

激光与光电子学进展

基于直调直检系统的动态概率整形技术

张黎杰¹, 隋琪^{1,2*}

¹暨南大学光子技术研究院, 广东 广州 511443;

²南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 511458

摘要 传统光通信中的直调直检(IM-DD)系统是最大功率(幅度)受限的系统,中间没有放大器,提高信道容量的问题变成了给定带宽和最大功率(幅度)时的信号空间大小和分布的问题。提出了一种基于IM-DD系统的动态概率整形(DPS)算法,解决了功率受限的问题并提升了系统的信道容量以及误码性能。采用脉冲幅度调制(PAM)格式,仿真结果表明,DPS不仅能带来约0.9 dB的信道容量提升,而且在PAM4和PAM8中分别能带来0.8 dB和1 dB的误码性能提升。

关键词 光通信; 直调直检; 功率受限; 信道容量; 动态概率整形

中图分类号 TN919.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.2306005

Dynamic Probabilistic Shaping Technique Based on Intensity Modulation Direct Detection System

Zhang Lijie¹, Sui Qi^{1,2*}

¹Institute of Photonics Technology, Jinan University, Guangzhou, Guangdong 511443, China;

²Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai),
Zhuhai, Guangdong 511458, China

Abstract In classic optical communication, intensity modulation direct detection (IM-DD) is a low-power (amplitude) system with no amplifier in the intermediate. Therefore, increasing the channel capacity becomes a challenge of signal space size and distribution at given bandwidth and maximum power (amplitude). The problem of limited power is solved by proposing a dynamic probabilistic shaping (DPS) algorithm based on the IM-DD system, which improves the system's channel capacity and bit error performance. The pulse amplitude modulation (PAM) format is used in this investigation. DPS can increase channel capacity by approximately 0.9 dB and improve bit error performance by 0.8 dB and 1 dB in PAM4 and PAM8, respectively, according to simulation data.

Key words optical communications; intensity modulation direct detection; limited power; channel capacity; dynamic probabilistic shaping

OCIS codes 060.4510; 060.4080; 060.2360

1 引言

随着互联网、大数据、5G 技术等新兴业务的快

速发展,光纤通信容量的需求呈现爆发式的增长。按照目前的发展趋势,现有的信息传输系统很快将无法满足不同容量需求^[1-5]。光通信具有大

收稿日期: 2021-03-02; 修回日期: 2021-04-02; 录用日期: 2021-04-09

基金项目: 广东省重点领域研发计划(2020B0101080002)、国家自然科学基金(61871408)

通信作者: *sui-qi@hotmail.com

容量、高速率、抗电磁干扰等优点,但同时也面临一些问题,例如光电转换器件带宽有限、激光器功率受限等。为了解决这些问题,提出各种高阶调制方法及各种均衡算法,但是高阶的调制格式在误码性能上不是很好,各种均衡算法也比较复杂,不利于实际应用。近几年,概率整形(PS)技术^[6]在相干光通信^[7-8]领域受到了广泛关注,PS技术不仅能提高系统的信道容量,获得整形增益,还能通过降低发射机的平均功率来提升系统的误码性能,但关于直调直检(IM-DD)系统的研究却比较少。根据思科2020年的预测,99%的通信数据流量都将与数据中心有关,直调直检系统是目前在数据中心内部、数据中心之间、接入网及城域网等短距离通信领域中被接受的最佳方案,具有低复杂度、高可靠性、低成本等优势^[9-11]。PS技术主要改变信号星座图中符号的概率分布,按照高斯概率分布模型将等概率分布的信号整形成不等概率信号,增加低功率符号的概率,降低高功率符号的概率,最终降低信号的平均发射功率。2015年德国慕尼黑工业大学的Böcherer等提出了 arithmetic distribution matching、constant composition distribution matching 等概率整形的核心算法内容,并将PS与相关编码调制等技术结合起来提升系统的信道容量和误码性能,2019年诺基亚贝尔实验室的Cho等在 Journal of Lightwave Technology 上受邀发表了关于在光通信中概率整形的综述文章,对概率整形技术做出了详细的说明^[12-17]。

直调直检是最大功率受限系统,中间没有放大器,也没有在线色散补偿。在功率受限的直调直检系统中,提升信道容量的问题变成了在给定带宽和最大功率时的信号空间大小和分布的问题。传统PS技术根据平均功率来实现高斯分布,没有考虑最大功率等问题。在带宽幅度受限的直调直检系统中,动态概率整形(DPS)技术考虑了最大功率情况下对信号动态概率的调整,使其具有最佳输入分布,避免了输入信号峰值功率过高导致的非线性干扰。

本文提出了一种基于直调直检系统的动态概率整形算法,利用MATLAB软件对算法进行了设计和仿真,在加性高斯白噪声(AWGN)信道模型下,仿真结果表明,DPS技术能在峰值功率受限的系统中提升约0.9 dB的系统容量增益,在脉冲幅度调制(PAM)4和PAM8中分别能带来约0.8 dB和1 dB的误码性能增益。

2 动态概率整形算法

2.1 概率整形

根据香农定理可知,对于有噪信道,当信号服从高斯分布时可以逼近信道容量极限,理论上,通过适当的信息编码,信道就有可能达到无误码容量极限,遗憾的是,香农并没有给出具体的编码方法,但提供了一种用来衡量实际通信机制的计算标准^[18]。后来人们探寻各种编码方法来实现和逼近香农极限,其中概率整形技术就是近几年诞生的一种新型编码调制技术。通过近年来的研究发现,概率整形技术在长距离和短距离传输方案中可以实现信道容量、传输距离、传输性能等方面的提升^[19-22]。在光纤通信系统中,当前影响传输系统的主要因素就是非线性干扰,而非线性干扰主要取决于输入信号光功率的大小和符号分布,也就限定了可传输的最大信噪比。研究人员的关注点就在于如何取得最优的符号分布和如何降低平均发射功率,关于动态概率整形的研究就是针对和解决这些问题的。在传统的星座图中,各点的间隔是等距的,而且每个星座点都是等概率的,而动态概率整形就是让能量低的符号比能量高的符号出现的次数更多,也就是降低能量高的星座点的概率,增加能量低的星座点的概率,这样就可以降低平均发射功率,减小符号的平均比特数,从而有效地适应噪声等因素带来的损伤。概率整形的基本过程如图1所示,首先产生伪随机二进制序列(PRBS),再进行概率整形处理,然后将整形后的比特信息映射到符号位,最后得到整形信号。

概率整形的算法设计流程如图2所示,算法设计的数学模型主要是基于信源编码中的算术编码实现的。主要过程:首先进行概率设定,确定编码区间、目标区间、缩放区间;然后进行编码,并在编码的过程中根据编码规则进行编码,当编码的区间满足缩放规则时,对目标区间、缩放区间、编码区间进行放大处理;再进行下一步编码,直至编码结束。

详细算法实现过程如图3所示,本示例是基于PAM4信号的算法设计具体流程。首先,设定PAM4信号符号的概率分布为 $P=[1/8\ 3/8\ 3/8\ 1/8]$,初始编码区间为 $X=[0\ 128\ 256]$,缩放区间为 $Y=[0\ 64\ 128\ 192\ 256]$,按照概率分布计算累积概率 $P_m=[1/8\ 4/8\ 7/8\ 1]$,按照累积概率计算得到目

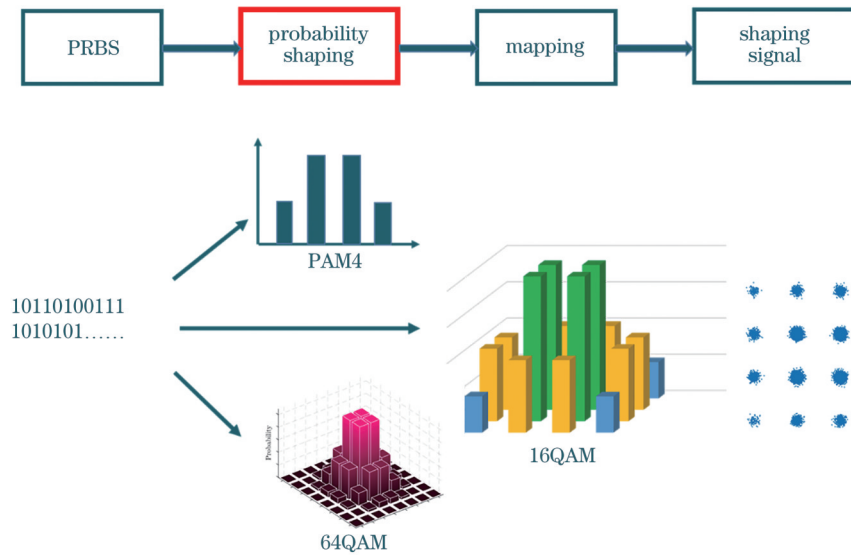


图 1 概率整形基本流程图

Fig. 1 Basic flowchart of probability shaping

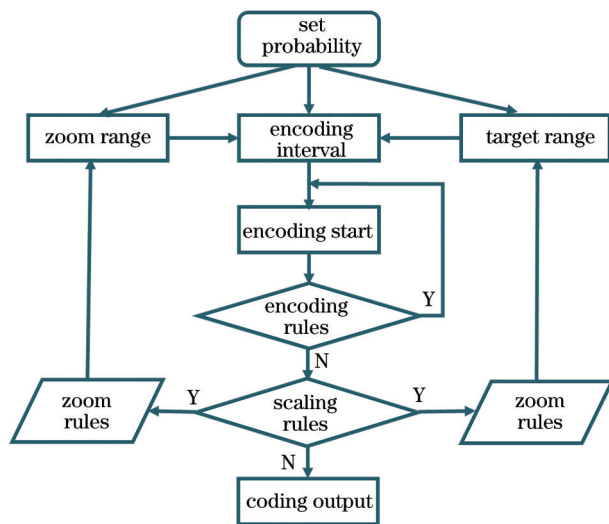


图 2 概率整形算法设计流程图

Fig. 2 Designed flowchart of probability shaping algorithm
 标区间 $Z = [0\ 32\ 128\ 224\ 256]$ 。然后,开始编码,判断编码规则。编码规则:当输入二进制数为 0 时,采用编码区间的上半部分表示,输入二进制数为 1 时,采用编码区间下半部分表示。接着,按照缩放规则进行区间的缩放处理,其中缩放规则满足 $E(E_1, E_2, E_3)$ 要求, E_1 表示将编码区间扩大两倍, E_2 表示将编码区间扩大两倍并减去整个区间的值, E_3 表示将区间扩大两倍并减去 0.5 区间的值。当编码区间 X 位于缩放区间的上半部分时采用 E_1 缩放,当编码区间 X 位于缩放区间下半部分时采用 E_2 缩放,当编码区间 X 位于缩放区间中间部分时采用 E_3 缩放,然后继续编码,直至

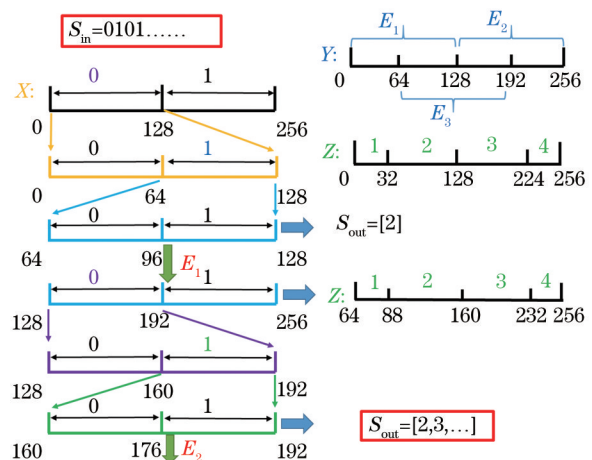


图 3 基于 PAM4 信号的概率整形算法具体步骤

Fig. 3 Concrete steps of probability shaping algorithm based on PAM4 signal

编码结束。以上为静态编码过程,其中 S_{in} 为输入的二进制比特数据流, S_{out} 为编码输出的符号数。在编码的过程中每个符号的概率分布不变。

2.2 动态概率整形

动态概率整形算法流程如图 4 所示。传统的概率整形在整个编码过程中的概率分布是固定不变的,而动态概率整形中下一次信号输入的概率分布与前面 N 位信号输出的结果有关,也就是每一次当前信号输入的概率分布是不一样的,是一个动态调整的过程。

在 PAM4 编码过程中,根据 S_{out} 前四位输出的符号来确定当前位符号的概率分布(判断前四位符号,然后查表 S_{book} ,生成对应序列矩阵并计算出概率

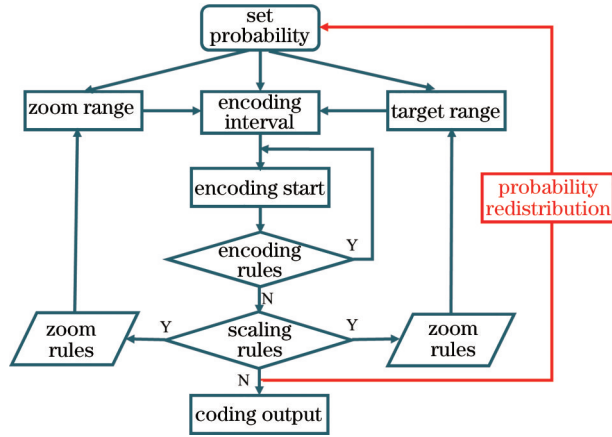


图 4 动态概率整形算法设计流程图

Fig. 4 Designed flowchart of dynamic probabilistic shaping algorithm

表 1 输出四位连续符号中的所有情况

Table 1 All cases in output four consecutive symbols

K	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	...	k	...	253	254	255	256
S_n	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	...	...	1	2	3	4
S_{n+1}	1	1	1	1	2	2	2	2	3	3	3	3	4	4	...	...	4	4	4	4
S_{n+2}	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	...	...	4	4	4	4
S_{n+3}	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	...	...	4	4	4	4

3) 生成动态概率矩阵 \mathbf{P}_{prob}

对生成的矩阵 \mathbf{M} 进行归一化处理,生成动态概率矩阵 \mathbf{P}_{prob}

$$\mathbf{P}_{\text{prob}} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{14} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & P_{24} \\ \vdots & & \vdots & \\ P_{k1} & P_{k2} & P_{k3} & P_{k4} \\ \vdots & & \vdots & \\ P_{2551} & P_{2552} & P_{2553} & P_{2554} \\ P_{2561} & P_{2562} & P_{2563} & P_{2564} \end{bmatrix}_{256 \times 4} \quad (1)$$

4) 动态编码

设定 PAM4 初始概率分布进行编码,并统计输出符号数,当输出符号数大于等于四位时开始查表 S_{book} 。本例将查表位数确定为当前输出的前四位符号数,查表得到当前情况下的概率分布 $\mathbf{P}_{\text{prob}1}$,按照此概率分布进行编码,输出下一位符号数,然后查表窗口向后移一位继续查表后编码,直至编码结束。

3 仿真分析

对动态概率整形算法进行仿真验证,仿真采用 MATLAB 软件,仿真基于 PAM4 和 PAM8 两种调制格式的信号展开。

首先利用 MATLAB 软件分别对均匀分布

分布 \mathbf{P}_{prob} ,再按此概率分布进行编码输出),具体过程如下。

1) 建立表格 S_{book}

首先建立表格 S_{book} ,列出 PAM4 输出符号中其中四位符号数 $S_n, S_{n+1}, S_{n+2}, S_{n+3}$ 的所有可能情况, $K = 4^4$,并用 K 的每一列情况来表示输出符号中的连续四位符号的可能情况,如表 1 所示。

2) 生成矩阵 \mathbf{M}

首先生成随机矩阵 \mathbf{T} ,每一行就是给定前面 4 位序列的组合,后面 4 位可能的序列组合;然后对后面 4 位进行分类,按照模运算 $\text{mod}(4)$ 进行处理并得到余数,就是分别对应输出 4 位的数量,最终得到矩阵 \mathbf{M} 。

(UD)的 UD-PAM4 和 DPS-PAM4 以及 UD-PAM8 和 DPS-PAM8 进行了数值模拟仿真,在 AWGN 信道模型、设定信号功率为 1 mW 的情况下,其中 UD-PAM4 的熵为 2, DPS-PAM4 的熵为 1.83, UD-PAM8 的熵为 3, DPS-PAM8 的熵为 2.72,发现动态概率整形技术会牺牲部分频谱效率,但后续结果表明这种牺牲并不会带来什么影响,甚至可以忽略。由于输入信号功率一定,在信号的峰值功率一定的情况下,信号的最大幅值也就确定了。在峰值功率一定的情况下,对信号进行 DPS 处理,在发射端,首先产生二进制伪随机序列;然后进行动态概率整形编码调制处理,并将调制后的信息映射到 PAM 信号;再对其进行上采样、滤波、通过 AWGN 信道,在接收端进行相应的逆处理;最终计算系统容量和误码率。

峰均比(PAPR)是一种对波形的测量参数,等于波形的振幅除以方均根(RMS)所得到的一个比值。分别分析不同信号的峰均比,公式为

$$R_{\text{PAP}} = \frac{P_{\text{peak}}}{P_{\text{average}}} = \frac{\max(|X_{(n)}|^2)}{E(|X_{(n)}|^2)} \quad (2)$$

式中: P_{peak} 为峰值功率; P_{average} 为平均功率; $X_{(n)}$ 为信号的幅度值。仿真计算得到 UD-PAM4 的峰均比为 1.8, DPS-PAM4 的峰均比为 4.36, UD-PAM8 的峰

均比为 2.33, DPS-PAM8 的峰均比为 5.14, 通过仿真计算对比可以发现, 动态概率整形技术能降低平均功率, 提高一定的峰均比。

图 5 和图 6 为普通 PAM 信号和经动态概率整形后的 PAM 信号的星座图、眼图及概率分布图。数值模拟仿真显示, 在峰值功率受限的情况下, 动态概率整形处理后的 PAM 信号比普通 PAM 信号的性能要好。在功率一定时, 动态概率整形处理后, 不同幅度符号之间间距变大, 信号的最大幅度与最小幅度之

比变大, 提高了信号的调制深度。例如 PAM4 和 PAM8 信号的星座图, 从动态概率整形后的星座图可以很明显看出, 星座图之间的间隔变大, 这样符号之间的干扰也就越小, 系统误码性能也会提升, 信号的质量也就越好。通过图 5 和图 6 可以发现: 普通 PAM 信号眼图的高电平处会发生过冲现象, 而且随着调制格式的增加, 这种过冲现象越明显; 而经动态概率整形处理后的 PAM 信号能抑制和缓解这种过冲现象, 而且调制格式越高, 抑制效果越好。

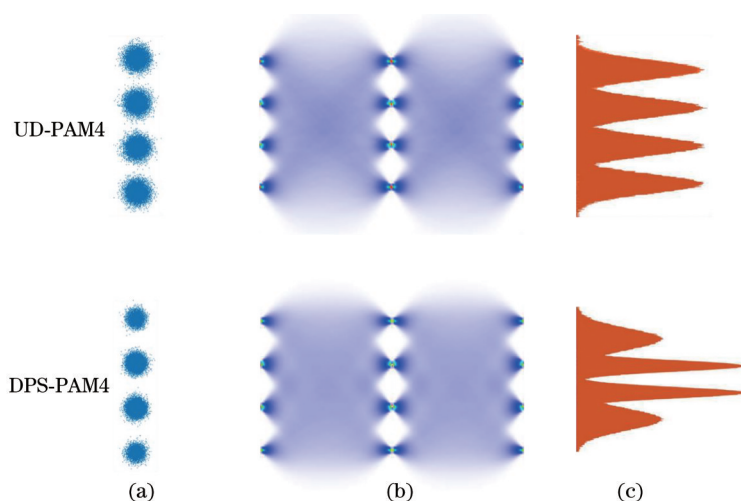


图 5 UD-PAM4 和 DPS-PAM4 信号的星座图、眼图及概率分布图。(a) 星座图; (b) 眼图; (c) 概率分布图

Fig. 5 Constellation, eye diagram, and probability distribution of UD-PAM4 and DPS-PAM4 signals. (a) Constellation; (b) eye diagram; (c) probability distribution

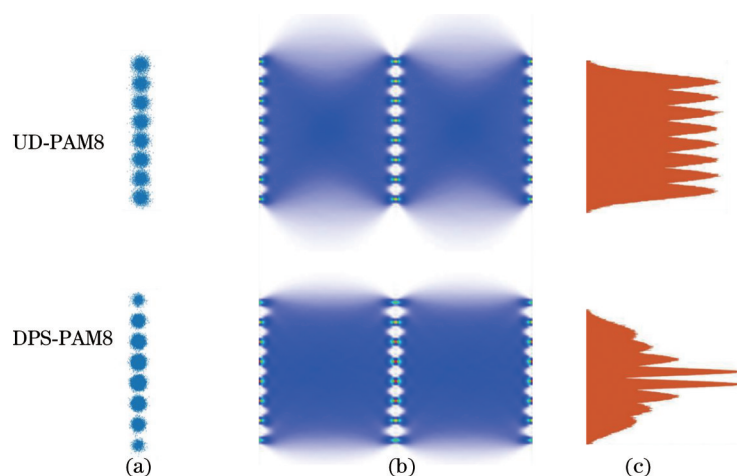


图 6 UD-PAM8 和 DPS-PAM8 信号的星座图、眼图及概率分布图。(a) 星座图; (b) 眼图; (c) 概率分布图

Fig. 6 Constellation, eye diagram, and probability distribution of UD-PAM8 and DPS-PAM8 signals. (a) Constellation; (b) eye diagram; (c) probability distribution

对动态概率整形过程中不同的查表位数 ($N=2, 3, 4$) 进行了仿真, 并得到眼图, 如图 7 所示。可以看出, 随着查表位数的增加, 高电平处的过冲现象越不明显, 说明减缓过冲的效果越好。说明动态概

率整形技术能很好地抑制和缓解在功率受限的系统中信号功率过高导致的非线性失真。因此动态概率整形技术在最大功率受限的直调直检系统中能带来性能上的提升。

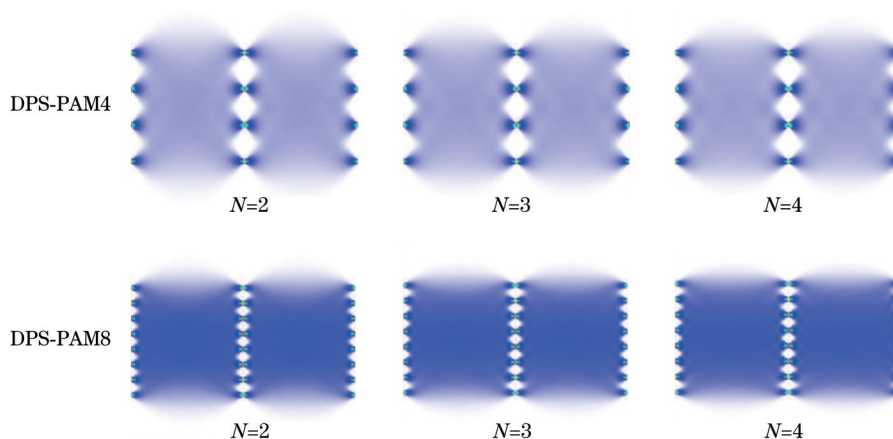


图7 不同查表位数的DPS-PAM4与DPS-PAM8眼图

Fig. 7 Eye diagrams of DPS-PAM4 and DPS-PAM8 with different table number lookups

图8和图9分别为UD-PAM4与DPS-PAM4和UD-PAM8与DPS-PAM8信号的误码率(BER)性能曲线图。首先生成普通和整形后的PAM信号,然后通过滤波处理技术来模拟光电调制器的带宽限制,在带宽和峰值功率受限的情况下,DPS-PAM4的频谱效率为1.83 bit/symbol,UD-PAM4的频谱

效率为2 bit/symbol, DPS-PAM8的频谱效率为2.72 bit/symbol,UD-PAM8的频谱效率为3 bit/symbol。从图8和图9发现,在误码率为 10^{-3} 时,DPS技术分别带来的增益约为0.8 dB和1 dB。因此在带宽和功率受限的系统中,动态概率整形技术相比普通情况能带来误码性能的提升。

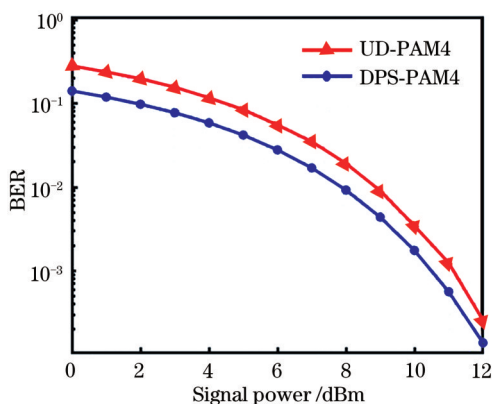


图8 UD-PAM4与DPS-PAM4误码率曲线图

Fig. 8 Bit error rate curves of UD-PAM4 and DPS-PAM4

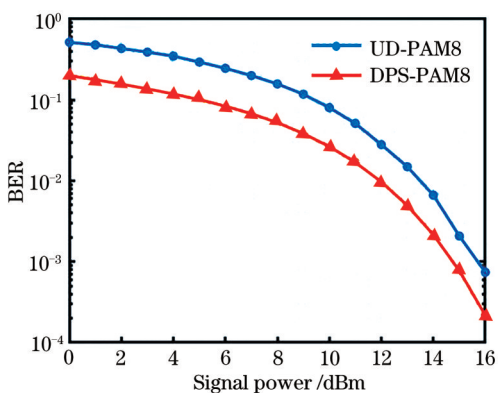


图9 UD-PAM8与DPS-PAM8误码率曲线图

Fig. 9 Bit error rate curves of UD-PAM8 and DPS-PAM8

4 结 论

由于峰值功率受限,直调直检系统无法很好地提升系统容量及误码性能,因此提出了一种基于直调直检系统的动态概率整形算法,并对算法进行设计。在对信号进行编码的过程中,不断地对输出的符号信息进行概率的动态调整,使得信息在传送的过程中不会由于峰值功率(幅度)过高而发生冲等。最后通过MATLAB软件进行仿真,仿真结果表明,动态概率整形技术能在带宽和功率受限的系统中缓解抑制高功率符号带来的过冲影响,提升信道的系统容量,约0.9 dB,同时,DPS技术分别能带来约0.8 dB和1 dB的误码性能增益。

参 考 文 献

- [1] Kachris C, Tomkos I. A survey on optical interconnects for data centers[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2012, 14(4): 1021-1036.
- [2] Ferdouse L, Anpalagan A, Erkucuk S. Joint communication and computing resource allocation in 5G cloud radio access networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(9): 9122-9135.
- [3] Liu B, Li L N. Development status of large-capacity optical transmission systems[J]. Science & Technology Review, 2016, 34(16): 20-33.

- 刘博, 李丽楠. 大容量光传输系统发展现状[J]. 科技导报, 2016, 34(16): 20-33.
- [4] Lü X D, Liang X R, Yu Q C, et al. Research status and development trend of optical communication technology [J]. Telecommunications Science, 2019, 35(2): 70-78.
吕向东, 梁雪瑞, 喻千尘, 等. 光通信技术研究现状及发展趋势[J]. 电信科学, 2019, 35(2): 70-78.
- [5] Temprana E, Alic N, Kuo B P P, et al. Beating the nonlinear capacity limit[J]. Optics and Photonics News, 2016, 27(3): 30-37.
- [6] 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.
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.
- [7] Ma B B, Ke X Z, Zhang Y. Polarization control and control algorithm of beams in coherent optical communication system[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(1): 0106002.
马兵斌, 柯熙政, 张颖. 相干光通信系统中光束的偏振控制及控制算法研究[J]. 中国激光, 2019, 46(1): 0106002.
- [8] Ren J Y, Sun H Y, Zhao Y Z, et al. Influence of intensity disturbance on the performance of dual-frequency laser coherent detection[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(3): 031407.
任建迎, 孙华燕, 赵延伸, 等. 强度扰动对双频激光相干探测性能的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(3): 031407.
- [9] Zhou X, Huo J H, Zhong K P, et al. Polarization division multiplexing system with direct decision for short reach optical communications[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2017, 40(2): 21-28.
周娴, 霍佳皓, 钟康平, 等. 偏振复用直接检测短距离光纤传输系统[J]. 北京邮电大学学报, 2017, 40(2): 21-28.
- [10] Lu J Z, Ji F J, Hu R, et al. Research on frequency domain equalization technology of light intensity modulation-direct detection system[J]. Optical Communications Research, 2016 (4): 5-7.
陆继钊, 姬发家, 胡荣, 等. 光强度调制-直接检测系统的频域均衡技术研究[J]. 光通信研究, 2016 (4): 5-7.
- [11] Wei J L, Rahman T, Calabrò S, et al. Experimental demonstration of advanced modulation formats for data center networks on 200 Gb/s lane rate IMDD links[J]. Optics Express, 2020, 28(23): 35240-35250.
- [12] 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.
- [13] Baur S, Boecherer G. Arithmetic distribution matching[C]//SCC 2015; 10th International ITG Conference on Systems, Communications and Coding, February 2-5, 2015, Hamburg, Germany. New York: VDE, 2015.
- [14] Schulte P, Böcherer G. Constant composition distribution matching[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2016, 62(1): 430-434.
- [15] Cho J, Winzer P J. Probabilistic constellation shaping for optical fiber communications[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(6): 1590-1607.
- [16] Li J J, Zhang A X, Zhang C L, et al. Field trial of probabilistic-shaping-programmable real-time 200-Gb/s coherent transceivers in an intelligent core optical network[C]//2018 Asia Communications and Photonics Conference (ACP), October 26-29, 2018, Hangzhou, China. New York: IEEE Press, 2018.
- [17] Roberts K, Zhuge Q B, Monga I, et al. Beyond 100 Gb/s: capacity, flexibility, and network optimization [J]. IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, 2017, 9(4): C12-C23.
- [18] Shannon C E. A mathematical theory of communication[J]. Bell System Technical Journal, 1948, 27(3): 379-423.
- [19] Cho J, Chen X, Chandrasekhar S, et al. Trans-Atlantic field trial using high spectral efficiency probabilistically shaped 64-QAM and single-carrier real-time 250-Gb/s 16-QAM[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(1): 103-113.
- [20] Cho J, Chandrasekhar S, Raybon G, et al. High spectral efficiency optical transmission with probabilistic constellation shaping[C]//2018 23rd Opto-Electronics and Communications Conference (OECC), July 2-6, 2018, Jeju, Korea (South). New York: IEEE Press, 2018.
- [21] Hong X, Fei C, Zhang G, et al. Discrete multitone transmission for underwater optical wireless communication system using probabilistic constellation shaping to approach channel capacity limit[J]. Optics Letters, 2019, 44(3): 558-561.
- [22] He Z L, Bo T W, Kim H. Probabilistically shaped coded modulation for IM/DD system[J]. Optics Express, 2019, 27(9): 12126-12136.