

## 湍流与相位噪声联合影响下的 16QAM 自适应概率整形

陈丹\*, 艾菲尔, 王睿, 赵沛岩

西安理工大学自动化与信息工程学院, 西安市无线光通信与网络研究重点实验室, 陕西 西安 710048

**摘要** 考虑大气湍流及电调制模块相位噪声对光通信系统性能的影响, 基于低密度奇偶校验(LDPC)编码设计了一种自适应概率整形(PS)的实用自由空间光通信编码调制方案, 实现以比特度量解码速率为目标函数的速率自适应, 采用启发式算法求解  $M$  元正交幅度调制(M-QAM)信号星座点概率质量函数(PMF)分布的最优问题。结果表明: 在弱湍流与相位噪声的联合影响下, 概率整形正交幅度调制(PS-16-QAM)在最优概率分布下的比特度量解码速率比均匀分布 16-QAM 下更逼近香农容量。当湍流强度一定时, 相位噪声增大对低信噪比下选取的 PS 分布影响更大, 当前向纠错译码前的误码率为  $10^{-2}$  时, 提出的 PS 方案与均匀分布编码调制系统相比最高可获得 4.8 dB 的整形增益。

**关键词** 光通信; 自由空间光通信; 湍流衰落; 相位噪声; 概率整形; 速率自适应

中图分类号 TN929.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS231210

## 1 引言

自由空间光(FSO)通信也称作无线光通信, 采用大气信道作为信号传输媒介, 具有大带宽、抗干扰以及方便部署等优点, 被广泛应用于城域网扩展、光纤备份、无线蜂窝网络回程和灾难恢复等多种场景, 在无线通信中拥有“最后一公里”通信的重要意义。自由空间光通信系统的研究对于构建高速光通信系统意义重大<sup>[1-3]</sup>。然而, FSO 通信链路受复杂大气信道的影响非常严重, 大气湍流与恶劣天气会劣化在大气传输中的光信号质量。因此, 设计能够缓解大气信道对光信号传输造成的严重退化, 实现高性能的鲁棒自适应传输方案至关重要。

在固定信噪比(SNR)的高斯信道下, 采用均匀分布(UD)编码调制系统的可达信息速率(AIR)会随着系统调制阶数的上升而下降, 因此, 概率整形(PS)技术是解决高阶编码调制系统 AIR 下降的关键技术之一<sup>[4]</sup>。基于 PS 的编码调制技术, 通过降低高能量星座点发射概率、提高低能量星座点发射概率, 实现对均匀调制星座的概率分布优化, 从而提升星座增益指数(CFM)<sup>[5]</sup>, 获得灵活的频谱效率。PS 是改善光通信系统传输性能、逼近信道容量极限的有效手段。

一些研究工作也证明了 PS 技术可以在短距离内

有效地提高自由空间传输的系统性能<sup>[6-9]</sup>。对于平均功率受限的加性高斯白噪声信道, 当星座基数趋于无穷大时, 概率整形技术相对于均匀正交振幅调制(QAM)的灵敏度增益可达 1.53 dB<sup>[10]</sup>, 这种增强的信噪比(SNR)将导致 SNR 受限的 AIR 增加。在未来的 FSO 通信系统中, 概率整形技术是一种提高频谱效率有前景的选择, 而大气信道中大气湍流效应相对于高速编码调制系统是一种慢衰落过程, 因此针对 FSO 调制编码系统优化信源分布、实现发射端信号星座分布的自适应调整是可行的。

在星座图概率整形中, 常用的方法是根据麦克斯韦-玻尔兹曼(MB)分布生成高斯分布的信源<sup>[11-12]</sup>。2015 年, 德国慕尼黑工业大学先后提出串行架构的固定组成分布匹配器(CCDM)<sup>[13]</sup>和概率幅度整形(PAS)方案<sup>[14]</sup>, 奠定了基于算术编码(AC)方法实现 PS 技术的基础。然而, 基于 AC 的概率整形方法适用于灵活要求较高且阶数超高的概率整形, 复杂度与难度较高。同年, Alvarado 等<sup>[15]</sup>证明了归一化广义互信息(NGMI)是预测软判决比特度量解码后前向纠错(FEC)的误码率(BER)的强大工具。目前也出现了较简单、成本低、适用于较低阶 QAM 以及长距离的点传传输的概率整形方法。为了增强概率整形的自适应性, 2019 年 Han 等<sup>[16]</sup>在概率整形的光通信系统中使

收稿日期: 2023-07-03; 修回日期: 2023-09-13; 录用日期: 2023-10-07; 网络首发日期: 2023-10-23

基金项目: 国家自然科学基金(62371390)、陕西省重点研发计划(2023-YBGY-039, 2020GY-036)、西安市高校院所人才服务企事业单位项目(GXYD14.21)、陕西省教育厅一般专项科研计划(22JK0339)

通信作者: \*chdh@xaut.edu.cn

用模拟退火算法计算星形 CAP-32 信号性能最优时的概率分布,此方法操作灵活,可实现大容量信号传输,但在逼近香农极限 1.53 dB 整形间隙的颗粒度较大。2022 年, Liu 等<sup>[17]</sup>在不同的 FSO 湍流信道中,以 MB 分布为基础,通过改变指数分布参数探索提高可达信息速率的优化问题可行区域。

本文将针对概率整形的 16QAM 与均匀分布的 16QAM 相比,在现有文献对概率整形技术信道不匹配的鲁棒性验证的数值研究基础上<sup>[18]</sup>,利用启发式算法研究自适应 16QAM 概率整形,实现以比特度量解码速率为目标函数的速率自适应,同时采用 FEC 译码前的误码率(pre-FEC BER)与 NGMI 阈值对系统差错传输性能进行评估,并建立了自适应概率整形 16QAM 信噪比阈值查找表。

## 2 系统模型

假设在接收端有完美的信道状态信息(CSI),且 FSO 系统不受码间干扰的影响。对于等效基带模型,输入  $X$  被定义为一个位映射块后的复 QAM 符号。非均匀 QAM 符号的值为  $X=[x_1, \dots, x_i, \dots, x_M]$ ,  $i=1, 2, \dots, M$ ,  $M$  表示 QAM 调制阶数,信号  $x_i$  被传输的概率为  $P_x$ ,且有  $P_x=[P_x(x_1), \dots, P_x(x_i), \dots, P_x(x_M)]$ 。在实际应用中,任何载波相位恢复方法都是不完善的,在计算对数似然比(LLR)之前,在解调器上仍会有一些数量的残余相位噪声。信号在具有相位噪声、大气湍流和高斯白噪声的无记忆信道中传输,接收信号<sup>[19-20]</sup>可表示为

$$Y = R(\varphi)GX + W, \quad (1)$$

式中: $G$  表示大气湍流信道衰落; $X$  表示发射信号; $W$  表示独立的高斯白噪声,方差为  $\sigma^2$ ; $R(\varphi) = e^{-j\varphi}$  为电调模块的相位噪声,由锁相环(PLL)内的本地振荡器输出的随机相位抖动与接收信号相位间的相位差产生。该相位噪声  $\varphi$  服从 Tikhonov 分布,其概率密度函数<sup>[19]</sup>为

$$f(\varphi) = \frac{1}{2\pi I_0(\alpha_1)} \exp(\alpha_1 \cos \varphi) \quad |\varphi| \leq \pi, \quad (2)$$

式中: $I_0(\alpha)$  为第一类 0 阶修正贝塞尔函数; $\alpha_1$  为环路信噪比, $\alpha_1 = A^2 / (N_0 B_L)$ ,  $A^2$  表示接收信号功率,  $N_0$  为加性高斯白噪声的单边功率谱密度,  $B_L$  表示一阶锁相环的环路带宽,反映了环路对噪声的抑制作用。在较小的相位噪声偏差情况下,  $\varphi \sim N(0, \sigma_\varphi^2)$ , 即可以用高斯分布描述相位噪声模型。

在 FSO 信道建模中,通常使用 Gamma-Gamma 湍流模型来描述湍流诱导的光强衰落  $g$ , 该模型适用于大范围湍流条件下的衰落模型,  $g$  的概率密度分布(PDF)<sup>[21]</sup>可以表示为

$$f_G(g) = \frac{2(\alpha\beta)^{(\alpha+\beta)/2}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} g^{(\alpha+\beta)/2-1} K_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta g}) \quad g > 0, \quad (3)$$

式中: $K_\nu(\cdot)$  表示第二类  $\nu$  阶修正贝塞尔函数; $\Gamma(\cdot)$  为 Gamma 函数; $\alpha$  和  $\beta$  分别是大尺度和小尺度湍流涡的参数,假设内部尺度可以忽略不计,  $\alpha$  和  $\beta$  可分别表示为

$$\alpha = \left\{ \exp \left[ \frac{0.49\sigma_R^2}{(1 + 1.11\sigma_R^{12/5})^{7/6}} \right] - 1 \right\}^{-1}, \quad (4)$$

$$\beta = \left\{ \exp \left[ \frac{0.51\sigma_R^2}{(1 + 0.69\sigma_R^{12/5})^{5/6}} \right] - 1 \right\}^{-1}, \quad (5)$$

式中: $\sigma_R^2 = 1.23\kappa^{7/6} C_n^2 d_{SD}^{11/6}$  是一个平面波的 Rytov 方差,它是光学湍流强度的度量,  $\kappa = 2\pi/\lambda$  为光波数,  $\lambda$  为波长,  $d_{SD}$  为链路距离,  $C_n^2$  为折射率结构参数。

## 3 自适应概率整形 16QAM 编码调制方案

自适应概率整形是寻找最大可达信息速率的过程。自适应分布优化方案(ADOS)是根据瞬时信噪比自适应地调整 16QAM 星座输入分布和可达信息速率的关键。基于自由空间光通信模型的自适应概率整形系统框图如图 1 所示。

首先,在发射端均匀分布的比特序列通过分布匹

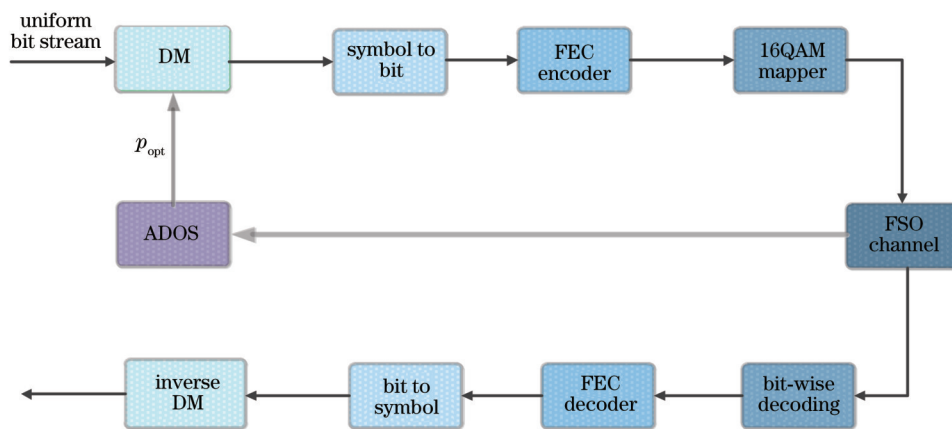


图 1 基于自由空间光通信模型的自适应概率整形系统框图

Fig. 1 Block diagram of adaptive probabilistic shaping system based on free-space optical communication model

配器(DM)生成概率整形后的符号序列,其经过FEC编码、调制进入大气信道进行传输。在接收端,比特度量译码器(BMD)计算每个位级的LLR以进行译码,最后经过逆DM恢复输入数据。ADOS过程会根据FSO信道中的不同信噪比调整星座输入分布,通过自适应概率整形确定目标最优概率分布 $p_{\text{opt}}$ ,实现在可靠通信约束下最大限度地提高比特度量解码速率的目的。

### 3.1 比特度量解码速率

在实际的通信系统中,一般采用基于比特度量译码的可达信息速率 $R_{\text{BMD}}$ 来评估系统的信道容量。在接收机处使用BMD译码,此时信道输入的比特在解码器上被独立地处理。在不同信噪比条件下, $R_{\text{BMD}}$ 的值取决于输入符号的概率分布情况。为了使互信息更加贴近系统的信道容量,需要寻找遵循大气信道条件下的最优输入分布。针对不同的接收端信噪比,自适应概率整形16QAM编码调制方案的比特度量解码速率的定义<sup>[22]</sup>如下:

$$R_{\text{BMD}} = \left\{ H(X) - \sum_{i=1}^m H[B_i|Y, (G\varphi)] \right\}^+ = \left\{ H(X) - \sum_{i=1}^m E \left\{ \log_2 \left[ 1 + \exp[-(1-2B_i)L_i] \right] \right\} \right\}^+, \quad (6)$$

式中: $m = \log_2 M$ ;  $E\{\cdot\}$ 表示期望; $H(X) = -\sum_{i=0}^{M-1} P_X(x_i) \log_2 P_X(x_i)$ 表示发射信号 $X$ 的信息熵,下文将以不同的信息熵区分不同概率分布; $\{\cdot\}^+$ 表示 $\max(\cdot, 0)$ ;  $H[B_i|Y, (G\varphi)]$ 是在相位噪声与湍流联合影响下第 $i$ 个比特 $B_i$ 与信道输出 $Y$ 之间的信息熵; $L_i$ 为对数似然比,可以表示为

$$L_i = \text{lb} \frac{\sum_{x_i \in X_i^0} \frac{1}{\sqrt{\pi} \sigma_n^2} \exp \left[ -\frac{(y - g\varphi x_i)^2}{\sigma_n^2} \right] P_X(x_i)}{\sum_{x_i \in X_i^1} \frac{1}{\sqrt{\pi} \sigma_n^2} \exp \left[ -\frac{(y - g\varphi x_i)^2}{\sigma_n^2} \right] P_X(x_i)}, \quad (7)$$

式中: $X_i^0$ 和 $X_i^1$ 分别表示发射信号 $X$ 的第 $i$ 位为0和1的PS-QAM符号。

### 3.2 传输速率的有效量化

NGMI作为量化每个传输比特所含信息比特数的信道度量,可以精确地预测FEC后的误码性能。考虑到 $N$ 个样本的蒙特卡罗模拟, $R_{\text{BMD}}$ 可以表示为

$$R_{\text{BMD}} \approx \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [-\text{lb} P_X(x_k)] - \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^m \left\{ \text{lb} \left[ 1 + e^{-(1-2B_i)L_i} \right] \right\}. \quad (8)$$

概率整形QAM系统的NGMI计算公式<sup>[23]</sup>如下:

$$N_{\text{GMI}} = 1 - \frac{H(X) - R_{\text{BMD}}}{m}, \quad (9)$$

式中: $0 \leq N_{\text{GMI}} \leq 1$ 。

### 3.3 概率分布优化粒子群算法

对于不同的接收信噪比,BMD速率依赖于发射信号的星座分布,一般传输速率应小于可实现速率,以保证可靠通信。启发式算法是一种常用于求解复杂优化问题的计算方法,其主要思想是模拟人类或自然界中蕴含的智慧和经验来寻找问题最优解。本节自适应概率整形分布的优化过程采用启发式算法的一种即粒子群优化(PSO)算法,利用该算法在指定接收信噪比下,通过最大化BMD速率得到16QAM信号的最优输入分布。自适应概率整形最优化问题的目标函数可以表示为

$$\begin{aligned} & \text{maximize } R_{\text{BMD}} \\ & \text{s.t. } \begin{cases} \langle P_X = [P_X(x_1), \dots, P_X(x_i), \dots, P_X(x_M)] \rangle = 1 \\ 0 \leq P_X(x_i) \leq 1 \\ R_{\text{BMD}} \leq R' \end{cases}, \end{aligned} \quad (10)$$

式中: $R'$ 为传输速率,可表示为

$$R' = cH(X), \quad (11)$$

式中: $c$ 为编码速率。

本文自适应概率整形方案根据信道条件调整BMD速率,粒子群优化算法步骤如下:

1)初始化。设置种群大小为 $P_{\text{pop}}$ ,且每一个种群粒子包括位置矢量和速度矢量两个属性。寻找种群中每个粒子在搜索空间中的最优解,在优化问题的确立时,可用2维搜索空间获取16QAM信号的最优PMF值。2维搜索空间中种群第 $j$ 个粒子的位置矢量可以表示为

$$p_{w_j} = [p_{\text{opt}}(x_{j1}), p_{\text{opt}}(x_{j2})], \quad j = 1, \dots, P_{\text{pop}}, \quad (12)$$

式中: $p_{\text{opt}}$ 为2维空间的概率值,16维空间的PMF可由式(12)扩展为

$$P_X = [p_{\text{opt}}(x_1)p_{\text{opt}}(x_2)p_{\text{opt}}(x_1)p_{\text{opt}}(x_2)]^T \times [p_{\text{opt}}(x_1)p_{\text{opt}}(x_2)p_{\text{opt}}(x_1)p_{\text{opt}}(x_2)]_0. \quad (13)$$

2)由式(8)计算每个粒子的适应度值即 $R_{\text{BMD}}$ 值。在特定信噪比下,后续迭代的过程能够使 $R_{\text{BMD}}$ 值更大的位置矢量有可能被保留下来。

3)更新粒子的速度和位置。速度矢量 $p_v$ 同样为2维矢量,表示前后两次迭代过程中的位置变化量。

种群第 $j$ 个粒子位置矢量和速度矢量按照如下公式进行迭代更新:

$$p_{v_j}^{s+1} = \omega^s p_{v_j}^s + c_1 \eta_1 [G_j^L - p_{v_j}^s] + c_2 \eta_2 [G^* - p_{v_j}^s], \quad (14)$$

$$p_{w_j}^{s+1} = p_{w_j}^s + p_{v_j}^{s+1}, \quad (15)$$

式中: $s$ 表示迭代次数; $\omega^s$ 为第 $s$ 次迭代的惯性权重; $c_1$ 和 $c_2$ 为学习因子,本文取 $c_1, c_2 \in [0, 4]$ ;  $\eta_1$ 和 $\eta_2$ 表示 $[0, 1]$ 区间内均匀分布的随机数; $G_j^L$ 表示第 $j$ 个粒子当

前搜索到的局部最优位置矢量;  $G^*$  表示种群中的所有粒子搜索到的全局最优位置矢量。

## 4 仿真结果与分析

在 Gamma-Gamma 湍流信道和相位噪声的联合影响下, 针对自适应概率整形 16QAM 启发式智能搜索优化算法所得到的优化分布, 进行 NGMI 及 pre-FEC BER 性能分析。在仿真分析中, FEC 编码单元采用的是 LDPC 编码, 编码码率设置为 3/4, 归一化广义互信息的阈值<sup>[7]</sup>为  $T_{\text{NGMI}} = 0.78$ , 样本数  $N = 10^6$ , 相位噪声方差考虑  $\sigma_\varphi^2 = 0.01$ 、 $\sigma_\varphi^2 = 0.12$  两种情况<sup>[24-25]</sup>; 湍流强度考虑弱湍流及中等湍流两种情况, 光强起伏方差分别为  $\sigma_I^2 = 0.4$  (弱湍流)、 $\sigma_I^2 = 1.0$  (中等湍流)。

根据前文分析, 在理论上每个信噪比都对应一个最优的 PMF, 即信噪比决定了信号的概率分布匹配。在 Gamma-Gamma 信道模型下, 针对每一个信噪比, 通过启发式优化算法遍历搜索出能够达到最大比特度

量解码速率的概率分布, 即最优概率分布。在不同湍流强度信道条件下, 优化 PS 概率分布与均匀分布的  $R_{\text{BMD}}$  随信噪比的变化曲线如图 2(a) 所示。图 2(b) 给出光强起伏方差一定 ( $\sigma_I^2 = 0.4$ ) 时相位噪声对优化 PS 分布和均匀分布的  $R_{\text{BMD}}$  性能的影响分析, 图 2(c) 给出相位噪声一定 ( $\sigma_\varphi^2 = 0.01$ ) 时湍流强度对优化 PS 分布和均匀分布的  $R_{\text{BMD}}$  性能的影响分析。

由图 2(a) 可以看出, 在弱湍流下, 优化后的 PS 方案更接近香农极限, 且随着信噪比的增加, 优化后的 PS 分布信号与均匀分布信号之间的整形增益逐渐减小, 最终 PS 信号下的  $R_{\text{BMD}}$  逐渐趋近于均匀分布下的  $R_{\text{BMD}}$ 。由图 2(b) 可知, 在弱湍流与相位噪声联合影响下, 湍流强度一定时, 改变相位噪声的大小,  $R_{\text{BMD}}$  的变化并不明显。图 2(c) 说明相位噪声大小一定时, 无论有无概率整形, 弱湍流下的 BMD 速率都要比中等湍流下的 BMD 速率高, 而且 PS 分布的 BMD 速率均远大于均匀分布。

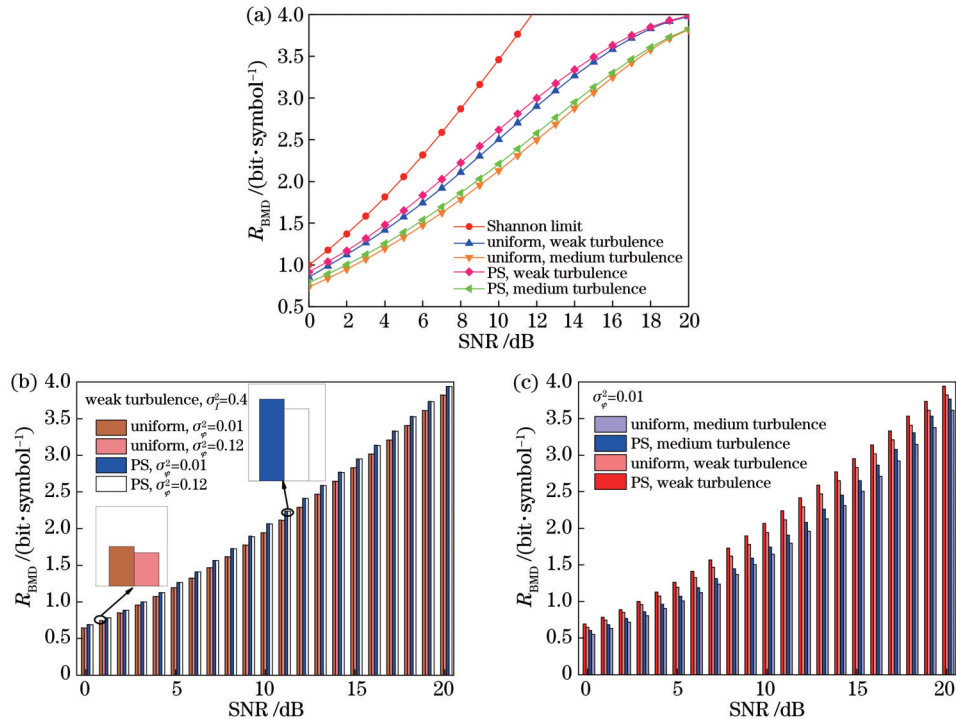


图 2 针对不同信噪比条件, 利用启发式优化算法遍历搜索 PMF 求解出的最优  $R_{\text{BMD}}$ 。(a) 仅考虑湍流影响的最优  $R_{\text{BMD}}$ ; (b) 不同相位噪声影响下的最优  $R_{\text{BMD}}$  ( $\sigma_I^2 = 0.4$ ); (c) 不同湍流强度影响下的最优  $R_{\text{BMD}}$  ( $\sigma_\varphi^2 = 0.01$ )

Fig. 2 Using heuristic optimization algorithm to traverse the search for PMF under different signal-to-noise ratio conditions, the optimal  $R_{\text{BMD}}$  is obtained. (a) Optimal  $R_{\text{BMD}}$  considering only the influence of turbulence; (b) optimal  $R_{\text{BMD}}$  under the influence of different phase noise ( $\sigma_I^2 = 0.4$ ); (c) optimal  $R_{\text{BMD}}$  under the influence of different turbulence intensities ( $\sigma_\varphi^2 = 0.01$ )

采用概率整形方法在设计 and 优化通信系统时, 为保证系统性能所需要的额外信噪比足够小, 由启发式算法遍历得出在不同信噪比间隔内的最优分布概率, 获得所对应的三个信息熵。图 3 给出弱湍流下该三个信息熵的 PS 分布及均匀分布的  $R_{\text{BMD}}$ 。

由图 3(a) 可知: 当 SNR 小于 8 dB 时, 信息熵  $H$  越小则  $R_{\text{BMD}}$  优势越明显, 说明 PS 方案在恶劣的大气信

道下可以有效提高 BMD 速率; 当 SNR 为 8 dB 时, 信息熵为 3.6072 的 PS 分布下的  $R_{\text{BMD}}$  大于其他信息熵下 PS 分布和均匀分布下的  $R_{\text{BMD}}$ ; 当 SNR 为 15 dB 时, 信息熵为 3.9227 的 PS 分布下的  $R_{\text{BMD}}$  最优。由图 3(a) 与图 3(b) 可以看出, PS 分布的信息熵大小随着湍流强度的增加而减小, 这是因为: 当空间光信号在大气湍流信道传输时, 湍流强度越大导致光强起伏越大, 则越需

要概率整形技术调整信号星座输入分布。随着信噪比的进一步增大,均匀分布的  $R_{\text{BMD}}$  大于 PS 分布,说明概率整形技术在低信噪比下更能有效提高  $R_{\text{BMD}}$ 。另一方面,如果考虑相位噪声与大气湍流的联合影响,由图

3(c)与图 3(d)可知,当湍流强度一定时,选取的 PS 分布信息熵随相位噪声强度的增大而减小。随着信噪比由低到高变化,对于不同的相位噪声大小,选取的 PS 分布差异变小。

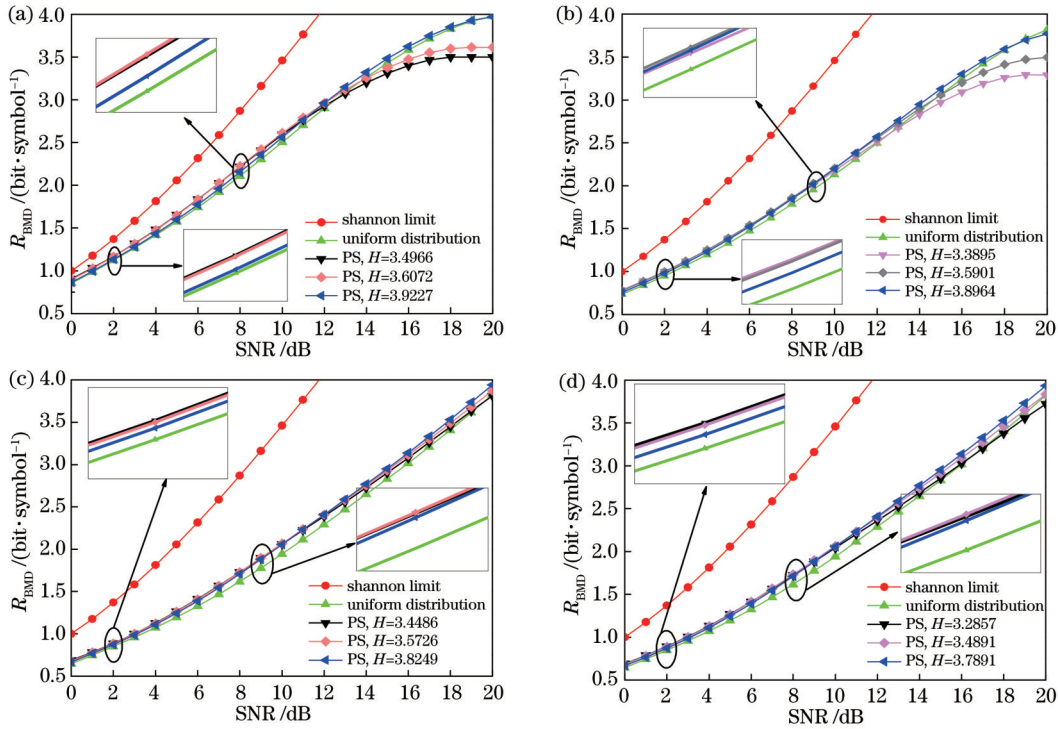


图 3 不同湍流强度和相位噪声下 PS 分布和均匀分布的  $R_{\text{BMD}}$ 。(a)弱湍流  $\sigma_t^2 = 0.4$  下的 BMD 速率曲线;(b)中等湍流  $\sigma_t^2 = 1.0$  下的 BMD 速率曲线;(c)弱湍流  $\sigma_t^2 = 0.4$ 、相位噪声  $\sigma_\phi^2 = 0.01$  下的 BMD 速率曲线;(d)弱湍流  $\sigma_t^2 = 0.4$ 、相位噪声  $\sigma_\phi^2 = 0.12$  下的 BMD 速率曲线

Fig. 3  $R_{\text{BMD}}$  of PS distribution and uniform distribution under different turbulence intensities and phase noise. (a) BMD rate curves under weak turbulence  $\sigma_t^2 = 0.4$ ; (b) BMD rate curves under moderate turbulence  $\sigma_t^2 = 1.0$ ; (c) BMD rate curves under weak turbulence  $\sigma_t^2 = 0.4$  and phase noise  $\sigma_\phi^2 = 0.01$ ; (d) BMD rate curves under weak turbulence  $\sigma_t^2 = 0.4$  and phase noise  $\sigma_\phi^2 = 0.12$

NGMI 可以对 FEC 译码后的误码率 (post-FEC BER) 进行稳健的预测,该预测可以使相同码率下不同概率分布的调制方案产生非常小的误差。采用 NGMI 作为 SNR 的函数,湍流信道下 PS-16QAM 方案的 NGMI 性能如图 4 所示。由图 4(a)可知,在选取不

同信息熵的情况下,随着 SNR 不断增加,NGMI 逐渐增大。信息熵越小则 NGMI 增益越大,因为此时需要引入概率整形确保系统有效性(即提高 BMD 速率)。观察 NGMI 值偏离 NGMI 阈值的程度,可知:低于  $T_{\text{NGMI}}$  的 PS 分布导致系统不能进行无错误译码,说明

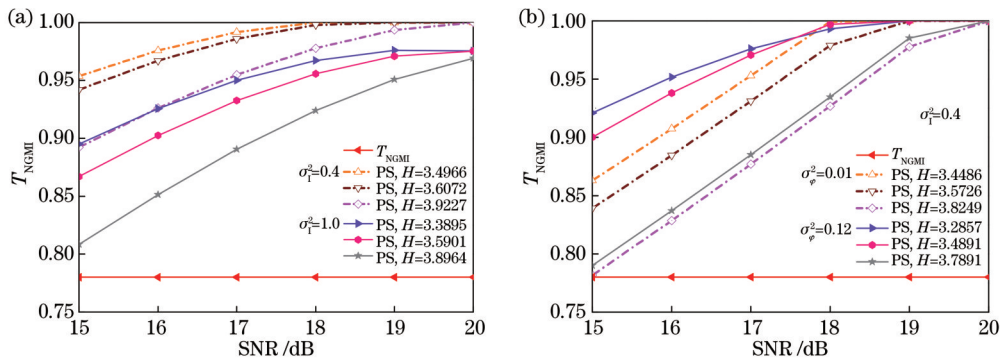


图 4 不同信道条件下的 PS-16QAM 的 NGMI 值。(a)湍流影响下的 NGMI;(b)湍流与相位噪声联合影响下的 NGMI

Fig. 4 NGMI values of PS-16QAM under different channel conditions. (a) NGMI under influence of turbulence; (b) NGMI under combined influence of turbulence and phase noise

自适应概率整形解决方案提供了更稳定的系统 NGMI 性能。与仅考虑湍流情况相比,图 4(b)中 NGMI 值均偏低,  $H=3.8249$  的 PS 方案在相位噪声方差  $\sigma_\phi^2=0.12$  下 NGMI 增长趋势与相位噪声方差  $\sigma_\phi^2=0.01$ 、 $H=3.7891$  的 PS 方案 NGMI 值的增长趋势相似,均在 19 dB 后出现拐点,增长变缓。

pre-FEC BER 在编码调制系统中也提供了良好的性能预测<sup>[24]</sup>,图 5 给出了湍流信道下基于概率整形系统的 pre-FEC BER 性能分析。由图 5(a)可知,随着星座概率分布信息熵的减小,BER 性能得到改善,这是因为信息熵的减小降低了最外层星座点概率。弱湍流下三种信息熵对应的 PS 方案和均匀分布之间的整形增益随着 BER 的增加而增大。在固定 BER 为  $10^{-2}$  时,弱湍流下,  $H=3.4966$  的 PS 分布获得的整形增益最大,约 4.3 dB,这是因为  $H=3.4966$  的 PS 分布更大程度地提高了靠近星座中心的星座点概率。在中等湍流下,优化算法遍历的最小信息熵  $H=3.3895$  的 PS 分

布获得的误码率也比均匀分布低。因此,PS 技术可以提高误码率性能,且在较低熵的调制方案中误码率性能提高更明显。如果考虑相位噪声与弱湍流的联合影响,由图 5(b)可以看出,在固定 BER 为  $10^{-2}$  时,在弱湍流且相位噪声方差  $\sigma_\phi^2=0.01$  条件下,  $H=3.4486$  的 PS 分布获得的整形增益最大,约 4.8 dB。其次,相位噪声越小则 BER 特性越好,且随着信噪比的增大,曲线逐渐趋于平缓,这是因为 QAM 系统的星座图中 16 个相位点间的欧氏距离较大,采样点间没有发生符号混叠,仍处在它的判决区域内,因此系统误码率不变。当 SNR 大于 13 dB 时,相位噪声方差  $\sigma_\phi^2=0.12$  下的所有 PS 分布的 BER 均高于相位噪声方差  $\sigma_\phi^2=0.01$  下的所有 PS 分布的 BER,这是因为此时星座点受相位噪声的影响明显,且此信噪比范围中 PS 方案遍历出的分布均倾向于均匀分布以获得更高的 BMD 速率。可见:信噪比较小时,引入概率整形可以有效提升系统误码率;信噪比较大时,可以不采用概率整形以降低系统复杂性。

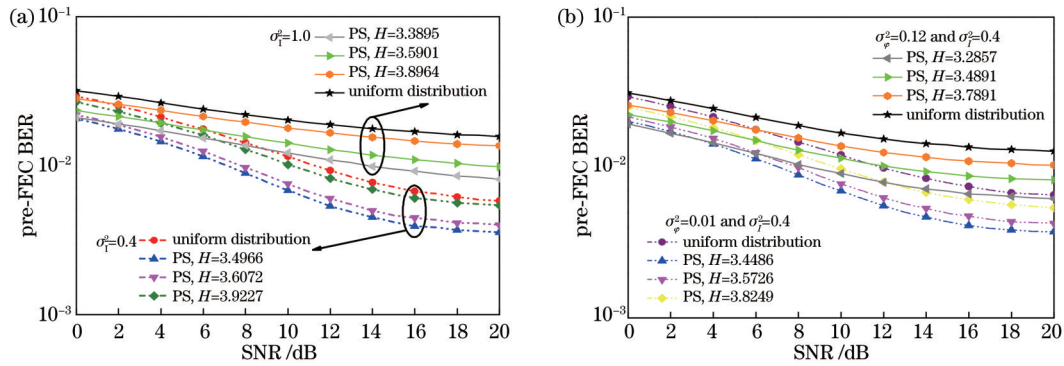


图 5 PS-16QAM 在 Gamma-Gamma 信道上的 BER。(a)湍流影响下的 pre-FEC BER;(b)湍流与相位噪声影响下的 pre-FEC BER  
 Fig. 5 BER of PS-16QAM on Gamma-Gamma channel. (a) Pre-FEC BER under influence of turbulence; (b) pre-FEC BER under influence of turbulence and phase noise

由上述分析可知,在启发式算法遍历筛选最优分布过程中,湍流强度严重影响最优分布的选取,基于图 3 的 BMD 速率值可以获得一定信噪比范围内的同一概率分布,建立 16QAM 自适应概率整形查找表。表 1 与表 2 分别给出了仅考虑湍流影响以及考虑湍流与相

位噪声联合影响下的 SNR 范围所对应的最优 1 维输入 PMFs 的  $P_X$  值。

由表 1 可以看出:当湍流强度一定时,随着信噪比的增大,信源最优概率分布均趋于均匀分布,且在高信噪比下,湍流强度越强,由启发式算法遍历出的最优概

表 1 仅考虑湍流影响时不同信道的信噪比范围对应的输入 PMFs 的  $P_X$

Table 1  $P_X$  of input PMFs corresponding to different SNR ranges when only considering turbulence effect

Turbulence intensity	Channel SNR range /dB	$P_X(1D)$ (one-sided 1D PMF)
$\sigma_i^2 = 0.4$	2-8	[0.0114 0.0420 0.0114 0.0420 0.0420 0.1546 0.0420 0.1546]
	8-15	[0.0150 0.0463 0.0150 0.0463 0.0463 0.1424 0.0463 0.1424]
	15-18	[0.0370 0.0592 0.0370 0.0592 0.0592 0.0946 0.0592 0.0946]
	18-20	[0.0625 0.0625 0.0625 0.0625 0.0625 0.0625 0.0625 0.0625]
$\sigma_i^2 = 1.0$	2-8	[0.0087 0.0380 0.0087 0.0380 0.0380 0.1653 0.0380 0.1653]
	8-15	[0.0144 0.0456 0.0144 0.0456 0.0456 0.1444 0.0456 0.1444]
	15-18	[0.0336 0.0581 0.0336 0.0581 0.0581 0.1002 0.0581 0.1002]
	18-20	[0.0625 0.0625 0.0625 0.0625 0.0625 0.0625 0.0625 0.0625]

率质量函数 PMF 与均匀分布差距越大;弱湍流下,PS 分布中心星座点概率与均匀分布相差 0.0321,增加了 51.36%;中湍流下,PS 分布中心星座点概率与均匀分

布相差 0.0377,增加了 60.32%;在高信噪比下,高湍流强度条件下需要概率整形技术来获得更高的可达速率。

表 2 考虑湍流与相位噪声联合影响时信道的信噪比范围对应的输入 PMFs 的  $P_X$

Table 2  $P_X$  of input PMFs corresponding to different SNR ranges when considering combined effect of turbulence and phase noise

Condition	Channel SNR range /dB	$P_X$ (1D) (one-sided 1D PMF)
$\sigma_t^2 = 0.4$	2-8	[0.0101 0.0402 0.0101 0.0402 0.0402 0.1595 0.0402 0.1595]
	8-15	[0.0138 0.0449 0.0138 0.0449 0.0449 0.1464 0.0449 0.1464]
$\sigma_\varphi^2 = 0.01$	15-18	[0.0268 0.0551 0.0268 0.0551 0.0551 0.1130 0.0551 0.1130]
	18-20	[0.0625 0.0625 0.0625 0.0625 0.0625 0.0625 0.0625 0.0625]
$\sigma_t^2 = 0.4$	2-8	[0.0067 0.0342 0.0067 0.0342 0.0342 0.1749 0.0342 0.1749]
	8-15	[0.0112 0.0417 0.0112 0.0417 0.0417 0.1554 0.0417 0.1554]
$\sigma_\varphi^2 = 0.12$	15-18	[0.0242 0.0536 0.0242 0.0536 0.0536 0.1186 0.0536 0.1186]
	18-20	[0.0625 0.0625 0.0625 0.0625 0.0625 0.0625 0.0625 0.0625]

采用启发式优化算法在不同湍流情况下遍历出实现最大比特度量解码速率对应的概率分布。仅考虑湍流影响时概率整形信源三维星座点在不同 SNR 下的概率分布图如图 6 所示,考虑弱湍流( $\sigma_t^2 = 0.4$ )及相位

噪声方差  $\sigma_\varphi^2 = 0.01$ 、 $\sigma_\varphi^2 = 0.12$  影响时,由启发式优化算法获得的概率整形信源三维星座点在不同 SNR 下的概率分布图如图 7 所示。

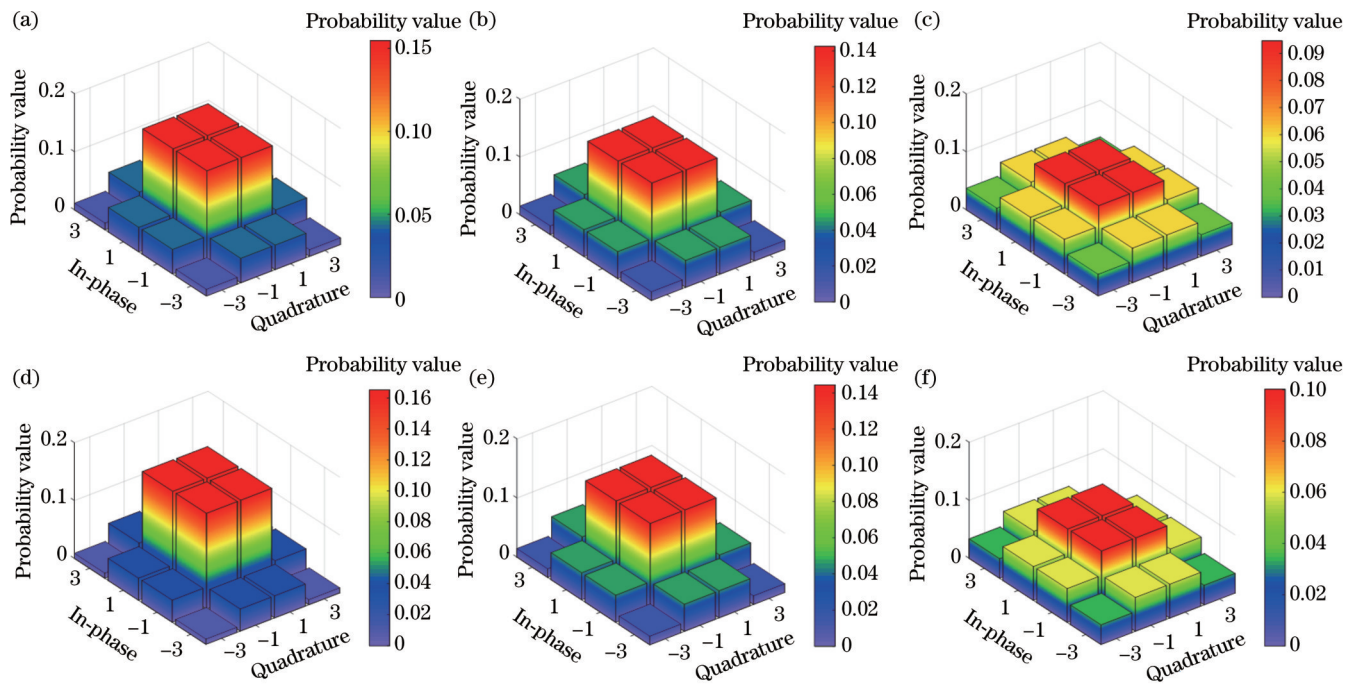


图 6 仅考虑弱湍流时采用粒子群算法获得的信源三维星座点概率分布图。(a)~(c)弱湍流( $\sigma_t^2 = 0.4$ )下筛选出的 2 dB、8 dB、15 dB 下 3D 星座分布;(d)~(f)中等湍流( $\sigma_t^2 = 1.0$ )下筛选出的 2 dB、8 dB、15 dB 下 3D 星座分布

Fig. 6 Probability distributions of three-dimensional constellation points obtained using particle swarm optimization algorithm when only considering weak turbulence. (a)-(c) 3D constellation distributions at 2 dB, 8 dB, and 15 dB filtered under weak turbulence ( $\sigma_t^2 = 0.4$ ); (d)-(f) 3D constellation distributions at 2 dB, 8 dB, and 15 dB filtered under moderate turbulence ( $\sigma_t^2 = 1.0$ )

由图 6 可以看出,在信噪比低的情况下,靠近原点的星座点概率高于远离原点的星座点概率。湍流强度越大,则靠近原点的星座点分布概率越高,不同湍流情况下,系统自适应地选取了相应非均匀分布以达到有效传输。由图 7 可以看出,在相同的相位噪声下,随着

信噪比的减小,靠近原点的星座点概率值更高,即提高了误码性能好的星座点出现的概率,而降低了误码性能差的星座点出现的概率。而在相同信噪比下,随着相位噪声的增大,靠近原点的星座点概率值更高。高信噪比时,对于不同相位噪声大小,系统选取相近信源

概率分布。综上所述,自适应概率整形方案既能达到

高的比特度量解码速率,又能确保系统的低复杂度。

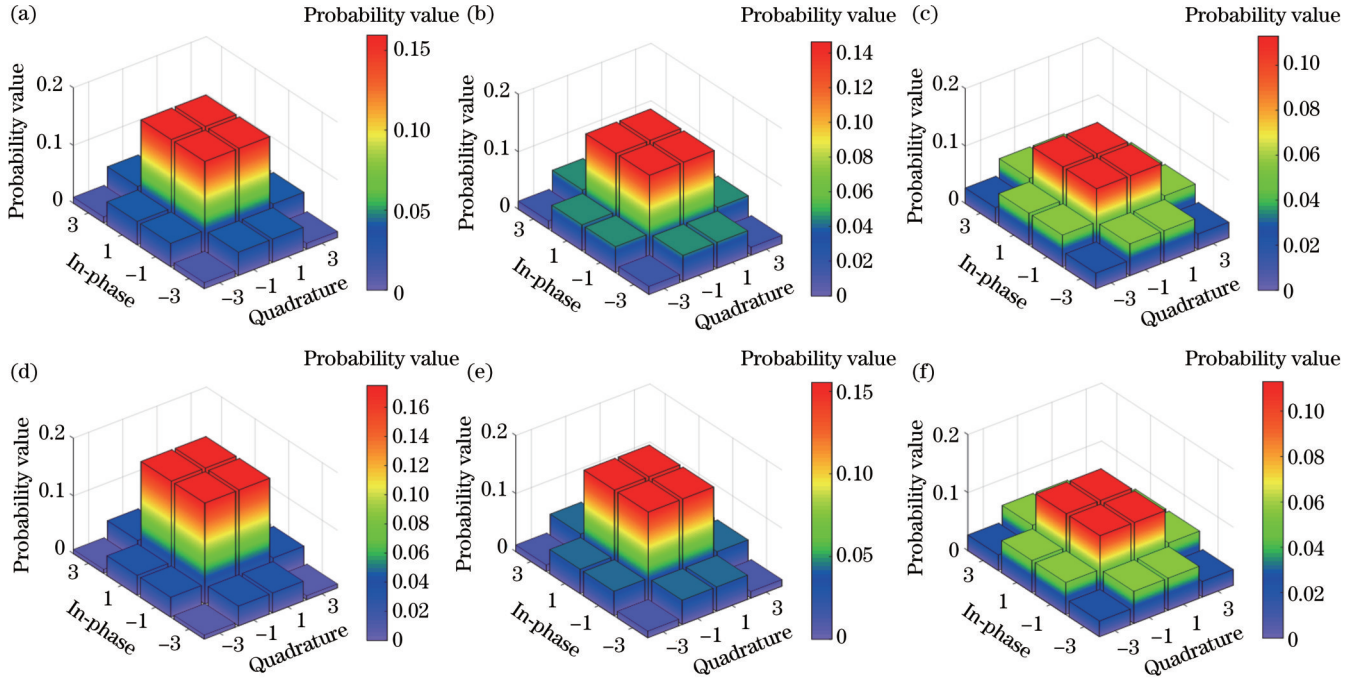


图 7 相位噪声不同时概率整形粒子群算法的信源三维星座点在不同 SNR 下的概率分布图。(a)~(c)  $\sigma_{\phi}^2 = 0.01, \sigma_i^2 = 0.4$  下筛选出的 2 dB、8 dB、15 dB 下 3D 星座分布;(d)~(f)  $\sigma_{\phi}^2 = 0.12, \sigma_i^2 = 0.4$  下筛选出的 2 dB、8 dB、15 dB 下 3D 星座分布

Fig. 7 Probability distributions of source 3D constellation points under different SNRs for probabilistic shaping particle swarm optimization algorithm with different phase noise. (a)~(c) 3D constellation distributions at 2 dB, 8 dB, and 15 dB filtered out under  $\sigma_{\phi}^2 = 0.01$  and  $\sigma_i^2 = 0.4$ ; (d)~(f) 3D constellation distributions at 2 dB, 8 dB, and 15 dB filtered out under  $\sigma_{\phi}^2 = 0.12$  and  $\sigma_i^2 = 0.4$

## 5 结 论

大气湍流及相位噪声对光通信系统性能的影响程度不同。设计了一种基于概率整形的实用自适应 FSO 编码调制方案。传输速率的约束使优化问题变得非凸,增加了优化过程的复杂性,故采用启发式算法求解优化问题,根据最大化比特度量解码速率获取信源的最优概率分布,依据最优比特度量解码速率切换点建立了自适应概率整形信噪比阈值查找表,大大提高了正交幅度调制的 FSO 系统容量。此外,评估了所提方案的 NGMI 与 pre-FEC BER 的性能。仿真结果表明:考虑相位噪声与大气湍流的联合影响,从所提出的方案获得的非均匀分布对比均匀分布最高可获得 4.8 dB 的整形增益,且湍流强度一定时,相位噪声增大对低信噪比下选取的 PS 分布影响更大。因此,概率整形技术为自由空间光通信系统 16QAM 系统性能带来了有效性和可靠性之间一个更好的折中。

### 参 考 文 献

[1] 谢孟桐, 李建华, 徐智勇, 等. 弱湍流下斜程逆向调制无线光通信性能分析[J]. 光学学报, 2021, 41(18): 1801002.  
Xie M T, Li J H, Xu Z Y, et al. Performance analysis for modulating retro-reflector FSO communications in weak turbulent atmosphere on slant path[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(18): 1801002.

[2] 张兢, 李文庆, 曹阳, 等. 自由空间光通信下 SCB-Spinal 码的性能分析[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(23): 2320003.  
Zhang J, Li W Q, Cao Y, et al. Performance analysis of SCB-spinal code in free-space optical communication[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(23): 2320003.

[3] 韩立强, 江红兵. 双跳混合 RF/MIMO FSO 放大转发中继通信系统性能分析[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(13): 130103.  
Han L Q, Jiang H B. Performance analysis of dual-hop mixed RF/MIMO FSO amplify and forward relay communication system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(13): 130103.

[4] Zou P, Hu F C, Zhao Y H, et al. On the achievable information rate of probabilistic shaping QAM order and source entropy in visible light communication systems[J]. Applied Sciences, 2020, 10(12): 4299.

[5] Ren J X, Liu B, Xu X, et al. A probabilistically shaped star-CAP-16/32 modulation based on constellation design with honeycomb-like decision regions[J]. Optics Express, 2019, 27(3): 2732-2746.

[6] Elzanaty A, Alouini M S. Adaptive coded modulation for IM/DD free-space optical backhauling: a probabilistic shaping approach[J]. IEEE Transactions on Communications, 2020, 68(10): 6388-6402.

[7] Kaushal H, Kaddoum G. Optical communication in space: challenges and mitigation techniques[J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2017, 19(1): 57-96.

[8] Xie C H, Chen Z X, Fu S N, et al. Achievable information rate enhancement of visible light communication using probabilistically shaped OFDM modulation[J]. Optics Express, 2018, 26(1): 367-375.

[9] Chen S T, Cheng J H, Gao W. Probabilistically shaped



- 16QAM signal transmission in a photonics-aided wireless terahertz-wave system[C]//2018 Optical Fiber Communications Conference and Exposition (OFC), March 11-15, 2018, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2018.
- [10] Geller O, Dar R, Feder M, et al. A shaping algorithm for mitigating inter-channel nonlinear phase-noise in nonlinear fiber systems[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(16): 3884-3889.
- [11] Fehenberger T, Alvarado A, Böcherer G, et al. On probabilistic shaping of quadrature amplitude modulation for the nonlinear fiber channel[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(21): 5063-5073.
- [12] Kschischang F R, Pasupathy S. Optimal nonuniform signaling for Gaussian channels[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1993, 39(3): 913-929.
- [13] Schulte P, Böcherer G. Constant composition distribution matching[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2016, 62(1): 430-434.
- [14] Böcherer G, Steiner F, Schulte P. Bandwidth efficient and rate-matched low-density parity-check coded modulation[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2015, 63(12): 4651-4665.
- [15] Alvarado A, Agrell E, Lavery D, et al. Replacing the soft-decision FEC limit paradigm in the design of optical communication systems[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(20): 4338-4352.
- [16] Han S, Liu B, Mao Y Y, et al. Self-adaptive probabilistically shaped star-carrier-less amplitude/phase passive optical network based on simulated annealing algorithm[J]. *Optical Engineering*, 2019, 58(2): 026101.
- [17] Liu X Y, Fang J F, Xiao S L, et al. Adaptive probabilistic shaping using polar codes for FSO communication[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2022, 14(1): 7913806.
- [18] Fehenberger T, Lavery D, Maher R, et al. Sensitivity gains by mismatched probabilistic shaping for optical communication systems[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(7): 786-789.
- [19] Chandra A, Patra A, Bose C. Performance analysis of BPSK over different fading channels with imperfect carrier phase recovery[C]//2010 IEEE Symposium on Industrial Electronics and Applications (ISIEA), October 3-5, 2010, Penang, Malaysia. New York: IEEE Press, 2011: 106-111.
- [20] Koike-Akino T, Millar D S, Kojima K, et al. Phase noise-robust LLR calculation with linear/bilinear transform for LDPC-coded coherent communications[C]//2015 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), May 10-15, 2015, San Jose, CA, USA. New York: IEEE Press, 2015.
- [21] Feng J F, Zhao X H. Performance analysis of OOK-based FSO systems in Gamma-Gamma turbulence with imprecise channel models[J]. *Optics Communications*, 2017, 402: 340-348.
- [22] Böcherer G, Schulte P, Steiner F. Probabilistic shaping and forward error correction for fiber-optic communication systems [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(2): 230-244.
- [23] Cho J, Schmalen L, Winzer P J. Normalized generalized mutual information as a forward error correction threshold for probabilistically shaped QAM[C]//2017 European Conference on Optical Communication (ECOC), September 17-21, 2017, Gothenburg, Sweden. New York: IEEE Press, 2018.
- [24] Cao S J, Kam P Y, Yu C Y, et al. Pilot-tone assisted log-likelihood ratio for LDPC coded CO-OFDM system[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(15): 1577-1580.
- [25] Agrell E, Secondini M, Alvarado A, et al. Performance prediction recipes for optical links[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2021, 33(18): 1034-1037.

## 16QAM Adaptive Probability Shaping Under Combined Influence of Turbulence and Phase Noise

Chen Dan\*, Ai Feier, Wang Rui, Zhao Peiyan

*School of Automation and Information Engineering, Xi'an Key Laboratory of Wireless Optical Communication and Network Research, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, Shaanxi, China*

### Abstract

**Objective** When a laser is transmitted in the atmosphere, atmospheric turbulence causes random fluctuations in the received light intensity, which seriously affects the performance of the free space optical (FSO) system. At the same time, the phase noise introduced by the electrolytic modulator module in the  $M$ -th quadrature amplitude modulation (MQAM) FSO system can cause the signal phase to shift, leading to degradation of demodulation performance and an increase in system error rate. Therefore, it is crucial to design a high-performance adaptive transmission scheme that can alleviate the severe degradation of optical signal transmission caused by atmospheric channels. The atmospheric turbulence effect in atmospheric channels is a slow fading process compared with high-speed coded modulation systems. By mapping the constellation points in the outer circle of the constellation map to a position close to the constellation origin with a certain probability and rules and sending and transmitting the mapped constellation points, probability shaping (PS) is achieved. Therefore, it is feasible to optimize the source distribution of the MQAM encoding FSO system and achieve adaptive adjustment of the transmitter signal constellation distribution based on channel conditions. In summary, we propose an adaptive PS system model in atmospheric channels that considers the combined effects of Gamma-Gamma turbulence and phase noise. This scheme can effectively improve the capacity of FSO communication links with QAM and suppress the impact of atmospheric turbulence on FSO systems.

**Methods** We consider the comprehensive impact of atmospheric turbulence and phase noise of the electrolytic modulation module on the performance of optical communication systems. A model describing the combined effects of phase noise and atmospheric turbulence is constructed using Tikhonov distribution and Gamma-Gamma turbulence model. By iteratively searching through the particle swarm optimization algorithm in the heuristic algorithm, we obtain the optimal probability distribution under the condition of maximizing the decoding rate of the bit metric and realize rate adaptation with the bit metric decoding rate as the objective function through adaptive 16QAM PS technology. We also evaluate the error transmission performance of the system through pre-FEC BER and NGMI threshold before FEC decoding and investigate the effects of different turbulence intensities, phase noise, and fixed turbulence intensities with varying phase noise levels on the decoding rate, pre-FEC BER, and NGMI performance of contrast metrics.

**Results and Discussions** A practical 16QAM encoding modulation FSO scheme with adaptive PS is proposed to address the issue of traditional channel coding techniques in FSO being susceptible to turbulence fading effects and the low achievable information rate of the system in conventional encoding uniform distribution mode. Compared with uniform distribution: the PS scheme can effectively improve the BMD rate under the combined influence of turbulence and phase noise; PS technology can improve bit error rate performance, and this improvement can be more pronounced in modulation schemes with lower entropy. The shaping gain between the PS scheme corresponding to the three information entropies and the uniform distribution under weak turbulence increases with the increase of BER.

**Conclusions** We design a practical adaptive FSO coding modulation scheme based on PS. Due to the constraint of transmission rate, the optimization problem becomes non convex, increasing the complexity of the optimization process. Therefore, a heuristic algorithm is used to solve the optimization problem. The optimal probability distribution of the source is obtained by maximizing the bit metric decoding rate, and an adaptive PS signal-to-noise ratio threshold lookup table is established based on the optimal bit metric decoding rate switching point, greatly improving the capacity of the QAM FSO system. In addition, we also evaluate the NGMI and pre-FEC BER performance of the proposed scheme. The simulation results show that by considering the combined effects of phase noise and atmospheric turbulence, the adaptive PS scheme with non-uniform distribution can achieve a maximum shaping gain of 4.8 dB compared with uniform distribution. Moreover, when the turbulence intensity is constant, the increase in phase noise has a greater impact on the selected PS distribution under low signal-to-noise ratio. Therefore, PS technology brings a better compromise between effectiveness and reliability for the performance of the 16QAM modulation format system in FSO communication.

**Key words** optical communications; free space optical communication; turbulence fading; phase noise; probability shaping; rate adaptive