

## 激光与光电子学进展

基于混合整形圆形正交振幅调制的太赫兹信号  
传输性能分析

王肖, 赵峰\*, 田景瑶, 孟昭, 杨雄伟, 赵林仙

西安邮电大学电子工程学院, 陕西 西安 710121

**摘要** 为提高光纤无线电(RoF)系统的传输性能,提出了一种基于概率-几何混合整形的圆形正交振幅调制(PS-GS-Cir-MQAM)矢量太赫兹信号传输方案。在Matlab和VPI环境下联合仿真分析了130 GHz波段PS-GS-Cir-MQAM信号在强度调制器(IM)和同相/正交(I/Q)调制器级联的RoF系统中信号的传输性能,并比较分析了信号的误码性能在不同整形方法后的改善效果。结果表明,提出的PS-GS-Cir-MQAM太赫兹信号的误码性能均优于其他三种整形格式。其中PS-GS-Cir-32QAM信号的误码性能提升效果最为明显,相比其他三种整形格式,分别提升了0.88、1.40、2.48 dB的信号功率增益。尤其是在克服光器件和光纤的非线性效应方面,PS-GS-Cir-MQAM的矢量太赫兹信号具有更大的传输优势。

**关键词** 光纤光学与光通信; 矢量太赫兹信号; 混合整形; 概率整形; 几何整形; 非线性效应

中图分类号 TN929.11

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP220485

Transmission Performance Analysis of Terahertz Signal Based on Hybrid  
Shaping Circular Quadrature Amplitude Modulation

Wang Xiao, Zhao Feng\*, Tian Bingyao, Meng Zhao, Yang Xiongwei, Zhao Linxian

*School of Electronic Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications,  
Xi'an 710121, Shaanxi, China*

**Abstract** A circular quadrature amplitude modulation based on probability-geometric hybrid shaping (PS-GS-Cir-MQAM) vector terahertz (THz) signal transmission scheme is proposed to improve the transmission performance of a radio-over-fiber (ROF) transmission system. The transmission performance of the 130 GHz band PS-GS-Cir-MQAM signal in an RoF system with an intensity modulator (IM) and in-phase/quadrature (I/Q) modulator cascaded is analyzed via co-simulation in Matlab and VPI, and the signal transmission performance is compared and analyzed. The improvement effect of different shaping methods on the error code performance is evaluated. The results show that the error performance of the proposed PS-GS-Cir-MQAM THz signal is better than those of the other three shaping formats. Among them, the PS-GS-Cir-32QAM THz signal shows the most significant improvement in error performance. Compared with the other three shaping formats, the signal power gain increases by 0.88, 1.4, and 2.48 dB, respectively. The proposed hybrid shaping-based vector THz signal is advantageous in terms of transmission; specifically, it overcomes the nonlinear effects of optical devices and optical fibers.

**Key words** fiber optics and optical communications; vector terahertz signal; hybrid shaping; probability shaping; geometric shaping; nonlinear effect

## 1 引言

为了适应无线通信数据流量的快速增长,研究者提出了各种先进技术用来提升系统的通信容量、带宽和数据传输速率<sup>[1-4]</sup>。光纤无线电(RoF)具有丰富的无线频谱资源,可实现大带宽和低传输损耗的高质量信

号长距离传输<sup>[5-10]</sup>。但面对日益增长的流量需求,如何提升频谱资源利用率和缩小通信系统容量与香农极限的差距仍是主要目标。虽然通过提高正交幅度调制(QAM)的调制阶数可以有效提高频谱利用效率和数据传输速率,但受限于系统的信噪比(SNR),单纯依靠提高调制格式的阶数会导致误码急剧恶化(传输可

收稿日期: 2022-01-10; 修回日期: 2022-02-07; 录用日期: 2022-03-03; 网络首发日期: 2022-03-13

基金项目: 国家自然科学基金(61875164)、陕西省创新能力支撑计划(2021TD-09)

通信作者: hfengzhao@xupt.edu.cn

靠性降低)<sup>[11-14]</sup>。这很大一部分原因是因为光纤传输系统中的非线性效应,虽然采用低噪声、低非线性器件可以进一步提高 SNR,但是代价较高<sup>[15-17]</sup>。与这种方法相比,星座整形技术在原有的基础上提高了信号的抗非线性效应,因此得到广泛研究。星座整形技术包括几何整形(GS)和概率整形(PS)<sup>[18-27]</sup>;几何整形技术是通过改变原有调制格式下星座点的位置获得整形增益;概率整形技术则是根据星座点的能量分布来改变各点的发送概率从而获得整形增益。这两种调制格式优化技术使得系统传输容量更逼近香农极限。PS-GS 混合整形技术可以打破星座顺序和结构的约束,在调制阶数相同的情况下,可以提高系统的频谱效率、传输容量和误码性能<sup>[28]</sup>。文献[23]研究了基于强度调制器直接检测(IM-DD)系统的 GS 与 PS 技术,证明了 PS-32QAM 在高 SNR 情况下可比 GS-32QAM 获得更好的接收器灵敏度增益,而 GS-32QAM 在低 SNR 情况下优于 PS-32QAM。文献[24]研究了基于同相正交(I/Q)调制器偏振复用相干光系统的 GS-PS 混合整形技术,验证了 GS-PS 32QAM 的传输性能优于 PS-32QAM 和常规 32QAM,与概率幅度整形(PAS) 64QAM 性能相当。文献[25-26]将 RoF 系统分别与 GS 和 PS 技术相结合,考虑光纤非线性效应时,进一步优化了光信号的传输性能。此外,与常规的矩形 QAM 格式相比较,相位均匀分布圆形(Cir) 8/16/32QAM 的最小欧氏距离(MED)较大<sup>[29]</sup>,具有更好的抗系统非线性能力。因此,相位均匀分布圆形 8/16/32QAM 与 PS-GS 相结合的方案,进一步提高了信号的传输性能。结合 PS-GS 混合整形技术,如何提高太赫兹信号的传输性能需进一步研究。

本文基于强度调制器(IM)和 I/Q 调制器级联太赫兹通信系统,提出了圆形 8/16/32QAM 与 PS-GS 混合整形相结合的方案,开展了提升矢量太赫兹信号的传输性能的研究。在 VPI 和 Matlab 联合仿真环境下,比较研究了 130 GHz 波段 PS-GS-Cir-MQAM、GS-Cir-MQAM、PS-Cir-MQAM 和 Cir-MQAM 信号传输的性能。

## 2 PS-GS-Cir-MQAM 信号的生成

PS-GS 混合整形 Cir-MQAM 信号的生成通常利用广义成对优化(PO)<sup>[30]</sup>算法和算术编码的恒参分布匹配(CCDM)<sup>[31]</sup>。本文首先利用广义 PO 算法调整 Cir-MQAM 星座点的坐标,然后再利用 CCDM 分配器调整 GS-Cir-MQAM 各个星座点的概率。

### 2.1 GS-Cir-MQAM 信号的生成

GS 技术通过改变原有星座点的坐标分布,充分利用平面空间实现最小欧氏距离最大化,不但提高了信号的抗干扰能力,系统容量也更加接近香农极限。本文采用 PO 算法对星座点进行 GS。PO 算法必须满足  $\sum_{i=1}^M p_i \vec{s}_i = 0$  (零和限制条件)和  $\sum_{i=1}^M p_i \|\vec{s}_i\|^2 = E$  (平均能量限制条件)两个条件保证搜索空间的连续性。在 PO 算法中,首先从已知 M 元星座点中随机选取一对星座点,以最小化误符号率(SER)和误码率(BER)为目标函数优化两个点的位置,重复选取星座点和优化位置得到最优的星座分布,然后根据最佳几何星座分布得到最优比特映射。考虑每对星座点之间的汉明距离,广义 PO 算法的目标函数将 PO 算法的两个目标函数简化为一个目标函数,根据两个约束条件和目标函数可以得到优化后星座点的位置。给定 M 进制的二维星座中信号星座点坐标为  $\vec{s}_i = (\vec{s}_{i,x}, \vec{s}_{i,y})$  ( $i \in \{1, 2, \dots, M\}$ ),相应的比特映射为  $\beta_i$ ,每个星座点的发送概率表示为  $p_i$  ( $i \in \{1, 2, \dots, M\}$ )。在高斯信道中,任取一对星座点,广义 PO 算法的目标函数用  $P_s$  表示为

$$P_s = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \sum_{i=1, i \neq j}^M h(\beta_j, \beta_i) Q\left(\frac{\|s_j - s_i\|}{2\sqrt{N_0/N}}\right) \quad (1)$$

利用广义 PO 算法得到 Cir-8QAM、Cir-16QAM 和 Cir-32QAM 的最优几何分布。图 1 给出了经过高斯信道后优化星座点和原星座点的对比,其中,图 1(a)给出了 Cir-8QAM 星座点的对比,图 1(b)给出了 Cir-16QAM 星座点的对比,图 1(c)给出了 Cir-32QAM 星座点的对比。圆点代表 GS 后的信号,星点代表 GS 前

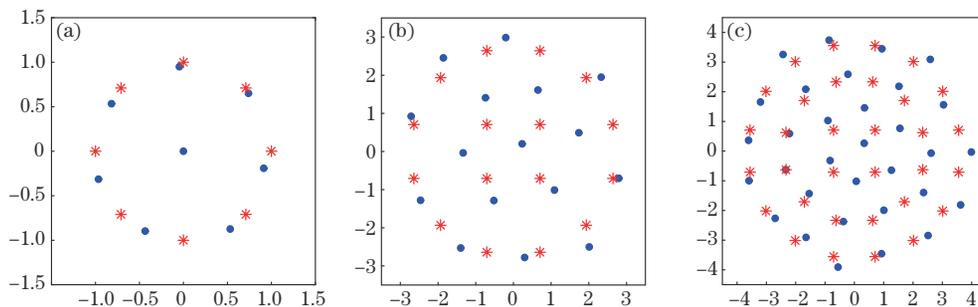


图 1 Cir-MQAM GS 前后星座对比。(a) Cir-8QAM 和 GS-Cir-8QAM 星座图;(b) Cir-16QAM 和 GS-Cir-16QAM 星座图;(c) Cir-32QAM 和 GS-Cir-32QAM 星座图

Fig. 1 Constellation comparison before and after Cir-MQAM geometric shaping (GS). (a) Constellations of Cir-8QAM and GS-Cir-8QAM; (b) constellations of Cir-16QAM and GS-Cir-16QAM; (c) constellations of Cir-32QAM and GS-Cir-32QAM

的信号,可以看出 GS-Cir-MQAM 星座具有更大的欧氏距离。

### 2.2 GS-Cir-MQAM 信号 PS

由于星座点的幅度分布存在差异,PS 技术通过增大幅度较小星座点的发送概率和减少幅度较大星座点的发送概率,降低了误码高发区星座点的发送概率,缓解了光通信系统的非线性问题。本文采用基于 CCDM 的 PS 技术,该技术将固定长度码组与算术编码相结合,不仅可以有效地将原始等概率的比特信源转化为所需概率分布的信源,并且在信源码长较长时还可以实现细粒度 PS。以圆形 QAM 信号为例,内环的环间距离比外环的环间距离大,因此外圈成为误码的高发区域,PS 技术减少了外圈星座点的发送概率,增加了内圈星座点的发送概率。而且整形后信号的整体功率会降低,在固定发射功率的情况下,增大了星座点之间的欧氏距离,使得在相同 SNR 之下,容错性更强。QAM 星座点的概率质量函数(PMF)可以通过离散的 Maxwell-Boltzmanr (M-B)分布表示为

$$p_x(x_i) = \frac{\exp\{-\nu[\operatorname{Re}(x_i)^2 + \operatorname{Im}(x_i)^2]\}}{\sum_{k=1}^M \exp\{-\nu[\operatorname{Re}(x_k)^2 + \operatorname{Im}(x_k)^2]\}}, \quad (2)$$

式中: $X$ 表示 GS-Cir-MQAM 的星座点集合; $\operatorname{Re}(x)$ 和  $\operatorname{Im}(x)$ 代表复平面上  $x_i$ 的实部和虚部; $\nu$ 是 M-B 分布的整形因子,取值在 0~1 之间。随着  $\nu$  的增加,能量大的星座点被分配的概率减小,能量小的星座点被分配的概率增大,在一定的 SNR 范围内降低了误码率。

本文中,当  $\nu=0.7669$  时,PS-GS-Cir-8QAM 信息速率达到 2.93 bit/symbol; 当  $\nu=0.1669$  时,PS-GS-Cir-16QAM 信息速率可达 3.77 bit/symbol; 当  $\nu=0.1669$  时,PS-GS-Cir-32QAM 信息速率可达 4.53 bit/symbol。由于 PS 后信号的平均功率降低,因此将 PS-GS-Cir-8QAM、PS-GS-Cir-16QAM 和 PS-GS-Cir-32QAM 信号的幅度分别增加 1.1600、1.2196 和 1.3152 倍,来保证具有相同的平均功率。

图 2 给出了具有 M-B 分布的 PS-GS-Cir-MQAM 星座点的概率分布,从图中可以清晰地看出,越靠近圆心位置的星座点的发送概率较大,这是因为经过 GS 后每圈星座点并不是标准圆。图 3 为 GS-Cir-MQAM 星座和 PS-GS-Cir-MQAM 星座,其中星点表示 PS-GS-Cir-MQAM 星座点,圆点表示 GS-Cir-MQAM 星座点,可以看出 PS-GS-Cir-MQAM 星座具有较大的欧氏距离。

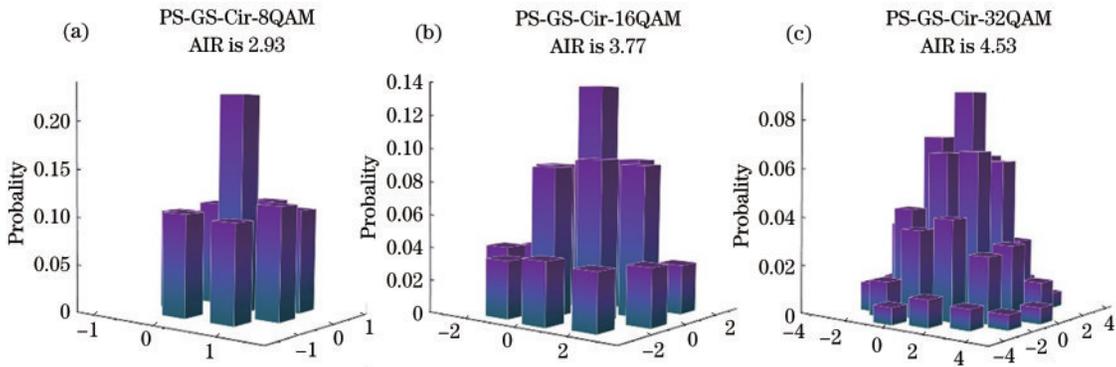


图 2 PS-GS-Cir-MQAM 的概率分布图。(a) PS-GS-Cir-8QAM 的概率分布图; (b) PS-GS-Cir-16QAM 的概率分布图; (c) PS-GS-Cir-32QAM 的概率分布图

Fig. 2 Probability distribution of PS-GS-Cir-MQAM. (a) Probability distribution of PS-GS-Cir-8QAM; (b) probability distribution of PS-GS-Cir-16QAM; (c) probability distribution of PS-GS-Cir-32QAM

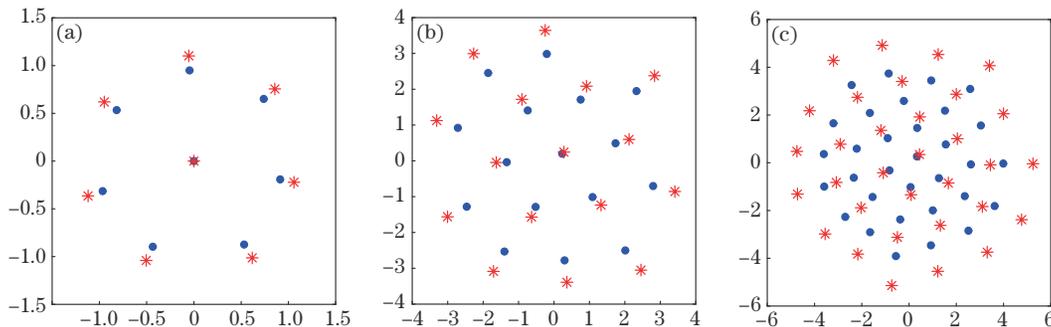


图 3 PS-GS-Cir-MQAM 的星座分布图。(a) PS-GS-Cir-8QAM 的星座分布图; (b) PS-GS-Cir-16QAM 的星座分布图; (c) PS-GS-Cir-32QAM 的星座分布图

Fig. 3 Constellation distributions of PS-GS-Cir-MQAM. (a) Constellation distribution of PS-GS-Cir-8QAM; (b) constellation distribution of PS-GS-Cir-16QAM; (c) constellation distribution of PS-GS-Cir-32QAM

### 3 系统仿真及结果分析

为了验证 PS-GS-Cir-MQAM 在信道的传输性能, 因此搭建了基于几何概率混合整形的太赫兹系统。系统架构如图 4 所示, 系统参数见表 1。

本文仿真了基于几何概率混合整形的太赫兹

信号生成系统, 在发射端, 外腔激光器发射波长为 1552.16 nm、光功率为 15 dB、线宽小于  $1 \times 10^5$  的连续相干光。本地振荡器产生频率为 50 GHz、峰值电压为 1 V 的余弦射频信号(RF), 驱动工作在最小传输点的强度调制器。

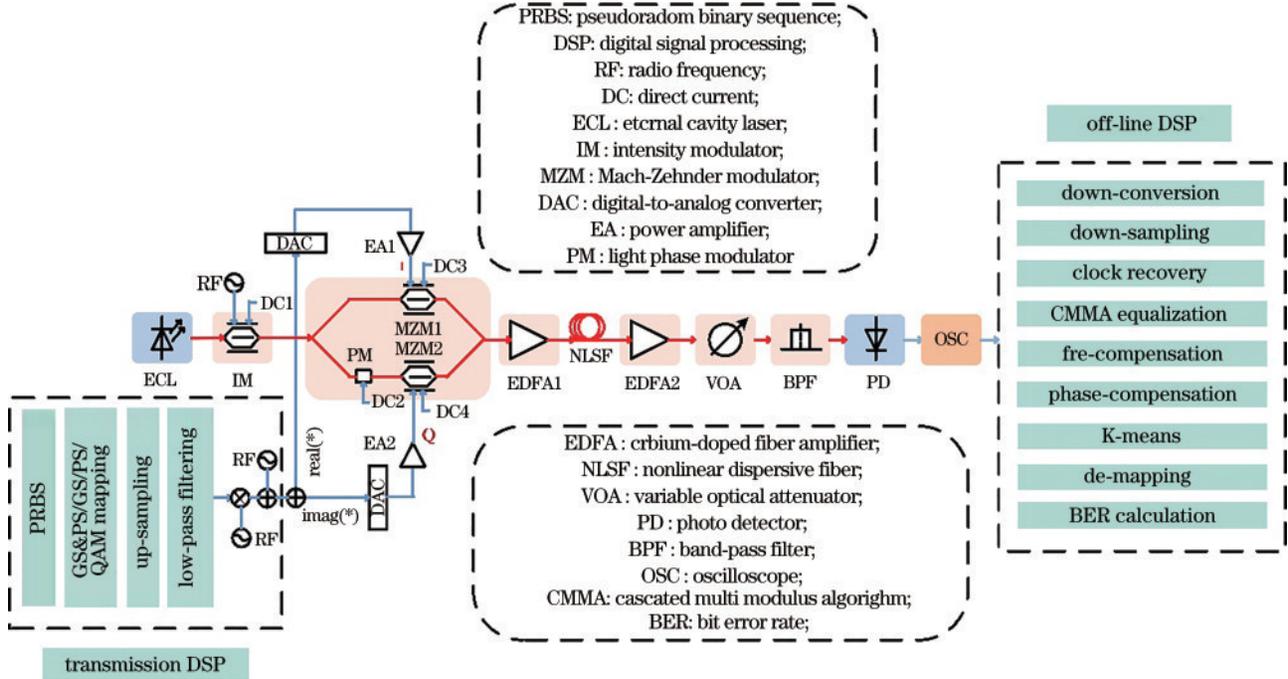


图 4 基于几何概率混合整形的矢量太赫兹信号生成系统

Fig. 4 Vector THz signal generation system based on geometric probability hybrid shaping

表 1 仿真系统关键器件参数

Table 1 Key device parameters of simulation system

Device	Parameter
ECL	Emission frequency: $193.1 \times 10^{12}$ Hz; line-width: $1 \times 10^5$ Hz; Average power: 0.01 W
IM, MZM1, MZM2	Insertion loss: 3.9 dB; extinction ratio: 33 dB; half-wave voltage: 4 V
Amplification	EDFA
EDFA	Noise figure: 3.0 dB
Fiber	NLSF
NLSF	Attenuation: $0.2 \times 10^{-3}$ dB/m; nonlinear index: $2.5 \times 10^{-20}$ m <sup>2</sup> /W
PD	Responsivity: 0.4 A/W
OSC	Sampling rate: 160 GSa/s

图 4 中虚线框中 transmission DSP 和 off-line DSP 通过 Matlab 编程实现。在基带调制阶段, 首先, 发送一定长度的伪随机比特序列 (PRBS) 信息, 通过 Cir-MQAM、GS-Cir-MQAM、PS-Cir-MQAM 和 PS-GS-Cir-MQAM 调制产生不同的调制格式的基带信号, 经过低通滤波产生基带矢量信号。接下来, 采用希尔伯特变换得到一个单边带复信号。然后将此信号与频率为 20 GHz 的复正弦射频信号混合得到上频带 (USB)

信号。随后, 线性添加一个频率为 -10 GHz 的正弦射频信号, 得到 10 GHz 未调制和 20 GHz 调制的双单边带基带矢量信号。最后, 数据的虚部和实部分别被发送到两个数模转换器的输入端口。经过数模转换后通过电子放大器 (EA) 放大, 这两个射频信号驱动一个 3 dB 带宽为 31 GHz、消光比为 30 dB 的 I/Q 调制器。为了确保 I/Q 调制器工作在标准的载波抑制 (OCS) 模式下, 首先需要确保两个马赫-曾德尔调制器 (MZM)

工作在最小输出光功率,并将相位调制器(PM)的相位差设置为 $90^\circ$ 。经OCS调制后,可以较好地抑制一阶子载波。在I/Q调制器的输出端口,被抑制的两个一阶子载波的两侧分别产生一对光学边带信号。采用掺铒光纤放大器(EDFA)将生成的光学边带信号功率提升至10 dBm,经过非线性光纤(NLSF)传输。由于长距离传输功率会大量损耗,因此在NLSF后增加了另一个EDFA来补偿光纤传输带来的功率损失。

经过光电探测器(PD)拍频产生的信号主要有四个频率(忽略其他高阶边带信号),分别为30、70、100、130 GHz。其中,30 GHz处信号传输后出现了严重的失真,因为间隔为30 GHz信号和虚载波经过光纤传输后拍频会发生相互串扰,传输中易受到光纤色散的影响,具有走离效应而无法使用;70 GHz和130 GHz是光域单边带信号和单边带虚载波拍频产生的,对光纤色散不敏感,在光纤中传输不会产生明显的走离效应。但是,光谱中存在部分幅度较低且信号间隔为70 GHz左右二阶谐波拍频的时候会串扰到70 GHz处的信号,影响了该波段信号的传输性能,因此130 GHz处信号

的BER性能比70 GHz处信号好;100 GHz处信号不携带信息,因此该频段的信号无法进行载波恢复。在后续仿真中,选择了位于130 GHz处的太赫兹信号进行离线DSP恢复,恢复出原始的数据信号。离线DSP主要包括:下变频、下采样、时钟恢复、级联多模算法(CMMA)、频偏估计、相位估计、聚类(K-means)算法和BER计算等。

考虑到经过PS的信号符号熵会降低,与未经过PS的信号不具有可比性,因此固定所有信号净比特速率,改变PS后信号的波特率,使两者具有相同的净比特速率。本文测量了信号经过的非线性光纤(非线性指数为 $2.6 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ )传输后的误码性能。为了确保BER可以达到硬判决门限(HD-FEC)阈值,对于阶数不同的信号传输时选取不同的光纤长度。

图5为Cir-8QAM、GS-Cir-8QAM和PS-GS-Cir-8QAM( $H=2.84 \text{ bit/symbol/pol}$ )的信号经过120 km NLSF光纤传输后BER与入PD功率的关系曲线图。从图中可以看出,在NLSF传输中三种调制格式的BER随着入PD功率的增加而减小。在所测量的入

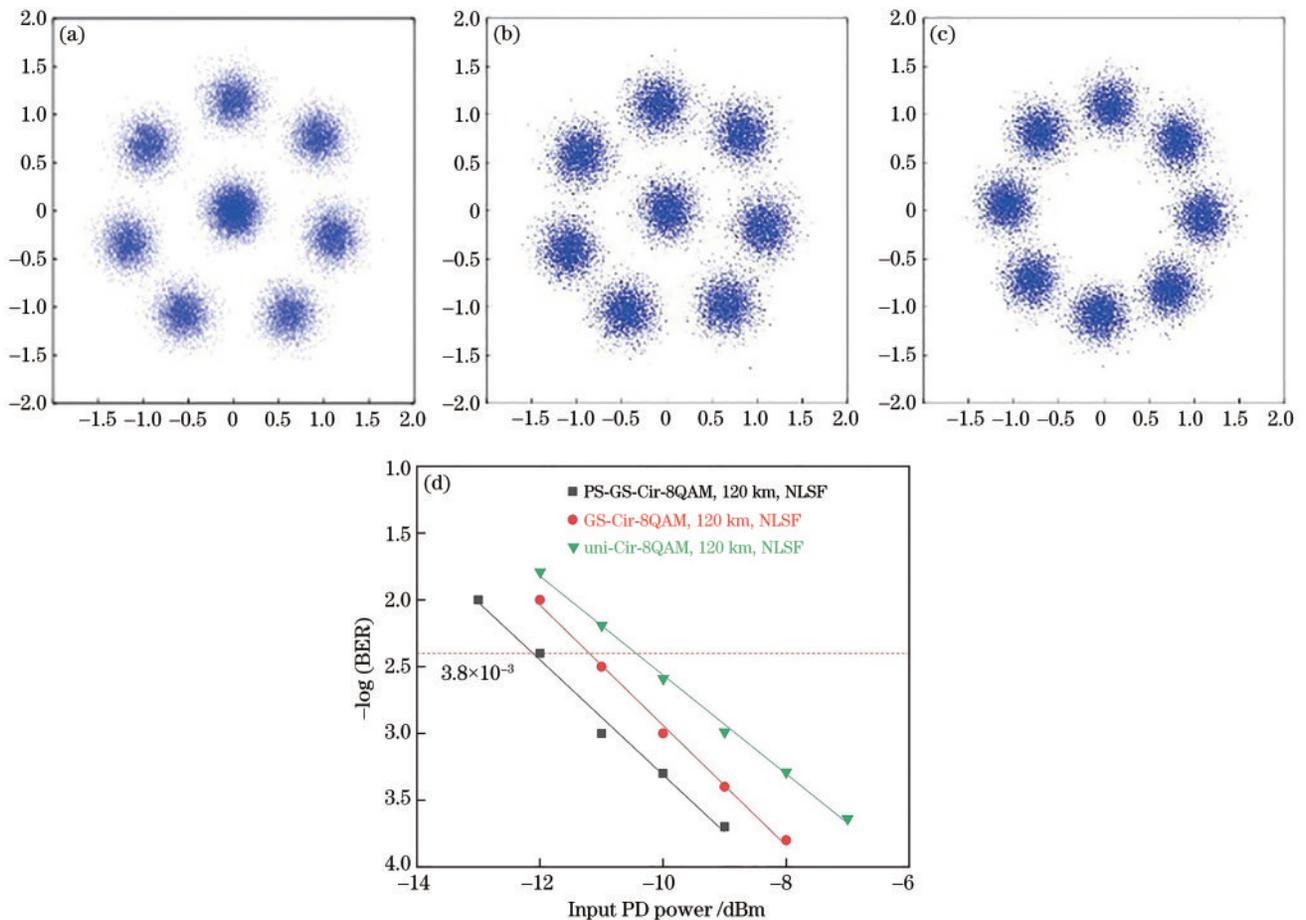


图5 Cir-8QAM、GS-Cir-8QAM和混合整形8QAM的BER曲线及星座图(入PD功率为 $-10 \text{ dBm}$ )。(a) PS-GS-Cir-8QAM经120 km NLSF传输;(b) GS-Cir-8QAM经120 km NLSF传输;(c) Cir-8QAM经120 km NLSF传输;(d) BER曲线

Fig. 5 Bit error rate (BER) curves and constellation diagrams of Cir-8QAM, GS-Cir-8QAM, and hybrid shaping 8QAM (input PD power is  $-10 \text{ dBm}$ ). (a) PS-GS-Cir-8QAM transmitted over 120 km NLSF; (b) GS-Cir-8QAM transmitted over 120 km NLSF; (c) Cir-8QAM transmitted over 120 km NLSF; (d) BER curves

PD 功率区域中,PS-GS-Cir-8QAM 总是优于其他两种格式。PS-GS-Cir-8QAM 在  $-12.1$  dBm 左右达到 HD-FEC 阈值,GS-Cir-8QAM 在  $-11.2$  dBm 左右达到该阈值,Cir-8QAM 则在  $-10.4$  dBm 左右才能达到该阈值。混合整形技术较 GS-Cir-8QAM 提升了  $0.9$  dB 左右的功率增益,较 Cir-8QAM 提升了  $1.7$  dB 左右的功率增益。当入 PD 功率为  $-10$  dBm 时,三种调制格式经过  $120$  km 的 NLSF 传输 BER 都可以达到 HD-FEC 阈值。如图 5(a)~5(c)显示了当入 PD 功率为  $-10$  dBm 时,PS-GS-Cir-8QAM、GS-Cir-8QAM 和 Cir-8QAM 三种调制格式的恢复星座图。可以看出图 5(a)星座点之间混叠很少,因此 GS-PS-Cir-8QAM 的性能最好。

图 6 为 Cir-16QAM、GS-Cir-16QAM、PS-Cir-16QAM ( $H=3.8$  bit/symbol/pol)和 PS-GS-Cir-16QAM ( $H=3.8$  bit/symbol/pol)信号经过  $100$  km NLSF 光纤传输后的信号 BER 与入 PD 功率的关系曲线图。可以看出,在所测量的入 PD 功率区域中,PS-GS-Cir-16QAM 优于其他三种格式。PS-GS-Cir-16QAM 在  $-14.10$  dBm 左右达到 HD-FEC 阈值,PS-Cir-16QAM

在  $-13.47$  dBm 左右达到该阈值,GS-Cir-16QAM 在  $-12.85$  dBm 左右达到该阈值,而 Cir-16QAM 则在  $-11.74$  dBm 左右达到该阈值。混合整形技术较 PS 技术提升了  $0.54$  dB 左右的功率增益,较 GS 技术提升了  $1.16$  dB 左右的功率增益,较 Cir-16QAM 提升了  $2.27$  dB 左右的功率增益。Cir-16QAM 比 Cir-8QAM 经过混合整形可以获得更大的功率增益,是因为 GS 后 Cir-8QAM 的星座点是两圈,内圈仅一个星座点,增加内圈的发送概率也仅增加了一个星座点的发送概率。而 Cir-16QAM 经过 GS 的星座点是三圈,第一圈是一个星座点,第二圈有六个星座点,最外圈有九个星座点。经过概率整形增加内圈的发送概率则是加大了第一圈和第二圈的发送概率,增加较多的内圈星座点的发送,因此比混合整形 Cir-8QAM 获得了更大的整形增益。当入 PD 功率为  $-11$  dBm 时,四种调制格式经过  $100$  km NLSF 传输的 BER 都可以达到 HD-FEC 阈值。图 6(a)~6(d)中分别绘制了 PS-GS-Cir-16QAM、PS-Cir-16QAM、GS-Cir-16QAM 和 Cir-16QAM 四种调制格式的恢复星座图。可以看出图 6(a)星座点之间混叠很少,因此,PS-GS-Cir-16QAM 的性能最好。

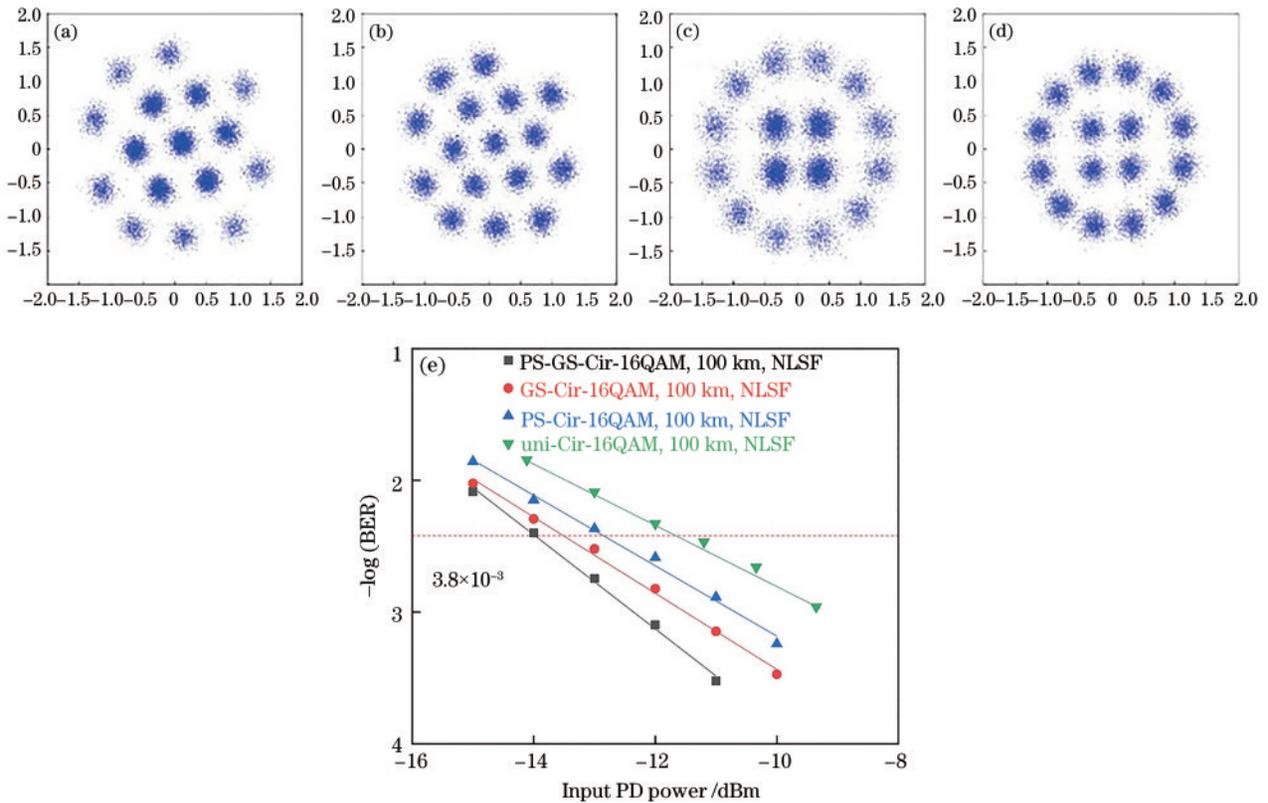


图 6 Cir-16QAM、GS-Cir-16QAM、PS-Cir-16QAM 和混合整形 Cir-16QAM 的 BER 曲线及星座图(入 PD 功率为  $-11$  dBm)。 (a) PS-GS-Cir-16QAM 经  $100$  km NLSF 传输; (b) GS-Cir-16QAM 经  $100$  km NLSF 传输; (c) PS-Cir-16QAM 经  $100$  km NLSF 传输; (d) Cir-16QAM 经  $100$  km NLSF 传输; (e) BER 曲线

Fig. 6 BER curves and constellation diagrams of Cir-16QAM, GS-Cir-16QAM, PS-Cir-16QAM, and hybrid shaping Cir-16QAM (input PD power is  $-11$  dBm). (a) PS-GS-Cir-16QAM transmitted over  $100$  km NLSF; (b) GS-Cir-16QAM transmitted over  $100$  km NLSF; (c) PS-Cir-16QAM transmitted over  $100$  km NLSF; (d) Cir-16QAM transmitted over  $100$  km NLSF; (e) BER curves

图 7 为 Cir-32QAM、GS-Cir-32QAM、PS-Cir-32QAM ( $H=4.6$  bit/symbol/pol) 和 PS-GS-Cir-32QAM ( $H=4.6$  bit/symbol/pol) 信号经过 70 km NLSF 光纤传输后 BER 与入 PD 功率的关系曲线图。在所测量的入 PD 功率区域中可以得出 PS-GS-Cir-32QAM 总是优于其他三种格式。PS-GS-Cir-32QAM 在  $-11.82$  dBm 左右就可以达到 HD-FEC 阈值, PS-Cir-32QAM、GS-Cir-32QAM 和 Cir-32QAM 则分别在  $-10.94$ 、 $-10.42$ 、 $-9.34$  dBm 左右达到该阈值。因此, PS-GS-Cir-32QAM 较 PS-Cir-32QAM、GS-Cir-32QAM 和 Cir-32QAM 分别提升了  $0.88$ 、 $1.40$ 、 $2.48$  dB 左右的功率增益。可以得出 Cir-32QAM 经过混合整

形获得的功率增益是最大的, 那是因为经过 GS 的 Cir-32QAM 的星座点是四圈, 经过概率整形增加了第一圈、第二圈和第三圈的发送概率, 相应地增加了内圈星座点的发送概率, 减少了外圈星座点的发送, 提高了误码性能, 比混合整形的 Cir-8QAM 和 Cir-16QAM 获得了更大的整形增益。当入 PD 功率为  $-9$  dBm 时, 四种调制格式经过 70 km NLSF 传输的 BER 都可以达到 HD-FEC 阈值。图 7(a)~7(d) 中分别绘制了 PS-GS-Cir-32QAM、PS-Cir-32QAM、GS-Cir-32QAM 和 Cir-32QAM 四种调制格式的恢复星座图。可以看出图 7(a) 星座点之间混叠较少, 因此, PS-GS-Cir-32QAM 的性能最好。

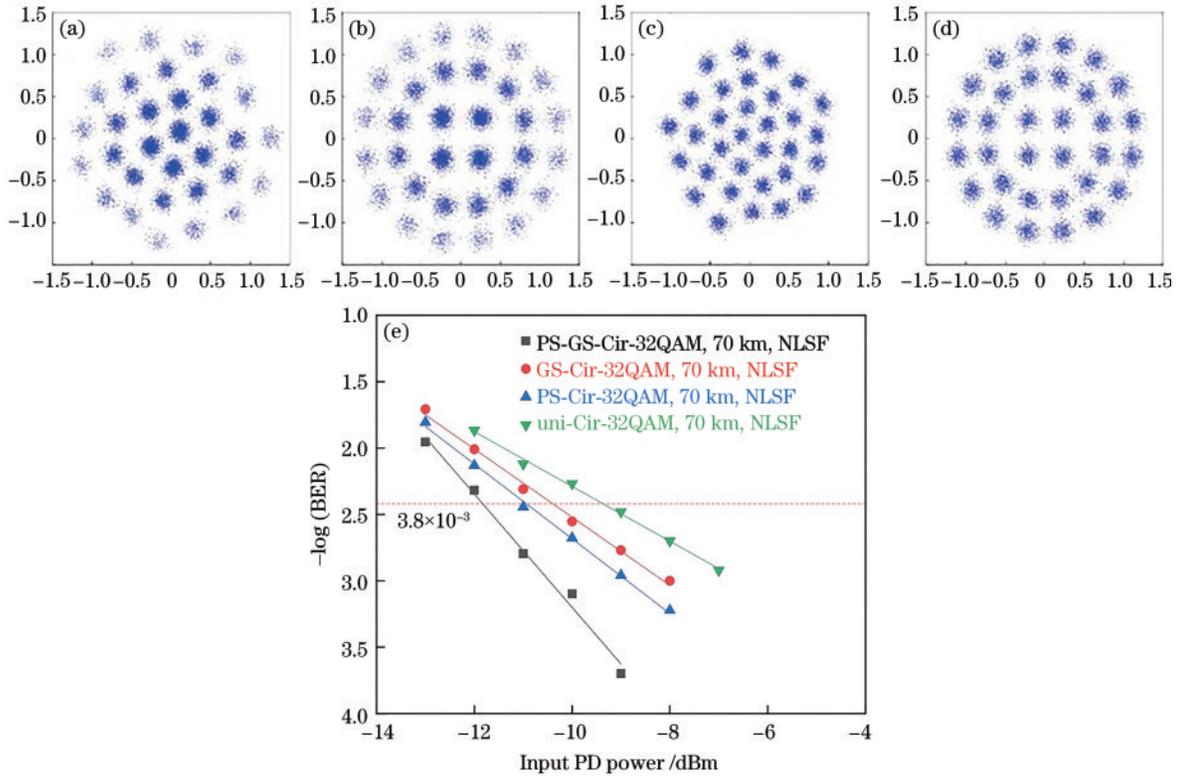


图 7 Cir-32QAM、GS-Cir-32QAM、PS-Cir-32QAM 和混合整形 Cir-32QAM 的 BER 曲线及星座图 (入 PD 功率为  $-9$  dBm)。(a) PS-GS-Cir-32QAM 经 70 km NLSF 传输; (b) PS-Cir-32QAM 经 70 km NLSF 传输; (c) GS-Cir-32QAM 经 70 km NLSF 传输; (d) Cir-32QAM 经 70 km NLSF 传输; (e) BER 曲线

Fig. 7 BER curves and constellation diagrams Cir-32QAM, GS-Cir-32QAM, PS-Cir-32QAM, and hybrid shaping Cir-32QAM (input PD power is  $-9$  dBm). (a) PS-GS-Cir-32QAM transmitted over 70 km NLSF; (b) PS-Cir-32QAM transmitted over 70 km NLSF; (c) GS-Cir-32QAM transmitted over 70 km NLSF; (d) Cir-32QAM transmitted over 70 km NLSF; (e) BER curves

### 4 结 论

提出了基于 PS-GS 混合整形的 MQAM 矢量太赫兹信号传输方案, 通过仿真分析, 验证了 PS-GS-Cir-MQAM、GS-Cir-MQAM、PS-Cir-MQAM 和 Cir-MQAM 调制格式下 130 GHz 太赫兹信号在系统中的有效传输。本文产生的 130 GHz 处的太赫兹信号为单边带信号对光纤色散不敏感, 在光纤传输中不会产生明显的走离效应。仿真结果表明, 承载 PS-GS-Cir-

MQAM 的信号经过 NLSF 传输后的 BER 性能始终优于承载 GS-Cir-MQAM、PS-Cir-MQAM 和 Cir-MQAM 的信号, 并且随着调制阶数的增加混合整形技术优势明显。由于 VPI 软件中器件的各个参数趋于理想, 而实际实验中器件引入非线性效应会更严重, 信号的质量必然会更差, 而经过混合整形的信号克服了光器件和光纤非线性效应的优势会更加突出, 因此具有更大的传输性能优势。

## 参 考 文 献

- [1] Yu J J, Wang K H, Zhang J W, et al.  $8 \times 506$ -gb/s 16QAM WDM signal coherent transmission over 6000-km enabled by PS and HB-CDM[C]//2018 Optical Fiber Communications Conference and Exposition (OFC), March 11-15, 2018, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2018.
- [2] Liu B, Li X Y, Zhang Y, et al. Probabilistic shaping for ROF system with heterodyne coherent detection[J]. *APL Photonics*, 2017, 2(5): 056104.
- [3] Zhang J W, Wey J S, Yu J J, et al. Symmetrical 50-gb/s/ $\lambda$  PAM-4 TDM-PON in O-band with DSP and semiconductor optical amplifier supporting PR-30 link loss budget[C]//2018 Optical Fiber Communications Conference and Exposition, March 11-15, 2018, San Diego, California, USA. Washington, D.C.: OSA, 2018: M1B.4.
- [4] 岳竹青. 高速光通信系统中编码调制技术的研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2020: 2-18.  
Yue Z Q. Research on coding modulation technology in high-speed optical communication system[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2020: 2-18.
- [5] 李汐, 张春蕾, 王欢. 基于概率整形的 16QAM/OFDM-RoF 系统研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(9): 0906008.  
Li X, Zhang C L, Wang H. 16QAM/OFDM-RoF system based on probabilistic shaping[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(9): 0906008.
- [6] 赵峰, 蔡卫童, 张龙龙, 等. 基于平衡探测的微波光子链路线性化分析[J]. *光学学报*, 2019, 39(11): 1104001.  
Zhao F, Cai W T, Zhang L L, et al. Linearization analysis of microwave photonic link based on balanced detection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(11): 1104001.
- [7] 刘翠微, 余建军. 结构简单的 D 波段矢量毫米波信号产生的方法[J]. *光学学报*, 2021, 41(4): 0406001.  
Liu C W, Yu J J. A new scheme of D-band mm-wave vector signal generation with simple structure[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(4): 0406001.
- [8] 刘丽敏, 董泽, 皮雅稚, 等. 采用外调制器产生四倍频的光载毫米波光纤无线通信系统[J]. *中国激光*, 2009, 36(1): 148-153.  
Liu L M, Dong Z, Pi Y Z, et al. Radio-over-fiber system for frequency-quadrupled millimeter-wave generation by external modulator[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(1): 148-153.
- [9] Zhao L, Yu J G, Chen L, et al. 16QAM vector millimeter-wave signal generation based on phase modulator with photonic frequency doubling and precoding[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, 8(2): 5500708.
- [10] 丁俊杰, 王演祎, 张教, 等. W 波段 PS-PAM8 信号在太赫兹空芯光纤中的有线传输[J]. *光学学报*, 2021, 41(24): 2406003.  
Ding J J, Wang Y Y, Zhang J, et al. Wired transmission of PS-PAM8 signal at W-band over terahertz hollow-core fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(24): 2406003.
- [11] Schmidt-Langhorst C, Ludwig R, Molle L, et al. Terabit/s single-carrier transmission systems based on coherent time-division demultiplexing[C]//Optical Fiber Communication Conference 2010, March 21-25, 2010, San Diego, California, USA. Washington, D.C.: OSA, 2010: OThV3.
- [12] van der Heide S, van Weerdenburg J, Biqot-Astruc M, et al. Single carrier 1 Tbit/s mode-multiplexed transmission over graded-index 50 $\mu$ m core multi-mode fiber employing Kramers-Kronig receivers[C]//2018 European Conference on Optical Communication (ECOC), September 23-27, 2018, Rome, Italy. New York: IEEE Press, 2018.
- [13] Nakamura M, Hamaoka F, Matsushita A, et al. Advanced DSP technologies with symbol-rate over 100-gbaud for high-capacity optical transport network[C]//2018 Optical Fiber Communications Conference and Exposition (OFC), March 11-15, 2018, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2018.
- [14] Benyahya K, Simonneau C, Ghazisaeidi A, et al. 200 Gb/s transmission over 20 km of FMF fiber using mode group multiplexing and direct detection[C]//2018 European Conference on Optical Communication (ECOC), September 23-27, 2018, Rome, Italy. New York: IEEE Press, 2018.
- [15] Yu J J, Dong Z, Chien H C, et al. 30-Tb/s ( $3 \times 12.84$ -Tb/s) signal transmission over 320km using PDM 64-QAM modulation[C]//OFC/NFOEC, March 4-8, 2012, Los Angeles, CA, USA. New York: IEEE Press, 2012.
- [16] Louchet H, Kuzmin K, Richter A. Improved DSP algorithms for coherent 16-QAM transmission[C]//2008 34th European Conference on Optical Communication, September 21-25, 2008, Brussels, Belgium. New York: IEEE Press, 2008.
- [17] Fukuchi K, Ogasahara D, Hu J, et al. 112Gb/s optical transponder with PM-QPSK and coherent detection employing parallel FPGA-based real-time digital signal processing, FEC and 100GbE Ethernet interface[C]//36th European Conference and Exhibition on Optical Communication, September 19-23, 2010, Turin, Italy. New York: IEEE Press, 2010.
- [18] 李琪, 周林, 张博, 等. 适用于 BICM-ID 系统的星座成形方法[J]. *通信学报*, 2015, 36(6): 153-160.  
Li Q, Zhou L, Zhang B, et al. Simple constellation shaping for BICM-ID[J]. *Journal on Communications*, 2015, 36(6): 153-160.
- [19] Zhou L, He H L, Zhang Y M, et al. Enhancement of spectral efficiency and power budget in WDN-PON employing LDPC-coded probabilistic shaping PAM8[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 45766-45773.
- [20] Zhao J Y, Liu B, Mao Y Y, et al. Flexible probabilistic shaping RoF signal transmission with adjustable ACO[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 23690-23697.
- [21] Millar D S, Fehenberger T, Koike-Akino T, et al. Coded modulation for next-generation optical communications [C]//Optical Fiber Communication Conference, March 11-15, 2018, San Diego, California. Washington, D.C.: OSA, 2018: Tu3C.3.
- [22] Che D, Cho J H, Chen X. Does probabilistic

- constellation shaping benefit IM-DD systems without optical amplifiers? [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(15): 4997-5007.
- [23] Ding J J, Zhang J, Wei Y R, et al. Comparison of geometrically shaped 32-QAM and probabilistically shaped 32-QAM in a bandwidth-limited IM-DD system [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(16): 4352-4358.
- [24] Qu Z, Djordjevic I B. Hybrid probabilistic-geometric shaping in optical communication systems[C]//2018 IEEE Photonics Conference, September 30-October 4, 2018, Reston, VA, USA. New York: IEEE Press, 2018.
- [25] 姜长鹏, 赵峰, 魏怡, 等. 一种多波段矢量毫米波信号概率整形性能分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(21): 2106002.  
Jiang C P, Zhao F, Wei Y, et al. Performance analysis of a multi-band vector millimetre-wave signal probability shaping[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(21): 2106002.
- [26] 刘君, 赵峰, 孟佳欣, 等. 一种矢量毫米波信号的几何成形性能分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(23): 2306004.  
Liu J, Zhao F, Meng J X, et al. Analysis of geometric shaping performance of a vector millimeter wave signal [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(23): 2306004.
- [27] 林志颖, 杨彦甫, 向前, 等. 相干光通信中概率整形信号的偏振解复用算法 [J]. *光学学报*, 2021, 41(6): 0606002.  
Lin Z Y, Yang Y F, Xiang Q, et al. Polarization demultiplexing algorithm for probabilistically shaped signals in coherent optical communication[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(6): 0606002.
- [28] Lü K, Zhang Q, Xin X J, et al. Constellation-designed 32QAM with geometric and probabilistic shaping for optical fiber system[J]. *Optical Engineering*, 2019, 58(1): 016101.
- [29] Chen H, Yang T, Wang L Q, et al. Phase uniformly distributed circular MQAM combined with probabilistic shaping for PM-CO-OFDM systems in satellite-to-ground optical communications[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, 11(6): 7907110.
- [30] Zhang S L, Yaman F, Mateo E, et al. Design and performance evaluation of a GMI-optimized 32QAM[C]//2017 European Conference on Optical Communication (ECOC), September 17-21, 2017, Gothenburg, Sweden. New York: IEEE Press, 2017.
- [31] Schulte P, Böcherer G. Constant composition distribution matching[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2016, 62(1): 430-434.