

适合于大气激光通信的双空间调制

王惠琴, 杨顺信, 李亚婷, 武鑫

引用本文:

王惠琴, 杨顺信, 李亚婷, 等. 适合于大气激光通信的双空间调制[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(3): 565–572.

WANG Hui-qin, YANG Shun-xin, LI Ya-ting, et al. Double spatial modulation suitable for atmospheric laser communication[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(3): 565–572.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/OPE.20202803.0565>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

Log-normal湍流信道中超奈奎斯特

BER performance of Faster-than-Nyquist communications under Log-normal turbulence channel
光学精密工程. 2020, 28(2): 465–473 <https://doi.org/10.3788/OPE.20202802.0465>

湍流信道下光空间调制信号的压缩感知检测

Compressed sensing detection of optical spatial modulation signal in turbulent channel
光学精密工程. 2018, 26(11): 2669–2674 <https://doi.org/10.3788/OPE.20182611.2669>

并行翻转-正交频分复用调光控制室内可见光通信系统

PF-OFDM dimming control for indoor visible light communication systems
光学精密工程. 2015, 23(10z): 85–91 <https://doi.org/10.3788/OPE.20152313.0084>

相关信道中光多输入多输出系统的误码率

Bit error rate of optical multiple input multiple output system in correlated channel
光学精密工程. 2016, 24(9): 2142–2148 <https://doi.org/10.3788/OPE.20162409.2142>

空间光混频器分光性能的分析与优化

Analysis and optimization of splitting performance for space optical hybrid
光学精密工程. 2017, 25(7): 1748–1756 <https://doi.org/10.3788/OPE.20172507.1748>

文章编号 1004-924X(2020)03-0565-08

适合于大气激光通信的双空间调制

王惠琴*, 杨顺信, 李亚婷, 武 鑫

(兰州理工大学 计算机与通信学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要:相对于传统的光空间调制,光广义空间调制在传输速率和频谱效率上虽然有了较大的提升,但其误码性能不够理想。本文利用脉冲位置调制(PPM)和脉冲幅度调制(PAM),通过每次同时激活两个激光器而提出了一种双空间调制(DSM)。采用联合界技术推导出了 DSM 的误码率理论上界,分析了其频谱效率、传输速率和复杂度的影响因素,并与已有光空间调制的性能进行了对比。仿真结果表明:DSM 不仅提升了系统的频谱效率和传输速率,而且有效地改善了系统的误码性能。在相同的传输速率下,当误码率为 1×10^{-3} 时,相对于(4,4)-8PPM SPPM 和(3,4)-4PPM GSPPM 方案,(3,4)-8PPM-2PAM DSM 的信噪比分别改善了约 2.5 dB 和 6 dB,频谱效率分别提高了 2.335 bits/(s·Hz)和 0.375 bits/(s·Hz)。DSM 方案为未来大气激光通信传输速率的提高提供了一种有效手段。

关键词:激光通信;双空间调制;脉冲幅度调制;脉冲位置调制;传输速率;频谱效率

中图分类号: TN929.12 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20202803.0565

Double spatial modulation suitable for atmospheric laser communication

WANG Hui-qin*, YANG Shun-xin, LI Ya-ting, WU Xin

(School of Computer & Communication,
Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

* Corresponding author, E-mail: 15117024169@139.com

Abstract: Compared with traditional optical spatial modulation, optical generalized spatial modulation has a significant improvement in transmission rate and spectral efficiency. However, its bit error rate (BER) is not ideal. In this paper, a double spatial modulation (DSM) is proposed to simultaneously activate two lasers, using pulse position modulation (PPM) and pulse amplitude modulation (PAM). The theoretical upper bound of the bit error rate of DSM is then derived using union bound technology. Furthermore, the effect factors of spectral efficiency, transmission rate, and complexity are analyzed. The performance of DSM is compared with that of the proposed optical spatial modulation. The simulation results show that the DSM improves the spectrum efficiency and transmission rate of the system, and efficiently reduces its BER. When the transmission rate is the same and the bit error rate is 1×10^{-3} , the signal-to-noise ratio of (3,4)-8PPM-2PAM DSM is improved by approximately 2.5 and 6 dB compared with (4,4)-8PPM SPPM and (3,4)-4PPM GSPPM, respectively. Further, its spectral efficiency is increased by 2.335 and 0.375 bits/(s·Hz), respectively. Therefore, DSM scheme can effectively improve the transmission rate of atmospheric laser communication in the future.

收稿日期:2019-05-15;修订日期:2019-07-10.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No.3961861026)

Key words: laser communication; double spatial modulation; pulse amplitude modulation; pulse position modulation; transmission rate; spectral efficiency

1 引言

大气激光通信由于其保密性好、性价比高等特点,成为一种新型宽带接入技术。随着数据传输业务量的急剧增加,人们对大气激光通信系统的容量和传输速率提出了更高的要求,同时,大气湍流的存在会严重影响激光通信系统的有效性和可靠性^[1]。因此,对大容量、高速率的大气激光通信系统提出了更为迫切的需求。

面对大气激光通信中存在的问题,目前主要的解决措施有轨道角动量^[2]、成像通信^[3]、光多输入多输出(Optical Multiple Input Multiple Output, OMIMO)^[4]和光空间调制(Optical Spatial Modulation, OSM)^[4]等。轨道角动量可大大提高通信系统的信道容量,但量子偏振涨落等现象会严重影响通信系统的性能。同时,由于其理论和模型还不完善,使其应用受到了一定限制。成像通信虽能获得较高的复用增益,但对位置信息较为敏感,而且无法满足移动性和无缝覆盖的需求。OMIMO技术可以在不增加频谱资源和发射功率的情况下,成倍提高现有系统的信道容量,但信道间干扰和多个激光器同步等问题导致其推广应用受到限制。与上述几种方法相比,OSM不仅采用传统数字调制星座(即数字域)传递信息,而且通过激光器索引号(即空间域)额外携带信息。因此,激光器不仅是形成无线链路的媒介,而且承载着信息比特本身。

早期的OSM起源于室内可见光通信^[5]。与开关键控(On-Off Keying, OOK)和脉冲位置调制(Pulse Position Modulation, PPM)相比,OSM的提出将频谱效率分别提高了2倍和4倍^[6]。与脉冲幅度调制(Pulse Amplitude Modulation, PAM)相比,二者具有相同的频谱效率,但OSM能提供更高的能量效率。学者们围绕如何设计高效的OSM方案展开了广泛的研究^[7-14]。文献[7-10]分别采用PAM和PPM调制构建了不同的OSM方案。其中,文献[7-8]采用PAM调制提出了不同的OSM,实现了频谱效率的提高,但却带来了能量损失。文献[9-10]利用PPM调制构

建了OSM方案,获得了较高的能量效率和较好的误码性能,但其频谱效率较低。随后,研究人员围绕室外大气激光通信中的OSM展开了研究^[11-12]。其中,文献[11]将OSM和脉冲位置幅度调制(Pulse Position Amplitude Modulation, PPAM)相结合,构建了一种适合于大气激光通信的空间调制方案,实现了频谱效率和能量效率间的折中。文献[12]分析了几何扩散对OSM系统性能的影响,并推导了OSM在Gamma-Gamma信道中的误码率。

但在上述研究中^[5-12],每次传输仅激活一个激光器,虽然这有效地消除了信道间干扰和发送激光器同步的问题,但这要求激光器数必须为2的整数次幂,从而大大限制了空间资源的利用率。文献[13]采用PAM调制,通过同时激活少量的激光器构建了一种室内的光广义空间调制(Optical Generalized Spatial Modulation, OGSM)。该方案不仅解决了激光器数必须为2的整数次幂的不足,而且大大提高了系统的频谱效率和传输速率。文献[14]利用PPM调制构建了一种OGSM方案,有效地增加了系统的能量效率。上述两种OGSM在频谱效率和传输速率上虽然有很大的提升,但其误码性能还不够理想,并且相关研究仅分析了它们在室内可见光通信中的性能。鉴于此,本文通过同时激活两个激光器分别发送PPM和PAM调制符号,提出一种适合于大气激光通信的双空间调制(Double Spatial Modulation, DSM)方案,该方案有效提高了误码性能,有望进一步提高大气激光通信的传输速率。

2 DSM 系统模型

假设系统中有 N_t 个激光器, N_r 个探测器,采用M-PPM和L-PAM调制构建的DSM系统模型如图1所示。在DSM方案中,假设每次激活少量的激光器,即每次激活的激光器数为2,所以从 N_t 个激光器中激活2个的组合数有 $\binom{N_t}{2}$ 种。由于所使用的激光器组合数必须为2的

整数次幂,所以只需从 $\binom{N_t}{2}$ 种组合中选取其中的

$G=2^{\lfloor \log_2 \binom{N_t}{2} \rfloor}$ 种即可,其中, $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示向下取整运算。

图 1 中,假设每次传输的信息比特为 \mathbf{b} ,它经串并转换后分为 $\mathbf{b}_1, \mathbf{b}_2$ 和 \mathbf{b}_3 三部分。其中, \mathbf{b}_1 被映射为系统中激活激光器序号的组合 (l_1, l_2) ,其长度为 $\lfloor \log_2 \binom{N_t}{2} \rfloor$ 比特。 \mathbf{b}_2 被映射为传统 M-PPM 调制星座图中的某个调制符号,其长度为

$\log_2 M$ 比特。 \mathbf{b}_3 被映射为传统 L-PAM 调制星座图中的某个调制符号,其长度为 $\log_2 L$ 比特。因此, DSM 系统每次传输的比特数为 $m = \lfloor \log_2 \binom{N_t}{2} \rfloor + \log_2 M + \log_2 L$ 。当 $N_t = 4, M = 4, L = 2$ 时,每次可传输 5 比特的信息。假设传输的二进制信息比特为 $\mathbf{b} = [1\ 0\ 0\ 1\ 1]$,经双空间调制后, $\mathbf{b}_1 = [1\ 0]$ 被映射为激活激光器序号组合 (1,4), $\mathbf{b}_2 = [0\ 1]$ 被映射为传统 4-PPM 调制的调制符号, $\mathbf{b}_3 = [1]$ 被映射为传统 2-PAM 调制的调制符号。

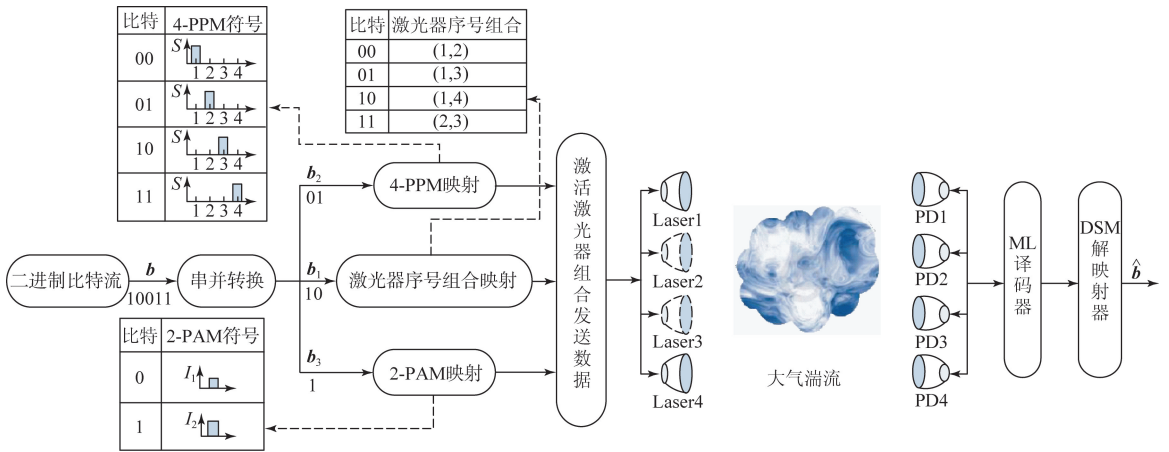


图 1 双空间调制系统模型

Fig. 1 Model of double spatial modulation system

在 DSM 映射中,假设 \mathbf{b}_1 被映射为系统中激活激光器序号组合 (l_1, l_2) ,其映射关系可用两个 $N_t \times 1$ 维向量来表示,即 $\mathbf{x}_{l_1} = [0 \cdots \underset{l_1}{1} \cdots 0]^T, \mathbf{x}_{l_2} = [0 \cdots \underset{l_2}{1} \cdots 0]^T$ 。其中,非零元素的位置表示激活激光器序号, $[\cdot]^T$ 表示转置运算。依据传统 M-PPM 调制的特点, \mathbf{b}_2 的映射关系可以表示为一个 $1 \times M$ 维的向量 $\mathbf{x}_{PPM} = [0 \cdots \underset{e}{S} \cdots 0]$, $1 \leq e \leq M$ 。其中, S 表示发送 M-PPM 调制符号的平均光强。那么,激活激光器 l_1 上发送的信号可表示为 $\mathbf{x}_{l_1} \mathbf{x}_{PPM}$ 。同理,依据传统 L-PAM 调制的特点, \mathbf{b}_3 的映射关系可以表示为 $\mathbf{x}_{PAM} = I_l = \frac{2I_0}{(L+1)} l$, $1 \leq l \leq L$ 。其中, I_0 代表发送 L-PAM 调制符号的平均光强。那么激活激光器 l_2 上发送的信号可

表示为 $\mathbf{x}_{l_2} \mathbf{x}_{PAM}$ 。因此, DSM 系统的发送信号为:

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}_{l_1} \mathbf{x}_{PPM} + \mathbf{x}_{l_2} \mathbf{x}_{PAM}, \mathbf{x} \in \mathbb{C}_{N_t \times M}. \quad (1)$$

发送端发送的信号经湍流信道后由光探测器接收。设光探测器接收到的信号为:

$$\mathbf{Y} = \eta \mathbf{H} \mathbf{x} + \mathbf{n}, \mathbf{Y} \in \mathbb{C}_{N_r \times M}, \quad (2)$$

其中: $\mathbf{n} \in \mathbb{C}_{N_r \times M}$ 是均值为零、方差为 σ_n^2 的加性高斯白噪声, η 是光电转换效率, \mathbf{H} 是 $N_r \times N_t$ 维信道衰落矩阵。对于弱到中等的大气湍流而言,信道衰落系数 h 服从对数正态分布,其概率密度函数^[15]为:

$$f_H(h) = \frac{1}{h\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\log_2 h - \mu)^2}{2\sigma^2}\right). \quad (3)$$

如果对衰落强度进行归一化处理,即 $E[h] = 1$,则均值 $\mu = -\ln(1 + \sigma_{S1}^2)$,方差 $\sigma^2 = \ln(1 + \sigma_{S1}^2)$ 。其中, $\sigma_{S1}^2 \in [0.4 \sim 1.0]$ ^[16] 表示信道衰落变化的闪烁指数。

在接收端,从受到衰落和噪声干扰的输出信号中估计出原始发射符号是信号检测的关键。假设接收端已知信道状态信息,即在 \mathbf{H} 已知的情况下,这里采用最大似然(Maximum Likelihood, ML)译码算法进行信号检测。ML 通过穷尽搜索的方式来检测出激活激光器的序号和调制符号,能够使系统获得最优的误码性能,其准则为:

$$(\hat{x}, \hat{l}) = \underset{x, l}{\operatorname{argmin}} \|\mathbf{Y} - \eta \mathbf{H} \mathbf{x}\|_{\mathbb{F}}^2, \quad (4)$$

其中: $\|\cdot\|_{\mathbb{F}}$ 表示 F -范数, \hat{l} 和 \hat{x} 分别代表检测到激活激光器的序号和发送的调制符号。将式(4)的输出结果经 DSM 解映射后恢复出原始比特 $\hat{\mathbf{b}}$ 。

3 误码率分析

在 DSM 星座空间中,星座点间的距离越小,其错误检测的几率就越高,系统的误码性能就越差,即传输信号星座点间的欧氏距离是系统错误概率的决定性因素。由于 DSM 星座空间中的星座点是随着输入比特的不同而随机产生,所以可以通过联合界^[17]技术获得 DSM 误码率的理论 upper 界。

假设 DSM 的传输速率为 m ,每次发射端从 2^m 个可能的发射信号 $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_{2^m}$ 中选取一个信号进行发送。通过联合界技术可以获得采用 ML 检测算法时 DSM 系统误码率的理论 upper 界为^[17]:

$$BER \leq$$

$$\frac{1}{2^m \times m} \sum_{i=1}^{2^m} \sum_{j=1, j \neq i}^{2^m} d_H(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) P(\mathbf{x}_i \rightarrow \mathbf{x}_j | \mathbf{H}), \quad (5)$$

其中: $d_H(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j)$ 表示 \mathbf{x}_i 和 \mathbf{x}_j 之间的汉明距离,即将信号 \mathbf{x}_i 错误判决为 \mathbf{x}_j 时产生的错误比特数。 $P(\mathbf{x}_i \rightarrow \mathbf{x}_j | \mathbf{H})$ 表示接收端已知信道矩阵 \mathbf{H} 时,发送符号 \mathbf{x}_i 被误检测为符号 \mathbf{x}_j 的成对错误概率,可表示为:

$$P(\mathbf{x}_i \rightarrow \mathbf{x}_j | \mathbf{H}) = P(\|\mathbf{Y} - \eta \mathbf{H} \mathbf{x}_i\|^2 > \|\mathbf{Y} - \eta \mathbf{H} \mathbf{x}_j\|^2) = P\left(\frac{2}{\eta} \mathbf{Y}^T \mathbf{H}(\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i) > \|\mathbf{H} \mathbf{x}_j\|^2 - \|\mathbf{H} \mathbf{x}_i\|^2\right). \quad (6)$$

依据信道模型(2),式(6)可表示为:

$$P(\mathbf{x}_i \rightarrow \mathbf{x}_j | \mathbf{H}) = P\left(\frac{2}{\eta} (\eta \mathbf{H} \mathbf{x}_i + \mathbf{n})^T \mathbf{H}(\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i) > \|\mathbf{H} \mathbf{x}_j\|^2 - \|\mathbf{H} \mathbf{x}_i\|^2\right) = P\left(\frac{2}{\eta} \mathbf{n}^T \mathbf{H}(\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i) > \|\mathbf{H}(\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i)\|^2\right) = P(D > \|\mathbf{H}(\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i)\|^2), \quad (7)$$

其中 $D \triangleq \frac{2}{\eta} \mathbf{n}^T \mathbf{H}(\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i)$ 。由于 $\mathbf{H}, \mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j$ 均是固定矩阵,而 \mathbf{n} 是一个由均值为零、方差为 σ_n^2 的高斯变量组成的矩阵,所以 D 是服从均值 $E(D) = 0$ 、方差 $\operatorname{Var}(D) = \frac{4\sigma_n^2}{\eta^2} \|\mathbf{H}(\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i)\|^2$ 的高斯随机变量。因此,式(6)能够写为^[18]:

$$P(\mathbf{x}_i \rightarrow \mathbf{x}_j | \mathbf{H}) = Q\left(\frac{\|\mathbf{H}(\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i)\|^2 - E(D)}{\sqrt{\operatorname{Var}(D)}}\right) = Q\left(\frac{\eta}{2\sigma_n} \|\mathbf{H}(\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i)\|\right), \quad (8)$$

其中 $Q(x) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(x/\sqrt{2})$ 。将它带入式(8)可得:

$$P(\mathbf{x}_i \rightarrow \mathbf{x}_j | \mathbf{H}) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{\eta^2}{8\sigma_n^2} \|\mathbf{H}(\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i)\|^2}\right). \quad (9)$$

将式(9)代入式(5)可得 DSM 的误码率 upper 界为:

$$BER \leq \frac{1}{2^{m+1} \times m} \sum_{i=1}^{2^m} \sum_{j=1, j \neq i}^{2^m} d_H(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) \cdot \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{\eta^2}{8\sigma_n^2} \|\mathbf{H}(\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i)\|^2}\right). \quad (10)$$

由式(10)可得,DSM 的 BER 不仅与汉明距离 d_H 有关,而且与信道状态信息和传输速率有关。

4 仿真分析及结果

为了验证该方案的正确性,本文利用蒙特卡洛仿真方法比较了不同 DSM 系统的误码性能,并将 DSM 和理论界、以及现有的空间脉冲位置调制(SPPM)、空间脉冲幅度调制(SPAM)、空间脉冲位置幅度调制(SPPAM)、广义空间脉冲位置调制(GSPPM)和广义空间脉冲幅度调制(GSPAM)等方案进行对比,结果如图 2~图 6 及

表1所示。仿真条件如下:假设接收端已知信道状态信息,系统总功率不变,闪烁指数 $\sigma_{s1}^2=0.6$,光电转换效率 $\eta=0.5$,接收端采用ML检测,而且GSPPM和GSPAM方案都只激活两个激光器。为了方便区分,采用 (N_t, N_r) -MPPM-LPAM来标注DSM系统的参数。

4.1 误码性能

图2为不同DSM系统的理论误码率和仿真误码率。其中,调制方式采用4-PPM和2-PAM。从仿真结果可以看出:随着信噪比的增加,DSM系统的误码率逐渐减小;当信噪比较低时,DSM系统的实际误码率低于理论上界;而当信噪比较大时,二者基本重合。例如,在 3×4 和 4×4 系统中,当信噪比高于23 dB时,理论分析与实际误码率曲线基本重合。增加激光器的数目可提高DSM系统的传输速率,但会带来误码性能的损失。例如,当误码率为 1×10^{-3} 时,相对于 $(3,4)$ -4PPM-2PAM DSM而言, $(4,4)$ -4PPM-2PAM DSM所需信噪比损失了2 dB,但其传输速率增加了1 bpcu。随着探测器数目的增加,DSM系统的误码性能逐渐变好,这说明系统获得了较好的接收分集增益。

传输速率相同时,随着PAM调制阶数的增加,DSM系统的频谱效率逐渐增大,但系统的误码性能会恶化。例如, $(3,4)$ -2PPM-8PAM DSM和 $(4,4)$ -2PPM-4PAM DSM的频谱效率明显优于其他DSM方案,但它们的误码性能却较差。增加激光器数目和PAM调制的阶数几乎具有相同的作用。例如, $(3,4)$ -2PPM-8PAM DSM和 $(4,4)$ -2PPM-4PAM DSM系统、 $(3,4)$ -4PPM-4PAM DSM和 $(4,4)$ -4PPM-2PAM DSM系统,不仅具有相同的频谱效率,而且当信噪比较小时,其误码率几乎相等。

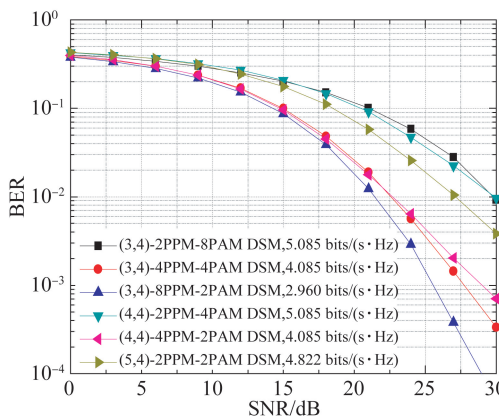


图3 传输速率为5 bpcu时不同参数下DSM的误码率
Fig. 3 BERs of DSM under different parameters at 5 bpcu

图4为DSM和传统OSM方案的误码率,其中, $N_r=4$,传输速率为5 bpcu,DSM选取图3中误码率最大和最小的系统。从仿真结果可以看出: $(3,4)$ -8PPM-2PAM DSM系统的误码性能明显优于 $(4,4)$ -4PPM-2PAM SPPAM和 $(4,4)$ -8PAM SPAM的性能。当误码率为 1×10^{-3} 时,前者相对于后两者其信噪比分别改善了约5 dB和11 dB。相对于 $(4,4)$ -8PPM SPPM系统而言,仅当信噪比低于22 dB时, $(3,4)$ -8PPM-2PAM DSM系统的误码率略高于前者,但其频谱效率却增加了2.335 bits/(s·Hz)。 $(4,4)$ -2PPM-4PAM DSM系统的误码性能优于 $(4,4)$ -8PAM SPAM系统,而劣于 $(4,4)$ -8PPM SPPM和 $(4,4)$ -4PPM-2PAM SPPAM系统,但其频谱效率却最高。这就说明合理地设计DSM系统,不仅可以获得较高的频谱效率和传输速率,而且其误码性能也可得到较好的改善。

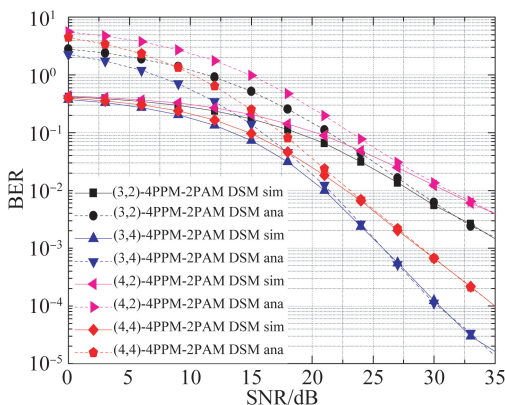


图2 不同DSM系统的理论误码率和仿真误码率
Fig. 2 Analytical and simulated BERs of different DSM systems

图3为不同参数下DSM方案的误码率,其中, $N_r=4$,传输速率为5 bpcu。从仿真结果可以看出:当传输速率相同时,随着PPM调制阶数的增加,DSM方案的误码率逐渐减小,但会带来频谱效率的损失。例如, $(3,4)$ -8PPM-2PAM DSM系统的误码性能最优,但其频谱效率却最低。当

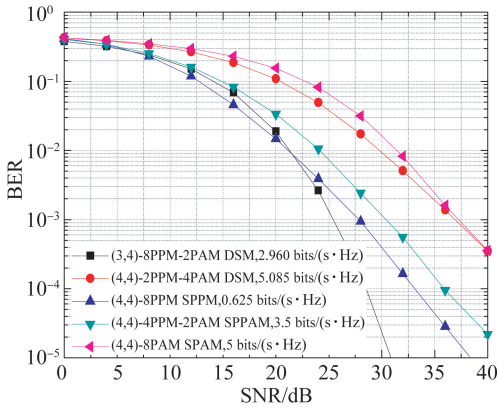


图 4 传输速率为 5 bpcu 时 DSM 和传统 OSM 方案的误码率
Fig. 4 BERs of DSM and traditional OSM schemes at 5 bpcu

图 5 为 DSM 和 OGSM 的误码率曲线,其中, $N_r=4$, 传输速率为 5 bpcu, DSM 选取图 3 中误码率最大和最小的系统。从仿真结果可以看出: (3,4)-8PPM-2PAM DSM 系统的误码性能明显优于 (3,4)-4PPM GSPPM 和 (3,4)-4PAM GSPAM 系统的性能。当误码率为 1×10^{-3} 时,前者相对于后两者其信噪比分别改善了约 6 dB 和 11 dB。(4,4)-2PPM-4PAM DSM 系统的误码性能优于 (3,4)-4PAM GSPAM 系统,而劣于 (3,4)-4PPM GSPPM 系统,但其频谱效率相比于 (3,4)-4PPM GSPPM 系统提高了 2.5 bits/(s·Hz)。所以在综合考虑误码性能、传输速率和频谱效率

的情况下,DSM 方案相比于 OGSM 方案更加适合于大气激光通信。

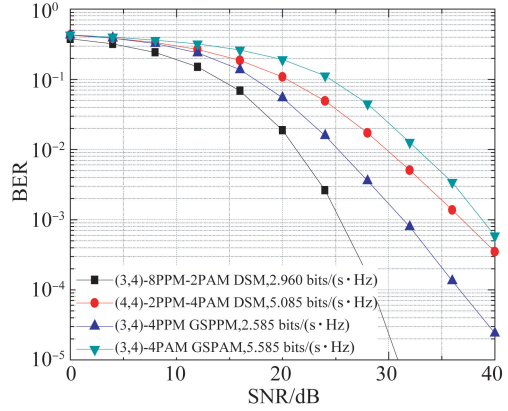


图 5 传输速率为 5 bpcu 时 DSM 和 OGSM 的误码率
Fig. 5 BERs of DSM and OGSM schemes at 5 bpcu

4.2 频谱效率、传输速率及复杂度分析

为了较为全面地评价 DSM 方案的性能,比较了 DSM 和其他几种 OSM 方案的频谱效率、传输速率以及复杂度变化情况,其结果如表 1 和图 6 所示。从表 1 可以看出:DSM 系统的频谱效率、传输速率以及复杂度均与激光器数和调制阶数有关,随着激光器数和调制阶数的增加,DSM 系统的频谱效率、传输速率以及复杂度都会不断增加。

表 1 不同 OSM 方案的频谱效率、传输速率和复杂度比较

Tab. 1 Comparison of spectral efficiency, transmission rate and complexity of different OSM schemes

OSM 方案	频谱效率/(bits · s ⁻¹ · Hz ⁻¹)	传输速率/bpcu	ML 译码复杂度
SPPM	$\frac{1}{M} \log_2 N_t M$	$\lfloor \log_2 N_t \rfloor + \log_2 M$	$2^m (2N_t M N_r + 2N_r M - 1)$
SPAM	$\log_2 N_t L$	$\lfloor \log_2 N_t \rfloor + \log_2 L$	$2^m (2N_t N_r + 2N_r - 1)$
SPPAM	$\frac{1}{M} \log_2 N_t M L$	$\lfloor \log_2 N_t \rfloor + \log_2 M + \log_2 L$	$2^m (2N_t M N_r + 2N_r M - 1)$
GSPPM	$\log_2 \binom{N_t}{2} + \frac{2}{M} \log_2 M$	$\left\lfloor \log_2 \binom{N_t}{2} \right\rfloor + 2 \log_2 M$	$2^m (2N_t M N_r + 2N_r M + N_t M - 1)$
GSPAM	$\log_2 \binom{N_t}{2} + 2 \log_2 L$	$\left\lfloor \log_2 \binom{N_t}{2} \right\rfloor + 2 \log_2 L$	$2^m (2N_t N_r + 2N_r + N_t - 1)$
DSM	$\log_2 \binom{N_t}{2} + \log_2 L + \frac{1}{M} \log_2 M$	$\left\lfloor \log_2 \binom{N_t}{2} \right\rfloor + \log_2 M + \log_2 L$	$2^m (2N_t M N_r + 2N_r M + N_t M - 1)$

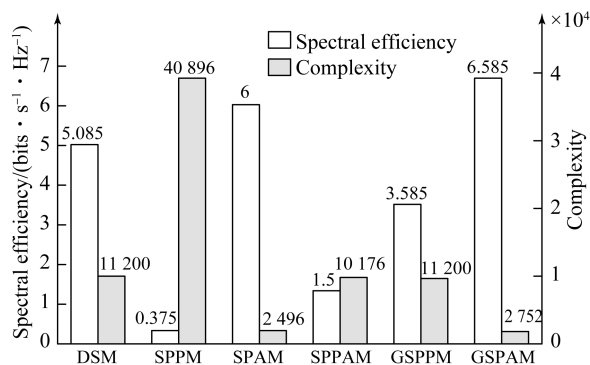


图6 传输速率为6 bpcu时不同OSM方案的频谱效率和复杂度

Fig. 6 Spectral efficiency and complexity of different OSM schemes at 6 bpcu

图6为不同OSM方案的频谱效率和复杂度。其中,传输速率为6 bpcu, $N_t=4$, $N_r=4$ 。从图中可以看出:GSPAM方案的频谱效率最高,SPPM方案的频谱效率最低。DSM方案的频谱效率明显比SPPM,SPPAM和GSPPM方案提高了4.71,3.585和1.5 bits/(s · Hz),而比GSPAM方案和SPAM方案降低了1.5和0.915 bits/(s · Hz)。DSM方案的频谱效率虽然略低于GSPAM和SPAM方案,但它提供了更好的误码性能。SPPM方案的复杂度最高,SPAM方案的复杂度最低。DSM方案的复杂度仅低于SPPM方案,且相对于SPPM方案

降低了72.61%,相对于SPPAM方案仅增加了9.14%。虽然DSM方案的复杂度略有增加,但它却提供了更高的频谱效率和较好的误码性能,而且所增加的复杂度对现在的高速信号处理技术而言是可以接受的。因此,DSM更适合于高速率、大容量的大气激光通信。

5 结论

针对大气激光通信对大容量、高速率的迫切需求,本文利用PPM和PAM两种调制方式,通过每次同时激活两个激光器提出了一种DSM方案,并与现有的OSM方案进行了对比。仿真结果表明:DSM方案不仅提升了系统的频谱效率和传输速率,并以少许的复杂度增加为代价,有效地改善了系统的误码性能。在相同的传输速率下,当误码率为 1×10^{-3} 时,相对于(4,4)-8PPM SPPM和(3,4)-4PPM GSPPM的方案而言,(3,4)-8PPM-2PAM DSM的信噪比分别改善了约2.5 dB和6 dB,其频谱效率分别提高了2.335 bits/(s · Hz)和0.375 bits/(s · Hz)。因此,DSM作为一种新型的光空间调制方案,它充分利用空间资源实现了系统频谱效率的提升,从而大大提高了系统的数据传输速率,为未来大气激光通信传输速率的提高提供了一种有效手段。

参考文献:

[1] 王惠琴,王雪,曹明华. 相关信道中光多输入多输出系统的误码率[J]. 光学精密工程, 2016, 24(9):2142-2148.
WANG H Q, WANG X, CAO M H. Bit error rate of optical multiple input multiple output system in correlated channels [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(9):2142-2148. (in Chinese)

[2] REN Y X, HUANG H, XIE G D, et al.. Atmospheric turbulence effects on the performance of a free space optical link employing orbital angular momentum multiplexing [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(20):4062-4065.

[3] 金光,李艳杰,钟兴,等. 空间成像与激光通信共口径光学系统设计[J]. 光学精密工程, 2014, 22(8):2067-2074.
JIN G, LI Y J, ZHONG X, et al.. Design of co-aperture optce system for space imaging and laser

communication [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(8): 2067-2074. (in Chinese)

[4] 王惠琴,宋梨花,曹明华,等. 湍流信道下光空间调制信号的压缩感知检测[J]. 光学精密工程, 2018, 26(11):2669-2674.
WANG H Q, SONG L H, CAO M H, et al.. Compressed sensing detection of optical spatial modulation signal in turbulent channel [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(11): 2669-2674. (in Chinese)

[5] MESLEH R, MEHMOOD R, ELGALA H, et al.. Indoor MIMO optical wireless communication using spatial modulation [C]. *Proceedings of IEEE International Conference on Communications*. IEEE, 2010: 1-5.

[6] MESLEH R, ELGALA H, HAAS H. Optical spatial modulation [J]. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 2011, 3(3):234-244.

[7] FATH T, KLAUE J, HAAS H. Coded spatial modulation applied to optical wireless communica-

- tions in indoor environments [C]. *Wireless Communications and Networking Conference*. IEEE, 2012:1000-1004.
- [8] FATH T, HAAS H, RENZO M D, *et al.*. Spatial modulation applied to optical wireless communications in indoor LOS environments [C]. *Proceedings of the Global Communications Conference*. IEEE, 2011:1-5.
- [9] POPOOLA W O, POVES E, HAAS H. Spatial pulse position modulation for optical communications [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(18):2948-2954.
- [10] PHAM H T T, CHU D B, DANG N T. Performance analysis of spatial PPM-based free-space optical communication systems with gaussian beam [C]. *International Conference on Advanced Technologies for Communications*. IEEE, 2014:144-148.
- [11] ÖZBILGIN T, KOCA M. Optical spatial modulation over atmospheric turbulence channels [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(11):2313-2323.
- [12] PHAM H T T, DANG N T. Performance improvement of spatial modulation-assisted FSO systems over Gamma-Gamma fading channels with geometric spreading [J]. *Photonic Network Communications*, 2017, 34(2):213-220.
- [13] ALAKA S P, NARASIMHAN T L, CHOCKALINGAM A. Generalized spatial modulation in indoor wireless visible light communication [C]. *Globecom IEEE Global Communications Conference*, 2015:1-8.
- [14] OLANREWaju H G, THOMPSON J, POPOOLA W O. Generalized spatial pulse position modulation for optical wireless communications [C]. *Vehicular Technology Conference*. IEEE, 2017:1-5.
- [15] NISTAZAKIS H, TSIFTSIS T A, TOMBRAS G S. Performance analysis of free-space optical communication systems over atmospheric turbulence channels [J]. *Iet Communications*, 2009, 3(8):1402-1409.
- [16] WILSON S G, Maïté B P, CAO Q, *et al.*. Free-space optical MIMO transmission with Q-ary PPM [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2005, 53(8):1402-1412.
- [17] PROAKIS J G. *Digital Communications* [M]. 4th ed. New York: McGraw-Hill, 2001.
- [18] FATH T, HAAS H. Performance comparison of MIMO techniques for optical wireless communications in indoor environments [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2013, 61(2):733-742.

作者简介:



王惠琴(1971—),女,甘肃渭源人,教授,博士生导师,2011年于西安理工大学获得博士学位,主要从事无线光通信理论与技术的研究。E-mail: 15117024169@139.com



杨顺信(1993—),男,甘肃庆阳人,硕士研究生,主要从事大气激光通信空间调制技术的研究。E-mail: 18809496894@139.com