

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2022 年 11 月 3 日 (03.11.2022)



(10) 国际公布号
WO 2022/227296 A1

(51) 国际专利分类号:
H04L 25/03 (2006.01)

(SHEN, Gangxiang); 中国江苏省苏州市工业园区仁爱路199号, Jiangsu 215000 (CN)。

(21) 国际申请号: PCT/CN2021/106996

(74) 代理人: 苏州市中南伟业知识产权代理事务所(普通合伙)(CENTRAL SOUTH WELL INTELLECTUAL PROPERTY OFFICE); 中国江苏省苏州市吴中区石湖西路188号吴中万达广场A座苏州大学国家科技园2303, Jiangsu 215000 (CN)。

(22) 国际申请日: 2021 年 7 月 19 日 (19.07.2021)

(25) 申请语言: 中文

(26) 公布语言: 中文

(30) 优先权:
202110461754.7 2021年4月27日 (27.04.2021) CN

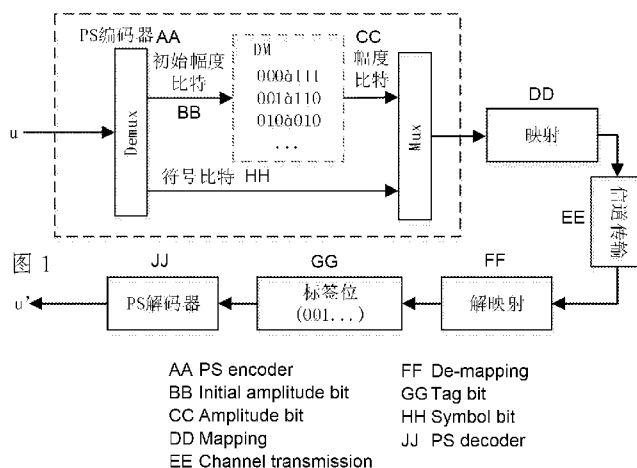
(71) 申请人: 苏州大学(SOOCHOW UNIVERSITY) [CN/CN]; 中国江苏省苏州市工业园区仁爱路199号, Jiangsu 215000 (CN)。

(72) 发明人: 高明义(GAO, Mingyi); 中国江苏省苏州市工业园区仁爱路199号, Jiangsu 215000 (CN)。
刘梦丽(LIU, Mengli); 中国江苏省苏州市工业园区仁爱路199号, Jiangsu 215000 (CN)。 沈纲祥

(81) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, IT, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL,

(54) Title: PROBABILISTIC SHAPED PAM-4 SIGNAL TRANSMISSION METHOD AND APPARATUS

(54) 发明名称: 概率整形PAM-4信号传输方法及装置



(57) Abstract: The present invention relates to a probabilistic shaped (PS) PAM-4 signal transmission method. The method comprises: receiving a bit sequence, and dividing the bit sequence into symbol bits and initial amplitude bits; performing distribution matching processing on the initial amplitude bits, and obtaining amplitude bits with probability distributions of "0" and "1" by means of energy level allocation; performing mapping processing on the amplitude bits and the symbol bits, so as to obtain a PS-PAM-4 signal; and sending the PS-PAM-4 signal to a receiving end, so that the receiving end performs channel equalization processing on the PS-PAM-4 signal, so as to obtain a processed output signal, and performs de-mapping and decoding processing on the output signal, so as to obtain the bit sequence. By means of the present invention, a plurality of probability distributions can be provided for any n symbol types, and constant PS encoding redundancy is provided, thereby greatly enhancing the flexibility of a system and reducing the use of an additional comparator. Moreover, in comparison with a traditional PAM-4 signal transmission method, the sensitivity of a receiver can be improved by as much as 4.2 dB, thereby achieving an ideal communication quality.

ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US,
UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW。

- (84) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的地区保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布:

- 包括国际检索报告 (条约第21条(3))。

(57) 摘要: 本发明涉及一种概率整形PAM-4信号传输方法, 包括接收比特序列, 将比特序列划分为符号比特和初始幅度比特; 对初始幅度比特进行分布匹配处理, 通过能级分配获得具有"0"和"1"概率分布的幅度比特; 对幅度比特和符号比特进行映射处理, 获得概率整形的PS-PAM-4信号; 将PS-PAM-4信号发送至接收端, 由接收端对PS-PAM-4信号进行信道均衡处理, 得到处理后的输出信号, 并对输出信号进行解映射和解码处理, 获得比特序列。本发明能够为任何n个符号类型提供多种概率分布, 并具有恒定的PS编码冗余度, 大大增强了系统的灵活性并减少了附加比较器的使用, 而且与传统PAM-4信号传输方法相比, 其可以将接收器灵敏度提高多达4.2dB, 通信质量理想。

概率整形 PAM-4 信号传输方法及装置

技术领域

本发明涉及光通信网络技术领域，尤其是指一种概率整形 PAM-4 信号传输方法及装置。

背景技术

概率整形 (Probabilistic shaped, PS) 脉冲幅度调制 (Pulse amplitude modulation, PAM) 由于其优越的性能而在数据中心内部网络中有广泛的应用前景。其中强度调制直接检测 (Intensity-modulation direct-detection, IM/DD) 四级脉冲幅度调制 (PAM-4) 因具有更简单的结构和更低的成本能耗而优于其他方案。

为了进一步提高 PAM 系统的性能，概率整形可以通过球形地限制信号空间中的调制级别来放宽信噪比要求，从而降低平均信号能量。但是，相干光通信系统的常规 PS 方案具有较高的计算复杂度，其复杂度主要由分布匹配器 (Distributed matcher, DM) 决定。其中分层分布匹配器 (Hierarchical distributed matcher, HiDM) 具有完全并行的输入-输出接口和流水线结构，却以较大的速率损失和较高的 SNR 为代价执行 DM/inv-DM。m-out-of-n 方法利用缩放和舍入技术，因此在硬件实施方面较为困难。另外基于算术编码的恒定成分分布匹配 (Constant composition distribution matching, CCDM) 在码长无限制的条件下具有零速率损失的特性，但由于串行编码而在解码时会引起一连串的错误。而基于霍夫曼编码的 DM 具有较低的实现复杂性，却存在比特率变化和同步问题。因此，具有低复杂性和高性能的 PS 方案在 IM/DD 系统中更具吸引力。

剪切和粘贴 (cut-and-paste, CAP) 方法满足了低复杂度这一条件, 该方法将发送比特序列切分为许多个 n 符号组。对于每个 n 符号组, 经过比特到符号映射后, 提取幅度位并根据查找表 (Look up table, LUT) 进行翻转, 然后计算并比较原始幅度位和翻转后幅度位的能量, 以选择能量较低的一个进行传输。最后, 将标签位粘贴到每个 n 符号组以区分翻转操作[8]。虽然通过改变每个组的符号长度可以实现不同的概率分布, 但是一旦选择了每个组的符号长度, 则概率分布将不可更改。

此外, PAM 系统的波特率始终受可用光学器件和电气组件的带宽限制。因此, 一些改进的 PAM-4 方案, 例如更快的奈奎斯特 (Faster-than Nyquist, FTN) PAM-4, 部分响应 (Partial-response, PR) PAM-4, 星座切换 (Constellation switching, CS) PAM-4 等被提出来以适应更高的波特率的信号在带宽受限的系统中传输[9-12]。这时, 各种能减轻带宽限制带来的符号间干扰 (Inter-symbol interference, ISI) 的均衡技术是必不可少的, 例如前馈均衡器 (Feed-forward equalizer, FFE)、判决反馈均衡器 (Decision feedback equalizer, DFE)、Tomlinson-Harashima 预编码 (Tomlinson-Harashima precoding, THP)、最大似然比特序列估计 (Maximum likelihood sequence estimation, MLSE) 和沃尔泰拉均衡器 (Volterra equalizer, VE) 等, 但是接收器的灵敏度依然存在较低的问题, 导致通信质量不理想。

综上所述, 现有技术的 PAM 系统存在符号长度确定后概率分布不可更改、接收器灵敏度低以及通信质量不理想的问题。

发明内容

为此, 本发明所要解决的技术问题在于克服现有技术中 PAM 系统存在符号长度确定后概率分布不可更改、接收器灵敏度低以及通信质量不理想的问题。

为解决上述技术问题，本发明提供一种由编码模块执行概率整形 PAM-4 信号传输方法，包括：

接收来自发射端的比特序列，将所述比特序列划分为符号比特和初始幅度比特；

- 5 对所述初始幅度比特进行分布匹配处理，通过能级分配获得具有“0”和“1”概率分布的幅度比特；

对所述幅度比特和符号比特进行映射处理，获得概率整形的 PS-PAM-4 信号；

- 10 将所述 PS-PAM-4 信号发送至接收端，由所述接收端对所述 PS-PAM-4 信号进行信道均衡处理，得到处理后的输出信号，并对所述输出信号进行解映射和解码处理，获得发射端发送的比特序列。

在本发明的一个实施例中，所述通过能级分配获得具有“0”和“1”概率分布的幅度比特包括：

- 15 对所述初始幅度比特进行 PAM-4 符号映射并对其进行排列组合，计算每个组合的能量；

根据每个组合的能量定义不同的能级，并计算其能级概率；

根据不同能级的概率计算概率分布中“0”和“1”的概率；

将高能级的比特翻转为低能级的比特，获得具有“0”和“1”概率分布的幅度比特。

- 20 在本发明的一个实施例中，每个组合的能量计算公式如下：

$$E = \sum_{i=1}^n x_i^2$$

式中，x 表示 PAM-4 符号，n 表示每个组合中的符号数。

在本发明的一个实施例中，所述 PS-PAM-4 信号为具有可变概率分布的信号。

在本发明的一个实施例中，由所述接收端对所述 PS-PAM-4 信号进行信道
5 均衡处理包括：

将所述 PS-PAM-4 信号作为训练好的信道均衡算法的输入信号，得到经过信道均衡处理后的输出信号，其中训练好的信道均衡算法如下：

$$Y(n) = \sum_{k=-M}^M a_k X(n+k)$$

式中，X(n) 为输入信号，Y(n) 为输出信号，M 为符号个数， a_k 为抽头系数。

10 在本发明的一个实施例中，所述信道均衡算法的训练步骤如下：

获取训练符号，将所述训练符号作为所述信道均衡算法的输入值，求解其输出值与设定的参考值的误差；

使用归一化最小均方算法计算均方误差并调整抽头系数；

再经过迭代训练得到最优权值的抽头系数。

15 并且，本发明还提供一种由接收端辅助编码模块执行概率整形 PAM-4 信号传输方法，包括：

接收来自编码模块的 PS-PAM-4 信号；

将所述 PS-PAM-4 信号进行信道均衡处理，得到处理后的输出信号，其中所述 PS-PAM-4 信号由比特序列划分的初始幅度比特经过分布匹配处理得到的
20 幅度比特与符号比特进行映射获得；

对所述输出信号进行解映射处理，得到解映射处理后的信号；

对所述解映射处理后的信号进行解码处理，获得发射端发送的比特序列。

此外，本发明还提供一种由系统执行概率整形 PAM-4 信号传输方法，所述系统包括编码模块和接收端，方法包括：

5 由编码模块执行以下步骤：

接收来自发射端的比特序列，将所述比特序列划分为符号比特和初始幅度比特；

对所述初始幅度比特进行分布匹配处理，其中分布匹配处理包括通过能级分配获得具有“0”和“1”概率分布的幅度比特；

10 对所述幅度比特和符号比特进行映射处理，获得概率整形的 PS-PAM-4 信号；

将所述 PS-PAM-4 信号发送至接收端，由所述接收端对所述 PS-PAM-4 信号进行信道均衡处理，得到处理后的输出信号，并对所述输出信号进行解映射和解码处理，获得发射端发送的比特序列；

15 由接收端执行以下步骤：

接收来自编码模块的 PS-PAM-4 信号；

将所述 PS-PAM-4 信号进行信道均衡处理，得到处理后的输出信号，其中所述 PS-PAM-4 信号由比特序列划分的初始幅度比特经过分布匹配处理得到的幅度比特与符号比特进行映射获得；

20 对所述输出信号进行解映射处理，得到解映射处理后的信号；

对所述解映射处理后的信号进行解码处理，获得发射端发送的比特序列。

此外，本发明还提供一种编码模块，包括：

序列划分单元，接收来自发射端的比特序列，所述序列划分单元用于将所述比特序列划分为符号比特和初始幅度比特；

5 概率分布匹配单元，所述概率分布匹配单元用于对所述初始幅度比特进行分布匹配处理，其中分布匹配处理包括通过能级分配获得具有“0”和“1”概率分布的幅度比特；

映射单元，所述映射单元用于对所述幅度比特和符号比特进行映射处理，获得概率整形的 PS-PAM-4 信号；

10 发送单元，所述发送单元用于将所述 PS-PAM-4 信号发送至接收端，由所述接收端对所述 PS-PAM-4 信号进行信道均衡处理，得到处理后的输出信号，并对所述输出信号进行解映射和解码处理，获得发射端发送的比特序列。

此外，本发明还提供一种接收端，包括：

接收单元，所述接收单元用于接收来自编码模块的 PS-PAM-4 信号；

15 信道均衡单元，所述信道均衡单元用于将所述 PS-PAM-4 信号进行信道均衡处理，得到处理后的输出信号，其中所述 PS-PAM-4 信号由比特序列划分的初始幅度比特经过分布匹配处理得到的幅度比特与符号比特进行映射获得；

解映射单元，所述解映射单元用于对所述输出信号进行解映射处理，得到解映射处理后的信号；

20 解码单元，所述解码单元用于对所述解映射处理后的信号进行解码处理，获得发射端发送的比特序列。

本发明的上述技术方案相比现有技术具有以下优点：

本发明通过对幅度比特的各种组合的能级分配，可以获得具有可变概率分布的 PS-PAM-4 信号，如此能够为任何 n 个符号类型提供多种概率分布，并具有恒定的 PS 编码冗余度，大大增强了系统的灵活性并减少了附加比较器的使用，而且采用信道均衡处理来减轻由于带宽有限而引起的符号间干扰，与
5 传统 PAM-4 信号传输方法相比，其可以将接收器灵敏度提高多达 4.2 dB，通信质量理想。

附图说明

为了使本发明的内容更容易被清楚的理解，下面根据本发明的具体实施例并结合附图，对本发明作进一步详细的说明，其中

10 图 1 是本发明实施例一中概率整形 PAM-4 信号传输方法的原理示意图。

图 2 是本发明实施例一中 DM 实现过程的示意图。

图 3 是图 2 中每种组合的能量示意图。

图 4 是本发明实施例一中基于 3 符号采用 ELA-CAP 方法获得的具有四个不同概率分布 (P1-P4) 的 PS-PAM-4 信号图。

15 图 5 是本发明实施例一中均匀 PAM-4 信号和四个 PS-PAM-4 信号的 GMI 曲线图。

图 6 是本发明实施例一中 FFE 的结构示意图。

图 7 是本发明实施例一中均方误差收敛曲线图。

图 8 是本发明实施例一中用于数据中心内部网络的 25G-Baud IM/DD
20 PAM-4 的点对点实验设置示意图。

图 9 是本发明实施例一中均匀 PAM-4 信号和四个 PS-PAM-4 信号的 BER 曲线图。

图 10 是本发明实施例一中均匀 PAM-4 信号和四个 PS-PAM-4 信号在 -20

具体实施方式

下面结合附图和具体实施例对本发明作进一步说明，以使本领域的技术人员可以更好地理解本发明并能予以实施，但所举实施例不作为对本发明的限定。

5 首先本发明对下文需要出现的英文标记做出如下释义：

ELA-CAP：能级分配的剪切和粘贴；DM：分布匹配器；PS：概率整形；
PAM：脉冲幅度调制；CCDM：算术编码的恒定成分分布匹配；FFE：前馈均衡器；PRBS：伪随机二进制序列；WDM：波分复用；AWG：任意波形发生器；EDFA：
10 光纤放大器；VOA：可变光衰减器；SSMF：单模光纤；BTB：背靠背；MZM：
单驱动调制器。

实施例一

下面对本发明实施例一提供的一种由编码模块执行概率整形 PAM-4 信号传输方法进行详细的阐述。

15 请参阅图 1 所示，本实施例一种由编码模块执行概率整形 PAM-4 信号传输方法，包括以下步骤：

S100：接收来自发射端的比特序列，将比特序列划分为符号比特和初始幅度比特。

S200：对初始幅度比特进行分布匹配处理，通过能级分配获得具有“0”和“1”概率分布的幅度比特。

20 示例地，通过能级分配获得具有“0”和“1”概率分布的幅度比特包括以下步骤：S210：对初始幅度比特进行 PAM-4 符号映射并对其进行排列组合，计算每个组合的能量，能量计算公式为 $E = \sum_{i=1}^n x_i^2$ ，式中，x 表示 PAM-4 符号，n 表示每个组合中的符号数；S220：根据每个组合的能量定义不同的能级，并计算各能级概率。S230：根据不同能级的概率计算概率分布中“0”和“1”

的概率；S240：将高能级的比特翻转为低能级的比特，获得具有“0”和“1”概率分布的幅度比特。

S300：对幅度比特和符号比特进行映射处理，获得概率整形的 PS-PAM-4 信号，其中 PS-PAM-4 信号为具有可变概率分布的信号。

5 S400：将 PS-PAM-4 信号发送至接收端，由接收端对 PS-PAM-4 信号进行信道均衡处理，得到处理后的输出信号，并对输出信号进行解映射和解码处理，获得发射端发送的比特序列。

示例地，由接收端对 PS-PAM-4 信号进行信道均衡处理包括将 PS-PAM-4 信号作为训练好的信道均衡算法的输入信号，得到经过信道均衡处理后的输出信号，其中训练好的信道均衡算法如下：

$$Y(n) = \sum_{k=-M}^M a_k X(n+k)$$

式中，X(n)为输入信号，Y(n)为输出信号，M为符号个数， a_k 为抽头系数。

示例地，信道均衡算法的训练内容包括：获取训练符号，将训练符号作为信道均衡算法的输入值，求解其输出值与设定的参考值的误差；使用归一化最小均方算法计算均方误差并调整抽头系数；再经过迭代训练得到最优权值的抽头系数。

为了更加详细的阐述 ELA-CAP 方法实现 DM 的内容，请继续参阅图 1 所示，首先将均匀的比特序列 u 分为符号比特和幅度比特。为了实现双边 MB 分配，不允许符号比特进入 DM 以保持其均匀分布。在进行幅度比特和符号比特多路复用、符号映射、信道传输和符号解映射之后，使用在发射端生成的标签位来实现 DM 逆运算。对于标签位，“0”表示反转操作，“1”表示不执行任何操作。由于每 n 个符号增加 1 个比特，则 DM 的码率可表示为：

$$R_{DM} = \frac{mn}{mn+1}$$

式中，m 表示每个 PAM 符号的幅度位数。

以 3 符号编码为例进行举例说明。请参阅图 2 所示，使用格雷码进行 PAM-4 符号映射。对于符号比特，“0”和“1”分别表示“-”和“+”。对于初始幅度比特，“0”和“1”分别对应于“3”和“1”。一个 PAM-4 符号由一个符号比特和一个初始幅度比特组成，即 3 个 PAM-4 符号具有 3 个初始幅度比特。其中 3 个初始幅度比特具有 2^3 种不同的排列组合，如图 2 的第一行所示。每个组合的能量计算方式如下：

$$E = \sum_{i=1}^n x_i^2$$

式中，x 表示 PAM-4 符号，n 表示每个组合中的符号数。例如，“000”表示幅度为“3”的 3 符号序列，其能量为 $3^2+3^2+3^2=27$ 。图 4 展示了每种组合的能量。

均匀的 3 符号组合具有 4 个能级，即 E1、E2、E3 和 E4，根据图 2 可以计算其概率分别为 1/8、3/8、3/8 和 1/8，如图 2 中的第一行所示，其中 $E1 > E2 > E3 > E4$ 。

由于输入比特是均匀的，所以可以根据不同能级的不同概率计算 P1-P4 分布中的“0”和“1”的概率，计算公式如下：

$$\begin{cases} P(0) = P(E1) \times 1 + P(E2) \times 2/3 + P(E3) \times 1/3 + P(E4) \times 0 \\ P(1) = 1 - P(0) \end{cases}$$

从上述公式中可以看出，降低高能量等级的概率可以降低传输序列的能量，实现方式也极为简单，只需将高能级的比特转换为低能级的比特。如此通过能级分配实现了如图 2 所示的四种概率分布（P1-P4）。当然还可以适用于 n (n>3) 个符号，且可以使用更低的冗余度实现更多的概率分布。

图 4 显示了基于 3 符号的 ELA-CAP 方法获得的具有四个不同概率分布

(P1-P4) 的 PS-PAM-4 信号。经过 AWGN 通道具有上述 P1-P4 分布, 均匀分布的 PAM-4 信号的 GMI 曲线和基于 CCDD 的 PS 分布的 PAM-4 信号的 GMI 曲线如图 5 所示, 其中 PS 分布具有相同的冗余度 ($R_{DM}=3/4$)。如图 5 所示, 以均匀分布和基于 CCDD 的 PS 分布的交点作为参考 ($GMI=1.682$ bit/symbol), P1 和 P4 分布分别可以实现 1.15-dB 和 0.7-dB 的整形增益。

同时, 由于传输装置的带宽限制, 接收信号 y_k 可以写为:

$$y_k = x_k A_g(0) + \sum_{n=1}^p x_{k-n} A_g(n\tau T) + \sum_{n=1}^p x_{k+n} A_g(-n\tau T) + n(k\tau T)$$

式中, y_k 表示第 k 个接收信号, x_k 表示第 k 个发送信号, A_g 是由信道脉冲响应决定的模糊函数, τ 代表 FTN 传输的压缩因子, T 为采样时间间隔, p 为产生 ISI 的未来符号与过去符号的个数。

因此, 在信道均衡器的设计中应同时考虑 pre-cursor ISI 和 post-cursor ISI。

本实施例采用用于信道均衡的 T 符号间隔的 FFE, 用以消除 pre-cursor ISI 和 post-cursor ISI, 其结构图如图 6 所示, 信道均衡算法的数学表达式如下:

$$Y(n) = \sum_{k=-M}^M a_k X(n+k) \quad (3-1)$$

其中, $X(n)$ 为输入信号, $Y(n)$ 为输出信号, M 为分别引起 pre-cursor ISI 和 post-cursor ISI 的符号个数, a_k 为抽头系数。在训练实验中有 32768 个符号, 1500 个符号用于训练, 其余用于测试。首先, 训练符号经过 FFE 之后, 其输出值与设定的参考信号作差来获取误差, 然后使用归一化最小均方算法计算均方误差并调整抽头系数, 再经过迭代训练得到最优权值。最后, 测试信号经过具有最优权值的 FFE 之后得到输出信号。其中均方误差收敛曲线如图 7 所示。从图中可以看到, 仅 1 次迭代即可达到收敛。

上述通过对幅度比特的各种组合的能级分配,可以获得具有可变概率分布的 PS-PAM-4 信号,如此能够为任何 n 个符号类型提供多种概率分布,并具有恒定的 PS 编码冗余度,大大增强了系统的灵活性并减少了附加比较器的使用,而且采用信道均衡处理来减轻由于带宽有限而引起的符号间干扰,与传统 PAM-4 信号传输方法相比,其可以将接收器灵敏度提高多达 4.2 dB,通信质量理想。

为了进一步验证本实施例的有益效果,图 8 展示了用于数据中心内部网络的 25G-Baud IM/DD PAM-4 的点对点实验设置。在发射端,首先将 PRBS 发射到 PS 编码器中,并通过位到符号映射获得概率整形的 PS-PAM-4 信号。然后对符号序列进行采样并应用滚降系数为 0.4 的根升余弦有限脉冲响应滤波器进行脉冲整形以减轻信号发射端带宽受限导致的性能下降。经过滤波和 S21 补偿的数据被加载到 AWG 中。同时,在发射端添加一个 PN 序列以进行信号同步。之后,通过 MZM 将来自 AWG 的 PS-PAM-4 电信号调制为 1550.112 nm 的连续波激光器。调制后的 PS-PAM-4 光信号的输出功率约为 5.7 dBm。在经过 2km 的 SSMF 传输后,使用 VOA 和 EDFA 控制 BER 测量的噪声水平。另一个 VOA 用于控制进入 10-GHz 光电探测器的光信号功率。接收到的电信号由 RTO 采样后由同步算法处理。然后,离散数字信号通过匹配的 RRC FIR 滤波器后重新采样为 1sps。接着,利用信道均衡算法恢复 PS-PAM-4 信号。最后,实现解映射和 PS 解码操作,并计算 BER。

图 9 显示了均匀 PAM-4 信号和四个 PS-PAM-4 信号的 BER 曲线。实验中传输了 25G-Baud PAM-4 信号,并且均匀信号和 PS 信号 (P1-P4) 的信息熵分别为 2、1.9486、1.9176、1.8741 和 1.812 bit/symbol。因此,传输比特率分别为 50、48.7149、47.9390、46.7853 和 45.3132 bit/s。从图 8 可以明显看出,与 BTB 情况相比,2 km SSMF 传输造成的损失可忽略不计,如实线和虚线所示。在硬判决前向纠错 (HD-FEC) 阈值 3.8×10^{-3} 时,un-PAM-4、P1-PAM-4、

P2-PAM-4、P3-PAM-4 和 P4-PAM-4 信号的接收光功率分别为-20 dBm、-21.2 dBm、-22 dBm、-22.6 dBm 和-24.2 dBm。因此，与均匀 PAM-4 信号相比，具有 P1-P4 概率分布的 PS-PAM-4 信号可以分别将接收器的灵敏度提高 1.2 dB、2 dB、2.6 dB 和 4.2 dB。两者在-20 dBm 时经过 FFE 的眼图如图 10 所示。假如没有 FFE，严重的 ISI 效应将导致眼睛闭合。从图中可以看出，通过降低高振幅信号的概率，可以扩大眼睛的睁开程度，从而增加附加噪声引起误差的余量，例如概率分布为 P4 的 PS-PAM-4 信号具有更大的余量。

本发明一种概率整形 PAM-4 信号传输方法中主要有三个执行主体，三个执行主体分别是发射端、编码模块和接收端，其中发射端的执行步骤较为简单，其只是作为发射信号的主体，因此本发明在这里不对发射端这一执行主体做较为详细的阐述。

下面本发明对编码模块、接收端以及由编码模块和接收端构成的系统分别作为执行主体的具体内容进行阐述，其中由编码模块作为执行主体的具体内容已经在上文做出了详细的阐述，本发明在这里不做赘述。

15 实施例二

本实施例提供一种由接收端辅助编码模块执行概率整形 PAM-4 信号传输方法，包括：

接收来自编码模块的 PS-PAM-4 信号；

将 PS-PAM-4 信号进行信道均衡处理，得到处理后的输出信号，其中 PS-PAM-4 信号由比特序列划分的初始幅度比特经过分布匹配处理得到的幅度比特与符号比特进行映射获得；

对输出信号进行解映射处理，得到解映射处理后的信号；

对解映射处理后的信号进行解码处理 获得发射端发送的比特序列

其具体内容已经在实施例一中做出了详尽的阐述，本发明在这里不做赘述。

实施例三

本实施例提供了一种由系统执行概率整形 PAM-4 信号传输方法，系统包
5 括编码模块和接收端，方法包括：

由编码模块执行以下步骤：

接收来自发射端的比特序列，将比特序列划分为符号比特和初始幅度比特；

对初始幅度比特进行分布匹配处理，其中分布匹配处理包括通过能级分
10 配获得具有“0”和“1”概率分布的幅度比特；

对幅度比特和符号比特进行映射处理，获得概率整形的 PS-PAM-4 信号；

将 PS-PAM-4 信号发送至接收端，由接收端对 PS-PAM-4 信号进行信道均衡处理，得到处理后的输出信号，并对输出信号进行解映射和解码处理，获得发射端发送的比特序列；

15 由接收端执行以下步骤：

接收来自编码模块的 PS-PAM-4 信号；

将 PS-PAM-4 信号进行信道均衡处理，得到处理后的输出信号，其中 PS-PAM-4 信号由比特序列划分的初始幅度比特经过分布匹配处理得到的幅度比特与符号比特进行映射获得；

20 对输出信号进行解映射处理，得到解映射处理后的信号；

对解映射处理后的信号进行解码处理，获得发射端发送的比特序列。

其具体内容已经在实施例一中做出了详尽的阐述，本发明在这里不做赘述。

下面对本发明提供的一种概率整形 PAM-4 信号传输装置进行详细的阐述。

实施例四

5 本实施例提供了一种编码模块，编码模块包括：

序列划分单元，接收来自发射端的比特序列，序列划分单元用于将比特序列划分为符号比特和初始幅度比特；

概率分布匹配单元，概率分布匹配单元用于对初始幅度比特进行分布匹配处理，其中分布匹配处理包括通过能级分配获得具有“0”和“1”概率分布的幅度比特；
10

映射单元，映射单元用于对所述幅度比特和符号比特进行映射处理，获得概率整形的 PS-PAM-4 信号；

发送单元，发送单元用于将所述 PS-PAM-4 信号发送至接收端，由所述接收端对所述 PS-PAM-4 信号进行信道均衡处理，得到处理后的输出信号，并对
15 所述输出信号进行解映射和解码处理，获得发射端发送的比特序列。

其具体内容已经在实施例一中做出了详尽的阐述，本发明在这里不做赘述。

实施例五

本实施例提供了一种接收端，接收端包括：

20 接收单元，接收单元用于接收来自编码模块的 PS-PAM-4 信号；

信道均衡单元，信道均衡单元用于将 PS-PAM-4 信号进行信道均衡处理，

得到处理后的输出信号，其中 PS-PAM-4 信号由比特序列划分的初始幅度比特经过分布匹配处理得到的幅度比特与符号比特进行映射获得；

解映射单元，解映射单元用于对所述输出信号进行解映射处理，得到解映射处理后的信号；

- 5 解码单元，解码单元用于对解映射处理后的信号进行解码处理，获得发射端发送的比特序列。

其具体内容已经在实施例一中做出了详尽的阐述，本发明在这里不做赘述。

- 10 本领域内的技术人员应明白，本申请的实施例可提供为方法、系统、或计算机程序产品。因此，本申请可采用完全硬件实施例、完全软件实施例、或结合软件和硬件方面的实施例的形式。而且，本申请可采用在一个或多个其中包含有计算机可用程序代码的计算机可用存储介质（包括但不限于磁盘存储器、CD-ROM、光学存储器等）上实施的计算机程序产品的形式。

- 15 本申请是参照根据本申请实施例的方法、设备（系统）、和计算机程序产品的流程图和 / 或方框图来描述的。应理解可由计算机程序指令实现流程图和 / 或方框图中的每一流程和 / 或方框、以及流程图和 / 或方框图中的流程和 / 或方框的结合。可提供这些计算机程序指令到通用计算机、专用计算机、嵌入式处理机或其他可编程数据处理设备的处理器以产生一个机器，使得通过计算机或其他可编程数据处理设备的处理器执行的指令产生用于实
20 现在流程图一个流程或多个流程和 / 或方框图一个方框或多个方框中指定的功能的装置。

这些计算机程序指令也可存储在能引导计算机或其他可编程数据处理设备以特定方式工作的计算机可读存储器中，使得存储在该计算机可读存储器中的指令产生包括指令装置的制造品，该指令装置实现在流程图一个流程

或多个流程和 / 或方框图一个方框或多个方框中指定的功能。

这些计算机程序指令也可装载到计算机或其他可编程数据处理设备上，使得在计算机或其他可编程设备上执行一系列操作步骤以产生计算机实现的处理，从而在计算机或其他可编程设备上执行的指令提供用于实现在流程图一个流程或多个流程和 / 或方框图一个方框或多个方框中指定的功能的步骤。

显然，上述实施例仅仅是为清楚地说明所作的举例，并非对实施方式的限定。对于所属领域的普通技术人员来说，在上述说明的基础上还可以做出其它不同形式变化或变动。这里无需也无法对所有的实施方式予以穷举。而由此所引申出的显而易见的变化或变动仍处于本发明创造的保护范围之内。

权 利 要 求 书

1. 一种由编码模块执行概率整形 PAM-4 信号传输方法，其特征在于，
包括：

接收来自发射端的比特序列，将所述比特序列划分为符号比特和初始幅
5 度比特；

对所述初始幅度比特进行分布匹配处理，通过能级分配获得具有“0”和
“1”概率分布的幅度比特；

对所述幅度比特和符号比特进行映射处理，获得概率整形的 PS-PAM-4 信
号；

10 将所述 PS-PAM-4 信号发送至接收端，由所述接收端对所述 PS-PAM-4 信
号进行信道均衡处理，得到处理后的输出信号，并对所述输出信号进行解映
射和解码处理，获得发射端发送的比特序列。

2. 根据权利要求 1 所述的由编码模块执行概率整形 PAM-4 信号传输方
法，其特征在于：所述通过能级分配获得具有“0”和“1”概率分布的幅度比
15 特包括：

对所述初始幅度比特进行 PAM-4 符号映射并对其进行排列组合，计算每
个组合的能量；

根据每个组合的能量定义不同的能级，并计算其能级概率；

根据不同能级的概率计算概率分布中“0”和“1”的概率；

20 将高能级的比特翻转为低能级的比特，获得具有“0”和“1”概率分布
的幅度比特。

3. 根据权利要求2所述的由编码模块执行概率整形 PAM-4 信号传输方法，其特征在于：每个组合的能量计算公式如下：

$$E = \sum_{i=1}^n x_i^2$$

式中，x 表示 PAM-4 符号，n 表示每个组合中的符号数。

5 4. 根据权利要求1所述的由编码模块执行概率整形 PAM-4 信号传输方法，其特征在于：所述 PS-PAM-4 信号为具有可变概率分布的信号。

5. 根据权利要求1所述的由编码模块执行概率整形 PAM-4 信号传输方法，其特征在于：由所述接收端对所述 PS-PAM-4 信号进行信道均衡处理包括：

10 将所述 PS-PAM-4 信号作为训练好的信道均衡算法的输入信号，得到经过信道均衡处理后的输出信号，其中训练好的信道均衡算法如下：

$$Y(n) = \sum_{k=-M}^M a_k X(n+k)$$

式中，X(n) 为输入信号，Y(n) 为输出信号，M 为符号个数， a_k 为抽头系数。

6. 根据权利要求5所述的由编码模块执行概率整形 PAM-4 信号传输方法，其特征在于：所述信道均衡算法的训练步骤如下：

15 获取训练符号，将所述训练符号作为所述信道均衡算法的输入值，求解其输出值与设定的参考值的误差；

使用归一化最小均方算法计算均方误差并调整抽头系数；

再经过迭代训练得到最优权值的抽头系数。

20 7. 一种由接收端辅助编码模块执行概率整形 PAM-4 信号传输方法，其特征在于，包括：

接收来自编码模块的 PS-PAM-4 信号；

将所述 PS-PAM-4 信号进行信道均衡处理，得到处理后的输出信号，其中所述 PS-PAM-4 信号由比特序列划分的初始幅度比特经过分布匹配处理得到的幅度比特与符号比特进行映射获得；

5 对所述输出信号进行解映射处理，得到解映射处理后的信号；

对所述解映射处理后的信号进行解码处理，获得发射端发送的比特序列。

8. 一种由系统执行概率整形 PAM-4 信号传输方法，其特征在于，所述系统包括编码模块和接收端，方法包括：

由编码模块执行以下步骤：

10 接收来自发射端的比特序列，将所述比特序列划分为符号比特和初始幅度比特；

对所述初始幅度比特进行分布匹配处理，其中分布匹配处理包括通过能级分配获得具有“0”和“1”概率分布的幅度比特；

15 对所述幅度比特和符号比特进行映射处理，获得概率整形的 PS-PAM-4 信号；

将所述 PS-PAM-4 信号发送至接收端，由所述接收端对所述 PS-PAM-4 信号进行信道均衡处理，得到处理后的输出信号，并对所述输出信号进行解映射和解码处理，获得发射端发送的比特序列；

由接收端执行以下步骤：

20 接收来自编码模块的 PS-PAM-4 信号；

将所述 PS-PAM-4 信号进行信道均衡处理，得到处理后的输出信号，其中

所述 PS-PAM-4 信号由比特序列划分的初始幅度比特经过分布匹配处理得到的幅度比特与符号比特进行映射获得；

对所述输出信号进行解映射处理，得到解映射处理后的信号；

对所述解映射处理后的信号进行解码处理，获得发射端发送的比特序列。

5 9. 一种编码模块，其特征在于，包括：

序列划分单元，接收来自发射端的比特序列，所述序列划分单元用于将所述比特序列划分为符号比特和初始幅度比特；

概率分布匹配单元，所述概率分布匹配单元用于对所述初始幅度比特进行分布匹配处理，其中分布匹配处理包括通过能级分配获得具有“0”和“1”
10 概率分布的幅度比特；

映射单元，所述映射单元用于对所述幅度比特和符号比特进行映射处理，获得概率整形的 PS-PAM-4 信号；

发送单元，所述发送单元用于将所述 PS-PAM-4 信号发送至接收端，由所述接收端对所述 PS-PAM-4 信号进行信道均衡处理，得到处理后的输出信号，
15 并对所述输出信号进行解映射和解码处理，获得发射端发送的比特序列。

10. 一种接收端，其特征在于，包括：

接收单元，所述接收单元用于接收来自编码模块的 PS-PAM-4 信号；

信道均衡单元，所述信道均衡单元用于将所述 PS-PAM-4 信号进行信道均衡处理，得到处理后的输出信号，其中所述 PS-PAM-4 信号由比特序列划分的
20 初始幅度比特经过分布匹配处理得到的幅度比特与符号比特进行映射获得；

解映射单元，所述解映射单元用于对所述输出信号进行解映射处理，得到

解码单元，所述解码单元用于对所述解映射处理后的信号进行解码处理，获得发射端发送的比特序列。

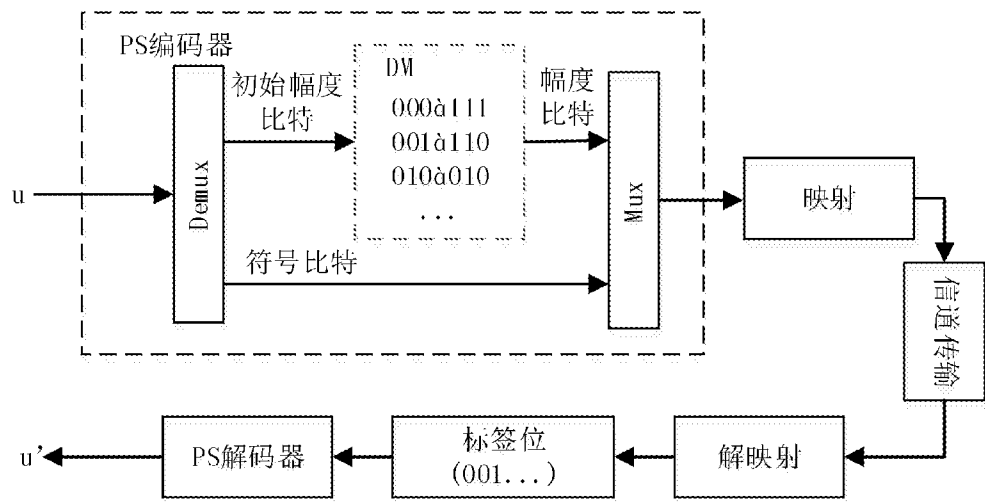


图 1

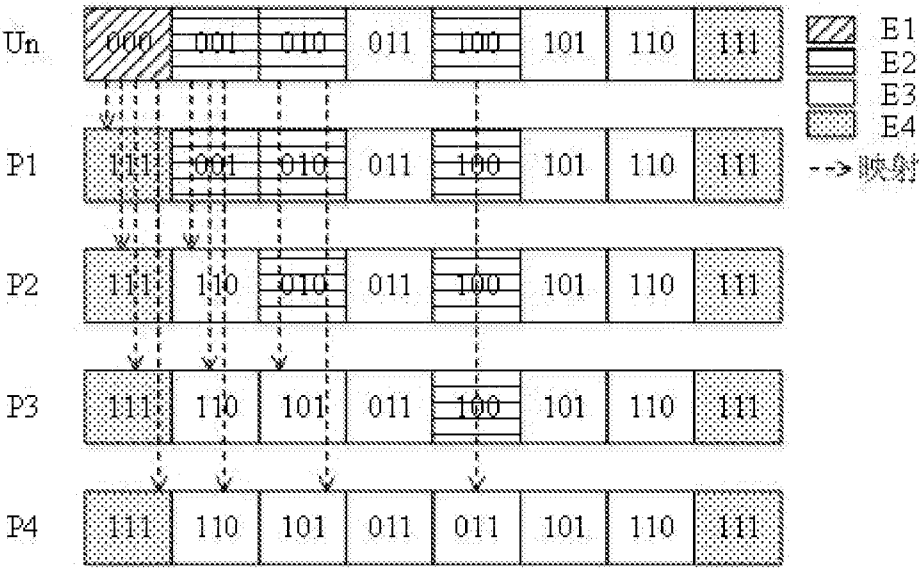


图 2

组合	000	001	010	011	100	101	110	111
能量	27	19	19	11	19	11	11	3

图 3

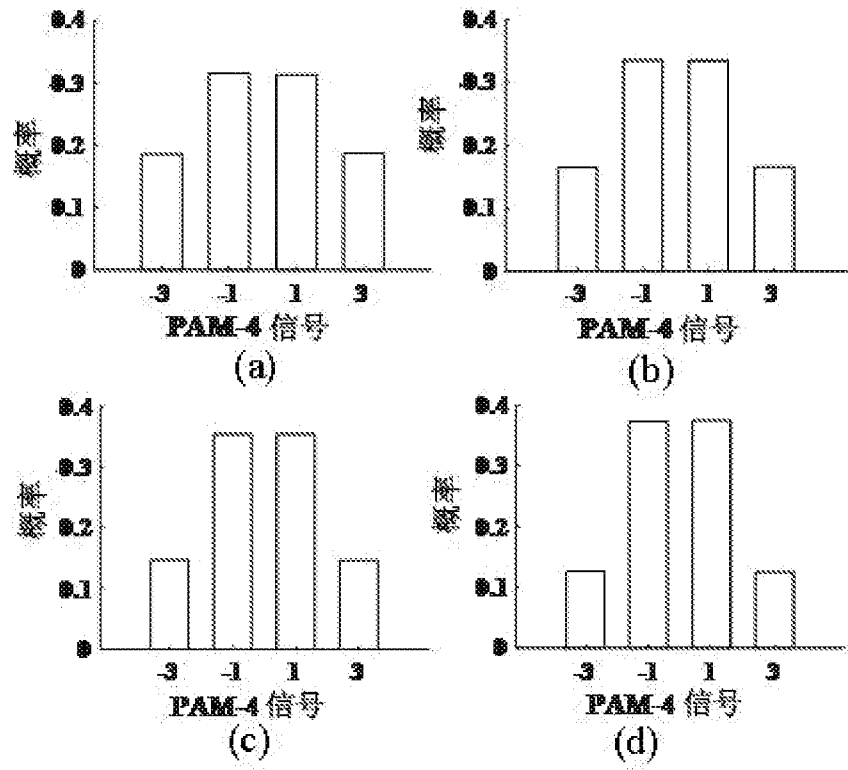


图 4

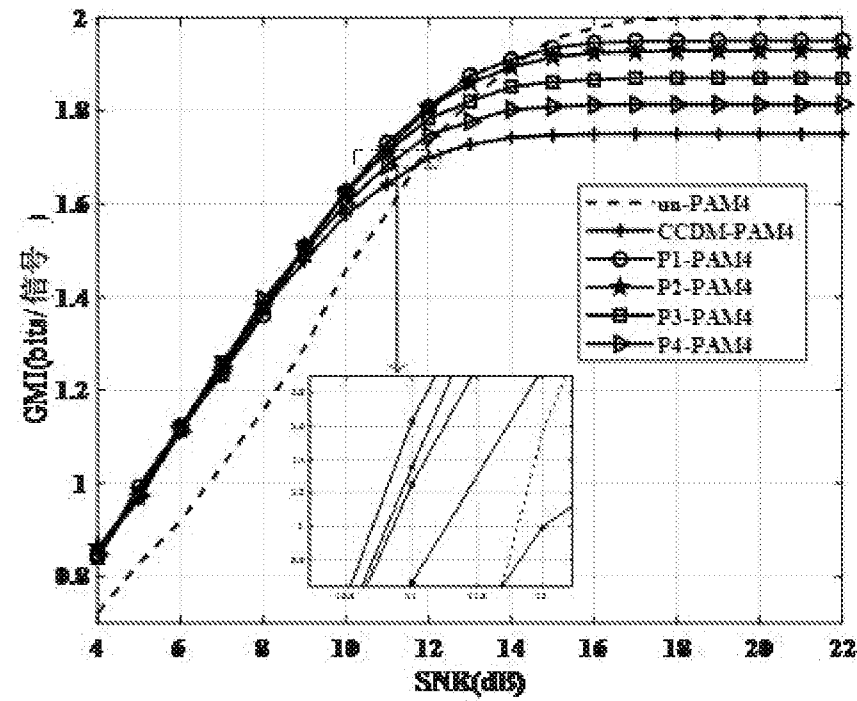


图 5

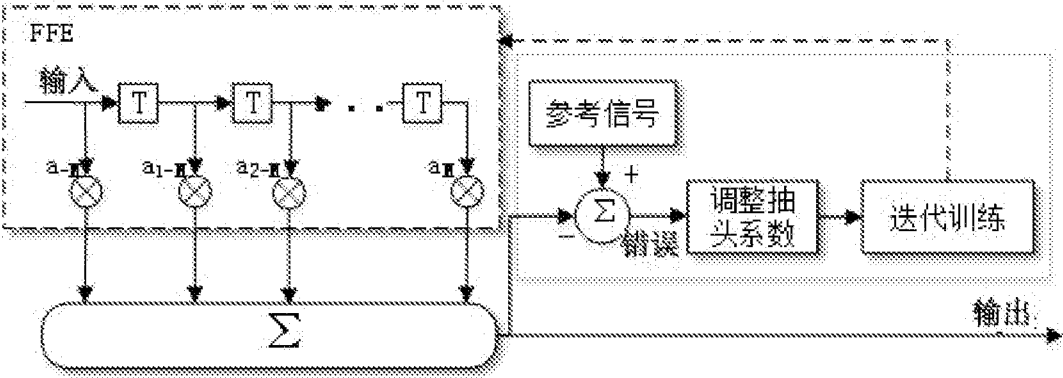


图 6

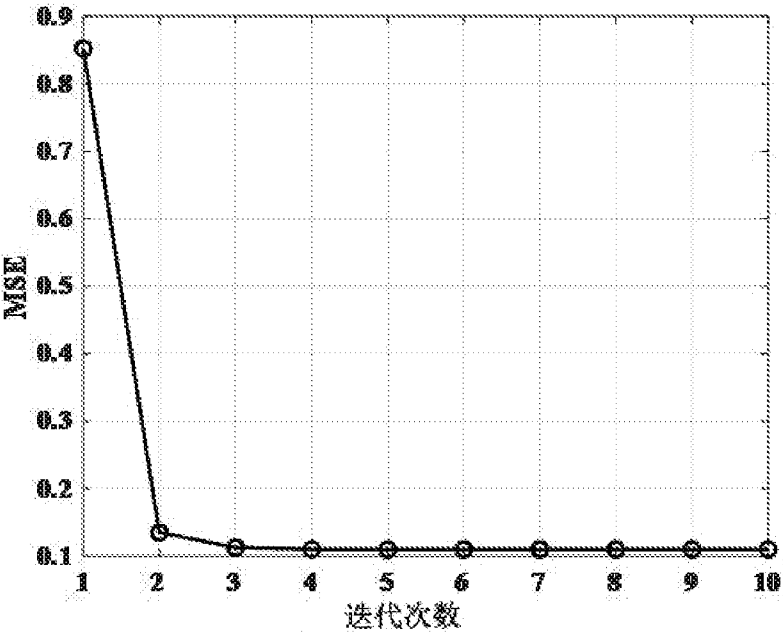


图 7

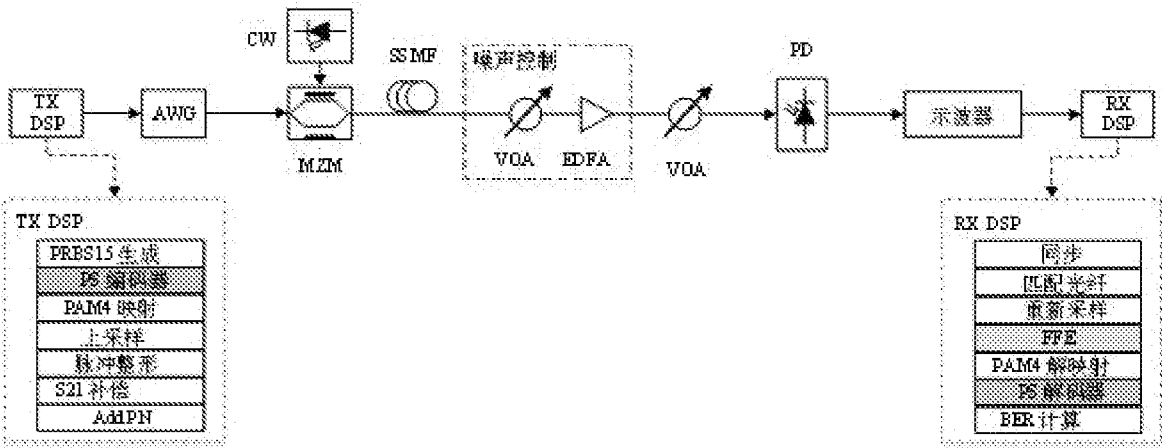


图 8

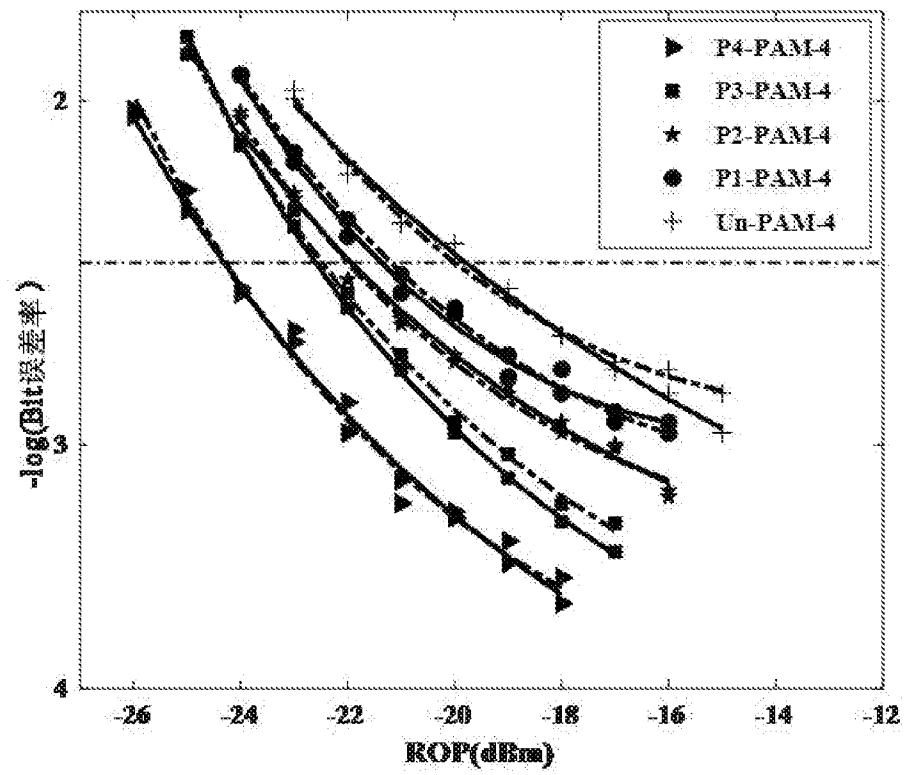


图 9

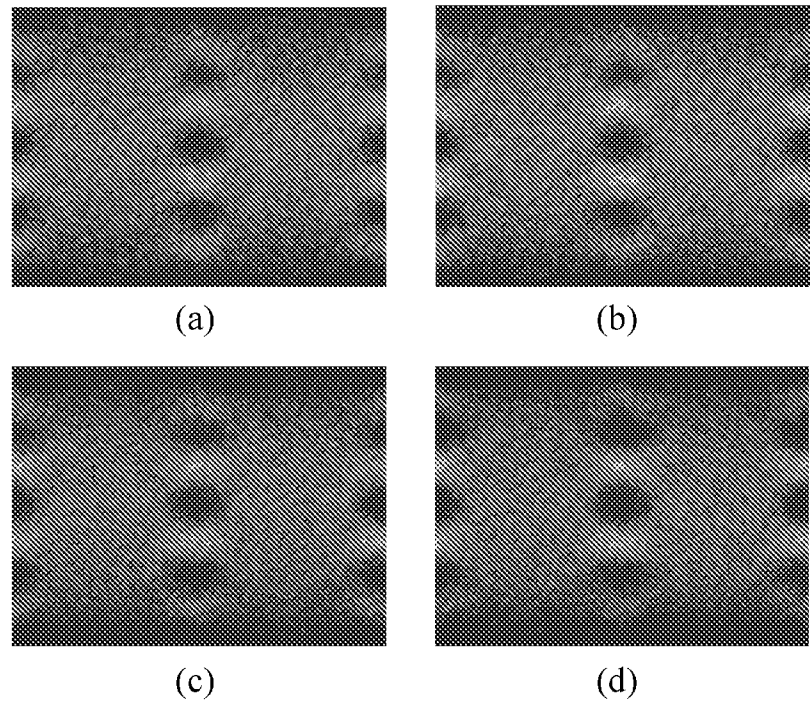


图 10

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2021/106996

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

H04L 25/03(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

H04L, H04B

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

WPI, EPODOC, CNKI, CNPAT: 整形, 分布匹配, DM, 能量, 比特, 概率, 幅度, 脉冲幅度调制, PAM, 符号比特, 能级, 能量, energy, pulse, shap+, amplitude, probability, bit, sign

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	CN 111049586 A (NANJING UNIVERSITY OF INFORMATION SCIENCE & TECHNOLOGY) 21 April 2020 (2020-04-21) description, paragraphs [0039]-[0061]	1-10
Y	US 10742472 B1 (QUALCOMM INC.) 11 August 2020 (2020-08-11) description, page 17, lines 37 – page 29, line 47	1-10
A	CN 111181652 A (HUAQIAO UNIVERSITY) 19 May 2020 (2020-05-19) entire document	1-10
A	US 10523480 B1 (NXP BV.) 31 December 2019 (2019-12-31) entire document	1-10
A	US 2020280468 A1 (NOKIA SOLUTIONS & NETWORKS OY) 03 September 2020 (2020-09-03) entire document	1-10



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date

“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

“&” document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

06 January 2022

Date of mailing of the international search report

26 January 2022

Name and mailing address of the ISA/CN

China National Intellectual Property Administration (ISA/
CN)
No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao, Haidian District, Beijing
100088, China

Facsimile No. (86-10)62019451

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2021/106996

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
CN	111049586	A	21 April 2020	None			
US	10742472	B1	11 August 2020	TW	202112108	A	16 March 2021
				WO	2021045854	A1	11 March 2021
CN	111181652	A	19 May 2020	None			
US	10523480	B1	31 December 2019	None			
US	2020280468	A1	03 September 2020	None			

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2021/106996

A. 主题的分类

H04L 25/03 (2006.01) i

按照国际专利分类 (IPC) 或者同时按照国家分类和 IPC 两种分类

B. 检索领域

检索的最低限度文献 (标明分类系统和分类号)

H04L, H04B

包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献

在国际检索时查阅的电子数据库 (数据库的名称, 和使用的检索词 (如使用))

WPI, EPDOC, CNKI, CNPAT: 整形, 分布匹配, DM, 能量, 比特, 概率, 幅度, 脉冲幅度调制, PAM, 符号比特, 能级, 能量, energy, pulse, shap+, amplitude, probability, bit, sign

C. 相关文件

类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求
Y	CN 111049586 A (南京信息工程大学) 2020年4月21日 (2020 - 04 - 21) 说明书第[0039]-[0061]段	1-10
Y	US 10742472 B1 (QUALCOMM INCORPORATED) 2020年8月11日 (2020 - 08 - 11) 说明书第17页第37行-第29第47行	1-10
A	CN 111181652 A (华侨大学) 2020年5月19日 (2020 - 05 - 19) 全文	1-10
A	US 10523480 B1 (NXP BV) 2019年12月31日 (2019 - 12 - 31) 全文	1-10
A	US 2020280468 A1 (NOKIA SOLUTIONS & NETWORKS OY) 2020年9月3日 (2020 - 09 - 03) 全文	1-10

☐ 其余文件在C栏的续页中列出。☒ 见同族专利附件。

* 引用文件的具体类型:

“A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件

“E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利

“L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件 (如具体说明的)

“O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件

“P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件

“T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件

“X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性

“Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性

“&” 同族专利的文件

国际检索实际完成的日期

2022年1月6日

国际检索报告邮寄日期

2022年1月26日

ISA/CN的名称和邮寄地址

中国国家知识产权局 (ISA/CN)

中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088

传真号 (86-10)62019451

受权官员

陈红英

电话号码 86-(10)-53961636

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2021/106996

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利	公布日 (年/月/日)
CN	111049586	A	2020年4月21日	无	
US	10742472	B1	2020年8月11日	TW 202112108 A	2021年3月16日
				WO 2021045854 A1	2021年3月11日
CN	111181652	A	2020年5月19日	无	
US	10523480	B1	2019年12月31日	无	
US	2020280468	A1	2020年9月3日	无	