

相干光通信中概率整形信号的偏振解复用算法

林志颖, 杨彦甫*, 向前, 辜超, 姚勇

哈尔滨工业大学(深圳)电子信息与工程学院, 广东 深圳 518055

摘要 为应对概率整形场景下相干光通信系统中的偏振解复用问题, 提出了一种基于独立成分分析和极大似然估计的偏振解复用算法。由于各个信号之间相互独立, 因此可以对信号采用独立成分分析的手段进行偏振解复用。通过基于最大似然估计的迭代更新寻找最佳的分离矩阵, 即偏振解复用矩阵。对所提算法在不同信噪比下的性能及整形强度的容忍度进行了仿真分析。结果表明, 所提算法能够应对不同的概率整形强度, 在较大的信噪比范围内均能完成良好的偏振解复用。相较于用于标准信号的恒模算法, 所提算法并不会受到整形强度的影响, 并且随着整形强度的增加, 系统的性能有所提升。

关键词 光通信; 概率整形; 偏振解复用; 独立成分分析

中图分类号 TN929.11

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0606002

Polarization Demultiplexing Algorithm for Probabilistically Shaped Signals in Coherent Optical Communication

Lin Zhiying, Yang Yanfu*, Xiang Qian, Gu Chao, Yao Yong

Department of Electronic and Information Engineering, Harbin Institute of Technology, Shenzhen, Guangdong 518055, China

Abstract To deal with the problem of polarization demultiplexing in coherent optical communication systems for probabilistically shaped scenes, this paper proposes a polarization demultiplexing algorithm based on independent component analysis and maximum likelihood estimation. Due to the independence between the signals, the polarization demultiplexing of signals can be realized by the independent component analysis. The iterative update based on maximum likelihood estimation is used to find the best separation matrix, which is the polarization demultiplexing matrix. The performance of the algorithm under different optical signal-to-noise ratios and the tolerance of the shaping intensity are simulated and analyzed. The results show that the proposed scheme can cope with different probabilistically shaped intensities, and can achieve good polarization demultiplexing in a large optical signal-to-noise ratio range. Compared with the constant modulus algorithm for standard signals, this scheme will not be affected by the shaping intensity. As the shaping intensity increases, the performance of the system can be improved.

Key words optical communications; probabilistic shaping; polarization demultiplexing; independent component analysis

OCIS codes 060.1660; 060.2330; 060.4510

1 引言

概率整形(PS)可以使得信号的各个星座点的

概率分布呈现高斯分布且概率由内到外逐步降低。根据信息论, 概率整形能够实现通信系统的传输容量的最大化, 还能更为平滑地调控频偏利用率。尽

收稿日期: 2020-09-14; 修回日期: 2020-10-23; 录用日期: 2020-11-09

基金项目: 深圳市科技计划项目(JCYJ20190806142407195)

* E-mail: yangyanfu@hit.edu.cn

管目前概率整形已被应用于不同的光通信系统,包括跨洋光通信系统^[1-2]、宽泛传输距离系统^[3],以及自由空间中的光通信系统^[4],但是研究人员对光通信系统中的概率整形技术的研究仍然处于实验阶段,大部分研究中数字信号处理(DSP)还是在监督条件下进行的。因为概率整形会带来星座点概率分布的改变,这造成许多成熟的用于标准信号的 DSP 算法的性能下降,例如盲相位搜索算法^[5]、四次方频偏估计算法^[6],以及用于信道均衡的多模算法^[7]。

目前概率整形光通信系统的信道均衡主要采用的是导频辅助的办法^[8],虽然它的性能可靠,但是导频会牺牲系统的传输效率。为了实现无导频辅助的正交振幅调制的概率整形(PS-M-QAM)信号的盲偏振解复用及均衡,Dris 等^[9]提出了基于半径筛选的斯托克斯空间的偏振解复用和半径定向的均衡算法。这一方法虽然适用于概率整形信号,但是其解偏过程依赖内部正交相移键控(QPSK)的信号,需要更大的数据量。此外,这个方案需要预知信号的信噪比(SNR),否则只能通过迭代来决定最优的 SNR 值。针对上述问题,Arikawa 等^[7]通过改进判决引导最小均方算法实现了盲自适应均衡^[7],他们通过调节误差函数使得滤波器输出的平均符号功率与 PS-M-QAM 信号的平均符号功率之间的误差最小,从而避免判决引导最小均方(DDLMS)的收敛误差。因为这个方案需要先用传统横模算法(CMA)进行滤波器参数的预收敛,所以当 CMA 无法正常工作,其性能会受到影响。

为了解决现有用于概率整形信号的偏振解复用方案的缺陷,本文提出一种基于独立成分分析和极大似然估计(ML-ICA)的偏振解复用算法。该算法将信号看作独立分布的矩阵,分析估计的信道琼斯矩阵的似然值,并通过自然梯度下降算法找到估计矩阵的最大似然值。相比上述的方案,所提算法不依靠信号的幅值,无需进行信号的筛选,且无需其他算法辅助进行预收敛。实验结果表明,与用于标准信号的 CMA 及针对高阶调制的半径判决均衡器(RDE)这两种偏振解复用方案相比,所提方案可在不同的光信噪比(OSNR)及概率整形强度下实现良好的偏振解复用。不同于 CMA 对于概率整形信号的失效情况,本文提出的解偏算法的性能不会因受到概率整形的影响而劣化。

2 基本原理

相干光通信系统中通常会采用偏振复用的方式

增加信道容量,但由于光纤中的随机双折射,两种偏振光会出现偏振混叠的情况。假设系统中包含了偏振串扰、频偏、随机相位噪声及高斯噪声。因为除了偏振混叠之外的噪声都与偏振态无关,所以可以用 $x(k)$ 来表示受到频偏、随机相位噪声及高斯噪声影响的信号。长度为 N 的双偏振接收信号序列 $\mathbf{r}(k)$ 可以表示为

$$\begin{cases} \mathbf{r}(k) = \mathbf{A}_k \mathbf{x}(k) \\ \mathbf{A}_k = \begin{bmatrix} \cos \phi_k & \sin \phi_k \\ -\sin \phi_k & \cos \phi_k \end{bmatrix} \\ \mathbf{x}(k) = \mathbf{s}(k) \exp\{j[2\pi k T_s \Delta f + \theta(k)]\} + \boldsymbol{\xi}(k) \end{cases}, \quad (1)$$

式中: k 为接收信号的时序; \mathbf{A}_k 为 2×2 的光纤信道的琼斯矩阵; ϕ_k 为偏振旋转角度; $\mathbf{s}(k)$ 为对应的双偏振发射信号; $\theta(k)$ 为相位噪声; Δf 为频偏; T_s 为符号周期; $\boldsymbol{\xi}(k)$ 为高斯噪声。

通常多电平正交幅度调制(M-QAM)的概率整形信号服从麦克斯韦-玻尔兹曼分布,各个星座点的概率分布 P_m ($m=1, 2, \dots, M$) 可以表示为^[10]

$$P_m = \exp(-\lambda |s_m|^2) / \sum_{i=1}^M \exp(-\lambda |s_i|^2), \quad (2)$$

式中: s_m 是该星座点对应的复信号; M 是星座点的总数; λ 是整形参数。因此,发射信号的信息熵 $H(s)$ 和平均功率 P_{tx} 分别可以表示为

$$H(s) = - \sum_{m=1}^M P_m \log_2 P_m, \quad (3)$$

$$P_{tx} = \sum_{i=1}^M |s_m|^2 \cdot P_m = \sum_{i=1}^M |s_m|^2 \cdot \exp(-\lambda |s_m|^2) / \sum_{i=1}^M \exp(-\lambda |s_i|^2). \quad (4)$$

由此可知,概率整形信号的平均功率与其调制格式及整形参数 λ 有关。故依照调制格式进行的信号功率复原会存在一定的误差。而现在主流的用于标准信号偏振解复用的多模算法需要依靠信号的幅值作为误差函数的重要指标,理想信号功率的计算误差导致了这一方案处理概率整形信号时的性能劣化。为了应对这一问题,本文提出了一种与信号幅值无关的偏振解复用算法。由于各个信源信息相互独立,并根据(1)式,得到接收信号的概率分布可以表示为^[11]

$$p(\mathbf{r}) = |\det \mathbf{B}| \cdot p(s) = |\det \mathbf{B}| \cdot \prod_i p_i(s_i), \quad (5)$$

式中: $p_i(s_i)$ 为信号各个独立成分的概率分布;矩阵

\mathbf{B} 为 \mathbf{A}_k 的逆矩阵, \mathbf{B} 可以表示为 $\mathbf{B} = [\mathbf{b}_1 \mathbf{b}_2 \cdots \mathbf{b}_n]^T$ 。因此(5)式可以改写为

$$p(\mathbf{r}) = |\det \mathbf{B}| \cdot \prod_i p_i(\mathbf{b}_i^T \mathbf{x}). \quad (6)$$

长度为 N 的信号序列可以看作 N 个不同的观测数据。根据这组数据,可以得到 \mathbf{B} 的对数似然度 $L(\mathbf{B})$ 满足

$$\frac{1}{N} \lg L(\mathbf{B}) = \lg |\det \mathbf{B}| + E \left\{ \sum_{i=1}^n \lg [p_i(\mathbf{b}_i^T \mathbf{x})] \right\}, \quad (7)$$

式中: $E[\cdot]$ 是通过观测数据算出的平均值。对于给定的接收信号,当 L 取最大值时对应的矩阵 \mathbf{B} 为最佳分离矩阵。为得到这个最佳分离矩阵,采用自然梯度下降的方式进行估计。对(7)式中的 \mathbf{B} 求偏导,得到对数似然度的随机梯度为

$$\frac{1}{N} \frac{\partial \lg L}{\partial \mathbf{B}} = (\mathbf{B}^T)^{-1} + E[g(\mathbf{B}\mathbf{x})\mathbf{B}^T], \quad (8)$$

式中: $g(\mathbf{B}\mathbf{x})$ 为分布 $\mathbf{B}\mathbf{x}$ 的负评分函数。因此可以得到最大似然估计算法中的自然梯度下降标准为

$$\Delta \mathbf{B} \propto (\mathbf{B}^T)^{-1} + E[g(\mathbf{B}\mathbf{x})\mathbf{x}^T]. \quad (9)$$

将(9)式右乘 $\mathbf{B}^T \mathbf{B}$ 后,得到

$$\Delta \mathbf{B} \propto \{ \mathbf{I} + E[g(\mathbf{B}\mathbf{x})\mathbf{x}^T \mathbf{B}^T] \} \mathbf{B} = \{ \mathbf{I} + E[g(\mathbf{r})\mathbf{r}^T] \} \mathbf{B}, \quad (10)$$

式中: \mathbf{I} 为单位矩阵。由于(10)式中信号的概率密度函数 p_i 未知,所以需要简单的密度簇函数来近似。研究表明,这种近似对算法中的最大似然估计并没有影响^[11]。因为光信号通常呈现次高斯分布,其概率密度函数可以设为

$$\ln p(\mathbf{r}) = \alpha - 2 \ln [\cosh(\mathbf{r})], \quad (11)$$

式中: α 为常数。其评分函数为

$$g(\mathbf{r}) = \tanh(\mathbf{r}) - \mathbf{r}. \quad (12)$$

为了简化计算过程,利用符号函数 $\text{sign}(\cdot)$ 近似(12)式中的 $\tanh(\cdot)$ 函数。结合接收信号为复数的特性,可以得到偏振解复用算法满足

$$\mathbf{y}_{\text{out},k} = \mathbf{B}_k \mathbf{y}_{\text{in},k}, \quad (13)$$

$$\mathbf{B}_{k+1} = \mathbf{B}_k + \mu [\mathbf{I} + g(\mathbf{y}_{\text{out},k}) \mathbf{y}_{\text{out},k}^H] \mathbf{B}_k, \quad (14)$$

$$g(\mathbf{y}_{\text{out},k}) = \text{sign}(\mathbf{y}_{\text{out},k}) - \mathbf{y}_{\text{out},k}, \quad (15)$$

式中: $\mathbf{y}_{\text{out},k}$ 、 $\mathbf{y}_{\text{in},k}$ 分别为输出、输入信号; μ 为步长; 上标 H 表示共轭转置; \mathbf{B}_k 为对于每一组双偏振信号进行估计所得到的偏振解复用矩阵。

3 数值仿真分析

采用波特率 $R_s = 28$ GBaud、信息熵 H 分别为 6 bit/symbol、4.41 bit/symbol 和 3.41 bit/symbol (它们对应的整形参数分别是 0, 0.1, 0.2) 的概率整形 64 正交幅度调制(PS-QAM)信号进行仿真,仿真结构如图 1 所示。常规的固定分量分布匹配(CCDM)算法^[12]可用作分布匹配器生成 PS 信号。实验中的符号总长度为 128000,偏振旋转速率为 200000 rad/s,频偏大小为 0.5 GHz,激光器线宽为 100 kHz,OSNR 范围为 [25 dB, 35 dB]。其中频偏估计部分进行了理想恢复,采用文献[13]中提出的两阶载波相位恢复算法对载波相位噪声进行处理。为了对比算法性能,本文将常用的 CMA 及 RDE 算法作为比较算法。CMA 及本文提出的 ML-ICA 算法的步长均设置为 5×10^{-3} , RDE 算法的步长设置

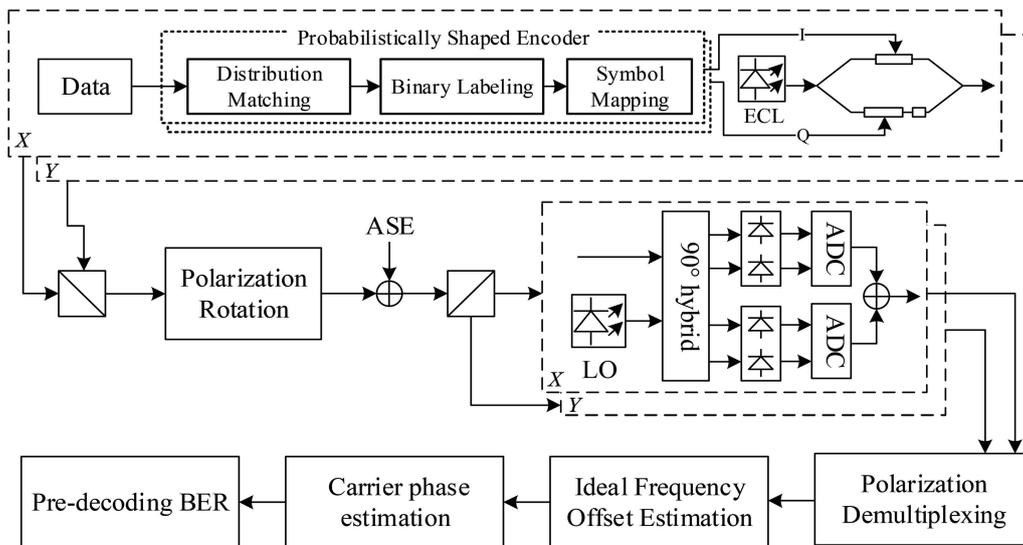


图 1 PS-64QAM 仿真结构示意图

Fig. 1 Diagram of PS-64QAM simulation structure

为 2×10^{-2} 。通过将恢复后的信号和发送的信号分别进行 QAM 的符号映射,得到先验比特信息以计算预解码误码率(BER)。这个预解码 BER 将作为算法性能的评判标准。

首先,对比了标准信号在不同起始偏振混叠情况下的恢复结果。从图 2 中可以看出,对于标准的 64QAM 信号,CMA 的恢复性能基本优于本文方

案,二者的预编码 BER 相差一个数量级。但是当起始偏振混叠角度 φ_0 为 $\pi/4$ 时,CMA 出现了严重的性能劣化,而本文提出的方案的性能基本不受起始偏振混叠的影响。这是因为 CMA 存在奇异性,在起始的偏振混叠角度为 $\pi/4 + k\pi$ (k 为整数)时,算法会失效。为了排除 CMA 奇异性的影响,后续的仿真中采用的起始偏振混叠角度为 $\pi/6$ 。

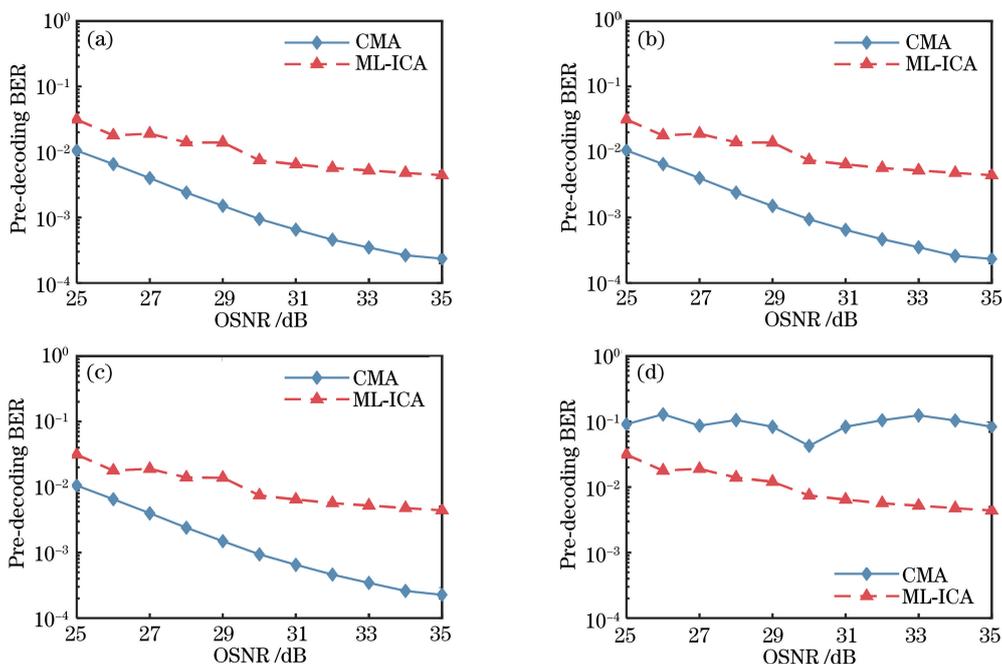


图 2 不同起始偏振混叠角度下的恢复结果。(a) $\varphi_0 = 0$; (b) $\varphi_0 = \pi/16$; (c) $\varphi_0 = \pi/8$; (d) $\varphi_0 = \pi/4$
 Fig. 2 Restored results under different initial polarization aliasing angles. (a) $\varphi_0 = 0$; (b) $\varphi_0 = \pi/16$;
 (c) $\varphi_0 = \pi/8$; (d) $\varphi_0 = \pi/4$

不同 OSNR 条件下的 PS-64QAM 信号的解偏情况如图 3 所示。在不同的 OSNR 条件下,本文所提出的方案均优于 CMA 及 RDE 算法。对于两种信息熵的信号,CMA 和 RDE 的预解码 BER 均在 10^{-1} 量级。因为这两种算法都是基于信号的各个

星座点幅值大小进行解偏的,所以单位功率的接收概率整形信号的各个星座点幅值大小分布不再根据调制格式而固定,导致最终的解偏失败。对于信息熵为 4.41 bit/symbol 的信号,所提出的解偏方案在 OSNR 大于 28 dB 的条件下的预解码 BER 达到

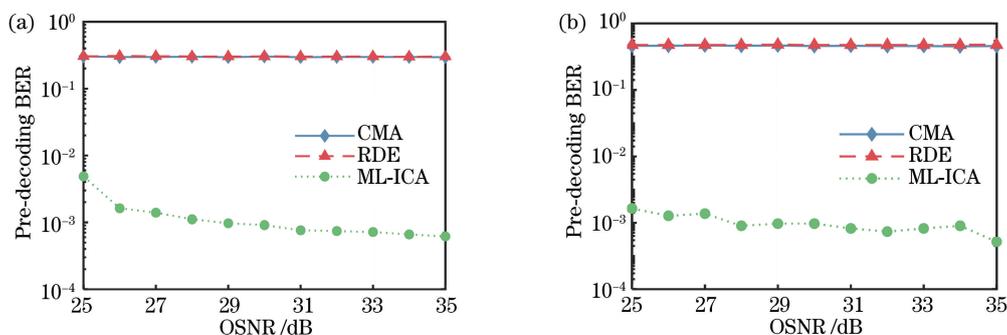


图 3 不同 OSNR 条件下的 PS-64QAM 信号的解偏结果。(a) $H = 4.41$ bit/symbol; (b) $H = 3.41$ bit/symbol
 Fig. 3 PS-64QAM signal polarization demultiplexing results under different OSNR.
 (a) $H = 4.41$ bit/symbol; (b) $H = 3.41$ bit/symbol

10^{-3} 左右;对于信息熵为 3.41 bit/symbol 的信号,所提出的解偏方案在[25 dB, 35 dB]的 OSNR 范围内的预解码 BER 达到 10^{-3} 左右。可见本文所提出的 ML-ICA 解偏算法适用于概率整形信号,它的性能不会因为整形强度的增加而劣化。

4 结 论

提出一种基于最大似然估计的独立成分分析的解偏算法,以处理相干光通信系统在概率整形条件下的信号偏振解复用问题。由于该方案在解偏的过程中不依赖信号的幅值信息,而是将估计矩阵的最大似然值作为误差,所以它能够应对概率整形带来的单位功率信号的星座点幅值因受整形强度的影响而改变的问题。

仿真结果表明,所提方案能够对 PS-64QAM 信号进行良好的偏振解复用。除了处理标准信号的情况外,该算法的恢复结果相比用于标准信号的 CMA 算法存在一定劣势,在应对不同整形强度的信号时,所提算法的结果均优于 CMA 及 RDE 算法。对于信息熵为 4.41 bit/symbol 的信号,所提算法在 OSNR 为 29 dB 及偏振旋转速率为 200000 rad/s 的条件下的预解码 BER 达到 10^{-3} 左右。因此,所提算法可较好地概率整形光信号的偏振解复用。

参 考 文 献

- [1] Ghazisaeidi A, Jauregui Ruiz I F D, Rios-Muller R, et al. 65 Tb/s transoceanic transmission using probabilistically-shaped PDM-64QAM [C] // ECOC 2016 - Post Deadline Paper; 42nd European Conference on Optical Communication, September 18-22, 2016, Dusseldorf, Germany. New York: IEEE Press, 2016: 1-3.
- [2] Domingues O D, Mello D A A, da Silva R, et al. Achievable rates of space-division multiplexed submarine links subject to nonlinearities and power feed constraints [J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(18): 4004-4010.
- [3] Gené J M, Chen X, Cho J, et al. Experimental demonstration of widely tunable rate/reach adaptation from 80 km to 12, 000 km using probabilistic constellation shaping [C] // 2020 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), March 8-12, 2020, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2020: M3G.3.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Yan Q F, Liu L, Hong X Z. Blind carrier frequency offset estimation in coherent optical communication systems with probabilistically shaped M-QAM [J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(23): 5856-5866.
- [7] Arikawa M, Sato M, Hayashi K. Wide range rate adaptation of QAM-based probabilistic constellation shaping using a fixed FEC with blind adaptive equalization[J]. Optics Express, 2020, 28(2): 1300-1315.
- [8] Yankov M P, da Silva E P, Ros F D, et al. Experimental analysis of pilot-based equalization for probabilistically shaped WDM systems with 256QAM/1024QAM [C] // Proceedings of the 2017 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), March 19-23, 2017, Los Angeles, California United States. Washington, D. C.: OSA, 2017: W2A.48.
- [9] Dris S, Alreesh S, Richter A. Blind polarization demultiplexing and equalization of probabilistically shaped QAM [C] // Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2019, San Diego, California. Washington, D.C.: OSA, 2019.
- [10] Kschischang F R, Pasupathy S. Optimal nonuniform signaling for Gaussian channels [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1993, 39(3): 913-929.
- [11] Aapo H, Juha K, Erkki O. Independent component analysis[M]. 1st ed. Zhou Z T, Dong G H, Xu X, et al, Transl. Beijing: Electronic Industry Press, 2007: 145-155.
海韦里恩, 朱哈·卡胡伦, 耳开·欧加. 独立成分分析[M]. 1版. 周宗潭, 董国华, 徐昕, 等, 译. 北京: 电子工业出版社, 2007: 145-155.
- [12] Schulte P, Böcherer G. Constant composition distribution matching [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2016, 62(1): 430-434.
- [13] Lin Z Y, Xiang Q, Yang Y F, et al. Robust and linewidth tolerant two-stage carrier recovery scheme for probabilistically shaped QAM system [C] // 14th Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO PR 2020), Sydney. Washington, D. C.: OSA, 2020.