

文章编号: 0258-7025(2009)Supplement 1-0086-07

双信道偏振态位移键控光传输系统的 交叉偏振调制特性研究

张 超 王陆唐 方 捻 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 基于级联半导体光放大器(SOA)的双信道偏振态位移键控(PolSK)光传输系统,以两种不同码型、码率和时延参数的数据调制光对系统的交叉偏振调制(XPolM)特性进行数值建模和仿真研究。研究结果表明双信道 PolSK 光传输系统的两偏振复用信道完全独立,能够同时传输两组具有不同类型、码率和时钟的数据信号,具有良好的双信道数据的偏振复用与解复用性能与已有实验相符。通过仿真研究观察到在高码率数据调制情况下,偏振调制信号光会出现码型效应以及信号光相位的时间变化所产生的复杂的频率啁啾现象。

关键词 光纤通信; 码型效应; 频率啁啾; 交叉偏振复用; 半导体光放大器

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL200936s1.0086

A Study of Cross-Polarization Modulation Characteristics of Dual-Channel PolSK Optical Transmission System

Zhang Chao Wang Lutang Fang Nian Huang Zhaoming

(The Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Network,

School of Communication & Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract In this paper, based on the dual-channel polarization shift-keying (PolSK) optical transmission system in which two cascaded semiconductor optical amplifiers (SOAs) are employed; the cross-polarization modulation (XPolM) characteristics of the system were studied using different code types, bit rates and time delays for the two data streams. The simulation results showed that the two polarization multiplexed channels of the system are completely independent, which can be used to transmit two data streams simultaneously with different code types, bit-rates and clock signals. Also the results showed that the system has good performances in the polarization multiplexing and de-multiplexing of the data, which are well agreed with those in our previous experimental system. Through the simulation, it was observed that the polarization-modulated signals at high bit-rate have complicated data pattern dependences and complicated optical frequency chirps which are resulted from the time varying of the phases of the optical signals.

Key words optical fiber communication; pattern dependence; frequency chirp; cross-polarization multiplexing; 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开始得到广泛的研究^[1~5]。另一方面,采

用增加信道的方法来增加光通信系统传输容量的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往往被利用通过多路数据信号调制形成

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

作者简介: 张 超(1985—),男,硕士研究生,主要从事光纤通信和 SOA 非线性等方面的研究。

E-mail: zhangchao85@shu.edu.cn

导师简介: 王陆唐(1956—),男,博士,副研究员,主要从事光纤通信、混沌保密通信和光纤传感等方面的研究。

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

多级信号光传输^[6,7]。

文献[8]提出了一个基于双 SOA 交叉偏振调制 (XPolM) 效应^[9] 的双信道 PolSK 光传输系统的设计方案。该方案利用 SOA 的交叉偏振调制效应,通过两组数据信号光(抽运光)调制对两个 SOA 进行交叉偏振调制形成一组双信道 4 态 PolSK 光信号,实现多路数据的偏振复用。在接收端采用一个偏振分束器(PBS)完成对双信道 4 态 PolSK 光信号的偏振解复用恢复出原来两路数据信号。建立了系统理论模型以及实验系统,并对该设计方案进行了数值仿真研究以及实际数据传输实验研究^[8,10]。研究结果证实该系统设计方案的有效性。

在先前实验与数值仿真研究中,由于实验条件的限制,采用的数据调制码率均不高。这限制了在高码率数据调制下对系统性能变化的了解。本文以文献[11]中所提出的理论模型为基础,采用 MatLab 软件建模,应用多类型调制信号进行数值仿真,对双信道 PolSK 光传输系统的偏振调制特性进行了调研。仿真结果表明,该系统的两个传输信道完全独立可以传输不同码率和码制的数据信号。另一方面,随着调制码率的增加,双信道 4 态 PolSK

光信号同样会出现码型效应导致检测信号消光比下降。仿真结果还揭示了在不同调制情况下,双信道 4 态 PolSK 光信号显现出复杂频率啁啾和相位变化。该研究结果为人们了解基于多重数据信号调制下 PolSK 信号光内在特性提供了一幅清晰图像,也为双信道 4 态 PolSK 光信号经过长距离光纤传输后波形出现失真提供了合理的理论解释依据。

2 工作原理与理论分析

双信道 PolSK 光传输系统原理框图如图 1 所示。系统由双信道 PolSK 信号发射机、光纤链路以及采用偏振分束器构造的偏振接收机所组成。发射机中包含了两个 SOA 作为相位调制器。两路幅度位移键控(ASK)输入信号光(抽运光)通过 SOA 的交叉偏振调制效应对探测光的偏振态进行调制形成一个双信道 4 态 PolSK 光信号实现两路信号的偏振复用。在接收机端通过 PBS 对通过光纤链路传输过来的双信道 4 态 PolSK 光信号进行偏振解复用分离出原来两路幅移键控(ASK)数据信号光。

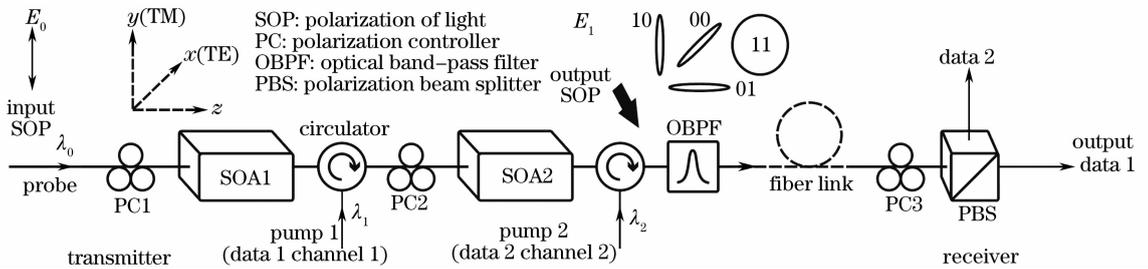


图 1 双信道 PolSK 光通信系统结构图

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

在系统仿真研究中,为了配合实际在实验系统中所使用的 SOA(型号 SOA1013,COVEGA),采用了文献[11]中所提出的 SOA 理论模型。SOA 各参数均采用文献中所提供的,仅将有源波导长度根据实际情况改为 1500 μm。该模型采用张应变有源介质结构通过导入载流子失衡因子 f 来平衡 TE 模与 TM 模间的增益差,从而获得 SOA 的增益偏振无关特性。由于张应变体结构的特殊性,SOA 有源波导具有不对称性结构产生出双折射效应。这造成通过波导光波的 TE 模与 TM 模的相位变化不等同。在连续探测光与信号调制抽运光共用光系统中,又由于输入抽运光通过交叉相位调制效应(XPM)使通过 SOA 的探测光的 TE 模与 TM 模的相位变化出现不对称性,从而导致探测光的偏振状态发生变化。

与偏振态变化相关联的探测光的相位变化 ϕ 可表示为

$$\phi = \phi_{TE} - \phi_{TM} = \frac{\alpha_{TE}\Gamma_{TE}g_{TE}L}{2\nu_{gTE}} - \frac{\alpha_{TM}\Gamma_{TM}g_{TM}L}{2\nu_{gTM}}, \quad (1)$$

式中 L 为波导长度, $\alpha_{TE/TM}$, $\Gamma_{TE/TM}$ 和 $g_{TE/TM}$ 以及 $\nu_{gTE/TM}$ 分别表示相应的 TE 模与 TM 模的线宽增强因子、限制因子和材料增益以及表征群速度。当有抽运光输入时,输入光功率的变化导致有源波导载流子密度分布发生变化,引起材料增益 $g_{TE/TM}$ 发生不同程度的变化从而使 ϕ 发生改变,这最终导致探测光的偏振态随相对应抽运光功率的变化而发生改变,达到偏振态调制效果。当采用两个级联的 SOA 分别被载有不同数据的抽运光调制时,输出探测光

就具有多种偏振态的变化实现双信道数据的偏振复用,构成一个双信道 4 态 PolSK 信号光,其中每个偏振分量代表一个特定的数据组合,如图 1 所示。双信道 4 态 PolSK 信号光在邦加球上映射出一个星座图像。该星座结构是刚性的,即星座图内各点间距离在信号通过光纤传输过程中始终保持不变。在 PolSK 信号传输过程中,当调制码率较低时,虽然各星座点所表示的偏振状态会随光纤中双折射率的变化而在邦加球上的位置发生改变,但各相邻星座点之间的夹角不发生变化,所以只要通过偏振接收机端处偏振控制器 PC3 的调整还是能够恢复出原有星座图的。在偏振接收机端,PBS 对输入信号光的两个垂直方向分别进行线偏振检测,分离出两路数据实现双信道 4 态 PolSK 信号光的偏振解复用。

图 1 中所示系统的传输矩阵可以表示为

$$\begin{bmatrix} E_{\text{out}}^x \\ E_{\text{out}}^y \end{bmatrix} = M_{\text{PBS}} M_{\text{PC3}} M_{\text{fiber}} M_{\text{SOA2}} M_{\text{PC2}} M_{\text{SOA1}} M_{\text{PC1}} \begin{bmatrix} E_{\text{in}}^x \\ E_{\text{in}}^y \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中 M 为光器件传输函数的琼斯矩阵,各光器件琼斯矩阵的具体表达式可参照文献[10]。 E_{in} 为输入探测光电场。 E_{out} 的 x 分量和 y 分量分别代表两个信道的输出。(2)式中,在有两路强度调制抽运光输入情况下,SOA1 和 SOA2 的传输矩阵 M_{SOA1} 和 M_{SOA2} 将会随着输入光功率的改变发生变化,从而导致输出探测光电场 E_{out} 各分量的强度发生变化。(2)式表示了双信道 PolSK 光传输系统中,两路信号光的偏振复用、传输和偏振解复用这一传递过程。

当调制码率较高时,双信道 PolSK 光传输系统中 SOA 中载流子的恢复速率是制约 SOA 调制性能关键因素之一,由于载流子浓度不能及时地恢复到原有的水平会导致增益的下降,造成探测光相位变化量的不足,其结果直接影响探测光偏振态的变化。当数据出现长串 1 码脉冲序列时,脉冲下降沿会明显出现变化缓慢形成码型效应^[11,12]。另一方面,抽运光调制 SOA 会导致探测光相位发生瞬时变化产生出频率啁啾现象^[13~15]。SOA 交叉偏振调制时信号光脉冲出现码型效应以及频率啁啾现象已在文献[11~16]中有所报道,但对于双信道偏振复用光传输系统而言,多态 PolSK 信号所出现的码型效应和频率啁啾现象以及对传输性能影响等的分析

还没有报道过,因此有必要开展对这些问题的调查研究。理论上,当具有频率啁啾的双信道 PolSK 信号光通过色散为非零的光纤链路传输时,不同频率成分将具有不同的传输速度。这种传输速度的差异会导致 PolSK 信号光的刚体结构发生改变,直接影响接收系统的偏振解复用性能引起数据判断误差。这些负面因素会明显降低 PolSK 系统的传输性能,增加功率代价。为了克服 SOA 交叉偏振调制效应所带来的负面影响,提高 PolSK 光传输系统的传输性能,有必要通过理论分析和系统仿真研究,详细地了解这些负面因素所造成的影响程度以及寻找出合理的解决方案。

3 数值计算结果与讨论

以下数值计算中采用了两组 64 比特长,RZ(归零)和/或 NRZ(非归零)码流。根据具体调查目标对两路调制信号进行了不同类型的组合,信号起始时间也做了相应调整。考虑到 SOA 的增益峰值在 1530 nm 附近和提高交叉偏振调制效率,计算中探测光、抽运光 1 和 2 的工作波长分别选定为 $\lambda_0 = 1530.3 \text{ nm}$, $\lambda_1 = 1539.8 \text{ nm}$ 和 $\lambda_2 = 1549.3 \text{ nm}$ 。探测光输入功率设定为 1.5 dBm,两抽运光最大光功率都设定约为 10 dBm,消光比为 10 dB。应该指出,由于抽运光的消光比有限,在数据为“0”码时 SOA 也同样会受到抽运光强的作用出现增益饱和现象。为了重点调查系统偏振调制特性,在本仿真研究中,暂不考虑光纤链路中色散、偏振模色散以及其他非线性效应等的影响,将其传输琼斯矩阵 M_{fiber} 视为以一单位矩阵,通过直接偏振接收来分析信号波形的变化情况。为了调查码型效应,仿真中所采用的码型均同于文献[7]的实验系统,如表 1 所示。针对文献[9]中对各码元仅采样一点进行计算而无法体现高码率调制下波形失真这一缺点,本文计算中均采用多点采样方法使仿真计算波形更接近于实际测量波形。

图 2 为一组计算结果。图 2(a)~图 2(d)的调制码率为 5 Gb/s,分别采用了 RZ-RZ 码,NRZ-NRZ 码,RZ-NRZ 码以及单路 NRZ 码这些组合。图 2(e)为双信道同时为不同码率的数据调制时的计算结果。

表 1 数据流码型

Table 1 Data stream patterns

Channel 1	1100101110011010111101111001110110111001101001100101110111010110
Channel 2	1011101100101111100111011110011010111010001101001110110100011100

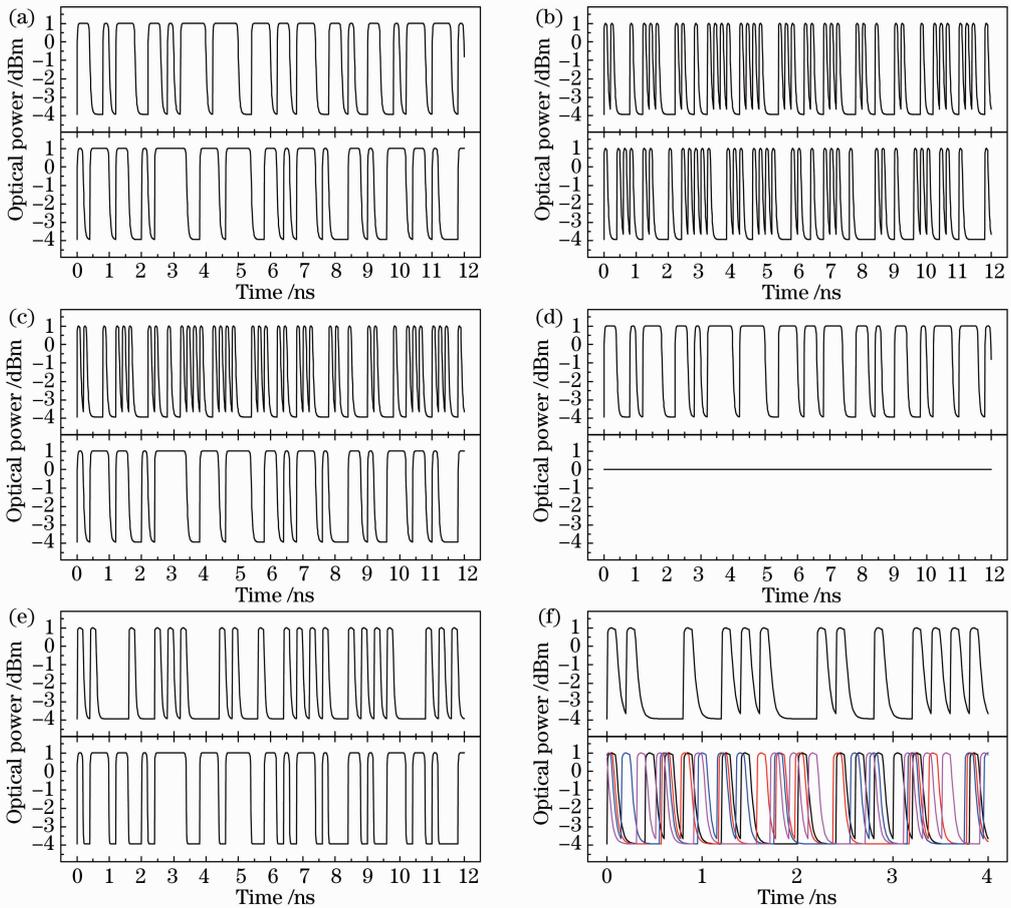


图2 双信道 PolSK 光通信系统偏振调制特性仿真结果。(a) 信道 1,2 都为 NRZ 码;(b) 信道 1,2 都为 RZ 码;(c) 信道 1 为 RZ 码,信道 2 为 NRZ 码;(d) 信道 1 为 NRZ 码,信道 2 为空置;(e) 信道 1 为 2.5 Gb/s RZ 码,信道 2 为 5 Gb/s NRZ 码;(f) 信道 1 为 5 Gb/s RZ 码,信道 2 为 4 组 5 Gb/s RZ 码波形,分别具有 0 ns,5.235 ns,5.850 ns 和 10.09 ns 的时延

Fig.2 Simulation results of polarization modulation characteristics of dual-channel PolSK optical transmission system. (a) Both channels with NRZ codes; (b) both channels with RZ codes; (c) channel 1 with RZ code and channel 2 with NRZ code; (d) channel 1 with NRZ code and channel 2 is vacant; (e) channel 1 with 2.5 Gb/s RZ code, channel 2 with 5 Gb/s NRZ code; (f) channel 1 with 5 Gb/s RZ code, channel 2 with 4 sets of 5 Gb/s RZ codes, with time delay at 0 ns, 5.235 ns, 5.850 ns and 10.09 ns, respectively

图2(f)为一组通过调整数据2起始时间使信道1与信道2具有不同时隙(time slot)也即不同时钟情况下的计算结果。从结果中没有看出由于信道2的时延变化而出现信道间的干扰现象。该项研究目的主要是调查系统的偏振复用和解复用特性。当两路数据流具有不同时隙时,数据流码型的变化会造成 PolSK 信号的星座图出现不规则变化,当星座图偏离系统解复用容许误差范围时将会出现信道交叉干扰现象。另一方面,由于此时两信道数据流的解复用和判别不可以参照同一时钟信号,对于有严格时钟对齐要求的多路数据流复用系统^[4]而言,这种不规则的时隙变化会立刻导致数据解复用出现差错。这项调查同样在实验系统研究中实施过。此项

仿真结果表明,双信道 PolSK 系统偏振解复用的动态范围宽、能够适应较大幅度 PolSK 信号星座图的变化。

以上这些仿真计算结果和文献[7]中的实际测量结果相符合,证明了双信道 PolSK 光传输系统的两个信道是完全独立的,每个信道可以独立传输不同码型和码率的数据信号。

图3为一组在不同码率调制下,双信道输出信号波形的仿真结果。从信号波形的变化可以看出,随着调制码率的提高,由于受载流子恢复速率的影响,导致 SOA 增益波动,出现信号波形上升沿与下降沿功率的不相等。与上升沿相比,下降沿出现长拖尾现象。对于长 1 码脉冲则出现消光比(ER)降

低这种码型效应。相比 NRZ 码, RZ 码的码型效应更为明显。信号波形的消光比下降会直接影响 PolSK 信号的检测性能, 增加系统的功率代价。图 4 为 NRZ 码与 RZ 码的输出信号波形消光比随调制

码率变化的测量结果。从图中可以看出, 随着调制码率的上升, NRZ 码与 RZ 码的消光比都呈下降趋势。相比 NRZ 码, RZ 码的消光比的下降则更为明显。

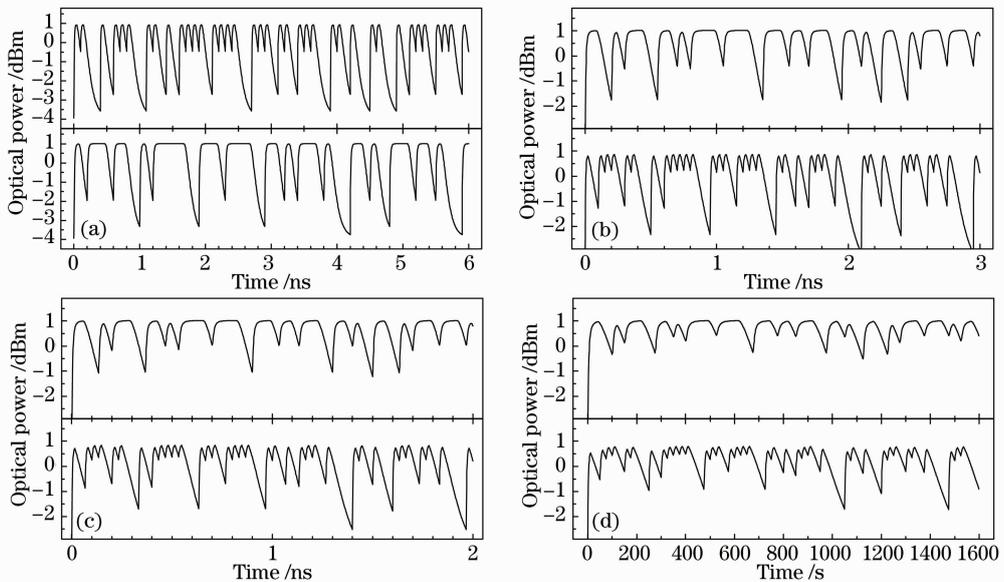


图 3 不同码率调制下输出信号波形的仿真结果。(a) 10 Gb/s, RZ-NRZ 码; (b) 20 Gb/s, NRZ-RZ 码; (c) 30 Gb/s, NRZ-RZ 码; (d) 40 Gb/s, NRZ-RZ 码

Fig. 3 Stimulated output signal waveforms under polarization modulation with different bit-rates. (a) 10 Gb/s, RZ-NRZ code; (b) 20 Gb/s, NRZ-RZ code; (c) 30 Gb/s, NRZ-RZ code; (d) 40 Gb/s, NRZ-RZ code

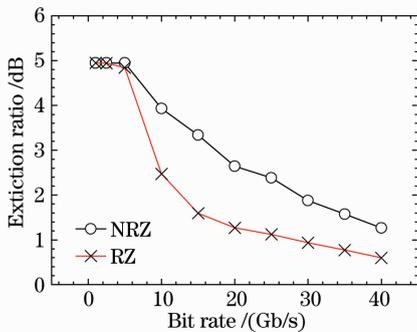


图 4 NRZ 码和 RZ 码的输出信号波形消光比随调制码率的变化分布图

Fig. 4 Extinction ratio changes of NRZ and RZ code output signal waveforms with bit rates

图 5 为一组为调查在不同调制组合状态下双信道 PolSK 信号光的频率啁啾变化的仿真结果。信号光的频率啁啾是通过计算两抽运光同时对两 SOA 进行交叉偏振调制后探测光电场的相位时间变化来求得的。从仿真计算结果可以看出, 在抽运光调制下探测光频率具有较大的正啁啾(蓝移)和较小的负啁啾(红移)。而且随着调制码率的增加, 探

测光频率中的红移部分将逐渐减少而蓝移部分则基本上保持不变。这种不对称的啁啾变化与 SOA 载流子的响应速率与恢复速率不相等有关。另一方面, 啁啾大小的分布还与两信道码型有关。当两路脉冲信号的上升沿相重合以及下降沿相重合时, 频率啁啾就会加强(啁啾相长效应)。反之, 当两路脉冲信号的上升沿与下降沿相重合时, 啁啾就会减小或消失(啁啾相消效应)。因此双信道 PolSK 信号光的频率啁啾呈现出复杂的码型效应。与单信道 2 态 PolSK 信号光相比, 双信道 PolSK 信号光的频率啁啾要更大些。因此可以推断出, 双信道 PolSK 光传输系统的传输性能要低于单信道 PolSK 光传输系统。这是首次通过本仿真研究得出的结论。

4 结 论

以文献[7]中所提出的理论模型为基础, 采用 MatLab 软件建模方式, 应用多类型调制信号进行数值仿真, 对双信道 4 态 PolSK 光通信系统的偏振调制特性进行了调研。仿真结果表明, 该系统的两个传输信道完全独立可以传输不同码率和码制的数

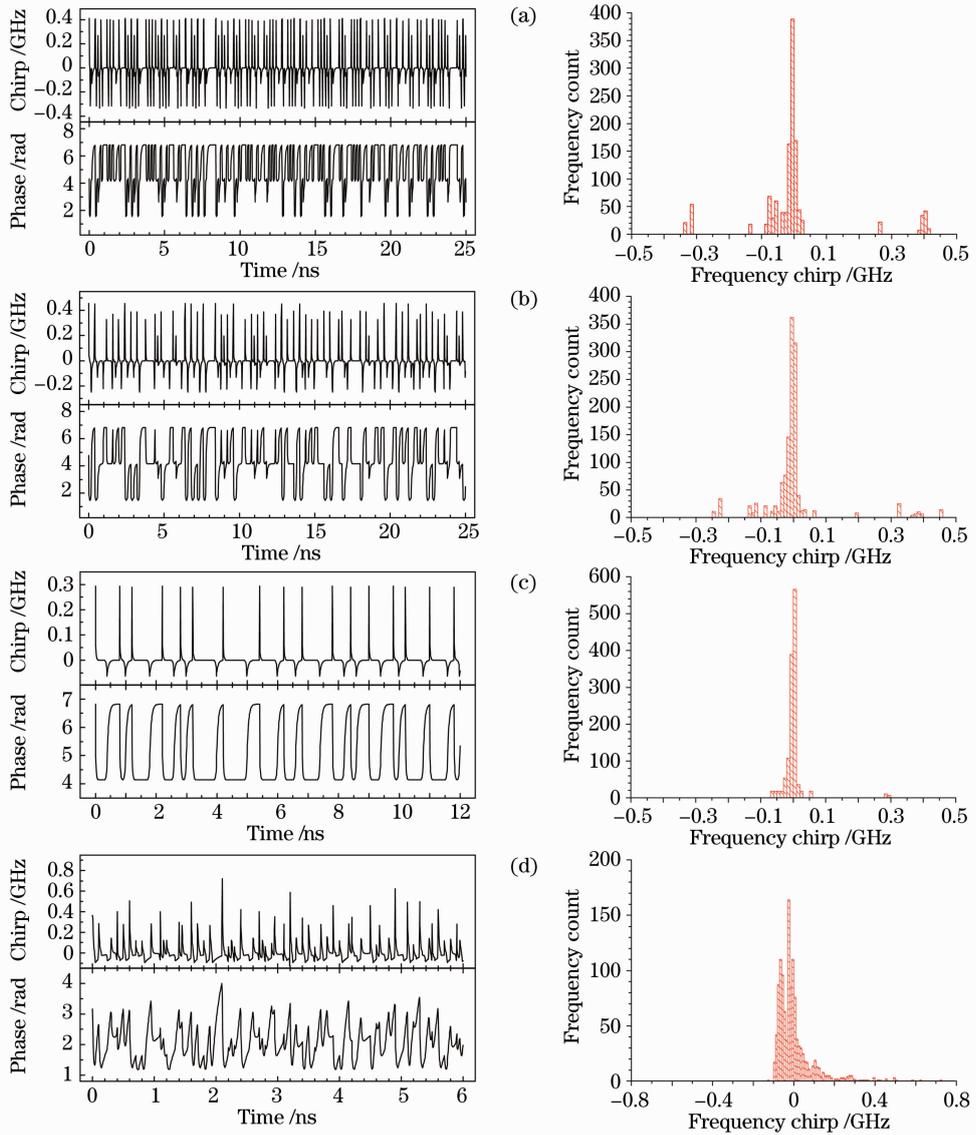


图 5 双信道 PolSK 信号光频率啁啾与相位变化仿真结果以及相对应的啁啾强度分布。(a)信道 1 为 2.5 Gb/s RZ 码,信道 2 为 5 Gb/s RZ 码;(b)信道 1 为 2.5 Gb/s RZ 码,信道 2 为 5 Gb/s NRZ 码;(c)信道 1 为 5 Gb/s NRZ 码,信道 2 为空置;(d)信道 1 为 10 Gb/s RZ 码,信道 2 为 20 Gb/s NRZ 码

Fig. 5 Frequency chirps and phase changes of dual-channel PolSK optical signals (left) as well as the corresponding intensity distribution of frequency chirp (right). (a) Channel 1 with 2.5 Gb/s RZ code, channel 2 with 5 Gb/s RZ code; (b) channel 1 with 2.5 Gb/s RZ code, channel 2 with 5 Gb/s NRZ code; (c) channel 1 with 5 Gb/s NRZ code, channel 2 is vacant; (d) channel 1 with 10 Gb/s RZ code, channel 2 with 20Gb/s NRZ code

据信号。另一方面,随着调制码率的提升,双信道 4 态 PolSK 光信号同样会出现码型效应,会导致检测信号消光比下降。仿真结果还揭示了在不同调制情况下,双信道 4 态 PolSK 光信号显现出复杂频率啁啾和相位变化并具有码型效应。仿真结果还表明双信道 4 态 PolSK 光信号具有相对大的频率啁啾会直接影响系统传输性能。该项研究结果为人们了解基于多重数据信号调制下 PolSK 信号光内在特性

提供了一幅清晰图像,也为双信道 4 态 PolSK 光信号经过具有色散特性的光纤链路长距离传输后波形出现失真提供了合理的理论解释依据。

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. Select. Areas Commun.*, 1995, **13**: 531~542

- 3 A. Carena, V. Curri, R. Gaudio *et al.*. Polarization modulation in ultra-long haul transmission systems; a promising alternative to intensity modulation[C]. Proc. Eur. Conf. Optical Communication, (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 S. Betti, G. De Marchis, E. Iannone. Polarization modulated direct detection optical transmission systems[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1992, **10**(1): 1985~1997
- 6 T. Kuri, K. Tsukamoto, N. Morinaga. Multiple polarization modulation (MPLM) system for coherent optical space communication [C]. Global Telecommunications Conference, GLOBECOM '95, IEEE, 1995, **3**: 2003~2007
- 7 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, FD2. 2003. 647~649
- 8 Wang Lutang, Fang Nian, Wang Ying *et al.*. Dual-channel PolSK optical transmission using SOA-based all-optical polarization modulations[J]. *Acta Optical Sinica*, 2009, **29**(1): 138~144
王陆唐,方 捻,王 颖等. 基于 SOA 全光偏振调制的双信道 PolSK 光传输系统[J]. 光学学报, 2009, **29**(1): 138~144
- 9 H. Soto, D. Erasme, G. Guekos. Cross-polarization modulation in semiconductor optical amplifiers[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(8): 970~972
- 10 Ying Wang, Lutang Wang, Nian Fang *et al.*. Modeling of a dual-channel polarization optical transmission system with SOA-based all-optical polarization modulations [C]. China-Japan Joint Microwave Conference, 2008. 784~787
- 11 Teng Xiang, Zhang Hanyi, Guo Yili *et al.*. Performance optimization of the wavelength converter based on cross-polarization-modulation in SOA[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(6): 810~814
滕 翔,张汉一,郭栾理等. 基于半导体光放大器中交叉偏振调制效应的波长转换器[J]. 中国激光, 2005, **32**(6): 810~814
- 12 Wang Fei, Zhou Hanqing, Xia Guangqiong *et al.*. Theoretical study on wavelength conversion using cross-polarization modulation in a single semiconductor optical amplifier[J]. *Optical Technique*, 2007, **33**(2): 315~318
王 飞,周寒清,夏光琼等. 基于半导体光放大器交叉偏振调制的波长转换理论研究[J]. 光学技术, 2007, **33**(2): 315~318
- 13 Wang Jing, Miao Hongli, Yang Ailing *et al.*. The chirp induced by polarization modes coupled in the polarized multiplexed communication system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(1): 31~34
王 晶,苗洪利,杨爱玲等. 偏振复用通信系统中偏振模耦合产生的啁啾[J]. 光子学报, 2003, **32**(1): 31~34
- 14 Feng Jianhe, Ji Yuefeng, Chen Shuqian *et al.*. Converted signal chirp of all-optical-wavelength-converters based on cross-gain modulation in SOA caused by phase modulated[J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **A28**(6): 545~548
冯建和,纪越峰,陈树强等. 基于 SOA 的 XGM 全光波长变换光信号啁啾效应分析[J]. 中国激光, 2000, **A28**(6): 545~548
- 15 Dong Jianji, Zhang Xinliang, Huang Dexiu. Chirp characteristics in wavelength converter based on single-port-coupled SOA [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **34**(2): 255~258
董建绩,张新亮,黄德修. 基于单端耦合 SOA 的波长转换器啁啾特性分析[J]. 光子学报, 2003, **34**(2): 255~258
- 16 H. J. S. Dorren, Daan Lenstra, Y. Liu *et al.*. Nonlinear polarization rotation in semiconductor optical amplifiers: Theory and application to all-optical flip-flop memories [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2003, **39**(1): 141~148