

文章编号: 0253-2239(2010)05-1268-06

# 偏振复用差分相移键控信号的数字相干解调与偏振解复用算法研究

冯 勇 闻 和 张 汉 一

(清华大学电子工程系集成光电子国家重点联合实验室, 清华信息科学与技术国家实验室, 北京 100084)

**摘要** 利用光纤偏振分束器和 3 dB 耦合器搭建偏振分集 90° 光学混频器, 采用单端接收实现了偏振分集的相干接收机。实现了 10 Gb/s 偏振复用差分相移键控(DPSK)光信号, 经过 280 km 普通单模光纤(SSMF)和掺铒光纤放大器(EDFA)传输后的数字相干接收, 测量无误码。研究了数字相干光接收中的各种信号处理算法。采用数字信号处理算法完成载波相位估计, 数字滤波器补偿光纤色散, 恒模算法进行自适应数字偏振解复用等。研究了 90° 光学混频器的非理想正交特性, 运用统计方法补偿了光学混频器偏离 90° 的误差, 此算法和信号格式以及光纤色散等因素无关。使用恒模算法实现数字偏振解复用, 该算法收敛时间小于 0.5  $\mu\text{s}$ 。

**关键词** 光纤通信; 数字相干检测; 恒模算法; 差分相移控; 数字偏振解复用

中图分类号 T929.11 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103005.1268

## Digital Optical Coherent Detection of Polarization-Multiplexed Differential Phase Shift Keying Signal and Analysis of Adaptive Digital Polarization Demultiplexing

Feng Yong Wen He Zhang Hanyi

(State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Tsinghua National Laboratory for Information Science and Technology, Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing, 100084, China)

**Abstract** Polarization beam splitters and 3 dB couplers are used to construct a home-made 90° optical hybrid, by which a polarization diversity optical coherent receiver is carried out with single-ended detection. A 10 Gb/s polarization multiplexed differential phase shift keying (DPSK) signal is transmitted through 280 km standard single-mode fiber (SSMF) using erbium-doped fiber amplifier (EDFA) amplification, and no error bits are measured in the result. The various digital signal processing algorithms in coherent detection are discussed. Carrier phase estimation, optical chromatic dispersion compensation and digital polarization demultiplexing are carried out. The phase error offset from the 90° of the optical hybrid is compensated by using statistical method. The algorithm is irrelevant with signal modulation format and fiber chromatic dispersion. Digital polarization demultiplexing is carried out by using constant modulus algorithm, and the convergence time of the algorithm is less than 0.5  $\mu\text{s}$

**Key words** optical fiber communication; digital optical coherent detection; constant modulus algorithm (CMA); differential phase shift keying (DPSK); digital polarization demultiplexing

### 1 引 言

在光通信中, 利用偏振复用可以在给定的频谱宽

度下将传输容量提高一倍, 结合新型调制格式, 很容易将现有的 10 Gb/s 的光通信系统升级到 40 Gb/s<sup>[1,2]</sup>,

收稿日期: 2009-06-11; 收到修改稿日期: 2009-08-06

基金项目: 国家 863 计划(2009AA01Z223, 2009AA01Z253)和国家自然科学基金(60932004)资助课题。

作者简介: 冯 勇(1985—), 男, 硕士研究生, 主要从事光传输系统中数字相干光检测方面的研究。

E-mail: y-feng03@mails.tsinghua.edu.cn

导师简介: 张汉一(1942—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事微波光子学与光网络等方面的研究。

E-mail: zhy-dee@mail.tsinghua.edu.cn

并且为今后 100 Gb/s 的高速光通信提供一个可行的发展方向。传统光通信中,偏振复用一直没有得到广泛应用,其重要原因是光纤的随机双折射,这种随机双折射受到外界环境影响在快速变化,导致光学偏振解复用非常困难且不实用。相干检测通过偏振分集的方式,同时获得  $x$  和  $y$  偏振方向信号光的复信号光场,采取数字信号处理算法进行偏振解复用,可以快速跟踪输入光偏振态的变化,大大降低光学接收机的复杂度。

2007~2008 年,国外对相干检测中数字偏振解复用进行了大量研究,在专用集成电路(ASIC)芯片和现场可编程门阵列(FPGA)上实现了实时偏振解复用算法<sup>[3,4]</sup>,而国内在偏振复用及偏振模色散(PMD)补偿这方面的研究主要集中在光学方式<sup>[5~8]</sup>。在已有工作基础上,对单偏振的  $90^\circ$ 混频器进行改进,实现了基于光纤器件的偏振分集  $90^\circ$ 光学混频器。利用此光学混频器和单端接收,实现了 20 Gb/s 的偏振复用(DPSK)信号在传输 280 km 后的相干解调,完成了在频域进行色散补偿,利用自适应算法实现数字偏振解复用,并分析了  $90^\circ$ 光学混频器非理想特性的补偿方法。

## 2 相干检测数字偏振解复用原理

由于光载波具有两个正交的偏振态,每个偏振态都可以独立地调制信号。对  $x$  和  $y$  偏振方向光分别调制信号后,得到  $x$  和  $y$  方向的电场  $E_x$  和  $E_y$ ,用琼斯矢量表示信号光为  $[E_x \ E_y]$ 。偏振复用的信号光在光纤中传播时,由于光纤双折射和偏振相关损耗的影响,光的偏振态会发生变化。光纤对偏振态的影响用琼斯矩阵  $\mathbf{P} = \begin{bmatrix} a & c \\ b & d \end{bmatrix}$  来表示,在接收端,光信号表示为

$$[E_x, E_y] \times \begin{bmatrix} a & c \\ b & d \end{bmatrix} = [aE_x + bE_y \quad cE_x + dE_y]. \quad (1)$$

为了对偏振复用信号进行解复用,传统的方法是在光学上实现的,即在接收端加入一个偏振分束器(PBS)将  $x$  和  $y$  偏振方向的光分离。由于信号光  $E_x$  和  $E_y$  发生能量耦合,需要在 PBS 前面增加一个偏振控制器,用以消除这种能量耦合。在实际的光纤系统中,光纤的琼斯矩阵是在快速变化的,因此需要一个快速的算法来控制偏振控制器实现偏振跟

踪,然而,实现起来较为困难<sup>[5]</sup>,尤其是在波分复用(WDM)系统中,需要对每个波长单独进行偏振跟踪,更为复杂。

在数字相干接收机中,采取偏振分集的方式,可以同时得到  $x$  和  $y$  方向的复光场信息  $E'_x$  和  $E'_y$ :

$$[E'_x \ E'_y] = [aE_x + bE_y \quad cE_x + dE_y]. \quad (2)$$

通过数字信号处理算法计算出光纤琼斯矩阵的逆矩阵  $\mathbf{Q} = \mathbf{P}^{-1}$ ,之后通过矩阵运算恢复原始信号为  $[E'_x \ E'_y] \times \mathbf{Q} = [E_x \ E_y] \times \mathbf{P}^{-1} \times \mathbf{Q} = [E_x \ E_y]$ 。相比于光学偏振解复用,数字偏振解复用采取自适应数字信号处理算法实现偏振跟踪,具有速度快、简单灵活的特点,极大地简化了接收机的结构。

## 3 偏振复用信号的相干检测系统

实验系统如图 1 所示,对直流光进行 DPSK 调制,调制数据为  $(2^{11} - 1)$  bit 长度的伪随机比特序列(PRBS)序列。将信号光分为两路,其中一路经过约 30 m 的光纤延时线,实现两路调制信号的解相关,即认为两路光分别调制了独立的信号,之后使用光纤偏振合束器(PBC),将两束正交的光合起来形成偏振复用信号光,并在 PBC 输入端口加入偏振控制器以保证偏振态的正交性。经过 280 km(100/100/80 km 共 3 段)的单模光纤传输,每段光纤后加入一个掺铒光纤放大器(EDFA)补偿光纤损耗,链路没有加入色散补偿光纤。在接收端,信号光经过一个 PBS, $x, y$  偏振方向的光分别与本振光进行  $90^\circ$ 混频。在 PBS 前面不需要增加偏振控制器来控制入射光的偏振态,而是采用数字信号处理算法进行偏振解复用。模数转换器(ADC)采样得到  $I_x, Q_x, I_y$  和  $Q_y$  4 个分量后,构造出信号光两个偏振态方向的复光场为  $E'_x = I_x + jQ_x, E'_y = I_y + jQ_y$ 。

偏振分集的相干接收机包含 1 个 PBS, 2 个  $90^\circ$ 混频器, 4 个平衡探测器。在利用光纤器件制作  $90^\circ$ 光学混频器的基础上,通过改进实现了偏振分集的相干接收机。在该接收机中,光输入端增加一个 PBS 将输入光的  $x$  和  $y$  偏振方向的光分离,之后,通过如图 2 所示的两个独立的  $90^\circ$ 混频器进行零差混频。同单偏振的  $90^\circ$ 混频器一样,实验前需要事先调整偏振控制器 PC1~PC4 实现  $90^\circ$ 的光学相移,采用单端接收得到的 4 个分量为

$$\begin{aligned}
 I_x &= R \times \left[ \frac{1}{4} |E_x|^2 + \frac{1}{4} |E_{LO}|^2 + \frac{1}{2} \text{Re}(E_x E_{LO}^*) \right] \approx \frac{1}{2} R \times \text{Re}(E_x E_{LO}^*), \\
 Q_x &= R \times \left[ \frac{1}{4} |E_x|^2 + \frac{1}{4} |E_{LO}|^2 + \frac{1}{2} \text{Im}(E_x E_{LO}^*) \right] \approx \frac{1}{2} R \times \text{Im}(E_x E_{LO}^*), \\
 I_y &= R \times \left[ \frac{1}{4} |E_y|^2 + \frac{1}{4} |E_{LO}|^2 + \frac{1}{2} \text{Re}(E_y E_{LO}^*) \right] \approx \frac{1}{2} R \times \text{Re}(E_y E_{LO}^*), \\
 Q_y &= R \times \left[ \frac{1}{4} |E_y|^2 + \frac{1}{4} |E_{LO}|^2 + \frac{1}{2} \text{Im}(E_y E_{LO}^*) \right] \approx \frac{1}{2} R \times \text{Im}(E_y E_{LO}^*),
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

式中  $E_x$  和  $E_y$  是调制在  $x$  和  $y$  方向上的复光场。等式右边的结果是在经过交流耦合、忽略信号强度项  $|E_x|^2$ 、 $|E_y|^2$  (在本振光强度远大于信号光强度条件下) 的结果,之后即可通过  $I, Q$  分量完全构造光的复琼斯矢量。

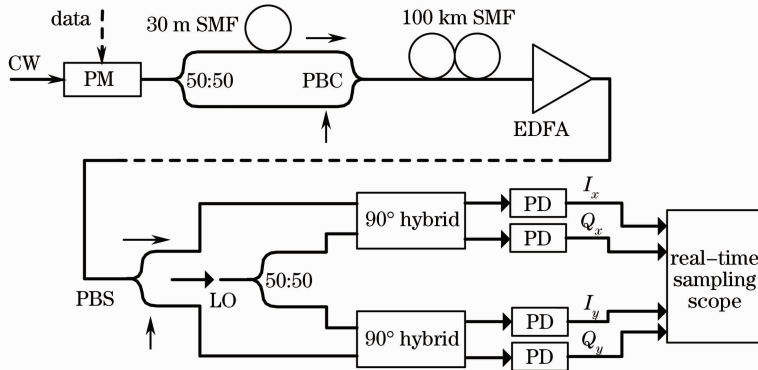


图 1 偏振复用信号传输与相干检测系统

Fig. 1 Experimental setup of polarization-multiplexing transmission and coherent detection system

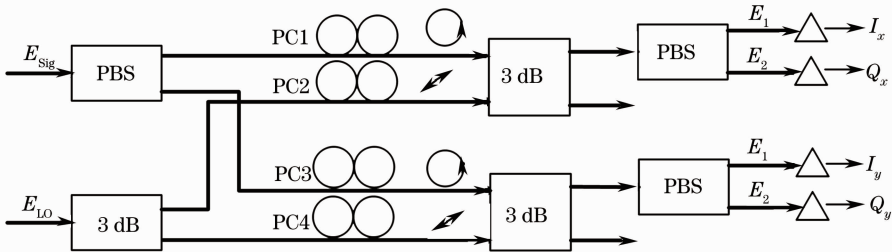


图 2 偏振分集相干接收机结构

Fig. 2 Structure of polarization-diversity coherent receiver

#### 4 偏振分集相干接收机的信号处理算法

偏振分集相干接收机的信号处理算法流程如图 3 所示,偏振分集的相干接收机得到输入光  $x$  和  $y$  方向的复光场  $E'_x$  和  $E'_y$ 。主要的算法流程包括:1) 对数字化的  $E'_x$  和  $E'_y$  进行规范化和正交化;2) 数字色

散补偿;3) 数字偏振解复用;4) 载波相位估计与符号判决。这里主要对 1) 和 3) 进行分析。

考虑到实际的  $90^\circ$  光学混频器  $I, Q$  支路信号的光学相位差会偏离理想的  $90^\circ$ , 导致它们之间正交性被破坏, 以及功率大小不等, 因此需要对这些偏差

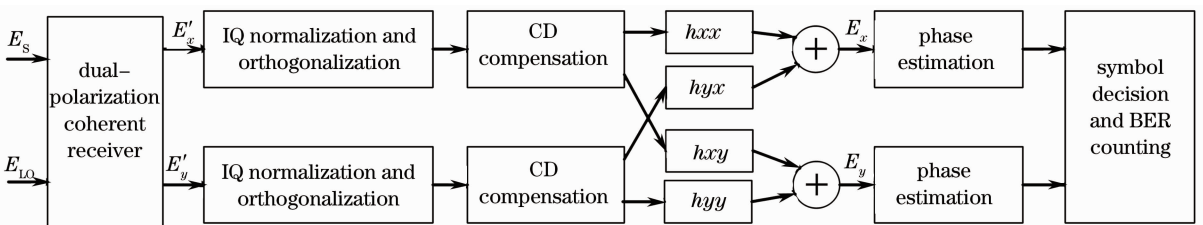


图 3 相干接收机数字信号处理算法流程

Fig. 3 Flow chart of digital-signal process algorithm of coherent receiver

影响进行校正,即正交规范化,它对后续处理很重要。国外在这方面已有初步研究<sup>[9]</sup>,在此基础上进一步研究发现算法和调制格式、光纤色散等效应无关,具有良好的普适性。

以  $x$  方向的  $90^\circ$  混频器为例,  $E_x E_{L0}^* = I + jQ$ 。若混频器  $I, Q$  路偏离  $90^\circ$  的相位差为  $\varphi$ , 则混频器的输出信号为  $I' = \text{Re}(E_x E_{L0}^*) = I, Q' = \text{Im}[E_x E_{L0}^* \exp(j\varphi)] = aI + bQ$ 。由于信号光和本振光频差以及相位噪声的共同作用使得复信号  $E_x E_{L0}^*$  在复平面的概率密度分布为圆对称, 因此  $I$  和  $Q$  的相关系数为 0, 即  $\langle I, Q \rangle = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T I \times Q dt = 0$ 。于是, 可以通过下面的计算得到  $a$  和  $b$ :

$$\begin{aligned} \langle I', Q' \rangle &= \langle I, aI + bQ \rangle = \\ &= a \langle I, I \rangle + b \langle I, Q \rangle = a \langle I, I \rangle, \\ a &= \frac{\langle I', Q' \rangle}{\langle I, I \rangle} = \frac{\langle I', Q' \rangle}{\langle I', I' \rangle}, \end{aligned} \quad (4)$$

$$I = I', Q = \frac{1}{b} \left( Q' - \frac{\langle I', Q' \rangle}{\langle I', I' \rangle} I' \right). \quad (5)$$

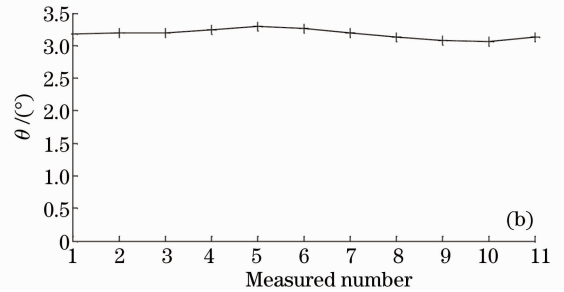
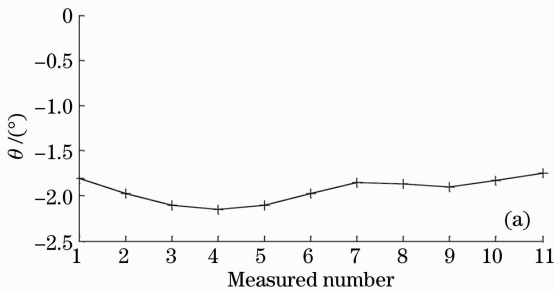


图 4  $x$  方向(a)和  $y$  方向(b)光学  $90^\circ$  混频器的相位误差

Fig. 4 Phase error of  $90^\circ$  optical hybrid (a)  $x$  polarization (b)  $y$  polarization

用此算法测量了 5 组不同时刻下混频器的相位误差, 如表 1 所示。数据 1~3 是在同一个时间段 (20 min) 测量的, 数据 4 和 5 是 1 h 后测量的, 可以看到在实验条件下混频器的相位误差能够保持在  $\pm 5^\circ$  范围内。

表 1 光学  $90^\circ$  混频器在不同时刻相位误差

Table 1 Phase error of  $90^\circ$  hybrid at different time

Data number	1	2	3	4	5
Phase error of $x$ polarization hybrid / ( $^\circ$ )	0.8	0.4	0.6	-1.8	-1.9
Phase error of $y$ polarization hybrid / ( $^\circ$ )	4.1	4.4	4.3	3.2	3.2

在色散补偿算法上, 若使用 FIR 滤波器进行补偿, 滤波器的阶数和光纤长度以及符号速率的平方成正比<sup>[10,11]</sup>。随着光纤长度以及速率的增加, 滤波器阶数急剧增加, 使用频域滤波的形式, 采用快速傅

系数  $b$  可以通过  $\langle Q, Q \rangle = 1$  来确定。至此完成了  $I, Q$  路的正交化。在此算法中, 信号光和本振光频差以及公共相位噪声产生的相位旋转使得  $\langle I, Q \rangle = 0$ , 因此算法和调制格式、色散等效应无关, 是该算法的主要优点。

在接收机中,  $I, Q$  两路的探测器响应度一般不同, 导致  $I, Q$  路的强度不同。同样, 从复信号  $E_x E_{L0}^*$  在复平面的圆对称概率密度分布可以知道  $I, Q$  路的能量相等, 因此最后将  $\frac{I}{\langle I, I \rangle^{1/2}}$  和  $\frac{Q}{\langle Q, Q \rangle^{1/2}}$  作为最终的处理结果, 完成了  $I, Q$  规范化处理。

在正交化处理中, 通过系数  $a$  和  $b$  可以计算出混频器的相位误差  $\varphi = \arctan(a/b)$ 。在实验结果中, 抽取  $25 \mu\text{s}$  的实验数据序列, 取 11 组不同采样点下的数据计算两个  $90^\circ$  混频器的相位偏差, 得到如图 4 所示的结果,  $x$  和  $y$  偏振方向的  $90^\circ$  混频器的相位误差分别为  $-1.9^\circ$  和  $3.2^\circ$ , 计算结果的标准差为  $0.13^\circ$  和  $0.07^\circ$ 。

里叶变换 (FFT) 和快速反傅里叶变换 (IFFT) 运算, 可大大减少运算复杂度。

色散补偿之后, 进行数字偏振解复用。其基本思想是通过数字信号处理方法计算出光纤琼斯矩阵的逆矩阵, 之后通过矩阵运算恢复原始  $x$  和  $y$  偏振方向的光信号, 实现和光学偏振解复用相同的功能。具体算法如图 5 所示,  $h_{xx}, h_{yy}, h_{xy}$  和  $h_{yx}$  是光纤琼斯逆矩阵的 4 个分量。在实际系统中, 光纤的琼斯矩阵在快速变化, 需要算法进行自适应跟踪。一般的自适应算法使用最小均方误差作为判断标准。在实验中, 信号光为调相信号, 光的强度为恒定值, 设光场为  $E$ , 选取误差函数  $\epsilon = 1 - |E|^2$ , 使用该准则的算法称为恒模算法 (CMA), 是相干检测中广泛使用的偏振解复用算法<sup>[12,13]</sup>。算法自适应调整复系数  $h_{xx}, h_{yy}, h_{xy}$  和  $h_{yx}$  使得误差函数的平方  $\epsilon^2$  最小, 最终  $h_{xx}, h_{yy}, h_{xy}$  和  $h_{yx}$  将逼近于光纤琼斯矩阵的 4 个分

量。均衡系数的更新方式如下：

$$\begin{aligned}
 h_{xx} &= h_{xx} + \mu \epsilon_x x_1 x_2^*, h_{xy} = h_{xy} + \mu \epsilon_x x_1 y_2^*, \\
 h_{yx} &= h_{yx} + \mu \epsilon_y y_1 x_2^*, h_{yy} = h_{yy} + \mu \epsilon_y y_1 y_2^*,
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

式中误差函数  $\epsilon_x = (1 - |x_2|^2)$ ,  $\epsilon_y = (1 - |y_2|^2)$ ,  $\mu$  为搜索步长, \* 为取共轭。

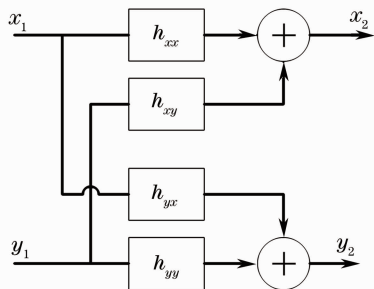


图 5 数字偏振解复用原理

Fig. 5 Principle of digital polarization demultiplexing algorithm

实验中 DPSK 信号由 Mach-Zehnder 调制器产生,信号码型为非归零码,产生的信号光在相位跳变处存在强度凹陷。一般来说,采集到的数据点不在符号周期的中心,如图 6(a)所示,导致采样点处的光强并不是一个恒定值。因此,在离线处理算法中,先计算出采样点偏离符号时隙中心的延迟,通过软件算法将采样点延迟到符号周期的中心。在计算误差函数  $\epsilon = 1 - |E|^2$  时,  $E$  取为符号周期中心的采样点,即每 2 个采样点取 1 个点进行运算。图 7 是经过色散补偿后,偏振解复用前软件重构出的信号光强度眼图。图 8 是偏振解复用后的信号光强度眼图,在偏振解复用算法中,初始值选取  $h_{xx} = 1, h_{yx} = 0, h_{yy} = 1, h_{xy} = 0$ ,搜索步长取为  $u$ 。图 9 是算法在不同搜索步长下的时间收敛性,算法收敛的最长时间为 300 ns,说明数字偏振解复用能够快速跟踪偏振态的变化。

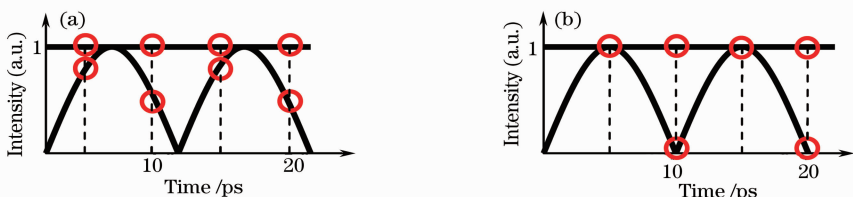


图 6 (a)原始数据采样点与(b)经过软件延迟后的采样点示意图

Fig. 6 Schematic figure of sampled digital data (a) original (b) after software delay

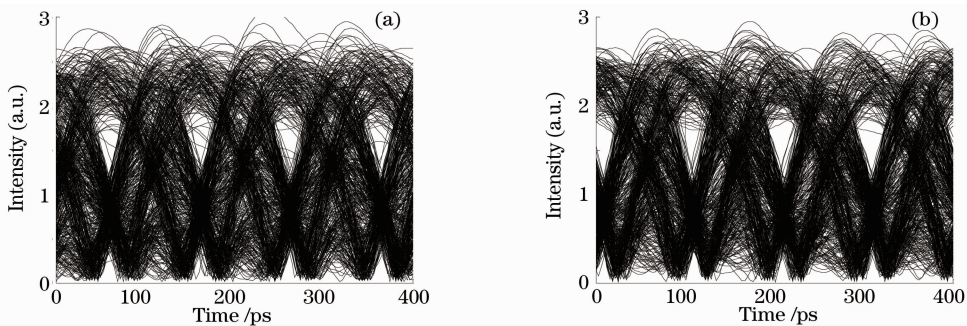


图 7 偏振解复用前(a)x方向和(b)y方向光强眼图(色散补偿后)

Fig. 7 (a) x and (b) y polarization eye-diagram before polarization demultiplexing(after dispersion compensation)

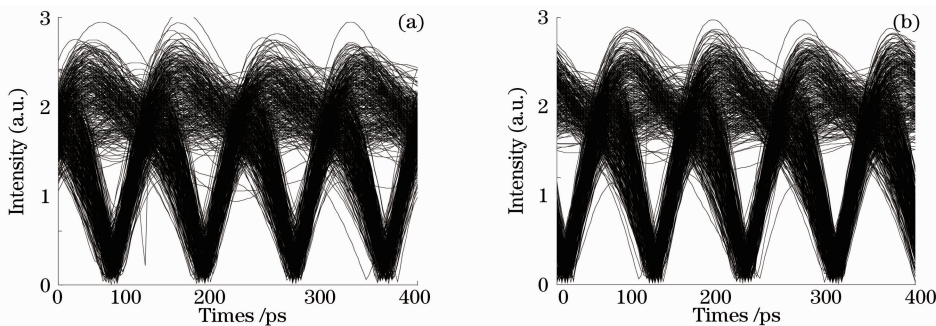


图 8 偏振解复用后(a)x方向和(b)y方向光强眼图(色散补偿后)

Fig. 8 (a) x and (b) y polarization eye-diagram after polarization demultiplexing(after dispersion compensation)



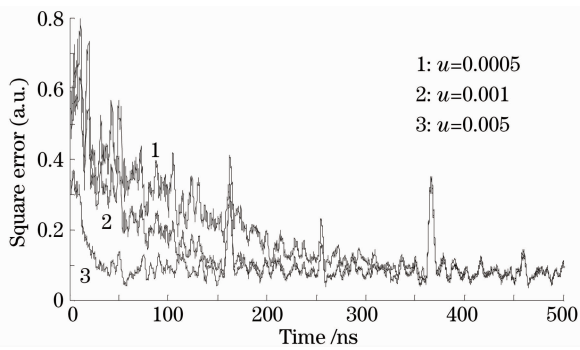


图 9 恒模算法在不同搜索步长下的时间收敛性

Fig. 9 Convergence of CMA algorithm with different steps  $u$

在偏振解复用之后,进行载波相位估计,以及符号判决等算法。图 10 是经过载波相位估计后  $x$  和  $y$  方向信号光的星座图,实验处理的数据为  $2 \times 10^5$  bit,测量无误码。

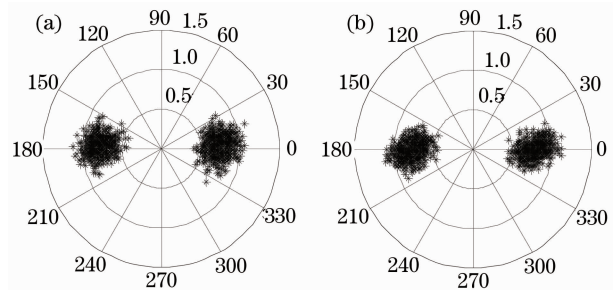


图 10 偏振解复用后(a) $x$ 方向和(b) $y$ 方向信号光星座图

Fig. 10 Constellation diagram of (a)  $x$  and (b)  $y$  polarization after polarization demultiplexing

## 5 结 论

在已有光纤  $90^\circ$ 混频器的基础上,改进制作了偏振分集  $90^\circ$ 光学混频器,用数字信号处理算法补偿了  $90^\circ$ 光学混频器的相位误差,验证了制作的  $90^\circ$ 光学混频器在实验室条件下具有良好的稳定性。采用数字色散补偿和偏振解复用处理,实现了 20 Gb/s 的偏振复用 DPSK 信号无误码传输 280 km。

## 参 考 文 献

- 1 T. Pfau, S. Hoffmann, R. Noe *et al.*. Coherent optical communication: towards realtime systems at 40 Gbit/s and beyond[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(2): 866~872
- 2 D. van den Borne, S. L. Jansen, H. de Waardt *et al.*. DQPSK modulation for robust optical transmission[C]. OFC/NFOEC Conference and Exposition (OFC/NFOEC), San Diego, California USA, 2008: OMQ1
- 3 Han Sun, Kuang-Tsan Wu, Kim Robers. Real-time measurement of a 40 Gb/s coherent system[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(2): 873~879
- 4 A. Leven, N. Kaneda, Young-Kai Chen. A real-time CMA-based 10 Gb/s polarization demultiplexing coherent receiver implemented in an FPGA [C]. OFC/NFOEC Conference and Exposition (OFC/NFOEC), San Diego, California USA, 2008: OTuO2
- 5 Zinan Wang, Chongjin Xie. Automatic optical polarization demultiplexing for polarization division multiplexed signals[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(5): 3183~3189
- 6 Li Chaoyang, Zheng Yuan, Yang Bojun *et al.*. Effect of automatic polarization mode dispersion compensation on bit-error-rate in 2.5 Gb/s transmission system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(4): 489~492  
李朝阳, 郑 远, 杨伯君等. 2.5 Gb/s 偏振模色散自动补偿对偏振膜色散容限值的影响[J]. *中国激光*, 2006, **33**(4): 489~492
- 7 Chen Lin, Xu Jiangrong, Yang Bojun *et al.*. A novel feed-forward adaptive polarization mode dispersion compensation method[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(9): 1224~1229  
陈 林, 徐江荣, 杨伯君等. 一种新的自适应偏振模色散补偿馈方法[J]. *中国激光*, 2005, **32**(9): 1224~1229
- 8 Xu Wei, Duan Gaoyan, Zhang Xiaoguang *et al.*. Analysis of polarization mode dispersion compensation performance for different modulation formats [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(2): 226~232  
许 玮, 段高燕, 张晓光等. 不同调制格式的偏振模色散补偿性能分析[J]. *光学学报*, 2008, **28**(2): 226~232
- 9 I. Fatadin, S. J. Savory, D. Ives. Compensation of quadrature imbalance in an optical QPSK coherent receiver [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2009, **20**(20): 1733~1735
- 10 D. S. Ly-Gagnon, S. Tsukamoto, K. Katoh *et al.*. Coherent detection of optical quadrature phase-shift keying signals with carrier phase estimation [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(1): 12~21
- 11 S. J. Savory. Digital filters for coherent optical receivers[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(2): 804~817
- 12 E. Ip, J. M. Kahn. Digital equalization of chromatic dispersion and polarization mode dispersion [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2007, **25**(8): 2033~2043
- 13 T. Pfau, C. Wordehoff, R. Peveling. Ultra-fast adaptive digital polarization control in a realtime coherent polarization-multiplexed QPSK receiver [C]. Proc. OFC/NFOEC Conference and Exposition (OFC/NFOEC), San Diego, California USA, 2008: OTuM3