

可实现完美相位保持的 OPC-NOLM 全光幅度再生

郭飏, 武保剑*, 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, 四川 成都 611731

摘要 针对现有相位保持幅度再生方案仍然存在残余相位扰动的问题, 提出光学相位共轭器辅助的非线性光纤环形镜 (OPC-NOLM) 方案, 该方案可实现多电平全光幅度再生功能, 具有相位扰动几乎为零的完美相位保持能力。以 16 阶正交幅度调制 (16QAM) 信号为例, 仿真了 OPC-NOLM 再生方案性能。研究表明, 在输入信噪比为 15 dB 时, 与不使用 OPC 的单一非线性光纤环形镜 (NOLM) 情形相比, 所提方案的噪声抑制比提高了 3.8 dB。

关键词 光纤光学; 全光再生; 非线性光环境; 相位保持; 幅度再生; 多级调制格式

中图分类号 O437.4 **文献标志码** A

DOI: 10.3788/AOS0306001

1 引言

随着现代通信网络的快速发展, 大容量、高速率的传输已成为现代通信系统的主要需求。高阶调制信号可以提高频谱效率, 但容易受到各种串扰和放大器自发辐射 (ASE) 噪声的干扰^[1-2]。全光再生技术对于抑制信号劣化和提高光信噪比 (OSNR) 有着相当重要的作用^[3]。全光再生意味着在光域中直接处理光信号, 其应用范围从非相干通信系统的二进制开关键控 (OOK) 格式到相干通信系统的正交相移键控 (QPSK) 和正交幅度调制 (QAM) 等阶调制格式。

全光幅度再生或相位再生方案可以通过光学非线性效应实现, 具有代表性的有非线性光纤环形镜 (NOLM)、马赫-曾德尔干涉仪 (MZI)、相敏放大器 (PSA)、半导体光放大器 (SOA) 等结构^[4-12], 这些结构大多以全光幅度再生为目标。多电平幅度再生应尽可能避免增加信号相位噪声, 实现相位保持的幅度再生 (PPAR)^[13]。已提出的 PPAR 方案主要有非线性放大环镜 (NALM)、光纤参量放大器 (FOPA) 及其级联结构等^[13-16]。本课题组也提出了一些改进的 PPAR 方案, 包括级联 MZI、级联 NOLM、Att-NALM、片上 MZI 结构等^[17-23]。上述诸多方案有一个共同的特点, 就是再生过程中仍存在着一定的残余相位扰动 (大于 4.4°)。此外, 全光幅度再生或相位再生方案也有采用光学相位共轭器 (OPC) 级联两个全光幅度再生器的方案^[18], 其中 OPC 将前面再生器输出的信号进行相位

共轭, 用于补偿 OPC 之后再再生器引入的相位偏移。这种方案的缺点是成本高和结构复杂, 不仅需要两套再生器件, 还需要 OPC 匹配前后再生器的光功率。

最近, 本课题组对内嵌 MZI 的 NOLM 结构的相位保持再生性能进行了实验验证^[24], 本文在此基础上提出一种 OPC 辅助的 NOLM (OPC-NOLM) 方案, 利用 NOLM 结构的反射端信号来增强功率转移曲线的阶梯性, 同时将相位扰动降低到接近 0, 从而实现完美相位保持的多电平幅度再生。该方案的最大优点是只需要一套全光再生器件, 结构相对简单。以 16 阶正交幅度调制 (16QAM) 信号为例, 仿真了 OPC-NOLM 再生方案性能。研究结果表明, 在输入信噪比为 15 dB 时, 与不使用 OPC 的单一 NOLM 结构相比, 本文所提方案的噪声抑制比提高了 3.8 dB。接下来推导 OPC-NOLM 再生器的光场转移函数, 分析实现完美相位保持的条件; 通过优化 OPC-NOLM 再生器的参数, 实现 PPAR 功能; 仿真 16QAM 信号的再生性能, 并与不使用 OPC 的单一 NOLM 结构进行比较。

2 OPC 辅助的全光 NOLM 再生方案

根据相位保持的机理, 在 NOLM 的全光再生器基础上, 通过引入 OPC, 提出 OPC-NOLM 相位保持幅度再生方案, 如图 1 所示^[24]。其中, NOLM 光纤环内包含两个耦合器, 分成两条光路。在 NOLM 结构的输入端口有一个光环行器, 用于将反射光从中分离出来。分离出来的反射光会进入一个 OPC 模块, 实现反射光

收稿日期: 2022-05-27; 修回日期: 2022-07-16; 录用日期: 2022-08-02; 网络首发日期: 2022-08-12

基金项目: 国家自然科学基金 (61975027, 62001086)

通信作者: *bjwu@uestc.edu.cn

的相位共轭。OPC 可通过四波混频等非线性效应实现,能够将一束光的相位进行共轭变换^[19-23]。借助于 OPC 和光环形器,可同时利用 NOLM 的透射光和反

射光,并根据共轭光场与原信号光场的干涉原理,消除幅度再生中的相位扰动,从而实现几乎没有相位扰动的完美相位保持再生功能。

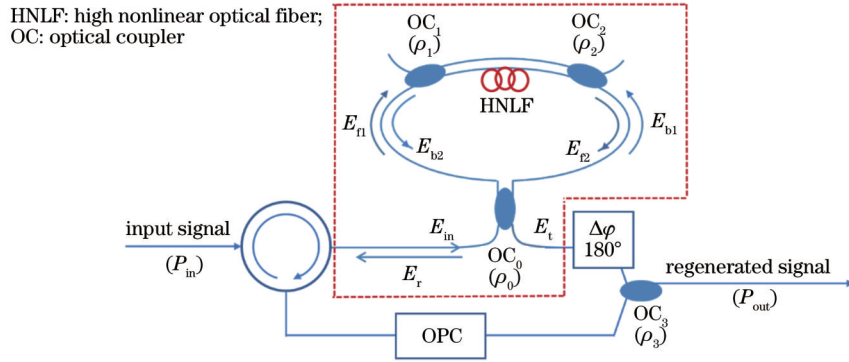


图1 OPC-NOLM相位保持幅度再生方案

Fig. 1 OPC-NOLM-based phase-preserving amplitude regeneration scheme

就 NOLM 结构而言,再生器的输入光场 E_{in} (功率为 P_{in}) 通过耦合器 OC_1 进入光纤环并被分成了两束光,顺时针和逆时针方向的光场 E_{n1} 和 E_{b1} 可分别表示为

$$\begin{cases} E_{n1} = i\sqrt{\rho_0} E_{in} \\ E_{b1} = \sqrt{1-\rho_0} E_{in} \end{cases}, \quad (1)$$

式中: ρ_0 是耦合器 OC_0 的耦合比。

两束光分别经过两个耦合器 OC_1 和 OC_2 , 以及一段高非线性光纤 (HNLF), 在 HNLF 中发生以自相位调制为主的非线性效应。两束光经过上述器件后的输出光场 E_{t2} 和 E_{b2} 分别为

$$\begin{pmatrix} E_{t2} \\ / \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} i\sqrt{\rho_2} & \sqrt{1-\rho_2} \\ \sqrt{1-\rho_2} & i\sqrt{\rho_2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & t_f \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i\sqrt{\rho_1} & E_{n1} \\ \sqrt{1-\rho_1} & E_{b1} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

$$\begin{pmatrix} E_{b2} \\ / \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} i\sqrt{\rho_1} & \sqrt{1-\rho_1} \\ \sqrt{1-\rho_1} & i\sqrt{\rho_1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & t_b \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i\sqrt{\rho_2} & E_{b1} \\ \sqrt{1-\rho_2} & E_{n1} \end{pmatrix}, \quad (3)$$

式中: “/” 表示不关注此处的输出量值; ρ_1 和 ρ_2 分别是耦合器 OC_1 和 OC_2 的耦合比; t_f 和 t_b 分别为 HNLF 对顺时针和逆时针传输光场的复透射系数, 其中 $t_f = \exp(-\alpha L) \exp[i\gamma P_{in}(1-\rho_0)(1-\rho_1)L_{eff}]$, $t_b = \exp(-\alpha L) \exp[i\gamma P_{in}\rho_0(1-\rho_2)L_{eff}]$, α , γ 和 L 分别为 HNLF 的衰减系数、非线性系数和长度, $L_{eff} = [1 - \exp(-\alpha L)]/\alpha$ 。

上述光场重新在 OC_0 处干涉耦合, NOLM 结构的透射光场和反射光场 E_t 和 E_r 分别为

$$\begin{pmatrix} E_t \\ E_r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} i\sqrt{\rho_0} & \sqrt{1-\rho_0} \\ \sqrt{1-\rho_0} & i\sqrt{\rho_0} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{t2} \\ E_{b2} \end{pmatrix}. \quad (4)$$

反射光光场由 OPC 进行共轭变换, 透射光则会经过一个相移角度 $\Delta\varphi=180^\circ$ 的移相器, 最后由耦合器 OC_3 干涉耦合输出, 形成再生器的输出光场:

$$E_{out} = \sqrt{1-\rho_3} E_r^* - i\sqrt{\rho_3} E_t, \quad (5)$$

式中: ρ_3 为耦合器 OC_3 的耦合系数; E_r^* 表示 NOLM 结构反射端光场的共轭。

根据式(1)~(5), 可以得到整个 OPC-NOLM 再

生器的输出光场为

$$E_{out} = E_{in} R A \exp(-i\varphi_b) + E_{in} R B \exp(i\varphi_b) + E_{in} R A \exp(-i\varphi_f) - E_{in} R C \exp(i\varphi_f) - 2E_{in} A - E_{in} B + E_{in} C, \quad (6)$$

式中: φ_b 和 φ_f 分别为 NOLM 结构中逆时针和顺时针光路的非线性相移, 并且 $\varphi_b = \gamma P_{in}\rho_0(1-\rho_2)L_{eff}$, $\varphi_f = \gamma P_{in}(1-\rho_0)(1-\rho_1)L_{eff}$; $A = \sqrt{(1-\rho_0)\rho_0\rho_1\rho_2\rho_3}$; $B = \rho_0\sqrt{\rho_1\rho_2(1-\rho_3)}$; $C = (1-\rho_0)\sqrt{\rho_1\rho_2(1-\rho_3)}$; $R = \sqrt{\frac{(1-\rho_1)(1-\rho_2)}{\rho_1\rho_2}} \exp(-\alpha L)$ 。

针对式(6), 对如下两种情况进行讨论:

1) 当 $\rho_3=0$ 即 $A=0$ 时, 由式(6)可以得到单一 NOLM 结构的透射端输出光场:

$$E_t = E_{in} [RB \exp(i\varphi_b) - RC \exp(i\varphi_f) - B + C]. \quad (7)$$

这种 NOLM 结构作为再生器使用时, 通常逆时针进入 HNLF 的功率远大于顺时针进入 HNLF 的功率^[13], 故 $\varphi_b \gg \varphi_f$ 。因此, 式(7)中第一项会带来较大的残余相位扰动, 即使比其他类型的再生器带来的扰动

要小^[25]。

2) 为了实现相位保持条件, 需要控制相位扰动较大的项。当 $A=B$ 即 $\rho_0=\rho_3$ 时, 式(6)可简化为

$$E_{\text{out}} = 2E_{\text{in}}RA \cos \varphi_b + E_{\text{in}}RA \exp(-i\varphi_f) - E_{\text{in}}RC \exp(i\varphi_f) - 3E_{\text{in}}A + E_{\text{in}}C. \quad (8)$$

由式(8)可知, 相位扰动来自 $E_{\text{in}}RA \exp(-i\varphi_f)$ 和 $E_{\text{in}}RC \exp(i\varphi_f)$ 这两项。将式(8)改写为如下形式:

$$E_{\text{out}} = E_{\text{in}}M \left[1 + \frac{R(A+C)}{M} \exp(i\varphi_f) \right], \quad (9)$$

式中: $M = 2RA \cos \varphi_b - 2R \cos \varphi_f - 3A + C$ 。

根据式(9), 从幅度和相位两个方面分析相位保持的机理。就幅度而言, 要求 $\left| \frac{R(A+C)}{M} \right| \ll 1$, 意味着

再生器的输出中非线性相移所占的比例远低于线性相移的部分, 此时输出光场相位受到的扰动会非常小, 这也是单一 NOLM 结构的相位保持幅度再生机理。在相位方面, 要求非线性相移 φ_f 趋近于 0, 这需要再生方案本身能够补偿非线性相移。本文提出的 OPC-NOLM 再生方案中, 上述两种相位保持机理均有涉及, 从而实现接近于 0 的相位保持效果^[6-7]。下面将通过数值仿真验证 OPC-NOLM 再生器比单一 NOLM 结构具有更优的相位保持能力。

3 OPC-NOLM 再生器的结构参数优化

为了实现良好相位保持的幅度再生效果, 需要对 OPC-NOLM 全光再生器的如下关键参数进行优化, 主要包括 OPC-NOLM 结构中耦合器的耦合比 ($\rho_0 \sim \rho_3$) 和高非线性光纤的长度 L 。具体优化步骤如下:

1) 根据 NOLM 结构的相位保持机理, 非线性相移项对应的幅度应足够小, 要求耦合比 ρ_0 应尽可能接近于 1, 这里选择 $\rho_0 = 0.99$ 。

2) 由获得式(8)的条件可知, $\rho_3 = \rho_0 = 0.99$; 同时要减小非线性相移 φ_f , 则 ρ_1 也尽可能接近于 1, 不妨选定实验室常用的最大值 $\rho_1 = 0.995$ 。

3) 耦合比 ρ_1 和 ρ_2 影响 NOLM 结构的功率转移特性, 为了易于获得阶梯型功率转移曲线, 通常取 $\rho_2 = 0.5$ ^[9]。

4) 根据实验室所用高非线性光纤参数 (衰减系数 $\alpha = 0.7 \text{ dB/km}$ 和非线性系数 $\gamma = 10.8 \text{ W} \cdot \text{km}^{-1}$)^[26], HNLFF 长度可优化为 $L = 1.5 \text{ km}$ 。

将上述结构参数代入式(7)和(8), 可分别计算单一 NOLM 结构的透射功率 $P_t = |E_t|^2$ 和 OPC-NOLM 再生器的输出功率 $P_{\text{out}} = |E_{\text{out}}|^2$, 它们随输入功率 P_{in} 的变化曲线如图 2 所示, 并且单一 NOLM 结构的功率转移函数 (PTF) 曲线已经由实验得到了验证^[24]。由图 2 可以看出, 加入 OPC 对 PTF 曲线的影响不是特别

大, 具体来说 OPC-NOLM 再生器的输出 PTF 曲线的阶梯性略好些。与 OPC-NOLM 再生器的 PTF 曲线的三个较平坦台阶对应的输入功率 (工作点) 分别为 0.66 W、1.43 W 和 2.24 W。幅度再生时, 输入高阶调制信号的各个电平均功率应与相应工作点对准。

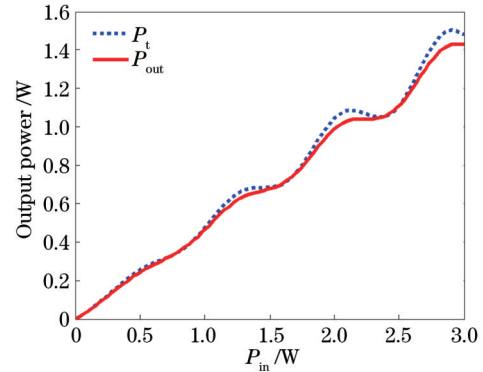


图 2 OPC-NOLM 再生器和单一 NOLM 结构的 PTF 曲线
Fig. 2 PTF curves for OPC-NOLM regenerator and single NOLM structure

根据 OPC-NOLM 再生器的输出光场的表达式 [式(8)], 还可以得到相位转移曲线。图 3 画出了 OPC-NOLM 再生器和单一 NOLM 结构输出光场的相位扰动随输入光功率的变化, 相位扰动 $\Delta\varphi$ 表示再生结构的输出信号的相位与输入信号的相位之间的角度差, $\Delta\varphi_{\text{out}}$ 和 $\Delta\varphi_t$ 分别表示 OPC-NOLM 再生器和单一 NOLM 结构的相位扰动。由图 3 可知, 单一 NOLM 结构仍有一个小的相位扰动, 而 OPC-NOLM 再生器的输出相位扰动始终为 0。可见, 本文提出的 OPC-NOLM 再生器可以实现完美相位保持的全光幅度再生。

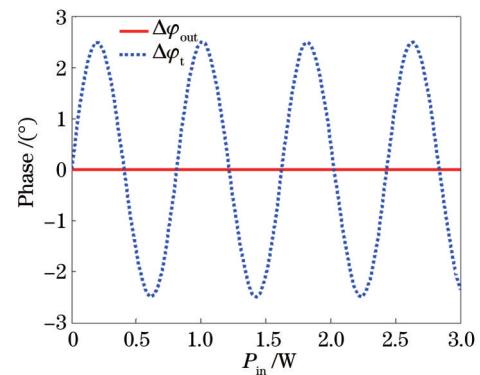


图 3 OPC-NOLM 再生器和单一 NOLM 结构的相位保持性能
Fig. 3 Phase preserving performance of OPC-NOLM and single NOLM regenerators

4 OPC-NOLM 再生器对 16QAM 信号的再生

为了进一步验证 OPC-NOLM 再生器的性能, 使用 OptiSystem 软件搭建了一个全光再生仿真系统, 如

图 4 所示, OPC-NOLM 再生器部分由 Matlab 程序执行, 其结构参数仍采用第 3 节给出的优化数据, 包括耦合比、光纤长度、损耗系数、非线性系数、工作点功率等参数。此外, 仿真中所用 16QAM 调制信号的速率为 50 Gbit/s, 光接收机的功率控制在 10 dBm。图 4 中 1550 nm 的连续光源和随机序列发生器分别与 IQ 调制器进行光电连接, 产生 16QAM 光信号。通过掺铒

光纤放大器(EDFA)和可调衰减器使 16QAM 信号光功率与 OPC-NOLM 全光再生器的工作点匹配。同时, 利用 EDFA 产生的 ASE 噪声来劣化 16QAM 光信号, 用于调节信号的信噪比。再生后的输出光信号由光接收机接收, 用于分析再生器输出信号的质量。对于高阶调制信号, 使用误差矢量幅度(EVM)参量来衡量信号质量, 即 M_{EV} 。

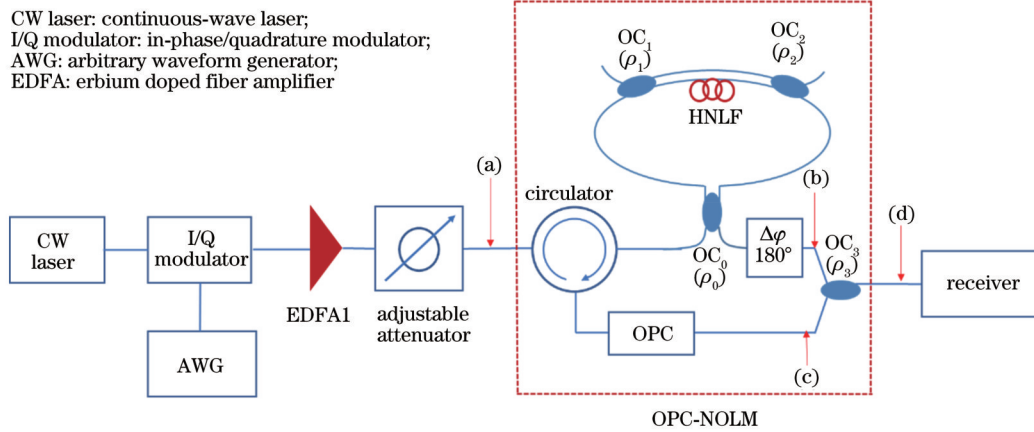


图 4 16QAM 信号再生仿真系统
Fig. 4 Simulation system for 16QAM signal regeneration

本文将 NOLM 结构等效为广义的 MZI 结构^[27]进行仿真, 此时的 MZI 上下臂具有相同的结构。为了表明相位保持幅度再生的仿真过程, 给出了图 4 中(a)~

(d) 4 个位置的 16QAM 星座图仿真结果, 如图 5 所示。图 5(a) 为输入再生器的劣化信号星座图, 信噪比为 12 dB, $M_{EV}=13.7\%$; 图 5(b) 为单一 NOLM 结构透射

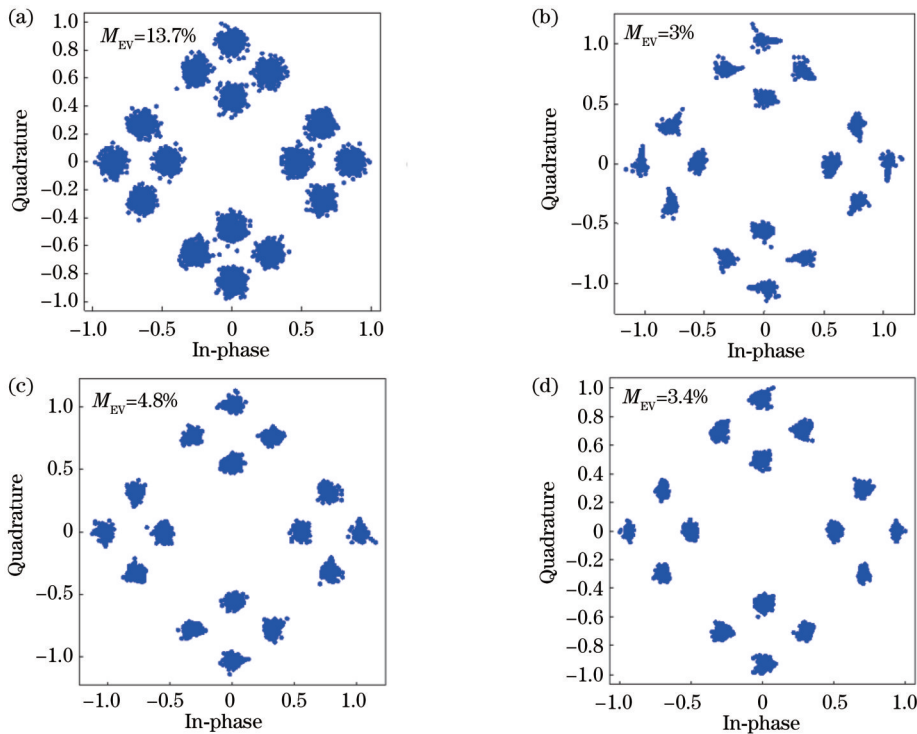


图 5 输入信噪比为 12 dB 时再生结构中 4 个位置的星座图。(a) 输入再生器的劣化信号; (b) 单一 NOLM 结构透射端的信号; (c) 单一 NOLM 结构反射信号经过 OPC 结构的信号; (d) OPC-NOLM 再生器输出的信号

Fig. 5 Constellation diagrams at four points in regeneration structure with input signal-to-noise ratio of 12 dB. (a) Degraded signal input to regenerator; (b) transmission signal from single NOLM structure; (c) reflected signal of single NOLM structure through OPC structure; (d) output signal of OPC-NOLM regenerator

端的信号星座图, $M_{EV}=3\%$; 图 5(c) 为单一 NOLM 结构反射信号经过 OPC 结构的信号星座图, $M_{EV}=4.8\%$; 图 5(d) 为整个 OPC-NOLM 再生器输出的信号星座图(再生信号), $M_{EV}=3.4\%$ 。比较图 5(a)、(b) 可知, NOLM 结构的透射端输出的星座图已经完成了幅度再生的功能, 并伴随有部分相位扰动。比较图 5(b)、(c) 可知, 经过 OPC 单元的信号幅度再生的效果不及单一 NOLM 透射端的输出, 但两者的相位扰动的方向正好相反, 它们干涉耦合后的幅度再生效果得到保留, 相位扰动相互抵消, 从而实现了完美的相位保持幅度再生。由图 5(d) 可知, 再生后星座点的离散程度明显降低, 再生前后星座点的平均相位扰动只有 0.002° 。

再生前后信号的质量变化还可以用噪声抑制比(NRR)参数 R_{NR} 来衡量, 它定义为再生前和再生后高阶调制信号的 M_{EV} 值之比^[17]。改变劣化信号的输入信噪比, 仿真比较 OPC-NOLM 再生器的输入和输出 M_{EV} 值, 得到相应的 R_{NR} 曲线, 如图 6 所示, $R_{SN,in}$ 为再生器的输入信噪比。由图 6 可以看出, 当输入信噪比大于 12 dB 时, OPC-NOLM 再生器的 R_{NR} 曲线随输入信噪比的增加开始缓慢变化。为了便于比较, 图 6 还给出单一 NOLM 结构的 R_{NR} 性能, 可以看出: OPC-NOLM 再生器总是比单一 NOLM 结构有更好的噪声

抑制性能; 当输入信噪比为 15 dB 时, 前者的 R_{NR} 高出后者 3.8 dB。

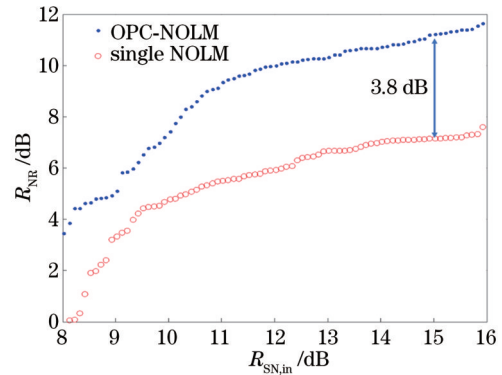


图 6 OPC-NOLM 再生器和单一 NOLM 结构的再生性能比较
Fig. 6 Comparison of regeneration performance between OPC-NOLM regenerator and single NOLM structure

为了更进一步展示所提出的再生方案的优越性, 表 1 列出了类似非线性再生器结构所支持的幅度再生电平数及其相位保持性能, 可以看出本文所提出的 OPC-NOLM 结构不仅支持多个电平的幅度再生, 在相位保持性能方面也实现了几乎无扰动的完美相位保持, 这是其他结构不具有的优势。

表 1 几种再生结构的相位保持效果比较

Table 1 Comparison of phase preserving characteristics of several regenerative structures

Type	Regenerated signal	PTF	Phase preserving	Phase / ($^\circ$)
NOLM-nested MZI ^[28]	256QAM	Uniform multiple levels	Phase regeneration	—
aNOLM ^[13]	8QAM	2 regenerative levels	Yes	17.18
Conj-NOLM ^[18]	16QAM	3 regenerative levels	Yes	8.8
Att-NALM ^[23]	16QAM	3 regenerative levels	Yes	6.3
MZI-nested NOLM ^[24]	QPSK	2 regenerative levels	Yes	3.8
On-chip MZI ^[17]	16QAM	3 regenerative levels	Yes	3.8
OPC-NOLM	16QAM	3 regenerative levels	Yes	0.002

5 结 论

提出一种 OPC-NOLM 方案, 该方案可将相位扰动减小到接近 0, 从而实现完美相位保持的多电平幅度再生。推导了 OPC-NOLM 再生器的输出光场公式, 从幅度和相位两个角度分析了再生器的相位保持机理。根据再生器的优化结构参数, 计算了 OPC-NOLM 再生器的 PTF 曲线和相位扰动性能, 并与单一 NOLM 结构进行了比较。针对 16QAM 信号, 搭建了 OPC-NOLM 全光再生仿真系统, 所得结果表明了 OPC-NOLM 再生方案比单一 NOLM 结构有更好的噪声抑制性能。

参 考 文 献

[1] Carena A, Curri V, Poggiolini P, et al. Maximum reach versus transmission capacity for terabit superchannels based on 27.75-Gbaud PM-QPSK, PM-8QAM, or PM-16QAM[J]. IEEE

Photonics Technology Letters, 2010, 22(11): 829-831.

- [2] 王轩力. 收发机噪声对非线性补偿光纤通信系统的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(23): 2306010.
Wang X L. Influence of transceiver noise on nonlinearity-compensated optical transmission systems[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(23): 2306010.
- [3] Mamyshev P V. All-optical data regeneration based on self-phase modulation effect[C]//24th European Conference on Optical Communication. ECOC '98 (IEEE Cat. No. 98TH839 8), September 20-24, 1998, Madrid, Spain. New York: IEEE Press, 1998: 475-476.
- [4] Kong X J, Wu B J, Zhou X Y, et al. Design of all-optical multi-level regenerators based on Mach-Zehnder interferometer[J]. Optics Communications, 2016, 380: 377-381.
- [5] Bottrill K R H, Kakarla R, Parmigiani F, et al. Phase regeneration of QPSK signal in SOA using single-stage, wavelength converting PSA[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(2): 205-208.
- [6] Wen F, Tsekrekos C P, Geng Y, et al. All-optical multilevel amplitude regeneration in a single nonlinear optical loop mirror [J]. Optics Express, 2018, 26(10): 12698-12706.
- [7] 卢行, 武保剑, 万峰, 等. 时钟抽运光纤再生器的动态转移特

- 性研究[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(9): 090603.
- Lu H, Wu B J, Wan F, et al. Research on dynamic transfer characteristics of clock-pumped fiber regenerators[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(9): 090603.
- [8] Perentos A, Fabbri S, Sorokina M, et al. QPSK 3R regenerator using a phase sensitive amplifier[J]. Optics Express, 2016, 24(15): 16649-16658.
- [9] 蒋尚龙, 武保剑, 孙凡, 等. 多电平全光幅度再生器的整形特性[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(5): 052303.
- Jiang S L, Wu B J, Sun F, et al. Reshaping characteristics of multilevel all-optical amplitude regenerators[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(5): 052303.
- [10] Slavik R, Parmigiani F, Kakande J, et al. All-optical phase and amplitude regenerator for next-generation telecommunications systems[J]. Nature Photonics, 2010, 4(10): 690-695.
- [11] Sorokina M. Design of multilevel amplitude regenerative system[J]. Optics Letters, 2014, 39(8): 2499-2502.
- [12] 董毅, 赵尚弘, 李勇军, 等. 基于级联 SOA 结合两级偏移滤波的波长保持型星上全光再生方案[J]. 光学学报, 2015, 35(5): 0506008.
- Dong Y, Zhao S H, Li Y J, et al. Wavelength-shift-free optical regeneration on satellite using cascading SOA with two-stage offset filter[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(5): 0506008.
- [13] Roethlingshoefer T, Richter T, Schubert C, et al. All-optical phase-preserving multilevel amplitude regeneration[J]. Optics Express, 2014, 22(22): 27077-27085.
- [14] Lali-Dastjerdi Z, Galili M, Mulvad H C H, et al. Parametric amplification and phase preserving amplitude regeneration of a 640 Gbit/s RZ-DPSK signal[J]. Optics Express, 2013, 21(22): 25944-25953.
- [15] Lakoba T I, Vasilyev M. On multi-channel operation of phase-preserving 2R amplitude regenerator[J]. Optics Communications, 2014, 322: 114-117.
- [16] Roethlingshoefer T, Onishchukov G, Schmauss B, et al. Cascaded phase-preserving multilevel amplitude regeneration[J]. Optics Express, 2014, 22(26): 31729-31734.
- [17] Guo B, Wu B J, Wang Y X, et al. On-chip Mach Zehnder interferometer-based all-optical amplitude regenerator for optical 16-QAM signals[J]. Optics Express, 2021, 29(17): 27683-27695.
- [18] Wen F, Wu B J, Qiu K, et al. Conjugate nonlinear-optical loop mirror(Conj-NOLM)-based phase-preserving multilevel amplitude regenerator[J]. Optics Express, 2019, 27(14): 19940-19949.
- [19] 孟天晖, 于晋龙, 王菊, 等. 基于色散位移光纤中四波混频效应的 2×40 Gb/s 全光 3R 再生系统[J]. 光学学报, 2012, 32(8): 0806004.
- Meng T H, Yu J L, Wang J, et al. 2 × 40 Gb/s all-optical 3R regeneration system using four-wave mixing in dispersion shifted fiber[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(8): 0806004.
- [20] 陈俊名, 郭晓洁. 基于正常色散硫系波导的宽可调谐中红外频谱转换[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(3): 0323003.
- Chen J M, Guo X J. Widely tunable mid-infrared spectral translation in chalcogenide waveguide with normal dispersion[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(3): 0323003.
- [21] 张定梅, 蒋再富. 相位共轭光反馈下半导体环形激光器的动力学[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(19): 1919001.
- Zhang D M, Jiang Z F. Dynamics of semiconductor ring laser subject to phase conjugate optical feedback[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(19): 1919001.
- [22] Guo B, Wu B J, Wen F, et al. All-optical phase-preserving amplitude regeneration of highorder modulated signals based on Mach-Zehnder interferometers[C]//Photonics for Energy 2019, November 11-14, 2019, Wuhan, China. Washington, D. C.: Optica Publishing Group, 2019: JW4A.11.
- [23] Zhang S Q, Wu B J, Sun F, et al. Optimization method for universal NOLM-based phase-preserving amplitude regenerator with application to Att-NALM scheme[J]. Optics Communications, 2020, 475: 126188.
- [24] Guo B, Wu B J, Wen F, et al. Phase-preserving principle of all-optical regenerators with applications to MZI-nested NOLM structure[J]. Optics Express, 2022, 30(12): 20175-20184.
- [25] Gordon J P, Mollenauer L F. Phase noise in photonic communications systems using linear amplifiers[J]. Optics Letters, 1990, 15(23): 1351-1353.
- [26] Guo B, Wen F, Wu B J, et al. All-optical multilevel amplitude regeneration based on polarization-orthogonal continuous-wave-light-assisted nonlinear-optical loop mirror (PC-NOLM) subsystem[J]. IEEE Access, 2019, 7: 149666-149671.
- [27] Pottiez O, Ibarra-Escamilla B, Kuzin E A. Large amplitude noise reduction in ultrashort pulse trains using a power-symmetric nonlinear optical loop mirror[J]. Optics & Laser Technology, 2009, 41(4): 384-391.
- [28] Sorokina M, Sygletos S, Ellis A, et al. Regenerative Fourier transformation for dual-quadrature regeneration of multilevel rectangular QAM[J]. Optics Letters, 2015, 40(13): 3117-3120.

All-Optical OPC-NOLM Amplitude Regeneration for Intact Phase Preservation

Guo Biao, Wu Baojian*, Wen Feng, Qiu Kun

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

Abstract

Objective Amid the rapid development of modern communication networks, high-order modulation formats, such as quadrature phase shift keying (QPSK) and quadrature amplitude modulation (QAM), have been used widely for large capacity and high-speed data transmission. However, compared with binary signals, high-order modulated signals are easily degraded by channel crosstalk noise and amplified spontaneous emission (ASE) noise. In this case, all-optical regeneration technology can help improve the optical signal-to-noise ratio (OSNR) directly in the optical domain. All-

optical amplitude or phase regeneration can usually be achieved by some optical structures with nonlinear effects, such as the nonlinear optical loop mirror (NOLM), the Mach-Zehnder interferometer (MZI), the phase-sensitive amplifier (PSA), and the semiconductor optical amplifier (SOA). In the process of all-optical amplitude regeneration, the conversion of amplitude noise to phase perturbation is always adopted to a certain extent. Therefore, phase-preserving amplitude regeneration (PPAR) schemes have been put forward for QPSK and QAM signals. Nevertheless, phase perturbation (larger than 3.8°) remains. The objective of the paper is to present an intact PPAR scheme without phase perturbation.

Methods This paper proposes an optical phase conjugator (OPC)-assisted NOLM (OPC-NOLM) PPAR scheme, in which the reflected signal from the NOLM unit is used to achieve a stepwise power transfer function (PTF) and the OPC is utilized to compensate for the phase perturbation. The optical field output from the OPC-NOLM regenerator is derived and used to analyze the phase-preserving mechanism of the regenerator from the two aspects of amplitude and phase. The structural parameters of the OPC-NOLM regenerator are optimized by the PTF and phase perturbation curves. Then, an OPC-NOLM regenerator simulation platform for optical 16QAM signals is built to verify the intact PPAR performance of the proposed scheme by comparison with the NOLM scheme.

Results and Discussions According to the PTF and amplitude-to-phase conversion characteristics, the phase-preserving mechanism of the OPC-NOLM regenerator is analyzed from the two aspects of amplitude and phase. The results show that the proportion of nonlinear components in the OPC-NOLM regenerator has been kept as small as possible to achieve intact PPAR. The OPC compensates for the phase perturbation at the transmission end by using the phase of the reflecting end to reduce the phase perturbation of the final output to almost zero. The structural parameters of the OPC-NOLM regenerator are optimized, including those of the MZI-nested NOLM, the gain of the OPC, and the coupling ratios of the transmission and reflecting ends of the NOLM. The detailed steps are summarized in the paper. The optimized results show that the OPC-NOLM regenerator introduces a phase perturbation of 0.002° (Fig. 3), which is smaller than that of the NOLM structure (at least 4.4°) and the references (at least 3.8°). Regarding the OPC-NOLM regenerator, the intact phase preservation can be attributed to the suppression of the amplitude noise and the compensation for phase perturbation.

Then, a 16QAM coherent communication system is built to simulate and verify the PPAR performance of the OPC-NOLM regenerator. The parameter of noise reduction ratio (NRR) is defined as the ratio of the input error vector magnitude (EVM) of the OPC-NOLM regenerator to the output EVM of the regenerator. The variation in the NRR with the input SNR indicates that when the input SNR is 15 dB, the NRR of the OPC-NOLM regenerator is 3.8 dB higher than that of the NOLM structure (Fig. 6).

Finally, some relevant regeneration structures are listed in Table 1 for a comparison of their numbers of voltage levels available for amplitude regeneration related to the PTF and their phase-preserving performance. This table reveals that the OPC-NOLM structure proposed in the paper not only supports multi-level amplitude regeneration but also gains an advantage over other structures in phase preservation.

Conclusions To further eliminate the residual phase perturbation of the currently available PPAR schemes, this paper proposes a novel OPC-NOLM scheme capable of intact phase preservation for input signals. The optical field output from the OPC-NOLM regenerator is derived and then used to explain the phase-preserving mechanism of the regenerator from the two aspects of amplitude and phase. According to the PTF and phase transfer curves of the OPC-NOLM regenerator, this paper optimizes the structural parameters of the regenerator and calculates its phase perturbation (0.002°). With 16QAM signals as an example, the NRR performance of the OPC-NOLM regeneration scheme is simulated. According to the simulation results, the proposed scheme achieves an NRR 3.8 dB higher than that of the NOLM structure without the OPC under an input SNR of 15 dB.

Key words fiber optics; all-optical regeneration; nonlinear optical environment; phase preservation; amplitude regeneration; multi-level modulation format