

基于 Delta-Sigma 调制的超高阶 QAM 概率整形算法

杨 博

(中国电子科技集团公司 第五十四研究所, 石家庄 050081)

摘要: 针对终端用户数量的急速增长, 以及大容量、高速率的网络通信性能需求, 研究了 delta-sigma 实现机理, 可以将通信信号进行高阶量化; 在功率受限的高斯信道中, 分析了通过概率整形, 将均匀分布的比特序列转换成高斯分布的序列符号, 可以得到最优的输入分布序列; 基于 delta-sigma 调制算法, 在强度调制直接检测系统中实现了超高阶 16384 QAM 的传输; 在此基础上利用概率整形技术, 对超高阶 QAM 信号进行了整形, 分别探究了不同信息熵下的传输性能; 通过实验仿真结果可以说明, 概率整形可以很好的适用于基于 delta-sigma 的超高阶通信, 并有效提升通信传输效能。信息熵每降低 1 bit/symbol, 系统接收性能大约提升 0.5 dB。

关键词: 强度调制; delta-sigma 调制; 概率整形; 超高阶调制; 信息熵

Ultra-High Order QAM Probabilistic Shaping Algorithm Based on Delta-Sigma Modulation

YANG Bo

(The 54th Research Institute of CETC, Shijiazhuang 050081, China)

Abstract: With the rapid growth of end-users and the demand for high-lcapacity and high-speed network communication performance, a delta-sigma implementation mechanism is studied, which performs high-order quantization on communication signals. In Gaussian signal channels with a limited power, an optimal input distribution sequence can be obtained by probability shaping when the uniformly distributed bit sequence is transformed into the symbol of Gaussian distribution. Based the delta-sigma modulation algorithm, a 16384 QAM transmission algorithm with an ultra-high order is presented in the direct detection system of intensity modulation. On these basis, the ultra-high order QAM signal is reshaped by a probabilistic shaping technology, and the transmission entropy is investigated respectively. Simulation results show that the probabilistic shaping transmission algorithm is suitable for the transmission performance of ultra-high level communication, thus effectively improving the performance of the system, with an increase of 0.5 dB for an information entropy reduction of per 1bit/symbol.

Keywords: intensity modulation; delta-sigma modulation; shaping transmission; ultra-high order modulation; information entropy

0 引言

近年来, 随着第五代通信技术的普及, 互联网流量快速增长, 更大容量、更高速率通信网络已经成为人们最迫切的需求之一。并且自从智能手机问世后, 终端用户使用的数据量也急速增大, 对移动前传 (MFH, mobile fronthaul) 造成了极大的压力。目前 MFH 主要是依赖于公共无线电接口协议 (CPRI, common public ra-

dio interface), 其有着公认的抗损伤能力, 但是其频谱效率低也是广为诟病的缺点之一, 因此 CPRI 被认为是大规模移动数据传输中的瓶颈。此外, 无线传输仍然面临着通信距离受限、信道不稳定等问题, 因此在实际应用中往往采用无线-光纤混合通信的形式, 利用光载无线通信 (RoF, radio over fiber) 技术将信号调制到激光上, 通过光纤链路进行传输, 再利用天线进行发射。在

收稿日期:2025-05-08; 修回日期:2025-06-18。

作者简介:杨 博(1989-), 男, 硕士, 工程师。

引用格式:杨 博. 基于 Delta-Sigma 调制的超高阶 QAM 概率整形算法[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(9):283-290.

光纤通信端,强度调制直接检测(IMDD,intensity modulation with direct detection)技术是目前使用较多的方案之一,其系统架构简单、算法需求较低。在IM-DD系统中,离散多音(DMT,discrete multi-tone)技术有着广泛的使用,从而获得高频谱效率、高色散容忍度的传输。但是DMT信号由于可能存在高峰均功率比,更容易受到噪声和非线性效应的影响。

概率整形技术是通过改变已知的星座分布调制信号的分布概率实现信号调制,不改变系统的整体架构,在多个研究领域都有较为突出的优势。一种是研究不同信道条件下的输入信号的概率分布。例如,在瑞利信道下,以信道容量为目标函数采用修正的交替优化算法最优输入分布,在信道容量为3 bit/symbol时,与均匀分布相比有超过0.5 dB增益。二是研究适用于概率分布的分布匹配方案。通过分布匹配器可以将均匀分布的输入信号转换成目标分布的非均匀的输出信号,实现概率整形。例如恒定成分分布匹配(CCDM,constant composition distribution matching,)方法实现概率整形。即通过一种可逆固定长度分布匹配器,通过算术编码将均匀分布的二进制数据序列转换成服从目标分布的符号序列,随着匹配器达到最大速率,可以输出目标分布的序列。三是研究适用于非均匀分布的前向纠错(FEC,forward error correction)码的设计。例如,通过一种二进制阶梯码作为FEC码的编码调制方案,可以在较宽的光谱效率范围内实现0.56 dB~1.55 dB的广义互信息增益。四是研究概率整形的实现方案。例如,通过概率与FEC巧妙结合,可以实现概率整形和FEC码联合使用的实现方案。

Delta-Sigma调制器通过采样和噪声整形,将量化噪声推到高频段,可以获得高分辨率基带信号,提高模数转换精度,同时具有较低的复杂度,能够与概率整形高阶调制等高复杂度算法结合使用,提高系统稳定性。

在本文中,提出一种基于DSM进行超高阶QAM调制,并且在此基础上进行概率整形,分析不同整形幅度对基于DSM的超高阶QAM的影响。最后在25 km的标准单模光纤中对我们的方案进行了传输验证,经过实验验证,利用概率整形,信息熵每降低1 bit/symbol,系统的接收灵敏度大约提升了0.5 dB。并且利用概率整形后,可以显著的提升基于DSM超高阶QAM的极限性能。

1 系统设计

1.1 Delta-Sigma 调制原理

正如我们所知,从模拟信号到数字信号的转化过程中,由于连续变化的信号幅值转换成离散变换的幅值,

势必会带来幅度上的误差,这个误差被称作量化噪声,其产生的机理如图1所示。在实际通信中,不管信噪比多么好,量化噪声都是不可避免的。并且量化噪声区别于信道噪声,它可以认为是均匀的存在于每一个进行量化的点上。对量化噪声进行噪声整形是DSM中的一项基础技术。

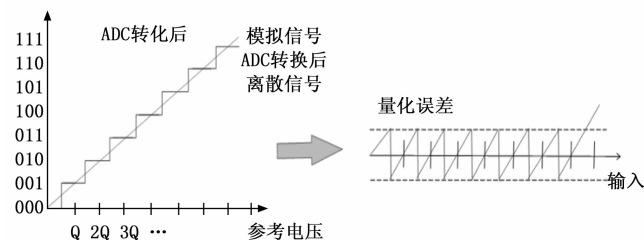


图1 量化误差产生机理

在噪声整形中,首先需要通过过采样,来降低量化噪声的密度。如图2所示, f_B 表示信号带宽, f_s 为采样率,OSR为过采样因子。在对信号进行bit量化后,可以看到,量化噪声分布在整个奈奎斯特区域,此时噪声的功率较高。在此基础上对信号进行过采样,过采样的倍数由过采样因子OSR决定。当对信号进行过采样后,此时量化噪声的频率会分布在整个区域,噪声的密度减小。当然此时噪声的总功率并不会减小,所以信噪比并没有变化。在过采样的基础上,我们进一步进行噪声整形,目的是将带内的噪声进一步推向带外的高频区域。最后,我们可以利用一个低通滤波器,巧妙的将低频信号和高频噪声进行截断,此时我们信号的信噪比有了极大的提升。

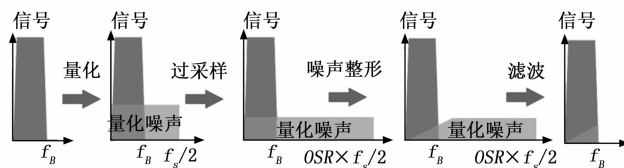


图2 DSM中噪声整形技术的工作原理

Delta-Sigma调制器的结构示意图如图3所示,其主要由积分器和量化器构成。模拟信号 $u(n)$ 输入到调制器中,量化器对积分后的信号 $x(n)$ 进行判决,当 $x(n) > 0$ 时,输出 $v(n) = 1$,否则输出 $v(n) = -1$ 。通过这种方式,模拟信号转化为1位的数字流,再通过反馈回路将数字信号转为模拟信号进行反馈。最后输出的就是由‘1’和‘-1’组成的数字流。

一阶Delta-sigma调制器的离散域积分器线性模型可以表示为:

$$X(n) = H(Z)U(n) + E_q \quad (1)$$

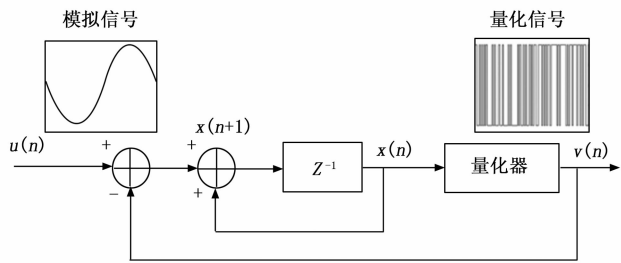


图 3 Delta-Sigma 调制器结构示意图

$$H(z) = \frac{z^{-1}}{1 - z^{-1}} \tag{2}$$

将 (2) 代入 (1) 可得：

$$U(z) = z^{-1} \cdot X(z) + (1 - z^{-1}) \cdot \epsilon(z) \tag{3}$$

输入信号延迟一位，噪声信号得到了 $1 - z^{-1}$ 调制，从频域上，量化噪声向高频推移，在低频处呈现较为明显的衰减。

对于 N 比特量化的一阶 Delta-sigma 调制器，其信噪比可表示为：

$$SNR = 10 \times \log \frac{P_{\text{Signal}}}{P_{\text{Noise}}} = 6.02 \cdot N - 3.39 + 9.03 \cdot \log_2 \left(\frac{f_s/2}{f_B} \right) \tag{4}$$

对于一阶调制器，过采样每增加一倍，信噪比提升 9.03 dB。高阶调制器实现复杂，噪声经多级整形后，调制器的信噪比可能受较大影响，对于放大器等相关电路设计要求较高，本文不再考虑。

1.2 概率整形基本原理

概率整形 (PS, probabilistic shaping) 是一种通过调整非均匀分布星座点的概率密度来优化信号传输效率的前沿技术。其核心思想是打破传统调制 (如 QAM) 中星座点均匀分布的限制，通过调整星座点出现的概率，使信号的平均能量降低，从而在相同信噪比 (SNR, signal to noise ratio) 下提升系统容量或降低功耗。传统均匀星座分布 (如 16 QAM、64 QAM) 中，所有星座点等概率出现，导致信号能量分布呈现高斯分布。然而，香农容量定理表明，信息传输的最大速率受限于信道的信噪比和带宽，而均匀分布并非最优化的信号设计。概率整形通过非均匀分布，将更多概率分配给低能量星座点，减少高能量点的出现概率，从而逼近香农极限。

信息论中对信息熵给出了数学表示，用 X 表示离散随机变量，则其信息熵可以表示为：

$$H(X) = - \sum_{x \in \chi} P(x) \log_2 [P(x)] \tag{5}$$

其中： χ 代表随机变量 X 的所有可能取值的集合， $P(x) = Pr(X = x), x \in \chi$ 代表随机变量 X 取值为 x 的

概率。

互信息量是两随机变量之间的关联性，对于两个随机变量 X 和 Y ，其概率函数分别为 $P(x)$ 和 $P(y)$ ，联合概率密度函数为 $p(x, y)$ ，互信息量为 $I(X, Y)$ ，互信息量可以表示为：

$$I(X, Y) = \sum \sum p(x, y) \log_2 \frac{p(x, y)}{p(x)p(y)} = H(X) - H(X/Y) = H(Y) - H(Y/X) \tag{6}$$

其中： $H(X/Y)$ 和 $H(Y/X)$ 代表条件熵。离散随机信道的信道容量表示如下：

$$C = \max_{p(x)} I(X; Y) \tag{7}$$

在实际传输系统传输过程中，在功率受限等因素影响下，输入信号在均匀分布时，对应的系统容量受限。在高斯信道条件下，互信息量可以如下表示：

$$I(X; Y) = H(Y) - \log \sqrt{2\pi e} \sigma \tag{8}$$

其中： σ 为高斯信道的标准差。在 $H(Y)$ 达到最大值的情况下，互信息量最大，即可以实现信容量最大。当 $H(Y)$ 标准差为 0 的高斯分布时， $I(X; Y)$ 最大，输入信号 $H(X)$ 最优概率分布也采用均值为 0 的高斯分布。此时，系统传输的信道容量可以表示如下：

$$C = \log \sqrt{2\pi e(p + \sigma^2)} - \log \sqrt{2\pi e} \sigma = \frac{1}{2} \log \left(1 + \frac{P}{\sigma^2} \right) \tag{9}$$

因此概率整形是通过将原本均匀分布的输入信号改变为适用于信道条件的输入信号分布，可以增加信号的互信息量，即增加系统的信道容量。

根据上述理论，均匀分布和高斯分布的输入随机变量，在信息熵相等条件下，输入信号发射功率比值表示如下：

$$10 \log_2 \sqrt{\frac{\sigma_{\text{均匀}}}{\sigma_{\text{高斯}}}} = \frac{\pi e}{6} = 1.53 \text{ dB} \tag{10}$$

概率整形的增益上限，即系统信道容量增加上限为 1.53 dB。

概率整形算法可以显著提升频谱效率，在高阶调制 (如 1 024 QAM) 中，概率整形可使系统容量提升约 15%~20%，同时可以通过减少高能量点的使用概率，降低突发噪声对信号的干扰。也可以根据信道状态调整概率分布，优化系统性能。在军工领域，概率整形算法广泛应用于雷达、卫星通信及电子战中，为复杂电磁环境下的高速、可靠数据传输提供了关键技术支撑。随着硬件技术和算法的进一步发展，概率整形有望成为下一代军事通信系统的基石。

1.3 概率整形实现方法

通过设置匹配器 (通过标准正态分布函数，可以将

均匀分布函数逆变为高斯分布函数), 根据输入输出序列长度 m 和 n 调节合适的概率整形因子 ($R = \frac{m}{n}$), 实现将均匀分布的比特序列 Y_m 转换成按照高斯分布的比特符号序列 X_m 。在发射端编码器之前增加匹配器, 实现概率整形。最常见的是利用复杂度较低的算术编码方法实现, 将独立分布的 $\frac{1}{2}$ 伯努利输入比特序列转换为目标分布的序列符号, 原理如下:

将均匀分布的二进制比特序列 Y_m , 经过匹配器后输出长度为 n , 幅度为 M , 服从概率分布 P_X 的符号序列 X_m 。

对于该概率分布 P_X 且任意 $\alpha > 0$, 当序列长度足够大时, 存在可逆映射满足以下不等式:

$$\frac{D(P_{f(B^n)} \| P_A^n)}{n} \leq \alpha \quad (11)$$

则概率整形编码速率为 $R = \frac{m}{n}$, 如果存在一个正值函数 $\beta(\alpha)$, 当 $\beta(\alpha) \xrightarrow{\alpha \rightarrow 0} 0$ 时, 满足以下不等式:

$$\frac{m}{n} \leq \frac{H(A)}{H(B)} + \beta(\alpha) \quad (12)$$

即满足以下不等式:

$$R \leq H(A) \quad (13)$$

概率整形会带来一定速率损失, 当序列长度增大时, 这种速率损失影响会逐渐减小。

在功率受限的高斯信道中, 通过概率整形, 将均匀分布的比特序列转换成高斯分布的序列符号, 可以得到最优的输入分布序列。针对不同信道的特征, 输入分布需要与传输信道进行匹配, 可以最大提升系统传输容量。

本文通过匹配滤波器实现信号的概率整形, 基于机器学习的概率整形算法需要进行大量数据训练与超高阶调制联合使用将大大增加系统的复杂度。联合编码调制在高阶调制下星座图复杂度高, 编码与调制的联合优化也会使计算复杂度成倍数上升。

1.4 QAM 调制解调算法

QAM (Quadrature Amplitude Modulation, 正交幅度调制) 是一种通过同时调制载波信号的同相分量 (I 路) 和正交分量 (Q 路) 来传输数据的数字调制技术。其核心思想是利用两个相互正交的正弦波 (相位差为 90°) 作为载波, 分别承载数据的幅度信息, 并通过合成后的信号实现高数据密度传输。QAM 的阶数 (如 16 QAM、64 QAM、256 QAM) 决定了每个符号可携带的比特数, 阶数越高, 频谱效率 (bps/Hz) 越高, 但对信噪比 (SNR) 和抗干扰能力的要求也越严格。

1.4.1 调制过程

比特映射与符号生成: 将输入的二进制比特流按符

号长度分割 (如 16 QAM 为 4 比特/符号, 64 QAM 为 6 比特/符号), 并通过预定义的映射规则 (如 Gray 编码) 将比特组合映射到星座图上的特定坐标点。Gray 编码可确保相邻星座点仅有一位比特差异, 降低误码率。

星座图设计: QAM 的星座点通常采用二维均匀网格分布 (如 16 QAM 为 4×4 网格), 其坐标值 (I , Q) 由高斯分布或均匀分布决定。例如, 对于 64 QAM, 星座点分布在 8×8 的网格中, 每个坐标轴有 $\pm 1, \pm 3, \pm 5, \pm 7$ 等幅度值。

通过本地振荡器生成同相信号和正交信号, 分别与 I 路和 Q 路的基带信号相乘, 再叠加形成复合信号。

函数表示为:

$$s(t) = I(t) \cos(2\pi f_c t) - Q(t) \sin(2\pi f_c t) \quad (14)$$

其中: $I(t)$ 和 $Q(t)$ 为基带信号, f_c 为载波频率。

高阶 QAM (如 256 QAM) 的星座点间距更小, 对信噪比要求显著提高。例如, 256 QAM 的理论门限 SNR 约为 20 dB, 远高于 16 QAM 的约 7.5 dB。同时, 高阶 QAM (如 256 QAM) 的星座点间距更小, 对信噪比要求显著提高。例如, 256 QAM 的理论门限 SNR 约为 20 dB, 远高于 16 QAM 的约 7.5 dB。

1.4.2 解调过程

解调过程主要分为同步与时域均衡、解映射和软判决以及信号估计和自适应调节 3 个步骤。

载波恢复过程为通过数字锁相环 (DPLL, digital phase locked loop) 或 Costas 环路实现载波相位同步, 消除因信道导致的相位偏移。利用最大似然序列估计 (MLSE, Maximum likelihood sequence estimation) 或插值法确定最佳采样时刻完成符号定时同步, 减少码间干扰 (ISI, inter symbol interference)。同时, 利用零强迫均衡 (ZF, zero forcing) 和最小均方误差 (MMSE, minimum mean square error) 等线性均衡技术以及决策反馈均衡 (DFE, decision feedback equalizer) 等非线性均衡技术, 通过滤波抵消信道脉冲响应, 或利用以解调符号的反馈进一步消除 ISI。

解映射与软判决主要分为硬判决和软判决。硬判决是直接根据接收信号的 I/Q 坐标找到最近的星座点, 并还原对应比特。软判决是输出每个比特的对数似然比 (LLR, log-likelihood ratio), 用于后续软解码 (如 Turbo 解码或 LDPC 解码), 软判决可以显著提升纠错性能。

信道估计方法主要有插入导频和盲估计两种。导频插入是在发送信号中周期性插入已知导频符号, 通过最小二乘法 (LS, least squares) 或最小均方误差 (LMMSE, linear minimum mean square error) 估计信道响应。盲

估计是利用信号的统计特性（如高阶累积量）推断信道状态，减少开销。自适应调制则是根据实时信道状态信息（CSI），动态切换 QAM 阶数（如从 64 QAM 降级到 16 QAM），平衡传输速率与系统可靠性。

1.4.3 算法实现与优化

数字信号处理（DSP，digital signal processing）是指通过调制器和解调器设计实现射频信号的生成和转换。调制器通过数字上变频（DUC，digital up converter）模块生成 I/Q 信号，通过数模转换（DAC，digital to analog converter）输出射频信号。解调器通过模数转换（ADC，analog to digital converter）捕获接收信号，利用 FFT 或滤波器组实现频域处理。

联合编码与调制一般通过并行级联卷积码（PCCC，parallel concatenated convolutional Code）和迭代译码形成的 Turbo 码显著降低误码率，与高阶 QAM 结合可实现高吞吐量通信。例如在卫星通信中，256Q AM 与 Turbo 码联合使用，可在 SNR 为 22 dB 时实现接近香农极限的传输速率。

硬件设计过程中需要根据调制阶数选择高速 ADC/DAC 芯片以满足高阶 QAM 更高的采样率和分辨率（如 12 位以上）需求，可以更加精确捕捉信号细节。在实际使用过程中如雷达和无人机等便携设备中需采用 FPGA 或专用 ASIC 实现算法加速等进行低功耗设计。

1.4.4 QAM 算法存在的问题及解决方法

QAM 算法使用过程中由于高频载波的相位噪声会导致星座点偏移，影响解调性能造成相位噪声与抖动。在多径效应和快速移动场景下，导频符号可能无法准确反映瞬时信道状态，从而产生信道估计误差。高阶 QAM 和联合编码（如 Turbo 码）的实时解码增加了系统计算复杂度对于处理器性能提出了更高的要求。

因此在设计使用过程中可以采取数字预失真（DPD，digital pre-distortion）、迭代检测算法、硬件加速等方式解决上述问题。数字预失真是通过补偿射频前端的非线性失真，减少星座点畸变。迭代检测算法是将信道估计、解调和解码过程迭代进行，逐步优化结果（如 Turbo 检测）。硬件加速是采用 GPU 或专用 DSP 芯片实现并行计算，降低复杂度的同时，满足实时性要求。

随着 QAM 阶数的增大，传输性能将逼近香农基线，通过与多输入多输出（如 4×4 MIMO，multiple-input multiple-output）技术结合，可以极大提升传输速率，同时，利用深度学习优化星座图设计和自适应参数选择，提升复杂环境下的鲁棒性。QAM 调制解调算法通过高效利用频谱和幅度信息，在军事通信、雷达及卫星系统中发挥核心作用。其成功依赖于精确的同步技

术、抗干扰设计和信道自适应机制。随着硬件算力提升和算法创新，QAM 将在未来复杂电磁环境下持续推动高速、可靠的数据传输能力。

1.5 基于 DSM 的超高阶 QAM 概率整形

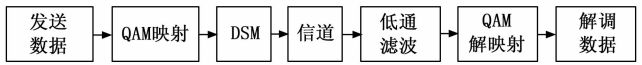
基于 DSM 的高阶 QAM 通信调制解调流程如图 4 所示，发送端首先将二进制数据进行 QAM 映射，生成高阶 QAM 符号。接着将高阶 QAM 符号输入 delta-sigma 调制器中，进行噪声整形以及量化。量化后的信号就是我们需要在信道中进行传输的信号。在接收端，我们仅仅需要进行一个低通滤波，就可以将 DSM 信号还原为高阶 QAM 信号。最后对 QAM 信号进行解调，获得我们初始的发送信号。

区别于传统的 DSM-QAM 传输，我们在进行 delta-sigma 调制之前，需要先对高阶 QAM 信号进行概率整形。根据概率成形基本原理，M 阶 QAM 星座符号点可以表示为 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$ 。为了满足 Maxwell-Boltzmann 分布，每个信号点 $x_i \in X$ 的概率质量函数可以表示为：

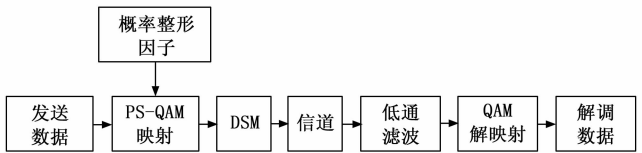
$$P_X(x_i) = e^{-\mu |x_i|^2} / \sum_{x_i \in X} e^{-\mu |x_i|^2}$$

(15)

其中： μ 是用来调节分布的概率整形因子。



(a) 传统 DSM-QAM 通信



(b) 利用概率整形的 DSM-QAM 通信

图 4 通信流程

2 基于 DSM 进行超高阶 QAM 调制算法

阐述设计中采用的关键技术和方法（算法、技术难点等）利用 delta-sigma 调制器作为模数转换器，代替 CPRI 实现新的 MFH 架构，是解决高峰均功率比问题的一个有效手段^[5-6]。相比于 CPRI，基于 DSM 的频谱效率更高，抗噪声鲁棒性更好。在参考文献 [7] 中，详细的介绍了 DSM 的原理，并且利用 DSM 技术进行了超高阶的 QAM 信号传输。在参考文献 [8-10] 中，各种基于 DSM 的超高阶调制格式传输也分别被报道。以上研究结果表明，在超高阶的 QAM 传输中，最有效且低成本的方式就是利用 DSM 对高阶信号进行量化，然后把高阶信号转为低阶信号进行传输。

但是即便使用了 DSM，随着调制阶数的增加，QAM

信号的抗噪能力仍然会严重下降,其主要影响因素是量化过程中不可避免的量化噪声。在几千甚至一万 QAM 以上的超高阶调制中,量化噪声已经是不可以被忽视的一项问题。这主要是因为超高阶 QAM 中星座点的欧式距离非常小,微小的噪声干扰就会带来明显的影响,非常容易出现错误判决。因此在增加调制阶数的同时,如何尽量避免量化噪声带来的影响,也是 DSM 中一项亟待解决的关键问题。

概率整形 (PS) 因其在光纤通信系统中对更高的频谱效率、更高的容量和更长的传输距离的支持作用而受到越来越多的关注。概率整形的基本思想是针对符号的能量,对生成符号的概率进行处理。在阶调制中,星座图外圈的符号需要的发射能量要高于内圈的点,如果使用概率整形技术使内圈点发送的概率获得增加,并且同时降低外圈点的发送概率,那么星座图整体的平均能量就会获得降低。此时在相同的发射光功率下,由于信号所需发射功率更低,所以受到噪声影响更小,因此概率成形技术可以有效的提升信噪比,使系统容量更接近信道的香农极限。因此针对基于 DSM 的高阶星座图进行概率整形,也是一项值得研究的话题。

3 数据处理

首先将要发送的二进制数据进行概率整形 QAM 映射,这里我们采用超高阶 16384-QAM。通过调节概率

整形因子,将信息熵分别固定为 14 bits/symbol、13 bits/symbol 和 12 bits/symbol,探究不同整形幅度下 DSM 的误码性能。

图 5 展示了不同信息熵下的 16384 QAM 星座图,其中图 (e)、(f)、(g) 是将图 (a)、(b)、(c) 的部分区域放大,从而更清楚的看到星座图中的细节。可以看出,由于阶数的增加,信息熵的减少会对星座点在星座图中的分布造成很大的影响,即使信息熵只相差 1 bit/symbol,星座也会有非常明显的整形效果。

经过星座整形后,获得的高阶 QAM 信号需要进行离散多音调制。这里我们将傅里叶点数设置为 1024,其中 500 个子载波用于调制数据,另外 500 个子载波调制上与前 500 个子载波共轭对称的数据,剩下的载波不进行调制,作为 0 载波。经过快速逆傅里叶变换 (iFFT) 后,频域的信号转为时域 DMT 信号。接下来对其进行 DSM 调制。

首先对时域 DMT 信号进行过采样,这里我们的过采样因子 OSR 设置为 8,实验采用四阶 DSM,噪声传递函数可以表示为:

$$H = \frac{(z^2 - 1.982z + 1)(z^2 - 1.987z + 1)}{(z^2 - 1.491z + 0.6514)(z^2 - 0.7228z + 0.2918)} \quad (16)$$

图 6 中 (a) 和 (b) 分别代表着噪声传递函数的频

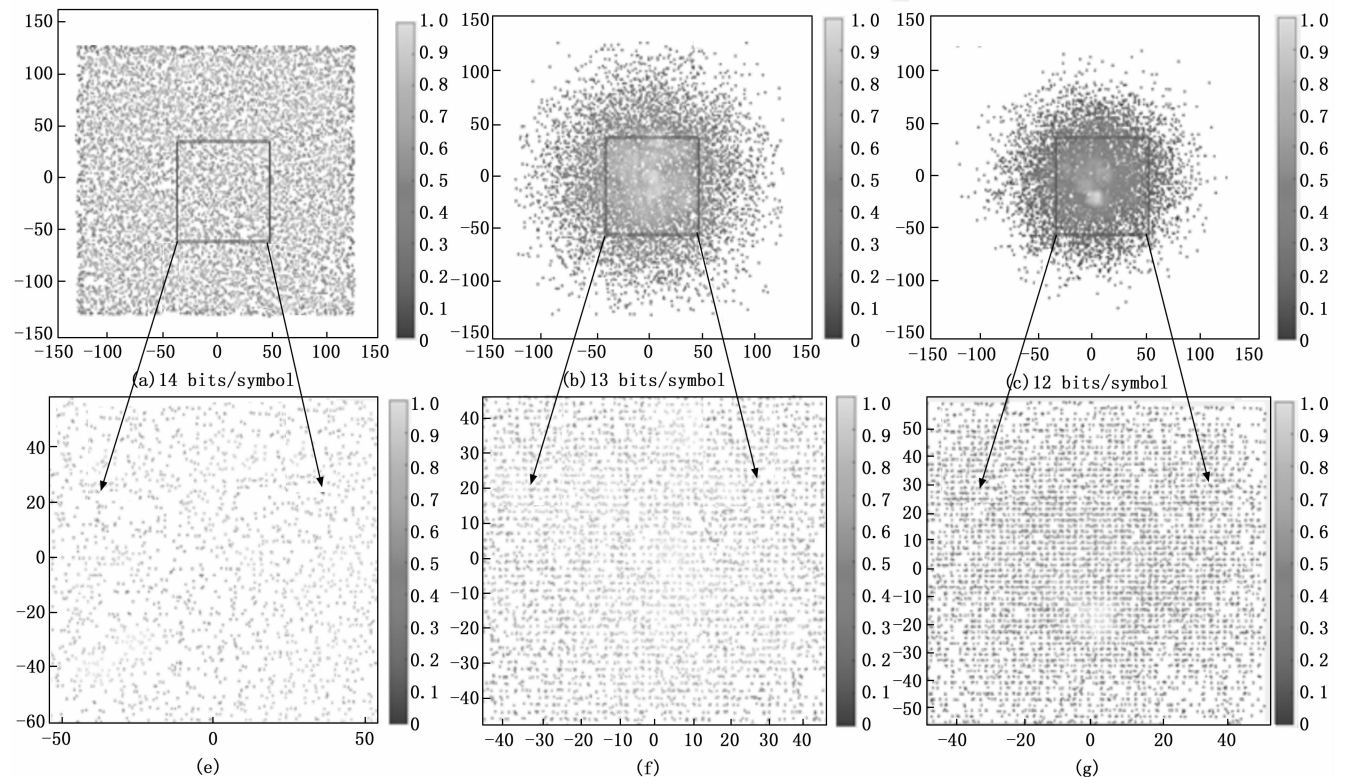


图 5 不同整形幅度下接收端的星座图

率响应和零极点图。经过噪声整形后，量化噪声密度降低，并且由低频推到了高频。经过 DSM 后，高阶的 QAM 信号被转化为 PAM4 信号进行发送，此时 PAM4 信号的频谱如图 7 所示。

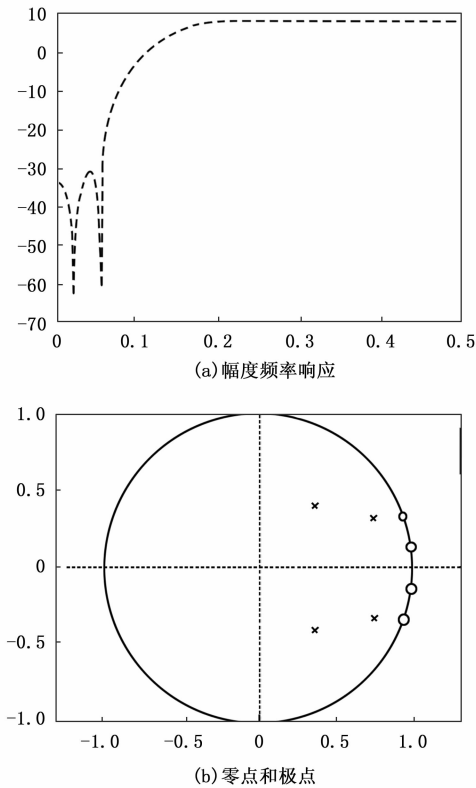


图 6 噪声传递函数

4 实验结果与分析

将所获得的 PAM4 信号在如图 8 所示的 IMDD 实验平台上进行传输。在我们的实验中，由于通过概率整形技术改变了信息熵，因此我们需要对任意波形发生器采样率进行调节，在 14 bits/symbol、13 bits/symbol 和 12 bits/symbol 的信息熵下，为了使传输速率相同，我们将任意波形发生器采样率分别设置为 10 GSa/s、10.8 GSa/s 和 11.7 GSa/s。光源波长设置为 1 550 nm，

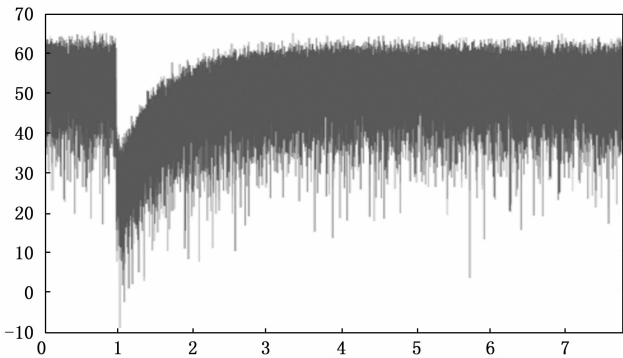


图 7 经过 DSM 后 PAM4 信号频谱

功率为 10 dBm。在马赫曾德尔调制器中进行强度调制后，利用掺铒光纤放大器进行放大后通过 25 km 的单模光纤进行传输。接收端通过一个可调光衰减器调节接收光功率，通过光电探测器后输入采样率为 50 GS/s 的混合信号示波器。

对于接收到的数据，我们首先将其恢复成 PAM4 信号，该过程可以用 PAM4 通信中的传统技术实现。接下来要做的是将 PAM4 信号恢复成高阶的 QAM 信号。根据 DSM 的基本原理，我们仅需要进行一个低通滤波的操作。

利用可调光衰减器，我们可以调整接收光功率，从而获得接收光功率与误码率（BER，bit error rate）的曲线，3 种不同信息熵下的 BER 曲线如图 9 所示。

5 结束语

利用概率整形，可以明显的提升系统 DSM 性能。在接收光功率较低的时候，大约有 0.5 dB 的接收灵敏度提升。而随着接收光功率的增加，信噪比也会逐渐提升，当到达 PAM4 信号误码率为 0 的阈值时，DSM 的性能达到极限状态，此时进一步增加信噪比也并不会提升系统的性能。可以看出，利用概率整形，可以明显地提升基于 DSM 的超高阶 QAM 通信的极限性能。文章对于理想条件下的均匀分布序列通过概率整形和超高阶

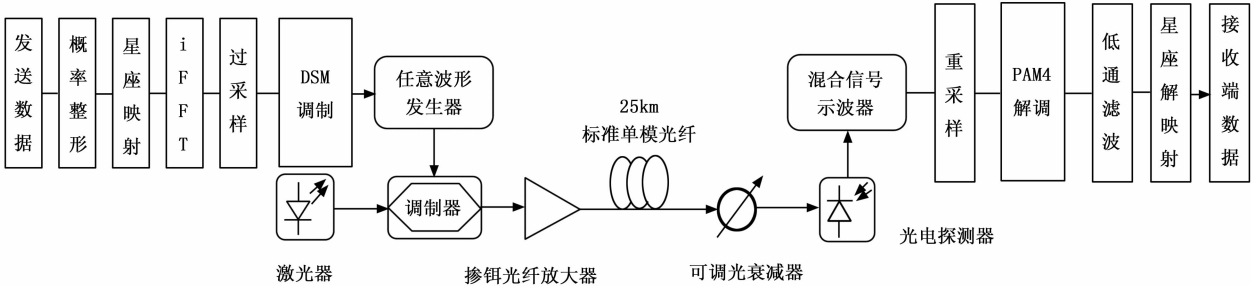


图 8 试验系统示意图

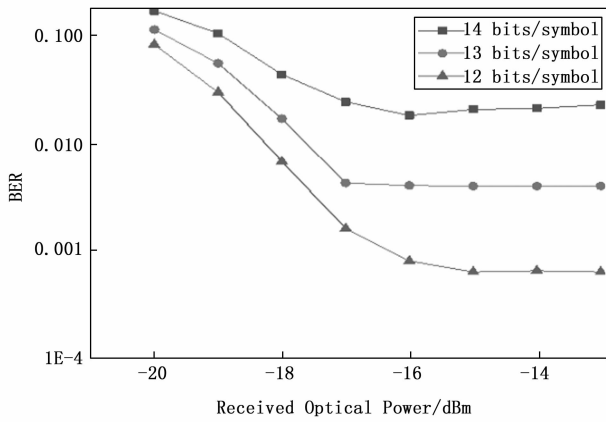


图 9 经过 25 km 标准单模光纤后 BER 曲线

调制实现了系统性能的提升,在实际应用过程中存在多径干扰、反射干扰以及噪声干扰等因素影响系统性能,本文提出的超高阶 QAM 算法可以在有限带宽内提升频谱效率,系统鲁棒性较强。

参考文献:

- [1] WANG J, ZHEN Y, YING K, et al. Delta-Sigma modulation for digital mobile fronthaul enabling carrier aggregation of 32 4G-LTE / 30 5G-FBMC signals in a single- λ 10-Gb/s IM-DD channel [J]. Optical Fiber Communications Conference, 2020, 26 (1): 1-2.
- [2] ZHAO L, et al. Probabilistic shaping-based delta sigma modulation [J]. Communications Conference, 2023, 48 (6): 1450-1453.
- [3] YAO Y, XIAO K, XIA B, et al. Design and analysis of Rotated-QAM based probabilistic shaping scheme for rayleigh fading channels [J]. IEEE Transactions on Wirelless Communication, 2020, 19 (5): 3047-3063.
- [4] SCHULTE P, BOCHERER G. Constant composition distribution matching [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2016, 62 (1): 430-434.
- [5] SHEIKH A, AMAT A G I, LIVA G, et al. Probabilistic amplitude shaping with hard decision decoding and staircase codes [J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36 (9): 1689-1697.
- [6] 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.
- [7] SONG R, HE J. OFDM-NOMA combined with LFM signal for W-band communication and radar detection simultaneously [J]. Opt. Lett. 2022, 47 (11): 2931-2934.
- [8] SHI J, YU J, ZHAO J, et al. 65, 536-QAM OFDM signal transmission over a fiber-THz system at 320 GHz with delta-sigma modulation [J]. Opt. Lett. 2023, 48 (8): 2098-2101.
- [9] 吴自强. 基于 Delta-Sigma 调制的低成本光传输技术研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2021.
- [10] 田若彤. 联合概率整形的相干激光通信关键技术研究 [D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2022.
- [11] 胡登鹏, 王世栋, 张尔扬. 高阶 QAM 调制制式识别及其系统实现 [J]. 飞行器测控学报, 2009, 28 (2): 56-60.
- [12] 王晓晴, 杨知行, 彭克武等. 一种 M-QAM 软判决解映射的简化算法研究 [J]. 电视技术. 2008, 32 (1): 17-19.
- [13] SHANNON C E. Probability of error for optimal codes in a gaussian channel [J]. The Bell System Technical, 1959, 38 (3): 620-646.
- [14] TIAN R, WU Z, MA S. Design and performance analysis of probabilistically shaped QAM signals for coherent FSO systems with gamma-gamma turbulence channels [J]. Applied Sciences, 2021, 11 (21): 9805.
- [15] WANG J, JIA Z, CAMPOS L, et al. Delta-Sigma digitization and optical coherent transmission of DOCSIS 3.1 signals in hybrid fiber coax networks [J]. Lightwave Technol, 2018, 36 (2): 568-579.
- [16] GU Y, WU Z, LI X, et al. Modulation format identification in a satellite to ground optical wireless communication systems using a convolution neural network [J]. Applied Sciences, 2022, 12 (7): 3331.
- [17] LIU J, DING J, WANG C, et al. 8192QAM signal transmission by an IM/DD system at W-Band using delta-sigma modulation [J]. IEEE Photon. Technol. Lett, 2023, 35 (4): 207-210.
- [18] BAI K, ZOU D, ZHANG Z, et al. Digital mobile fronthaul based on performance enhanced multi-stage noise-shaping delta-sigma modulator [J]. Lightwave Technol, 2021, 39 (2): 439-447.
- [19] PAN X, et al. Photonic-aided W-band dual-vector RF signal generation and detection enabled by bandpass delta-sigma modulation and heterodyne detection [J]. Opt. Lett. 2023, 48 (8): 2146-2149.
- [20] LIU B, LI X, ZHANG Y, et al. Probabilistic shaping for ROF system with heterodyne coherent detection [J]. Apl. Photonics. 2017, 2 (5): 1-3.
- [21] RAPHAELI D, GUREVITZ A. Constellation shaping for pragmatic turbo-coded modulation with high spectral efficiency [J]. IEEE Trans. Commun. 2004, 52 (3): 341-345.