $t$ 表示 $t$ 时刻,把绝对码 $a_n(t)$ 换成相对码(或差分码) $b_n(t)$ ,编码规则为

$$b_n(t) = a_n(t) \oplus b_{n-1}(t-1), \quad (4)$$

式中 $\oplus$ 表示异或,最初的 $b_{n-1}(t-1)$ 可以任意设定。再根据所得到的差分码表示的二进制信号 $b_n(t)$ 后,通过电光调制器来进行绝对调相。因此,相邻前后码元的相移为 $0$ 或 $\pi$ 对应要传递的信息数据 $0$ 或 $1$ 。在解调方面,两个连续码元通过非等臂的信号支路和自相位延时 $1$  bit信号支路进行偏光干涉,对DPSK信号进行相位解调,实现相位到强度的转换,进而解调得到数据信息,如图7所示。两支路差分延迟的时间间隔对应 $1$  bit传输数据的时间 $T$ 。

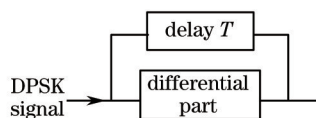


图7 DPSK调制信号解调自差分干涉机理图

Fig.7 Diagram of self-differential interference of DPSK modulating signal

### 3.5.1 基于光纤的多模-差分相移键控调制干涉接收

相比于复杂自适应光学系统,采用多模-差分相移键控(M-DPSK)调制原理的接收结构装置,其是一种更简单的克服大气湍流效应方案,该方案已经成功地用于 TerraSAR 和 NFIRE 卫星上的通信终端载荷,实现了与地面的激光通信链路<sup>[39]</sup>。该方案基于非等臂迈克耳孙干涉仪结构,通过单个消色差棱镜来重建光瞳像,其中棱镜的焦距和分束器的厚度的选取,要保证两支路有相同的出瞳面和所需要的光程差。通过把压电晶体位置在一个操作偏压点的方法来控制来反射镜 M2,以保证即使接收光存在多普勒频移的情况,干涉仪两臂的光程差也是分数倍波长。具体的原理结构框图如图 8 所示,两片反射镜 M1 和 M2 都覆盖薄玻璃层。

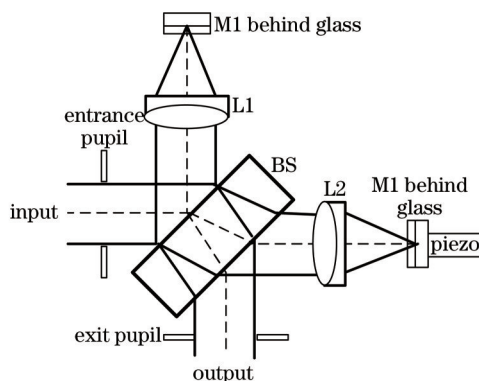


图 8 基于迈克耳孙干涉仪的 M-DPSK 调制技术结构示意图

Fig.8 Schematic drawing of technique of M-DPSK modulation based on Michelson interferometer

该结构要求干涉仪两臂的光程差与 1 bit 数据所需的时间相对应。同样,这里要求激光光源的相干长度要大于光程差,这样一个连续比特的相对相位就可以通过干涉转换为强度变化,也同样的为了把干涉仪的光程差稳定在分数波长的范围内。在探测端,信号光的调制对比度取决于相似波前的干涉情况,并不取决于光束波前本身的质量。为了保证入瞳和出瞳具有相同的波前,这里需要两臂的出瞳和入瞳严格共轭。由于在高速率通信的 1 bit 周期内,大气湍流效应的变化慢于波前相位畸变,即使接收信号光的波前有畸变,干涉仪通过叠加两臂的相同波前,也可以得到最优的调制对比度。其实验装置图如图 9 所示。

尽管 M-DPSK 技术解决了克服大气湍流效应、提高干涉对比度的问题,但是无法把信号光束聚焦在单模光纤的小模场面积(在波长为 1064 nm,  $NA=0.15$  时,模场直径  $10\ \mu\text{m}$ )上面。此时, M-DPSK 技术的净增益由光电探测器探测面(光束聚焦后的光斑直径达到  $60\ \mu\text{m}$ )和衍射极限点扩展函数的面积比决定,因此,高速(大于 10 Gb/s)光电探测器的灵敏度将提高。M-DPSK 调制接收技术已经应用于 ESA 地面站,为 ERDS 计划提供搭载于 Alphasat、ERDS-A 和 EDRS-C 卫星激光通信终端的地面测试任务。

以 M-DPSK 调制干涉技术为基础,进一步提出了改进型 M-DPSK 调制干涉接收结构,该结构由方形分束器、玻璃块状反射镜和压电晶体控制的标准反射镜组成,用于解码从 Alphasat 和 EDRS 卫星回传的通信数据,其结构设计如图 10 所示。

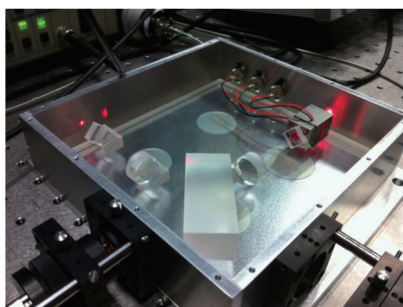


图 9 基于迈克耳孙干涉仪的非等臂干涉仪实验装置图

Fig.9 Experiment setup based on Michelson interferometer with both unequal arms

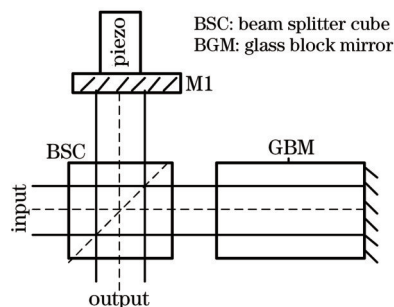


图 10 改进型基于迈克耳孙干涉仪的 M-DPSK 结构示意图

Fig.10 Structural diagram of improved M-DPSK design based on Michelson interferometer

### 3.5.2 基于 DPSK 调制的自差分零差探测技术

自由空间 DPSK 调制自差分零差探测技术,是以马赫-曾德尔(Mach-Zehnder)干涉结构、 $2\times 90^\circ$ 光学桥接器为基础,基于自差分干涉原理的相干探测技术<sup>[40]</sup>,用于星地激光通信中地面接收端克服大气湍流对通信链路性能的影响。自由空间 DPSK 调制的自差分零差探测装置的干涉结构有两种:自由空间差分干涉结构<sup>[41]</sup>和光瞳匹配差分干涉结构<sup>[42]</sup>,分别如图 11(a)和(b)所示。

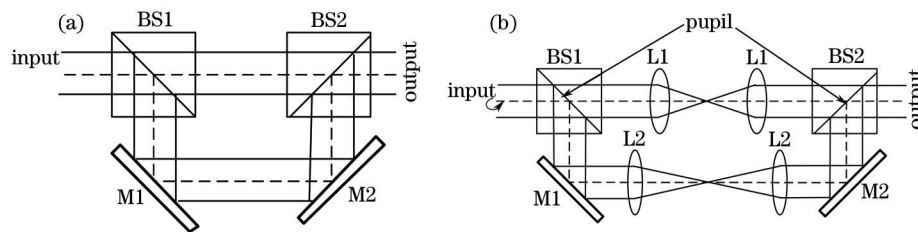


图 11 基于 DPSK 调制的自差分零差探测技术。(a) 自由空间差分干涉结构; (b) 光瞳匹配差分干涉结构

Fig.11 Self-differential homodyne detection technology based on DPSK modulation. (a) Free-space differential interference structure; (b) pupil-matching differential interference structure

差分后的干涉场通过平衡接收机来探测信号,理论上探测灵敏度比直接探测的情况高 3 dB。通过前置放大器电路部分实现稳相和对数据的处理。中国科学院上海光学精密机械研究所刘立人课题组多年来进行星地激光通信方面的研究<sup>[43]</sup>,采用基于 DPSK 调制的光瞳匹配式差分干涉结构接收载波光信号<sup>[44]</sup>,其接收端的差分部分实验装置如图 12 所示。

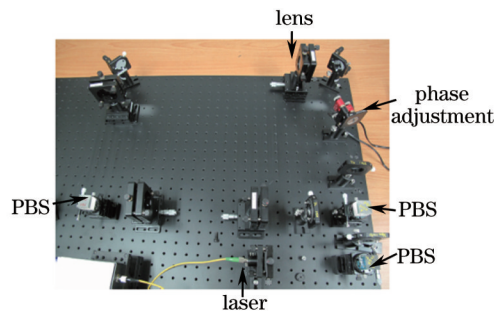


图 12 光瞳匹配式差分干涉结构实验图

Fig.12 Experiment setup of pupil-matching differential interference

相对于传统的技术方案,其优点在于:光学信号在发射或者接收过程中,不需要波前补偿技术和相位延迟技术;由于不需要本振光,所以无需频率锁定和锁相环技术;采用自差分的形式,对大气湍流效应不敏感,大大地降低了技术难度、简化了硬件结构、节约了链路成本,可以有效克服大气介质的非均匀特性对信号光束传播的破坏。这种新型的、非光纤的全光结构应用在星地激光通信中,解决了星地高速光通信的瓶颈问题,有助于实现通信在地基的全球互联光通信网络。

## 4 结 论

星地激光通信是信息领域中顶尖高科技交叉领域,具有巨大的应用前景,该技术也代表国家在空间信息领域的综合水平和创新能力。克服大气湍流效应影响是解决天基宽带网络最有效的手段,具有很大的民用和军用潜能,所以实现高速率的星地激光通信将是各国科研技术领域一个研究热点。

针对星地激光通信过程,分析了大气信道中湍流效应对激光传输的影响。根据国内外星地激光通信的研究状况和实验进展,提出几种克服大气湍流的方法:减小接收口径、自适应光学系统相位补偿、BPSK 调制外传探测接收技术、基于 LDPC 编码的轨道角动量调制技术和 DPSK 调制自差分零差相干探测技术,并做了对比和分析。和传统的非相干直接探测相比,这些方法可以不同程度地提高通信速率,增大通信容量。其中,基于 DPSK 调制的自差分零差相干探测技术通过改变光信号的相对相位变化来加载信息。在接收端经过自差分干涉,解调出相位信息的同时,抵消了大气湍流效应对光波相对相位的影响,进而达到克服大气湍流效应的目的,具有非常大的发展潜力和广阔的应用前景。



## 参考文献

- 1 Chan, Vincent W S. Space coherent optical communication systems—an introduction[J]. *J Lightwave Technol*, 1987, 5(4): 633–637.
- 2 V W Chan. Optical satellite networks[J]. *J Lightwave Technol*, 2003, 21(11): 2811–2827.
- 3 A Panahi, A A Kazemi. High speed laser communication network for satellite systems[C]. SPIE, 2011, 8026: 80260L.
- 4 R G Marshalek, G S Mecherle, P Jordan. System-level comparison of optical and RF technologies for space-to-space and space-to-ground communication links circa 2000[C]. *Photonics West'96*, 1996. 134–145.
- 5 T Tolker-Nielsen, G Oppenhauser. In-orbit test result of an operational optical intersatellite link between ARTEMIS and SPOT4, SILEX[C]. SPIE, 2002. 4635: 1–15.
- 6 T Tolker-Nielsen, J Guillen. SILEX: the first european optical communication terminal in orbit[J]. *ESA bulletin*, 1998, 96(1): 998.
- 7 Liu Liren. Satellite laser communication is reviewed[J]. *Science*, 2007, 59(3): 29–33.  
刘立人. 卫星激光通信研究进展[J]. *科学*, 2007, 59(3): 29–33.
- 8 Liu Liren. Laser communications in space I optical link and terminal technology[J]. *Chinese J Lasers*, 2007, 34(1): 3–20  
刘立人. 卫星激光通信 I 链路和终端技术[J]. *中国激光*, 2007, 34(1): 3–20.
- 9 Liu Liren, Wang Lijuan, Luan Zhu, *et al.*. Mathematical and physical basis for pointing, acquisition and tracking testing of inter satellite laser communication terminals[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(9): 1329–1334.  
刘立人, 王利娟, 栾竹, 等. 卫星激光通信终端光跟踪检测的数理基础[J]. *光学学报*, 2006, 26(9): 1329–1334.
- 10 Li Xiaofeng. The Principle and Technology of the Satellite-to-Ground Laser Communication Links[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2007. 121–159.  
李晓峰. 星地激光通信链路原理与技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007. 121–159.
- 11 Xia Yun. Performance Analysis for Space-to-ground Optical Communication System with Existence of Atmospheric Turbulence[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007.  
夏芸. 大气湍流对星地光通信的影响及性能分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
- 12 Miller, P Zieske. Characterization of atmospheric turbulence[C]. SPIE, 1976, 0075: 30–38.
- 13 J C Ricklin, F M Davidson. Atmospheric turbulence effects on a partially coherent Gaussian beam: implications for free-space laser communication[J]. *J Opt Soc Am A*, 2002, 19(9): 1794–1802.
- 14 L C Andrews, R L Phillips. *Laser Beam Propagation Through Random Media*[M]. Bellingham: SPIE Press, 2005.
- 15 Wu Huiyun, Chen Jinbao, Sun Zhenhai. Analysis of beam propagation through a relay mirror system in turbulent atmosphere[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(2): 0213001.  
吴慧云, 陈金宝, 孙振海. 激光湍流大气中继传输性能分析[J]. *中国激光*, 2013, 40(2): 0213001.
- 16 L C Andrews, R L Phillips, R J Sasiela. Strehl ratio and scintillation theory for uplink Gaussian-beam waves: beam wander effects[J]. *Opt Eng*, 2006, 45(7): 076001.
- 17 J Reclons, L C Andrews, R L Phillips. Analysis of beam wander effects for a horizontal-path propagating Gaussian-beam wave: focused beam case[J]. *Opt Engng*, 2007, 46(8): 086002.
- 18 A Ishimaru. *Wave Propagation and Scattering in Random Media*[M]. New York: Academic Press, 1978.
- 19 G Wang. A new random-phase-screen time series simulation algorithm for dynamically atmospheric turbulence wave-front generator[C]. SPIE, 2006, 6027: 602716.
- 20 Rao Ruizhong. *Light Propagation in the Turbulent Atmosphere*[M]. Hefei: Anhui Science and Technology Press, 2005. 307–335.  
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. 307–335.
- 21 Walter P Cole, Michael A Marciniak, Mitchell B Haeri. Atmospheric-turbulence-effects correction factors for the laser range equation[J]. *Opt Engng*, 2008, 47(12): 126001.
- 22 Jose Paulo G de Oliveira. Availability of free-space optical communication systems under influence of beam wandering and optical turbulence[C]. SPIE, 2009, 7324: 732406.
- 23 Z Sodnik, J P Armengol, R Czichy. Adaptive optics and ESA's optical ground station[C]. SPIE, 2009, 7464: 746406.
- 24 R Fields, D Kozlowski, H Yura, *et al.*. 5.625 Gb/s bidirectional laser communications measurements between the NFIRE satellite and an optical ground station[C]. SPIE, 2011, 8184: 81840D.

- 25 R Tyson. Principles of Adaptive Optics[M]. Florida: CRC Press, 2010.
- 26 Devaney N, Dalimier E, Farrell T, *et al.*. Correction of ocular and atmospheric wavefronts: a comparison of the performance of various deformable mirrors[J]. Appl Opt, 2008, 47(35): 6550–6562.
- 27 Wu Huiyun, Chen Jinbao, Sun Zhenhai. Analysis of beam propagation through a relay mirror system in turbulent atmosphere[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(2): 0213001.  
吴慧云, 陈金宝, 孙振海. 激光湍流大气中继传输性能分析[J]. 中国激光, 2013, 40(2): 0213001.
- 28 R H Czichy, Z Sodnik, B Furch. Design of an optical ground station for in-orbit checkout of free-space laser communication payloads[C]. Photonics West'95, 1995. 26–37.
- 29 Cheng Qiang, Yan Feng, Xue Donglin, *et al.*. Wavefront error testing of off-axis three-mirror anastigmatic system using phase diversity technology[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(10): 1008001.  
程强, 闫锋, 薛栋林, 等. 利用相位差异技术检测离轴三反光学系统的波前误差[J]. 中国激光, 2012, 39(10): 1008001.
- 30 Tang Weijie, Fu Lei, Chen Shufen, *et al.*. Realization of measuring micro-vibration based on phase generated carrier modulation-demodulation method and interference analysis[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(2): 0214001.  
唐伟杰, 付雷, 陈淑芬, 等. 相位生成载波调制解调法测量微振动的实现及干扰分析[J]. 中国激光, 2013, 40(2): 0214001.
- 31 R B Garreis. 90 degree optical hybrid for coherent receivers[C]. Munich'91 (Lasers'91), 1991. 210–219.
- 32 M Gregory, F Heine, H Kämpfner, *et al.*. Inter-satellite and satellite-ground laser communication links based on homodyne BPSK[C]. SPIE, 2010, 7587: 75870E.
- 33 L Allen, M W Beijersbergen, R J C Spreeuw, *et al.*. Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes[J]. Phys Rev A, 1992, 45(1): 8185.
- 34 Jian Wang, Jeng-Yuan Yang, Irfan M Fazal, *et al.*. Terabit free-space data transmission employing orbital angular momentum multiplexing[J]. Nature Photon, 2012, 6(7): 488–496.
- 35 Ivan B. Djordjevic and Murat Arabaci. LDPC-coded orbital angular momentum (OAM) modulation for free-space optical communication[J]. Opt Express, 2010, 18(24): 24722–24728.
- 36 Zhao S, Wang B, Zhou L, *et al.*. Turbulence mitigation scheme for optical communications using orbital angular momentum multiplexing based on channel coding and wavefront correction[J]. arXiv preprint arXiv: 1401.7558. 2014.
- 37 A Gnauck, P J Winzer. Optical phase-shift-keyed transmission[J]. J Lightwave Technol, 2005, 23(1): 115–130.
- 38 Ma Xiaoping, Sun Jianfeng, Zhi Yanan, *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): 0706017.  
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): 0706017.
- 39 Z Sodnik, M Sans. Extending EDRS to laser communication from space to ground[J]. Proc. of ICSOS, 2012. 13–2.
- 40 Dong Jing, Chen Rui, Li Xiaolong, *et al.*. Laser coherent detection of moving target based on micro-doppler effect[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(10): 1014001.  
董晶, 陈蕊, 李小龙, 等. 运动目标微多普勒效应的激光雷达相干探测及特征提取[J]. 中国激光, 2012, 39(10): 1014001.
- 41 Zhi Ya'nan, Sun Jianfeng, Dai Enwen, *et al.*. High-data rate differential phase shift keying receiver for satellite-to-ground optical communication link[C]. SPIE, 2012, 8517: 85170F.
- 42 Sun Jianfeng, Lu Wei, Wang Lijuan, *et al.*. High-data rate laser communication field experiment in the turbulence channel[C]. SPIE, 2012, 8517: 851713.
- 43 Liu Liren, Wang Lijuan, Luan Zhu, *et al.*. Mathematical and physical basis for pointing, acquisition and tracking testing of inter-satellite laser communication terminals[J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(9): 1329–1334.  
刘立人, 王利娟, 栾竹, 等. 卫星激光通信终端光跟踪检测的数理基础[J]. 光学学报, 2006, 26(9): 1329–1334.
- 44 Luan Zhu, Zhou Yu, Zhi Ya'nan, *et al.*. An aperture-matched phase-compensated differential phase shift keying receiver with a 90° hybrid[C]. SPIE, 2011, 8162: 81620O.