

刘博¹ 姜蕾¹ 毛雅亚¹ 吴翔宇² 任建新² 徐星² 赵建业¹ 韩顺¹

概率整形编码调制技术



作者简介:刘博,男,博士,教授,博士生导师,南京信息工程大学物理与光电工程学院院长,研究方向为光纤通信方面,包括大容量光传输、光子编码调制以及光信号处理等应用基础.曾获得教育部“长江学者”青年学者、江苏省“双创人才”、北京市青年拔尖人才等称号.主持多项国家自然科学基金青年项目和面上项目,以及国家 863 计划等.以第一完成人获教育部科学研究优秀成果二等奖,第二完成人获中国电子学会科学技术一等奖.近年来获授权发明专利 22 项,发表高水平 SCI 论文 30 余篇.

E-mail:bo@nuist.edu.cn

收稿日期 2019-05-13

基金项目 国家自然科学基金(61835005, 61822507, 61875248, 61705107, 61727817, 61775098, 61720106015, 61675004, 61522501, 61475024);国家高技术研究发展计划(863 计划)(2015AA015501, 2015AA015502);北京青年人才项目(2016000026833ZK15);信息光子学与光通信国家实验室(北京邮电大学)开放基金;江苏省研究生科研与实践创新计划项目(SJKY19_0972)

1 南京信息工程大学 物理与光电工程学院, 南京, 210044

2 北京邮电大学 电子工程学院,北京,100876

摘要

随着 5G 通信技术的发展,多样化的应用场景对光纤通信系统的接入灵活性提出了更高的要求.概率整形是一种具有低复杂度、高灵活度的新型调制编码技术.目前,该技术已经在国内外掀起了研究的热潮,引起众多科研工作者的关注.概率整形不仅可实现灵活的宽带光接入,而且可以对超大星座尺度的正交幅度调制信号进行优化.本文介绍了笔者所在团队在概率整形方面的一系列研究成果并展开讨论,希望能为未来光纤通信系统的研究提供借鉴与依据.

关键词

概率整形;灵活性;宽带光接入网

中图分类号 TN929.11

文献标志码 A

0 引言

随着全球互联网产业的发展,对通信系统传输容量的需求急速增加.光纤通信因其具备的传输频带宽、抗干扰能力强、传输距离远以及保密性能好等优点,在数据通信中的传输性能远优于电缆以及微波通信,已经成为世界通信中主要的通信方式之一.近年来,随着正交幅度调制(Quadrature Amplitude Modulation, QAM)、相位调制等编码调制技术以及波分复用、偏分复用(Polarization Multiplexing Modulation, PDM)等多载波调制技术的广泛研究和实际应用,光纤通信的发展极其迅速.然而面对科技的快速发展,传输容量和传输速率供不应求,长距离的传输使得信号质量受到极大的挑战.目前,使用数字信号处理技术可实现多种自适应补偿均衡算法,可有效地解决通信过程中的色散以及非线性干扰等问题,极大地提高了光纤传输性能以及信号质量,但自适应均衡算法的应用加剧了传输系统的整体复杂性,光通信系统的实际成本也随之升高.

面对实际光纤通信系统对于低成本、高速、大容量、长距离、灵活接入等的要求,概率整形(Probabilistic Shaping, PS)作为一种新型的编码调制优化技术,不仅可以在扩充信道的传输容量的同时降低系统的复杂度,而且能在不增加系统复杂度的情况下提高系统的灵活性.概率整形编码调制技术在光通信中的应用已经引起了国内外众多研究学者的关注.在 2017 年,德国贝尔实验室的 Idler 等^[1]验证了 4 载波-超信道上可传输 1 Tb/s 概率整形信号,频谱效率约达 5 (bit/s)/Hz,

在德国骨干网中的传输距离长达 1 500 km.2015 年, Buchali 等^[2]提出利用 PS-64QAM 调制格式实现 200~300 Gb/s 可调整的网络数据速率,并且 PS-64QAM 的传输距离比常规的 16QAM 以及 64QAM 信号提升高达 40%.2018 年的 OFC 会议上,美国 NEC 实验室的 Qu 等^[3]提出了一种基于二维概率分布匹配器的通用型概率-几何混合整形方案,并通过实验证明了概率-几何混合整形 32QAM 的性能是优于普通 PS-32QAM 以及常规的 32QAM 的传输性能的.在国内,复旦大学的余建军等^[4]用实验实现了 PDM-PS-16QAM 单载波信号在多输入多输出无线射频网中的可靠传输,并且通过实验比较得出加入概率整形技术的最大可靠信息速率(60.6 Gb/s)明显优于均匀分布的 16QAM(56 Gb/s).面对未来的物联网以及移动互联网对灵活性和可靠性提出的要求,概率整形作为一种新型的调制格式优化技术,兼顾了频谱效率和无码性能,是未来灵活光接入网的新选择.

近年来,笔者对光通信中概率整形这一新型的编码调制优化技术进行了一系列研究.目前,概率整形编码调制技术的发展主要是概率整形的理论研究

及实现方式.本文对概率整形技术在光通信领域中的原理、实现方法进行探讨与分析.此外,本文将介绍概率整形编码调制技术在宽带光接入网的应用方面的研究,希望能对未来概率整形在光纤通信中的应用发展提供有力的依据.最后,本文利用 MATLAB 仿真软件实现超大星座尺度下的概率整形编码调制技术,并对不同概率分布因子的通信系统进行仿真,检验其系统的传输性能,将其应用于未来的光纤通信系统中.

1 概率整形原理与实现方法

概率整形是一种编码调制的优化技术,常与正交幅度调制相结合.概率整形主要原理是将星座外圈的星座点以一定的概率和规则映射到靠近星座原点的星座点上并发送传输.以 16QAM 为例,均匀分布的 16QAM 与 PS-16QAM 的星座原理如图 1 所示.其中图 1a 和 1c 分别为常规 16QAM 的二维和三维原理图,而图 1b 和 1d 则是 PS-16QAM 的二维和三维星座原理图.在图 1a、1b 中,圆点的大小表示该星座点的概率大小,不同颜色的圆点代表不同概率的

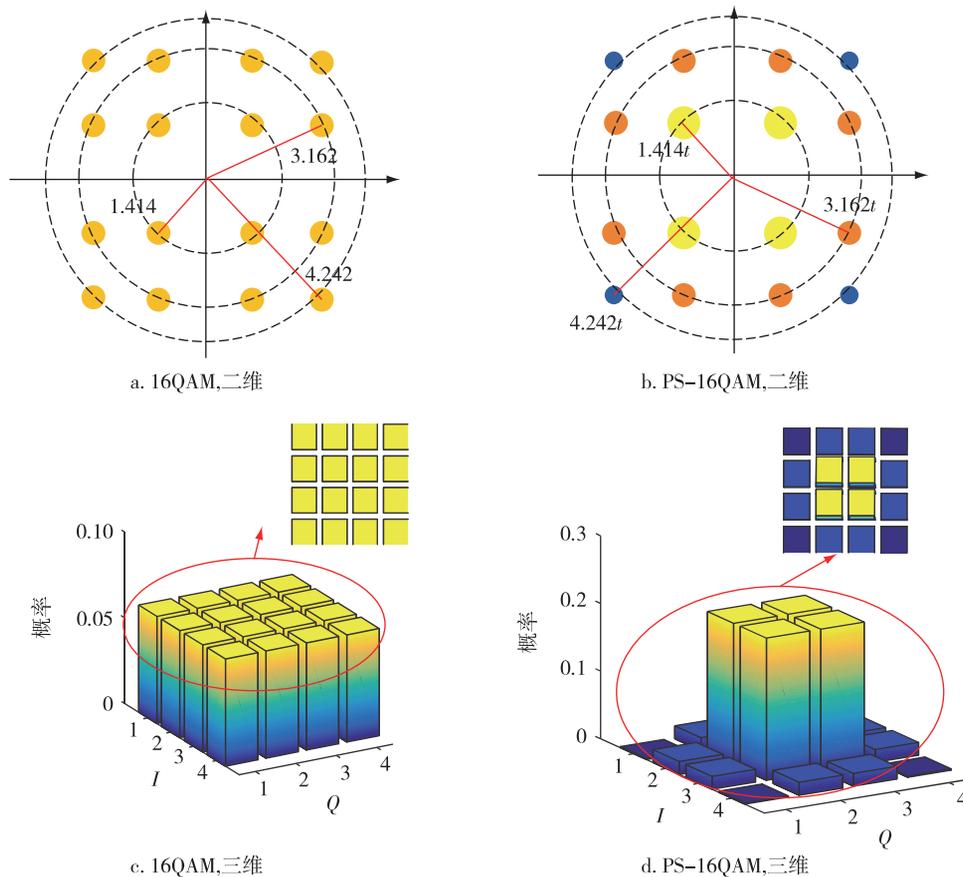


图 1 二维与三维下的常规 16QAM 与 PS-16QAM 星座原理图

Fig. 1 Schematic of conventional 16QAM and PS-16QAM constellations in 2D and 3D

星座点.将各个星座点与星座原点之间的距离称为欧氏距离.因此,可以清晰地看出常规 16QAM 的各个星座点的概率值相同,而在 PS-16QAM 的星座图中,欧氏距离小的星座点的概率值较大,即越靠近星座中心的星座点的概率值越大.图 1c、1d 分别展示了常规 16QAM 与 PS-16QAM 的三维概率分布,其中用柱状图的高低表示该点概率值的大小.从图 1 中可以看出,常规 16QAM 的各个星座点的概率是相同的,而 PS-16QAM 的星座点的概率值则是非均匀分布的,通过调整概率整形中相应的分布参数,可改变 PS-16QAM 的概率分布程度.

实现概率整形的方法目前主要有两种.第 1 种是在通信系统中增加分布匹配器和分布解匹配器^[2,5-6],如图 2 所示.其中图 2a、2b 分别为常规和加入概率整形后的通信系统框图.分布匹配器可在编码之前实现“外编码”,从而使得编码映射后的各个 QAM 符号出现的概率服从麦克斯韦-玻尔兹曼 (Maxwell-Boltzmann) 分布^[7-8]:

$$P_X(x_i) = e^{-v|x_i|^2} / \sum_{j=1}^m e^{-v|x_j|^2}, \quad (1)$$

其中,星座符号集 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$, v 为概率分布

因子,可代表概率整形程度.通常情况下, v 取 0~1 之间的值, v 值越大,概率整形程度越大,从而不同的 v 可以形成不同的概率分布.

第 2 种实现概率整形的方法是固定符号级标签整形方法^[9],如图 3 所示.通过对图 3a 均匀分布的 16QAM 信号进行概率整形,得到图 3c 非均匀分布的 PS-9QAM 星座图.图 3b 给出了固定符号级标签的成形方法,将 16QAM 的符号改变,并添加标签“00”、“01”、“10”作为标记.

两种概率整形的实现方法各有各的优点,第 1 种分布匹配器的成形方法适用于灵活要求高的网络以及实现超高阶超大 QAM 的概率成形,成本高;第 2 种固定符号级标签的概率整形适用于低阶 QAM 以及长距离的点对点传输,简单方便,成本低.

下面将对概率整形所具有的低误码率、低平均功率以及高灵活性进行分析说明.16QAM 的星座点呈现 3 种幅度分布,幅度值分别为 1.414、3.162、4.242,如图 1a、1b 所示.内圈与第 2 圈的距离为 1.748,而外圈与第 2 圈的距离为 1.080,因此 16QAM 信号传输过程中最主要的误差来自于外圈的 4 个点上.而概率整形可以通过降低外圈的 4 个点出现的概率降低传输系



图 2 通信系统原理

Fig. 2 Schematic diagram of optical fiber communication system

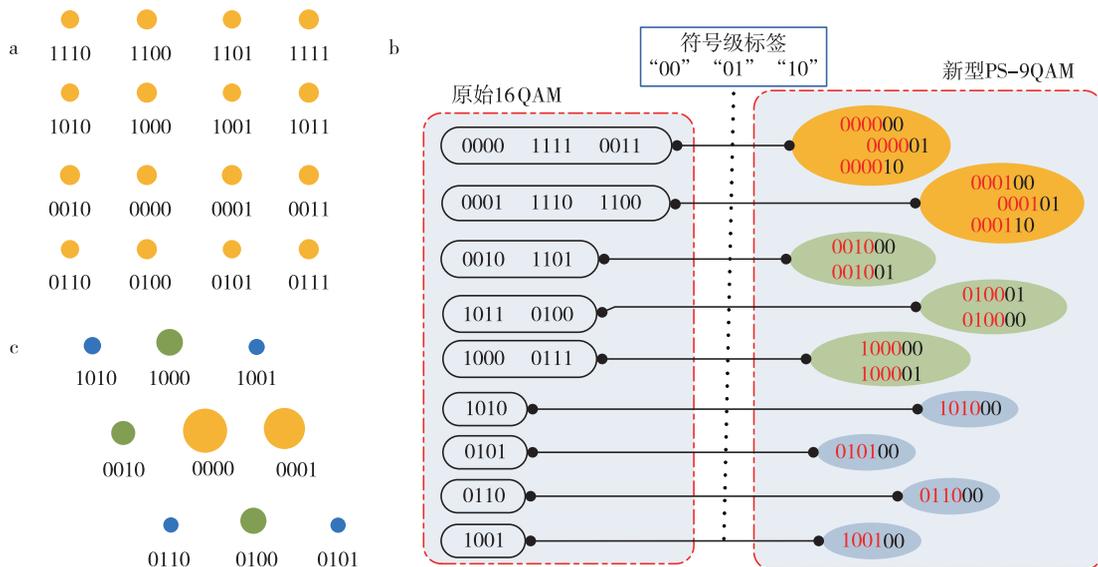


图 3 基于固定符号级标签的概率整形方法示意图

Fig. 3 Schematic of probabilistic shaping based on symbol-level labeling

统的误码率.常规 16QAM 信号的分布是均匀的,其平均相对功率可由下式计算得出:

$$P_1 = \frac{1}{16} \times 4 \times (1^2 + 1^2) + \frac{1}{16} \times 8 \times (3^2 + 1^2) + \frac{1}{16} \times 4 \times (3^2 + 3^2) = 10. \quad (2)$$

PS-16QAM 信号的概率分布随着概率分布因子的变化而变化,这里以 $v=0.2$ 为例,概率分布如表 1 所示,并计算此时 PS-16QAM 信号的平均相对功率:

$$P_2 = 0.173\ 1 \times 4 \times (1^2 + 1^2) + 0.034\ 9 \times 8 \times (3^2 + 1^2) + 0.007\ 1 \times 4 \times (3^2 + 3^2) = 4.688. \quad (3)$$

从式(2)、(3)可以看出 PS-16QAM 的平均功率低于常规 16QAM,从而概率整形可以节省系统的发射功率,降低成本.若要使得常规 16QAM 与 PS-16QAM 具有可比性,则要扩大 PS-16QAM 星座图.由于常规 16QAM 信号的平均相对功率是 PS-16QAM 的 2.133 倍,因此 PS-16QAM 的各幅度应增大 1.46 倍,即图 1b 中的扩大因子 $t=1.46$.星座图扩大,则星座点之间的欧式距离增大,容错性得到提高,因而概率整形可以降低系统的误码率.从表 1 中可以看出概率整形后的星座点的概率呈现非均匀分布.根据信息熵的计算式:

$$H(x) = - \sum_{i=1}^m (P_X(x_i) \log_2 P_X(x_i)), \quad (4)$$

可以得出信息熵随着概率分布因子的变化而变化,如表 2 所示.根据传输速率等于波特率与信息熵的

表 1 当概率分布因子为 0.2 时,PS-16QAM 的各个星座点出现的概率值

Table 1 The probability values of each constellation point of PS-16QAM when $v=0.2$

0.007 1	0.034 9	0.034 9	0.007 1
0.034 9	0.173 1	0.173 1	0.034 9
0.034 9	0.173 1	0.173 1	0.034 9
0.007 1	0.034 9	0.034 9	0.007 1

表 2 信息熵与概率分布因子的关系

Table 2 The relationship between information entropy and probability distribution factor

概率分布因子(v)	信息熵 $H(x)$ /(bits/symbol)
0	4.000 0
0.1	3.786 4
0.2	3.306 1
0.3	2.826 5
0.4	2.476 9

乘积,可以得到在波特率不变的情况下,传输速率随信息熵的变化而变化,因此传输速率具有一定的灵活性,在接收端可以获得灵活的接入速率.概率整形具有高度的灵活性.

2 基于概率成形的光通信系统

概率整形因其具有的低误码率、低功耗、高灵活性、低复杂度等优点,被广泛认为是一种前景广阔的技术.目前,我们对概率整形的实现方法进行研究,探求更加符合光纤信道的概率整形技术.除此以外,我们将概率整形技术应用于光纤通信系统中,希望通过这一技术解决光通信系统在灵活性、复杂性与频谱效率以及传输容量之间的矛盾.

2.1 多种概率成形设计方案

在固定符号级标签概率整形方法的基础上,我们在文献[10]提出了一种类蜂窝的概率整形结构.以无载波幅度和相位调制(Carrier-Less Amplitude/Phase, CAP)-32 为例,通过星座设计,即改变星座点的位置以及概率分布,得到如图 4 所示的类蜂窝结构的星座图.图 4a 给出了星座映射规则,32 个星座点均匀分布在 4 个不同幅度的同心环上,使得相同环的相位差为 $\pi/4$,而这些点与相邻环上相位差为 $\pi/8$ 的点相互交错.图 4b 描述了新型星座的几何结构设计原理,通过最内圈均匀分布的 8 个点,形成正八边形,以正八边形的任一边向外延伸画正三角形,确定次内圈的 8 个点;类似的,通过进一步向外形成菱形,获得次外圈的最小半径的 8 个点.为了保持最小欧式距离恒定,将次内圈的 8 个点沿半径延长最小欧式距离获得最外圈的 8 个星座点.图 4c 给出了所提出的蜂窝状决策区域,改善了星座的品质因数(Constellation Figure of Merit, CFM),增强了调制方案对噪声的鲁棒性.最后图 4d 给出了信息熵为 4.6 bits/symbol 时,利用麦克斯韦-玻尔兹曼分布函数得到对星座点优化后的概率分布三维图.通过计算分析 CFM,在相同信息熵下,所提出的类蜂窝结构优于传统星型概率整形结构.实验结果表明,在误码率为 1×10^{-3} 时,所提出的类蜂窝结构的 PS-CAP-16 的接收机灵敏度以 1.5 dB 优于传统的概率整形方案.

概率整形的程度取决于概率分布因子的大小.为了增强概率整形的自适应性,我们在概率整形的光通信系统中使用模拟退火算法^[11],来计算星型 CAP-32 信号性能最优时的概率分布,获得自适应星型 CAP-24 信号,如图 5 所示.在自适应调制过程中,

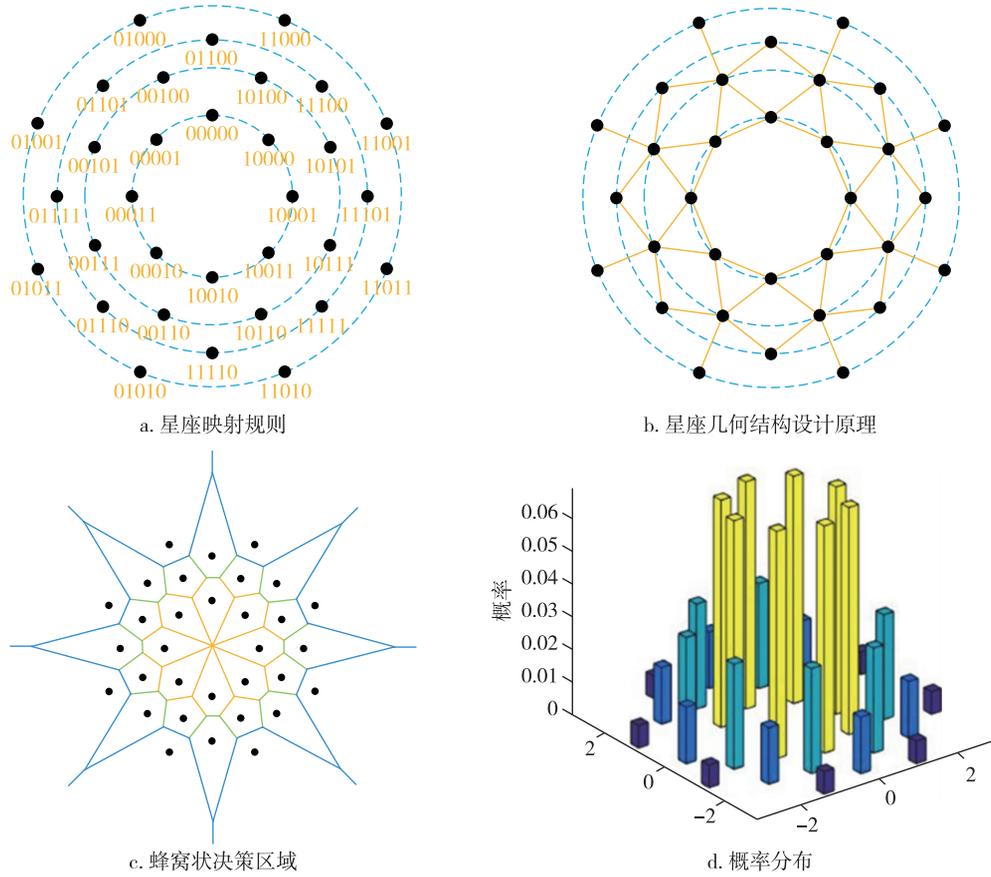


图4 基于类蜂窝决策区域星座设计概率整形方法示意图^[10]

Fig. 4 Schematic of probabilistic shaping based on constellation design with honeycomb-like decision regions

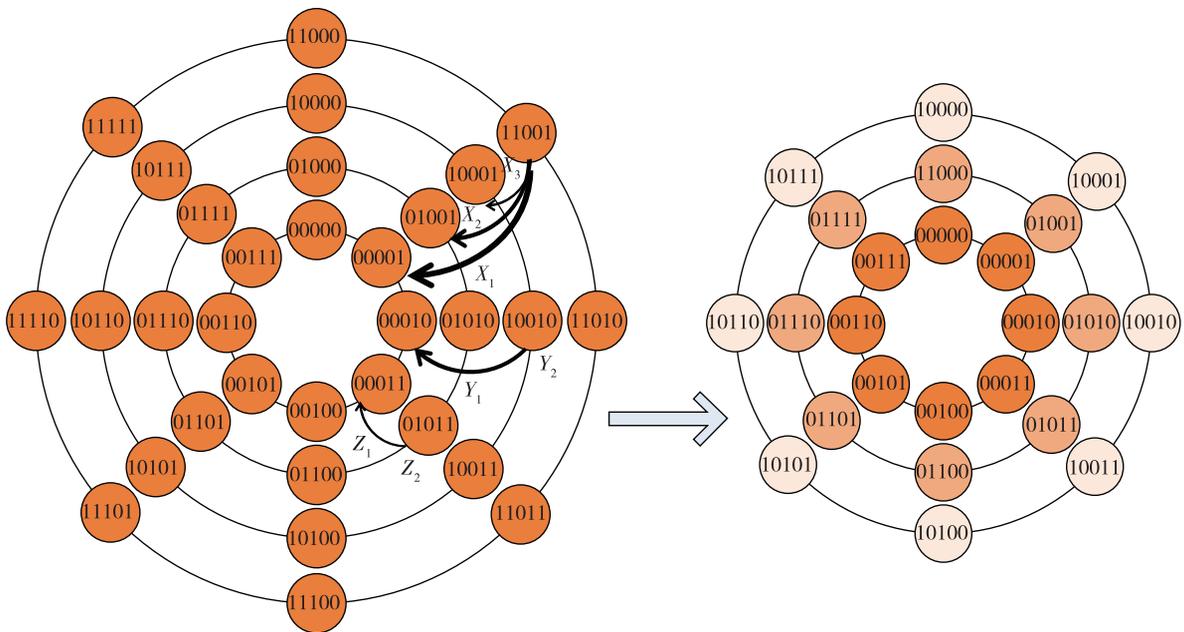


图5 星型 CAP-32 转化为星型 CAP-24 的星座示意图^[11]

Fig. 5 Schematic of the constellation of star-CAP-32 converted to star-CAP-24

我们规定:最外圈的星座点以 $X_1 : X_2 : X_3$ 的比率分别映射到内三圈上,次外圈则以 $Y_1 : Y_2$ 分别映射到最内圈和次外圈,次内圈的星座点以 $Z_1 : Z_2$ 比率重新映射到最内圈和次内圈.为了获得自适应调制的最优分布,需要选择出合适的 X, Y, Z 的值.我们采用模拟退火算法找出最低误码率时星型 CAP-32 信号的最佳概率分布:三圈概率分布比为 0.724:0.175:0.101 的自适应星型 CAP-24 信号星座图.通过分别计算星型 CAP-32 和 CAP-24 的平均峰值功率比(PAPR)和 CFM,可以得出自适应星型 CAP-24 具有更低的 PAPR 和更高的 CFM.通过搭建 25 km 的光纤通信系统验证所提出的方案,自适应后的星型 CAP-24 相较于星型 CAP-32 可以获得 1.5 dB 的增益,而相对于常规的星型 CAP-24 有 0.2 dB 的增益.

2.2 基于概率成形的宽带光接入应用研究

目前,概率整形研究主要在于实现概率整形的方法上.鉴于概率整形具有平均功率低、抗噪声能力强以及灵活性等特点,我们针对概率整形在宽带光接入网中的应用展开研究.在文献[12]中,我们提出

了一种二维多概率整形分布(Multiple Probabilistic Shaping, MPS)的灵活多载波滤波器组(Filter Bank Multi-Carriers, FBMC)的无源光网络(Passive Optical Network, PON)方案的传输.图6给出了该方案的发送端原理图.本方案中提出在一个光通信系统中同时采用多个概率整形的调制方式,结合多载波复用技术实现灵活的宽带光接入网络.所提出的基于 MPS 方案的光纤通信系统既满足了未来 5G 场景中对于灵活性的要求,又实现了接收端的灵活速率接入.此外,值得一提的是概率整形解决了复杂度与灵活性之间的矛盾,在增加灵活性的同时并没有增加系统的复杂度.

在上述多概率整形方案的基础上,我们又提出并用实验验证了一种基于概率整形的光学多载波生成系统,该系统可以动态地修改时域和频域的频率和概率^[13].如图7所示,我们利用可调晶体振荡器(Adjustable Crystal Oscillator, ACO)的可变性实现局

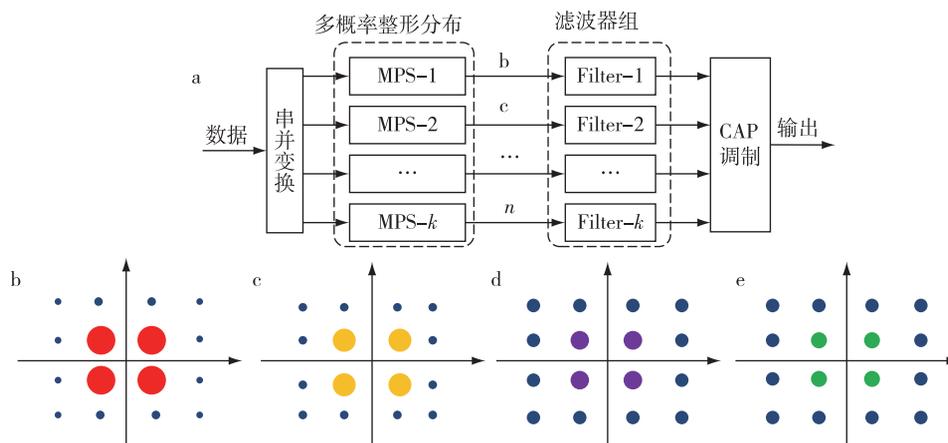


图6 基于二维 MPS 的 FBMC PON 发送端示意图

Fig. 6 Schematic FBMC PON transmitter based on two-dimensional MPS

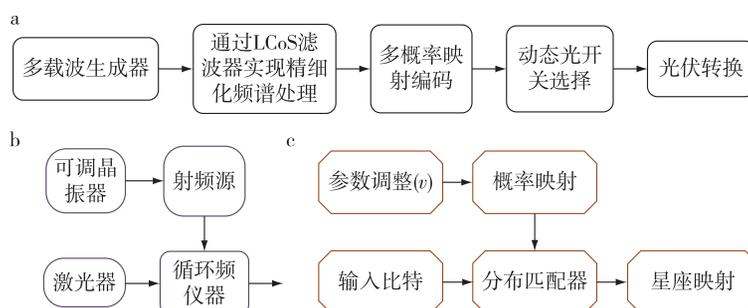


图7 多频率多概率光毫米波生成示意图

Fig. 7 Schematic of multi-frequency and multi-probability optical millimeter wave generation

部振动频率的动态调整和光学毫米波的频率变化^[13](图 7b).同时通过概率整形实现多概率映射,如图 7c 所示.实验中使用 20 GHz 射频分别生成频率为 20、40 和 60 GHz 的光毫米波,并通过概率整形技术将多概率分布映射到毫米波上,从而改善整个系统的误码率,进一步提高了系统的灵活性.

3 超大星座尺度下的概率整形编码技术

目前,光通信领域的一大热门话题是如何实现大容量、高频谱效率、高速率的光纤通信系统.众所周知,QAM 信号的阶数越高,则传输信号的频谱效率越高.可稳定无误码传输的高阶 QAM 信号为 64QAM,即 QAM 阶数不超过 64.超高阶 QAM 传输已经逐渐成为研究的重点方向,该方向主要是利用概率整形编码调制技术将 QAM 信号的外圈星座点概率映射到中间传输,从而降低信号星座的阶数.日本东北大学的电子通信研究实验室^[14]对概率整形后的 4096QAM 与均匀分布的 1024QAM 信号进行实验和数据对比发现,两者均具有相同的传输速率和频谱效率.PS-4096QAM 在传输 160 km 后,整形增益 1.8 dB,且传输性能较均匀分布的 1024QAM 有所改善.

在本文中,我们提出一种超大星座尺度下概率

整形方法,该方法主要是将超大星座通过概率整形后实现将星座尺度降低,实现小尺度的星座传输,从而提升通信系统的质量.这里,我们使用 MATLAB 软件仿真 16384QAM 信号经过概率整形后实现信号压缩,从而提升系统的性能.仿真链路框图如图 8 所示,我们依次对传输的信号进行概率整形、正交幅度调制以及多载波编码技术.本文主要为实现超大星座尺度的概率整形编码调制技术,所以使用的信道为高斯白噪声信道.概率整形编码调制技术采用分布匹配器式的 PS 实现方式.我们利用 MATLAB 软件仿真对比常规 16384QAM 与 PS-16384QAM 的系统误码率随信噪比的变化曲线,如图 9 所示,其中 $v=0$ 表示常规 16384QAM 信号, $v=0.1$ 表示 PS-16384QAM 信号.从图 9 中对比来看,概率整形可以有效地降低系统的误码率(BER),提升通信系统的传输性能.图 9 中还展示了 SNR(信噪比)为 14 时的接收端星座图,PS-16384QAM 的星座图规模明显减小,从而可以推测出概率整形具有更低的发射功率,可节约成本.随着概率分布因子的增大,概率整形程度增加.为验证这一结论,我们对其进行仿真,结果如图 10 所示.从图 10 中可以明显地看出,随着 v 值的增加,相同信噪比下的误码率明显减低,因此对于超大星座尺度下的 QAM 信号调制来说,概率整形是



图 8 超大星座尺度下概率整形编码调制系统框图

Fig. 8 Block diagram of PS coded modulation system under large constellation scale

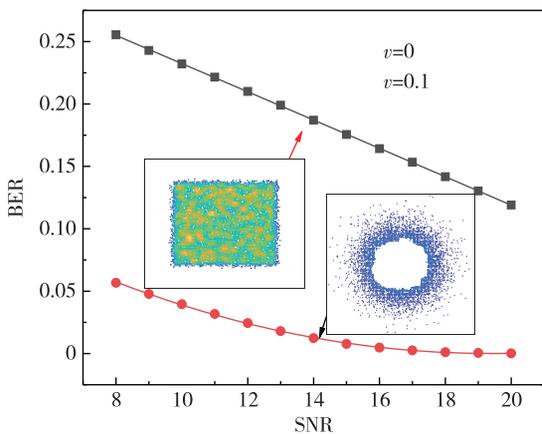


图 9 常规 16384QAM 与 PS-16384QAM 的 BER 随 SNR 变化曲线

Fig. 9 The BER as a function of SNR for conventional 16384QAM and PS-16384QAM

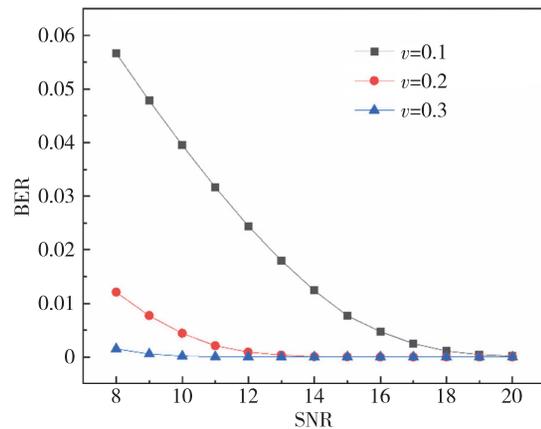


图 10 不同概率分布因子下的 PS-16384QAM 的 BER 随 SNR 变化曲线

Fig. 10 The BER vs. SNR of PS-16384QAM under different probability distribution factors

一种有效的改善通信系统性能的编码调制技术.概率整形可以随着概率分布因子变化而变化,这说明概率整形技术具有一定的灵活性,可以将其用于宽带光接入网中,实现灵活的光接入技术.图 11 展示了 SNR 为 12 时的不同概率分布因子下的 16384QAM 的接收端星座图,可以看出随 v 值的增大,概率整形程度增加,星座规模减小,且系统的接收误码率相应地减小.因此概率整形技术在超大星座尺度信号的传输改善上具有重要的作用.

4 光纤通信系统的发展前景

未来的光纤通信系统面临着大容量、高速率、高复杂度等挑战,为了应对这些挑战,我们正在不断地开发和设计新的算法、器件以及系统架构.概率整形

是目前一种具有低复杂度、高灵活性的新算法,可用于改善光纤通信系统的传输性能.我们提出将概率整形这一技术用于宽带接入网中,实现了不同速率的灵活接入.此外,为了应对超大容量的通信需求,我们对超大星座尺度的 QAM 信号进行概率整形,以实现超高阶 QAM 的传输.由于实验条件限制,在这里仅用 MATLAB 软件进行简单的系统仿真验证超大星座尺度的信号传输,从仿真结果来看,概率整形技术能够有效地实现超大星座尺度的有效压缩并提升系统的传输性能.然而,目前的概率整形算法缺乏智能化、自适应化,在未来我们将采用人工智能算法优化概率整形光纤通信系统,以实现真正的系统自适应概率调节,从而保证整个系统传输性能的最优化.

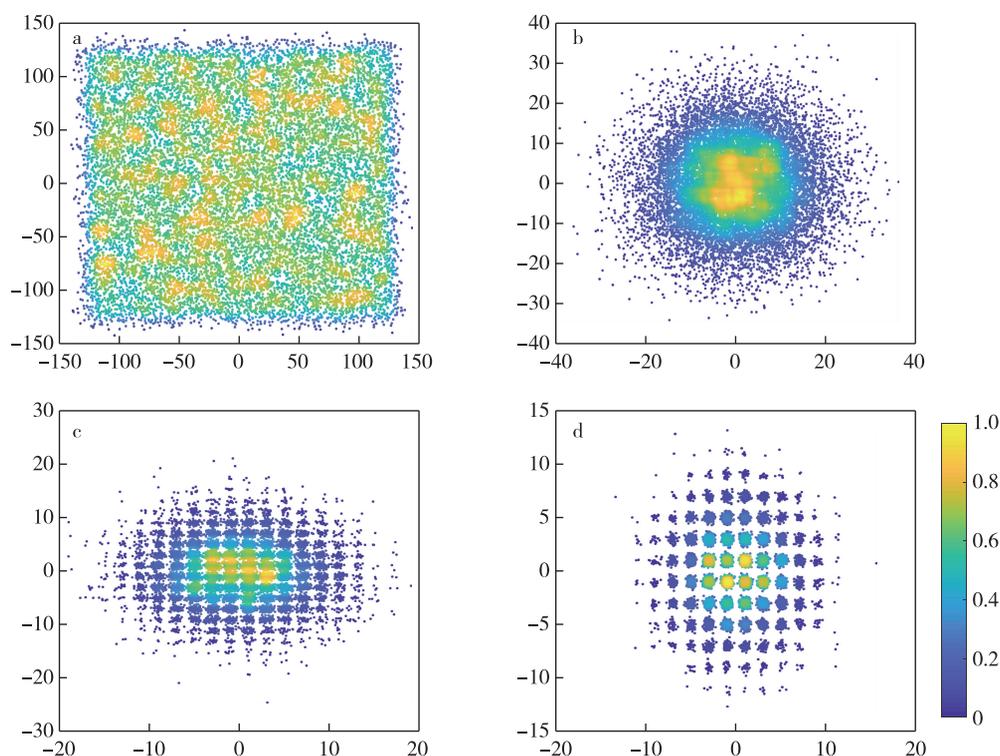


图 11 不同概率分布因子下 16384QAM 信号的接收星座图:(a) $v=0$, (b) $v=0.1$, (c) $v=0.2$, (d) $v=0.3$

Fig. 11 Received constellation of 16384QAM signals with different probability distribution factors, (a) $v=0$, (b) $v=0.1$, (c) $v=0.2$, (d) $v=0.3$

参考文献

References

- [1] 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
- [2] Buchali F, Steiner F, Böcherer G, et al. Rate adaptation and reach increase by probabilistically shaped 64-QAM: an experimental demonstration [J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 34 (7) : 1599-1609
- [3] Qu Z, Zhang S L, Djordjevic I B. Universal hybrid probabilistic-geometric shaping based on two-dimensional distribution matchers [C] // Optical Fiber Communications Conference, 2018, DOI: 10.1364/OFC.2018.M4E.4
- [4] Yu J J, Li X Y, Zhang J W, et al. 432-Gb/s PDM-16QAM signal wireless delivery at W-band using optical and an-

- tenna polarization multiplexing [C] // European Conference on Optical Communication, 2014, DOI: 10.1109/ECOC.2014.6963945
- [5] Schulte P, Böcherer G. Constant composition distribution matching [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2015, 62(1):430-434
- [6] Buchali F, Idler W, Schmalen L, et al. Probabilistically shaped QAM for independent reach, spectral efficiency and bit-rate adaptation [C] // European Conference on Optical Communication, 2016
- [7] 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
- [8] Böcherer G, Schulte P, Steiner F. Bandwidth efficient and rate-matched low-density parity-check coded modulation [J]. IEEE Transactions on Communications, 2015, 63(12):4651-4665
- [9] Xu X, Liu B, Wu X, et al. A robust probabilistic shaping PON based on symbol-level labeling and rhombus-shaped modulation [J]. Optics Express, 2018, 26(20):26576-26589
- [10] 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
- [11] 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):6
- [12] Jiang L, Liu B, Mao Y Y, et al. Flexible filter bank multi-carriers PON based on two-dimensional multiple probabilistic shaping distribution [J]. IEEE Access, 2019, 7:1793-1799
- [13] 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
- [14] Okamoto S, Terayama M, Yoshida M, et al. Experimental and numerical comparison of probabilistically shaped 4096QAM and a uniformly shaped 1024 QAM in all-raman amplified 160 km transmission [J]. Optics Express, 2018, 26(3):3535-3543

Probabilistic shaping of coded modulation technology

LIU Bo¹ JIANG Lei¹ MAO Yaya¹ WU Xiangyu² REN Jianxin² XU Xing² ZHAO Jianye¹ HAN Shun¹

¹ School of Physics and Optoelectronic Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

² School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876

Abstract With the development of 5G communication technology and its diverse application scenarios, the requirements for access flexibility in optical fiber communication systems have increased. Probabilistic shaping is a new modulation and coding technology with lower complexity and higher flexibility. Currently, this technology has mobilized research across the world and attracted the attention of many researchers. Probabilistic shaping not only enables flexible broadband optical access, but also optimizes quadrature amplitude modulation signals at the scale of large constellations. In this study, we will discuss a series of research achievements by our team in the field of probabilistic shaping, and hope to provide guidance and references for future optical fiber communication systems.

Key words probabilistic shaping; flexibility; broadband optical access network