

doi:10.13756/j.gtxyj.2026.260047.

专题:面向6G的无线光通信

赵伦,刘天凯,李依桐,等.基于BWSIDM的概率整形FSO传输[J].光通信研究,2026(2):260047.

Zhao L, Liu T K, Li Y T, et al. Probability Shaping FSO Transmission based on BWSIDM[J]. Study on Optical Communications, 2026(2):260047.

基于BWSIDM的概率整形FSO传输(特邀)

赵伦^{1,2},刘天凯¹,李依桐³,吴廷伟¹,胡智力¹,熊文瑞¹,郭磊^{1,4}

(1. 重庆邮电大学通信与信息工程学院,重庆 400065; 2. 喀什地区电子信息产业技术研究院,新疆喀什 844000;
3. 中国电子科技集团公司第五十四研究所北京研发中心,北京 100043; 4. 东北大学计算机科学与工程学院,沈阳 110169)

摘要:【目的】针对传统基于比特加权分布匹配(BWDM)的概率整形(PS)方案虽可提升系统抗湍流性能,但存在标志比特错误的问题,文章提出了一种基于比特加权和同步反转分布匹配(BWSIDM)的PS 16阶正交振幅调制(QAM)自由空间光(FSO)传输方案。【方法】在发送端,采用3位标志比特标记比特分组的反转状态,并引入并行分组的同步反转机制以降低标志比特开销(OH);在接收端,通过标志比特中的多数比特值确定分组的反转状态,从而降低标志比特传输错误的概率。【结果】在不同湍流强度、传输距离及信道衰减条件下,基于BWSIDM的PS方案性能均优于基于BWDM的PS方案。在背靠背(BTB)传输中,对于56 Gbit/s 16QAM信号,当误码率(BER)分别为 10^{-3} 和 10^{-4} 时,BWSIDM与BWDM方案相比,光信噪比(OSNR)分别提升了0.99和1.05 dB。在弱湍流条件下的FSO传输中,当BER分别为 10^{-4} 和 5×10^{-5} 时,BWSIDM与BWDM方案相比,传输距离分别提升了约59.4和76.1 m。【结论】基于BWSIDM的PS方案不仅具有更强的抗噪声性能,还能有效提升大气湍流环境下FSO通信系统的传输距离与抗衰减性能,具有良好的应用前景。

关键词:自由空间光通信;概率整形;比特加权和同步反转分布匹配;大气湍流

中图分类号:TN929

文献标志码:A

Probability Shaping FSO Transmission based on BWSIDM

ZHAO Lun^{1,2}, LIU Tiankai¹, LI Yitong³, WU Tingwei¹, HU Zhili¹, XIONG Wenrui¹, GUO Lei^{1,4}

(1. School of Communications and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications,

Chongqing 400065, China; 2. Kash Institute of Electronics and Information Industry, Kashi 844000, China;

3. Beijing Research and Development Center, The 54th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation

(CETC54), Beijing 100043, China; 4. School of Computer Science and Engineering, Northeastern University,

Shenyang 110169, China)

Abstract: 【Objective】 To address the problem that the traditional Probabilistic Shaping (PS) scheme based on Bit-Weighted Distribution Matching (BWDM) is vulnerable to flag bit errors despite improving the anti-turbulence performance of the system, this paper proposes a probabilistically shaped 16 Quadrature Amplitude Modulation (QAM) Free-Space Optical (FSO) transmission scheme based on Bit-Weighted and Synchronous Inversion Distribution Matching (BWSIDM). 【Methods】 At the transmitter, three flag bits are used to mark the inversion state of each bit group, and a synchronous inversion mechanism for parallel groups is introduced to reduce the Overhead (OH) of flag bits. At the receiver, the inversion state of each group is determined by the majority value of the flag bits, thereby reducing the probability of transmission errors in the flag bits. 【Results】 The performance of the PS scheme based on BWSIDM is superior to that based on BWDM under different turbulence intensities, transmission distances, and channel attenuations. For Back-to-Back (BTB) transmission of 56 Gbit/s 16QAM signals, the Optical Signal-to-Noise Ratio (OSNR) of the BWSIDM scheme is improved by 0.99 and 1.05 dB compared with the BWDM scheme at Bit Error Rate (BER) of 10^{-3} and 10^{-4} , respectively. For FSO transmission under weak turbulence conditions, the transmission distance of the BWSIDM scheme is increased by approximately 59.4 and 76.1 m relative to the BWDM scheme at BER of 10^{-4} and 5×10^{-5} , respectively. 【Conclusion】 The PS scheme based on BWSIDM not only has stronger anti-noise performance but also effectively improves the transmission distance and anti-attenuation performance of the FSO communication system in an atmospheric turbulence environment, demonstrating the application prospects.

Key words: FSO communication; PS; BWSIDM; atmospheric turbulence

收稿日期:2026-02-10; 修回日期:2026-02-28; 纸质出版日期:2026-04-10

基金项目:新疆维吾尔自治区自然科学基金资助项目(2024D01A16);国家自然科学基金资助项目(62025105, 62301097)

作者简介:赵伦(1987-),男,湖北孝感人。讲师,博士,主要研究方向为无线光通信。

通信作者:李依桐,高级工程师。E-mail:ytongm@163.com

© Editorial Office of *Study on Optical Communications*. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

0 引言

随着移动宽带密集型业务的快速普及,以及数字视频、高清智能网络协议电视、云计算、虚拟现实和人工智能等各类网络应用的不断涌现,用户对通信容量提出了日益严苛的要求^[1-2]。自由空间光(Free-Space Optical, FSO)通信凭借低功耗、频谱免授权、方向性强和传输速率高等优势,近年来已成为研究热点。然而,大气湍流会导致光传输过程中的折射率扰动。高阶正交幅度调制(Quadrature Amplitude Modulation, QAM)信号经过FSO信道传输后会受到严重干扰,导致系统误码率(Bit Error Rate, BER)升高,传输性能下降^[3-4]。

概率整形(Probabilistic Shaping, PS)技术可以重塑星座的概率分布,降低平均传输功率,缓解大气湍流引起的光强波动,从而提高FSO通信的性能和传输距离^[5-9]。2016年,Schulte等人^[10]提出了经典的恒定成分分布匹配(Constant Component Distribution Matching, CCDM)方案,通过一个固定长度的匹配器,将遵循独立伯努利(1/2)分布的输入位转换成具有期望分布的输出符号序列。然而,CCDM方案会不可避免地产生相当大的处理复杂性。近年来,研究提出了基于比特加权分布匹配(Bit-Weighted Distribution Matching, BWDM)的PS方案,其计算复杂度较低^[11-14]。然而,如果标志比特在传输过程中发生错误,会导致相应分组的错误反转,从而提高系统BER。

本文的主要工作和贡献如下:

①本文提出了一种基于比特加权和同步反转分布匹配(Bit-Weighted and Synchronous Inversion Distribution Matching, BWSIDM)的PS-16QAM-FSO传输方案,旨在提高FSO信号在大气湍流中的传输性能。传统基于BWDM方案的PS方案可以提高系统的抗湍流性能,但是容易受到标志比特错误的影响。BWSIDM方案采用同步反转策略,即决定星座分布的前两行同时满足一定条件时才执行比特反转。同时,采用3位标志比特标记分组的反转状态,可有效降低现有比特加权方案中单个标志比特的传输错误导致的BER提高。在接收端,通过标志比特中的多数比特值确定分组的反转状态,以降低信号在传输过程中标志比特错误的概率。

②仿真实验结果表明,与现有BWDM方案相比,本文所提基于BWSIDM的PS方案不仅增强了通信系统的抗噪声能力,还能有效提升系统在大气

湍流环境下的传输距离与抗衰减性能,表现出显著优势。

1 基本原理

本文所提BWSIDM方案采用同步反转策略,即决定星座分布的前两行同时满足一定条件时才执行比特反转。同时,采用3位标志比特标记分组的反转状态,可有效降低现有比特加权方案中单个标志比特的传输错误导致的BER提高。在接收端,通过标志比特中的多数比特值确定分组的反转状态,以降低信号在传输过程中标志比特错误的概率。

在16QAM调制中,符号点的功率层级由其星座图上的位置决定:内层点的功率最小,中间层点的功率次之,外层点的功率最大,分别对应 S_1 、 S_2 和 S_3 3个功率级,如图1(b)所示。PS编码过程如图1(a)所示。首先将Matlab软件生成的长度为 L 的串行伪随机二进制序列(Pseudo-Random Binary Sequence, PRBS)转换为长度分别为 L_1 、 L_1 、 L_2 和 L_2 的4个并行序列。由图1(b)可知星座分布由前两个序列决定,因此,本文对前两个序列进行比特加权和同步反转处理,得到长度均为 L'_1 的两个序列。图1(c)为基于BWSIDM方案的PS-16QAM的编码过程示例,将前两个长度为 L_1 的序列分别划分为若干长度为 k 的分组,后续BWSIDM处理流程如下:

$$\text{若满足} \begin{cases} \text{sum}(A_i^1) > \frac{k}{2} \\ \text{sum}(A_i^2) > \frac{k}{2} \end{cases}, \text{则在} \begin{cases} A_i^1 (i=1, 3, 5, \dots) \\ A_{i-1}^2 (i=2, 4, 6, \dots) \end{cases}$$

前添加标志比特“000”,并对 A_i^1 和 A_i^2 进行比特反转操作,式中: A_i^1 为第1个序列的第 i 组比特; A_i^2 为第2个序列的第 i 组比特; $\text{sum}(A_i^1)$ 和 $\text{sum}(A_i^2)$ 分别为对 A_i^1 和 A_i^2 中的比特求和,即分组的权重; k 为分组长度。

否则,在 $\begin{cases} A_i^1 (i=1, 3, 5, \dots) \\ A_{i-1}^2 (i=2, 4, 6, \dots) \end{cases}$ 前添加标志比特“111”,且 A_i^1 和 A_i^2 保持不变。

进一步,为实现星座点映射,经BWSIDM方案处理后的4个序列长度需保持一致,即 $L'_1=L_2$, $L'_1=\lceil L_1 + \frac{3L_1}{2k} \rceil$,从而将每一列的4个比特映射为1个16QAM星座点,式中, $\lceil \cdot \rceil$ 为向上取整。据此可推导出 L_1 和 L_2 的长度分别为

$$L_1 = \left\lfloor \frac{2k}{8k+6} L \right\rfloor, L_2 = \left\lfloor \frac{2k+3}{8k+6} L \right\rfloor. \quad (1)$$

如图 1(b)所示,前两行序列映射为 16QAM 的前缀码,因此 BWSIDM 处理后前缀码中“00”的出现概率得到显著提升,进而实现 PS 的目标。 L_1 中出现比特“0”的概率 P_0 为

$$P_0 = \frac{1}{2^{k+1}} \left[\sum_{t=\lfloor \frac{k}{2} \rfloor}^k \frac{t+1.5}{k+1.5} C_k^t + \sum_{t=0}^{\lfloor \frac{k}{2} \rfloor} \frac{t}{k+1.5} C_k^t + \sum_{t=\lfloor \frac{k}{2} \rfloor}^k \frac{2t}{k+1.5} C_k^t \right], \quad (2)$$

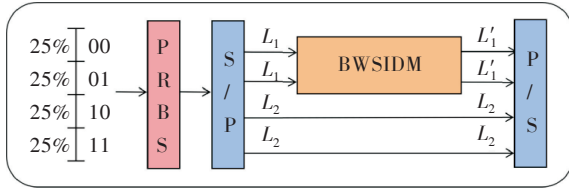
式中： $\lfloor \cdot \rfloor$ 为向下取整； C_k^t 为从 k 个不同元素中取出 t ($t \leq k$) 个元素的所有组合的个数。

相较于传统的单独反转方式,本文采用的并行分组的同步反转机制可将标志比特的开销(Overhead, OH)降低一半,其 OH 计算公式为

$$OH = \frac{3L_1}{2k}. \quad (3)$$

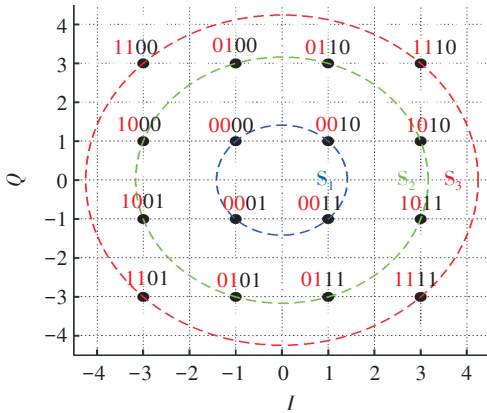
在接收端,通过提取标志比特中的多数比特值来判定分组的反转状态,以此完成接收信号的恢复。采用 3 位标志比特的设计可以有效降低信号在传输过程中标志比特错误的概率,进一步提升解码的准确性。本方案选用 3 位标志比特,是二值状态判决、信道误码特性与传输 OH 平衡的最优选择:3 位为满足多数判决的最小奇数位,可实现单比特错误完全容错,匹配 FSO 湍流信道单比特随机错误的特征;设单比特错误概率为 p , 3 位标志比特判决错误概率为 $3p^2-2p^3$, 而若选择 5 位标志比特判决错误概率为 $10p^3-15p^4+6p^5$, 数量级降低较少,而与 3 位标志比特相比 OH 却增加了 67%, 与同步反转机制的 OH 优化效果相悖。3 位标志比特判决错误概率较 1 位标志比特抗错能力提升 3 个数量级,且不会因位数过多增加额外 OH, 与同步反转机制协同实现低 OH 和高抗错的设计目标,有效降低了标志比特传输错误概率,提升了解码准确性。

通过调整分组长度 k 的取值,星座点的符号率分布也会发生相应变化,进而实现不同程度的整形效果。如图 2 所示,本文以 $k=\{3, 7, 11, 15\}$ 为例,给出了 PS-16QAM 各个星座点的概率分布。由图可清晰观察到,随着 k 值的减小,系统的整形程度呈现显著提升的趋势。这一现象的原因在于: k 值越小,序列被划分的分组数量越多,对应插入的标志比特也随之增加,最终使得比特“0”的出现概率以及前缀码“00”所映射星座点的概率得以提高,即 16QAM 星座图中内层 S_1 功率能级对应的星座点占比显著增加。



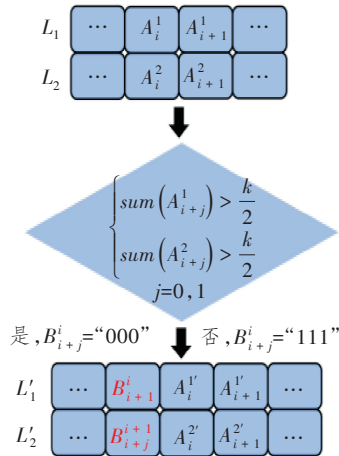
(a) PS 编码过程

(a) PS encoding process



(b) 16QAM 星座标签分布图

(b) 16QAM constellation and label mapping



(c) BWSIDM 编码示例

(c) An example of BWSIDM encoding

注:S/P 和 P/S 分别为串/并转换和并/串转换;Q 为正交分量幅度; I 为同相分量幅度; B_{ij}^i 为 3 位标志比特。

图 1 PS 结构图

Figure 1 The diagram of PS structure

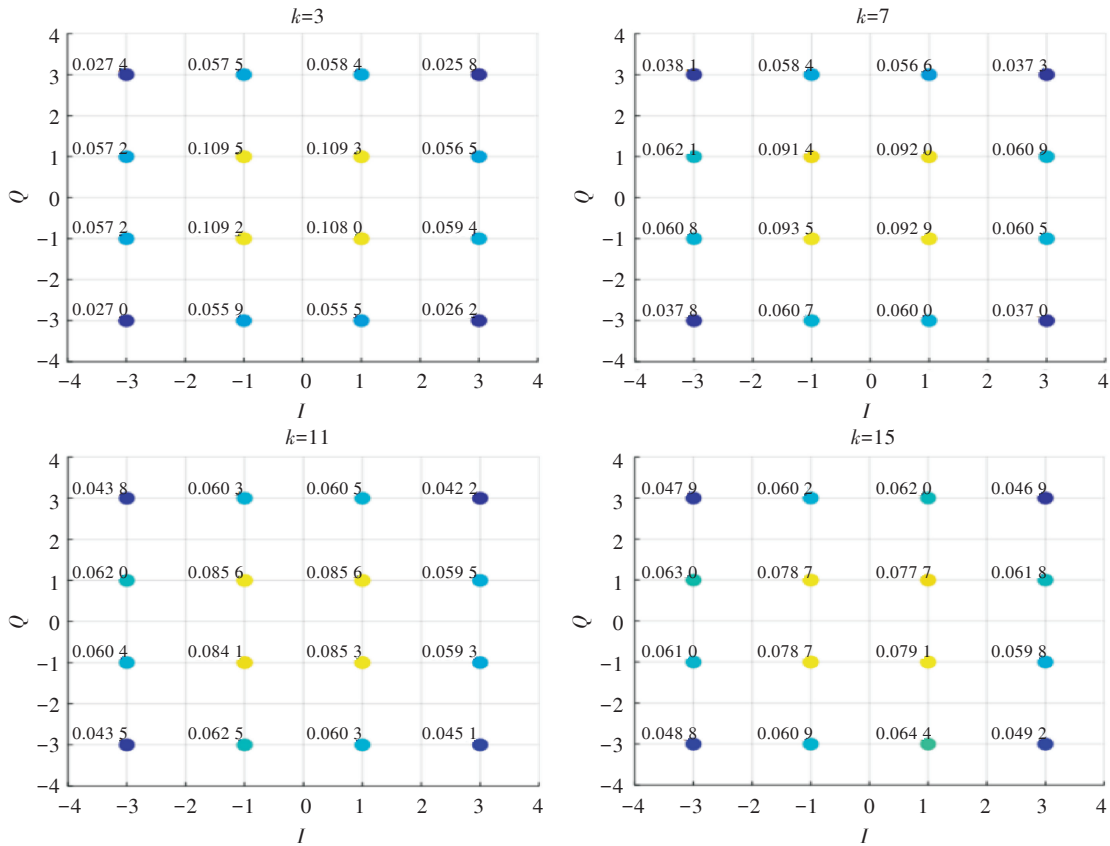


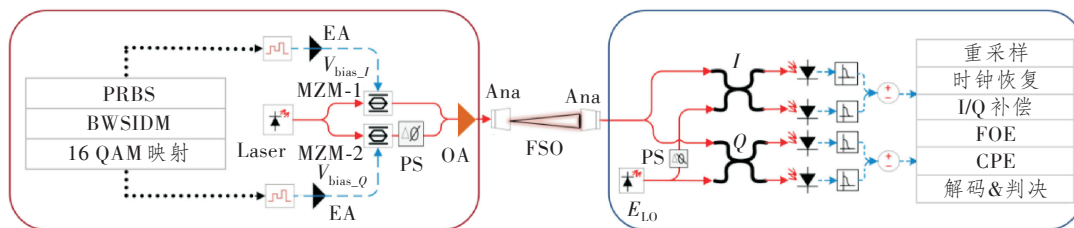
图2 不同 k 值下 PS-16QAM 信号的星座概率分布

Figure 2 The constellation probability distribution of PS-16QAM signal under different k values

2 仿真实验设置

图3所示为基于单路 I/Q 调制器生成 16QAM 信号的仿真实验系统架构。在发送端,将 PRBS 的长度设为 840 000。将 Matlab 软件生成的随机均匀二进制序列转换为 4 路并行序列,经 BWSIDM 方案 PS 处理后,映射得到 PS-16QAM 电域基带信

号。光源采用线宽为 100 kHz 的连续波(Continuous Wave, CW)激光器,输出光功率为 10 dBm,其产生的波长为 1 550 nm 的光信号被送入 I/Q 调制器。通过调节 I/Q 调制器的直流偏置电压,使集成的两个 Mach-Zehnder 调制器(MZM-1 和 MZM-2)均工作于最小功率点,且两个调制器的半波电压均设置为 $V_{\text{bias}_I} = V_{\text{bias}_Q} = 5 \text{ V}$ 。



..... 二进制信号 ———> 光信号 - - - -> 电信号

注:EA 为电放大器;OA 为光放大器;Ana 为光学天线; E_{L0} 为本振激光器;FOE 为频偏估计;CPE 为载波相位估计。

图3 基于 BWSIDM 的 PS 相干光通信系统仿真图

Figure 3 Simulation diagram of the coherent optical communication system based on BWSIDM-PS

将 I/Q 调制器的输出光信号放大后输入到 FSO 信道。本文使用 Gamma-Gamma 湍流模型来模拟弱湍流(Weak Turbulence, WT)、中湍

流(Moderate Turbulence, MT)和强湍流(Strong Turbulence, ST)条件。FSO 的信道仿真参数如表 1 所示。

表 1 FSO 信道仿真参数

Table 1 Parameters for FSO channel simulation

仿真参数	参数值
比特率/Gbit/s	56
光波长/nm	1 550
激光器线宽/kHz	100
路径损耗/dB/km	7
光束发散角/mrad	2
发射孔径直径/cm	5
接收孔径直径/cm	20
闪烁模型	Gamma-Gamma
	5×10^{-15} WT
折射率结构常数/ $m^{-2/3}$	5×10^{-14} MT
	5×10^{-13} ST

在接收端,采用激光源作为本振(Local Oscillator, LO)激光源,产生波长为 1 550.001 nm、线宽为 100 kHz、输出功率为 10 dBm 的 CW 光信号。接收

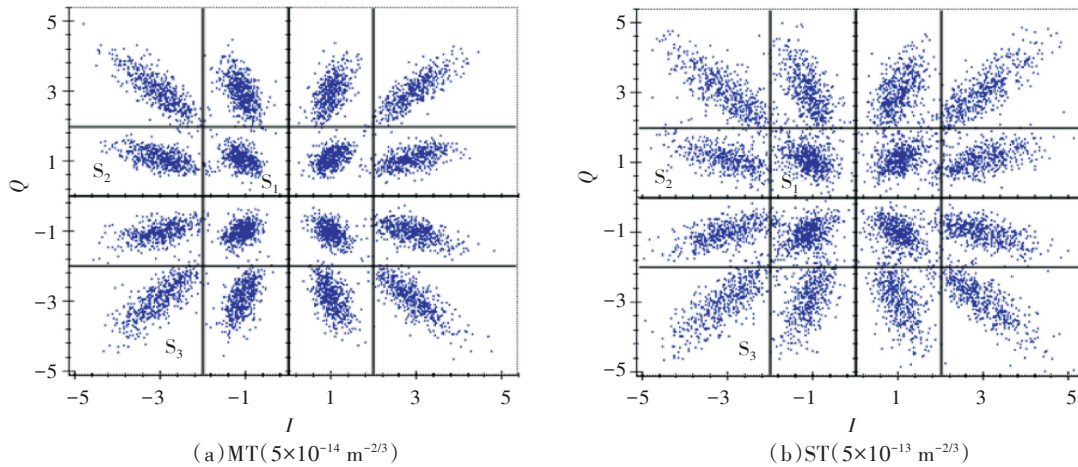


图 4 16QAM 信号经过 1 800 m FSO 传输后的星座分布

Figure 4 Constellation distributions of a 16QAM signal after 1 800 m FSO transmission

3 结果与讨论

本文将所提 BWSIDM 方案与现有 BWDM 方案进行对比,以验证所提 PS 方案的性能增益。如图 5 所示,在背靠背(Back-to-Back, BTB)传输场景下,可观察到在整个光信噪比(Optical Signal-to-Noise Ratio, OSNR)范围内, BWSIDM 方案的 BER 始终低于现有 BWDM 方案:当 $BER=10^{-3}$ 时, BWSIDM 方案较 BWDM 方案的 OSNR 提升约 0.99 dB;当 $BER=10^{-4}$ 时,该提升进一步增大至约 1.05 dB。

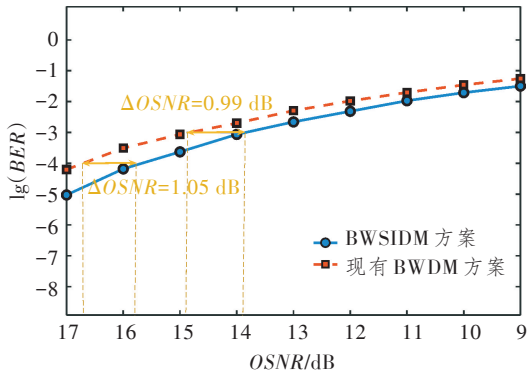
结果表明, BWSIDM 方案具有更强的抗噪声能力,可实现更低的 BER 与更优的系统传输性能。

光信号被送入相干接收模块。该模块由一个 LO、两个相位偏移为 90° 的光混频器以及两路各包含两个光电探测器(Photo Detector, PD)的平衡探测器组成。PS-16QAM 通过离线数字信号处理技术恢复,处理流程包括重采样、时钟恢复、自适应均衡、FOE 和 CPE。

16QAM 星座点按振幅划分为 S_1 、 S_2 和 S_3 3 个功率等级,与图 1 (b)中的功率层级一一对应。图 4 所示为经 1 800 m FSO 信道传输后的 16QAM 星座图,图中黑色实线为 16QAM 信号的最佳决策阈值。由图可知,信号幅值越高,经湍流信道传输后沿半径方向的扩散现象越显著;其中功率级 S_1 的星座点扩散程度并不明显,而功率级 S_2 和 S_3 的星座点扩散已超出最大似然判决算法的阈值范围,进而导致系统 BER 性能下降。此外,大气湍流强度越大,星座点的扩散程度也会越突出。

尤其在高 OSNR 区域, BWSIDM 方案的 BER 下降趋势更为显著,说明该方案在高 OSNR 条件下具备更优异的抗噪声性能,能够提供更稳定和可靠的传输表现。

图 6 所示为在 2 000 m WT FSO 传输场景下, BWSIDM 与现有 BWDM 方案在不同分组大小 k 下的 BER 性能对比。结果表明,随着 k 的增大,两种方案的 BER 均呈逐渐上升趋势,且 BWSIDM 方案的 BER 始终比 BWDM 方案低约 1 个数量级。但在实际应用中, k 并非越小越优: k 越小,意味着分组数量越多,标志比特随之增加,最终会导致系统传输 OH 显著增大。



注: $\Delta OSNR$ 为光信噪比差值。

图5 在不同 OSNR 下现有 BWDM 与 BWSIDM 方案 BER 性能对比

Figure 5 Comparison of BER performance between the existing BWDM and the BWSIDM scheme under different OSNR conditions

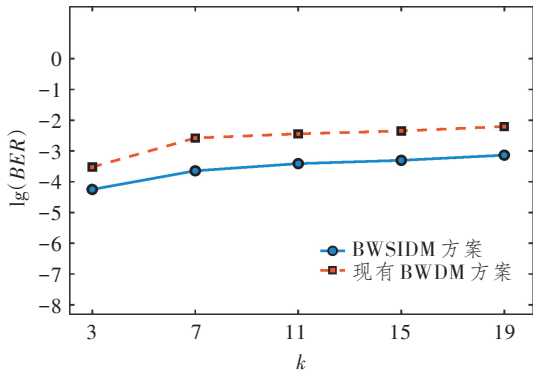


图6 在不同 k 下 BWSIDM 与 BWDM 方案 BER 性能对比

Figure 6 Comparison of BER performance between the BWSIDM and the BWDM scheme under different values of k

图7对比了 $k=3$ 时,BWSIDM与现有BWDM方案在不同传输距离下的BER性能。结果表明,在相同传输距离下,BWSIDM方案的BER性能始终优于BWDM方案,验证了本文所提方案具有更强的抗湍流能力。在WT条件下,当BER分别为 10^{-4} 和 5×10^{-5} 时,BWSIDM方案的传输距离与传统BWDM方案相比,分别提升了约59.4和76.1 m。以上结果表明,本文所提PS方案在MT、ST与WT条件下均能有效延长16QAM信号的传输距离。

图8对比了传输距离为2400 m、分组长度 $k=3$ 时,BWSIDM与现有BWDM方案在不同衰减条件下的BER性能。针对WT信道下的FSO传输场景,当 $BER=5 \times 10^{-4}$ 时,BWSIDM方案的抗衰减能力与BWDM方案相比,提升了约0.46 dB/km。该结果进一步验证了BWSIDM方案具有更强的抗

湍流能力,且在MT和WT条件下其BER性能提升更为显著。

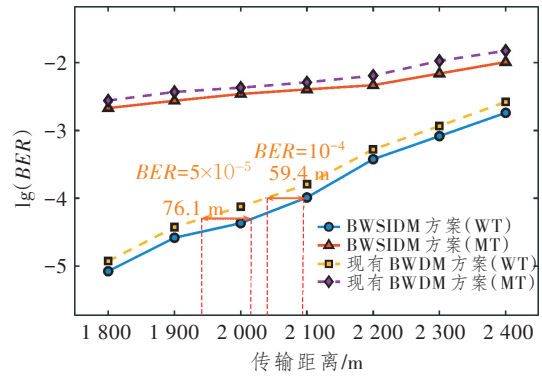


图7 不同传输距离下 BWSIDM 与 BWDM 方案 BER 性能对比

Figure 7 BER performance comparison between the BWSIDM and the BWDM scheme as a function of transmission distance

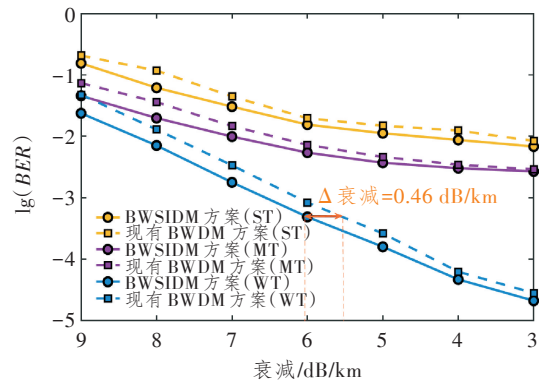


图8 在不同衰减下 BWSIDM 与现有 BWDM 方案 BER 性能对比

Figure 8 Comparison of BER performance between BWSIDM and existing BWDM scheme under different attenuation conditions

4 结束语

本文提出了一种基于BWSIDM方案的PS-16QAM-FSO传输方案,可通过调整分组长度 k 实现不同的PS增益。在BTB传输场景中,BWSIDM方案在高OSNR条件下表现出更强的抗干扰能力:当BER分别为 10^{-3} 和 10^{-4} 时,该方案较现有BWDM方案的OSNR分别提升约0.99和1.05 dB。

在大气湍流传输环境中,BWSIDM方案同样表现出优异性能:在WT条件下,当 $BER=10^{-4}$ 和 5×10^{-5} 时,传输距离分别延长约59.4和76.1 m;当 $BER=5 \times 10^{-4}$ 时,抗衰减能力提升约0.46 dB/km。

综上,采用3个标志比特实现比特同步反转,可

有效降低现有比特加权方案中因引入标志比特而可能导致 BER 升高的风险。此外,基于 BWSIDM 方案的 PS 方案不仅能够提升通信系统的抗噪声性能,还可有效增强大气湍流环境下的传输距离与抗衰减能力,为高速和可靠的 FSO 通信提供充分的技术支撑。

参考文献:

- [1] Park G, Mai V, Lee H, et al. Free - Space Optical Communication Technologies for Next-Generation Cellular Wireless Communications[J]. IEEE Communications Magazine, 2024, 62(3): 24–30.
- [2] Chow C W. Optical Wireless Communication - Recent Progresses and Future Perspectives [J]. Journal of Lightwave Technology, 2026, 44(3): 806–820.
- [3] 朱一鸣, 林显浩, 迟楠, 等. 面向5G/6G移动前传网络的关键技术[J]. 光通信研究, 2025(3):240078.
Zhu Y M, Lin X H, Chi N, et al. Key Technologies for 5G/6G Mobile Fronthaul Network [J]. Study on Optical Communications, 2025(3): 240078.
- [4] Nguyen T V, Pham T V, Dang N T, et al. Performance of Generalized QAM/FSO Systems with Pointing Misalignment and Phase Error over Atmospheric Turbulence Channels [J]. IEEE Access, 2020, 8: 203631–203644.
- [5] Guiomar F P, Lorences - Riesgo A, Ranzal D, et al. Adaptive Probabilistic Shaped Modulation for High-Capacity Free - Space Optical Links[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(23): 6529–6541.
- [6] Chen S, Liu B, Mao Y, et al. Secure Optical 3D Probabilistic Shaping CAP System based on Spherical Constellation Masking [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2020, 32(18): 1171–1174.
- [7] Kang W. A Nonbinary LDPC - Coded Probabilistic Shaping Scheme for a Rayleigh Fading Channel[J]. Entropy, 2022, 24(11): 1649.
- [8] Kong M, Shi J, Sang B, et al. 800 - Gb/s/Carrier WDM Coherent Transmission over 2 000 km based on Truncated PS - 64QAM Utilizing MIMO Volterra Equalizer[J]. Journal of Lightwave Technology, 2022, 40(9): 2830–2839.
- [9] 程婧帆, 蒋林, 何星辰, 等. 基于四维分集辅助的分阶段截断概率整形调制格式[J]. 光学学报, 2025, 45(22): 25–34.
Cheng J F, Jiang L, He X C, et al. Four-Dimensional Set-Partitioning Assisted Staged Truncated Probabilistic Shaping Modulation Format Scheme[J]. Acta Optica Sinica, 2025, 45(22): 25–34.
- [10] Schulte P, Böcherer G. Constant Composition Distribution Matching[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2016, 62(1): 430–434.
- [11] Zhang L, Wang K, Wang C, et al. Demonstration of Real-Time DMT-WDM-PON Employing Probabilistic Shaping based on Intra-Symbol Bit-Weighted Distribution Matching [J]. Journal of Lightwave Technology, 2024, 42(2): 532–540.
- [12] Zheng T, Bian C, Uddin R, et al. Single-Stage Flip PAM - 8 Signal Transmission for W - Band Wireless System[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2026, 38(4): 275–278.
- [13] Yu H, He H, Fan J, et al. A Novel Probabilistic Shaping PAM4 Employing Bit Weight Reconstruction for Optical Interconnection[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2023, 35(20): 1123–1126.
- [14] Zhang L, Yu J, Wang K, et al. Real-Time Intra-Symbol Two-Stage Bit-Class Distribution Matcher-based PS - 64QAM DMT Transceiver for W - Band Wireless Transmission [J]. Journal of Lightwave Technology, 2025, 43(4): 1759–1772.