



DOI: 10.12086/oe.2020.190712

光空间调制技术的研究进展

毛一聪, 王惠琴*, 张悦, 曹明华

兰州理工大学计算机与通信学院, 甘肃 兰州 730050

摘要: 光空间调制(OSM)作为一种新型的光多输入多输出(OMIMO)技术, 利用空间域激光器索引号额外携带信息, 有效地提高了系统的传输速率和能量效率;同时,由于每符号周期仅激活一个激光器传递信息,较好地解决了传统 OMIMO 系统中的信道干扰和同步等问题。本文首先介绍了现有的几种光空间调制技术, 概括和总结其在国内外的研究现状。此外,从传输速率、频谱效率、误码率(BER)和计算复杂度等四个方面对现有的 OSM、光空移键控(OSSK)、增强型光空间调制(EOSM)和差分光空间调制(DOSM)等方案进行了比较分析。最后,指出了 OSM 中亟需解决的关键性问题及其未来的发展方向。

关键词: 无线光通信; 光空间调制; 传输速率; 误码率

中图分类号: TN929.12

文献标志码: A

引用格式: 毛一聪, 王惠琴, 张悦, 等. 光空间调制技术的研究进展[J]. 光电工程, 2020, 47(3): 190712

Research status and development of optical spatial modulation technology

Mao Yicong, Wang Huiqin*, Zhang Yue, Cao Minghua

School of Computer and Communication, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China

Abstract: Optical spatial modulation (OSM), a new optical multiple input multiple output (OMIMO) technique, effectively improves the transmission rate and energy efficiency by using the spatial domain laser index to carry additional information. Meantime, since only one laser is activated per symbol duration to transmit information, the problems of channel interference and synchronization are solved in traditional OMIMO system. This paper firstly introduces several OSM technologies and summarizes their research status both at home and abroad. Next, the OSM, optical space shift keying (OSSK), enhanced optical spatial modulation (EOSM) and differential optical spatial modulation (DOSM) schemes are compared and analyzed in terms of transmission rate, spectral efficiency, bit error rate (BER) and complexity. Finally, the key problems and future development direction are pointed out in OSM system.

Keywords: wireless optical communication; optical spatial modulation; transmission rate; bit error rate

Citation: Mao Y C, Wang H Q, Zhang Y, *et al.* Research status and development of optical spatial modulation technology[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020, 47(3): 190712

1 引言

随着终端用户数和数据业务量的指数增长, 不仅骨干网面临严峻的挑战, 而且对接入网技术也提出了

收稿日期: 2019-11-27; 收到修改稿日期: 2020-02-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61861026, 61875080)

作者简介: 毛一聪(1995-), 男, 硕士研究生, 主要从事无线光通信 MIMO 技术方面的研究。E-mail: maoyc0113@sina.com

通信作者: 王惠琴(1971-), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事无线光通信 MIMO 技术方面的研究。E-mail: whq1222@lut.cn

版权所有©2020 中国科学院光电技术研究所

新的要求。相较于射频技术,无线光通信(wireless optical communication, WOC)具有带宽不受限,安全性和灵活易架构的优势,作为一种全新的接入网技术引起了业界的广泛关注^[1]。但是,大气湍流和复杂多变的信道环境所引起的信号衰落是影响 WOC 系统性能的主要因素。为了克服 WOC 系统中衰落对链路性能的影响,光多输入多输出(optical multiple input multiple output, OMIMO)技术应运而生^[2-3]。OMIMO 技术充分利用空间分集在收发两端通过多个光学天线同时收发多个并行的独立数据子流,在不增加频谱资源和发射功率的前提下有效地提高系统的信道容量和抗衰落能力^[4]。但因同时激活多个激光器而存在成本上升、信道间干扰(inter-channel interference, ICI)和信道间同步(inter antenna synchronization, IAS)困难等问题,这将严重影响 OMIMO 技术在实际通信中的推广应用^[5]。

近年来,OMIMO 技术不断地与各种新技术相结合,使得系统在获得 OMIMO 信道所能达到的自由度的同时,较好地取得了误码率(bit error rate, BER)、计算复杂度以及传输速率之间的平衡,从而实现系统性能的最优^[6]。光空间调制(optical spatial modulation, OSM)作为一种新型的 OMIMO 技术,它不仅利用传统的调制符号传输信息,而且还将一部分信息隐含于激光器索引号中,使激光器索引号成为一种额外数据信息的携带方式^[7]。这将大大提高了系统的传输速率和频谱效率。另外,在 OSM 中,由于每个符号周期只有一个激光器工作,降低了检测复杂度和链路成本,同时又克服了传输过程中的 ICI 和 IAS 等问题^[9]。因此,OSM 为提升通信系统的传输速率和频谱效率,建设大容量、高可靠性、低功率的通信系统提供了一种有效手段。目前,已有文献明确指出空间调制是未来大规模 MIMO 技术发展的方向^[10-11]。

基于上述优点,OSM 是一个发展前景十分广阔,且可应用到多种场合的 OMIMO 技术^[12]。同时,随着 5G 的快速发展以及大规模 MIMO 技术的深入研究,空间调制以其自身特有的优势有望成为 5G 物理层的核心技术之一。为满足不同的需求,目前已经出现了光空移键控(optical space shift keying, OSSK)、增强型光空间调制(enhanced optical spatial modulation, EOSM)和差分光空间调制(differential optical spatial modulation, DOSM)等改进的光空间调制技术。其中, OSSK 是 OSM 一种简化形式,仅仅利用激活激光器的

索引号传输信息,其特点是结构简单,计算复杂度低。增强型光空间调制通过每次激活少量激光器传输信息,进一步提高了系统的传输速率并打破了激光器数目必须为 2 的整数次幂的限制。上述的 OSM 方案都是假设在收发两端可以获得精确的信道状态信息,然而复杂多变的大气信道使得信道估计变得困难。差分光空间技术的提出有效避免信道估计的需要,在高速移动的场景下获得较好的性能。因此,本文针对 WOC 领域中已有的 OSM 方案的原理和发展现状进行介绍,并分析比较了不同方案在 BER、传输速率和计算复杂度等性能方面的特点。同时,指出了光空间调制研究中需要解决的关键问题,为未来高速率、大容量的大规模 OMIMO 通信研究奠定了理论基础。

2 几种光空间调制

光空间调制又被视为一种多维调制技术,和传统的数字调制技术相比,光空间调制引入第三维度,即空间维度。它将激光器的索引号作为新的映射资源,通过建立不同输入比特与激光器索引号间的映射关系,达到空间调制的目的^[8]。空间调制的思想在射频领域中得到了快速发展,并取得了一系列较丰富的研究成果^[6-12]。近年来,随着研究者对 WOC 领域的广泛关注以及微电子技术和 LED 照明技术的发展,英国爱丁堡大学的 Mesleh 和 Haas 教授首次将空间调制的概念引入可见光通信(visible light communication, VLC),目的是解决传统 OMIMO 中存在的信道间同步和相关性问题^[13-15]。后来,空间调制在 WOC 领域得到了初步发展,并取得了一定的研究成果^[16-31]。目前常见的光空间调制主要包括 OSM、OSSK、EOSM 和 DOSM 等。下面将分别介绍各方案的原理及研究现状。

2.1 光空间调制

OSM 在每一符号周期内仅有一个激光器被激活。此时,不仅采用传统的调制符号传递信息,而且还利用激活激光器的索引号额外携带信息。对于一个有 N_t 个激光器, N_r 个光电探测器的 OSM 系统而言,其系统模型如图 1 所示。

在图 1 中,假设每次传输的信息比特为 b ,经串并转换后分为 b_1 和 b_2 两部分。其中, b_1 被映射为激活激光器的索引号,它携带 $\log_2 N_t$ 个比特信息。 b_2 被映射为调制阶数为 M 的调制符号,它携带 $\log_2 M$ 个比特信息。因此,每一符号周期传输的总比特数为 $m = \log_2(MN_t)$ 。相较于传统 OMIMO 系统,OSM 在

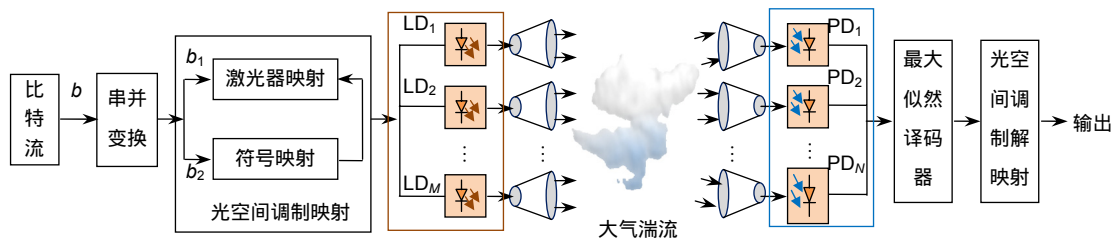


图 1 OSM 系统模型
Fig. 1 OSM system model

每符号周期上传输的总信息数增加了 $\log_2 N_t$ 个比特。依据上述映射规则，发送符号向量可以表示为

$$\mathbf{x}_i = \left[0, 0, \dots, 0, x_q, 0, \dots, 0 \right]^T$$

i -th

式中： x_i 为 $N_t \times 1$ 维的符号向量， i 是被激活的激光器索引号， $i \in [1:N_t]$ 。 x_q 为 M 进制星座符号中的第 q 个符号， $q \in [1:M]$ 。调制后的信号 x 由光学发送天线发出，经大气信道和光学接收天线后由光电探测器接收。假设接收到的信号为

$$\mathbf{y} = \eta \mathbf{H} \mathbf{x} + \mathbf{n}, \quad (1)$$

其中： η 为光电转换效率， \mathbf{n} 是均值为零、方差为 σ_n^2 的加性高斯白噪声。 \mathbf{H} 是 $N_r \times N_t$ 维的信道衰落矩阵。对于大气湍流信道而言， \mathbf{H} 中的元素通常是服从 log-normal 分布^[27]、Gamma-Gamma 分布^[28]、negative-exponential 分布^[64]或 exponential-Weibull 分布^[65]等。

如何从 \mathbf{y} 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(channel state information, CSI)，即在 \mathbf{H} 已知的情况下，可采用最大似然(maximum likelihood, ML)准则进行信号检测。其准则为

$$(\hat{i}, \hat{x}) = \arg \min_{i, x} \|\mathbf{y} - \eta \mathbf{H} \mathbf{x}\|_F^2, \quad (2)$$

其中： $\|\cdot\|_F$ 表示 F-范数， \hat{i} 和 \hat{x} 分别代表检测到激活激光器的索引号和发送的调制符号。对式(2)的判决结果进行解映射后即可恢复出原始比特。

空间调制以其独特的优势，使其在 WOC 领域中受到了广泛关注。目前，有关 OSM 在 VLC 中的研究主要是针对如何提高系统的传输速率和降低误码率而提出的各种优化方案^[16-18]。其中，文献[16]将 SM 技术与高能量效率的脉冲位置调制(pulse position modulation, PPM)相结合，提出了空间脉冲位置调制(spatial pulse position modulation, SPPM)。同时，文献[17]分析了 OSM 中的同步问题对传输性能的影响。文献[18]讨论了由多径信道引起的符号间干扰(inter-symbol

interference, ISI)对 OSM 系统性能的影响。SPPM 方案有效地提高了系统的传输速率和能量效率，但系统频谱效率的提高受限。为此，文献[19]将 SM 技术与高频谱效率的脉冲幅度调制(pulse amplitude modulation, PAM)相结合，提出了空间脉冲幅度调制(spatial pulse amplitude modulation, SPAM)，进一步提升了系统的频谱效率。针对室内相关性信道，文献[20-21]将不同的编码技术与空间调制相结合，分别提出了网格编码空间调制(TCSM)方案和分层空时编码空间调制方案，进一步提高了系统性能。

上述文献都是采用静态模型方法进行分析，在高速变化的场景并不适用。因此，文献[22]提出了适合于大规模 MIMO-VLC 的自适应空间调制，其目的在受控的 ICI 条件下，寻找最佳的激活激光器的组合形式。但在高 ICI 或高频谱效率条件下，系统性能仍然不理想。为此，文献[23]和[24]分别提出调制阶数可变和激活激光器数目可变的自适应空间调制(adaptive spatial modulation, ASM)。ASM 较好地改善了系统的误码性能，但接收端信号检测的复杂度随之增加。后来，针对 OSM 系统，文献[25]提出了自适应功率分配算法，保证移动用户获得了最佳性能，同时降低了系统复杂度。

相较于 VLC 系统，室外光通信中 OSM 技术的发展相对较晚。由于室外信道环境更加复杂多变，有关室外光通信系统中 OSM 的研究主要集中在考虑通信链路中各因素(湍流、衰减和瞄准误差)对系统性能的影响以及如何获得高传输速率和低误码率的系统方案。其中，文献[26]首次把 SPPM 方案应用到室外大气激光通信中，综合考虑几何扩展、大气湍流和瞄准误差等因素，研究了在高斯光束下 SPPM 系统的性能，此外还分析了背景噪声和热噪声对系统的影响。随后，文献[27]将 OSM 与具有更高能量效率与频谱效率的多进制脉冲位置-脉冲幅度联合调制(pulse position-amplitude modulation, PPAM)相结合，提出一种

空间脉冲位置-幅度调制 (spatial pulse position-amplitude modulation, SPPAM)方案,进一步优化了系统的性能。同时,分别推导了 log-normal 与 Gamma-Gamma 衰落信道模型下的理论误码率,为室外 OSM 的推进提供了理论依据。文献[28]针对不相关 Gamma-Gamma 衰落信道,分析了使用 SPPM 的几何扩展对 WOC 系统性能的影响。在此基础上,文献[29]利用泊松计数模型推导了 Gamma-Gamma 信道模型下 SPPM 理论误码率表达式,并构造了自适应闭环 OSM 系统。相对于开环 OSM,该系统在一定程度上提高了系统的误码性能。上述文献较好地研究了不同光空间调制方案的系统性能,但在接收端译码时均采用了 ML 译码算法。虽然 ML 性能优秀,但译码复杂度高,这就限制了它在实际中的应用。为此,文献[30]针对 SPPM 方案,结合发送信号的稀疏性,提出了一种基于压缩感知的信号检测方法,极大地降低了译码算法的复杂度。除此之外,文献[31]根据 PAM 的双极性把 OSM 空间域的激光器分成两部分,并结合线性最小均方误差(minimum mean square error, MMSE)译码方法而设计了一种低复杂度适合于 OSM 的接收机算法。

2.2 光空移键控

OSSK 作为一种特殊的光空间调制技术,仅利用激活激光器的索引号来传输信息。因此, OSSK 在有效地避免了 ICI 和 IAS 的基础之上,进一步降低了收发系统的复杂度。由于 OSSK 具有结构简单、复杂度低等优势,一经提出后便获得了学术界的广泛关注。

目前, VLC 领域中有关 OSSK 的研究,主要集中在研究光源和探测器的个数、布局和映射方式等因素对系统性能的影响^[32-33]。然而,相对于静态而稳定的室内光信道而言,大气信道具有更强的随机性和空间相关性。鉴于此, Mohamed 等^[34-35]在深入理解 OSSK

原理的基础上,将其引入到室外大气激光通信中,提出了基于 log-normal 和 negative-exponential 衰落信道下的 OSSK 系统,并给出了两种湍流信道下 OSSK 系统平均误码率(ABER)的理论上限,为室外 OSSK 的发展奠定了理论基础。随后, Anshul 等^[36-37]分别针对 Gamma-Gamma 和 negative-exponential 衰落信道,推导出了 OSSK 系统的 ABER 和平均信道容量表达式,并分析了湍流强度和发送天线数对 OSSK 系统性能的影响。

上述文献较好地研究了不同湍流信道下 OSSK 系统的性能,但未考虑 WOC 中特有的影响因素——瞄准误差对系统性能的影响。为此,文献[38-40]针对 log-normal、Gamma-Gamma 和 negative-exponential 三种衰落信道,研究了大气湍流和瞄准误差联合效应对 OSSK 系统误码率和信道容量的影响。研究结果表明,在实际通信中, OSSK 受瞄准误差影响较小,而且其系统性能明显优于 MIMO-PAM 系统。后来,文献[41]提出了一种发射端基于部分信道增益排序的空移键控系统(partially informed transmitter-based optical space shift keying, PIT-OSSK)。在该系统中,利用了已知的部分信道增益自适应地调整星座映射和功率分配,很大程度上提升了系统的误码性能。基于上述研究,虽然 OSSK 获得了一定的频谱效率和能量效率,但由于 OSSK 调制方案未充分体现出数字域调制方式的优势,导致其系统的传输速率和频谱效率的提升受限。因此,大量学者致力于寻找具有更高传输速率和更低复杂度的 OSSK 优化方案。

2.3 增强型光空间调制

虽然 OSM 和 OSSK 有效避免了传统 OMIMO 中存在的 ICI 和 IAS 问题,但由于其每个符号周期仅激活一个激光器,使空间资源利用率受限,同时也在一定程度上限制了传输速率和频谱效率的提升。鉴于此,

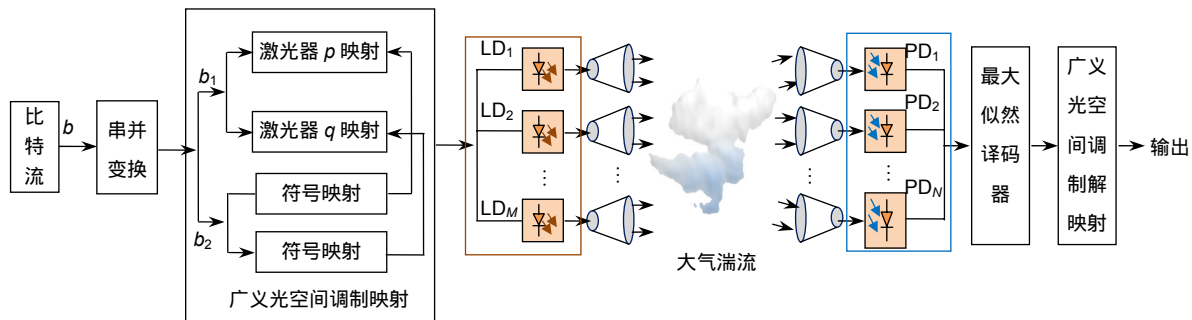


图 2 GOSM 系统模型
Fig. 2 GOSM system model

目前大量学者致力于研究集空时编码、空间复用和空间调制优点于一身的增强型光空间调制。其中,广义光空间调制(generalized optical spatial modulation, GOSM)是增强型光空间调制中重要的分支,其特点是在每一符号周期内可同时激活少量激光器,并通过在激活的激光器上加载相同或不同的调制符号来进一步提升系统的传输速率、频谱效率和空间资源利用率。GOSM 的系统模型如图 2 所示。

在图 2 中,对于一个有 N_t 个激光器, N_r 个光电探测器的 GOSM 系统,假设每次传输的信息比特为 b ,经串并转换后分为 b_1 和 b_2 两部分。其中, b_1 被映射为激活激光器的索引号。若每次激活 N_μ 个激光器,则 b_1 包含 $\lfloor \log_2 C_{N_t}^{N_\mu} \rfloor$ 个比特信息。 b_2 被映射为调制阶数是 M 的调制符号。若在激活的激光器上加载不同的调制信息,且采用相同的调制阶数时,则 b_2 包含 $N_\mu \log_2 M$ 个比特信息。因此,每一符号周期传输的总比特数为 $m = \lfloor \log_2 C_{N_t}^{N_\mu} \rfloor + N_\mu \log_2 M$ 。值得注意的是,在激活的激光器上也可加载相同的调制信息,则 b_2 包含 $\log_2 M$ 个比特信息。此时,每符号周期传输的总比特数为 $m = \lfloor \log_2 C_{N_t}^{N_\mu} \rfloor + \log_2 M$ 。依据上述映射规则,发送符号向量可以表示为

$$\mathbf{x}_i = \left[0, \underset{i\text{-th}}{x_p}, 0, \dots, 0, \underset{j\text{-th}}{x_q}, 0, \dots, 0 \right]^T$$

式中: \mathbf{x}_i 为发送符号向量; i, j 分别是激活激光器的索引号, $i, j \in [1: N_t]$; x_p, x_q 分别为 M 进制星座符号中的第 p, q 个符号, $p, q \in [1: M]$ 。与 OSM 相类似,调制后的信号经光学天线、大气信道、探测器和解映射后,即可输出原始比特。

广义光空间调制利用激光器的组合来传递信息。目前,在 VLC 领域中已取得了一定的研究成果^[42-60]。其中,广义光空移键控(generalized optical space shift keying, GOSSK)作为 GOSM 的一种简化形式^[42],得到了广泛的应用。文献[43]采用自适应控制法提出了一种自适应的 GOSSK 方法。文献[44-45]分别分析了非相关和相关信道下 GOSSK 调制的误码率。在此基础上,针对相关信道,文献[46-47]以成对错误概率为依据,研究了广义空分键控系统的性能,并提出了一种基于最大化最小欧氏距离准则的天线组选择算法。后来,文献[48]明确指出了 GOSSK 技术在室内可见光通信中的应用价值。同年,文献[49]采用欧氏距离最小化的方式提出了一种预编码的改进方案,进一步改善了 GOSSK 调制系统的误码性能。文献[50]采用 OOK

方式设计并实现了一个 GOSSK 的系统,成功地验证了 GSSK 技术在光通信领域的应用价值。

虽然 GOSSK 获得了一定的频谱效率和能量效率,但因传统调制方式未携带信息而导致系统的传输速率受限。为此,文献[51]通过同时激活少量激光器,并在激活的激光器上加载相同的 PPM 调制符号,构建了一种广义空间脉冲位置调制(generalized spatial pulse position modulation, GSPPM)系统。文献[52]通过同时激活两个或多个激光器,并在激活的激光器上分别加载不同的 PAM 调制符号,从而构建了广义空间脉冲幅度调制(generalized spatial pulse amplitude modulation, GSPAM)系统。GSPPM 和 GSPAM 方案^[51-52]与 SPPM 和 SPAM 方案相比,有效地提高了系统的传输速率和频谱效率,同时解决了 OSM 和 OSSK 中激光器数目必须为 2 的整数次幂的限制。基于 GOSM 的优势,文献[53]利用信道状态信息,基于接收信号最小欧氏距离最大化准则,提出了一种自适应广义空间调制方案,该方法有效地提高了系统性能。文献[54]比较分析了 OSSK、GOSSK、OSM、GOSM 等几种空间调制的误码性能,指出 GOSM 虽然误码性能有所恶化,但能获得更高的频谱效率。后来,文献[55]在发送端未知信道状态信息的情况下,提出一种空间复用与空间调制相结合的复用型广义空间调制。文献[56-58]分别将索引调制(index modulation, IM)与正交频分复用(orthogonal frequency division multiplexing modulation, OFDM)、MIMO、MIMO-OFDM 相结合,提出了适合于室内可见光通信的高性能的广义空间调制。文献[59]针对采用 PAM 调制提出了基于最优星座映射的广义空间调制,但其要求激活天线的数量必须是 2 的幂次方。为此,文献[60]采用分组的方式提出了一种改进的 GOSM 方案,有效地解决了激活天线是 2 的幂次方的问题。

随后,将 GOSM 扩展到了室外大气激光通信,并针对大气信道的特点展开了相关研究^[61-63]。文献[61]构建了 log-normal 衰落信道下的 GOSM 方案。它通过每时刻激活两个激光器,并在激活激光器上加载 PPM 调制符号来进行信息传递。同时,针对 GOSM 方案,提出了一种 OB-MMSE 译码算法,有效地降低了接收端的译码复杂度。在此基础上,为了进一步提高空间资源的利用率和系统的传输速率,学者们还研究了其它的增强型光空间调制^[62-63]。其中,文献[62]将分层的思想与 OSM 相结合,提出了一种分层光空间调制系

统。通过将激光器分为 2 层，每层激活一个激光器，并在激活的激光器上分别加载不同的 PPM 和 PAM 调制符号来提高系统的传输速率和频谱效率。文献[63]通过每次激活一个或两个激光器的索引组合增大空间域映射，从而提出了一种激活激光器数目可变的光空间调制系统，达到了有效提高系统的传输速率和误码性能的目的。目前，有关增强型光空间调制及其相关技术的研究仍在不断发展和深入，新的研究成果将会继续出现。

2.4 差分光空间调制

在上述有关光空间调制的研究中，为了在接收端准确的检测出发送信号，接收端需要提前已知 CSI。要获得精确的 CSI 就需要复杂的信道估计，这就大大增加了系统实现的难度^[39]。另外，即使获得了 CSI，原始的比特信息也由于信道时变性和随机性未必能完全恢复。鉴于此，差分空间调制应运而生^[64]。文献[64]结合 PAM 首次提出了差分光空间调制(DOSM-PAM)方案，并针对不同的湍流信道分析了系统性能，其原理图如图 3 所示。

在一个有 N_t 个激光器， M 个光电探测器的 DOSM 系统中，首先将比特流进行分块，每个块包含 $b = \lfloor \log_2(N_t!) \rfloor + \log_2 M$ 个比特信息，其中 $\lfloor \log_2(N_t!) \rfloor$ 用来选择空间域激光器的索引号，而 $\log_2 M$ 比特用于选择符号域的星座映射。其次，利用这 b 个比特可以产生一个特殊的空时映射矩阵 $S \in \mathcal{S}$ ，其中 \mathcal{S} 为包含所有空时映射矩阵的集合。在差分方案中， S 不是真正的传输矩阵，时刻 t 的传输矩阵 X_t 是由当前时刻的 S_t 与 $t-1$ 时刻的传输矩阵 X_{t-1} 相乘产生。此时的差分过程可表示为

$$X_t = \frac{X_{t-1} S_t}{\rho_{t-1}}, \quad (3)$$

式中 ρ_{t-1} 是 PAM 幅度值。将传输矩阵 X_t 由激光器发送出去，经光学天线及探测器后，接收到的信号仍满足

式(1)。假设大气为准静态湍流信道，接收端采用 ML 准则即可完成信号的检测。此时对应的似然准则为

$$\hat{S}_t = \arg \min_{\forall S_t \in \mathcal{S}} \left\| Y_t - \frac{Y_{t-1} S_t}{\rho_{t-1}} \right\|_F^2. \quad (4)$$

文献[64]不仅提出了差分空间调制，而且通过分类讨论方法分析了误码性能和分集增益，得到了激光器数目为 2 时，DOSM-PAM 系统的理论平均误码率和理论分集增益。同时，针对 2-ary PAM 的星座映射，得出了在幅度比为 0.6 时的误码率性能最佳的结论。另外，文献[64]还提出了一种结构更为简单的差分光控移键控(differential optical space shift keying, DOSSK)方案，由于该方案仅采用空间域激光器索引号携带信息，因此是一种 OSSK 系统的差分形式。目前，WOC 系统中的差分空间调制方案还在初步探索阶段，未来具有较大的发展潜力。

3 性能分析

针对现有的 OSSK^[34]、DOSM-PAM^[64]、DOSSK^[64]、SPPM^[16]、SPPAM^[17]和 GSPPM^[51]六种不同 OSM 系统，比较了各方案的性能，其结果如表 1 和图 4 所示。其中，表 1 列出了六种不同光空间调制方案的传输速率、频谱效率和计算复杂度。

由表 1 可见， N_t 和调制阶数是影响各系统传输速率和频谱效率的关键因素。其中，OSSK 的传输速率与频谱效率相等，而 SPPAM、SPPM、GSPPM、DOSM 和 DOSSK 的传输速率均大于频谱效率。故，当频谱效率一定时，OSSK 的传输速率最低。当 N_t 和调制阶数固定时，GSPPM 的传输速率最大，而 SPPAM 与 DOSM 的传输速率视 N_t 与调制阶数的具体值而定，SPPM 的传输速率均小于 SPPAM 和 DOSM，而 DOSSK 的传输速率又小于 SPPM。因此，上述六种方案的传输速率比较可归纳为 $GSPPM \geq (SPPAM, DOSM) \geq SPPM \geq DOSSK \geq OSSK$ 。另外，各系统复杂度除了与

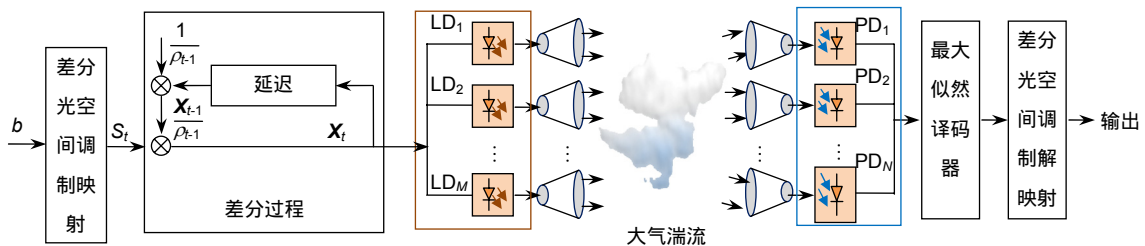


图 3 DOSM 系统模型

Fig. 3 DOSM system model

表 1 不同光空间调制方案的传输速率、频谱效率和复杂度

Table 1 Transmission rate, spectral efficiency and complexity of different OSM schemes

调制方案	传输速率/(bpcu)	频谱效率/(bit/s)/Hz	计算复杂度
OSSK	$\log_2 N_t$	$\log_2 N_t$	$N_t(2N_t N_r + 2N_r - 1)$
(L,M)-SPPAM	$\log_2 N_t + \log_2 LM$	$\log_2(LMN_t)/L$	$N_t LM(2N_t L N_r + 2N_r L - 1)$
L-SPPM	$\log_2 N_t + \log_2 L$	$\log_2(LN_t)/L$	$N_t L(2N_t L N_r + 2N_r L - 1)$
L-GSPPM	$\lceil \log_2 C_{N_t}^2 \rceil + 2\log_2 L$	$\log_2(C_{N_t}^2 L^2)/L$	$\lceil \log_2 C_{N_t}^2 \rceil \cdot L^2 \cdot (2N_t L N_r + 2N_r L + N_t L - 1)$
DOSM-PAM	$\lceil \log_2(N_t!) \rceil + \log_2 M$	$(\lceil \log_2(N_t!) \rceil + \log_2 M)/N_t$	$2^{\lceil \log_2(N_t!) \rceil} M(3N_t^2 N_r + 3N_t N_r - 1)$
DOSSK	$\lceil \log_2(N_t!) \rceil$	$\lceil \log_2(N_t!) \rceil / N_t$	$2^{\lceil \log_2(N_t!) \rceil} (2N_t^2 N_r + 3N_t N_r - 1)$

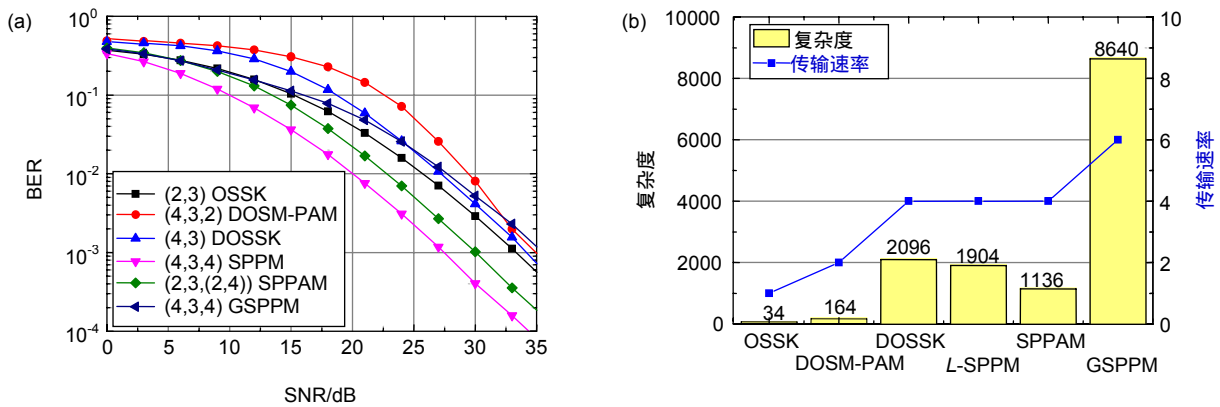


图 4 不同光空间调制系统性能对比。(a) 误码率曲线; (b) 传输速率和复杂度

Fig. 4 Performance comparison of different OSM systems. (a) BER curves; (b) Transmission rate and complexity

N_t 和调制阶数有关外,还与 N_r 有关,但 N_t 和调制阶数是影响计算复杂度的主要因素。当 N_t 和调制阶数固定时,比较各系统的计算复杂度可得,GSPPM 方案的计算复杂度最高而 OSSK 的计算复杂度最低。

为了全面比较六种不同光空间调制方案的性能,在 CSI 已知且系统总能量一定的情况下,给出了频谱效率为 1 (bit/s)/Hz 时,六种光空间调制方案的误码性能,其结果如图 4 所示。为了方便识别,采用 $(N_t, N_r, (L, M))$ 来标注系统参数,其中 L 为 PPM 的阶数, M 为 PAM 的阶数。本文仿真均采用蒙特卡罗方法,信道模型采用 log-normal 分布,一般常用闪烁指数(S.I.)来表示大气湍流引起光强起伏的强弱,其仿真参数值为 S.I.=0.6, $\eta=0.5$ 。

由图 4 可知, SPPM 方案的误码性能最优,其传输速率与 DOSSK 方案相同,复杂度明显优于 DOSSK 和 GSPPM 方案。DOSM-PAM 方案与 OSSK 方案极大

地降低了系统的计算复杂度,但却牺牲了传输速率与误码性能。相较而言, OSSK 的传输速率略低于

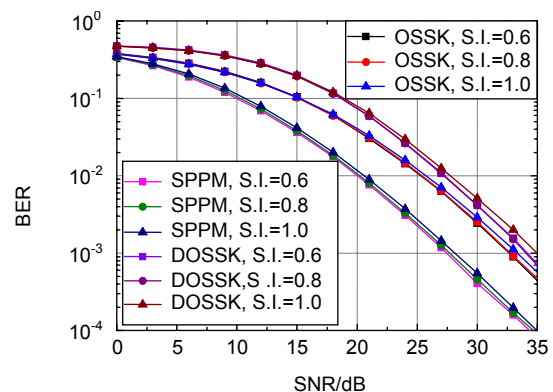


图 5 不同的 S.I.下不同 OSM 系统误码率性能对比

Fig. 5 Performance comparison of different OSM systems under different S.I.

DOSM-PAM,但其误码性能优于 DOSM-PAM。GSPPM 方案较大的提高了系统的传输速率,但却牺牲了计算复杂度与误码性能。因此,上述六种不同的光空间调制方案各有特点,在实际应用中需根据实际情况进行选择。

在湍流信道中,闪烁指数 S.I.用来衡量大气湍流引起的光强起伏的强弱。从图 5 中可以得出:随着 S.I.的增大,湍流强度对 OSSK 系统、SPPM 系统和 DOSSK 系统误码性能的影响均增大,使得系统误码率提高。例如,当 BER=10⁻³时,S.I.由 0.6 增大到 1,SPPM 系统的信噪比损失了 0.8 dB。从整体看,弱湍流虽然对误码性能有一定影响,但是影响较小。

4 总结与展望

随着人们对大容量、高速率通信系统的迫切需求,具有高效、低复杂度的空间调制应运而生。作为一种新型的光 MIMO 技术,光空间调制利用空间域的激光器索引号携带额外信息,将传统的二维调制扩展到多维,它为提高系统的传输速率和降低功耗提供了一种有效措施,有望成为下一代通信技术的备选方案。同时光空间调制的理论研究为即将开展的实验具有一定的指导价值。

虽然空间调制技术在射频中已日趋成熟,但由于无线光通信与射频通信存在较大区别,使得原有射频领域中有关空间调制的理论和方法在 WOC 中无法直接使用。而目前有关无线光通信领域中空间调制技术的研究还处于初步探索阶段,距离实际应用还有较大差距。目前,光空间调制亟需解决的问题有:

1) 空间调制是一种全新的三维调制技术,即“数字域+空间域”的调制技术。已有光空间调制的研究成果均是两种调制分开考虑。这就使得已有的最优信号星座图还是二维星座,并非真正意义上的三维调制星座图。相对于传统的调制星座,空间调制显示出了部分性能增益,但是,当它应用到发射天线数目不是 2 的指数倍的系统中时,其性能受限。因此,如何设计光空间调制中最优三维调制星座图方案亟待解决。

2) 已有光空间调制在接收端译码算法的研究大多采用最大似然译码。虽然最大似然检测算法能够获得较好的性能,但是其较高的复杂度很难应用于实际。因此在性能保障的前提下,亟需探索低复杂度及切实可行的译码算法。

基于光空间调制技术的高能量效率的优势,未来

其在 WOC 领域大规模 MIMO 用户、多用户多小区 MIMO 通信中有重大的应用前景。光空间调制利用激光器的空间相对位置额外携带信息,不仅提高了传输速率,而且为大规模 MIMO 系统的发射端设计节省功耗。随着大规模光 MIMO 技术的不断深入发展,仅仅依靠空间域索引和数字域调制不能满足当前的通信需求。因此,将光空间调制与其他技术相结合,不断提高光通信系统的速率和容量,也是未来光空间调制系统发展的趋势之一。在此基础之上,将光空间调制技术中“索引”的概念进行拓展,提出广义化的索引调制。例如,OFDM 中通过子载波的索引提高系统的传输速率。

参考文献

- [1] El Mashade M B, Toeima A H. Performance characterization of spatial diversity based optical wireless communication over atmospheric turbulence channels[J]. *Radioelectronics and Communications Systems*, 2018, **61**(4): 135–152.
- [2] Djordjevic I B, Denic S, Anguita J, et al. LDPC-Coded MIMO optical communication over the atmospheric turbulence channel[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2008, **26**(5): 478–487.
- [3] Hajjarian Z, Fadlullah J, Kavehrad M. MIMO free space optical communications in turbid and turbulent atmosphere[J]. *Journal of Communications*, 2009, **4**(8): 524–532.
- [4] Wang H Q, Wang X, Lynette K, et al. Performance analysis of MIMO wireless optical communication system with Q-ary PPM over correlated log-normal fading channel[J]. *Optics & Laser Technology*, 2018, **102**: 153–159.
- [5] Mesleh R, Mehmood R, Elgala H, et al. Indoor MIMO optical wireless communication using spatial modulation[C]//*Proceedings of 2010 IEEE International Conference on Communications*, 2010: 1–5.
- [6] Yu X B, Qiu S N, Wang C. Research status and prospect for spatial modulated MIMO technique in wireless communications[J]. *Journal of Data Acquisition & Processing*, 2017, **32**(3): 440–453.
虞湘宾, 邱赛男, 王丞. 无线通信中空间调制 MIMO 技术的研究现状与展望[J]. *数据采集与处理*, 2017, **32**(3): 440–453.
- [7] Basar E, Wen M W, Mesleh R, et al. Index modulation techniques for next-generation wireless networks[J]. *IEEE Access*, 2017, **5**: 16693–16746.
- [8] Chau Y A, Yu S H. Space modulation on wireless fading channels[C]//*IEEE 54th Vehicular Technology Conference. VTC Fall 2001. Proceedings (Cat. No. 01CH37211)*, 2001: 1668–1671.
- [9] Freudenberger J, Rohweder D, Shavgulidze S. Generalized multistream spatial modulation with signal constellations based on Hurwitz integers and low-complexity detection[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2018, **7**(3): 412–415.
- [10] Qu W L, Zhang M, Cheng X, et al. Generalized spatial modulation with transmit antenna grouping for massive MIMO[J]. *IEEE Access*, 2017, **5**: 26798–26807.
- [11] Mesleh R, Haas H, Ahn C W, et al. Spatial modulation—a new low complexity spectral efficiency enhancing technique[C]//*Proceedings of 2006 First International Conference on Communications and Networking in China*, 2006: 1–5.
- [12] Di Renzo M, Haas H, Ghayeb A, et al. Spatial modulation for

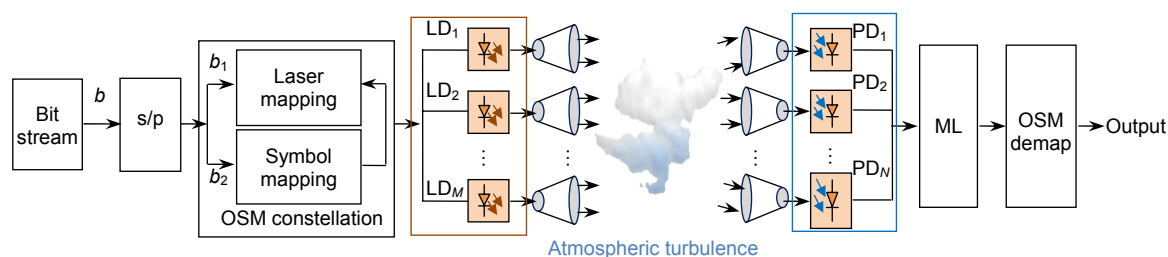
- generalized MIMO: challenges, opportunities, and implementation[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2014, **102**(1): 56–103.
- [13] Mesleh R, Elgala H, Haas H. Optical spatial modulation[J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2011, **3**(3): 234–244.
- [14] Mesleh R, Elgala H, Mehmood R, et al. Performance of optical spatial modulation with transmitters-receivers alignment[J]. *IEEE Communications Letters*, 2011, **15**(1): 79–81.
- [15] Mesleh R, Elgala H, Hammouda M, et al. Optical spatial modulation with transmitter-receiver alignments[C]//*Proceedings of 2011 16th European Conference on Networks and Optical Communications*, 2011: 1–4.
- [16] Popoola W O, Poves E, Haas H. Spatial pulse position modulation for optical communications[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, **30**(18): 2948–2954.
- [17] Olanrewaju H G, Popoola W O. Effect of synchronization error on optical spatial modulation[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2017, **65**(12): 5362–5374.
- [18] Olanrewaju H G, Thompson J, Popoola W O. Performance of optical spatial modulation in indoor multipath channel[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2018, **17**(9): 6042–6052.
- [19] Fath T, Haas H, Di Renzo M, et al. Spatial modulation applied to optical wireless communications in indoor LOS environments[C]//*Proceedings of 2011 IEEE Global Telecommunications Conference*, 2011: 1–5.
- [20] Fath T, Klaue J, Haas H. Coded spatial modulation applied to optical wireless communications in indoor environments[C]//*Proceedings of 2012 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, 2012: 1000–1004.
- [21] Masuda K, Kamakura K, Yamazato T. Spatial modulation in layered space-time coding for image-sensor-based visible light communication[C]//*Proceedings of 2016 IEEE 27th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, 2016: 1–6.
- [22] Xu K, Yu H Y, Zhu Y J. Channel-adapted spatial modulation for massive MIMO visible light communications[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, **28**(23): 2693–2696.
- [23] Wang J Y, Zhu J X, Lin S H, et al. Adaptive spatial modulation based visible light communications: SER analysis and optimization[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, **10**(3): 7903814.
- [24] Wang J Y, Ge H, Zhu J X, et al. Adaptive spatial modulation for visible light communications with an arbitrary number of transmitters[J]. *IEEE Access*, 2018, **6**: 37108–37123.
- [25] Yesilkaya A, Cogalan T, Panayirci E, et al. Achieving minimum error in MISO optical spatial modulation[C]//*Proceedings of 2018 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2018: 1–6.
- [26] 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]//*Proceedings of 2014 International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC 2014)*, 2014: 144–148.
- [27] Özbilgin T, Koca M. Optical spatial modulation over atmospheric turbulence channels[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, **33**(11): 2313–2323.
- [28] 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.
- [29] Abou-Rjeily C, Kaddoum G. Optical spatial modulation for FSO IM/DD communications with photon-counting receivers: performance analysis, transmit diversity order and aperture selection[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2019, **37**(9): 2053–2068.
- [30] Wang H Q, Song L H, Cao M H, et al. Compressed sensing detection of optical spatial modulation signal in turbulent channel[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, **26**(11): 2669–2674.
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.
- [31] Wu L, Cheng J L, Zhang Z C, et al. Low-complexity spatial modulation for IM/DD optical wireless communications[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2019, **31**(6): 475–478.
- [32] Gong Y X. Research on indoor visible light MIMO wireless communications based on space shift keying[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2014.
巩玉先. 基于空移键控的室内可见光 MIMO 无线通信技术研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2014.
- [33] Gong Y X, Ding L W, He Y J, et al. Analysis of space shift keying modulation applied to visible light communications[C]//*International Conference on Information and Communications Technologies (ICTCT 2013)*, 2013, **3**: 503–507.
- [34] Abaza M, Mesleh R, Mansour A, et al. The performance of space shift keying for free-space optical communications over turbulent channels[J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, **9387**: 93870V.
- [35] Abaza M, Mesleh R, Mansour A, et al. Performance analysis of space-shift keying over negative-exponential and log-normal FSO channels[J]. *Chinese Optics Letters*, 2015, **13**(5): 051001.
- [36] Jaiswal A, Bhatnagar M R, Jain V K. BER analysis of optical space shift keying in atmospheric turbulence environment[C]//*Proceedings of 2016 10th International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP)*, 2016: 1–6.
- [37] Jaiswal A, Bhatnagar M R, Jain V K. On the ergodic capacity of optical space shift keying based FSO-MIMO system under atmospheric turbulence[C]//*Proceedings of 2017 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2017: 1–7.
- [38] Jaiswal A, Bhatnagar M R, Jain V K. Performance evaluation of space shift keying in free-space optical communication[J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2017, **9**(2): 149–160.
- [39] Jaiswal A, Bhatnagar M R, Jain V K. Performance of optical space shift keying over gamma–gamma fading with pointing error[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, **9**(2): 7200716.
- [40] Jaiswal A, Abaza M, Bhatnagar M R, et al. An investigation of performance and diversity property of optical space shift keying-based FSO-MIMO system[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2018, **66**(9): 4028–4042.
- [41] Jaiswal A, Bhatnagar M R, Jain V K. Partially informed transmitter-based optical space shift keying under atmospheric turbulence[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2019, **18**(8): 3781–3796.
- [42] Popoola W, Poves E, Haas H. Generalised space shift keying for visible light communications[C]//*Proceedings of 2012 8th International Symposium on Communication Systems, Networks & Digital Signal Processing (CSNDSP)*, 2012: 1–4.
- [43] Wang X F. On the performance of space shift keying modulation for visible light communications[D]. Xi'an: Southwest Jiaotong University, 2014.
王晓飞. 空移键控调制在可见光通信系统中的应用研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
- [44] Popoola W O, Poves E, Haas H. Error performance of genera-

- lised space shift keying for indoor visible light communications[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2013, **61**(5): 1968–1976.
- [45] Popoola W O, Sinanovic S, Nistazakis H E. Enhancing the error performance of optical SSK under correlated channel condition[C]//*Proceedings of 2016 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC)*, 2016: 7–11.
- [46] Fu H S. Research on spatial modulation for visible light communications[D]. Zhengzhou: The PLA Information Engineering University, 2014.
付红双. 可见光通信中的空间调制技术研究[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2014.
- [47] Fu H S, Zhu Y J, Cai W B. Study on optical multiple active antennas space shift keying[J]. *Journal of Signal Processing*, 2014, **30**(7): 842–847.
付红双, 朱义君, 蔡文炳. 可见光多天线空分键控技术研究[J]. 信号处理, 2014, **30**(7): 842–847.
- [48] Popoola W O, Haas H. Demonstration of the merit and limitation of generalised space shift keying for indoor visible light communications[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, **32**(10): 1960–1965.
- [49] Kadampot I A, Park K H, Alouini M S. Precoded generalized space shift keying for indoor visible light communications[C]//*Proceedings of 2014 3rd International Workshop in Optical Wireless Communications (IWOW)*, 2014: 85–89.
- [50] Bian R, Videv S, Griffiths A D, et al. Experimental demonstration of generalised space shift keying for visible light communication[C]//*Proceedings of 2017 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSea-Com)*, 2017: 1–5.
- [51] Olanrewaju H G, Thompson J, Popoola W O. Generalized spatial pulse position modulation for optical wireless communications[C]//*Proceedings of 2016 IEEE 84th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)*, 2016: 1–5.
- [52] Alaka S P, Narasimhan T L, Chockalingam A. Generalized spatial modulation in indoor wireless visible light communication[C]//*Proceedings of 2015 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, 2015: 1–7.
- [53] Zhu Y J, Fu H S, Cai W B. Low complexity adaptive generalized spatial modulation for visible light communication[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2015, **45**(6): 2080–2084.
朱义君, 付红双, 蔡文炳. 可见光通信中低复杂度自适应广义空间调制算法[J]. 吉林大学学报(工学版), 2015, **45**(6): 2080–2084.
- [54] Stavridis A, Haas H. Performance evaluation of space modulation techniques in VLC systems[C]//*Proceedings of 2015 IEEE International Conference on Communication Workshop (ICCW)*, 2015: 1356–1361.
- [55] Xiao S F. Research on MIMO technology in visible light communication system[D]. Zhengzhou: The PLA Information Engineering University, 2014.
肖帅芳. 室内可见光通信中的 MIMO 技术研究[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2014.
- [56] Başar E, Panayirci E, Uysal M, et al. Generalized LED index modulation optical OFDM for MIMO visible light communications systems[C]//*Proceedings of 2016 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2016: 1–5.
- [57] Nguyen N T, Nguyen Q T, Nguyen N H. The index-based optical spatial modulation scheme in optical MIMO[C]//*Proceedings of 2016 International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC)*, 2016: 191–196.
- [58] Yesilkaya A, Basar E, Miramirkhani F, et al. Optical MIMO-OFDM with generalized LED index modulation[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2017, **65**(8): 3429–3441.
- [59] Kumar C R, Jeyachitra R K. Power efficient generalized spatial modulation MIMO for indoor visible light communications[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, **29**(11): 921–924.
- [60] Kumar C R, Jeyachitra R K. Dual-mode generalized spatial modulation MIMO for visible light communications[J]. *IEEE Communications Letters*, 2018, **22**(2): 280–283.
- [61] Cao M H, Song L H, Wang H Q, et al. Low-complexity OB-MMSE detection algorithm for generalized wireless-optical spatial modulation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, **39**(12): 1206002.
曹明华, 宋梨花, 王惠琴, 等. 广义无线光空间调制中的低复杂度 OB-MMSE 检测算法[J]. 光学学报, 2019, **39**(12): 1206002.
- [62] Wang H Q, Li Y T, Cao M H, et al. Layered optical spatial modulation in turbulent channels[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, **39**(7): 0706001.
王惠琴, 李亚婷, 曹明华, 等. 湍流信道中的分层光空间调制[J]. 光学学报, 2019, **39**(7): 0706001.
- [63] Zhang Y, Wang H Q, Cao M H, et al. Enhanced optical spatial modulation in wireless optical communication[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, **40**(3): 0306001.
张悦, 王惠琴, 曹明华, 等. 无线光通信中的增强型光空间调制[J]. 光学学报, 2020, **40**(3): 0306001.
- [64] Jaiswal A, Bhatnagar M R, Soni P, et al. Differential optical spatial modulation over atmospheric turbulence[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2019, **13**(6): 1417–1432.
- [65] Khallaf H S, Elfiqi A E, Shalaby H M H, et al. On the performance evaluation of LQAM-MPPM techniques over exponentiated Weibull fading free-space optical channels[J]. *Optics Communications*, 2018, **416**: 41–49.

Research status and development of optical spatial modulation technology

Mao Yicong, Wang Huiqin*, Zhang Yue, Cao Minghua

School of Computer and Communication, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China



OSM system model

Overview: As a novel access network technology, wireless optical communication (WOC) has sparked great interests in the field. Compared with RF, there are significant advantages, such as high bandwidth, inherent security and ease of installation. However, the channel fading caused by atmospheric turbulence and complex channel environment is the main factor affecting the performance of WOC system. Therefore, OMIMO system comes into being and makes use of spatial diversity at receiver and transmitter to overcome the performance influence caused by link fading. When multiple lasers are activated simultaneously, the problems of inter-channel interference (ICI) and inter antenna synchronization (IAS) limit the promotion and development of OMIMO system. Optical spatial modulation (OSM) is a novel OMIMO scheme which conveys information over both signal and space simultaneously. OSM effectively improves the transmission rate and energy efficiency by using the spatial domain laser index to carry additional information. Since only one laser is activated per symbol duration to transmit information, the problems of channel interference and synchronization are solved in traditional OMIMO system, and complexity and link cost of proposed OSM scheme are decreased. Based on the above advantages, OSM is an OMIMO technology with broad development prospects and can be applied in various occasions. In the field of RF, the idea of SM has been developed rapidly and rich research results have been obtained. Compared with RF field, OSM is still in the exploration stage. In this paper, we introduce four kinds of schemes of OSM, optical space shift keying (OSSK), enhanced optical spatial modulation (EOSM) and differential optical spatial modulation (DOSM) from basic principle to research status both at home and abroad. OSSK is a simple form of OSM, which only uses the index of the laser to transmit information. EOSM effectively increases the transmission rate by activating a small number of lasers. And EOSM overcomes in a novel fashion the constraint in OSM that the number of lasers has to be a power of two. DOSM can effectively avoid complex channel estimation and obtain better performance under high mobility scenarios. In terms of transmission rate, spectral efficiency, bit error rate (BER) and complexity, four kinds of OSM scheme are compared and analyzed. It is noticed from analysis that different OSM schemes have their own characteristics and advantages, so they are selected according to the specific situation in practical application. In short, with the requirement of high capacity and high-speed communication system, OSM scheme is expected to be an alternative to next generation communications technology. It has significant application prospect in the future for massive MIMO user and multi-user multi-cell MIMO communication.

Citation: Mao Y C, Wang H Q, Zhang Y, *et al.* Research status and development of optical spatial modulation technology[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020, 47(3): 190712

Supported by National Natural Science Foundation of China (61861026, 61875080)

* E-mail: whq1222@lut.cn