

基于  $K$ -means 的自适应概率整形信号相位恢复算法杨雄伟<sup>1</sup>, 赵峰<sup>2\*</sup>, 赵林仙<sup>1</sup>, 孟昭<sup>2</sup><sup>1</sup>西安邮电大学通信与信息工程学院, 陕西 西安 710121;<sup>2</sup>西安邮电大学电子工程学院, 陕西 西安 710121

**摘要** 为解决未知概率整形因子信号的自适应相位恢复问题, 提出了一种基于  $K$ -means 聚类的自适应相位恢复算法。通过理论分析与数值仿真, 验证了基于  $K$ -means 聚类进行星座点模值半径重定位的可行性, 将  $K$ -means 聚类与前馈式载波相位恢复算法相结合, 解决了概率整形信号经归一化处理后存在的星座点相对放大的问题, 实现了未知概率整形因子信号相位的自适应恢复。对该算法在不同光信噪比、不同激光器线宽下的 16 正交幅度调制 (QAM) 与 64QAM 信号进行了分析, 结果表明所提算法不仅可用于未知概率整形因子信号的相位恢复, 还可用于均匀 QAM 信号的相位恢复。所提算法在星座点模值的重新定位中考虑了噪声的影响, 在相同的测试相位数量下可以实现更高精度的相位补偿, 对于均匀 QAM 信号的光信噪比容忍度提升了约 1 dB。

**关键词** 光通信; 概率整形; 载波相位恢复;  $K$ -means 聚类

中图分类号 TN929.11

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.0906001

Phase Recovery Algorithm for Adaptive Probabilistic Shaping Signal Based on  $K$ -meansYang Xiongwei<sup>1</sup>, Zhao Feng<sup>2\*</sup>, Zhao Linxian<sup>1</sup>, Meng Zhao<sup>2</sup>

<sup>1</sup> School of Communication and Information Engineering, Xi'an University of Post and Telecommunications, Xi'an 710121, Shaanxi, China;

<sup>2</sup> School of Electronic Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710121, Shaanxi, China

**Abstract** A self-adaptive phase recovery algorithm based on  $K$ -means clustering is proposed to solve the problem of self-adaptive phase recovery of unknown probability shaping factor signals. Through theoretical analysis and numerical simulation, the feasibility of constellation point modulus radius repositioning based on  $K$ -means clustering is verified. Then, the  $K$ -means clustering is combined with the feedforward carrier phase recovery algorithm to solve the problem of relative amplification of constellation points after normalization of probabilistic shaped signals, and the adaptive recovery of signal phase of unknown probability shaping factor is realized. The 16 quadrature amplitude modulation (QAM) and 64QAM signals at different optical signal-to-noise ratio (OSNR) and laser linewidth are simulated. The results show that the proposed algorithm can be used not only for phase recovery of signals with unknown probability shaping factor, but also for phase recovery of uniform QAM signals. Because the proposed algorithm considers the influence of noise in the repositioning of the constellation point modulus, higher precision phase compensation can be realized under the same number of test phases. The algorithm improves the tolerance of OSNR by about 1 dB for uniform QAM signals.

**Key words** optical communications; probabilistic shaping; carrier phase recovery;  $K$ -means clustering

收稿日期: 2021-10-25; 修回日期: 2021-11-14; 录用日期: 2021-11-25

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

## 1 引言

概率整形(PS)技术作为调制格式的优化技术,凭借较低的系统复杂度得到了较大传输容量的提升,为光通信系统提供了极大的灵活性,因此受到了越来越多研究学者的关注<sup>[1-6]</sup>。自 2016 年 9 月以来,概率整形技术已被用于各种实验研究中,如诺基亚贝尔实验室利用概率整形技术在德国骨干网中通过四载波完成了 1 Tbit/s 的数据传输,实现了前所未有的传输容量与频谱效率<sup>[7]</sup>。在均匀分布的正交幅度调制(QAM)信号与概率整形正交幅度调制(PS-QAM)信号的对比中,研究人员发现在非线性信道中概率整形技术可以提供大于 1.53 dB 的灵敏度增益<sup>[8]</sup>。因此,作为一项突破性的技术,概率整形技术将会成为改善未来光通信系统性能最具优势的技术之一。现阶段的数字信号处理(DSP)主要针对均匀 QAM 信号开发<sup>[9-11]</sup>,常用的相位恢复算法有 Viterbi-Viterbi(V-V)算法、分圈的 V-V 算法和修正类 V-V 算法<sup>[12-16]</sup>,对于更高阶的多模 QAM 信号,常用的相位恢复算法有盲相位搜索(BPS)算法<sup>[17]</sup>和二级补偿的盲相位搜索联合最大似然估计(BPS+ML)算法<sup>[18]</sup>。

理论上,对于 PS-QAM 信号的相位恢复,也可使用均匀 QAM 信号的 DSP 算法,但随着研究的深入,特别是在较大的概率整形因子下,均匀 QAM 信号的 DSP 算法无法直接用于 PS-QAM 信号的相位恢复<sup>[19]</sup>。为了降低突发错误对算法性能的影响以及为了保证算法的快速收敛,DSP 算法常对信号进行归一化处理,对概率整形后的呈高斯分布的信号进行归一化处理,所得星座点相对于均匀 QAM 星座点得到一定程度的放大。无论是修正的 V-V 算法,还是 BPS+ML 算法,全部都依赖于星座点的位置,星座点位置变化过大会影响星座点的分类和 BPS 算法中最佳补偿相位的选取,从而导致算法性能下降甚至失效。目前针对概率整形信号相位恢复的解决方案依赖于概率整形的先验信息,需要利用概率整形因子计算出整形后信号的平均发送功率,再利用平均发射功率将放大的星座点恢复为标准的星座点,从而进行后续的载波相位恢复。在实际的通信链路中,发射端可能会根据信道质量的反馈信息实时调整概率整形因子以保证通信质量,因此自适应概率整形信号相位恢复的研究很有意义。Lin 等<sup>[20]</sup>已经提出了基于核密度估计的自适应概率整形信号载波相位恢复算法,其核心思想是利用核密

度估计算法对概率整形因子进行估计,从而完成后续的载波相位恢复,但该算法在低信噪比下的性能会有所下降。较低的信噪比可能会影响概率整形因子估计的准确度,从而导致在低信噪比区间内相位补偿算法的性能有所下降。

基于此,本文提出了一种简便的概率整形信号相位自适应恢复算法,该算法无需概率整形信号的先验信息,可在未知概率整形因子的状况下自适应地完成概率整形信号的相位恢复。针对概率整形信号在归一化后星座点会有一定程度的放大的问题,利用 K-means 聚类自适应求出概率整形信号经归一化后星座点的模值半径,并根据重新定位的模值计算出放大星座点与标准星座点之间的转换因子,利用转换因子将概率整形后放大的星座点转化为标准的星座点,从而进行后续的相位恢复。该方案的优势在于:可自适应于不同概率整形因子下信号的相位恢复。同时,因为模值半径的重新定位考虑了噪声的影响,所以在相同信噪比下,该方案可以实现更高精度的相位补偿,补偿后信号的误差矢量幅度(EVM)值更低。该算法也可用于均匀 QAM 信号的相位恢复,与常规的前馈式载波相位恢复算法相比,一定程度上解决了噪声影响导致最终恢复出的星座点中心偏离标准点的问题,这相当于引入了聚类辅助判决,因此在相同的滑动窗口长度与相同的测试相位数量下,基于 K-means 聚类的模值重定位联合算法表现出了更高的光信噪比(OSNR)容忍度。

## 2 基本原理

在相干光通信系统中,由于激光器具有一定的线宽,线宽的存在会引入相位噪声,这种噪声会以一定的速率随机改变,造成星座点旋转,从而导致星座点的延长与混叠。相位噪声过大则会淹没调制信息。光信号在光纤中传输也会受到一定相位噪声的影响,同样表现为星座点的旋转。因此,信号相位的恢复对通信系统来说极为重要,以 QAM 信号为例,仅考虑相位噪声和信道高斯噪声,则接收到的第  $n$  个码元可以表示为

$$S_n = A_n \exp(ja_n + \theta_n) + N_n, \quad (1)$$

式中: $S_n$  表示  $n$  时刻接收的码元; $A_n$  为码元模值; $a_n$  为  $n$  时刻的码元相位; $\theta_n$  为  $n$  时刻的相位噪声; $N_n$  为信道加性噪声。可以看出, $\theta_n$  过大则会淹没调制信息  $a_n$ 。

目前,概率整形信号常遵循 Maxwell-Boltzmann 分布:

$$P_S(s_i) = \frac{e^{-v|s_i|^2}}{\sum_{k=1}^M e^{-v|s_k|^2}}, \quad (2)$$

式中:  $P_S(s_i)$  表示某一符号  $s_i$  出现的概率;  $M$  表示符号的阶数;  $v$  表示概率整形因子。从式(2)中可以发现, 模值小的符号出现的概率大, 模值大的符号出现的概率小, 这导致信号的平均功率降低。因此, 在星座点数据经归一化后, 概率整形信号相对于均匀 QAM 信号会有一定程度的放大, 放大程度用标量  $\Delta$  表示,  $\Delta = \sqrt{Q/\bar{P}}$ , 其中  $Q$  为标准 QAM 的平均发射功率,  $\bar{P}$  为概率整形信号的平均发射功率,  $\bar{P}$  可以表示为

$$\bar{P} = \sum_{k=1}^M |S_k|^2 \cdot P(S_k), \quad (3)$$

式中:  $P(S_k)$  表示某一星座点出现的概率;  $S_k$  表示星座点数据。

对于不同概率整形因子下的信号, 都需要计算出对应的平均发射功率, 通过  $\tilde{S} \cdot \sqrt{\bar{P}}$  ( $\tilde{S}$  表示归一化后的星座点) 将归一化后放大的星座点恢复为标准星座点。假如默认信号的平均发射功率为均匀信号的发射功率  $Q$ , 则  $\tilde{S} \cdot \sqrt{Q} = \Delta S$ , 可以看出归一化后恢复的星座点也相对放大了  $\Delta$  倍。如果采用相应的聚类算法完成对  $\Delta S$  模值的重新定位, 通过式(4)就可以实现对  $\Delta$  的求解, 而无需计算概率整形信号的平均发送功率。  $\Delta$  可表示为

$$\Delta = \frac{\Delta A + N}{A}, \quad (4)$$

式中:  $A$  为标准 QAM 信号模值;  $N$  为幅度噪声;  $\Delta A + N$  为实际定位的星座点模值;  $\Delta A = |\Delta S| = \Delta |S|$ 。可以发现, 这样计算出的  $\Delta$  考虑了噪声的影响, 因此通过  $\tilde{S} \sqrt{Q}/\Delta$  标准化后的星座点模值更加接近标准模值  $A$ , 从而提升了后续 BPS+ML 算法的相位补偿效果。

### 2.1 基于 K-means 聚类的模值重定位

利用 K-means 聚类算法进行星座点模值半径的重新定位, 其基本思想是将接收信号中的部分数据进行取模运算后作为样本数据  $X = \{X_1, X_2, X_3, \dots, X_n\}$ , 然后利用 K-means 聚类将这  $n$  个样本数据按照模值的相似性聚类到  $K$  个不同模值半径中, 其中  $n$  的取值与概率整形因子有关: 概率整形因子越大,  $n$  的值就越大; 概率整形因子越小,  $n$  的值就越小。设计中取  $n$  为总体数据长度的 20%。对于 K-means 聚类, 首先按照标准星座点的模值进

行  $K$  个聚类中心的初始化, 得到  $\{C_1, C_2, C_3, \dots, C_K\}$ ,  $1 \leq K < n$ , 然后计算每个样本数据与每一个聚类中心的距离的绝对值:

$$\text{dis}(X_i, C_j) = \text{abs}(X_i - C_j), \quad (5)$$

式中:  $X_i$  表示第  $i$  个样本数据,  $1 \leq i \leq n$ ;  $C_j$  表示第  $j$  个聚类中心,  $1 \leq j \leq K$ 。依次比较每个样本数据到每一个聚类中心的模值差, 并按最小模值差的原则将样本聚类, 将本次聚类元素模值的均值作为新的聚类中心  $\{S_1, S_2, S_3, \dots, S_k\}$ , 继续进行迭代, 直到聚类中心保持不变, 则停止迭代, 最后得到的聚类中心就是重新定位的模值。

算法设计过程中, 为了保证聚类算法的快速收敛, 引入了半径因子  $\alpha$ 。  $\alpha$  是初始聚类中心与标准星座点模值半径的相对比值, 初始值设置为 1.1。同时, 为了保证算法聚类的可靠性, 在每一次聚类结果收敛时对聚类结果进行判定。以 16QAM 为例, 内外三圈模值保持着一定的比例, 因此在聚类收敛时可判断聚类结果是否满足基本的比例关系, 从而判断聚类是否成功, 如果不满足, 则可以将初始半径因子加 0.2, 重新开始聚类。最后, 为了降低算法的复杂度, 在判断迭代是否收敛时不再遵循聚类中心保持不变的原则, 而是当上一次聚类中心与本次聚类中心的模值差的平均值小于 0.005 时就判定聚类收敛。模值之间间隔很小, 在聚类未完全收敛的情况下, 其对最终转换因子的计算影响不大, 这样的设计减少了迭代次数, 极大提高了算法效率。基于 K-means 聚类的算法流程图如图 1 所示。

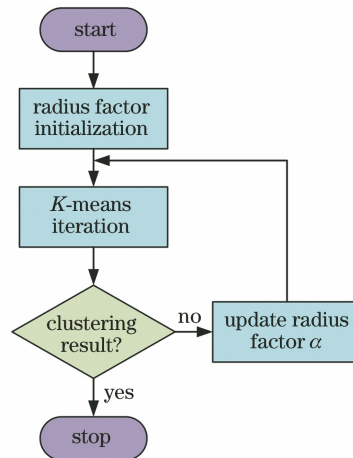


图 1 K-means 聚类算法流程图

Fig. 1 Flow chart of K-means clustering algorithm

### 2.2 载波相位恢复

概率整形信号一般用于高阶多模的 QAM 信号, 而分圈的 V-V 算法与修正类 V-V 算法相对于

基于前馈的补偿算法适用性较差,对于高阶 QAM 信号的相位恢复并不理想,且基于前馈的相位补偿算法在实际应用中更加适合并行流水线的处理模式,能进一步提高算法效率,因此后续的载波相位恢复采用 BPS+ML 算法。BPS+ML 算法原理如下:首先利用  $N$  个测试相位进行相位噪声的补偿,然后根据补偿后的星座点与标准星座点之间的欧氏距离进行判定。为了保证算法的可靠性,采取滑动窗口的模式对补偿后连续  $B$  个符号与标准星座点之间的欧氏距离求和,在  $N$  个求和值中选取最小值所对应的测试相位作为这  $B$  个符号的最佳补偿相位。BPS+ML 算法采取二级补偿模式,前面的 BPS 过

程采取少量的测试相位与较小滑动窗口长度,在一级 BPS 进行粗略的补偿后,后续采用最大似然相位估计算法(ML)来进一步提高相位补偿的精度。

利用  $K$ -means 聚类完成模值半径的重新定位,然后根据定位结果计算出放大的星座点与标准星座点之间的转换因子,利用转换因子将星座点标准化,从而执行后续的 BPS+ML 算法。自适应的载波相位恢复算法示意图如图 2 所示,其中  $Y$  表示接收的星座点数据, $S_n$  是  $Y$  中的部分数据, $R$  是标准 QAM 信号的模值, $r$  是基于  $K$ -means 重新定位的模值半径, $\lambda$  表示转换因子, $Y'$  表示标准化后的星座点数据, $Y''$  表示相位补偿后的星座点数据。

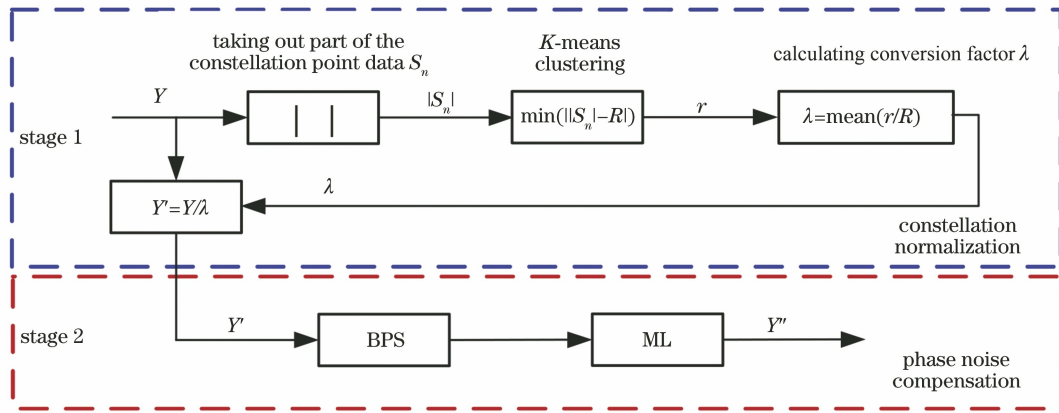


图 2 相位恢复算法示意图

Fig. 2 Schematic diagram of phase recovery algorithm

### 3 数值仿真与结果分析

利用 VPI 软件搭建仿真系统,分别进行了

16QAM 与 64QAM 概率整形信号的仿真,系统波特率设置为 10 GBaud,传输 131072 个符号,仿真示意图如图 3 所示。

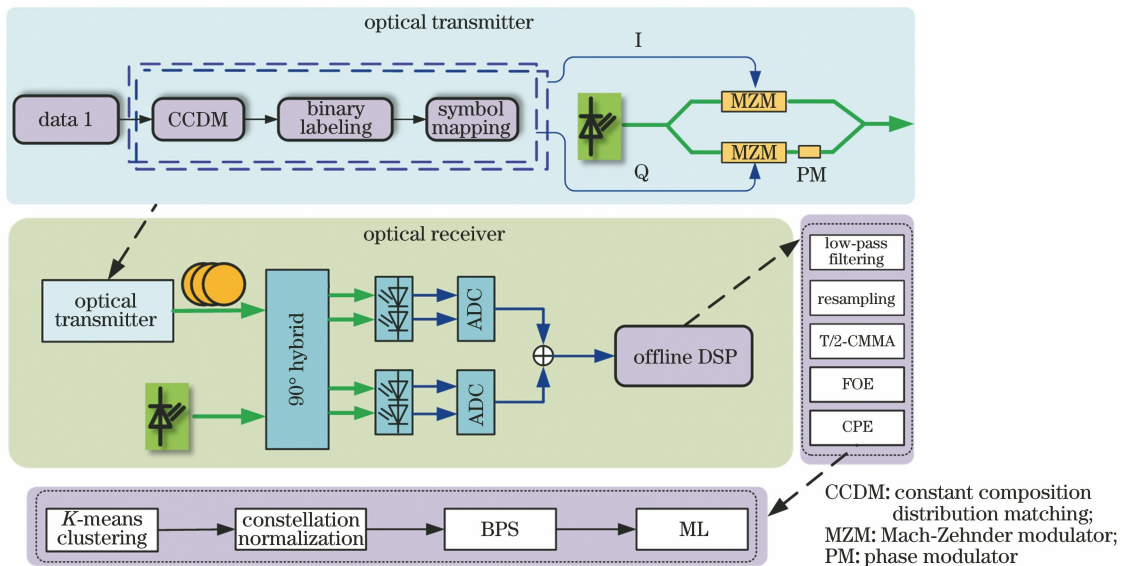


图 3 系统仿真框图

Fig. 3 Schematic diagram of system simulation

### 3.1 基于 K-means 聚类的模值重定位性能分析

K-means 聚类属于无监督的聚类方式,聚类过程中噪声的存在可能会导致不正确的聚类,从而影响转换因子的计算。为了研究基于 K-means 聚类的模值重定位的性能,在激光器线宽为 100 kHz 的情况下,分别进行了不同概率整形因子下 16QAM 的仿真。为了避免接收端其他算法的影响,直接利用 VPI 软件进行下采样与符号判决,然后利用 K-means 聚类进行模值半径的重新定位,计算出不同噪声下的转换因子,并以无噪声情况下计算出的转换因子为标准,进行归一化处理。分别进行信息熵为 3.78, 3.56, 3.30 bit/symbol 的 16QAM 的仿真,结果如图 4 所示,横轴为不同噪声下接收星座点三类模值方差的均值,纵轴为转换因子的归一化值。

随着模值方差的增大,基于聚类结果所得出的转换因子与标准转换因子的差值越来越大,但基本保持在最佳转换因子的 90% 以上。图 4 中信息熵为 3.78 bit·symbol<sup>-1</sup> 的曲线模值方差为 0.3196 时对应的聚类错误率为 24.6%;信息熵为 3.56 bit·symbol<sup>-1</sup> 的曲线模值方差为 0.325 时对应的聚类错误率为 13.29%;信息熵为 3.30 bit·symbol<sup>-1</sup> 的

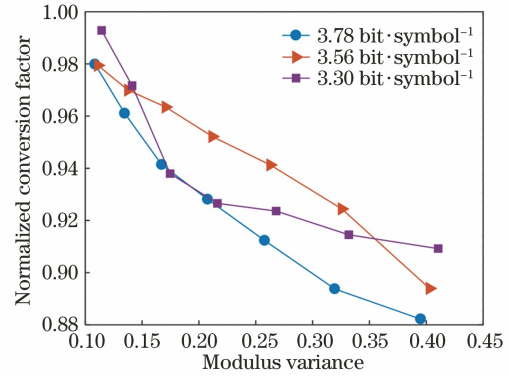


图 4 归一化转换因子随模值方差的变化

Fig. 4 Variation of normalized conversion factor with modulus variance

曲线模值方差为 0.331 时对应的聚类错误率为 8.08%。这表明,概率整形因子越大,对应星座点的放大程度就越大,抗噪声能力就越强,聚类效果就越好;上述结果也表明了利用 K-means 聚类进行星座点模值半径重新定位的可行性,即使在存在一定噪声和聚类错误的情况下,噪声和聚类错误对转换因子的计算影响很小。图 5(a)~(c)分别是信息熵为 3.78, 3.56, 3.30 bit·symbol<sup>-1</sup> 的模值重新定位结果图,可以看出, K-means 聚类可以完成模值半径的重新定位。

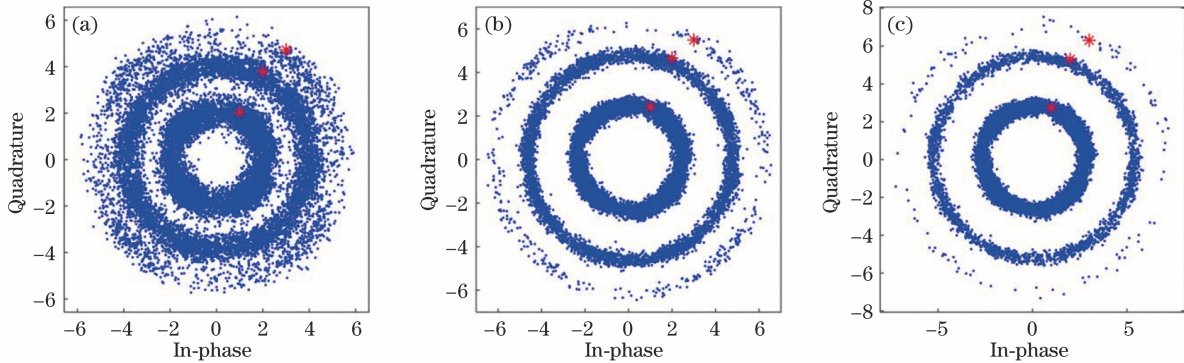


图 5 半径重定位结果。(a)信息熵为 3.78 bit·symbol<sup>-1</sup>; (b)信息熵为 3.56 bit·symbol<sup>-1</sup>; (c)信息熵为 3.30 bit·symbol<sup>-1</sup>

Fig. 5 Radius relocation results. (a) Information entropy is 3.78 bit·symbol<sup>-1</sup>; (b) information entropy is 3.56 bit·symbol<sup>-1</sup>; (c) information entropy is 3.30 bit·symbol<sup>-1</sup>

### 3.2 16QAM 相位恢复仿真分析

利用图 3 所示的仿真系统进行 PS-16QAM 信号的仿真,对产生的信号进行离线 DSP 处理,其中包括下采样、正交归一化、时钟恢复、偏振均衡、频偏估计与相位恢复。仿真中分别进行了不同信息熵下 16QAM 信号的相位恢复,其中相位恢复分别采用常规 BPS+ML 算法和基于 K-means 聚类的模值重定位与 BPS+ML 联合算法。图 6(a)、(b)分别表示不同信息熵下 16QAM 信号的光信噪比与误码率

(BER, 其值用  $V_{BER}$  表示)、EVM 的关系。

图 6 中的 W/O 曲线和 W 曲线分别表示采用常规 BPS+ML 算法和基于 K-means 聚类的模值重定位与 BPS+ML 联合算法。从图 6(a)中的误码率可以看出,联合算法可以自适应完成不同概率整形因子下信号的相位恢复,并且通过对比 4 bit·symbol<sup>-1</sup> W/O 与 4 bit·symbol<sup>-1</sup> W 两条曲线,可以发现,对于均匀 16QAM 信号,采用联合算法恢复后的误码率更低。图 6(b)为采用不同算法

恢复后信号的 EVM 值,可以看出,采用联合算法恢复后信号的 EVM 值都优于采用常规 BPS+ML 算法恢复后信号的 EVM 值。这表明,基于  $K$ -means 聚类的模值重定位与 BPS+ML 联合算法对均匀

16QAM 和概率整形 16QAM 都有增益。对于均匀 16QAM 信号,高信噪比区间约有 1 dB 的 OSNR 增益,对于概率整形 16QAM 信号,恢复后信号的 EVM 值有一定的提升。

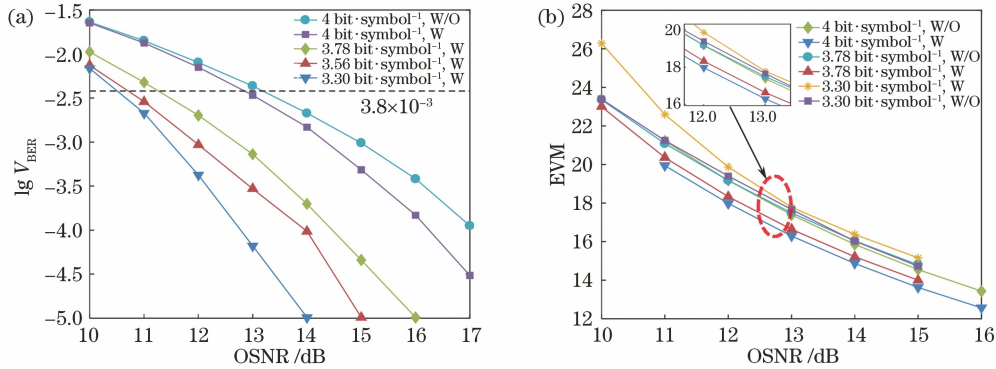


图 6 不同光信噪比条件下恢复信号的 BER 和 EVM。(a) BER;(b) EVM

Fig. 6 BER and EVM after signal recovery under different OSNR. (a) BER; (b) EVM

为了测试算法对激光器线宽的容忍度,在线宽分别为 100 kHz、300 kHz、500 kHz、700 kHz、1 MHz 时对发射端与本地端激光器进行了仿真,其中 BPS+ML 算法的测试相位数量为 32,滑动窗口长度为 11。对于概率整形信号来说,归一化广义互信息(NGMI)是一种更可靠、更精确的性能指标,因此采用 NGMI 来代替误比特率。如图 7 所示,8 条曲线分别表示不同信息熵下 16QAM 在不同线宽下进行相位恢复后的 NGMI。从 NGMI 值可以看出,线宽在 100 kHz 与 1 MHz 之间时,算法均可以完成信号的相位恢复,但采用联合算法进行相位恢复后得到的 NGMI 值相对于常规 BPS+ML 算法的 NGMI 值有一定的提升。

相位数量为 32,滑动窗口长度为 33。与 16QAM 不同的是,64QAM 的模值半径数量为 9,并且其内部的 3、4 圈和 6、7 圈间隔较小,在大量噪声存在的情况下,很容易将 3、4、6、7 圈与周围圈聚为一类。因此,在判断聚类是否成功时,只考虑 1、2、5、8、9 圈之间的相对比值。同时,在计算转换因子时,只考虑第 1、2、5、8、9 圈的聚类结果。在发射端与接收端激光器线宽设置为 100 kHz 的情况下,分别进行了不同信息熵 64QAM 信号的传输仿真。

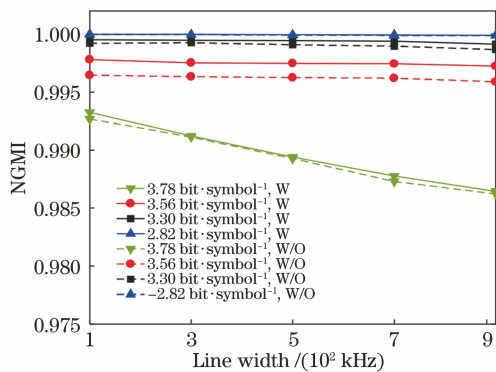


图 7 不同线宽下不同信息熵的 16QAM 的 NGMI

Fig. 7 NGMI curves of 16QAM with different information entropy and different line width

### 3.3 64QAM 相位恢复仿真分析

利用 VPI 中搭建的系统进行 PS-64QAM 的仿真,波特率设置为 10 GBaud,BPS+ML 算法的测试

图 8(a)为不同信息熵下 PS-64QAM 的误码率与光信噪比的关系曲线,从图 8 中可以看出,在两条均匀 64QAM 的误码率曲线中,采用基于  $K$ -means 聚类的模值重定位得到的误码率比 BPS+ML 联合算法恢复后的误码率更低,联合算法提高了均匀 64QAM 信号的约 1 dB 的 OSNR 容忍度。同时,可以看出,联合算法可以自适应完成 64QAM 信号的信息熵从 4.71 bit·symbol<sup>-1</sup>到 6 bit·symbol<sup>-1</sup>的相位恢复。图 8(b)为采用 BPS+ML 算法和联合算法恢复后信号的 EVM 值,可以看出,联合算法得到的恢复后信号的 EVM 值更低,这表明基于  $K$ -means 聚类的模值重定位与 BPS+ML 联合算法对 64QAM 依旧具有一定的增益。

与 16QAM 的分析过程相似,进行了不同激光器线宽下的仿真,其中 BPS+ML 算法的测试相位数量与滑动窗口长度保持不变,同样以 NGMI 为指标。图 9 为激光器线宽在 100 kHz、300 kHz、500 kHz、700 kHz 和 1 MHz 下不同信息熵 64QAM 的 NGMI。可以看出,在激光器线宽为

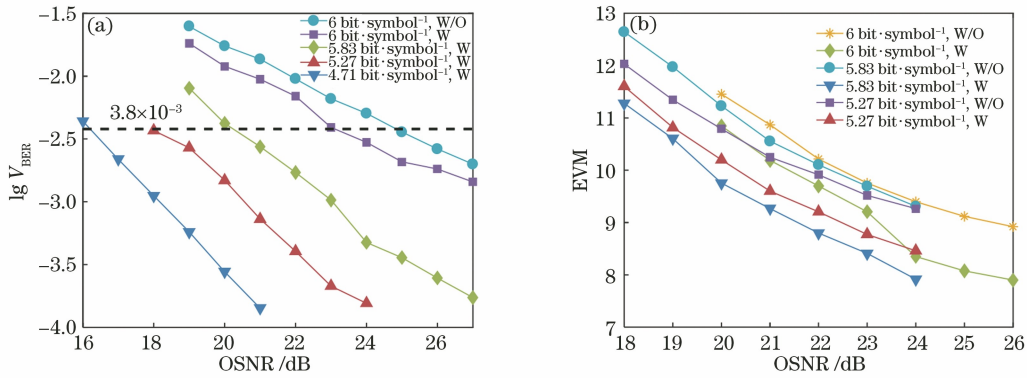


图 8 不同光信噪比条件下恢复信号的 BER 和 EVM。(a) BER;(b) EVM

Fig. 8 BER and EVM after signal recovery under different OSNR. (a) BER; (b) EVM

100 kHz 到 1 MHz 之间,联合算法均可以完成信号的相位恢复。当信息熵为  $5.83 \text{ bit} \cdot \text{symbol}^{-1}$  与  $5.27 \text{ bit} \cdot \text{symbol}^{-1}$  时,采用常规 BPS+ML 算法在激光器线宽为 500 kHz 与 700 kHz 时就无法完成对应的相位解扰。同时,对比不同算法恢复后数据的 NGMI,可以发现采用联合算法恢复后数据的 NGMI 值更高。这主要是因为模值半径重新定位时考虑了噪声的影响,因此计算出的转换因子更加准确,标准化后星座点的模值更加接近标准模值,对应恢复后的星座点也更加接近标准点,所以联合算法相对于常规的 BPS+ML 算法有一定的性能提升,对激光器线宽的容忍度更高。

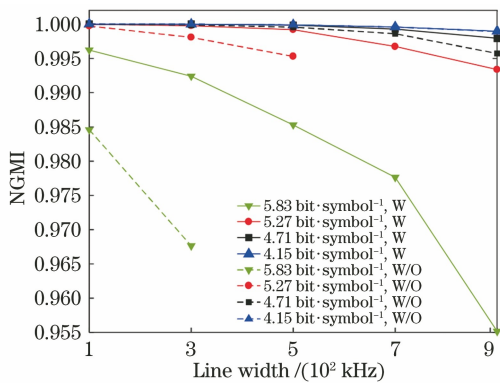


图 9 不同线宽下不同信息熵 64QAM 的 NGMI

Fig. 9 NGMI curves of 64QAM with different information entropy for different line width

图 10 给出了部分仿真结果,其中图 10(a)为信息熵为  $4 \text{ bit} \cdot \text{symbol}^{-1}$  的均匀 16QAM 的光信噪比为 15 dB 时的模值重新定位结果图,图 10(b)是对应图 10(a)的最终恢复的星座图。图 10(c)是信息熵为  $2.8 \text{ bit} \cdot \text{symbol}^{-1}$  的 PS-16QAM 信号在光信噪比为 13 dB 时的模值重新定位结果图,图 10(d)是对应图 10(c)的最终恢复的星座图。图 10(e)为信息熵为  $6 \text{ bit} \cdot \text{symbol}^{-1}$  的均匀 64QAM 的光信噪比为

24 dB 时的模值重新定位结果图,图 10(f)是对应图 10(e)的最终恢复的星座图。图 10(g)是信息熵为  $4.71 \text{ bit} \cdot \text{symbol}^{-1}$  的 PS-64QAM 信号在光信噪比为 20 dB 时的模值重新定位结果图,图 10(h)是对应图 10(g)的最终恢复的星座图。从这些结果可以看出,基于 K-means 聚类可以完成模值半径的重新定位。对于高阶 QAM 信号,模值之间本身间隔较小,噪声可能会导致聚类点的重合,但通过对大量仿真结果的分析发现,对于高阶 QAM 信号,只取聚类结果的部分作为参考模值,其对最终信号恢复的影响可以忽略不计。

## 4 结 论

提出了一种自适应概率整形信号相位恢复算法,该算法解决了大概率整形因子和未知概率整形因子下无法直接应用常规相位恢复算法的问题。利用 K-means 聚类对概率整形后的信号进行模值半径的重新定位,并根据重新定位的结果求出含有噪声的信号与标准 QAM 信号之间的转换因子,利用转换因子将含有噪声的星座点标准化,从而进行后续的相位恢复。在模值半径重新定位迭代的过程中,所提算法考虑了噪声的影响,改善 BPS+ML 算法相位恢复的效果。

仿真结果表明,所提算法可自适应于不同概率整形因子下信号的相位恢复。对于均匀 QAM 信号的相位恢复,所提算法存在约 1 dB 的 OSNR 增益。对于概率整形信号的相位恢复,所提算法在低信噪比区间不存在性能损失且恢复后数据的 EVM 值更低。通过仿真发现噪声大小对转换因子的计算影响不大,因此算法稳定度较高。在模值半径重新定位的过程中,只需要取部分数据进行迭代,其复杂度也相对较低。综合以上优点,可以发现基于 K-means 聚

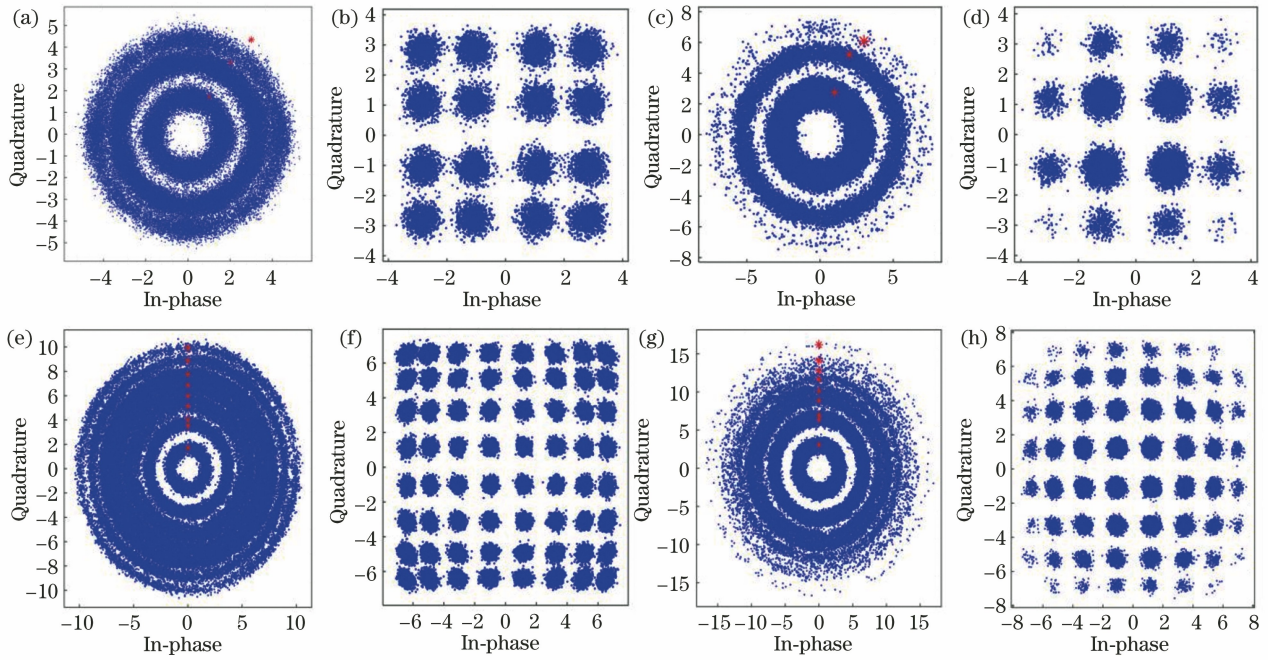


图 10 仿真结果图。(a)(b)  $4 \text{ bit} \cdot \text{symbol}^{-1}$  16QAM; (c)(d)  $2.8 \text{ bit} \cdot \text{symbol}^{-1}$  16QAM; (e)(f)  $6 \text{ bit} \cdot \text{symbol}^{-1}$  64QAM; (g)(h)  $4.71 \text{ bit} \cdot \text{symbol}^{-1}$  64QAM

Fig. 10 Simulation results. (a)(b)  $4 \text{ bit} \cdot \text{symbol}^{-1}$  16QAM; (c)(d)  $2.8 \text{ bit} \cdot \text{symbol}^{-1}$  16QAM; (e)(f)  $6 \text{ bit} \cdot \text{symbol}^{-1}$  64QAM; (g)(h)  $4.71 \text{ bit} \cdot \text{symbol}^{-1}$  64QAM

类的模值重定位与 BPS+ML 联合算法是一种简便、灵活的方案,可用于均匀信号和不同概率整形因子下的概率整形信号的相位恢复。

### 参 考 文 献

- [1] Fehenberger T, Böcherer G, Alvarado A, et al. LDPC coded modulation with probabilistic shaping for optical fiber systems [C]//2015 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), March 22-26, 2015, Los Angeles, CA, USA. New York: IEEE Press, 2015: 15216234.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Schmalen L. Probabilistic constellation shaping: challenges and opportunities for forward error correction [C]//2018 Optical Fiber Communications Conference and Exposition (OFC), March 11-15, 2018, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2018: 17856133.
- [5] 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.
- [6] Yu J J, Kong M, Chien H C, et al. 400G/channel 50-GHz WDM coherent transmission: PS 64QAM versus hybrid 32/64QAM [C]//2019 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), March 3-7, 2019, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2019: 18618623.
- [7] Idler W, Buchali F, Schmalen L, et al. Field trial of a 1 Tb/s super-channel network using probabilistically shaped constellations [J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(8): 1399-1406.
- [8] Dar R, Feder M, Mecozzi A, et al. On shaping gain in the nonlinear fiber-optic channel [C]//2014 IEEE International Symposium on Information Theory, June 29-July 4, 2014, Honolulu, HI, USA. New York: IEEE Press, 2014: 2794-2798.
- [9] 徐文婧, 李岩, 刘宇暘, 等. 相干光通信载波相位恢复算法研究 [J]. 光学学报, 2021, 41(12): 1206002. Xu W J, Li Y, Liu Y Y, et al. Carrier phase recovery algorithm for coherent optical communication [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(12): 1206002.
- [10] 李耀祖, 王目光, 郭玉箫, 等. 基于简化扩展卡尔曼滤波的双偏振载波相位恢复算法 [J]. 光学学报,



- 2019, 39(11): 1106005.
- Li Y Z, Wang M G, Guo Y X, et al. Dual-polarization carrier phase recovery algorithm based on simplified extended Kalman filter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(11): 1106005.
- [11] 张杰, 邱琪. 一种高精度的四次方载波相位恢复算法 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(13): 130604. Zhang J, Qiu Q. High-precision fourth power carrier phase recovery algorithm [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(13): 130604.
- [12] Viterbi A J, Viterbi A M. Nonlinear estimation of PSK-modulated carrier phase with application to burst digital transmission [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1983, 29(4): 543-551.
- [13] 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: 10426305.
- [14] Fatadin I, Ives D, Savory S J. Laser linewidth tolerance for 16-QAM coherent optical systems using QPSK partitioning [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, 22(9): 631-633.
- [15] Zhong K P, Ke J H, Gao Y, et al. Linewidth-tolerant and low-complexity two-stage carrier phase estimation based on modified QPSK partitioning for dual-polarization 16-QAM systems [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31(1): 50-57.
- [16] Ke J H, Zhong K P, Gao Y, et al. Linewidth-tolerant and low-complexity two-stage carrier phase estimation for dual-polarization 16-QAM coherent optical fiber communications [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(24): 3987-3992.
- [17] Pfau T, Hoffmann S, Noe R. Hardware-efficient coherent digital receiver concept with feedforward carrier recovery for  $M$ -QAM constellations [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(8): 989-999.
- [18] Zhou X. An improved feed-forward carrier recovery algorithm for coherent receivers with  $M$ -QAM modulation format [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, 22(14): 1051-1053.
- [19] Mello D A A, Barbosa F A, Reis J D. Interplay of probabilistic shaping and the blind phase search algorithm [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(22): 5096-5105.
- [20] 林志颖, 杨彦甫, 向前, 等. 用于概率整形信号的自适应载波相位恢复算法 [J]. *光学学报*, 2020, 40(23): 2306001. Lin Z Y, Yang Y F, Xiang Q, et al. Adaptive carrier phase recovery algorithm for probabilistically shaped signals [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(23): 2306001.