



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 116886192 B

(45) 授权公告日 2025. 11. 11

(21) 申请号 202210808338.4

H04B 10/2575 (2013.01)

(22) 申请日 2022.07.11

H04B 10/50 (2013.01)

H04B 10/516 (2013.01)

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 116886192 A

(56) 对比文件

(43) 申请公布日 2023.10.13

Xiong Wu.Low-complexity absolute-term based nonlinear equalizer with weight sharing for C-band 85-GBaud OOK transmission over a 100-km SSMF.《Optics Letters》.2022,第1-2页.

(73) 专利权人 香港理工大学深圳研究院

地址 518057 广东省深圳市南山区粤海街道高新技术产业园南区粤兴一道18号  
香港理工大学产学研大楼205室

Haiyun Xin.50 Gbps PAM-4 Over Up to 80-km Transmission With C-Band DML Enabled by Post-Equalizer.《IEEE Photonics Technology Letters》.2020,第1-2页.

(72) 发明人 张俊威 吕超

(74) 专利代理机构 深圳市君胜知识产权代理事

务所(普通合伙) 44268

专利代理师 王娅洁 温宏梅

审查员 李晓琳

(51) Int. Cl.

H04B 10/25 (2013.01)

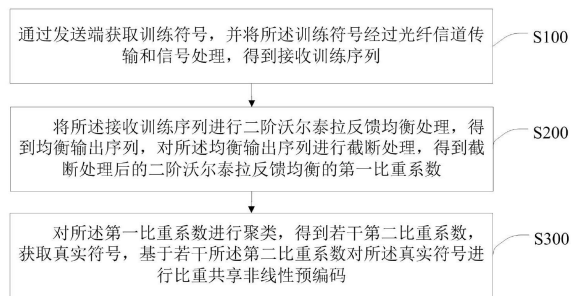
权利要求书2页 说明书12页 附图4页

(54) 发明名称

补偿IMDD光纤系统损伤的比重共享非线性预编码方法

(57) 摘要

本发明公开了补偿IMDD光纤系统损伤的比重共享非线性预编码方法,方法包括:通过发送端获取训练符号,并将训练符号经过光纤信道传输和信号处理,得到接收训练序列;将接收训练序列进行二阶沃尔泰拉反馈均衡处理,得到均衡输出序列,对均衡输出序列进行截断处理,得到截断处理后的二阶沃尔泰拉反馈均衡的第一比重系数;对第一比重系数进行聚类,得到若干第二比重系数,获取真实符号,基于若干第二比重系数对真实符号进行比重共享非线性预编码。本发明实施例通过对截断处理后的二阶沃尔泰拉反馈均衡的比重系数进行聚类,进一步减少比重系数,采用聚类降低比重共享非线性预编码方法的复杂度,进一步降低IMDD光纤传输系统的成本。



1. 一种补偿IMDD光纤系统损伤的比重共享非线性预编码方法,其特征在于,所述方法包括:

通过发送端获取训练符号,并将所述训练符号经过光纤信道传输和信号处理,得到接收训练序列;

将所述接收训练序列进行二阶沃尔泰拉反馈均衡处理,得到均衡输出序列,对所述均衡输出序列进行截断处理,得到截断处理后的二阶沃尔泰拉反馈均衡的第一比重系数;其中,所述第一比重系数用于表征二阶沃尔泰拉反馈均衡的脉冲响应;

对所述第一比重系数进行聚类,得到若干第二比重系数,获取真实符号,基于若干所述第二比重系数对所述真实符号进行比重共享非线性预编码;

所述基于若干所述第二比重系数对所述真实符号进行比重共享非线性预编码,包括:

根据若干所述第二比重系数和聚类处理后的新的输入信号项对发送端发送的真实符号进行比重共享非线性预编码;

所述比重共享非线性预编码的输出为:

$$x(n) = \text{Mod} \left[ a(n) - \sum_{i=0}^{K_2-1} w(i)x'(n, i) \right];$$

其中,Mod(·)是取模 $2M$ 操作,其中 $M$ 为实数PAM符号的调制阶数, $x'(n, i)$ 为 $x(n)$ 的线性项及非线性拍频项进行所述聚类处理后的新的输入信号项, $a(n)$ 为发送端发送的真实符号, $K_2$ 为聚类中心数量, $w_i$ 为第 $i$ 个聚类中心。

2. 根据权利要求1所述的补偿IMDD光纤系统损伤的比重共享非线性预编码方法,其特征在于,所述将所述训练符号经过光纤信道传输和信号处理,得到接收训练序列包括:

将所述训练符号经过光纤信道传输,得到训练光信号;

将所述训练光信号进行光电探测、模数转换、同步处理和降采样处理,得到接收训练序列。

3. 根据权利要求1所述的补偿IMDD光纤系统损伤的比重共享非线性预编码方法,其特征在于,所述将所述接收训练序列进行二阶沃尔泰拉反馈均衡处理,得到均衡输出序列包括:

将所述接收训练序列进行二阶沃尔泰拉反馈均衡处理和二阶沃尔泰拉前馈均衡处理,得到均衡输出序列。

4. 根据权利要求3所述的补偿IMDD光纤系统损伤的比重共享非线性预编码方法,其特征在于,所述均衡输出序列包括前馈均衡输出项和反馈均衡输出项;所述对所述均衡输出序列进行截断处理,得到截断处理后的二阶沃尔泰拉反馈均衡的第一比重系数包括:

将所述反馈均衡输出项中大于预设第一时间间隔的二阶沃尔泰拉非线性项删除,得到截断处理后的二阶沃尔泰拉反馈均衡输出项;

基于递归最小二乘算法,计算所述二阶沃尔泰拉反馈均衡输出项的第一比重系数。

5. 根据权利要求4所述的补偿IMDD光纤系统损伤的比重共享非线性预编码方法,其特征在于,所述对所述均衡输出序列进行截断处理,得到截断处理后的二阶沃尔泰拉反馈均衡的第一比重系数还包括:

将所述前馈均衡输出项中大于预设第二时间间隔的二阶沃尔泰拉非线性项删除,得到

截断处理后的二阶沃尔泰拉前馈均衡输出项；

基于递归最小二乘算法,计算所述二阶沃尔泰拉前馈均衡输出项的第三比重系数。

6.根据权利要求5所述的补偿IMDD光纤系统损伤的比重共享非线性预编码方法,其特征在于,所述计算所述二阶沃尔泰拉前馈均衡输出项的第三比重系数之后包括:

对所述第三比重系数进行聚类,得到若干第四比重系数。

7.根据权利要求6所述的补偿IMDD光纤系统损伤的比重共享非线性预编码方法,其特征在于,所述基于若干所述第二比重系数对所述真实符号进行比重共享非线性预编码之后包括:

将进行比重共享非线性预编码之后序列进行滤波成型、数模转换和电光强度调制,得到光信号;

将所述光信号经过光纤信道传输,并发送至接收端;

通过接收端将接收的光信号进行光电探测、模数转换、信号同步和降采样,得到真实接收信号;

基于若干所述第四比重系数对所述真实接收信号进行比重共享非线性前馈均衡。

8.根据权利要求7所述的补偿IMDD光纤系统损伤的比重共享非线性预编码方法,其特征在于,所述基于若干所述第四比重系数对所述真实接收信号进行比重共享非线性前馈均衡之后包括:

将进行比重共享非线性前馈均衡后的信号进行解码,得到解码符号。

9.一种智能终端,其特征在于,包括有存储器,以及一个或者一个以上的程序,其中一个或者一个以上程序存储于存储器中,且经配置以由一个或者一个以上处理器执行所述一个或者一个以上程序包含用于执行如权利要求1-8中任意一项所述的方法。

10.一种非临时性计算机可读存储介质,其特征在于,当所述存储介质中的指令由电子设备的处理器执行时,使得电子设备能够执行如权利要求1-8中任意一项所述的方法。

## 补偿IMDD光纤系统损伤的比重共享非线性预编码方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及高速光纤通信系统技术领域,尤其涉及的是补偿IMDD光纤系统损伤的比重共享非线性预编码方法。

### 背景技术

[0002] 随着视频流媒体、云计算、数据存储、虚拟现实和增强现实等需要大量带宽的网络服务的普及,数据中心流量的持续增长推动了对高速信号传输的需求。基于强度调制和直接检测(IMDD)的光纤通信系统具有低成本、低功耗和面积小等优点,是目前数据中心互连通信和接入网的一种有效解决方案。

[0003] 然而,工作在C波段的低成本高速双边带IMDD传输系统的传输容量和距离受到光纤色度色散的限制,这是因为光纤色度色散和平方律直接检测相互作用,导致接收到的信号产生严重的频率选择性功率衰落和非线性失真,从而限制了系统的传输容量和带宽。现有技术中已有方法补偿频率选择性功率衰落,但是极高的复杂度阻碍了其在成本敏感的强度调制/直接检测(IMDD)光纤传输系统中的应用。

[0004] 因此,现有技术还有待改进和发展。

### 发明内容

[0005] 本发明要解决的技术问题在于,针对现有技术的上述缺陷,提供一种补偿IMDD光纤系统损伤的比重共享非线性预编码方法,旨在解决现有技术中已有方法补偿频率选择性功率衰落,但是极高的复杂度阻碍了其在成本敏感的强度调制直接检测(IMDD)光纤传输系统中的应用的问题。

[0006] 本发明解决问题所采用的技术方案如下:

[0007] 第一方面,本发明实施例提供一种补偿IMDD光纤系统损伤的比重共享非线性预编码方法,其特征在于,所述方法包括:

[0008] 通过发送端获取训练符号,并将所述训练符号经过光纤信道传输和信号处理,得到接收训练序列;

[0009] 将所述接收训练序列进行二阶沃尔泰拉反馈均衡处理,得到均衡输出序列,对所述均衡输出序列进行截断处理,得到截断处理后的二阶沃尔泰拉反馈均衡的第一比重系数;其中,所述第一比重系数用于表征二阶沃尔泰拉反馈均衡的脉冲响应;

[0010] 对所述第一比重系数进行聚类,得到若干第二比重系数,获取真实符号,基于若干所述第二比重系数对所述真实符号进行比重共享非线性预编码。

[0011] 在一种实现方式中,所述将所述训练符号经过光纤信道传输和信号处理,得到接收训练序列包括:

[0012] 将所述训练符号经过光纤信道传输,得到训练光信号;

[0013] 将所述训练光信号进行光电探测、模数转换、同步处理和降采样处理,得到接收训练序列。

[0014] 在一种实现方式中,所述将所述接收训练序列进行二阶沃尔泰拉反馈均衡处理,得到均衡输出序列包括:

[0015] 将所述接收训练序列进行二阶沃尔泰拉反馈均衡处理和二阶沃尔泰拉前馈均衡处理,得到均衡输出序列。

[0016] 在一种实现方式中,所述均衡输出序列包括前馈均衡输出项和反馈均衡输出项;所述对所述均衡输出序列进行截断处理,得到截断处理后的二阶沃尔泰拉反馈均衡的第一比重系数包括:

[0017] 将所述反馈均衡输出项中大于预设第一时间间隔的二阶沃尔泰拉非线性项删除,得到截断处理后的二阶沃尔泰拉反馈均衡输出项;

[0018] 基于递归最小二乘算法,计算所述二阶沃尔泰拉反馈均衡输出项的第一比重系数。

[0019] 在一种实现方式中,所述对所述均衡输出序列进行截断处理,得到截断处理后的二阶沃尔泰拉反馈均衡的第一比重系数还包括:

[0020] 将所述前馈均衡输出项中大于预设第二时间间隔的二阶沃尔泰拉非线性项删除,得到截断处理后的二阶沃尔泰拉前馈均衡输出项;

[0021] 基于递归最小二乘算法,计算所述二阶沃尔泰拉前馈均衡输出项的第三比重系数。

[0022] 在一种实现方式中,所述计算所述二阶沃尔泰拉前馈均衡输出项的第三比重系数之后包括:

[0023] 对所述第三比重系数进行聚类,得到若干第四比重系数。

[0024] 在一种实现方式中,所述基于若干所述第二比重系数对所述真实符号进行比重共享非线性预编码之后包括:

[0025] 将进行比重共享非线性预编码之后序列进行滤波成型、数模转换和电光强度调制,得到光信号;

[0026] 将所述光信号经过光纤信道传输,并发送至接收端;

[0027] 通过接收端将接收的光信号进行光电探测、模数转换、信号同步和降采样,得到真实接收信号;

[0028] 基于若干所述第四比重系数对所述真实接收信号进行比重共享非线性前馈均衡。

[0029] 在一种实现方式中,所述基于若干所述第四比重系数对所述真实接收信号进行比重共享非线性前馈均衡之后包括:

[0030] 将进行比重共享非线性前馈均衡后的信号进行解码,得到解码符号。

[0031] 第二方面,本发明实施例还提供一种补偿IMDD光纤系统损伤的比重共享非线性预编码装置,其中,所述装置包括:

[0032] 训练序列处理模块,用于通过发送端获取训练符号,并将所述训练符号经过光纤信道传输和信号处理,得到接收训练序列;

[0033] 截断处理模块,用于将所述接收训练序列进行二阶沃尔泰拉反馈均衡处理,得到均衡输出序列,对所述均衡输出序列进行截断处理,得到截断处理后的二阶沃尔泰拉反馈均衡的第一比重系数;其中,所述第一比重系数用于表征二阶沃尔泰拉反馈均衡的脉冲响应;

[0034] 聚类模块,用于对所述第一比重系数进行聚类,得到若干第二比重系数,获取真实符号,基于若干所述第二比重系数对所述真实符号进行比重共享非线性预编码。

[0035] 第三方面,本发明实施例还提供一种智能终端,包括有存储器,以及一个或者一个以上的程序,其中一个或者一个以上程序存储于存储器中,且经配置以由一个或者一个以上处理器执行所述一个或者一个以上程序包含用于执行如上述任意一项所述的补偿IMDD光纤系统损伤的比重共享非线性预编码方法。

[0036] 第四方面,本发明实施例还提供一种非临时性计算机可读存储介质,当所述存储介质中的指令由电子设备的处理器执行时,使得电子设备能够执行如上述中任意一项所述的补偿IMDD光纤系统损伤的比重共享非线性预编码方法。

[0037] 本发明的有益效果:本发明实施例首先通过发送端获取训练符号,并将所述训练符号经过光纤信道传输和信号处理,得到接收训练序列;然后将所述接收训练序列进行二阶沃尔泰拉反馈均衡处理,得到均衡输出序列,对所述均衡输出序列进行截断处理,得到截断处理后的二阶沃尔泰拉反馈均衡的第一比重系数;其中,所述第一比重系数用于表征二阶沃尔泰拉反馈均衡的脉冲响应;最后对所述第一比重系数进行聚类,得到若干第二比重系数,获取真实符号,基于若干所述第二比重系数对所述真实符号进行比重共享非线性预编码。可见,本发明实施例中通过对截断处理后的二阶沃尔泰拉反馈均衡的比重系数进行聚类,进一步减少比重系数,采用聚类降低比重共享非线性预编码方法的复杂度,进一步降低IMDD光纤传输系统的成本。

## 附图说明

[0038] 为了更清楚地说明本发明实施例或现有技术中的技术方案,下面将对实施例或现有技术描述中所需要使用的附图作简单地介绍,显而易见地,下面描述中的附图仅仅是本发明中记载的一些实施例,对于本领域普通技术人员来讲,在不付出创造性劳动的前提下,还可以根据这些附图获得其他的附图。

[0039] 图1为本发明实施例提供的补偿IMDD光纤系统损伤的比重共享非线性预编码方法流程示意图。

[0040] 图2为本发明实施例提供的仿真装置及收发端DSP流程图。

[0041] 图3为本发明实施例提供的针对光纤传输损伤补偿的比重共享非线性预编码的预编码及解码示意图。

[0042] 图4为本发明实施例提供的采用Matlab仿真56GBaud的PAM-4信号传输50km标准单模光纤后不同编码/均衡方案的比重系数数量和误码率对照图。

[0043] 图5为本发明实施例提供的采用Matlab仿真56GBaud的PAM-4信号传输50km标准单模光纤后截断的NTHP-VFFE和比重共享非线性预编码-VFFE的所有比重数值按从小到大排列后的比重分布图。

[0044] 图6为本发明实施例提供的补偿IMDD光纤系统损伤的比重共享非线性预编码装置的原理框图。

[0045] 图7为本发明实施例提供的智能终端的内部结构原理框图。

## 具体实施方式

[0046] 本发明公开了补偿IMDD光纤系统损伤的比重共享非线性预编码方法,为使本发明的目的、技术方案及效果更加清楚、明确,以下参照附图并举实施例对本发明进一步详细说明。应当理解,此处所描述的具体实施例仅用以解释本发明,并不用于限定本发明。

[0047] 本技术领域技术人员可以理解,除非特意声明,这里使用的单数形式“一”、“一个”、“所述”和“该”也可包括复数形式。应该进一步理解的是,本发明的说明书中使用的措辞“包括”是指存在所述特征、整数、步骤、操作、元件和/或组件,但是并不排除存在或添加一个或多个其他特征、整数、步骤、操作、元件、组件和/或它们的组。应该理解,当我们称元件被“连接”或“耦接”到另一元件时,它可以直接连接或耦接到其他元件,或者也可以存在中间元件。此外,这里使用的“连接”或“耦接”可以包括无线连接或无线耦接。这里使用的措辞“和/或”包括一个或多个相关联的列出项的全部或任一单元和全部组合。

[0048] 本技术领域技术人员可以理解,除非另外定义,这里使用的所有术语(包括技术术语和科学术语),具有与本发明所属领域中的普通技术人员的一般理解相同的意义。还应该理解的是,诸如通用字典中定义的那些术语,应该被理解为具有与现有技术的上下文中的意义一致的意义,并且除非像这里一样被特定定义,否则不会用理想化或过于正式的含义来解释。

[0049] 由于现有技术中,工作在C波段的低成本高速双边带IMDD传输系统的传输容量和距离受到光纤色度色散的限制,这是因为光纤色度色散和平方律直接检测相互作用,导致接收到的信号产生严重的频率选择性功率衰落和非线性失真,从而限制了系统的传输容量和带宽。为了补偿频率选择性功率衰落,通常可以采用包括接收端判决反馈均衡(DFE)或发送端Tomlinson-Harashima预编码(THP) [Rath R, Clausen D, Ohlendorf S, et al. Tomlinson-Harashima precoding for dispersion uncompensated PAM-4 transmission with direct-detection[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(18): 3909-3917.]的反馈均衡方法。该方法首先从已有符号中估计出码间干扰,然后减去串扰,从而消除码间干扰,其中DFE和THP的比重系数可以通过发送训练符号,采用自适应递归最小二乘(RLS)或最小均方误差(LMS)算法经无误差传播的DFE模型估计得到。相比于接收端DFE,发射端THP可以避免误差传播,实现更优的传输性能。此外,通过引入二阶Volterra非线性项后的非线性THP(NTHP)可以同时补偿频率选择性功率衰落及部分非线性损伤,同时结合接收端非线性Volterra前馈均衡(VFFE)进一步提升系统的传输性能[Xin H, Zhang K, Kong D, et al. Nonlinear Tomlinson-Harashima precoding for direct-detected double sideband PAM-4 transmission without dispersion compensation [J]. Optics express, 2019, 27(14): 19156-19167.]。然而,引入二阶Volterra非线性项后的NTHP以及VFFE的比重系数数量及复杂度随着其非线性记忆长度的增加而指数增长,极高的复杂度阻碍了其在成本敏感的IMDD光纤传输系统中的应用。

[0050] 为了解决现有技术的问题,本实施例提供了一种补偿IMDD光纤系统损伤的比重共享非线性预编码方法,通过对截断处理后的二阶沃尔泰拉反馈均衡的比重系数进行聚类,进一步减少比重系数,采用聚类降低比重共享非线性预编码方法的复杂度,进一步降低IMDD光纤传输系统的成本。具体实施时,首先通过发送端获取训练符号,并将所述训练符号经过光纤信道传输和信号处理,得到接收训练序列;然后将所述接收训练序列进行二阶沃

尔泰拉反馈均衡处理,得到均衡输出序列,对所述均衡输出序列进行截断处理,得到截断处理后的二阶沃尔泰拉反馈均衡的第一比重系数;其中,所述第一比重系数用于表征二阶沃尔泰拉反馈均衡的脉冲响应;最后对所述第一比重系数进行聚类,得到若干第二比重系数,获取真实符号,基于若干所述第二比重系数对所述真实符号进行比重共享非线性预编码。

[0051] 示例性方法

[0052] 本实施例提供一种补偿IMDD光纤系统损伤的比重共享非线性预编码方法,该方法可以应用于高速光纤通信系统的智能终端。具体如图1所示,所述方法包括:

[0053] 步骤S100、通过发送端获取训练符号,并将所述训练符号经过光纤信道传输和信号处理,得到接收训练序列;

[0054] 具体地,IMDD为强度调制和直接检测。传统的发送端NTHP结合接收端VFFE可以有效的补偿IMDD光纤传输系统的频率选择性功率衰落及非线性损伤。然而其具有极多的比重系数和极高的编码/均衡复杂度,极大地限制了其应用于低成本的IMDD光纤传输系统。故本发明为了降低NTHP-VFFE的高编码/均衡复杂度,提出一种补偿IMDD光纤系统损伤的比重共享非线性预编码方法,旨在以较低的编码/均衡复杂度补偿IMDD光纤系统频率选择性功率衰落及非线性损伤,进一步降低IMDD光纤传输系统的成本。在本实施例中,研发人员会设计一段符号长度为 $N_t$ 的已知实数脉冲幅度调制(PAM)训练符号 $t(n)$ ,其中 $n=0,1,\dots,N_t-1$ ,然后将其输入至发送端,发送端获取到训练符号,并将所述训练符号输入光纤信道,接收端接收到光纤信道的光信号后进行信号处理,就可以得到接收训练序列。

[0055] 在步骤S100中,所述将所述训练符号经过光纤信道传输和信号处理,得到接收训练序列包括如下步骤:

[0056] S101、将所述训练符号经过光纤信道传输,得到训练光信号;

[0057] S102、将所述训练光信号进行光电探测、模数转换、同步处理和降采样处理,得到接收训练序列。

[0058] 具体地,将所述训练符号 $t(n)$ 进行符号滤波成型、数模转换和电光强度调制后生成光信号,光信号发送到光纤信道后,通过光纤信道输出训练光信号,接收端接收该训练光信号,并将该训练光信号进行带通滤波器的滤波、光电探测器的探测、模数转换、信号同步处理和降采样到2样本每符号后,得到接收训练序列 $r(n)$ 。

[0059] 得到接收训练序列后,就可以执行如图1所示的如下步骤:S200、将所述接收训练序列进行二阶沃尔泰拉反馈均衡处理,得到均衡输出序列,对所述均衡输出序列进行截断处理,得到截断处理后的二阶沃尔泰拉反馈均衡的第一比重系数;其中,所述第一比重系数用于表征二阶沃尔泰拉反馈均衡的脉冲响应;

[0060] 具体地,本发明引入二阶沃尔泰拉(Volterra)非线性项后的非线性THP(NTHP)可以同时补偿频率选择性功率衰落及部分非线性损伤,然后将所述接收训练序列进行二阶沃尔泰拉(Volterra)反馈均衡(DFE)处理,得到均衡输出序列,为了降低复杂度,对所述均衡输出序列进行截断处理,得到截断处理后的二阶沃尔泰拉反馈均衡的第一比重系数,第一比重系数用于表征二阶沃尔泰拉反馈均衡的脉冲响应,可以根据训练符号和接收训练序列估计得到。

[0061] 在步骤S200中,所述将所述接收训练序列进行二阶沃尔泰拉反馈均衡处理,得到均衡输出序列包括如下步骤:将所述接收训练序列进行二阶沃尔泰拉反馈均衡处理和二阶

沃尔泰拉前馈均衡处理,得到均衡输出序列。

[0062] 具体地,为了进一步提升系统的传输性能,本发明同时结合接收端非线性沃尔泰拉(Volterra)前馈均衡(VFFE)。在本实施例中,将所述接收训练序列进行二阶沃尔泰拉反馈均衡(VDFE)处理和二阶沃尔泰拉前馈均衡(VFFE)处理,得到均衡输出序列:

$$y(n) = \sum_{k_1=0}^{N_1-1} h_1(k_1)r(2n-k_1) + \sum_{k_1=0}^{N_2-1} \sum_{k_2=k_1}^{N_2-1} h_2(k_1, k_2)r(2n-k_1)r(2n-k_2) \quad (1)$$

[0063]

$$- \sum_{k_1=1}^{D_1} w_1(k_1)d(n-k_1) - \sum_{k_1=0}^{D_2-1} \sum_{k_2=k_1}^{D_2-1} w_2(k_1, k_1)d(n-k_1)d(n-k_1)$$

[0064] 上式中,第一项为二阶沃尔泰拉前馈均衡输出项(VFFE),第二项为二阶沃尔泰拉反馈均衡输出项(VDFE),其中, $n, k_1$ 和 $k_2$ 是非负整数, $r(2n-k_1)$ 表示相对 $r(2n)$ 延时 $k_1$ 个采样点的接收信号, $d(n)$ 是硬判决输出,训练过程中把 $d(n)$ 替换为已知发送信号 $t(n)$ , $h_1$ 和 $N_1$ 分别是VFFE的1阶线性比重系数和记忆长度, $h_2$ 和 $N_2$ 分别是VFFE的2阶非线性比重系数和记忆长度, $w_1$ 和 $D_1$ 分别是VDFE的1阶线性比重系数和记忆长度, $w_2$ 和 $D_2$ 分别是VDFE的2阶非线性比重系数和记忆长度, $N_1, N_2, D_1$ 和 $D_2$ 的取值范围通常为 $[20, 1000]$ 。VFFE和VDFE的比重系数数量分别为 $N_1+N_2(N_2+1)/2$ 和 $D_1+D_2(D_2+1)/2$ ,均衡复杂度(所需实数乘法数)分别为 $N_1+N_2(N_2+1)$ 和 $D_1+D_2(D_2+1)$ ,其比重系数数量与复杂度均和非线性记忆长度的平方成正比。

[0065] 在步骤S200中,所述均衡输出序列包括前馈均衡输出项和反馈均衡输出项;所述对所述均衡输出序列进行截断处理,得到截断处理后的二阶沃尔泰拉反馈均衡的第一比重系数包括如下步骤:将所述反馈均衡输出项中大于预设第一时间间隔的二阶沃尔泰拉非线性项删除,得到截断处理后的二阶沃尔泰拉反馈均衡输出项;基于递归最小二乘算法,计算所述二阶沃尔泰拉反馈均衡输出项的第一比重系数;将所述前馈均衡输出项中大于预设第二时间间隔的二阶沃尔泰拉非线性项删除,得到截断处理后的二阶沃尔泰拉前馈均衡输出项;基于递归最小二乘算法,计算所述二阶沃尔泰拉前馈均衡输出项的第三比重系数。

[0066] 具体地,将反馈均衡输出项VDFE(公式(1)的第二项)中大于预设第一时间间隔 $U-1$ 的二阶沃尔泰拉非线性项删除,其中, $U$ 的取值范围为 $[1, 10]$ ,数值远小于 $D_2$ ,得到截断处理后的二阶沃尔泰拉反馈均衡输出项:

$$[0067] \quad - \sum_{k=1}^{D_1} w_1(k)d(n-k) - \sum_{u=0}^{U-1} \sum_{k=1}^{D_2-u} w_2(k, u)d(n-k)d(n-k-u) \quad (2)$$

[0068] 将所述前馈均衡输出项VFFE(公式(1)的第一项)中大于预设第二时间间隔 $Q-1$ 的二阶沃尔泰拉非线性项删除,其中, $Q$ 的取值范围为 $[1, 10]$ ,数值远小于 $N_2$ ,得到截断处理后的二阶沃尔泰拉前馈均衡输出项:

$$[0069] \quad \sum_{k=0}^{N_1-1} h_1(k)r(2n-k) + \sum_{q=0}^{Q-1} \sum_{k=0}^{N_2-1-q} h_2(k, q)r(2n-k)r(2n-k-q) \quad (3)$$

[0070] 通过上式截断处理可以降低比重系数数量和复杂度,则截断的VFFE-VDFE的输出可以表示为:

$$\begin{aligned}
[0071] \quad y(n) = & \sum_{k=0}^{N_1-1} h_1(k)r(2n-k) + \sum_{q=0}^{Q-1} \sum_{k=0}^{N_2-1-q} h_2(k,q)r(2n-k)r(2n-k-q) \\
& - \sum_{k=1}^{D_1} w_1(k)d(n-k) - \sum_{u=0}^{U-1} \sum_{k=1}^{D_2-u} w_2(k,u)d(n-k)d(n-k-u)
\end{aligned} \quad (4)$$

[0072] 其中,  $Q$ 和 $U$ 分别为VFFE和VDFE的截断因子,其取值远小于 $N_2$ 和 $D_2$ ,用于剔除对非线性均衡贡献很小的非线性项,从而降低复杂度。经截断后的VFFE和VDFE的比重系数数量分别降低为 $L_1 = N_1 + Q(2N_2 - Q + 1)/2$ 和 $L_2 = D_1 + U(2D_2 - U + 1)/2$ ,均衡复杂度分别降低为 $N_1 + Q(2N_2 - Q + 1)$ 和 $D_1 + U(2D_2 - U + 1)$ 。

[0073] 接着,基于递归最小二乘(RLS)算法,计算所述二阶沃尔泰拉反馈均衡输出项的第一比重系数 $w_1(k)$ 和 $w_2(k,u)$ ,计算所述二阶沃尔泰拉前馈均衡输出项的第三比重系数 $h_1(k)$ 、 $h_2(k,q)$ ,具体步骤如下:

[0074] 1) 定义输入信号项向量 $r(n)$ 及比重系数向量 $h$ 分别为

$$[0075] \quad r(n) = [\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2]^T \quad (5)$$

$$[0076] \quad h = [h_1, h_2, w_1, w_2]^T \quad (6)$$

$$[0077] \quad \alpha_1 = [r(2n), r(2n-1), \dots, r(2n-N_1+1)] \quad (7)$$

$$\begin{aligned}
[0078] \quad \alpha_2 = & [r(2n)r(2n), r(2n-1)r(2n-1), \dots, r(2n-N_2+1)r(2n-N_2+1), \\
& r(2n)r(2n-1), r(2n-1)r(2n-2), \dots, r(2n-N_2+2)r(2n-N_2+1), \dots, \\
& r(2n)r(2n-Q+1), r(2n-1)r(2n-Q), \dots, r(2n-N_2+Q)r(2n-N_2+1)]
\end{aligned} \quad (8)$$

$$[0079] \quad \beta_1 = [d(n-1), d(n-2), \dots, d(n-D_1)] \quad (9)$$

$$\begin{aligned}
[0080] \quad \beta_2 = & [d(n-1)d(n-1), d(n-2)d(n-2), \dots, d(n-D_2)d(n-D_2), \\
& d(n-1)d(n-2), d(n-2)d(n-3), \dots, d(n-D_2+1)d(n-D_2), \dots, \\
& d(n-1)d(n-U), d(n-2)d(n-U-1), \dots, d(n-D_2+U-1)d(n-D_2)]
\end{aligned} \quad (10)$$

$$[0081] \quad h_1 = [h_1(0), h_1(1), \dots, h_1(N_1-1)] \quad (11)$$

$$\begin{aligned}
[0082] \quad h_2 = & [h_2(0,0), h_2(1,0), \dots, h_2(N_2-1,0), h_2(0,1), h_2(1,1), \dots, h_2(N_2-2,1), \dots, \\
& h_2(0,Q-1), h_2(1,Q-1), \dots, h_2(N_2-Q,Q-1)]
\end{aligned} \quad (12)$$

$$[0083] \quad w_1 = [w_1(1), w_1(2), \dots, w_1(D_1)] \quad (13)$$

$$\begin{aligned}
[0084] \quad w_2 = & [w_2(1,0), w_2(2,0), \dots, w_2(D_2,0), w_2(1,1), w_2(2,1), \dots, w_2(D_2-1,1), \dots, \\
& w_2(1,U-1), w_2(2,U-1), \dots, w_2(D_2-U+1,U-1)]
\end{aligned} \quad (14)$$

[0085] 则公式(4)可以改写为向量形式:

$$[0086] \quad y(n) = h^T r(n) \quad (15)$$

[0087] 2) 初始化比重系数向量 $h(0) = 0$ ,  $L \times 1$ 矩阵 $P = \delta^{-1}I$ ,其中 $L = L_1 + L_2$ ,  $\delta$ 是数值很小的正数,  $I$ 是 $L \times L$ 单位矩阵,迭代次数 $n = 1$ 。

[0088] 3) 计算误差 $e(n) = t(n) - y(n) = h^T(n-1)r(n)$ 。

[0089] 4) 计算增益向量 $k(n) = P(n-1)r(n)\{\lambda + r^T(n)P(n-1)r(n)\}^{-1}$ 并更新矩阵 $P(n) = \lambda^{-1}\{P(n-1) - k(n)r^T(n)P(n-1)\}$ 。

[0090] 5) 更新比重系数向量 $h(n) = h(n-1) + k(n)e(n)$ 。

[0091] 6) 迭代次数 $n$ 增加为 $n = n + 1$ ,如果 $n = N_t - 1$ ,结束迭代过程,否则返回步骤2。

[0092] 7) 根据最终得到的向量 $h$ 的前 $L_1$ 个元素得到比重系数 $h_1(k)$ 和 $h_2(k,q)$ ,后 $L_2$ 个元素得到比重系数 $w_1(k)$ 和 $w_2(k,u)$ ,第一比重系数和第二比重系数的估计也可以采样LMS或其他估计算法。

[0093] 得到第一比重系数之后,就可以执行如图1所示的如下步骤:S300、对所述第一比

重系数进行聚类,得到若干第二比重系数,获取真实符号,基于若干所述第二比重系数对所述真实符号进行比重共享非线性预编码。

[0094] 具体地,采用k-means聚类算法将截断的VDFE中数量为 $L_2$ 的第一比重系数进行分类,分成 $K_2$  ( $K_2$ 可以取值为40)个聚类簇,并求得 $K_2$ 个聚类中心 $w(i)$ ,  $i=1,2,3,\dots$ ,也即若干第二比重系数,经聚类后,比重共享VDFE的比重系数数量由 $L_2$ 降低到 $K_2$ ,均衡复杂度得到大量降低。同时,对所述第三比重系数进行聚类,得到若干第四比重系数。也即采用k-means聚类算法将截断的VDFE中数量为 $L_1$ 的第三比重系数进行分类,分成 $K_1$  ( $K_1$ 可以取值为60)个聚类簇,并求得 $K_1$ 个聚类中心 $h(i)$ ,  $i=1,2,3,\dots$ ,也即若干第四比重系数,经聚类后,比重共享VDFE的比重系数数量由 $L_1$ 降低到 $K_1$ ,均衡复杂度得到大量降低。此时的比重共享VDFE-VDFE的输出可以表示为:

$$[0095] \quad y(n) = \sum_{i=0}^{K_1-1} h(i)r'(n, i) - \sum_{i=0}^{K_2-1} w(i)d'(n, i) \quad (16)$$

$$[0096] \quad r'(n, i) = \sum_{k=0, h_1(k) \in h_2(i)}^{N_1-1} r(2n-k) + \sum_{q=0}^{Q-1} \sum_{k=0, h_2(k, q) \in h_2(i)}^{N_2-1-q} 2r(n-k)2r(n-k-q) \quad (17)$$

$$[0097] \quad d'(n, i) = \sum_{k=1, w_1(k) \in w_2(i)}^{D_1} d(n-k) + \sum_{u=0}^{U-1} \sum_{k=1, w_2(k, u) \in w_2(i)}^{D_2-u} d(n-k)d(n-k-u) \quad (18)$$

[0098] 其中,聚类中心 $h(i)$ 和 $w(i)$ 分别为比重共享VDFE和比重共享VDFE的比重系数。 $r'$ 和 $d'$ 分别为比重共享VDFE和比重共享VDFE的经过聚类处理后的信的输入信号项,即VDFE或VDFE中比重系数属于相同分类的原始输入信号项之和。

[0099] 得到系数数量降低后的若干第二比重系数 $w(i)$ 和若干第四比重系数 $h(i)$ 后,获取真实符号 $a(n)$ ,基于若干所述第二比重系数对所述真实符号进行比重共享非线性预编码,在本实施例中,将比重共享VDFE中比重系数用作比重共享非线性预编码,也就是说,比重共享非线性预编码是将接收端的比重共享VDFE放在发送端做,避免接收端做VDFE后的判决反馈引起误差传播。根据若干所述第二比重系数(比重共享VDFE的系数 $w(i)$ )和聚类处理后的新的输入信号项 $x'(n, i)$ ,对发送端发送的真实符号 $a(n)$ ,进行比重共享非线性预编码,比重共享非线性预编码的输出为:

$$[0100] \quad x(n) = \text{Mod} \left[ a(n) - \sum_{i=0}^{K_2-1} w(i)x'(n, i) \right] \quad (19)$$

$$[0101] \quad x'(n, i) = \sum_{k=1, w_1(k) \in w(i)}^{D_1} x(n-k) + \sum_{u=0}^{U-1} \sum_{k=1, w_2(k, u) \in w(i)}^{D_2-u} x(n-k)x(n-k-u) \quad (20)$$

[0102] 其中,  $\text{Mod}(\cdot)$  是取模 $2M$ 操作,其中 $M$ 为实数PAM符号的调制阶数,通过取模 $2M$ 操作,使得比重共享非线性预编码的输出信号幅度限制在 $-M$ 和 $M$ 之间。

[0103] 在一种实现方式中,所述基于若干所述第二比重系数对所述真实符号进行比重共享非线性预编码之后包括如下步骤:将进行比重共享非线性预编码之后序列进行滤波成型、数模转换和电光强度调制,得到光信号;将所述光信号经过光纤信道传输,并发送至接收端;通过接收端将接收的光信号进行光电探测、模数转换、信号同步和降采样,得到真实接收信号;基于若干所述第四比重系数对所述真实接收信号进行比重共享非线性前馈均衡。

[0104] 具体地,将进行比重共享非线性预编码之后序列 $x(n)$ 经滤波成型、数模转换和电

光强度调制后生成光信号,光信号传送到标准单模光纤进行传输,经单模光纤传输后,通过光电探测、模数转换、信号同步和降采样后,得到的真实接收信号为 $v(n)$ ,基于若干所述第四比重系数 $h(i)$ 对所述真实接收信号进行比重共享非线性前馈均衡补偿残留的系统线性及非线性损伤,则比重共享VFFE的输出为:

$$[0105] \quad y'(n) = \sum_{i=0}^{K_1-1} h(i)v'(n, i) \quad (21)$$

$$[0106] \quad v'(n, i) = \sum_{k=0, h_1(k) \in h(i)}^{N_1-1} v(2n-k) + \sum_{q=0}^{Q-1} \sum_{k=0, h_2(k, q) \in h(i)}^{N_2-1-q} v(2n-k)v(2n-k-q) \quad (22)$$

[0107] 在一种实现方式中,所述基于若干所述第四比重系数对所述真实接收信号进行比重共享非线性前馈均衡之后包括如下步骤:将进行比重共享非线性前馈均衡后的信号进行解码,得到解码符号。

[0108] 具体地,对比重共享VFFE均衡后的输出信号执行与发送端比重共享非线性预编码相同的取模2M操作进行解码,最终恢复得到补偿信道传输损伤后的解码符号 $b(n)$ ,该解码符号接近原始发送符号,可以表示为:

$$[0109] \quad b(n) = \text{Mod}[y'(n)] \quad (23)$$

[0110] 本发明的特点:

[0111] 本发明提出一种用于补偿IMDD光纤系统传输损伤的比重共享非线性预编码,通过对传统的NTHP进行改进,以较低复杂度补偿IMDD系统频率选择性功率衰落及非线性损伤。相比于传统的NTHP,本发明通过截断具有较大时间间隔的二阶Volterra非线性项来避免获取非线性项需要的大量乘法操作。此外,本发明的比重系数是通过k-means聚类后获取的,不同线性及非线性项通过共享相同的比重系数可以更进一步降低比重系数的数量,进而降低编码及均衡的复杂度。相比于现有的NTHP方案,本发明同时具备更低的预编码/均衡复杂度和很好的光纤传输损伤补偿性能。

[0112] 如图2所示,给出了本发明的仿真装置图及收发端DSP流程图。发送端将离线产生的56GBaud的PAM-4信号加载到采样率为112GSa/s的任意波形发生器中进行数模转换,产生的模拟信号经电放大器放大后驱动一个工作在正交点的马赫-曾德尔调制器进行信号的电光调制,其中1550.12nm的光载波通过外腔激光器产生。最终产生的光信号以6dBm的光功率注入到50km的标准单模光纤进行传输,光纤传输后的光信号经掺铒光纤放大器放大并用一个光带通滤波器滤除带外噪声后,光信号被一个光电探测器进行探测,探测后的电信号通过示波器进行采集并模数转换为数字信号进行离线处理。

[0113] 训练比重系数的DSP流程:发送端首先将一段长度为20000的伪随机序列映射为PAM-4符号作为训练符号,训练过程不执行预编码,训练符号进行2倍上采样并脉冲成型,其中成型滤波器为简单的矩形滤波器成型,成型的信号经数模转换、信道传输和模数转换后,重采样到2样本每符号,接着进行信号同步,同步后的训练序列进行前述方法的比重共享VFFE-比重共享VDFE的比重系数估计,得到比重共享非线性预编码及比重共享VFFE的比重系数。

[0114] 比重共享非线性预编码的编码和解码的DSP流程:发送端首先将一段长度为 $2^{19}$ 的伪随机序列映射为PAM-4符号作为数据信号,接着进行以上步骤S300的比重共享非线性预编码,预编码后的信号进行2倍上采样并脉冲成型,其中成型滤波器为简单的矩形滤波器成

型,成型的信号经数模转换、信道传输和模数转换后,重采样到2样本每符号,接着进行信号同步,同步后的信号进行前述方法的比重共享VFFE均衡及比重共享非线性预编码的解码,最后进行符号判决,PAM-4解映射和误码率计算。

[0115] 如图3所示,给出本发明进行比重共享非线性预编码的预编码和解码的数字信号处理(DSP)过程,其中,公式部分只需要乘法器和加法器即可实现。预编码过程需要对发送端的实数数据符号 $a(n)$ 进行滤波及取模 $2M$ 操作,滤波器的比重系数是采用训练序列估计截断的VDFE的比重系数并聚类后得到的,经比重共享非线性预编码后,实现了在发送端预补偿光纤信道的功率选择性衰落和部分非线性损伤,而接收端在执行比重共享VFFE补偿部分残留的线性及非线性损伤后,只需采样简单的取模 $2M$ 操作即可实现比重共享非线性预编码的解码,恢复出原始符号信息。

[0116] 图4给出了采用Matlab仿真56GBaud的PAM-4信号传输50km标准单模光纤后不同编码/均衡方案的比重系数数量和误码率,其中编码/均衡器的经优化后的参数为 $N_1=50$ 、 $N_2=40$ 、 $Q=9$ 、 $D_1=24$ 、 $D_2=20$ 、 $U=9$ 、 $K_1=60$ 、 $K_2=40$ 。图4包括了传统的VFFE-VDFE、截断的VFFE-VDFE、截断的NTHP-VFFE和比重共享非线性预编码-VFFE结果,可以看到,截断的NTHP-VFFE和比重共享非线性预编码-VFFE具有相近的性能,它们的误码率分别为0.0029941和0.0027257,均低于7%前向纠错编码硬判决误码率阈值0.0038,而且由于避免了判决反馈均衡的误差传播问题,它们的性能均优于传统的VFFE-VDFE和截断的VFFE-VDFE的误码率0.0096864和0.0078899。但是,提出的比重共享非线性预编码-VFFE所需的比重系数数量为 $40+60=100$ 个,比仅采用截断的NTHP-VFFE所需的542个比重系数降低80%以上,极大地降低了预编码/均衡的复杂度。结果表明提出的方案同时具备很好的频率选择性功率衰落及非线性损伤补偿性能,以及很低的预编码/均衡复杂度。

[0117] 图5是采用Matlab仿真56GBaud的PAM-4信号传输50km标准单模光纤后截断的NTHP-VFFE(如图5(a)和图5(b)所示)以及比重共享非线性预编码-VFFE(如图5(c)和图5(d)所示)的所有比重数值按从小到大排列后的比重分布。可以看出即使截断了具有较大时间间隔的二阶非线性项,截断的VTHP-VFFE中有很多比重系数具有相近的数值,因此通过k-means聚类分类后,比重共享非线性预编码-VFFE的比重系数数量经由542个降低为100个,从而实现极低的预编码/均衡复杂度。

[0118] 示例性设备

[0119] 如图6中所示,本发明实施例提供一种补偿IMDD光纤系统损伤的比重共享非线性预编码装置,该装置包括训练序列处理模块401、截断处理模块402和聚类模块403,其中:

[0120] 训练序列处理模块401,用于通过发送端获取训练符号,并将所述训练符号经过光纤信道传输和信号处理,得到接收训练序列;

[0121] 截断处理模块402,用于将所述接收训练序列进行二阶沃尔泰拉反馈均衡处理,得到均衡输出序列,对所述均衡输出序列进行截断处理,得到截断处理后的二阶沃尔泰拉反馈均衡的第一比重系数;其中,所述第一比重系数用于表征二阶沃尔泰拉反馈均衡的脉冲响应;

[0122] 聚类模块403,用于对所述第一比重系数进行聚类,得到若干第二比重系数,获取真实符号,基于若干所述第二比重系数对所述真实符号进行比重共享非线性预编码。

[0123] 基于上述实施例,本发明还提供了一种智能终端,其原理框图可以如图7所示。该

智能终端包括通过系统总线连接的处理器、存储器、网络接口、显示屏、温度传感器。其中，该智能终端的处理器用于提供计算和控制能力。该智能终端的存储器包括非易失性存储介质、内存储器。该非易失性存储介质存储有操作系统和计算机程序。该内存储器为非易失性存储介质中的操作系统和计算机程序的运行提供环境。该智能终端的网络接口用于与外部的终端通过网络连接通信。该计算机程序被处理器执行时以实现一种补偿IMDD光纤系统损伤的比重共享非线性预编码方法。该智能终端的显示屏可以是液晶显示屏或者电子墨水显示屏，该智能终端的温度传感器是预先在智能终端内部设置，用于检测内部设备的运行温度。

[0124] 本领域技术人员可以理解，图7中的原理图，仅仅是与本发明方案相关的部分结构的框图，并不构成对本发明方案所应用于其上的智能终端的限定，具体的智能终端可以包括比图中所示更多或更少的部件，或者组合某些部件，或者具有不同的部件布置。

[0125] 在一个实施例中，提供了一种智能终端，包括有存储器，以及一个或者一个以上的程序，其中一个或者一个以上程序存储于存储器中，且经配置以由一个或者一个以上处理器执行所述一个或者一个以上程序包含用于进行以下操作的指令：

[0126] 通过发送端获取训练符号，并将所述训练符号经过光纤信道传输和信号处理，得到接收训练序列；

[0127] 将所述接收训练序列进行二阶沃尔泰拉反馈均衡处理，得到均衡输出序列，对所述均衡输出序列进行截断处理，得到截断处理后的二阶沃尔泰拉反馈均衡的第一比重系数；其中，所述第一比重系数用于表征二阶沃尔泰拉反馈均衡的脉冲响应；

[0128] 对所述第一比重系数进行聚类，得到若干第二比重系数，获取真实符号，基于若干所述第二比重系数对所述真实符号进行比重共享非线性预编码。

[0129] 本领域普通技术人员可以理解实现上述实施例方法中的全部或部分流程，是可以通过计算机程序来指令相关的硬件来完成，所述的计算机程序可存储于一非易失性计算机可读存储介质中，该计算机程序在执行时，可包括如上述各方法的实施例的流程。其中，本发明所提供的各实施例中所使用的对存储器、存储、数据库或其它介质的任何引用，均可包括非易失性和/或易失性存储器。非易失性存储器可包括只读存储器 (ROM)、可编程ROM (PROM)、电可编程ROM (EPROM)、电可擦除可编程ROM (EEPROM) 或闪存。易失性存储器可包括随机存取存储器 (RAM) 或者外部高速缓冲存储器。作为说明而非局限，RAM以多种形式可得，诸如静态RAM (SRAM)、动态RAM (DRAM)、同步DRAM (SDRAM)、双数据率SDRAM (DDRSDRAM)、增强型SDRAM (ESDRAM)、同步链路 (Synchlink) DRAM (SLDRAM)、存储器总线 (Rambus) 直接RAM (RDRAM)、直接存储器总线动态RAM (DRDRAM)、以及存储器总线动态RAM (RDRAM) 等。

[0130] 综上所述，本发明公开了补偿IMDD光纤系统损伤的比重共享非线性预编码方法，所述方法包括：通过发送端获取训练符号，并将所述训练符号经过光纤信道传输和信号处理，得到接收训练序列；将所述接收训练序列进行二阶沃尔泰拉反馈均衡处理，得到均衡输出序列，对所述均衡输出序列进行截断处理，得到截断处理后的二阶沃尔泰拉反馈均衡的第一比重系数；其中，所述第一比重系数用于表征二阶沃尔泰拉反馈均衡的脉冲响应；对所述第一比重系数进行聚类，得到若干第二比重系数，获取真实符号，基于若干所述第二比重系数对所述真实符号进行比重共享非线性预编码。本发明实施例通过对截断处理后的二阶沃尔泰拉反馈均衡的比重系数进行聚类，进一步减少比重系数，采用聚类降低比重共享非

线性预编码方法的复杂度,进一步降低IMDD光纤传输系统的成本。

[0131] 基于上述实施例,本发明公开了一种补偿IMDD光纤系统损伤的比重共享非线性预编码方法,应当理解的是,本发明的应用不限于上述的举例,对本领域普通技术人员来说,可以根据上述说明加以改进或变换,所有这些改进和变换都应属于本发明所附权利要求的保护范围。

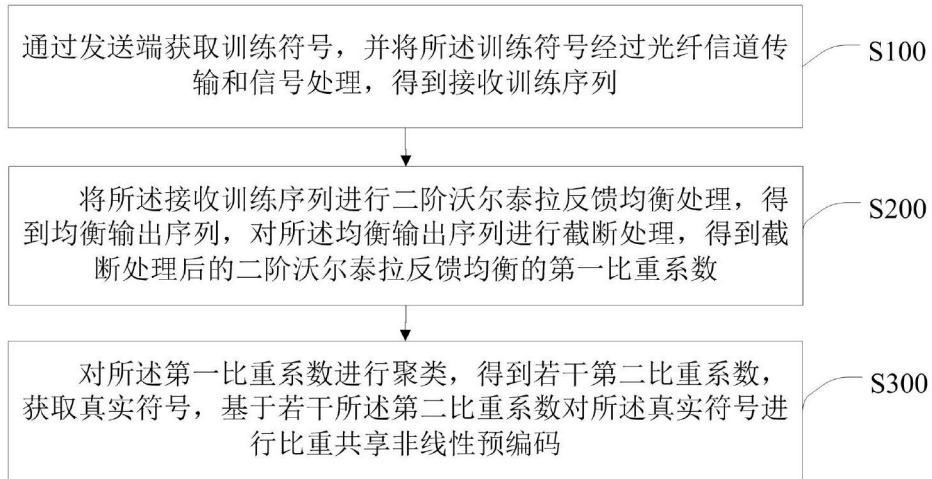


图1

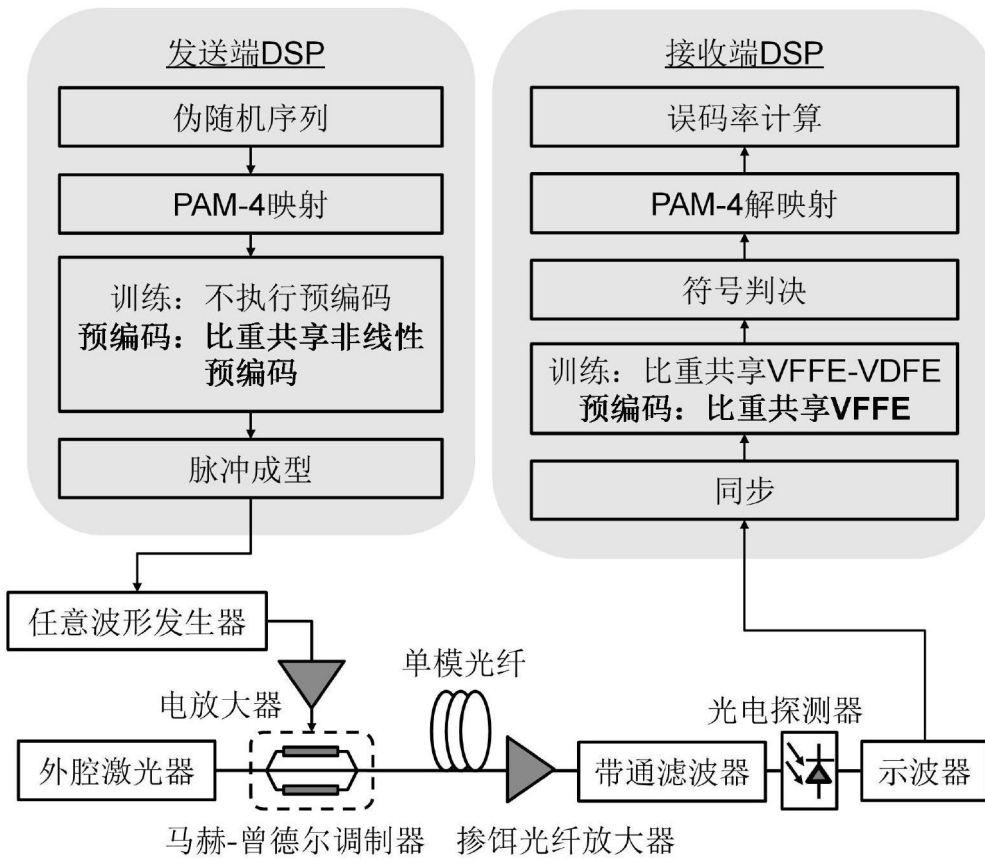


图2

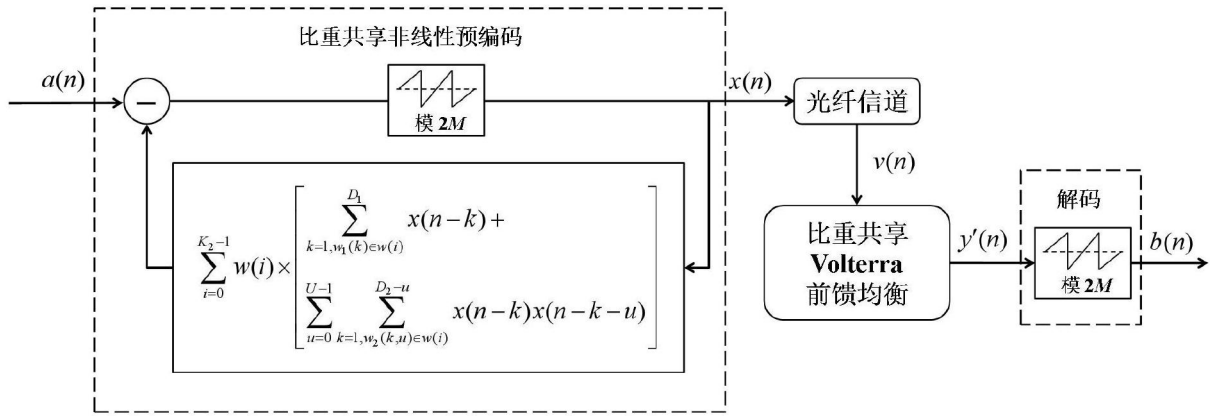


图3

编码/均衡方案	比重系数数量	误码率
VFFE-VDFE	870(VFFE) +234(VDFE) =1104	0.0096864
截断的VFFE-VDFE	374(截断的VFFE) +168(截断的VDFE) =542	0.0078899
截断的NTHP-VFFE	168(截断的NTHP) +374(截断的VFFE) =542	0.0029941
比重共享非线性预编码- <b>NFFE</b>	40(比重共享非线性预编码) +60(比重共享VFFE) =100	0.0027257

图4

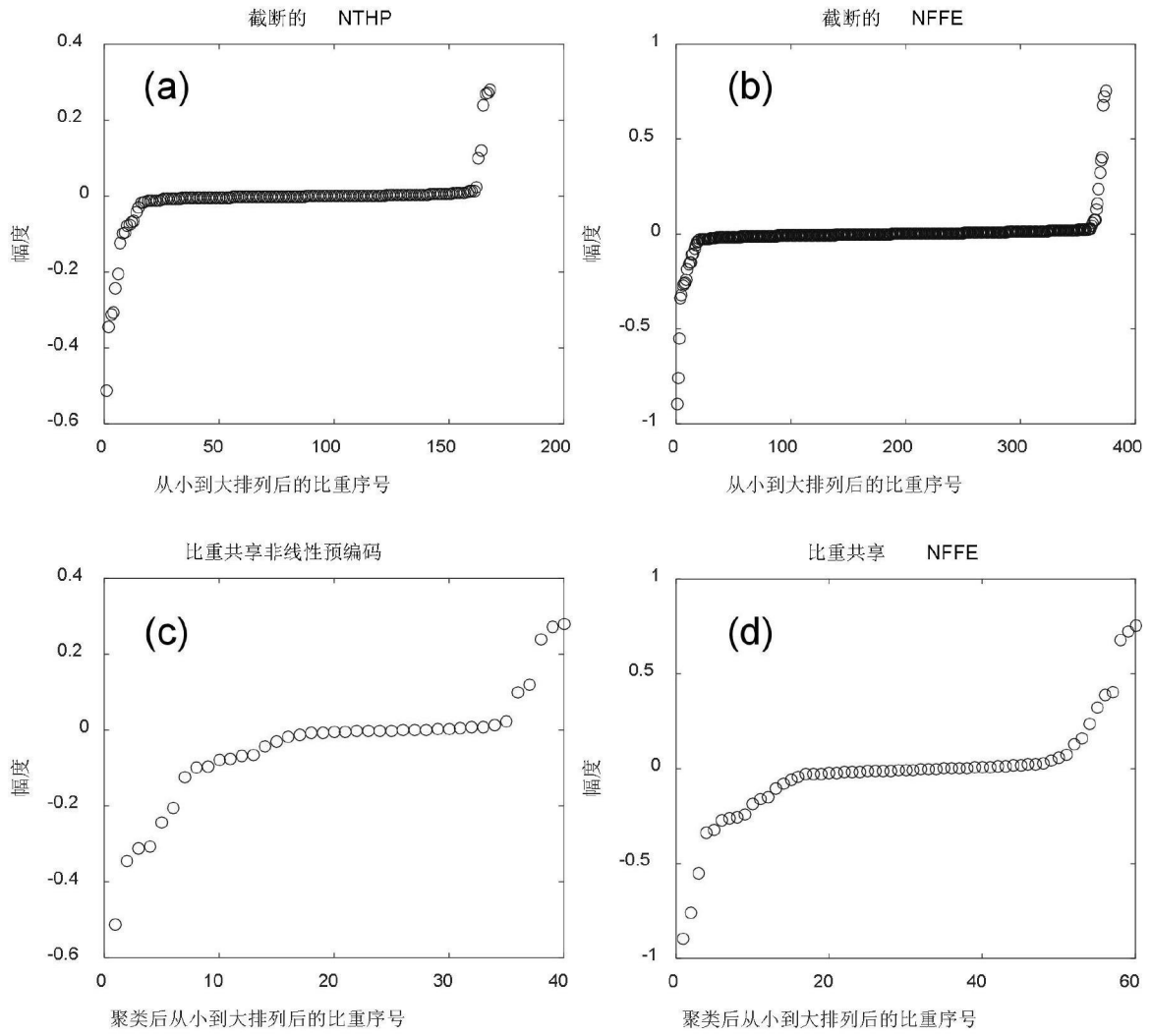


图5



图6

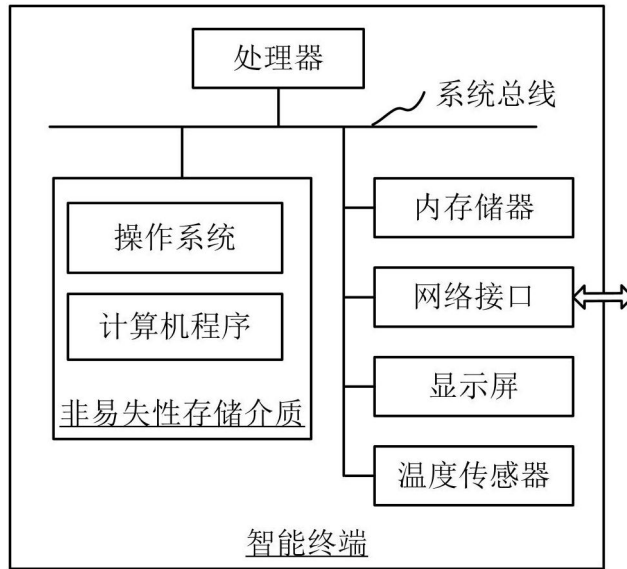


图7