

# 基于高维调制的模分复用系统性能研究

Enock Lewa Kashero<sup>1</sup>, 侯丹<sup>2</sup>, 宋正勋<sup>1</sup>, 胡贵军<sup>2</sup>

(1. 长春理工大学 电信工程学院, 长春 130022; 2. 吉林大学 通信工程学院, 长春 130012)

**摘要:** 为了提高系统的传输容量和传输性能, 提出了基于高维调制的模分复用通信技术。通过搭建的基于高维调制的模分复用系统, 仿真分析了 4b-4D 和 8b-8D 高维信号在不同光信噪比、传输距离和模式耦合系数条件下的传输性能, 并与传统的谱效率相同的二维调制信号 QPSK 进行了对比。实验结果表明, 在目标误码率下, 4b-4D 信号和 8b-8D 信号所需信噪比分别比 QPSK 信号降低了 2 和 4 dB, 传输距离分别比 QPSK 信号增加了 20 和 40 km。可见, 随着信号维度的增大, 信号的抗噪声性能及抗色散性能越好。此外, 实验结果表明模式耦合对误码率的影响也随着信号维度的增加而减小。

**关键词:** 光纤通信; 高维调制; 模分复用; 误码率; 传输性能

**中图分类号:** TN929.11 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-5868(2017)02-0238-04

## Transmission Performance of Mode Division Multiplexing System Based on High-dimensional Modulation Format

Enock Lewa Kashero<sup>1</sup>, HOU Dan<sup>2</sup>, SONG Zhengxun<sup>1</sup>, HU Guijun<sup>2</sup>

(1. School of Electronics and Information Engin., Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, CHN;

2. College of Communication Engin., Jilin University, Changchun 130012, CHN)

**Abstract:** To improve the transmission capacity and performance of optical transmission system, a mode division multiplexing system based on high-dimensional modulation format was proposed. And the transmission performance of 4b-4D and 8b-8D signals with different optical SNR (OSNR), transmission distance and mode coupling factor was simulated, and also it was compared with that of 2D modulated signal QPSK. The simulation results show that, at the same BER, 4b-4D and 8b-8D signals yield around 2 and 4 dB OSNR gain, and 20 and 40 km transmission distance increment with respect to QPSK respectively. Besides, the effect of mode coupling also decreases with the increase of signal dimension.

**Key words:** fiber optic communication; high-dimensional modulation; mode division multiplexing; BER; transmission performance

## 0 引言

模分复用技术是利用少模光纤中彼此正交且相互独立的模式作为不同的传输信道, 分别承载信息, 可以使现有的光纤传输系统容量成倍提升<sup>[1-2]</sup>。与

此同时, 高维调制格式因其较高的频谱效率和渐进功率谱效率而备受关注<sup>[3-7]</sup>。高维调制信号在空间是一个整体, 可以在多个维度进行优化<sup>[8-9]</sup>。通过采用提高信号的维度, 扩大星座点的最小欧氏距离及在欧氏距离保持不变的情况下降低平均符号能量等方式, 可以达到提高信号的渐进功率效率的目的。因此, 基于高维调制的模分复用系统可以实现谱效率和功率效率具佳的效果<sup>[10-13]</sup>。

收稿日期: 2016-10-13.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61575078); 吉林省科学和技术基金项目(20140203009GX); 吉林省发展和改革委员会项目(2014Y087).

本文将模分复用技术和高维调制相结合，提出了基于高维调制的模分复用通信技术，本着从传输技术和信号发送端的调制技术两个方面来提升系统的传输性能和传输容量。本文在 VPI 中搭建了基于高维调制的模分复用系统，分别研究了噪声、传输距离及模式耦合对 2b-2D(QPSK)、4b-4D 和 8b-8D 三种信号误码性能的影响。仿真结果表明，在同一光信噪比下，4b-4D 和 8b-8D 高维信号的误码性能明显优于 QPSK 信号，且随着维度的增高，这种优势越明显。在目标误码率为  $10^{-3}$  的条件下，4b-4D 信号和 8b-8D 信号所需的信噪比分别比 QPSK 信号降低了 2 和 4 dB，传输距离分别比 QPSK 信号提高了 20 和 40 km。可见，随着信号维度的增大，信号的抗噪声性能及抗色散性能越好。此外，实验结果表明模式耦合对误码率的影响也随着信号维度的增加而减小。

### 1 基于高维调制的模分复用系统

基于高维调制的模分复用系统组成框图如图 1 所示。在发射端，首先将二进制伪随机信号 (PRBS) 由高维调制模块映射成高维信号，然后经光调制器调制到光载波上，再经模式转换器转为某一高阶模，最后由模式复用器 (MUX) 将不同模式承载的信号合成一路后送到少模光纤中传输。在接收端，经解复用器 (DEMUX) 和相干接收后把接收到的数据送到高维解调模块中进行解调，得到二进制码流。最后对解调出的二进制数据进行误码分析。其中高维调制模块和高维解调模块的组成分别如图 2、3 所示。实验中采用的激光器线宽为 100 kHz，波长为 1550 nm。少模光纤支持 LP<sub>01</sub> 模和 LP<sub>11</sub> 模两个模式，LP<sub>01</sub> 模色散设为 17 ps/(nm·km)，LP<sub>11</sub> 模色散设为 18 ps/(nm·km)，光纤损耗为 0.2 dB/km，偏振模色散为 2 ps/km<sup>1/2</sup>。

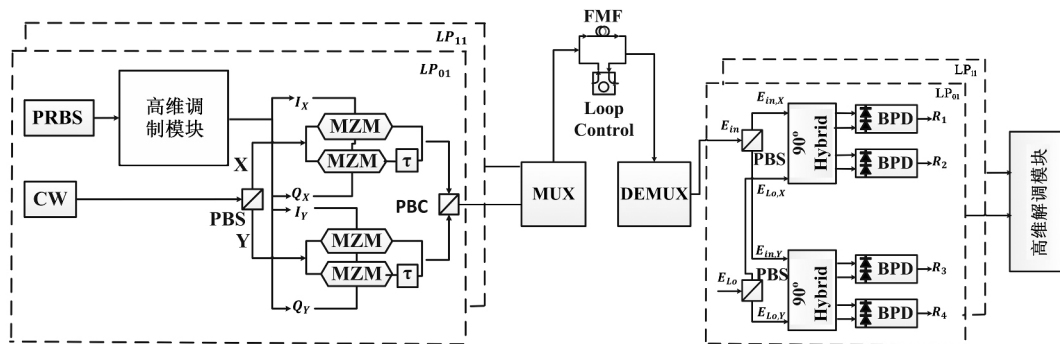


图 1 基于高维调制的模分复用系统组成框图

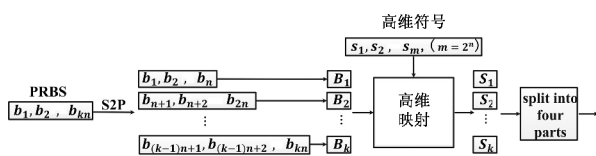


图 2 高维调制原理框图



图 3 高维解调原理框图

### 2 仿真结果及分析

本文利用 VPI 和 Matlab 建立了基于高维调制的模分复用系统的仿真平台，仿真结果展示了 4b-4D 和 8b-8D 信号在不同信噪比、传输距离以及模式耦合系数条件下的误码率性能，并与谱效率相同的 QPSK 信号进行了对比。仿真结果如下：

#### 2.1 光信噪比对系统传输性能的影响

在传输速率为 40 Gbit/s、传输距离为 100 km 的条件下通过调节光信噪比测量三种信号的误码率性能。实验结果如图 4 所示。

从图 4 中可以看出，随着光信噪比的增大，三种信号的误码率都逐渐减小。通过进一步对比三种信号的误码率曲线，可以得到以下结论：相同光信噪比下的误码率性能随着信号维度的增加而提高，这表明维度越大，信号的抗噪声性能越好。当目标误码率设为  $10^{-3}$  时，为达到目标误码率，8b-8D、4b-4D 和 QPSK 信号所需要的信噪比分别约为 17、19 和 21 dB。由此可见 8b-8D 信号在抗噪声性能方面比 QPSK 信号提高了 4 dB 左右，4b-4D 信号相对于 QPSK 信号提高了 2 dB 左右。

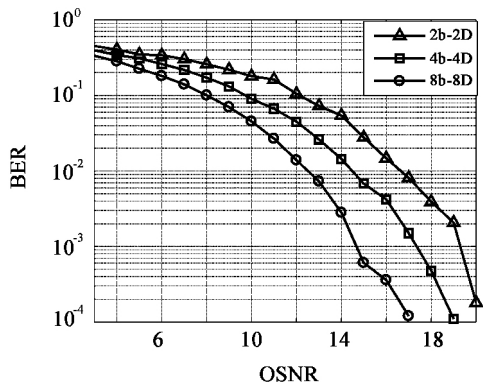


图4 误码率与光信噪比关系图

### 2.2 距离对系统传输性能的影响

在传输速率为 40 Gbit/s、偏振模色散为 2 ps/km<sup>1/2</sup>、LP<sub>01</sub> 模和 LP<sub>11</sub> 模的色散大小分别设为 17 和 18 ps/(nm·km) 的条件下,通过改变传输距离  $L$  测量三种信号的误码率性能。实验结果如图 5 所示。

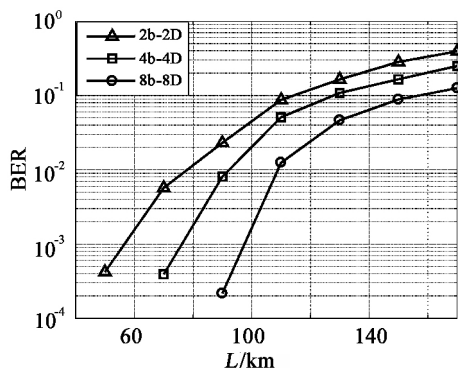


图5 误码率与传输距离关系图

从图 5 中可以看出,随着距离的增加,色散和偏振模色散引起的码间干扰越来越严重,导致三种信号的误码率不断上升。但在相同传输距离下,8b-8D 信号和 4b-4D 信号的误码率性能都优于 QPSK 信号,而且 8b-8D 信号的优势更加明显。这表明信号的维度越高则抗色散能力更强。因此,在误码率相同的条件下,八维信号和四维信号均比二维信号传输的距离远。在目标误码率为 10<sup>-3</sup> 时,QPSK 信号仅能传输 50 km 左右,但 4b-4D 信号和 8b-8D 信号分别能传输 70 和 90 km,即分别比 QPSK 信号提高了 20 和 40 km。通过上述分析可以看出高维信号更适合远距离传输。

### 2.3 模式耦合对系统传输性能的影响分析

在传输速率为 40 Gbit/s、传输距离为 100 km 的条件下,通过改变耦合系数测量三种信号的误码率

性能。结果如图 6 所示。

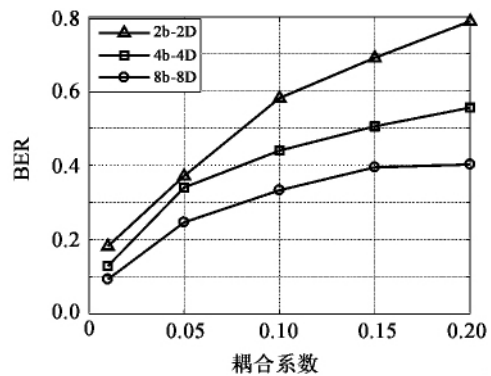


图6 误码率与耦合系数关系图

从图 6 可以看出,随着耦合系数的增加,三种信号的误码率都呈逐渐增大趋势,且模式耦合对三种信号误码性能的影响要大于光信噪比和传输距离的影响。对比 QPSK 信号,可以看出 4b-4D 信号和 8b-8D 信号随着耦合系数的增大误码性能逐渐趋于平缓,且在相同的耦合系数下均小于 QPSK 信号。最终可以得出信号的维度越高,模式耦合对其误码性能影响越小的结论。

## 3 结论

本文研究了基于高维调制的模分复用通信技术,通过 VPI 搭建了仿真系统,对谱效率相同的 2b-2D(QPSK)、4b-4D 和 8b-8D 三种信号进行仿真,分别研究了信噪比、传输距离和模式耦合系数对这三种信号的误码性能的影响。仿真结果表明,在目标误码率下,4b-4D 信号和 8b-8D 信号所需信噪比分别比 QPSK 信号降低了 2 和 4 dB,传输距离分别比 QPSK 信号提高了 20 和 40 km。得出随着信号维度增加,信号的抗噪声性能及抗色散性能越好的结论。此外,通过对比三种信号的模式耦合与误码率关系曲线,可以得出模式耦合对信号误码率的影响随着信号维度的增加而减小的结论。可见,本文提出的基于高维调制的模分复用通信技术从传输技术和信号发送端的调制技术两个方面可以达到提升系统的传输性能和传输容量的目的。

### 参考文献:

[1] Ryf R, Randel S, Gnauck A H, et al. Mode-division multiplexing over 96 km of few mode fiber using coherent 6×6 MIMO processing[J]. J. of Lightwave Technol., 2012, 30 (4): 521-531.  
 [2] Bai N, Ip E, Huang Y K, et al. Mode-division multiplexed

- transmission with inline few-mode fiber amplifier[J]. *Opt. Express*, 2012, 20(3): 2668-2680.
- [3] Johannisson P, Sjödin M, Eriksson T A, et al. Four-dimensional modulation formats for long-haul transmission [C]// *Opt. Fiber Commun. Conf.*, 2014: 1-3.
- [4] Lavery D, Behrens C, Makovejs S, et al. Long-haul transmission of PS-QPSK at 100 Gb/s using digital backpropagation[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2012, 24(3): 176-178.
- [5] Millar D, Koike-Akino T, Maher R. Experimental demonstration of 24-dimensional extended Golay coded modulation with LDPC[C] // *Opt. Fiber Commun. Conf. and Exhibition*, 2014: 1-3.
- [6] Fischer J K, Alreesh S, Elschner R, et al. Bandwidth-variable transceivers based on four-dimensional modulation formats[J]. *J. of Lightwave Technol.*, 2014, 32(16): 2886-2895.
- [7] Zhang Hongbin. Multidimensional coded modulation for undersea fiber optical transmission legacy modern and future [C]// *Opt. Fiber Commun. Conf.*, 2016.
- [8] Eriksson T. Multidimensional modulation formats for coherent optical communication systems[J]. *Chalmers University of Technol.*, 2014.
- [9] Millar D S, Koikeakino T, Arik S O, et al. High-dimensional modulation for coherent optical communications systems[J]. *Opt. Express*, 2014, 22(7): 8798-8812.
- [10] Karlsson M. Spectrally efficient four-dimensional modulation [C]// *Opt. Fiber Commun. Conf. and Expo.*, 2012: 1-3.
- [11] Agrell E, Karlsson M. Power-efficient modulation formats in coherent transmission systems [J]. *J. of Lightwave Technol.*, 2009, 27(22): 5115-5126.
- [12] Karlsson M, Agrell E. Which is the most power-efficient modulation format in optical links? [J]. *Opt. Express*, 2009, 17(13): 10814-10819.
- [13] Ishimura S, Kikuchi K. Multi-dimensional permutation modulation aiming at both high spectral efficiency and high power efficiency[C]// *Opt. Fiber Commun. Conf.*, 2014: 1-3.
- 作者简介:**  
Enock(1989—),男,肯尼亚人,硕士生,主要从事光纤技术方面的研究。  
**E-mail:** kasheroenock@yahoo.com

=====  
(上接第 237 页)

- [2] 李慧军,陈小敏,孙辉先. Spacewire 网络技术及应用研究 [C]// 中国空间科学学会空间探测专业委员会第十九次学术会议, 2006.
- Li H J, Chen X M, Sun H X. Rresearch of spacewire network technology and application[C]// *Proc. of the 19th Conf. on Space Science Society of China Space Exploration Professional Committee*, 2006.
- [3] 鲁文帅. SpaceWire 即插即用技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- Lu W S. Research of plug and play technology of SpaceWire [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.
- [4] 李慧军,惠平,曹松,等. 星载数据总线技术的现在与未来[C]// 中国空间科学学会空间探测专业委员会第十五次学术会议, 2002.
- Li H J, Hu P, Cao Song, et al. Present and future of spaceborne data bus technology[C]// *Proc. of the 15th Conf. on Space Science Society of China Space Exploration Professional Committee*, 2002.
- [5] 马鸣锦,朱剑冰,何红旗,等. PCI、PCI-X 和 PCI Express 的原理及体系结构[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007: 42-43.
- Ma M J, Zhu J B, He H Q, et al. The Principle and System Structure of PCI, PCI-X and PCI Express [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007: 42-43.
- [6] ECSS-E-ST-50-52C Spacewire-remote memory access protocol [S]. Noordwijk, Netherlands: ECSS Secretariat ESA-ESTEC Requirements & Standards Division, 2010.
- [7] McClements C, Dunstan M. RMAP initiator IP core user manual[Z]. STAR Dundee User Manual, 2012.
- [8] 詹金勇. PXI/PCI 总线设备驱动程序设计及应用[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
- Zhan J Y. Design and application of PXI/PCI bus device drivers [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011.
- 作者简介:**  
刘文莉(1992—),女,山东临清人,硕士研究生,研究方向为光总线技术。  
**E-mail:** 991984835@qq.com