

基于非线性光纤环形镜的少模脉冲 幅度调制再生器*

王瑜浩 武保剑[†] 郭飏 文峰 邱昆

(电子科技大学信息与通信工程学院, 光纤传感与通信教育部重点实验室, 成都 611731)

(2019年12月9日收到; 2020年2月6日收到修改稿)

随着网络带宽需求的快速增加, 波分复用系统的容量已接近非线性香农极限. 为了适应未来网络的发展, 空分复用技术引起了越来越多的关注. 本文首次提出基于少模非线性光纤环形镜 (FM-NOLM) 的脉冲幅度调制 (PAM) 全光再生器, 描述了其工作原理和具体设计过程. 采用 COMSOL 软件对组成 FM-NOLM 的硫化物高非线性光纤进行了模式特性仿真. 以 LP_{01} , LP_{11} , LP_{21} 三个光纤模式为例, 确定了再生器的参数, 计算出每个模式的功率转移函数曲线. 仿真分析了该少模 PAM-4 全光再生器的噪声抑制 (NRR) 性能, 并与单模情形进行了比较. 研究表明, 1) 对于每个空间模式的 PAM 信号, 所有再生电平具有一致的功率转移性能; 2) 当输入信噪比 (SNR) 约大于 20 dB 时, 三种模式的噪声抑制比均可超过 3 dB, 并随着输入信噪比线性增加, 其斜率约为 1.2; 3) 在相同输入 SNR 条件下, 三种模式的噪声抑制比相差不大, 不超过 1.1 dB. 为了说明再生器的再生性能, 当输入 SNR 为 25 dB 时, 我们还给出了再生前后 PAM-4 信号的功率分布直方图. 与现有的再生方案相比, 本文方案的均匀多电平再生转移性能, 使其更适合高频谱效率的长距空分复用系统和任意电平的 PAM 信号再生. 此外, 该方案也能够扩展到波长域, 有效提高光通信系统的传输容量.

关键词: 少模光纤, 全光再生, 非线性光纤环境, 噪声抑制比

PACS: 42.65.-k, 42.81.-i, 42.79.Hp

DOI: 10.7498/aps.69.20191858

1 引言

近年来, 网络带宽的需求量大幅度增加, 波分复用系统可以传输的容量已经达到香农极限. 为了适应未来网络的发展, 空分复用技术受到人们的关注. 模分复用作为空分复用的一种, 早在 1982 年就已提出^[1], 当时由于模间色散、模式耦合和差分模式群时延等问题还难以解决, 模分复用的发展几乎处于停滞状态. 近些年来, 随着光纤制造工艺和 DSP 算法的成熟, 模分复用技术重新进入了人们的视野. 目前, 文献^[2]采用支持 12 个模式的少模光纤实现了 6.1 Tbits/s 信号的 708 km 传输; 文

献^[3]采用每芯 10 个模式的 12 芯少模多芯光纤 (FM-MCF) 实现了超过 100 个信道数的空分复用传输. 模式耦合^[4]和模间非线性^[5]成为制约少模光纤通信系统传输的劣化因素, 人们可以利用 DSP 算法在电域对模式耦合和非线性^[6,7]进行补偿或采用光相位共轭器 (OPC) 在光域补偿非线性^[8]. 另一方面, 为了增加少模光纤通信系统的传输距离, 少模掺铒光纤放大器 (FM-EDFA)^[9]必不可少, 但对光信号进行放大的同时还会引入自发辐射噪声 (ASE). 为了降低或抑制上述劣化因素的影响, 可针对少模光纤通信系统研制相应的全光再生技术.

就全光再生技术而言, 1998 年 Mamyshev^[10]提出利用光纤自相位调制 (SPM) 的频谱展宽效应

* 国家重点研发计划 (批准号: 2018YFB1801003) 和国家自然科学基金 (批准: 61671108) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: bjwu@uestc.edu.cn

实现 OOK 信号的全光幅度再生, 后来人们利用四波混频 (FWM) 效应也实现了相位调制信号的再生^[11,12]. 随着超高速、大容量光纤通信系统的应用, 多波长和高阶调制信号的再生成为研究重点^[13]. 近几年, 我们在这两个方面也开展了相应研究, 通过实验演示了 8 个波长的 OOK 信号的同时再生^[14,15], 并提出了基于马赫-曾德尔干涉仪 (MZI) 的多电平幅度再生方案^[16] 和基于共轭 NOLM 的相位保持多电平幅度再生方案^[17] 等. 目前为止, 现有的全光再生方案能够支持的幅度再生电平数大都为 4 个左右, 主要是受限于各个再生电平功率转移函数的非一致性^[16], 即信号的高低电平具有不同的再生能力. 总之, 人们对单模光纤系统中的全光再生技术已经做了大量研究, 而针对多模或少模光纤系统的全光再生技术尚未见报道.

本文提出一种基于少模非线性光纤环形镜的全光 PAM 再生器方案, 能够对不同模式 PAM 信号的各个电平进行相同的幅度再生. 这种方案的关键在于, 采用少模非线性光纤组成 NOLM 结构, 并通过调节辅助光功率的方式使再生器工作在不同模式. 论文按如下方式组织: 第 2 部分描述少模 PAM 再生器的结构, 理论分析工作原理; 第 3 部分给出再生器的设计步骤, 包括 1) 采用 COMSOL 软件对硫化物高非线性光纤和多模耦合器的模式特性进行仿真; 2) 以 LP_{01} , LP_{11} , LP_{21} 三个光纤模式的 PAM-4 信号再生为例, 确定再生器的参数; 3) 计算再生器的噪声抑制比; 第 4 部分给出结论.

2 少模 PAM 再生器结构与原理

本文提出的少模光纤 PAM 再生器结构如图 1 所示, 主要由少模光纤放大器、FM-NOLM 单元以

及辅助光路三部分组成, 可实现任意模式 PAM 信号的全光再生. 少模光纤 PAM 再生器可作为延长光信号传输距离的线路中继器, 也可以用于接收端提高光接收机灵敏度. 作为线路中继时, 少模光纤 PAM 再生器类似于光波分复用中交换节点的构建方式, 首先模式解复用器将少模光纤中各个模式解复用, 所得信号为劣化的 PAM 信号; 然后经过单通道的少模光放大器放大 (无需考虑多通道情形下差模增益的限制) 后由少模光纤耦合器耦合进入 FM-NOLM 结构, 再生的 PAM 信号由 FM-NOLM 的透射端口输出, 并通过模式复用器将它们复用在一起, 继续在少模光纤中传输. 这种少模光纤 PAM 再生器具有三个特点: 一是采用高非线性少模光纤组成非线性光环形镜 (FM-NOLM) 结构; 二是待整形的劣化 PAM 信号与连续辅助光具有相同的模式且偏振正交, 可采用模式转换器或注入锁定多模激光器获得与劣化 PAM 信号相同空间模式的连续辅助光^[18,19]. 调节信号光与辅助光偏振态之间的夹角, 通过监测光环形镜反射端 (图 1 中 Reflection 端口) 的功率变化可确定信号光与辅助光偏振正交^[20,21]. 针对信号在光纤的传输过程中偏振态随机变化的实际应用, 可联合自动反馈偏振控制器增强信号光和辅助光偏振正交的稳定性; 三是利用非线性光环形镜中的模内交叉相位调制实现 PAM 再生, 通过调节少模光纤放大器增益可使各个模式的功率转移曲线与输入信号匹配.

对于单模情形下, 我们研究组已经实现类似结构的 PAM 再生器^[20]. 本文提出的基于 FM-NOLM 的少模 PAM 再生器与单模 PAM 再生器相比有以下不同: 1) 为了解决普通少模光纤非线性系数小的问题, 采用硫化物少模高非线性光纤构建 FM-NOLM;

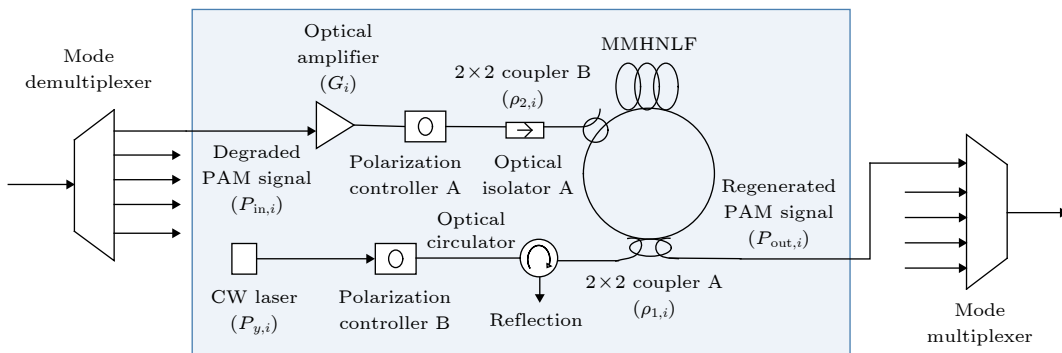


图 1 少模 PAM 再生器原理图

Fig. 1. Schematic diagram of a few-mode PAM regenerator.

2) FM-NOLM 结构用到了可商用的多模光纤耦合器多模光纤隔离器. 信号模式不同多模光纤耦合器的耦合系数也不一样.

对于任意给定的 LP 模式, 水平 x 偏振的劣化 PAM 信号与垂直 y 偏振的连续辅助光在 FM-NOLM 结构中发生模内自相位调制 (intra-mode SPM) 和模内交叉相位调制 (intra-mode XPM)^[22]. 根据图 1, 在忽略器件插入损耗情形下, 水平和垂直两个偏振光路的光功率转移函数分别为:

$$\begin{cases} P_{\text{out},i}^x = R_i \rho_{2,i} (1 - \rho_{1,i}) G_i P_{\text{in},i}, \\ P_{\text{out},i}^y = R_i \rho_{2,i} P_{y,i} [\rho_{1,i}^2 + (1 - \rho_{1,i})^2 \\ - 2\rho_{1,i} (1 - \rho_{1,i}) \cos(\Delta\phi_i)], \end{cases} \quad (1)$$

式中 $P_{\text{in},i}$ 和 G_i 分别为模式 i 的输入功率和少模光放大器增益, $\rho_{1,i}$ 和 $\rho_{2,i}$ 为耦合器 1 和 2 在不同模式下的耦合效率; L 为非线性光纤长度, $R_i = 10^{-\alpha_{\text{dB},i} L/10}$ 为模式的幅度衰减因子, $\alpha_{\text{dB},i}$ 为损耗系数; $\Delta\phi_i = 2\gamma_i P_{\text{in},i} L_{\text{eff},i} G_i (1 - \rho_{2,i})/3$ 为两个偏振光路的相位差, γ_i 为不同模式下的非线性系数, $L_{\text{eff},i} = [1 - \exp(-\alpha_{\text{dB},i} L)]/\alpha_{\text{dB},i}$ 为光纤的有效长度.

两路偏振光合成的总输出功率为

$$\begin{aligned} P_{\text{out},i} &= R_i \rho_{2,i} (1 - \rho_{1,i}) G_i P_{\text{in},i} \\ &+ R_i P_{y,i} [\rho_{1,i}^2 \rho_{2,i} + (1 - \rho_{1,i})^2 \rho_{2,i}] \\ &- 2R_i P_{y,i} \rho_{1,i} (1 - \rho_{1,i}) \rho_{2,i} \cos(\Delta\phi_i). \end{aligned} \quad (2)$$

令 $\Delta P_i = 3\pi/\gamma_i L_{\text{eff},i} G_i (1 - \rho_{2,i})$, 并对输入信号功率 $P_{\text{in},i}$ 、输出信号光功率 $P_{\text{out},i}$ 进行归一化, 即 $p_{\text{in},i} = P_{\text{in},i}/\Delta P_i$, $p_{\text{out},i} = P_{\text{out},i}/(G_{0,i} \Delta P_i)$, 式中 $G_{0,i} = R_i \rho_{2,i} (1 - \rho_{1,i}) G_i$ 为线性增益. 由 (2) 式可得归一化功率转移函数为

$$p_{\text{out},i} = p_{\text{in},i} - a_i \cos(2\pi p_{\text{in},i}) + b_i, \quad (3)$$

式中

$$\begin{aligned} a_i &= 2\gamma_i P_{y,i} (1 - \rho_{2,i}) \rho_{1,i} L_{\text{eff},i} / (3\pi), \\ b_i &= \gamma_i P_{y,i} L_{\text{eff},i} (1 - \rho_{2,i}) \frac{\rho_{1,i}^2 + (1 - \rho_{1,i})^2}{3\pi (1 - \rho_{1,i})}. \end{aligned} \quad (4)$$

由 (3) 式可知, 归一化输出功率 $p_{\text{out},i}$ 是关于归一化输入功率 $p_{\text{in},i}$ 线性函数和余弦函数之和. 要实现 PAM 信号再生, 全光再生器的工作点应满足如下条件^[23]:

$$\frac{dp_{\text{out},i}}{dp_{\text{in},i}} = 1 + 2\pi a_i \sin(2\pi p_{\text{in},i}) = 0, \quad 2\pi a_i = 1. \quad (5)$$

此时有 $P_{y,i} = 3/[4\gamma_i L_{\text{eff},i} \rho_{1,i} (1 - \rho_{2,i})]$, $p_{\text{in},i} = m - 1/4$

(m 为正整数), 对应的输入工作点为 $P_{\text{in},i}^{\text{WP}} = 3\pi(m - 1/4)/[\gamma_i L_{\text{eff},i} G_i (1 - \rho_{2,i})]$. 显然, 针对不同模式的 PAM 信号再生, 需要同时调节辅助光的功率 $P_{y,i}$ 和相应再生器的工作点, 才能使 PAM 信号达到良好的再生效果.

下面采用非线性系数较高的硫化少模光纤来构成 FM-NOLM 结构, 然后优化设计少模再生器的其他参数, 并仿真计算再生器性能.

3 FM-NOLM 再生器的设计与性能仿真

3.1 基于硫化物少模光纤的 NOLM 结构参数

石英光纤的非线性系数很小, 如果要获得高性能的再生效应必须采用超长光纤. 硫化物光纤具有红外透过谱宽、非线性系数大等显著优点^[24], 可以大大减小再生器中光纤的长度. 本文采用 COMSOL 软件仿真硫化物少模光纤来构建 FM-NOLM, 并对少模 PAM 再生器进行设计, 所用光纤纤芯/包层半径为 $8/62.5 \mu\text{m}$, 纤芯/包层折射率为 $1.4457/1.4378$, 损耗系数为 0.21 dB/km , 非线性折射率为 $4.2 \times 10^{-18} \text{ m}^2/\text{W}$, 所用光纤长度 200 m . 表 1 和表 2 给出了 LP_{01} , LP_{11} , LP_{21} 三种模式 (分别对应于 $i = 1, 2, 3$) 的仿真结果, 其中模场有效面积由 $A_{\text{eff},i} = 1/\iint |F_i(x, y)|^4 dx dy$, 计算, 进而可计算各模式在 1550 nm 波长的非线性系数 $\gamma_i = 2\pi n_2/\lambda A_{\text{eff},i}$. 连接光纤采用多模石英光纤, 不同材料光纤之间的连接关键在于模场匹配, 通过适当设计光纤结构可提高模场匹配程度, 减小连接器的插入损耗.

表 1 高非线性硫化物光纤参数

Table 1. The highly nonlinear As-Se chalcogenide glass fiber's parameters.




模式类型	模场分布	有效折射率	有效模场面积	非线性系数
		n	$A_{\text{eff},i}/\mu\text{m}^2$	$\gamma_i/\text{W}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$
LP_{01}		1.4444	143.4123	118.72
LP_{11}		1.4425	206.4894	82.5
LP_{21}		1.4400	236.8308	71.8

表 2 FM-NOLM 再生器设计参数

Table 2. The parameters of FM-NOLM Regenerator.

模式类型	多模光纤耦合器 模式耦合效率 ρ_i	辅助光源功率 $P_{y,i}/\text{dBm}$	少模光放大器增益 G_i/dB
LP ₀₁	0.84	23.73	1.99
LP ₁₁	0.50	22.62	5.83
LP ₂₁	0.18	25.50	10.86

多模光纤耦合器的模式耦合效率也与导波光模场分布密切相关^[13]. 对称光纤耦合器的耦合效率为 $\rho_i = \sin^2(\kappa_i l)$, 其中耦合系数^[25]

$$\kappa_i = \frac{k_0^2}{2\beta_i} \iint_{-\infty}^{+\infty} (n^2 - \bar{n}^2) F_i^* F_i dx dy,$$

n 和 \bar{n} 分别为光纤耦合和非耦合区的光芯折射率, β_i 和 F_i 分别为相应模式的传播常数和归一化模场分布, $k_0 = 2\pi/\lambda_0$ 为真空中波数, l 为光纤耦合区的长度. 选用 THORLABS 公司多模光纤耦合器的参数, 可仿真计算出三种模式的耦合系数比例关系, 当 LP₁₁ 的耦合效率为 $\rho_{11} = 0.5$ 时, 其他模式的耦合效率也就确定了, 计算结果如表 2 所列.

3.2 少模 PAM 全光再生器的功率转移曲线 (PTF)

下面以 PAM-4 全光再生器的设计为例, 计算少模 PAM 全光再生器的 PTF 曲线. 设再生器的工作波长为 1550 nm, 输入的不同模式 PAM 信号有相同的信号性能, 输入的 PAM-8 信号的电平间隔为 $\Delta P = 0.3W$, 其工作点电平为 0.225, 0.525, 0.825, 1.125 W, 即 $P_m = \Delta P(0.75 + i)$, 其中 ($i = 0, 1, 2, 3$). 对于每个模式的输入信号特性相同的情形, 为了使再生器工作点与输入信号电平对准, 需要同时优化设置辅助光功率 $P_{y,i}$ 和再生器中光放大器增益 G_i , 参数优化结果列于表 2 中. 通过改变 FM-EDFA 泵浦功率或在其输入端增加可调光衰减器的方式调节再生器中光放大器的增益. 当再生器工作在上述最佳参数下, 所得到的 PTF 曲线如图 2 所示, 它们的归一化输出功率差异源于非线性系数及耦合效率的模式依赖性. 由图 2 可明显看出, 每个模式的 PTF 曲线均可保持一致的可再生特性, 这种一致的可再生特性主要体现在如下两个方面: 1) 转移曲线具有多个平坦的台阶, 即各电平的再生性能及可再生范围均相同; 2) 可再生电平之间具有相等的间隔, 即相邻工作点之间的电平间隔保持不变.

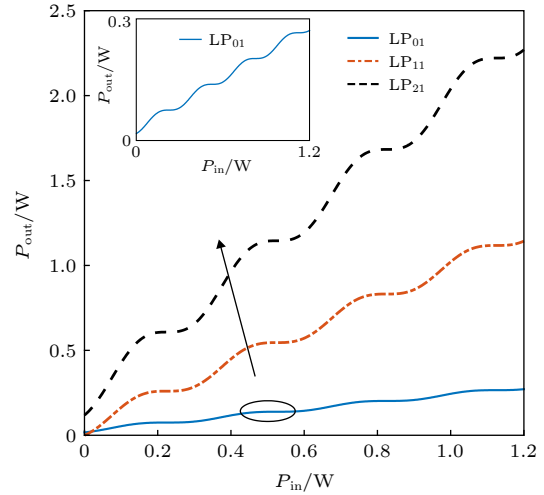


图 2 再生器输入输出功率转移曲线

Fig. 2. The regenerator's input and output power transfer function (PTF) curve.

3.3 少模 PAM 全光再生器的性能

为了说明少模 PAM 再生器的性能, 用噪声抑制比 (NRR) 参数来表征再生器的整形性能. 噪声抑制比定义为^[12]

$$\text{NRR} = \sigma_{\text{out}}^2 / \sigma_{\text{in}}^2, \quad (6)$$

式中归一化输入噪声 $\sigma_{\text{in}}^2 = E[(\sqrt{p_{\text{in}}} - \sqrt{p_{\text{in},w}})^2]$, p_{in} 为归一化输入信号功率, $p_{\text{in},w}$ 为工作点的归一化输入信号功率, $E[\cdot]$ 表示集平均; 类似地, 归一化输出噪声 $\sigma_{\text{out}}^2 = E[(\sqrt{p_{\text{out}}} - \sqrt{p_{\text{out},w}})^2]$, p_{out} 为归一化输出信号功率, $p_{\text{out},w}$ 为工作点的归一化输出信号功率.

下面, 通过在输入 PAM 信号的幅度上叠加零均值的高斯白噪声来模拟信号的劣化, 即输入信噪比^[26] $\text{SNR}_{\text{in}} = E[p_{\text{in},w}] / \sigma_{\text{in}}^2$, 其中 σ_{in}^2 为高斯白噪声的归一化输入功率. 仿真中采用 3.1 节给出的 FM-NOLM 参数, 输入 PAM-4 信号的工作点电平为 0.225, 0.525, 0.825, 1.125 W. 图 3(a) 和图 3(b) 分别给出了 LP₀₁, LP₁₁, LP₂₁ 三个模式的 NRR 再生性能随归一化输入噪声功率 σ_{in}^2 和输入信噪比 SNR_{in} 的变化曲线. 由图 3(a) 可知, LP₀₁ 模式的 NRR 性能与我们的单模 NOLM 再生器理论和实验结果趋势^[20] 基本类似, 存在的差异源于再生器结构取值参数的不同, 保证了本文仿真过程的可靠性.

在我们的单模全光 PAM 再生器实验中, 实际输入信号的信噪比可达到 24.8 dB, 对应的归一化输入噪声为 -25.3 dB. 因此, 我们可关注一下 $\text{SNR}_{\text{in}} =$

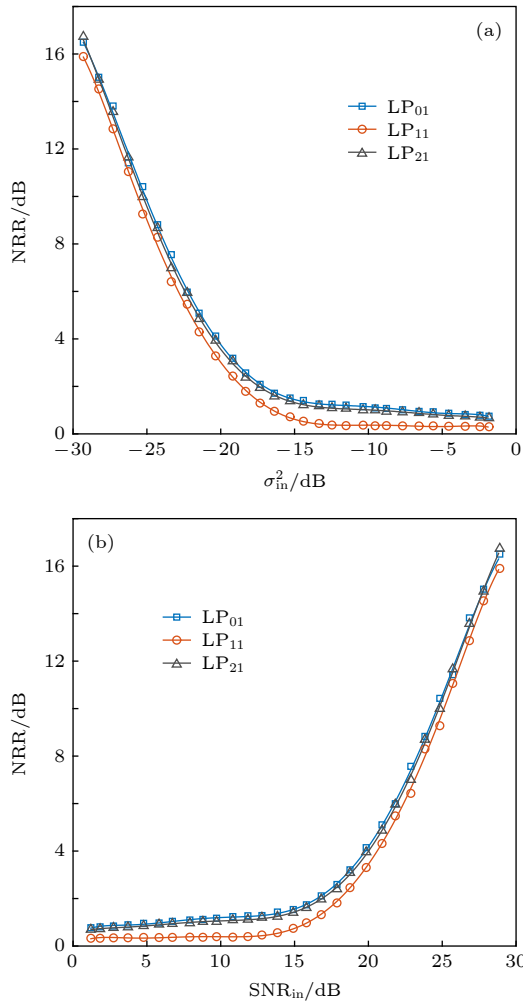


图 3 LP_{01} , LP_{11} , LP_{21} 三个模式的 NRR 再生性能随 (a) 归一化输入噪声功率 σ_{in}^2 和 (b) 输入信噪比 SNR_{in} 的变化曲线

Fig. 3. The NRR regeneration performance of LP_{01} , LP_{11} , and LP_{21} with (a) normalized input noise power (b) input signal-to-noise ratio.

25 dB 时的再生性能, 由图 3(b) 可知, LP_{01} , LP_{11} , LP_{21} 三种模式的 NRR 分别为 10.4, 9.3, 10.0 dB, 其中 LP_{11} 模式的 NRR 略低些. 此时, LP_{01} , LP_{11} , LP_{21} 三种模式再生前后的噪声分布如图 4 所示, 相比于图 4 中输入噪声分布, 三种模式再生后的噪声明显得到抑制, 如图 4(a)—图 4(c) 所示. 在其他输入 SNR 条件下也可以进行类似分析.

由图 3 可以看出, FM-PAM 再生性能随着输入 SNR 的变化分为三个区域: 1) 当输入 SNR 小于 15 dB 时, LP_{01} , LP_{11} , LP_{21} 三种模式的噪声抑制比基本上保持在 1.07, 0.35 和 0.94 dB, 其差异源于非线性系数及耦合效率的模式依赖性; 2) 当 $15 \text{ dB} \leq SNR_{in} \leq 20 \text{ dB}$ 时, NRR 开始急剧增加, 对输入 SNR 的变化比较敏感, $SNR_{in} = 20 \text{ dB}$ 时三种

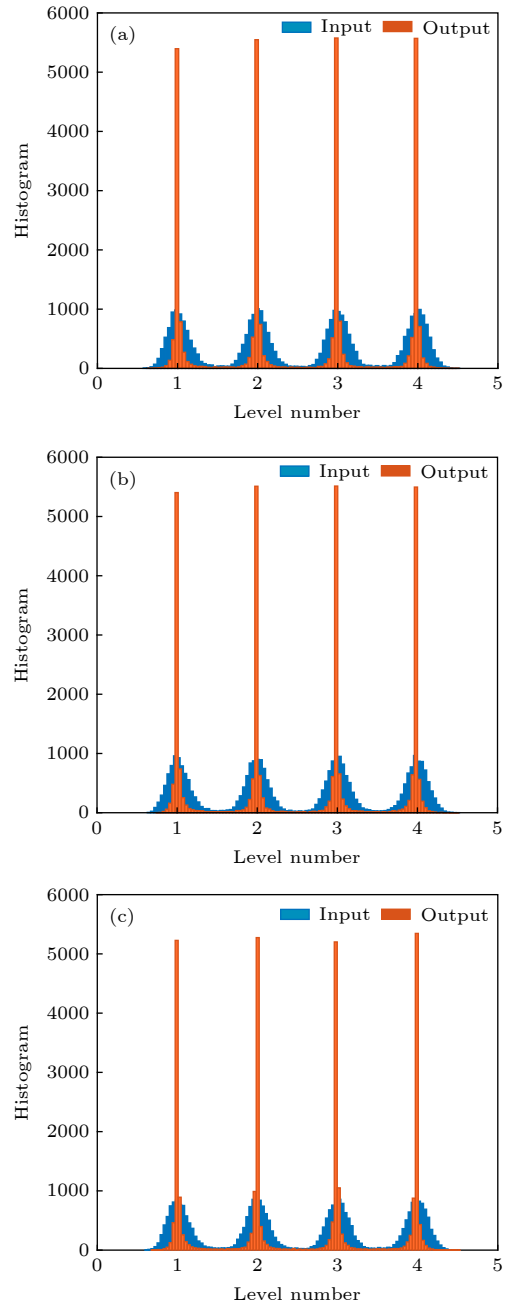


图 4 LP_{01} , LP_{11} , LP_{21} 再生前后电平功率分布直方图 (a) LP_{01} ; (b) LP_{11} ; (c) LP_{21}

Fig. 4. The each level power histogram before and after regeneration of LP_{01} , LP_{11} and LP_{21} : (a) LP_{01} ; (b) LP_{11} ; (c) LP_{21} .

模式的 NRR 均可超过 3 dB; 3) 输入 SNR 大于 20 dB 时, NRR 随输入信噪比线性增加, 其斜率约为 1.2. 因此, 结合实际情况, 该 FM-PAM 再生器的理想输入 SNR 工作范围约在 20—25 dB, 三种模式的 NRR 相差不超过 1.1 dB. 由以上分析可知, 相比现有的再生器方案, 本文方案的优点在于: 1) 针对空分复用系统应用, 提出了少模光纤再生

器, 并具有多电平再生功能; 2) 本文提出的少模再生器对每个电平都有一致均匀的再生能力, 理论上可实现任意电平数的再生 (实际受到注入功率的限制); 3) 该再生方案构建技术基本不受带宽限制, 可与波分复用 (WDM) 技术相结合将其扩展到波长域。

4 结 论

本文提出一种基于 FM-NOLM 的全光 PAM 再生器方案, 描述了其工作原理和具体设计过程; 采用 COMSOL 软件对硫化物高非线性光纤的模式特性和多模耦合器的模式特性进行仿真, 并用于组成 FM-NOLM, 仿真计算出 LP_{01} , LP_{11} , LP_{21} 光纤模式的非线性系数及耦合效率; 计算出少模 PAM 全光再生器每个模式的 PTF 曲线; 最后以 LP_{01} , LP_{11} , LP_{21} 三个光纤模式的 PAM-4 信号为例, 仿真分析了少模 PAM 全光再生器的再生性能。仿真结果表明, 当输入信噪比约大于 20 dB 时, 三种模式的噪声抑制比均可超过 3 dB, 并随着输入信噪比线性增加, 其斜率约为 1.2; 在相同输入 SNR 条件下, 三种模式的噪声抑制比相差不大, 不超过 1.1 dB。

参考文献

- [1] Berdague S, Facq P 1982 *Appl. Opt.* **21** 1950
- [2] Ryf R, Randel S, Fontaine N K, Palou X 2013 *39th European Conference and Exhibition on Optical Communication London, UK, September 22–26, 2013 We2 D.1*
- [3] Sakamoto T, Saitoh K, Saitoh S, Abe Y, Takenaga K, Urushibara A, Wada M, Matsui T, Aikawa K, Nakajima K 2018 *44th European Conference and Exhibition on Optical Communication Roma, Italy, September 23–27, 2018 p1*
- [4] Filipe M F, Costa S C, Sygletos S, Ellis A D 2019 *J. Lightwave Technol.* **37** 989
- [5] Rademacher G, Luis R S, Puttnam B J, Maruyama R, Aikawa K, Awaji Y, Furukawa H, Petermann K, Wada N 2019 *J. Lightwave Technol.* **37** 1273
- [6] Ryf R, Randel S, Gnauck A H, Bolle C, Sierra A, Mumtaz S, Esmacelpour M, Burrows E C, Essiambre R, Winzer P J, Peckham D W, Mccurdy A H, Lingle R 2012 *J. Lightwave Technol.* **30** 521
- [7] Sidelnikov G, Redyuk A, Ferreira F, Sygletos S 2017 *Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference Munich, Germany, June 25–29, 2017 p1*
- [8] Tavares J S, Pessoa L M, Salgado H M 2017 *J. Lightwave Technol.* **35** 4072
- [9] Ip E, Li M J, Bennett K, Huang Y K, Tanaka A, Korolev A, Koreshkov K, Wo od, William, Mateo E, Hu J Q, Yano Y 2014 *J. Lightwave Technol.* **32** 790
- [10] Mamyshev P V 1998 *24th European Conference on Optical Communication Madrid, Spain, September 20–24, 1998 p475*
- [11] Kakande J, Bogris A, Slavik R, Parmigiani F, Syvridis D, Petropoulos P, Richardson D J 2010 *36th European Conference and Exhibition on Optical Communication Torino, Italy, September 19–23, 2010 p1*
- [12] Stiller B, Onishchukov G, Schmauss B, Leuchs G 2014 *Opt. Express* **22** 1028
- [13] Alan E W, Ahmad F, Fatemeh A, Cao Y W, Amirhossein M A, Ahmed A, Liao P C, Zou K H, Ari N W, Moshe T 2019 *J. Lightwave Technol.* **37** 21
- [14] Wen F, Geng Y, Liao M L, Wu B J, Lu L J, Zhou L J, Zhou X Y, Qiu K, Chen J P 2017 *Asia Communications and Photonics Conference Guangdong, China, November 10–13, 2017 p1*
- [15] Zhou X Y, Wu B J, Wen F, Zhang H C, Zhou H, Qiu K 2014 *Opt. Express* **22** 2937
- [16] Ryf R, Randel S, Gnauck A H, Bolle C, Essiambre R, Winzer P J, Peckham D W, Mccurdy A, Lingle R 2011 *Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference Los Angeles, USA, March 6–10, 2011 p1*
- [17] Wen F, Wu B J, Qiu K 2019 *Opt. Express* **27** 19940
- [18] Song Y 2018 *M. S. Thesis* (Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China) (in Chinese) [宋阳 2018 硕士学位论文 (成都: 电子科技大学)]
- [19] Sygletos S, Weerasuriya R, Ibrahim S K, Gunning F, Phelan R, O'Gorman J, O'Carroll J, Kelly B, Bogris A, Syvridis D, Lundstroin C, Andrekson P, Parmigiani F, Richardson D J, Ellis A D 2010 *12th International Conference on Transparent Optical Networks Munich, Germany, June 27–July 1, 2010 p1*
- [20] Guo B, Wen F, Wu B J, Sun F, Qiu K 2019 *IEEE Access* **7** 149666
- [21] Wen F, Tsekrekos C P, Geng Y, Zhou X Y, Wu B J, Qiu K, Turitsyn S K, Sygletos S 2018 *Opt. Express* **26** 12698
- [22] Wan F, Wu B J, Cao Y M, Wang Y H, Wen F, Qiu K 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 20182129 (in Chinese) [万峰, 武保剑, 曹亚敏, 王瑜浩, 文峰, 邱昆 2019 物理学报 **68** 20182129]
- [23] Jiang X R, Wu B J, Guo B, Wen F, Qiu K 2020 *Opt. Commun.* **458** 124840
- [24] Li M, Liao Y B 1999 *J. Optoelectron. Laser* **5** 480
- [25] Wu B J, Qiu K 2013 *Fiber-optical Information Processing Principles and Technology* (Beijing: Science Press) pp152–154 (in Chinese) [武保剑, 邱昆 2013 光纤信息处理原理及技术 (北京: 科学出版社) 第152—154页]
- [26] Cao Y M, Wu B J, Wan F, Qiu K 2018 *Acta Phys. Sin.* **6** 7094208 (in Chinese) [曹亚敏, 武保剑, 万峰, 邱昆 2018 物理学报 **6** 7094208]

Research on few-mode PAM regenerator based on nonlinear optical fiber loop mirror*

Wang Yu-Hao Wu Bao-Jian[†] Guo Biao Wen Feng Qiu Kun

(Key Laboratory of Optical Fiber Sensing and Communication, Ministry of Education, School of Information & Communication Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

(Received 9 December 2019; revised manuscript received 6 February 2020)

Abstract

In recent years, the demand for network bandwidth has increased significantly, and the capacity of wave division multiplexing (WDM) systems has reached the nonlinear Shannon limit. In order to adapt to the development of future networks, space division multiplexing (SDM) technology attracts more and more attention. In this paper, we put forward a novel structure of pulse amplitude modulation(PAM) regenerator based on few-mode nonlinear optical fiber loop mirror (FM-NOLM) for the first time, and theoretically analyze the working principle for few-mode reshaping. It can regenerate degraded PAM signals and improve transmission performance in SDM system. The detailed design steps of the regenerator are given, in which the sulfide highly nonlinear fiber and multimode coupler are used to build up the FM-NOLM and their mode characteristics are simulated by COMSOL software. The parameters of the regenerator are determined by taking the few-mode optical fiber supporting LP_{01} , LP_{11} , and LP_{21} modes as an example, and then the power transfer function (PTF) curve of each mode for PAM signals is calculated. We simulate and analyze the noise reduction ratio (NRR) performance of the few-mode regenerator for PAM-4 signals, and compare with the case of single mode fiber. Our simulation shows that: (1) for each spatial mode of PAM signal, all regenerative levels have the same consistent power transfer performance; (2) for the input signal-to-noise ratio (SNR) greater than 20 dB, the NRR for each mode can exceed 3 dB, and increase with the input SNR at the slope of about 1.2; (3) the NRR difference between the three modes is less than 1.1 dB for the same input SNR. In order to illustrate the reshaping function of the regenerator, we also present the power distribution histograms for PAM-4 signals before and after regeneration when the input SNR is 25 dB. This scheme proposed here has some advantages over the existing regenerators in the applicability for the long-haul SDM system with high spectral efficiency and regeneration of any level number of PAM signals in theory due to its uniform multi-level regeneration function, but also is capable of being extended to the wavelength domain for higher transmission capacity.

Keywords: few-mode fiber, all-optical regeneration, nonlinear fiber loop mirror, noise reduction ratio

PACS: 42.65.-k, 42.81.-i, 42.79.Hp

DOI: 10.7498/aps.69.20191858

* Project supported by the National Key R&D Program of China (Grant No. 2018YFB1801003) and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61671108).

[†] Corresponding author. E-mail: bjwu@uestc.edu.cn