

QPSK 空间相干激光通信仿真与实验

杨静^{1,2}, 吕晓萌^{1,2}, 陈少勇^{1,2}, 杨焯^{1,2}, 蔚增禧^{1,2}, 崔岩^{1,2}, 李文亮^{1,2}, 乔澜^{1,2}

(1. 中国电子科技集团公司第二十九研究所, 四川成都 610029; 2. 四川省宽带微波电路高密度集成工程研究中心, 四川成都 610029)

摘要:相干激光通信因其具有高通信速率、复杂编码格式、极高灵敏度,已成为星间高速数据通信的重要技术之一。本文设计了一种 QPSK 空间相干激光通信系统链路,给出发射端二进制电信号到激光载波相位的调制映射表,和接收端激光载波相位到二进制电信号的解调映射表。对设计的空间相干激光通信系统链路进行数字化仿真,以星座图的 EVM 作为核心指标衡量系统性能,仿真分析接收端入射光功率、接收端光放大器噪声系数等因素对 EVM 的影响。根据仿真结果搭建相应通信链路,在输入光功率为 -45 dBm、 -48.5 dBm 时,经测试得到相应星座图 EVM 分别为 17.8% 、 24.4% ,与仿真结果较符合。

关键词:空间光通信;相干光通信;QPSK;EVM

中图分类号:TN929.1;TN249 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2023.08.005

Simulation and experiment of QPSK spatial coherent laser communication

YANG Jing^{1,2}, LV Xiao-meng^{1,2}, CHEN Shao-yong^{1,2}, YANG Ye^{1,2},
YU Zeng-xi^{1,2}, CUI Yan^{1,2}, LI Wen-liang^{1,2}, QIAO Lan^{1,2}

(1. The 29th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chengdu 610029, China;

2. Sichuan Province Engineering Research Center for Broadband Microwave Circuit High

Density Integration, Chengdu 610029, China)

Abstract: Coherent laser communication has become one of the important technologies of inter satellite high-speed data communication because of its high communication rate, complex coding format and extremely high sensitivity. In this paper, a QPSK spatially coherent laser communication system link is designed to give the modulation mapping table from the binary electrical signal to the laser carrier phase at the transmitter and the demodulation mapping table from the laser carrier phase to the binary electrical signal at the receiver are given. The digital simulation of the designed spatial coherent laser communication system link is carried out, and the EVM of constellation is used as the core index to measure the system performance. The impact of the parameters such as the input power at the receiver and the noise figure of the optical amplifier at the receiver on the EVM are simulated and analyzed. The corresponding communication link is built according to the simulation results. When the input power is -45 dBm and -48.5 dBm, the corresponding EVM of constellation is 17.8% and 24.4% respectively, which is in good agreement with the simulation results.

Keywords: spatial optical communication; coherent optical communication; QPSK; EVM

1 引言

空间激光通信凭借其高速数据传输能力、极高

接收灵敏度,已成为未来高速星间通信重要的技术手段。光通信技术经过几十年的发展至今硕果累

作者简介:杨静(1994-),女,博士,工程师,主要研究方向光子信息技术。E-mail:845530812@qq.com

通讯作者:吕晓萌(1986-),男,博士,高工,主要研究方向为星间激光通信,微波光子技术。E-mail:342721062@qq.com

收稿日期:2022-10-10; 修订日期:2022-11-11

累,以提高灵敏度、通信速率为核心目标,总共经历了五代技术改进^[1]。光通信按探测体制分为直接探测与相干探测,前者光电探测器响应信号光的强度,而后者响应信号光与本振光混频后的强度,通常本振光强度远大于信号光,因而相干探测比直接探测具有可观的相干增益,所以在掺铒光纤放大器(EDFA)发明之前,相干探测灵敏度远高于直接探测,因而在前三代光通信系统中,相干探测是主要技术发展焦点。相干探测虽然具有极高灵敏度,但系统复杂,对激光器线宽、数字信号处理器(DSP)速度等要求较高。1990年EDFA出现后,信号光不需要通过光-电-光中继器周期性再生,而是直接在光域上放大且不用考虑插损,这使直接探测的灵敏度大大提高,且结合波分复用(WDM)通信速率也大大提高达到 Tbps 量级,因而系统简单、对器件要求不高的直接探测成为发展热点,此即第四代光通信系统。

到目前最先进的第五代光通信系统,为适应现代社会对通信网络速率要求的不断提高^[2],且受益于窄线宽激光器、高速数模转换器(DAC)、DSP的发展,谱效率更高的相干探测再一次成为研究热点,调制格式由低阶调制发展到高阶调制,即一个符号代表多个比特,谱效率由第四代系统的 0.8 bps/Hz 以下,发展到 8 bps/Hz 以上。

除了技术体制上的改进,随着人类社会通信场景也趋向多样化,因而脱离开光纤传输介质而通过自由空间传输的空间相干激光通信逐渐成为当前研究热点^[3]。由于光纤通信需要在通信双方铺设光缆,受限于成本、地形等存在一定局限性,而空间激光通信传输介质为自由空间,应用场景局限性大大降低,且真空传输不存在光纤中的色散问题,因而数据处理更简单快速。在诸多应用场景中,通过将大量通信卫星发射至太空组网,实现覆盖全球的高速通信网络,对民用、军用领域都具有巨大吸引力而受到较大关注。

本文对高阶调制的 QPSK 空间相干激光通信技术进行研究,第一章详细介绍系统链路结构:包括发射端、自由空间传输、接收端,第二章概述相干链路原理,通过在发射端将二进制数字信号调制到光载波上,并在接收端相干解调实现双方通信,第三章针对空间链路进行数字化仿真分析,从而得到信号星座图,并在实验室搭建相应链路完成实验验证,根据仿真结果搭建相应通信链路,在输入光功率为 -45 dBm、-48.5 dBm 时,经测试得到相应星座图 EVM 分别为 17.8%、24.4%,与仿真结果较符合。

2 QPSK 空间相干激光通信链路结构:

本文设计的 QPSK 空间相干激光通信基本链路如图 1 所示。

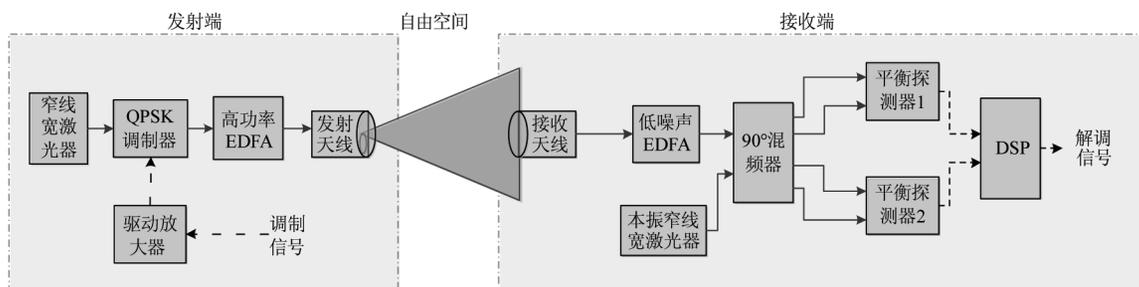


图 1 QPSK 空间相干激光通信链路结构

Fig. 1 The link structure of QPSK spatial coherent laser communication

通信双方分为发射端和接收端,连接线条的箭头方向代表信号流向,其中实线代表光纤,承载光信号传输;虚线代表电缆,承载电信号传输。发射端包含:窄线宽激光器、QPSK 调制器、驱动放大器、高功率 EDFA、发射光学天线,接收端包括:接收光学天线、低噪声 EDFA、本振窄线宽激光器、光混频器(hybrid)、平衡探测器、DSP。

对于发射端的链路,窄线宽激光器发出激光作为光通信载波,调制电信号经过驱动放大器放大以满足调制器半波电压要求^[4],通过 QPSK 调制器将

要传输的电信号加载到激光相位上,调制后的信号光经高功率 EDFA 进行受激放大,放大后的信号光由发射光学天线准直扩束,扩束后辐射至自由空间。

对于接收端的链路,由接收光学天线部分接收空间信号光至接收端低噪声 EDFA,经该 EDFA 放大后的信号光与接收端本振窄线宽激光器发出的激光(本振光)合束,信号光与本振光间的频率差可实时反馈补偿^[5],经过 90° hybrid,得到本振光与信号光四组不同相位关系的混频光,然后四组混频光经过两个平衡探测器得到 I、Q 两路电信号,经过 DSP

对接收的信号进行正交归一化、时钟同步、频偏估计、相位估计等处理^[6],即可解算出原始调制数字信号,从而实现双方高速通信。

3 QPSK 相干激光通信原理

相干激光通信主要包括发射端的信号调制、接收端的信号解调两个核心部分,其功能分别是将二进制电信号调制到光载波的相位上、将光载波相位携带的信息解调恢复到二进制电信号,接下来分别阐述其工作原理。

3.1 调制原理

对于发射端,由 IQ 调制器实现电信号 QPSK 调制,其调制器结构和原理^[7]如图 2 所示。

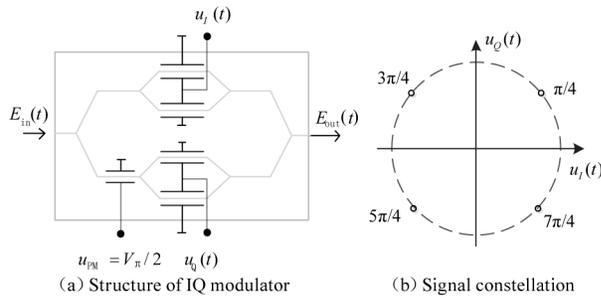


图 2 IQ 调制器原理图

Fig.2 The schematic diagram of IQ modulator

图 2(a) 中 I、Q 两臂调制信号 $u_i(t)$ 、 $u_q(t)$ 为放大后的数字电信号,则输出光场为:

$$E_{out}(t) = E_0 \cos(2\pi f_0 t + \theta_s) \quad (1)$$

其中 E_0 为光场幅度; f_0 为激光载波频率; θ_s 的取值与 I、Q 两路数字电信号取值对应关系为表 1。

表 1 调制信号映射表

Tab. 1 The mapping table of modulation signal

θ_s	$\pi/4$	$3\pi/4$	$5\pi/4$	$7\pi/4$
$u_i(t)/V_\pi$	1	-1	-1	1
$u_q(t)/V_\pi$	1	1	-1	-1

V_π 为调制器的半波电压。由此,I、Q 两路二进制数字电压信号,通过电光调制器转化为光场的相位信息,并体现为载波相位的四个象限变化,如图 2(b)所示,称为信号的星座图。

3.2 解调原理

对于接收端,通过 hybrid 及两个平衡探测器得到解调后的 I、Q 两路电信号:

$$V_I = V_0 \cos(\theta_s), V_Q = V_0 \sin(\theta_s) \quad (2)$$

其中, V_0 为探测器输出电信号幅度,则解调电信号与调制光场的相位关系如表 2 所示。

表 2 解调信号映射表

Tab. 2 The mapping table of demodulation signal

θ_s	$\pi/4$	$3\pi/4$	$5\pi/4$	$7\pi/4$
$\sqrt{2}V_I/V_0$	1	-1	-1	1
$\sqrt{2}V_Q/V_0$	1	1	-1	-1

与表 1 存在一一对应关系,通过映射译码,即可解调出原始二进制数字信号。

4 QPSK 空间相干光通信链路仿真和实验

根据图 1,在仿真软件中搭建相应的仿真链路如图 3 所示。

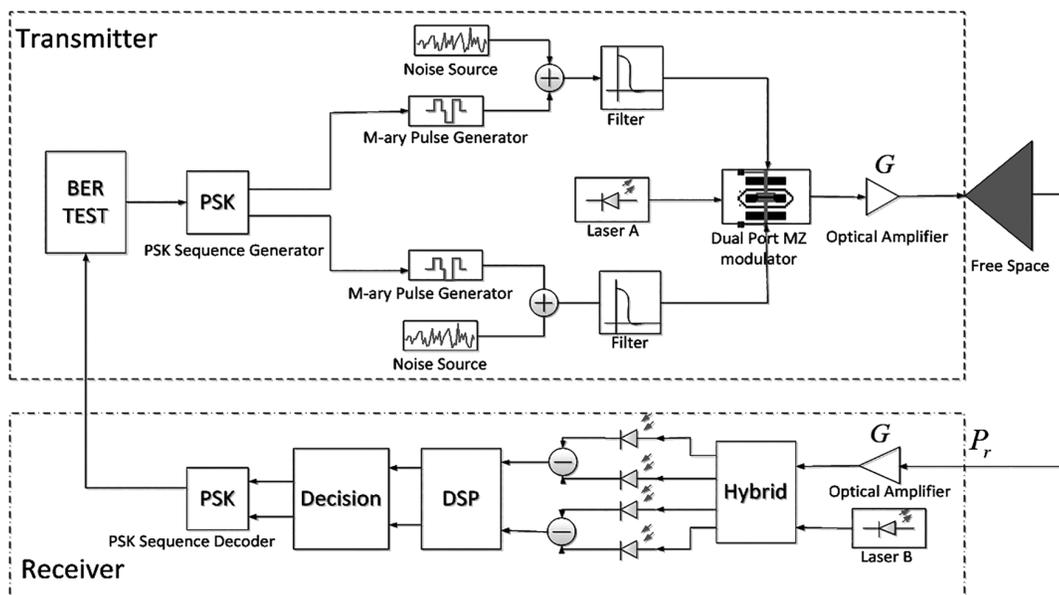


图 3 仿真链路图

Fig.3 The simulation link

图 3 中上部为发射端 (Transmitter)、自由空间 (Free Space), 下部为接收端 (Receiver), 其中误码率测试设备发射伪随机数字信号作为信号源, 并与接收端解调的数字信号对比, 从而得到误码率, 同时在链路中加入了噪声源模拟链路噪声, 加入滤波器模拟链路带宽, 并滤除链路中高频噪声以提高信噪比。

器件参数为: 通信速率 2.5 GHz, 发射端激光器线宽 10 kHz, 出光功率为 10 dBm, 波长为 1550 nm; 发射端的高功率 EDFA 噪声系数 7 dB, 出光功率为 32 dBm (约 1.6 W); 发射光学天线口径 40 mm, 束散角 60 urad; 自由空间距离为 6000 km, 设置为真空环境, 对应的空间损耗为 77 dB, 此时接收端入射光功率为 -45 dBm; 接收端的本振窄线宽激光器光功率 0.5 dBm, 波长为 1550 nm, 线宽为 10 KHz; 低噪声 EDFA 的线宽 2 nm, 探测器带宽为 2 GHz, DSP 滤波带宽为 2.5 GHz 的 0.75 余弦滚降滤波器。可变参数为: 接收端入射光功率 P_r (通过调节发射端 EDFA 增益调节)、接收端 EDFA 增益倍数 G 和噪声系数 NF (本文未特别说明情况下, 均指接收端 EDFA 的增益倍数和噪声系数)、探测器响应度 R 。

接下来研究各可变参数的影响。首先研究 P_r 的影响。根据实验条件, 设定 G 为 30 dB, NF 为 6 dB, R 为 0.8 A/W 下, 研究接收端在不同 P_r 下的星座图, 仿真得到星座图如图 4 所示。

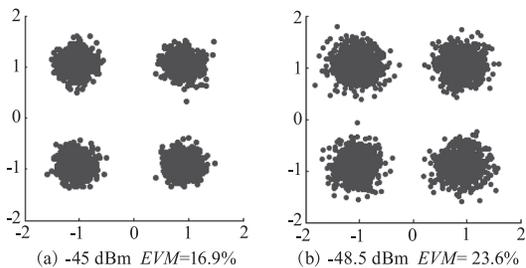


图 4 仿真星座图

Fig. 4 Simulation constellations

其中星座图的横坐标为 I 路信号幅度, 纵坐标为 Q 路信号幅度, 每个时刻采集到的 I、Q 信号对应星座图上的一个点, 将一段时间持续采样得到的 I、Q 信号画出, 就得到信号的星座图。理论上星座图为四个象限上四个点如图 2b 所示, 由于系统各器件引入的噪声, 如光放大器的自发辐射噪声、探测器的热噪声、散粒噪声等, 退化为四组离散点云。通过判定信号处在星座图象限的位置, 则可以得到表 2 中 θ_i 取值, 从而得到 I、Q 数字信号的取值实现双方通信。

衡量通信系统的直接参数为误码率, 然而由于计算机性能有限, 当误码率较低时无法通过数字信号的码流对比得到准确的误码率, 比如对于 10^{-7} 的误码率, 理论上需要计算 10^7 个码元才能得到一个误码, 且由于统计误差, 往往需要更多误码的出现才能更准确得到误码率, 因而通常通过星座图信号质量 (或信噪比) 来衡量系统性能, 表征信号星座图信噪比的物理量为误差矢量幅度 (EVM), 其计算方法为^[8]:

$$EVM = \sqrt{\frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N ((x_i - x_{\text{mean}})^2 + (y_i - y_{\text{mean}})^2)}{x_{\text{mean}}^2 + y_{\text{mean}}^2}} \quad (3)$$

其中, N 为总的计算 EVM 的信号码元数; x_i, y_i 且分别为第 i 个码元的横纵坐标值, 且有:

$$x_{\text{mean}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i, y_{\text{mean}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i \quad (4)$$

EVM 越小表明星座图各象限点云越集中, 信号质量越好。经过仿真得到, 图 4 中的 EVM 分别为 16.9% 和 23.6%, 可见随着 P_r 的升高, EVM 降低, 因而要求系统 P_r 越高越好。

此外, 通过 EVM 可以理论估计系统比特误码率 (BER), 两者关系为:

$$BER = \frac{1}{2} \text{erfc}\left(\frac{1}{\sqrt{2} \times EVM}\right) \quad (5)$$

erfc 为补余误差函数, 每一个符号由 I、Q 两路码元共同决定, 则总符号误码率 (SER) 为:

$$\begin{aligned} SER &= 1 - (1 - BER)^2 \approx 2 \times BER \\ &= \text{erfc}\left(\frac{1}{\sqrt{2} \times EVM}\right) \end{aligned} \quad (6)$$

相应变化曲线图如图 5 所示。

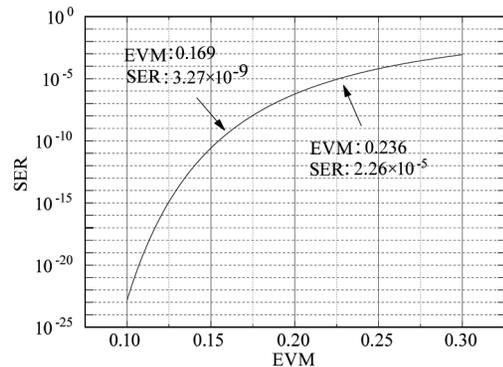


图 5 SER 与 EVM 的关系

Fig. 5 Relationship between SER and EVM

可见 EVM 为 16.9 % 和 23.6 % 时,估计符号误码率约为 3.27×10^{-9} 和 2.26×10^{-5} ,不考虑其他情况如前向误码纠错(FEC)等,如果要求系统 SER 小于 10^{-7} ,则 EVM 不得大于 20 %。

其次,研究 G 和 R 的影响。当 P_r 为 -45 dBm 且 NF 为 6 dB 时,仅改变 G ,给出当响应度分别为 0.5 A/W 和 0.8 A/W 时的, EVM 随 G 的变化趋势如图 6 所示。

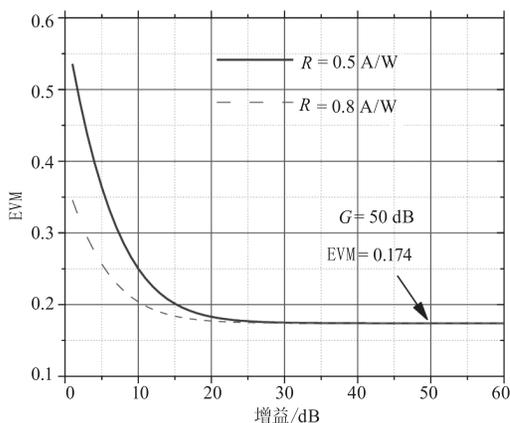


图 6 EVM 与 G 的关系

Fig. 6 Relationship between EVM and G

可见 EVM 随 G 增大而逐渐降低趋于最小值,而探测器响应度 R 对此最小值影响不大,只影响 EVM 随 G 变化趋势,从而可合理设定接收端 EDFA 的增益倍数 G ,使得 EVM 接近最小值。最后,研究 NF 的影响。在 P_r 为 -45 dBm 时,设置接收端的低噪声 EDFA 的 NF 在 5、3、1 dB 下,经仿真后得到的星座图如图 7 所示。

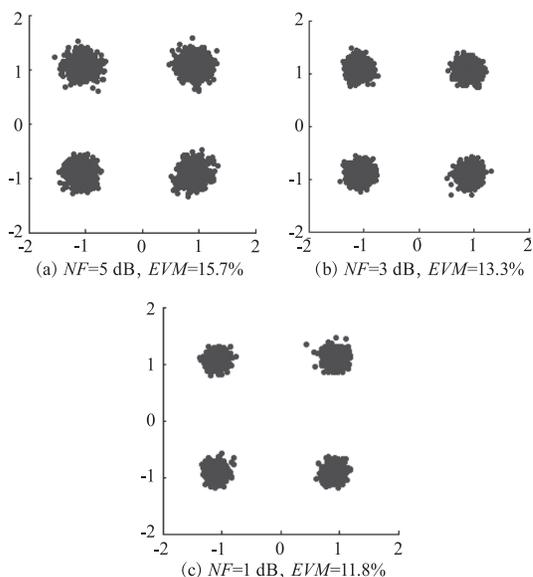


图 7 仿真星座图

Fig. 7 Simulation constellations

可见随着 NF 的降低, EVM 降低,因而要求接收端 EDFA 的 NF 越小越好,在保偏系统中其理论极限值为 0 dB。

根据仿真结果,我们设计并搭建了空间光通信的相干激光链路,其中器件参数与仿真设置值接近。接收端 EDFA 输出光功率固定为 10 dBm,采用空间插损方式模拟真空环境中的衰减量,由于光纤较短,级联光纤带来的色散可以忽略,因而可以近似模拟真空传输。本激光相干通信采用全保偏方式实现,为慢轴对准方式。接收端 EDFA 的 NF 为 6 dB。调节光衰减器使得 P_r 等于 -45 dBm 和 -48.5 dBm,实验得到的处理后的信号星座图如图 8 所示。

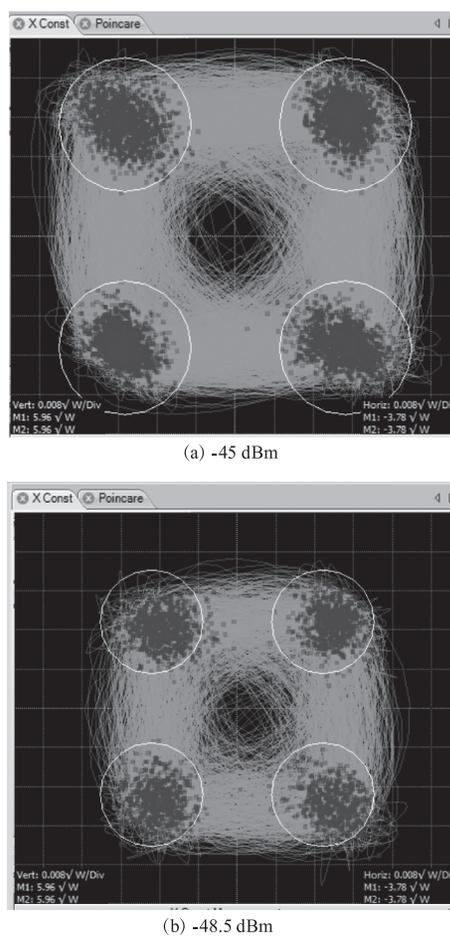


图 8 实验星座图

Fig. 8 Experimental constellations

以图 8(a) 为例,四个象限圆圈里的点云为处理后的信号,其余点为数字信号的上升、下降沿处采样到的轨迹,不纳入 EVM 计算范围,经过计算得到 EVM 分别为 17.8 %、24.4 %,与图 4 仿真结果 EVM 16.9 %、23.6 % 较符合,验证了本文所设计的 QPSK 相干光通信链路实际工程应用的可行

性和合理性。值得注意的是,图中未归一化显示信号幅度,所以图 8(b)入射光功率降低时,信号幅度相应降低。

5 结 论

本文设计并搭建了一套 QPSK 相干激光通信系统链路,依次对其进行原理分析、仿真、实验验证。首先,以表征信号误码率的星座图 EVM 为指标,仿真分析了接收端入射光功率 P_r 、接收端 EDFA 增益倍数 G 和噪声系数 NF 、探测器响应度 R 的影响,在 G 增大时,EVM 逐渐趋近于最小值, R 对此最小值影响不大,只影响 EVM 随 G 变化趋势,该最小值主要由 P_r 和 NF 共同决定,且 P_r 越大、 NF 越小,此最小值越小,因而两者作为后续系统优化的重点关注参数。其次搭建实验链路,该链路可实现发射功率为 1.6 W 时 6000 km 级的空间激光通信,当接收端输入功率 P_r 分别为 -45 dBm、-48.5 dBm 时,测得 EVM 分别为 17.8%、24.4%,与仿真结果 16.9%、23.6% 较符合,验证了本文所设计的 QPSK 相干激光通信链路实际工程应用的可行性和合理性,对空间相干激光通信的研究具有理论、工程参考意义,为后续继续提高通信速率、灵敏度等打下基础。

参考文献:

- [1] Govind P. Agrawal. Optical fiber communication system [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2020. (in Chinese)
Govind P. Agrawal. 光纤通信系统[M]. 北京:电子工业出版社,2020.
- [2] Fu Qiang, Jiang Huilin, Wang Xiaoman, et al. Research status and development trend of space laser communication[J]. China Optics, 2012, 5(2): 116 - 125. (in Chinese)
付强,姜会林,王晓曼,等. 空间激光通信研究现状及发展趋势[J]. 中国光学, 2012, 5(2): 116 - 125.
- [3] Bai Shuai, Wang Jianyu, Zhang Liang, et al. Development history and trend of space optical communication [J]. Advances in Laser and Optoelectronics, 2015, 52(7): 7 - 20. (in Chinese)
白帅,王建宇,张亮,等. 空间光通信发展历程及趋势[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(7): 7 - 20.
- [4] Yan Yingxing, LI Miaomiao, HU Hongkun, et al. A method of measuring half wave voltage of electro optic modulator based on small signal [J]. Laser & Infrared, 2022, 52(6): 918 - 922. (in Chinese)
闫应星,李淼淼,胡红坤,等. 基于小信号的电光调制器半波电压测量方法[J]. 激光与红外, 2022, 52(6): 918 - 922.
- [5] Dong Guangyan, XU Shengqi. Research on digital coherent optical receiver for satellite to ground laser communication [J]. Laser & Infrared, 2016, 46(11): 1311 - 1314. (in Chinese)
董光焰,徐圣奇. 星地激光通信中光学数字相干接收机的研究 [J]. 激光与红外, 2016, 46(11): 1311 - 1314.
- [6] Wang Ye. Research on digital signal processing technology in spatial coherent optical communications system [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Precision Machinery and Physics, Chinese Academy of Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, 2020. (in Chinese)
王也. 空间相干光通信系统中的数字信号处理技术研究 [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, 2020.
- [7] Tang Wenbin. Research on automatic bias control and damage compensation algorithm for IQ modulation [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2021. (in Chinese)
汤文兵. 用于 IQ 调制的自动偏置控制与损伤补偿算法研究 [D]. 武汉:华中科技大学, 2021.
- [8] H A Mahmoud, H Arslan. Error vector magnitude to SNR conversion for nondata-aided receivers [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(5): 2694 - 2704.