

引用本文:李进,赵辉,马薇雯,等.自由空间光通信中的光广义正交空间调制技术[J].光通信技术,2023,47(3):23-30.

自由空间光通信中的光广义正交空间调制技术

李进,赵辉*,马薇雯,邓文超,李静

(重庆邮电大学通信与信息工程学院,重庆400065)

摘要:为了提高现有光空间调制系统的频谱效率,提出了一种在同相和正交域同时激活多根发射光学天线分别传输调制信号的实部与虚部的光广义正交空间调制(OGQSM)技术。该技术将调制符号扩展到同相和正交域,使得系统在空间域可以携带更多的比特,从而提高了系统频谱效率和误码性能。采用适用于所有湍流状态的Malaga湍流信道,分析了OGQSM系统在大气湍流、指向误差和路径损耗联合作用下的系统误码性能。蒙特卡罗仿真结果表明:与现有的光空间调制技术相比,所提出的OGQSM技术能够获得更好的频谱效率和误码性能,且接收光学天线数量与系统误码性能存在正相关关系,指向误差和大气湍流强度与系统误码性能存在负相关关系。

关键词:自由空间光通信;光空间调制;Malaga湍流信道;指向误差;频谱效率

中图分类号:TN929.12 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2023)03-0023-08

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2023.03.004

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Optical generalized quadrature spatial modulation technology in free space optical communication

LI Jin, ZHAO Hui*, MA Weiwen, DENG Wenchao, LI Jing

(School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: In order to improve the spectral efficiency of existing optical spatial modulation systems, an optical generalized quadrature spatial modulation(OGQSM) technology is proposed, in which multiple transmitting optical antennas are simultaneously activated in the in-phase and quadrature domains to transmit the real and imaginary parts of the modulated signals respectively. This technology extends the modulation symbols to the in-phase and quadrature domains, so that the system can carry more bits in the spatial domain, thus improving the spectral efficiency and bit error performance of the system. The Malaga turbulent channel which is suitable for all turbulent states is used to analyze the OGQSM system bit error performance of the proposed technology under the combined action of atmospheric turbulence, pointing error and path loss. Monte Carlo simulation results show that, compared with the existing optical spatial modulation technology, the proposed OGQSM technology can obtain better spectral efficiency and error performance, and the number of receiving optical antennas is positively correlated with the bit error performance of the system, the pointing error and the atmospheric turbulence intensity are negative correlated with the bit error performance of the system.

Key words: free space optical communication, optical spatial modulation, Malaga turbulent channel, pointing error, spectral efficiency

0 引言

近年来,自由空间光(FSO)通信由于容量大、数据

传输速率高、安全性高、无需频率许可和易于部署等优点受到了广泛关注。然而,大气温度、压强、高度的随机变化产生的大气湍流效应以及由发射机和接收机之间的欠对准引起的指向误差会对FSO系统的传输性能有不同程度的影响^[1]。为了对抗大气湍流和指向误差对FSO通信链路性能的影响,多输入多输出(MIMO)技术被广泛应用在FSO系统中^[2]。光空间调制(OSM)作为一种新型的光MIMO技术,由于每个符号周期仅激活一根天线,在有效避免传统光MIMO技术信道间干扰强和天线间同步难等问题的同时,还降低了链路成本和接收端信号检测的复杂度^[3]。此外,OSM

收稿日期:2022-10-19。

基金项目:国家自然科学基金项目(批准号:12104078)资助;重庆市自然科学基金项目(批准号:cstc2021jcyj-msxmX0836)资助。

作者简介:李进(1998—),男,山东菏泽人,硕士研究生,现就读于重庆邮电大学通信与信息工程学院信息与通信工程专业,主要研究方向为自由空间光通信理论与技术、光信号传输技术及复杂信号处理技术等。

* **通信作者:**赵辉(1980—),女,博士,教授,主要研究方向为信号与信息处理、空间光通信等。



李进,赵辉,马薇雯,等:自由空间光通信中的光广义正交空间调制技术

技术不仅采用传统数字调制星座(信号域)传递信息,而且通过天线索引(空间域)来承载信息,很大程度上提高了系统的传输速率和频谱效率。因此,高效的OSM技术对于FSO通信系统有效抵抗大气湍流效应、减小指向误差的影响具有重要意义。2015年,ÖZBILGIN T等人^[4]将空移键控与联合脉冲位置和幅度调制相结合,首次提出了FSO通信中的OSM方案。文献[5]利用脉冲位置调制,通过激活多个光学天线构建了光广义空间调制(OGSM)方案。该方案不仅提高了系统的频谱效率,还打破了光学天线数量必须为2的整数次幂的限制。2020年,王惠琴等人^[6]将仅激活一根光学天线传输信息推广到激活多根甚至所有的光学天线,提出了一种光完全广义空间调制(OFGSM)方案,并使用联合界给出了系统在对数正态信道下的误码率表达式。同年,CELIK K等人^[7]提出了光正交空间调制(OQSM)方案,通过将空间索引位扩展到同相和正交域,使空间域映射比特数变为OSM方案的2倍。在此基础上,2021年,BHOWAL A等人^[8]研究了具有指向误差的Gamma-Gamma信道下的光改进型正交空间调制(OIQSM)方案,通过使用2组不同的光学天线在单个传输周期上额外发送一个调制符号提高了系统的频谱效率,同时推导出了最大似然(ML)检测下系统误码率的性能界。

然而,以上方案的误码性能分析只针对对数正态信道和Gamma-Gamma信道,不能全面反应所有大气湍流状态对FSO系统性能的影响。为了提高FSO通信系统的频谱效率,本文通过在同相和正交域激活多根光学天线传输不同的调制符号,提出一种FSO通信中的光广义正交空间调制(OGQSM)技术。

1 大气湍流信道模型

综合考虑大气湍流、指向误差和路径损耗对通信系统性能的影响,信道衰减系数 h 可以建模为

$$h=h_0h_p h_w \quad (1)$$

其中, h_0 是大气湍流引起的信道衰落, h_p 是指向误差, h_w 是给定天气条件和链路距离下的路径损耗。激光功率在大气中的衰减遵循比尔·朗伯定律,在传输距离一定时,路径损耗 h_w 被认为是一个固定的常数。指向误差 h_p 的概率密度分布函数(PDF)^[9]为

$$f(h_p)=\frac{\xi^2}{A_0} h_p^{\xi-1}, h_p \in [0, A_0] \quad (2)$$

其中, $A_0=[\operatorname{erf}(b)]^2$, $b=\sqrt{\pi/2} \varphi/\omega_z$, φ 为接收孔径的

半径, ω_z 是在大气湍流中传播的高斯光束的束腰; ξ 是指向误差参数, ξ 可以反应指向误差的强度, ξ 越低,指向误差强度越大, $\xi^2=\omega_{zeq}^2/4\sigma_s^2$; ω_{zeq} 是接收孔径处的等效波束半径, σ_s 是接收孔径处的指向误差位移标准差。

为了分析不同湍流强度对系统性能的影响,本文采用适用于所有湍流状态的Malaga湍流分布模型。在Malaga湍流、指向误差和路径损耗联合作用下的信道衰减系数 h 的PDF^[10]为

$$f(h)=\frac{\xi^2 A}{2h} \sum_{n=1}^{\beta} a_n \left(\frac{\alpha\beta}{g\beta+\Omega'} \right)^{-\frac{\alpha+n}{2}} \times G_{1,3}^{3,0} \left[\frac{\alpha\beta}{g\beta+\Omega'} \frac{h}{h_w A_0} \left| \begin{matrix} \xi^2+1 \\ \xi^2, \alpha, n \end{matrix} \right. \right] \quad (3)$$

其中, α 和 β 分别为大气湍流信道中与大尺度和小尺度波动相对应的衰落相关参数^[13]; n 为级数求和的项;相干光平均功率 $\Omega'=\Omega+2b_0\rho+2\sqrt{2b_0\rho\Omega}\cos(\phi_1-\phi_2)$, Ω 是视距分量的光信号平均功率, $2b_0$ 为总散射分量的平均功率, ρ 为耦合到视距分量的散射功率,且 $0\leq\rho\leq 1$, ϕ_1 和 ϕ_2 分别为大气湍流信道中视距分量与耦合到视距散射分量的确定性角度; g 为离轴涡旋接收到的散射分量的平均功率, $g=2b_0(1-\rho)$, $G[\cdot]$ 是Meijer-G函数, A 和 a_n 分别表示为

$$A=\frac{2\alpha^{\frac{\alpha}{2}}}{g^{1+\frac{\alpha}{2}}\Gamma(\alpha)} \left(\frac{g\beta}{g\beta+\Omega'} \right)^{\beta+\frac{\alpha}{2}} \quad (4)$$

$$a_n=\binom{\beta-1}{n-1} \frac{(g\beta+\Omega')^{1-\frac{n}{2}}}{(n-1)!} \left(\frac{\Omega'}{g} \right)^{n-1} \left(\frac{\alpha}{\beta} \right)^{\frac{n}{2}} \quad (5)$$

其中, $\Gamma(\cdot)$ 为伽马函数。

2 OGQSM 系统模型

本文提出的OGQSM系统如图1所示。假设系统含有 N_t 根发射光学天线和 N_r 根接收光学天线,采用 M 阶的正交振幅调制(QAM)。在OGQSM系统中,空间域被扩展为同相和正交分量,其中同相分量传输调制符号的实部,正交分量传输调制符号的虚部。两部分传输信号是正交的,因此可以完全避免信道间干扰。此外,同相分量和正交分量调制符号的选择是独立的,系统可以通过同时在同相和正交分量激活多根发射光学天线实现单个传输周期多个调制符号的传输。因此,在每个传输周期,OGQSM系统以特定的光学天线激活

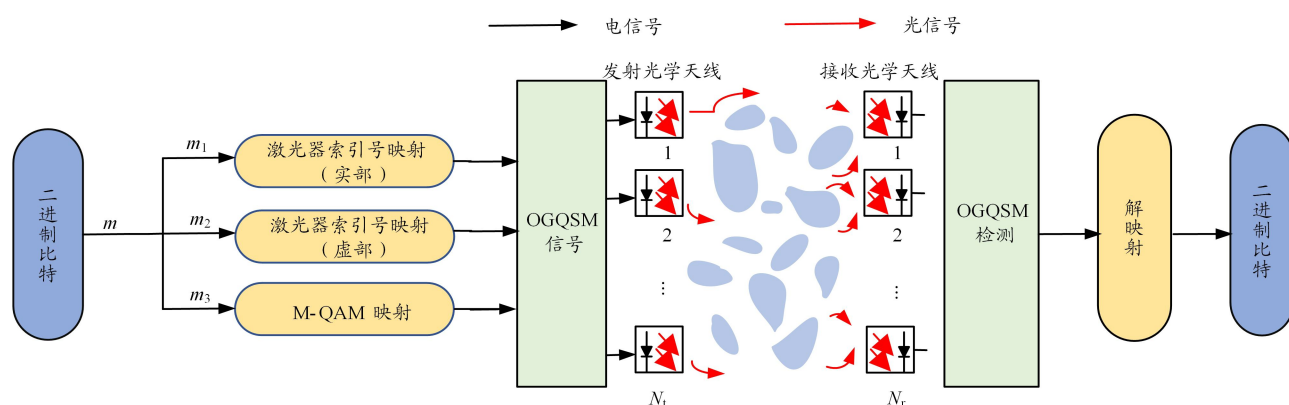


图1 OGQSM 系统模型

模式(OAAP)从 N_t 根发射光学天线中激活 N_a 根,用于传输调制符号的实部。类似地,激活另外 N_a 根发射光学天线用于传输调制符号的虚部。其余没有被激活的发射光学天线可以看作传输的是零值。本文中 OAAP 共有 $C(N_t, N_a)$ 种,但只有 $N_c = 2^{\lfloor \log_2 C(N_t, N_a) \rfloor}$ 种被用于选择光学天线组合, $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示向下取整运算。因此,系统的频谱效率 η 为

$$\eta = 2[\log_2 C(N_t, N_a)] + N_a \log_2 M \quad (6)$$

发送端每个传输周期输入的 m 个二进制比特经串/并变换被分成比特数分别为 m_1 、 m_2 和 m_3 的三部分。其中,第一部分 m_1 个比特映射为 N_a 个调制阶数为 M 的 QAM 星座符号, $m_1 = N_a \log_2 M$, 得到的 N_a 个 MQAM 调制符号 x 为

$$x = [x_1, x_2, \dots, x_{N_a}] \quad (7)$$

将得到的 N_a 个 MQAM 调制符号分解为实部 x^I 和虚部 x^Q , 可分别表示为

$$x^I = [x_1^I, x_2^I, \dots, x_{N_a}^I] \quad (8)$$

$$x^Q = [x_1^Q, x_2^Q, \dots, x_{N_a}^Q] \quad (9)$$

第二、第三部分比特数相等, 即 $m_2 = m_3 = \lfloor \log_2 C(N_t, N_a) \rfloor$ 个比特用于选择 N_a 个 OAAP 来激活特定的发射光学天线分别发射 N_a 个调制符号的实部和虚部。

OGQSM 系统的传输信号矢量 X 可以表示为

$$X = X^I + jX^Q \quad (10)$$

其中, OGQSM 系统传输信号的实部 X^I 和虚部 X^Q 可以分别表示为

$$X^I = [0, X_1^I, X_2^I, 0, \dots, X_{N_a}^I]^T \quad (11)$$

$$X^Q = [0, X_1^Q, X_2^Q, 0, \dots, X_{N_a}^Q]^T \quad (12)$$

X^I 和 X^Q 向量中非 0 元素的下标值为 OAAP 所激活的发射光学天线索引号。

设 $N_t=4$ 、 $N_a=2$ 、 $N_r=4$, 此时采用 4QAM 的 OGQSM 系统, 其 OAAP 映射表如表 1 所示。若系统输入比特为 $[1\ 1\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 1]$ 映射表, 则 $m_1=4$ 个比特 $[1\ 1\ 0\ 0]$ 被映射成 $N_a=2$ 个 4QAM 星座符号 $x = [1-j, 1+j]$, 即 $x^I = [1, 1]$, $x^Q = [-1, 1]$ 。 $m_2=2$ 个比特 $[1\ 0]$ 选择同相分量光学天线索引组合 $\{1, 4\}$, 即同时激活发射光学天线 1 和 4 发射调制符号的实部 x^I , 则 $X^I = [1, 0, 0, 1]^T$ 。 $m_3=2$ 个比特 $[0\ 1]$ 选择正交分量光学天线索引组合 $\{1, 3\}$, 即同时激活发射光学天线 1、3 发射调制符号的虚部 x^Q , 则 $X^Q = [-1, 0, 1, 0]^T$ 。 OGQSM 系统总的传输信号矢量 $X = X^I + jX^Q = [1-j, 0, j, 1]^T$ 。

表 1 OAAP 映射表

空间域比特	光学天线索引
[00]	{1, 2}
[01]	{1, 3}
[10]	{1, 4}
[11]	{2, 3}

传输信号(电信号)矢量 X 经直流偏置转换为光信号, 光信号经大气湍流信道传输后, 接收光学天线接收到的信号 y 为

$$y = \sqrt{O_{\text{eff}}} E H X + n_0 \quad (13)$$

其中, E 为符号平均能量, O_{eff} 为系统光学效率, H 是 $N_r \times N_t$ 维的信道衰落系数矩阵, n_0 是 $N_r \times 1$ 维均值为 0、方差为 N_0 的加性高斯白噪声。

在接收端, 采用 ML 算法从受到信道衰落和噪声

李进,赵辉,马薇雯,等:自由空间光通信中的光广义正交空间调制技术

干扰的接收信号 y 中估计原始发送信号,其检测原理为

$$[\hat{l}_{\text{ML}}, \hat{x}_{\text{ML}}] = \underset{l \in N, s \in V}{\operatorname{argmin}} \|y - \sqrt{O_{\text{eff}}} H X\|_F^2 \quad (14)$$

其中, $\hat{l}_{\text{ML}}$ 和 $\hat{x}_{\text{ML}}$ 分别代表检测到的发射光学天线的索引和发送的 QAM 符号, l 为激活发射光学天线索引的所有组合, V 为所有 MQAM 调制符号的集合。最后,检测出的激活发射光学天线索引和调制符号经 OAAP 映射表进行逆映射,即可恢复出原始信息。

3 性能分析

只有当发射光学天线索引和调制符号同时被正确检测时,信号才能被正确解调。为了避免传统联合界限法在高调制阶数和少接收机数量时出现系统误码性能分析准确性下降的问题^[11-12],本文根据分类检测思想进行 OGQSM 信号检测。OGQSM 系统的平均误码率 (ABER) 来源于空间域和信号域两部分,因此 OGQSM 系统的 ABER 可以表示为^[8]

$$P_e \leq P_{\text{index}} + P_{\text{symbol}} - P_{\text{index}} P_{\text{symbol}} \quad (15)$$

其中, P_{index} 为空间域中 l 被检错成 l' 引起的 ABER, P_{symbol} 为信号域中调制符号 x 被检错成 x' 引起的 ABER。 P_{index} 和 P_{symbol} 分别被定义为

$$\begin{cases} P_{\text{index}} \leq \frac{1}{\eta 2^\eta} \sum_{l \in N} \sum_{l' \in N} n(l \rightarrow l') P_r(l \rightarrow l') \\ P_{\text{symbol}} \leq \frac{1}{\eta 2^\eta} \sum_{x \in V} \sum_{x' \in V} n(x \rightarrow x') P_r(x \rightarrow x') \end{cases} \quad (16)$$

其中, $n(\cdot)$ 为检测时出现的错误比特数, $P_r(\cdot)$ 为平均成对错误概率 (APEP)。结合式 (15) 可知, 计算 ABER 的关键在于正确分析检测错误的类型, 并计算出其对应的 APEP。

3.1 信号域 APEP 分析

OGQSM 系统中将调制符号 x 检错成 x' 的 APEP^[13] 可以表示为

$$\begin{aligned} P_r(x \rightarrow x') &= \frac{1}{2^\eta} E_1 \left[Q \left(\frac{1}{N_r} \sqrt{\frac{\gamma \|Hx - Hx'\|^2}{2}} \right) \right] = \\ &= \frac{1}{2^\eta} \int_0^\infty Q \left(\frac{1}{N_r} \sqrt{\frac{\gamma \sum_{j=1}^{N_r} \sum_{j=1}^{N_r} \|h_{ij}x - h_{ij}x'\|^2}{2}} \right) \times \\ &\quad f_{\gamma_{\text{SM}}}(h) dh \end{aligned} \quad (17)$$

其中, $E_1(\cdot)$ 为信道衰减矩阵的期望值, $Q(\cdot)$ 为 Gaussian-Q 函数, $\gamma_{\text{SM}} = \sum_{j=1}^{N_r} \left(\sum_{j=1}^{N_r} h_{ij} \right)^2$, γ 为接收端的电信号

平均信噪比 (SNR), $\gamma = \frac{R_e O_{\text{eff}} E}{N_0}$, R_e 为接收光学天线响

应度, h_{ij} 为遵循式 (3) 分布的信道矩阵中的元素。式 (17) 涉及到从每根发射光学天线到接收光学天线间的信道增益的多维积分, 不能导出其精确的闭合表达式, 但可以在 Matlab 的帮助下进行数值计算。

3.2 空间域 APEP 分析

l 被检错成 l' 的成对错误概率^[14]为

$$P_r(l \rightarrow l') = Q \left(\frac{1}{N_r} \sqrt{\frac{\gamma}{2} \sum_{q=1}^{N_r} |h_{qi} - h_{qj}|^2} \right) \quad (18)$$

其中, h_{qi} 和 h_{qj} 是 2 个非负、独立且服从式 (3) 的随机变量。令 $u_q = |h_{qi} - h_{qj}|$, $r_q = u_q^2$, $v = \sum_{q=1}^{N_r} r_q$, 根据 2 个非负、独立随机变量差值的性质^[15-16], 结合式 (3) 和文献 [17], 可求得 u_q 的 PDF 为

$$f_{u_q}(u_q) = \frac{\xi^4 A^2}{2 h_w A_0} \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{n_1=1}^{\beta} \sum_{n_2=1}^{\beta} \psi(k, n_1, n_2) \quad (19)$$

其中, k, n_1, n_2 都为非负整数, 表示级数求和的项, $\psi(k, n_1, n_2)$ 表示为

$$\begin{aligned} \psi(k, n_1, n_2) &= \frac{a_{n_1} a_{n_2}}{k!} \times \\ &\times \left[\frac{\alpha \beta}{(g\beta + \Omega') h_w A_0} \right]^k \left(\frac{\alpha \beta}{g\beta + \Omega'} \right)^{-\frac{2\alpha + n_1 + n_2 - 2}{2}} \times \\ &\times C_{5,5}^{3,4} \left[1 \left| \begin{matrix} 0, k+1-\xi^2, k+1-\alpha, k+1-n_1, \xi^2 \\ \xi^2-1, \alpha-1, n_2-1, k-\xi^2, k \end{matrix} \right. \right] \end{aligned} \quad (20)$$

r_q 的 PDF 为

$$f_{r_q}(r_q) = \frac{\xi^4 A^2}{4 h_w A_0} \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{n_1=1}^{\beta} \sum_{n_2=1}^{\beta} \psi(k, n_1, n_2) \cdot r_q^{\frac{k-1}{2}} \quad (21)$$

所以, r_q 的矩母函数 (MGF) 可以写为

$$M_{r_q}(s) = \frac{\xi^4 A^2}{4 h_w A_0} \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{n_1=1}^{\beta} \sum_{n_2=1}^{\beta} \psi(k, n_1, n_2) \frac{\Gamma\left(\frac{k+1}{2}\right)}{s^{\frac{k+1}{2}}} \quad (22)$$

则 v 的 MGF 为

$$M_v(s) = \prod_{q=1}^{N_r} M_{r_q}(s) \quad (23)$$

由柯西乘积可得

$$M_v(s) = \sum_{k=0}^{\infty} \phi^{(N_r)} s^{-\frac{k+N_r}{2}} \quad (24)$$

其中, $\phi^{(N_r)}$ 表示 ϕ 的 N_r-1 次卷积, ϕ 的表达式为

$$\phi = \frac{\xi^4 A^2}{4h_w A_0} \sum_{n_1=1}^{\beta} \sum_{n_2=1}^{\beta} \psi(k, n_1, n_2) \Gamma\left(\frac{k+1}{2}\right) \quad (25)$$

对式(24)进行逆拉普拉斯变换可得 v 的 PDF 为

$$f_v(v) = \sum_{k=0}^{\infty} \phi^{(N_r)} \frac{v^{\frac{k+N_r-2}{2}}}{\Gamma\left(\frac{k+N_r}{2}\right)} \quad (26)$$

综上所述,将 l 检错为 l' 的 $P_r(l \rightarrow l')$ 为

$$P_r(l \rightarrow l') = \int_0^{\infty} Q\left(\frac{1}{N_r} \sqrt{\frac{\gamma}{2}} v\right) f_v(v) dv \quad (27)$$

由于

$$\int_0^{\infty} x^{\frac{\varphi-1}{2}} \operatorname{erfc}(b\sqrt{x}) dx = 2 \frac{\Gamma\left(\frac{\varphi+2}{2}\right)}{(\varphi+1)b^{\frac{\varphi+1}{2}} \sqrt{\pi}} \quad (28)$$

可求得空间域 APEP 为

$$P_r(l \rightarrow l') = \sum_{k=0}^{\infty} \phi^{(N_r)} \frac{\Gamma\left(\frac{k+N_r+1}{2}\right) (2N_r)^{k+N_r}}{\sqrt{\pi} (k+N_r) \Gamma\left(\frac{k+N_r}{2}\right) (\gamma)^{\frac{k+N_r}{2}}} \quad (29)$$

下面证明式(29)中无穷级数的收敛性。APEP 级数求和项可以表示为

$$P_k = \phi^{(N_r)} \frac{\Gamma\left(\frac{k+N_r+1}{2}\right) (2N_r)^{k+N_r}}{\sqrt{\pi} (k+N_r) \Gamma\left(\frac{k+N_r}{2}\right) (\gamma)^{\frac{k+N_r}{2}}} \quad (30)$$

则

$$\frac{P_{k+1}}{P_k} = \frac{(2N_r) (k+N_r) \Gamma\left(\frac{k+N_r+2}{2}\right) \Gamma\left(\frac{k+N_r}{2}\right)}{(\gamma)^{1/2} (k+N_r+1) \left[\Gamma\left(\frac{k+N_r+1}{2}\right)\right]^2} \times$$

$$\left[\frac{\alpha\beta}{h_w A_0 (g\beta + \Omega') (k+1)} \times \frac{\Gamma\left(\frac{k+2}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{k+1}{2}\right)} \right]^{N_r} \times$$

$$\left(\sum_{n_1=1}^{\beta} \sum_{n_2=1}^{\beta} \frac{G_{5,5}^{3,4} \left[1 \left| \begin{matrix} 0, k+2-\xi^2, k+2-\alpha, k+2-n_1, \xi^2 \\ \xi^2-1, \alpha-1, n_2-1, k+1-\xi^2, k+1 \end{matrix} \right. \right]}{G_{5,5}^{3,4} \left[1 \left| \begin{matrix} 0, k+1-\xi^2, k+1-\alpha, k+1-n_1, \xi^2 \\ \xi^2-1, \alpha-1, n_2-1, k+1-\xi^2, k \end{matrix} \right. \right]} \right)^{N_r} \quad (31)$$

因为对于所有的 k 值,2 个 Meijer-G 函数的比值总是非零实数,且分母中 k 的阶数比分子中 k 的阶数多 1,则 $k \rightarrow \infty$ 时, $P_{k+1}/P_k \rightarrow 0$ 。因此,式(29)中的无穷

级数绝对收敛。

在不同的湍流强度、指向误差参数 ξ 、SNR 和 N_r 条件下空间域 APEP 与 k 的关系如图 2 所示。可以看出,随着 k 值的增大, APEP 趋于收敛,且 SNR 越高、 N_r 数量越多、湍流强度和指向误差越弱, APEP 收敛得越快。考虑到不同参数对 OGQSM 系统的影响,本文将 k 值设为 15,此时由 k 引起的误差可忽略不计,从而可以使用 Matlab 计算 APEP。

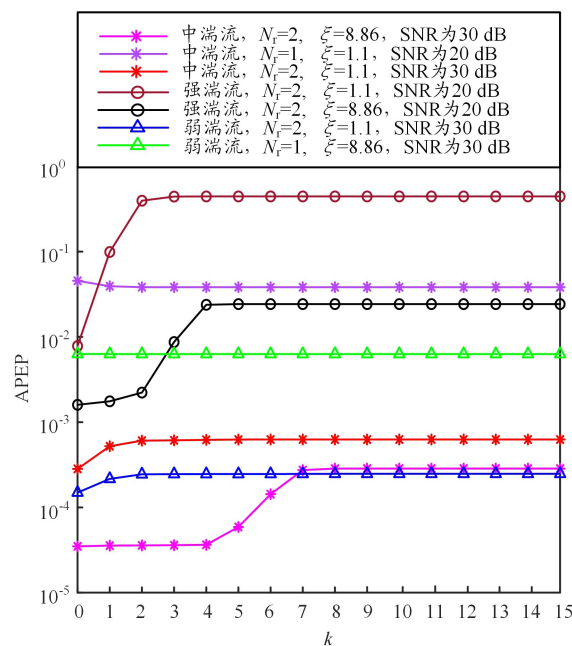


图2 不同条件下空间域 APEP 表达式的收敛性验证

4 仿真结果与数值分析

为了验证 OGQSM 系统的性能,本文进行了蒙特卡罗仿真实验。假设接收端已知完整的信道状态信息,发射光学天线间的距离超过其空间相干距离以确保信道间相互独立。考虑 3 种不同的大气折射率结构参数: 1.2×10^{-13} 、 1×10^{-13} 和 $2.8 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$,因此使用 $(\alpha=2.296, \beta=2)$ 、 $(\alpha=4.2, \beta=3)$ 和 $(\alpha=8, \beta=4)$ 分别代表强、中和弱湍流,系统其它仿真参数如表 2^[18]所示。

4.1 不同调制方案的频谱效率与误码性能

不同调制方案的频谱效率如表 3 所示。可以看出:相较于 OSM 和 OQSM 方案, OGQSM 方案的发射光学天线数不必再为 2 的整数次幂,系统设计更加灵活;相较于 OGSM 方案, OGQSM 方案携带了更多的空间域比特,提高了系统频谱效率。调制阶数 $M=4$ 时不同调制方案的频谱效率如图 3 所示。可以看出,当光学天线数量 $N_t=16, N_a=2$ 时, OSM、OQSM 和 OGSM 方案可实

李进,赵辉,马薇雯,等:自由空间光通信中的光广义正交空间调制技术

表2 系统参数

参数	数值
波长/nm	785
FSO 链路长度/km	1
1 km 处光束半径/m	2.5
光束发散角/mrad	2
$\phi_1-\phi_2$	$\pi/2$
系统光学效率	0.85
光电探测器的响应度	0.5
耦合到视距分量的散射功率	0.597 6

表3 不同调制方案的频谱效率

方案名称	频谱效率/bpcu
OSM	$\log_2 N_t + \log_2 M$
OQSM	$2\log_2 N_t + \log_2 M$
OGSM	$\log_2 C(N_t, N_a) + N_a \log_2 M$
OGQSM	$2[\log_2 C(N_t, N_a)] + N_a \log_2 M$

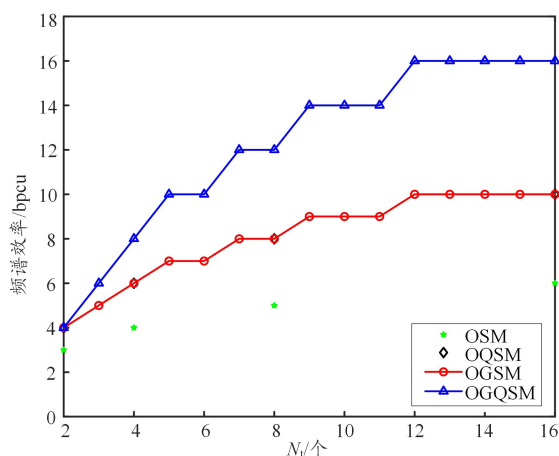


图3 $M=4$ 时不同光空间调制方案的频谱效率对比

现的频谱效率分别为 6、10 和 10 bpcu, 而 OGQSM 方案可实现的频谱效率为 16 bpcu。因此,相较于其它光空间调制方案,OGQSM 方案明显提高了系统的频谱效率。

当 $N_t=4, N_r=4, \xi=3.33$, 湍流强度为弱湍流, $\eta=10$ bpcu 时, OSM、OQSM、OGSM 和 OGQSM 方案的误码性能对比如图 4 所示。其中, OSM 采用 256QAM; OQSM 采用 64QAM; OGSM 采用 16QAM, 每个符号周期激活 2 根发射光学天线; OGQSM 采用 4QAM, 每个符号周期激活 3 个发射光学天线。从图 4 可以看出,随

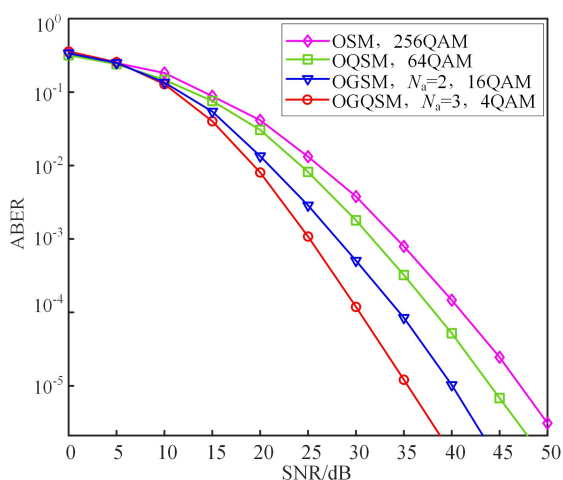


图4 $\eta=10$ bpcu 时,不同调制方案误码性能对比

着 SNR 的增大, OGQSM 方案的 ABER 始终优于其它调制方案。这是因为在相同的频谱效率情况下,相较于 OSM、OQSM 和 OGSM 方案, OGQSM 方案使用了更多的空间索引引位比特, 使得系统在信号域使用了更低阶的 QAM 调制, 提升了误码性能。由此可知, 在系统发射机与接收机数量一定时, 相较于其它调制方案, 本文所提的 OGQSM 方案能提供更高的频谱效率和更优的误码性能。

4.2 OGQSM 系统误码性能分析

当 $\xi=3.33, N_t=4, N_r=4, \alpha=8, \beta=4$ 时, 不同频谱效率 η 情况下 OGQSM 系统的理论 ABER 与蒙特卡罗仿真 ABER 如图 5 所示。可以看出, $\eta=8$ bpcu 的 OGQSM 系统误码性能最好, 在 ABER 为 10^{-5} 时, 相较于 $\eta=10$ bpcu 和 $\eta=12$ bpcu 时, $\eta=8$ bpcu 的 OGQSM 系统的信噪比增益分别约为 3.5 dB 和 5.5 dB。这是因为 $\eta=10$ bpcu 的 OGQSM 系统虽然与 $\eta=8$ bpcu 的 OGQSM 系统同样

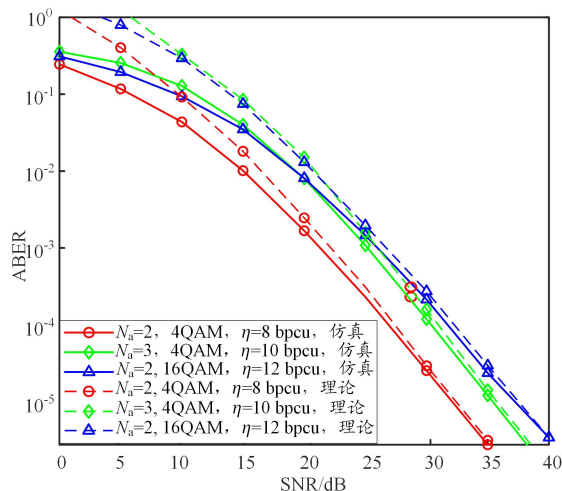


图5 不同频谱效率 η 下 OGQSM 系统的误码性能对比

采用 4QAM 调制,但是 $\eta=8$ bpcu 的 OGQSM 系统只使用 2 条光链路,而 $\eta=10$ bpcu 的 OGQSM 系统在每个传输周期使用了 3 条光链路,增加了光干扰,造成 ABER 变大。而 $\eta=12$ bpcu 的 OGQSM 系统采用了 16QAM 调制,与 $\eta=8$ bpcu 的 OGQSM 系统相比,虽然其系统的频谱效率得到了提高,但随着调制符号阶数的增加,调制符号矢量间的间距减小,导致了更多的信号域检测错误。另外,在低 SNR 时,系统受噪声影响较大,导致计算存在误差;在高 SNR 时,理论 ABER 上界与蒙特卡罗仿真结果相吻合,表明了理论推导的正确性。

当 $N_t=4, N_r=4, N_a=4$, 调制方式为 4QAM 时,中湍流条件下指向误差参数 ξ 对 OGQSM 系统误码性能的影响如图 6 所示。可以看出,当 ξ 分别为 0.43 和 0.63,即使在高 SNR 时,系统的 ABER 也始终小于 10^{-2} ,此时 ξ 严重限制了 OGQSM 系统的通信性能;当 $\xi < 1$ 时,其值的微小降幅将导致系统误码性能发生大幅度的恶化;当 $\xi > 1$ 时,其值的微小降幅并不会对系统的误码性能产生较大影响。当 ABER 为 10^{-6} 时,相较于 $\xi=22.92$ 时的系统 SNR, $\xi=11.23$ 时系统的 SNR 损失约为 3 dB。由此可知, ξ 对于 OGQSM 系统通信性能的影响不可忽略,对于越弱的指向误差(ξ 越高),OGQSM 系统的误码性能越好。

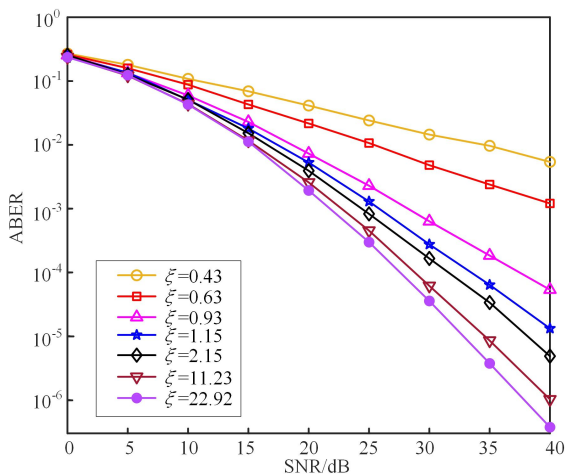


图 6 指向误差参数 ξ 对系统误码性能的影响

当 $N_t=4, N_a=2, \xi=11.23$, 调制方式为 4QAM 时,不同湍流条件下系统接收光学天线数量 N_r 对 OGQSM 系统误码性能的影响如图 7 所示。可以看出,随着 N_r 逐渐减小,OGQSM 系统的误码性能恶化明显,而对于相同的 N_r 值,随着湍流强度的增加,OGQSM 系统的误码性能恶化轻微。这说明系统接收光学天线数量对误

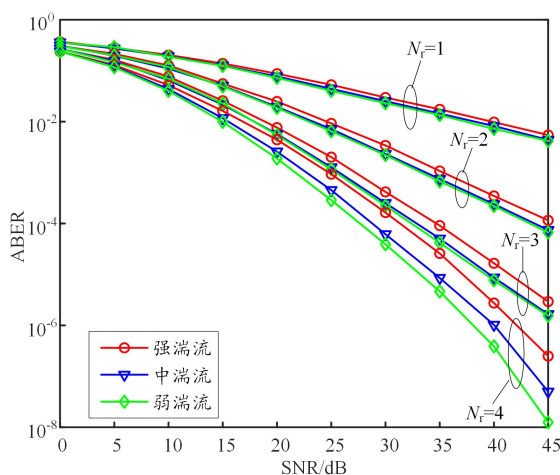


图 7 接收光学天线数量 N_r 对 OGQSM 系统误码性能的影响

码性能的影响明显高于湍流强度对系统误码性能的影响。由此可知,在实际应用中,根据系统实施成本适当增加 OGQSM 系统的接收光学天线数量,能极大地降低大气湍流效应的影响,有效改善系统的误码性能,其原因是接收端会将多个互相独立的衰落信号进行合并处理,这为系统提供了接收分集增益。

5 结束语

本文针对 FSO 通信中现有的 OSM 技术频谱效率受限、误码性能不理想等问题,提出了一种新型 OGQSM 技术。该技术在同相和正交域同时激活多根发射光学天线来发送调制信号的实部和虚部,增加了空间域映射比特数,从而提高了系统的频谱效率。此外,分别从空间域和信号域推导了 OGQSM 系统在具有指向误差和路径损耗的 Malaga 湍流信道下的理论 ABER 上界表达式,并仿真验证了理论推导的正确性。仿真结果表明:频谱效率相同时,相较于现有的 OSM、OQSM 和 OGSM 方案,OGQSM 方案能够有效改善系统误码性能;大气湍流和指向误差会导致系统接收功率减弱,进而降低系统的可靠性;增加接收光学天线的数量会提高系统接收分集增益,有效降低大气湍流效应影响,使系统得到更好的误码性能。

参考文献:

- [1] FARID A A, HRANILOVIC S. Outage capacity optimization for free-space optical links with pointing errors[J]. Journal of Lightwave technology, 2007, 25(7): 1702-1710.
- [2] BHATNAGAR M R, GHASSEMLOOY Z. Performance analysis of gamma-gamma fading FSO MIMO links with pointing errors[J]. Journal of Lightwave technology, 2016, 34(9): 2158-2169.
- [3] MESLEH R, ELGALA H, HAAS H. Optical spatial modulation [J].

李进,赵辉,马薇雯,等:自由空间光通信中的光广义正交空间调制技术

Journal of Optical Communications and Networking, 2011, 3(3): 234–244.

[4] ÖZBILGIN T, KOCA M. Optical spatial modulation over atmospheric turbulence channels [J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(11): 2313–2323.

[5] 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): 37–45.

[6] 王惠琴,杨顺信,张悦,等. 大气激光通信中的完全光广义空间调制[J]. 光学学报, 2020, 40(13): 7–13.

[7] CELIK Y, COLAK S A. Quadrature spatial modulation sub-carrier intensity modulation (QSM-SIM) for VLC[J]. Physical Communication, 2020, 38: 45–55.

[8] BHOWAL A, KSHETRIMAYUM R S. Advanced optical spatial modulation techniques for FSO communication [J]. IEEE Transactions on Communications, 2020, 69(2): 1163–1174.

[9] 黎赛,杨亮,崔琪楣,等. RIS 辅助的混合 RF/THz 系统性能分析[J]. 通信学报, 2022, 43(1): 49–58.

[10] ANSARI I S, YILMAZ F, ALOUINI M S. Performance analysis of free-space optical links over Málaga (M) turbulence channels with pointing errors [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 15

(1): 91–102.

[11] 王惠琴,侯文斌,彭清斌,等. 基于 K 均值聚类的 SPPM 分步分类检测算法[J]. 通信学报, 2022, 43(1): 161–171.

[12] YU S, GENG C, ZHONG J, et al. Performance analysis of optical spatial modulation over a correlated gamma-gamma turbulence channel[J]. Applied Optics, 2022, 61(8): 2025–2035.

[13] BHOWAL A, KSHETRIMAYUM R S. Advanced spatial modulation systems[M]. [s.l.]: Springer, 2021.

[14] 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.

[15] 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): 1–16.

[16] PAPOULIS A, PILLAI S U. Probability, random variables, and stochastic processes[M]. [s.l.]: Tata McGraw-Hill Education, 2002.

[17] PRUDNIKOV A P, BRYCHKOV Y A, MARICHEV O I. Integrals and Series [M]. New York: Gordon and Breach, 1990.

[18] 柯熙政,王晨昊,陈丹. Malaga 大气湍流信道下副载波调制系统相