

基于 SOA 全光偏振调制的双信道 PolSK 光传输系统

王陆唐 方捻* 王颖 黄肇明

(上海大学通信与信息工程学院特种光纤与光接入网省部共建重点实验室, 上海 200072)

摘要 提出一个新颖的采用两个级联半导体光放大器(SOA)作为独立全光偏振调制器实现双信道偏振态位移键控(PolSK)光传输系统方案,并进行了实验验证。从发射机端输出的 PolSK 光信号具有四个偏振态,构成了两个独立的二进制数据信道。各信道数据可以采用不同的码制,码率以及不同的时钟信号。该系统方案,提高了通信系统的比特-符号比以及频谱利用率;又由于 PolSK 光信号功率恒定,减小了光纤链路中非线性效应对光信号的影响提高了通信系统长距离数据传输能力;在接收机端实现了光信号的直接偏振检测,简化了接收机的设计和成本;又由于采用了稳偏接收模块使接收系统能够实现稳定信号接收。构成了基于本方案的实验系统,进行了一系列基础实验和性能测试。分别进行了 50 km, 80 km 以及 100 km 长距离光纤数据传输实验,实验结果表明所提出的系统方案是有效的。

关键词 光纤通信;偏振态位移键控;偏振复用/解复用;半导体光放大器

中图分类号 TN929.11

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS20092901.0138

Dual-Channel PolSK Optical Transmissions Using SOA-Based All-Optical Polarization Modulations

Wang Lutang Fang Nian Wang Ying Huang Zhaoming

(The Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Network, School of Communication & Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract We propose and experimentally demonstrate a novel dual-channel polarization shift-keying (PolSK) optical transmission system, in which two semiconductor amplifiers (SOAs) are cascaded as two individual all-optical polarization modulators for each channel. The formed PolSK signals have four states of polarization (SOP), constituting two orthogonal binary data channels. Each channel can independently transmit data streams with different formats, bit rates and clock signals. The transmitted PolSK signals can be directly detected, it greatly simplifies the design of the receiver and eventually reduces the system cost. With this scheme, the system capacity for data transmissions can be doubled. Furthermore, due to the constant optical power of PolSK signals, the transmission system can enhance its tolerance to nonlinear effects in the fiber link, increase its long-distance transmission capacity. The SOPs of received signals are easily tracked by using two polarization stabilizers in each branch of the receiver, respectively, in order to achieve a stable signal receiving. The experimental setup based on the proposed scheme was constituted and several basic experiments were carried out for investigating the system's performance. The long-distance data transmissions over 50 km, 80 km and 100 km fiber links, respectively, are carried out and the experimental results prove that the feasibility of our proposed scheme is validated.

Key words fiber-optics communication; polarization shift-keying; polarization modulation/depolarization; semiconductor optical amplifier

1 引言

偏振态位移键控技术(PolSK)利用光波偏振态的多样性和恒定的光功率,作为下一代高速光传输手段已经得到了广泛深入地研究^[1~4]。在另一方

面,为了增加通信信道以此来提高光系统的传输容量,一些新的概念和系统设计方案已经被提出。在这些研究成果中,为了提升系统的传输能力,光载波的一些参数,例如偏振态和相位等被利用通过信号

基金项目:国家自然科学基金(60577042)和上海市重点学科(T102)资助项目。

作者简介:王陆唐(1956—),男,博士,副研究员,主要从事光纤通信、混沌保密通信方面的研究。

E-mail:ltwang@mail.shu.edu.cn

* 通信联系人。E-mail:nfang@staff.shu.edu.cn

调制形成多级信号光^[5]。这些技术反映在多级直接检测 PolSK 系统方案^[6]以及 DPSK(差分相位位移键控)与 PolSK 技术相结合的系统设计方案中^[7]。然而在这些系统方案中,由于信号调制都是在电光领域而非全光领域中完成,这不仅仅限制了光传输系统性能的提高同时不可避免地增加了光传输系统设计的复杂性。进一步,这些系统方案还要求各信道中的传输信号必须具有内在关联性,如相同码制和码率以及相匹配的时钟信号,这将降低了系统应用的灵活性,极大地限制了 PolSK 技术在光通信领域中的推广应用。

最近几年,半导体光放大器(SOA)作为有源光器件在光通信、光信息处理领域中已经得到了广泛地应用^[8,9]。人们通过利用 SOA 的光非线性效应实现了包括光开关,波长转换器^[10,11]以及光逻辑模块等在内的多功能全光有源器件。在 SOA 诸多的光非线性效应中,通过 SOA 的交叉相位调制效应(XPM)和交叉增益调制效应(XGM)所组合形成的交叉偏振态调制效应(XPolM)是最为吸引人的非线性效应之一^[12~14]。该项调制技术可以直接用于

PolSK 系统实现全光信号的偏振调制。

本文从利用 SOA 非线性偏振调制效应实现全光信号调制出发,充分利用光波偏振态的多样性,提出一个新颖的采用双 SOA 作为全光调制器的双信道 PolSK 光通信系统方案。通过理论和实验研究表明该系统两个信道完全独立,传输数据不必具有内在关联性,可灵活选择不同的码制、码率以及时钟信号。接收部分采用直接检测方式大大简化了接收系统的设计和成本,同时还提高接收信号的处理速度。

2 系统方案及工作原理简介

双信道 PolSK 光传输系统结构如图 1 所示。在发射机部分,两个级联 SOA 组成一个二级偏振调制器。在各调制阶段,利用 SOA 的非线性偏振效应,实现抽运信号光对探测光的光-光交叉偏振态调制最终形成两个正交的 PolSK 信道。在接收机部分,通过偏振分束器(PBS)对光纤链路传输过来的双信道 PolSK 信号实现偏振解复用分离出两组独立的强度调制信号。在这个系统方案中,如何实现两组光信号的偏振复用和解复用是一个关键部分。

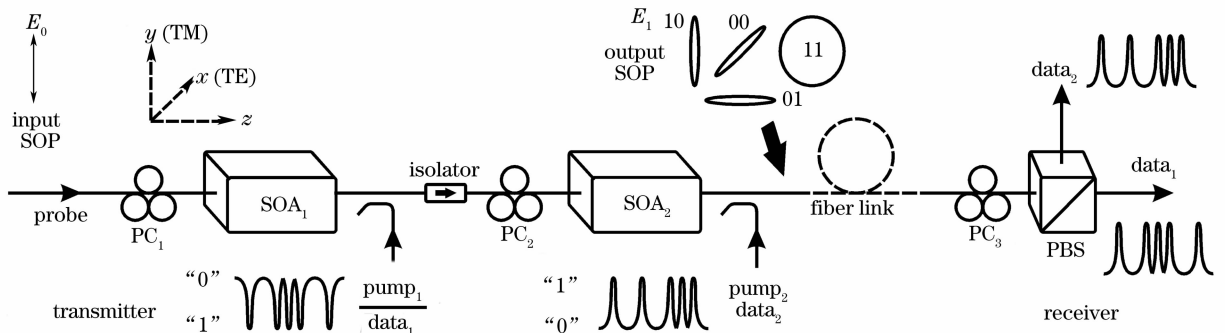


图 1 双信道 PolSK 光传输系统原理框图

Fig. 1 Schematic of proposed dual-channel PolSK optical transmission system

在连续探测光与信号调制抽运光共用光系统中,当探测光通过 SOA 时,由于两偏振分量的相位差发生改变,其偏振态将发生变化。从物理结构上来看,由于 SOA 波导结构上的不对称性,其固有的双折射率使得 TE 模和 TM 模产生不等同的相位变化^[15]。另一方面,当有强抽运光入射时,输入光子会导致 SOA 的有源波导载流子密度分布发生变化^[10];由于其 TE 模和 TM 模的微分折射率不相同,所对应的有效折射率也不相同,最终导致探测光的两模分量的相位差也发生变化。基本上,当一个线偏振光输入到 SOA 后,其输出光束将转变为一个椭圆偏振光。

设坐标系统中 z 方向为光波传播方向, x - y 平面与 SOA 的波导平面平行(如图 1 所示),即 x 轴对应于 SOA 波导中 TE 模方向, y 轴对应于 TM 模方向。输入探测光可分解为 TE 模与 TM 模两个正交偏振分量, E_x 和 E_y 。两个正交偏振分量通过 SOA 后其幅度变为 $G_x |E_x|$ 和 $G_y |E_y|$,同时两偏振分量间出现一个附加相位差 $\Delta\varphi$ 。这里 $G_{x/y}$ 分别表示 SOA 对 TE 模和 TM 模的增益。当所选用的 SOA 的增益与偏振无关时有 $G_x = G_y$ 。由于两正交偏振分量的振幅比值与相位差决定了光的偏振状态,对于探测光而言,其正交偏振分量的振幅比值在 SOA 放大前后保持不变,故其偏振态的变化主要是受附加相

位差所影响。不考虑 SOA 增益因素,在抽运光作用下,SOA 可单纯视为一个相位可调延迟器,采用琼斯矩阵表示为^[16]

$$\mathbf{J}_{\text{SOA}}(\Delta\varphi) = \begin{bmatrix} e^{j\frac{\Delta\varphi}{2}} & 0 \\ 0 & e^{-j\frac{\Delta\varphi}{2}} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 $\Delta\varphi$ 为 TE 模与 TM 模间总相位差,其中包含有 SOA 波导固有双折射所产生的相位差 $\Delta\varphi_A$ 和抽运光强所致的附加相位差 $\Delta\varphi_B$ 两部分。二进制调制时, $\Delta\varphi$ 具体表示为

$$\Delta\varphi = \begin{cases} \Delta\varphi_A & \text{low pump} \\ \Delta\varphi_A + \Delta\varphi_B & \text{high pump} \end{cases}, \quad (2)$$

其中^[15]

$$\Delta\varphi_B = \frac{2\pi L}{\lambda_C} [(\bar{n}_{\text{TM}} - \bar{n}_{\text{TE}})_{\text{high pump}} - (\bar{n}_{\text{TM}} - \bar{n}_{\text{TE}})_{\text{low pump}}], \quad (3)$$

式中 λ_C 为探测光波长, $\bar{n}_{\text{TE/TM}}$ 为沿长度为 L 的 SOA 波导平均后的 TE 模与 TM 模的有效折射率,是 SOA 波导载流子密度的函数也即为光功率的函数。当强抽运光入射时,将会引起 $\bar{n}_{\text{TE/TM}}$ 发生改变产生附加相移差从而导致传输光偏振状态发生改变。因此对于探测光而言,当通过 SOA 时,其偏振态被抽运光强所控制,即为交叉偏振调制。基于这个调制机理,通过改变抽运光强的大小可以获得所需要的输出探测光的偏振状态。

图 2 为一组在抽运光作用下,通过 SOA 后探测光偏振态变化的测量结果。图中椭圆探测光在抽运光强的作用下发生了旋转,并且旋转角度大小与抽运光强成正比。与晶体电光相位调制器不同的是,由 SOA 所构成的相位可调延迟器,抽运光强所导致的最大相移量 $\Delta\varphi_{\text{max}}$ 一般较小,对于长波导类型的 SOA $\Delta\varphi_{\text{max}}$ 不会超过 π ^[12]。

当抽运光为幅度位移键控(ASK)调制时,探测光的偏振态随之发生改变,不同的偏振状态对应于不同的调制数据也即为 PolSK 信号。基于这种偏振调制方式,当采用二进制调制时,一个 SOA 作为偏振调制器仅可获得一组 2 态 PolSK 信号光。要想获得一组 4 态 PolSK 信号就需要级联两个 SOA 构成一个二级光-光可调偏振调制器来实现。类似方法在文献[6]中可以找到,那里通过级联两个光-电相位调制器实现了 4 态 PolSK 信号的产生。两 SOA 间串接一个偏振控制器(PC₂),用于调整 SOA₂ 输入探测光的椭圆率以及方位角,以满足输出探测光特定偏振态的要求。所采用的偏振控制器

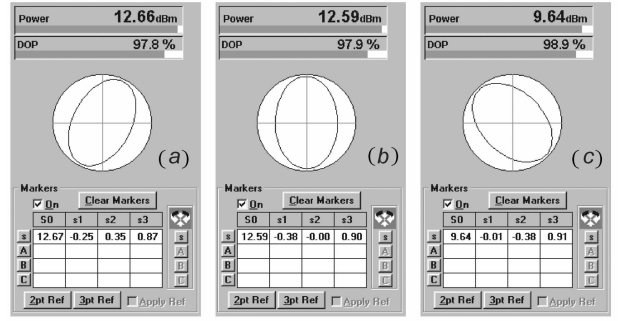


图 2 在不同抽运光功率作用下输出探测光的偏振态

Fig. 2 State of polarization (SOP) of the probe light under different pump powers

(a) -20.0 dBm; (b) -2.5 dBm; (c) 8.9 dBm

为全光纤巴比涅-索累补偿器(Babinet-Soleil),是一种旋转波片类型的偏振控制器^[17],它的琼斯矩阵表达式为

$$\mathbf{J}_{\text{PC}}(\Omega, \Gamma) = \begin{pmatrix} \cos \Omega & -\sin \Omega \\ \sin \Omega & \cos \Omega \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{j\Gamma/2} & 0 \\ 0 & e^{-j\Gamma/2} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cos \Omega & \sin \Omega \\ -\sin \Omega & \cos \Omega \end{pmatrix}, \quad (4)$$

式中 Ω 为快轴的方位角($0 \leq \Omega \leq \pi/2$), Γ 为相位延迟量($0 \leq \Gamma \leq 2\pi$)。整个二级偏振调制器由两个 SOA 和一个偏振控制器(PC₂)级联所组成,其传输琼斯矩阵 \mathbf{J}_{Modu} 为各器件矩阵乘积

$$\mathbf{J}_{\text{Modu}}(\Delta\varphi_1, \Delta\varphi_2) = \mathbf{J}_{\text{SOA}_2}(\Delta\varphi_2) \cdot \mathbf{J}_{\text{PC}_2}(\Omega, \Gamma) \cdot \mathbf{J}_{\text{SOA}_1}(\Delta\varphi_1), \quad (5)$$

功能上 \mathbf{J}_{Modu} 可被视作为一个偏振控制器,具有两个可控变量 $\Delta\varphi_1, \Delta\varphi_2$ 。 $\Delta\varphi_1$ 和 $\Delta\varphi_2$ 的取值范围由抽运光 1 和 2 的光强大小所决定,其绝对值大小与光强成正比关系^[15],而 Ω 与 Γ 为内部参量。当输入探测光偏振态被确定时,可根据所要求的输出偏振态以及 $\Delta\varphi_1$ 和 $\Delta\varphi_2$ 的取值范围来确定 Ω 与 Γ 参量的数值。一旦 Ω 与 Γ 被确定下来,输出偏振态将成为变量 $\Delta\varphi_1$ 与 $\Delta\varphi_2$ 的函数也即成为抽运光 1 和 2 光强的函数。输入探测光偏振态由偏振控制器 PC₁ 所控制。由于抽运光 1 和 2 均为幅度位移键控(ASK)调制,所获得的 4 态 PolSK 信号光在庞加莱球面上表现为 4 个分离星座点。设输入探测光为相对于 x 轴 45° 角倾斜的线偏振光,琼斯矢量表示为

$$\mathbf{E}_0 = \begin{bmatrix} E_{0x} \\ E_{0y} \end{bmatrix} = \sqrt{P} \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (6)$$

这里 P 为光强度,被定义为 $P = (|E_{0x}|^2 + |E_{0y}|^2)/2$ 。通过二级偏振调制器后输出探测光的琼斯矢量为

$$\mathbf{E}_1 = \begin{pmatrix} E_{1x} \\ E_{1y} \end{pmatrix} = \mathbf{J}_{\text{Modu}} \cdot \mathbf{E}_0 = \sqrt{2P} \cdot \begin{pmatrix} \cos \nu \cdot e^{-j\frac{\Delta}{2}} \\ \sin \nu \cdot e^{j\frac{\Delta}{2}} \end{pmatrix}, \quad (7)$$

这里 $\nu = \arctan(|E_{1y}|/|E_{1x}|)$ 为辅助角, Δ 为两正交偏振分量的相位差, 均为变量 $\Delta\varphi_1$ 和 $\Delta\varphi_2$ 函数。

当 PolSK 信号光通过光纤链路传输时, 由于光纤链路固有双折射率的随机分布影响, 信号光原有的偏振状态会被改变。对多态 PolSK 信号而言, 这种变化则表现为一种星座刚体的空间旋转现象, 即星座位置发生变化, 但各星座间的距离则保持不变。因此在接收机端可以通过一个偏振控制器(PC₃)将偏振态变化后的 PolSK 信号调整恢复到原有偏振状态, 然后再进行偏振检测。这里光纤链路结合 PC₃ 的传输琼斯矩阵表示为





$$\mathbf{J}_{\text{Fiber+PC}_3} = \sqrt{D} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (8)$$

这里 D 表示光纤链路的传输衰减。若采用以方位角 θ 和椭圆率角 ϵ 为参量的表达方式^[5], 4 态 PolSK 信号光可表示为

$$\mathbf{E}_2 = \begin{pmatrix} E_{2x} \\ E_{2y} \end{pmatrix} = \mathbf{J}_{\text{Fiber+PC}_3} \cdot \mathbf{E}_1 = \sqrt{2DP} \cdot \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos \epsilon \\ j \sin \epsilon \end{pmatrix}, \quad (9)$$

表 1 采用 PBS 实现 4 态 PolSK 信号的偏振解复用

Table 1 Depolarization of 4-PolSK signal with PBS

Data ₁		Data ₂	Orientation angle θ	Polarization state	PBS output electric field amplitude	
Positive phase	Reverse phase				level	Uprightness
1	0	0	$\pi/4$		$\sqrt{DP} \cos \epsilon$	$\sqrt{DP} \cos \epsilon$
0	1	0	0		$\sqrt{2DP} \cos \epsilon$	0
1	0	1	$\pi/2$		0	$\sqrt{2DP} \cos \epsilon$
0	1	1	Random value		\sqrt{DP}	\sqrt{DP}

从表 1 可以看出, 4 态 PolSK 信号通过 PBS 偏振解复用后, 数据 2 在垂直方向为同相输出, 正相数据 1 在水平方向为反相输出, 反相数据 1 则为同相输出。为了获取两路同相输出在发射机的调制部分采用数据 2 为正相而数据 1 为反相调制。这里应该指出, 在接收机端仅采用一个 PBS 对 4 态 PolSK 信号进行偏振解复用时, 并不能达到最佳检测效率。当数据 1 和 2 同时都为“0”码时, PBS 两端输出电场幅度并不都等于零, 而是 $\sqrt{DP} \cos \epsilon$, 两数据同时都

其中^[12]

$$\theta = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{2 \cos \nu \sin \nu}{\cos^2 \nu - \sin^2 \nu} \cos \Delta \right),$$

$$\epsilon = \frac{1}{2} \arctan (\sin 2\theta \tan \Delta). \quad (10)$$

在接收机端, 采用 PBS 作为偏振解复用器实现两信道分离, 同时将各信道 PolSK 信号转化为幅度位移键控信号后直接进行光电检测。功能上理想的 PBS 为两线检偏器的正交组合^[16], 其琼斯矩阵为

$$\mathbf{J}_{\text{PBS}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (11)$$

4 态 PolSK 信号光偏振解复用后, PBS 的水平输出与垂直输出电场振幅分量 ($e_{//}$, e_{\perp}) 为

$$\begin{pmatrix} e_{//} \\ e_{\perp} \end{pmatrix} = \Re \left[\sqrt{2DP} \cdot \begin{pmatrix} \cos \theta \cos \epsilon - j \sin \theta \sin \epsilon \\ \sin \theta \cos \epsilon + j \cos \theta \sin \epsilon \end{pmatrix} \right] = \sqrt{2DP} \cdot \begin{pmatrix} \cos \theta \cos \epsilon \\ \sin \theta \cos \epsilon \end{pmatrix}, \quad (12)$$

这里 \Re 表示取实部。要实现完整的 4 态 PolSK 信号的偏振解复用, PBS 的输入光电场应具备有 3 个方位角, 即水平 ($\theta = 0$)、垂直 ($\theta = \pi/2$) 和 45° 倾斜 ($\theta = \pi/4$)。实验中根据输入光的偏振状态((6)式)和 SOA 的具体物理参数, 确定抽运光 1 和 2 光强大小时同时调整偏振调制器 PC₁ 和 PC₂ 参数, 可获得多组 4 偏振状态的组合。表 1 为一组最佳信噪比的 4 偏振态组合。

为“1”码时, PBS 两端输出电场幅度并不都等于 $\sqrt{2DP} \cos \epsilon$ 而是 \sqrt{DP} 。实验所测量信号波形中也可以发现这种零电平抬起高电平下降的现象。这会减小检测信号消光比和导致信噪比下降。这个问题可在数据判别阶段适当提高“0”码的判别阈值来解决。最终两信道检测光电流分别表示为 $i_x \propto |e_{//}|^2$ 和 $i_y \propto |e_{\perp}|^2$, 其大小正比于所对应的 PBS 输出电场分量幅度的平方。

3 实验结果与讨论

图 3 为实验系统框图。图中,接收机系统由两个稳偏模块(POS103A, General Photonics),一个偏振控制器(PC₃)和一个3 dB光纤耦合器(OC)以及两个光电检测器所组成。检测输出被输入到数字示波器中观测并记录信号时间波形。稳偏模块的功能图显示在图 3 中的右下角虚线框内。该稳偏模块具有 2 ms 的相应时间和 $16 \pi/\text{s}$ 的变化速率足以跟踪长距离传输光纤扰动所引起的光信号偏振态的低速随机漂移,但对由偏振调制所引起的检测光偏振态的高速变化不敏感,实现 PolSK 信号的稳定接受。偏振控制器采用仅有两个可调部件的巴比涅-索累补偿器类型的姚氏全光纤偏振控制器(PolaRITE™, General Photonics)和 OC 组合,实现了两组稳偏模块的输入光功率相等但偏振态正交。实验系统所采用两个 SOA 均为同类型模块(SOA1013, COVEGA),具有大于 70 nm 以上的增益带宽和高的饱和输出(>14.8 dBm)以及低的增益偏振依存性(<0.8 dB)。SOA 有源波导长度为 1500 μm ,抽运光所引起的 TE/TM 双折射率可达 2×10^{-4} 的数量级,足以获得大于 $\pi/2$ 以上的模间相位差(见图 2 的测量结果)。考虑到 SOA 在长波长处具有高的微

分增益,探测光和两个抽运光的工作波长分别为 1530.3 nm 和 1539.8 nm 以及 1549.3 nm。探测光的输入、输出光功率分别为 -2 dBm 和 2.15 dBm。抽运光 1 被第一组数据(data₁)反相,抽运光 2 被第二组数据(data₂)同相强度调制,并经过光纤放大器放大,经由两个光循环器(circulator)输入到 SOA₁ 和 SOA₂ 中。抽运光 1,2 的输入光功率由各自的可变光衰减器(VOA)调节,输入平均光功率分别为 4 dBm 和 10 dBm。通过调节相应的偏振控制器来控制抽运光 1,2 的偏振状态,以保证最佳的偏振调制性能。在实验中,两组数据的码率均为 630 Mbps,具有独立可调时延和 RZ 或 NRZ 码制选择以及正反向电平输出。两抽运信号光的消光比都大于 20 dB。从 SOA₂ 输出的 4 态 PolSK 光信号在通过一个中心波长为 1530.3 nm,带宽为 1 nm 的光带通滤波器(OBPF,用以减少来自 SOA 的自发辐射噪声光)后,入射到一条具有 16.9 ps/(nm·km)色散系数的单模光纤链路中传输,在偏振接收机端被偏振解复用后形成两组独立的幅度位移键控信号(ASK)并被光电检测。最终检测信号通过数字示波器进行时间波形的观察和记录。

在一组实验中,采用了两组 64 比特长,RZ 码的

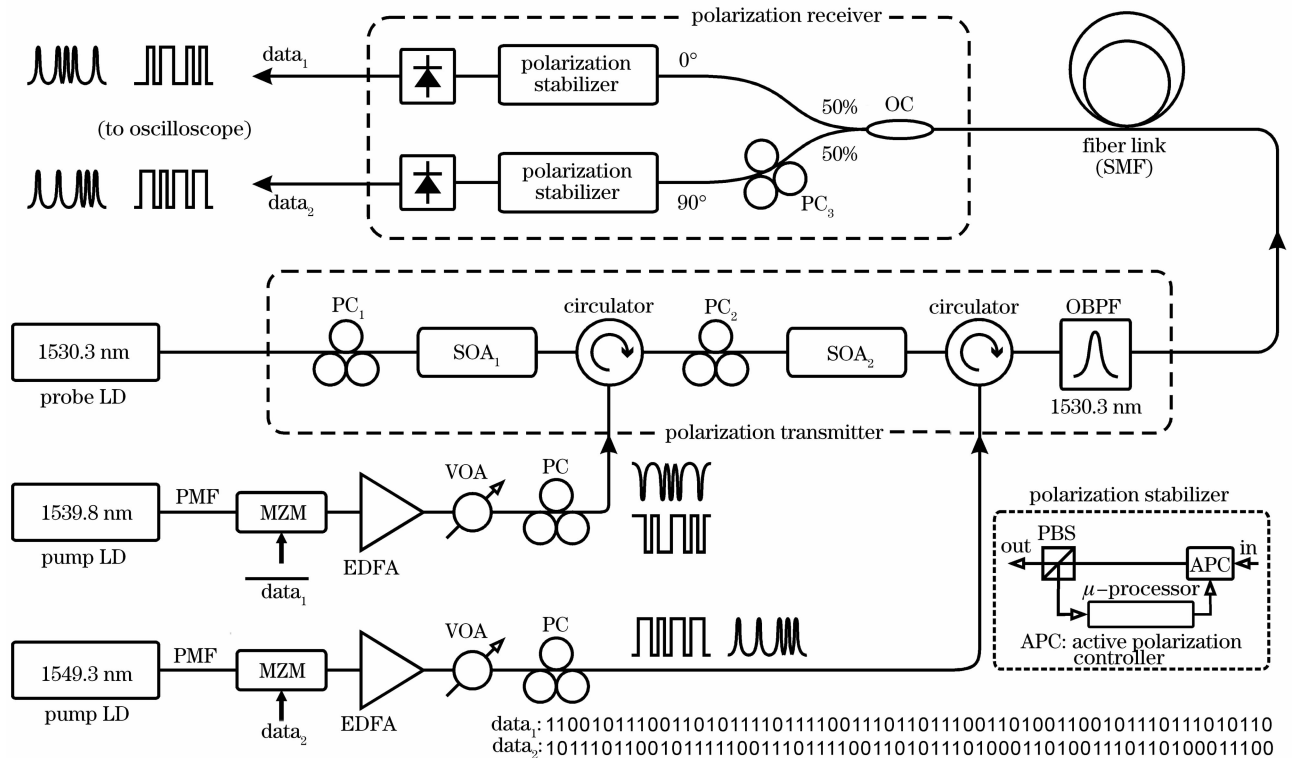


图 3 实验系统框图。PMF:保偏光纤;VOA:可调光衰减器;OBPF:光带通滤波器

Fig. 3 Experimental setup. PMF: polarization maintaining fiber; VOA: variable optical attenuator;

OBPF: optical band-pass filter; MZM: Mach-Zehnder modulator

二进制数据(数据码型显示在图 3 内)用于偏振调制。两组 PolSK 信号通过 1 km 长光纤的传输,在接收机端被偏振解复用后接收,波形显示在图 4 中。图中观察信号波形的时间窗口宽度设定为 100 ns。从这些实验结果中可以观察到信号的调制、偏振复用、传输以及最终被成功偏振解复用。在实验结果中还可以观察到,在调制信号和偏振解复用后的信号间存在一个时间差。这是由于抽运光的引导光纤所产生的附加光程所致。

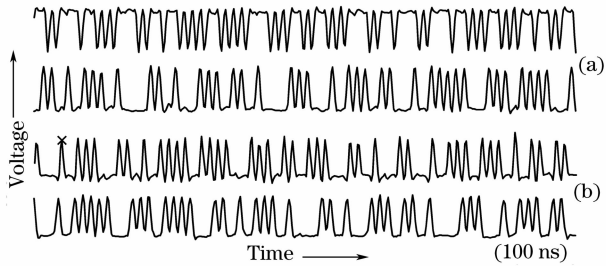


图 4 信号波形。(a) 调制信号波形;(b) 所接收的 PolSK 信号波形。上波形为信道 1,下波形为信道 2

Fig. 4 Signal waveforms. (a) modulation signals; (b) received PolSK signals. Up trace is channel 1 and low one is channel 2

实验调查了两 PolSK 信道间的交叉干扰影响问题。为了消除数据码型所带来的影响,采用连续改变数据 1 的时延,通过示波器观察信号波形的变化来判断信道交叉干扰的影响程度。如果信道间交叉干扰严重,随着数据 1 时延的改变应该可以看到两信道信号波形的变化。图 5 为在两个不同时延下所记录的信号时间波形。在实验结果中,观察两信道信号波形很难察觉到明显的波形失真。这代表两 PolSK 信道正交程度高具有低的信道交叉干扰影响。这个结果还显示了两信道是完全独立的,意味着可以同时传输两组不同码率或同码率不为同一时

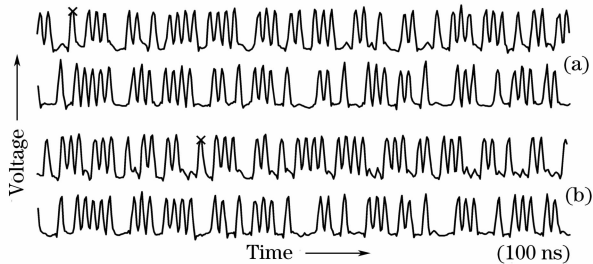


图 5 在不同 data₁ 时延条件下所记录的信号波形

(a) 1.64 ns; (b) 25.67 ns. 符号“×”为时延测定点

Fig. 5 Recorded signal waveforms with different time delays to the data₁. (a) 1.64 ns; (b) 25.67 ns. Mark “×” is used for delay time measurements

钟的数据流。

为了调查 XGM 效应对信道的影响,关闭了抽运光 2,仅保留抽运光 1 对 SOA₁ 的偏振调制,同时观察两信道信号波形,结果如图 6(a)所示。图中可以看到,虽然信道 2 调制被关闭,但信道 2 输出中仍保留较小幅度的波动(<10%),这是由于抽运光 1 通过 SOA₁ 的 XGM 效应调制了探测光强度所致。这个幅度波动在数据判断阈值以下不会引起大的测量误差。图 6(b)为两信道调制分别采用不同码制后的时间波形。这里信道 1 调制采用了 RZ 码,信道 2 采用了 NRZ 码。同样信道 1 也可以采用 NRZ 码而信道 2 为 RZ 码。实验结果表明两信道对不同码制的数据信号的具有兼容性。该实验结果结合图 5 的实验结果表明,传输系统具备有兼容两组不同的码制,不同的码率或不同步的数据信号的能力。

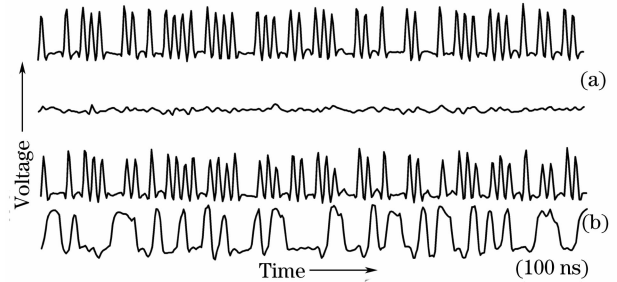


图 6 所记录的信号。(a) 信道 2 被关闭;

(b) 信道 1 为 RZ 码,信道 2 为 NRZ 码

Fig. 6 Measured signal waveforms. (a) Channel 2 was turned off; (b) channel 1 with RZ format and channel 2 with NRZ format

实验调查了系统长距离光纤传输性能。在该实验中,采用了两组 $2^{20}-1$ 长伪随机码作为调制信号。对于 50 km 长的光纤链路,采用了 RZ-RZ 码制。对于 80 km,采用了 RZ-NRZ 码制。分别测定了接收信号的眼图,结果显示在图 7(a),(b)中。对于 50 km 长距离光纤传输,大的张开度被观察到。这表示此时信号传输具有低的误码率,但对于 80 km 传输,眼图质量有所下降,这表明误码率上升。由于缺乏误码率测试设备,在目前实验阶段还不能给出具体的对应不同传输距离时的误码率测量结果。图 7(c)为 100 km 长距离光纤传输的实验结果。实验中由于未能获得较好的信号眼图,所以仅仅记录了长距离传输后信号的时间波形。在该实验中,信道 1 采用 NRZ 码,信道 2 采用了 RZ 码。从图 7(c)的实验结果来看,虽然不能获得可利用的信号眼图,但信号时间波形还是保留较好的完整性。长距

离光纤传输实验结果表明,当距离大于80 km以后,信号的眼图质量会明显下降。通过观察发现,信号的时间抖动(timing jitter)随着传输距离的增加而明显增强从而导致误码率上升,这已成为影响系统长距离传输性能的主要因素之一。以上实验结果表明,当该系统用于实际的长距离光纤数据传输时,接收信号的时钟恢复将变得非常有必要。

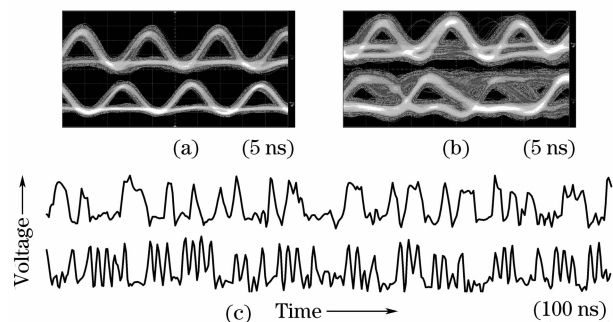


图7 长距离传输测量结果。眼图:(a) 50 km 传输(RZ-RZ码);(b) 80 km 传输(RZ-NRZ码);(c) 100 km 传输后信号波形(NRZ-RZ)

Fig. 7 Measured results of long-distance transmission. Eye diagrams: (a) after 50-km (RZ-RZ); (b) after 80-km (RZ-NRZ); (c) signal waveforms after 100-km transmission (NRZ-RZ)

4 结 论

提出了一个新颖的采用两个级联半导体光放大器(SOA)作为独立偏振调制器的双信道偏振态位移键控(PolSK)光传输系统方案。该方案利用SOA的交叉偏振态调制效应实现全光信号偏振调制。在发射机端,通过级联两个SOA形成一个二级偏振调制器实现了两个正交PolSK信道。在接收机端通过正交偏振检测实现了信号偏振解复用,并通过使用两组稳偏模块消除了由于接收信号偏振态随机波动所致的接收灵敏度的变化,实现了信号的稳定接收。对系统工作原理进行了简单的理论分析。并通过实验验证了系统工作原理。实验测试了SOA的非线性偏振调制特性、信道交叉干扰、码制兼容性和长距离光纤传输特性。实验结果表明该系统方案在抗干扰,提高数据传输码率和长距离通信传输等方面有独特的优越性。

参 考 文 献

1 S. Benedetto, P. Poggiolini. Theory of polarization shift keying modulation [J]. *IEEE Trans. Commun.*, 1992, **40**:708~721

2 S. Benedetto, R. Gaudino, P. Poggiolini. Direct detection of optical digital transmission based on polarization shift keying modulation [J]. *J. Sel. Areas Commun.*, 1995, **13**:531~542

3 A. Carena, V. Curri, R. Gaudino *et al.*. Polarization modulation in ultra-long haul transmission systems: a promising alternative to intensity modulation [C]. *Proc. Eur. Conf. Opt. Commun.*, (ECOC'98), *Tech. Dig.*, 1998. 429~430

4 Jiayu Fan, Zhaoming Huang, Lutang Wang. Duo-binary encoded polarization shift keying (PolSK) modulation in long haul optic transmission [C]. *SPIE*, 2003, **5281**:136~144

5 T. Kuri, K. Tsukamoto, *et al.*. Multiple polarization modulation (MPLM) system for coherent optical space communication [C]. *Global Telecommun. Conf., GLOBECOM'95, IEEE*, 1995, **3**:2003~2007

6 E. Hu, Y. Hsueh, K. Wong *et al.*. 4-level direct-detection polarization shift-keying (DD-PolSK) system with phase modulators [C]. *Proc. OFC*, 2003, paper FD2. 2003. 647~649

7 J. Comellas, J. M. Gene, J. Prat. Quaternary optical transmission system combining phase and polarization-shift keying [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(7):1766~1768

8 Wang Hua, Yao Minyu, Zhang Hongming *et al.*. Multi-wavelength fiber ring laser with semiconductor optical amplifier [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(11): 1502~1506

王 华,姚敏宇,张洪明等. 采用半导体光放大器的多波长光纤环形激光器[J]. *中国激光*, 2007, **34**(11): 1502~1506

9 Ding Yuan, Zhang Xinliang, Dong Jianji *et al.*. Improvement for all-optical logical and gate based on cascaded semiconductor optical amplifiers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(11): 1517~1521

丁 园,张新亮,董建绩等. 基于级联半导体光放大器实现全光逻辑与门的改进方案[J]. *中国激光*, 2007, **34**(11): 1517~1521

10 L. Qiang, M. J. Connelly. Signal-induced birefringence and dichroism in a tensile-strained bulk semiconductor optical amplifier and its application to wavelength conversion [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2005, **23**(12):4037~4045

11 Dong Jianji, Zhang Xinliang, Huang Dexiu. Experimental study of wavelength conversion at various modulation formats based on four-wave mixing in a semiconductor optical amplifier[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7): 1327~1332

董建绩,张新亮,黄德修. 基于半导体光放大器四波混频效应的多种调制格式的波长转换实验[J]. *光学学报*, 2008, **28**(7): 1327~1332

12 H. Soto, D. Erasme, G. Guekos. Cross-polarization modulation in semiconductor optical amplifiers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(8):970~972

13 Cheng Mu, Wu Chongqing, Zhao Rui *et al.*. All-optical fuffer based on polarization rotation in semiconductor optical amplifier [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(10): 1898~1902

程 木,吴重庆,赵 瑞等. 基于半导体光放大器偏振旋转的全光缓存器[J]. *光学学报*, 2008, **28**(10): 1898~1902

14 Zhang Zuxing, Sang Minghuang, Ye Zhiqing *et al.*. Multiwavelength fiber laser based on nonlinear polarization rotation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(4): 648~652

张祖兴,桑明煌,叶志清等. 基于非线性偏振旋转效应的多波长光纤激光器[J]. *光学学报*, 2008, **28**(4): 648~652

15 S. Diez, C. Schmidt, R. Ludwig *et al.*. Effect of birefringence in a bulk semiconductor optical amplifier on four-wave mixing [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, **10**(2):212~214

16 Edward Collett. *Polarized Light in Fiber Optics* [M]. SPIE Press, 2003. 77~82

17 H. G. Jerrard. Modern description of polarized light; matrix methods [J]. *Opt. and Laser Technol.*, 1982, **14**:309~319