

借助聚类分析的光发射机信号畸变评估方法

周钟青, 杨彦甫, 张群, 何倩雯, 向前, 曹军涛

哈尔滨工业大学深圳研究生院电子与信息工程学院, 广东 深圳 518000

摘要 面向光发射机信号畸变分析的应用场景,采取了一种相位近似缓变的相干检测系统,并借助聚类分析算法对畸变光信号进行分析预处理,精确估计畸变系数并实现较好的星座图恢复效果。该系统通过调整本振光传输链路长度使其与信号光传输链路的长度基本相等,本振光和信号光之间的相位差在较长的时间窗口内近似恒定,从而允许借助聚类分析方法对长时间窗口数据进行星座图的智能分析与预处理,基于聚类中心点位置计算获得畸变系数,同时以聚类中心位置作为参考进行后续均衡和载波相位处理。该方案解决了在信号畸变与相位噪声同时存在下的信号恢复难题,可实现精准信号畸变评估。在实验系统中使用聚类分析方法和盲相位搜索(BPS)算法对 I-Q 增益不平衡、I-Q 幅度分布不均匀和 I-Q 相位误差三种发射机畸变信号进行处理,并进行相应的实验验证。仿真和实验结果均表明,该实验系统中聚类算法可对发射机的上述三种畸变损伤实现精确估计。

关键词 相干光通信; 光发射机; 信号畸变; 聚类分析; 相位延迟

中图分类号 TN913.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.030604

Optical Transmitter Signal Distortion Evaluation Based on Cluster Analysis

Zhou Zhongqing, Yang Yanfu, Zhang Qun, He Qianwen, Xiang Qian, Cao Juntao

College of Electronic and Information Engineering, Harbin Institute of Technology Shenzhen Graduate School, Shenzhen, Guangdong 518000, China

Abstract Aiming at the application of optical transmitter signal distortion analysis, we adopt a coherent detection system with slowly varying phase, analyze the preprocessing of the distorted optical signal by means of cluster analysis, and estimate the distortion coefficients accurately to achieve a better constellation restoration effect. In this system, we adjust the length of the local oscillator fiber link to be equal to the fiber length of the signal link, so that the phase difference between the local oscillator and the signal light can be approximately constant over a long time window. It means that we can do intelligent analysis and preprocessing of the constellation for the long time window data by means of cluster analysis. Then, we obtain the distortion coefficients and cluster centroids based on cluster analysis of signal constellation, and use the location information of cluster centroids to equalization process and carrier phase recovery. This scheme solves signal recovery problems in the presence of signal distortion and phase noise, enabling accurate signal distortion evaluation. In this system, we simulate and experiment three kinds of distorted signals (I-Q gain imbalance, I-Q phase error, and I-Q amplitude uneven distribution) by using cluster analysis and blind-phase-search (BPS) algorithm. The results show that in the experimental system we can accurately estimate the transmitter signal distortion mentioned by using cluster analysis.

Key words coherent optical communications; optical transmitter; signal distortion; cluster analysis; phase delay

OCIS codes 060.1660; 060.2330; 060.2920

收稿日期: 2017-10-12; 收到修改稿日期: 2017-10-12

基金项目: 国家自然科学基金(61205046, 61575051)、深圳市科技计划项目(JCYJ20150327155705357, KQCX2015032409501296, JSGG20150529153336124, JCYJ20150529114045265, JSGG20170414141239041)

作者简介: 周钟青(1992—),男,硕士研究生,主要从事高速相干光通信方面的研究。E-mail: 838493029@qq.com

导师简介: 杨彦甫(1981—),男,博士,副教授,主要从事高速相干光通信系统方面的研究。

E-mail: yangyanfu@hotmail.com(通信联系人)

1 引言

随着光通信系统容量不断升级,调制格式也向更高阶发展,而发射机有限的数模转换器位数及光电调制带宽都会引起发射光信号畸变与损伤。因此,对高阶光发射机信号进行准确的畸变评估,对于光模块厂商质量监测与系统性能优化具有很重要的实际应用价值。在高阶光通信系统中,发射机信号可能存在畸变^[1-2],如 I-Q 增益不平衡、I-Q 相位误差、I-Q 幅度分布不均匀。在传统实验系统里,发射端信号光与本振光的相位是不相干的,随着时间快速随机起伏,在相位恢复前,星座图会呈现为多个不同半径的圆环,传统算法以标准星座图作为参考进行相位恢复。当信号存在明显畸变时,使用传统算法恢复相位效果较差,甚至可能失效,这将会极大影响后续星座图畸变分析的准确度。因此,用传统的数字信号处理方法按照标准星座点来处理畸变信号,既无法正确恢复发射机光信号的星座图,也无法正确估计信号的畸变情况。在已有文献报道中,Weerdenburg 等^[3]基于 K-means 的聚类算法对接收星座图的光信号进行了性能检测,此算法需要先做载波相位恢复再做聚类分析,比较适用于低阶调制格式 QPSK 和 8QAM,不宜用于 16QAM 等高阶调制格式。此外,Fludger 等^[4]提出的发射机损伤估计方法,也需对畸变信号先做载波相位恢复,而且无法预知畸变信号的畸变程度,最终影响畸变系数的估计效果。

本文提出一种新的实验系统和处理算法用于解决传统方案中相位噪声与信号畸变同时存在时的信号恢复与畸变评估问题。在该方案中,使信号链路长度和本振光信号链路长度基本相等,信号光和本振光使用同一光源,使得本振光和信号光在接收机之前的相位保持相干状态,相干拍频中的相位差处于缓变状态,考虑外界振动,该相位差在毫秒量级可以认为是恒定的^[5],这为下一步的信号处理算法处理提供了充足的时间窗口条件。后续处理中采用经典的 K-means 聚类算法^[6-7]对接收信号进行预处理得到聚类中心点,根据聚类点的相对位置信息可以估计信号的畸变类型和畸变系数,并可以用于智能设置半径导向均衡器(RDE)参数,同时还能盲相位搜索法(BPS)^[8-9]进行载波相位恢复提供理想星座参考点。实验结果表明,该算法可以很好地估算出光通信系统中发射机存在的畸变情况和畸变系数。

由于信号光与本振光沿不同路径传播,即使两段长度严格相等,但受外界环境的干扰,两路光在分别经过信号链路和本振链路之后,两者相位差仍然会随时间缓慢波动,在毫秒量级采集时间窗内可近似为一个恒定值,这会导致星座图整体旋转,因此在最后环节仍然需要载波相位的恢复来补偿这一恒定的旋转角度。该技术方法的优势在于不需要额外本振光源和光锁相环,解决了信号畸变条件下实现相位恢复的难题,可有效分析信号畸变损伤并提供精确的信号质量评估结果^[10],适用于发射机损伤因素的评估以及发射机工作状态的检测。

2 工作原理

2.1 实验装置

传统的相干通信系统中信号光和本振光的相位是不相关的,导致接收的信号都含有随机的相位噪声,因此须要采取一种本振光和信号光的相位差在较长时间窗口内缓慢波动的实验系统^[5]。

实验系统如图 1 所示,信号光和本振光共用同一个窄带光源,通过调整本振光传输链路的长度,使信号光和本振光的光纤链路长度基本相等,两路光程相等,让本地振荡光源和信号光之间的相位差在较长的时间窗口内恒定。所述缓变相位波动时间尺度为毫秒量级^[5],对于常见的 10 GHz 及以上光信号调制速率,在 10000 个调制周期内相位差可认为是恒定的。当光纤链路长度不等时,相位噪声快速变化。

设 P_S 为信号光功率, P_{LO} 为本振光功率,则相干检测接收机中入射光功率^[11]为

$$P(t) = P_S + P_{LO} + 2\sqrt{P_S P_{LO}} \cos(\omega_{IF}t + \phi_S - \phi_{LO}), \quad (1)$$

式中, ω_{IF} 表示中频, $\omega_{IF} = \omega_S - \omega_{LO}$, ϕ_S 和 ϕ_{LO} 分别表示信号光和本振光的相位。由于信号光和本振光的光纤链路长度基本相等,这时, $\omega_{IF} = 0$, $\phi_c = \phi_S - \phi_{LO}$,在一定时间窗口内, ϕ_c 为常数,近似于零差探测^[11],因此

$$P(t) = P_S + P_{LO} + 2\sqrt{P_S P_{LO}} \cos \phi_c. \quad (2)$$

在光纤链路相等的系统中,接收机接收到的信号在作时钟恢复处理之后即可得到带有恒定相位噪声的接收数据,各个信号星座点之间是清晰分开的。在光纤链路不等的系统中,接收信号在作时钟恢复处理之后,星座点是随机旋转的。

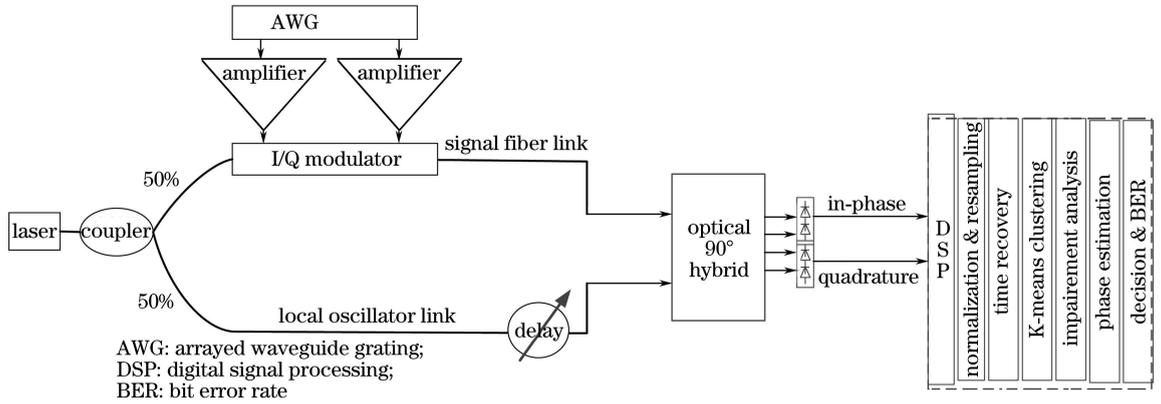


图1 信号光和本振光链路长度相等实验系统原理图

Fig. 1 Schematic of experiment with the same length of signal fiber link and local oscillator link

2.2 聚类算法

聚类算法使用 K-means 聚类算法, K-means 算法^[6-7]的原理是:以复平面中任选 k 个信号点为中心进行聚类,以欧氏距离平方最小为标准,将剩余的数据点归类;通过迭代,逐次更新 k 个聚类中心的位置,直到达到跳出迭代的阈值条件。假设要把原始数据点分为 k 个类别,算法的实现过程如下^[6]。

1) 随机选取 k 个初始中心点;

2) 在第 n 次迭代中,求每个样本数据到 k 个聚类中心点的距离,将该样本数据点归到距离最短的中心点所在的类;

3) 计算每个类中的平均距离,更新该类的中心点;

4) 对于所有的 k 个聚类中心,如果利用步骤 2)

3)的迭代法更新后,值保持不变或达到一定迭代次数,则迭代结束,否则继续迭代。

K-means 聚类算法^[6]中,采用欧氏距离平方作为计算聚类中心与数据点的分类距离。

$$D = \sum_{k=1}^K \sum_{d \in C_k} (d - M_k)^2, \quad (3)$$

式中, K 是聚类数, M_k 作为初始的聚类中心点, d

为所有属于聚类 C_k 中的点, D 为所有点与聚类中心点误差总和。为保证聚类算法的稳定性,设定聚类算法的迭代次数为 10, 迭代次数过低时聚类算法可能无法得到正确聚类中心, 迭代次数过高时算法运行时间增加, 因此应选择适中的迭代次数。

2.3 畸变系数估计

使用聚类中心点的位置信息可计算出畸变系数, 以下将针对方形 16QAM 三种信号畸变类型分别估计畸变系数。

图 2(a) 给出了 I-Q 增益不平衡的星座图, 其是由 I 路和 Q 路的驱动放大器的增益不相等引起, 定义星座图聚类中心点的 I 路和 Q 路的长度之比 G 为 I-Q 增益不平衡系数^[1]:

$$G = \alpha / \beta, \quad (4)$$

式中, α 为星座图聚类中心点 I 路幅值, β 为星座图聚类中心点 Q 路幅值。

图 2(b) 给出了 I-Q 相位误差情况, 这是由 IQ 调制器中的 90° 相位调制器失衡引起的, 星座图聚类中心点 I 路和 Q 路的夹角 θ 与 I-Q 相位误差系数 P ^[1] 的关系为

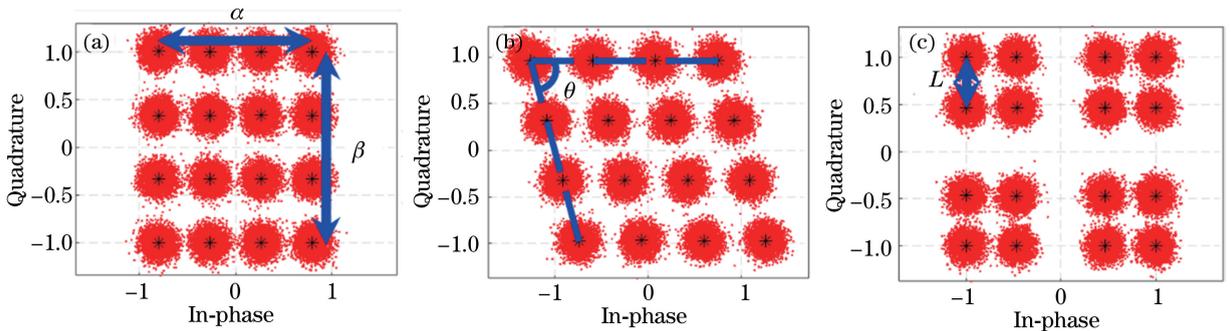


图2 三种畸变类型的星座图。(a) I-Q 增益不平衡;(b) I-Q 相位误差;(c) I-Q 幅度分布不均匀

Fig. 2 Constellations of three kinds of distortion. (a) I-Q gain imbalance constellation;

(b) I-Q phase error constellation; (c) I-Q amplitude uneven distribution constellation

$$P = 90^\circ - \theta. \quad (5)$$

而图 2(c)则是 I-Q 幅度分布不均匀的星座图, 这是因为射频信号峰值过大造成的 IQ 调制器非线性调制, 定义星座图中最外圈半径聚类中心点和次外圈半径聚类中心点的实际距离 L 与标准星座图的理想距离(2/3)之差为 I-Q 幅度分布不均匀系数 A :

$$A = L - 2/3. \quad (6)$$

2.4 载波相位恢复

使用盲相位搜索(BPS)^[8-9]算法进行载波恢复, BPS 算法中以聚类中心点的位置信息作为判决星座点, 得到相位恢复后的星座图。BPS 算法的具体描述是: 给出一系列测试角度 φ_b , 将测试角度看作是相位噪声的补偿角度, 共有 B 个:

$$\varphi_b = \frac{b\theta_r}{B}, b=0, 1, \dots, B-1, \quad (7)$$

式中, θ_r 为测试角度的扫描范围, 输入数据 $X(m)$ 经过相位角度为 φ_b 的相位旋转后, 输入判决电路, 判决中以聚类中心点 $C(k)$ 为判决值, 然后计算相位旋转后的输入信号 $X(m)$ 和判决值在复平面上最近星座点的平方距离:

$$|d_{m,b}|^2 = |X(m) \exp(j\varphi_b) - C(k)|^2. \quad (8)$$

为了消除放大自发辐射(ASE)噪声的损伤^[8], 采用 $2N+1$ 个相邻码元经过相同的测试角度旋转后的距离平方和的平均值:

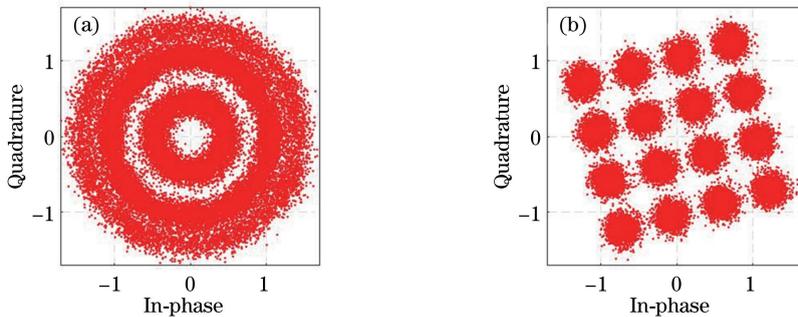


图 3 光纤链路星座图。(a)长度不等;(b)相等

Fig. 3 Constellation of fiber links. (a) Unequal; (b) equal

图 4(a)为用 K-means 聚类算法对无畸变的 16QAM 信号进行聚类处理后得到的星座图的聚类中心点, 图 4(b)为由聚类中心点的相对位置信息得到理想聚类点后的位置, 该聚类位置可作为理想参考点, 用以设置半径导向均衡器(RDE)和进行相位噪声恢复处理。

由发射机引起的星座图畸变主要有三种: I-Q 增益不平衡、I-Q 相位误差、I-Q 幅度分布不均匀。分别以标准星座点为参考点使用 BPS 算法和以理

$$S_{m,b} = \frac{1}{2N+1} \sum_{n=-N}^N |d_{n,b}|^2. \quad (9)$$

在不同测试角度 φ_b 中, 获取平均距离 $S_{m,b}$ 为最小时的测试角度作为该输入信号的相位噪声。

整个算法处理的具体步骤为: 1) 在信号光链路和本振光链路基本对齐的情况下, 利用 K-means 聚类算法得到星座图的聚类中心点位置; 2) 其聚类中心点位置可用来设置半径导向均衡器(RDE)和进行载波相位恢复; 3) 使用聚类中心点估计信号畸变类型和畸变系数, 以精确评估和监测发射机信号质量。

3 仿真分析

为研究该聚类算法性能, 开展了单偏振 14 Gbuad 方形 16QAM 信号相干光通信系统仿真研究, 信号光和本振光光纤链路长度基本相等, 符号长度为 2^{16} , 激光线宽为 100 kHz。

首先, 将信号光和本振光在光纤链路长度基本相等和长度不等时的实验系统下进行仿真分析。

图 3 为光纤链路长度不等和基本相等情况下的星座图对比。当本振光和信号光光纤链路长度不等时, 信号的相位噪声是快速变化的; 而在光纤链路基本相等的情况下, 信号的相位噪声在时间窗口内是缓慢波动的, 因此对接收信号做时钟恢复之后可以得到清晰的星座图, 进而进行后续的聚类算法处理。

想聚类星座点为参考点使用 BPS 算法处理三种畸变情况下的信号, 得到的结果如图 5 所示。

从图 5 可以明显看出, 分别在 I-Q 增益不平衡系数为 0.70、I-Q 相位误差为 15° 的信号畸变情况下, 采用标准星座点和聚类星座点作参考点恢复出来的星座图效果是明显不一样的, 如图 5(a)和(d)、图 5(b)和(e)所示, 通过聚类星座点恢复的星座图明显更清晰; 在 I-Q 分布不均匀系数为 0.1 时, 单从用标准星座点和聚类星座点恢复得到的星座图上来

看没有明显差别,但标准星座点恢复的 EVM 值为 12.09%,聚类星座点恢复的误差向量幅度(EVM)值为 11.5%,通过聚类星座点恢复得到的信号其 EVM 值相对更小,说明其恢复信号的质量更佳^[12-13]。

如图 6 所示,I-Q 增益不平衡系数理论值分别在 0.95、0.90、0.85、0.80 时,即使 OSNR 比较小(15 dB),聚类算法也能准确估计出 I-Q 增益不平衡系数;I-Q 相位误差理论值在 $+1^\circ$ 到 $+19^\circ$ 范围内,聚类算法可以准确估计出 I-Q 相位误差数值。说明即

使在较低的 OSNR 下,本聚类算法也可以准确估计出信号畸变情况以及畸变值。

如图 7 所示,I-Q 幅度分布不均匀系数理论值分别在 $+0.2$ 、 $+0.1$ 、 -0.1 时,聚类算法在 OSNR 比较小(15 dB)时也能准确估计出 I-Q 增益不平衡系数;当理论值为 -0.2 、OSNR 低于 $+17$ dB 时,不能精确地估计其系数,这是由于 I-Q 幅度分布不均匀系数为 -0.2 和低 OSNR 时,16QAM 星座图的内圈星座点和中圈星座点混叠较严重,影响聚类算法的准确度。

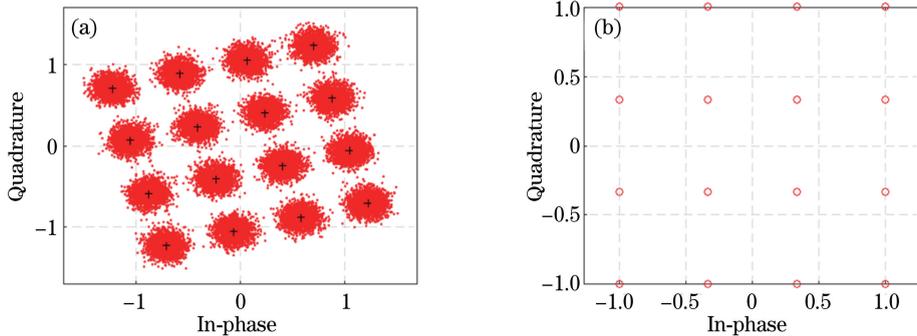


图 4 (a) 聚类处理后的星座图; (b) 理想聚类点的星座图

Fig. 4 (a) Constellation with cluster analysis; (b) cluster centroid constellation

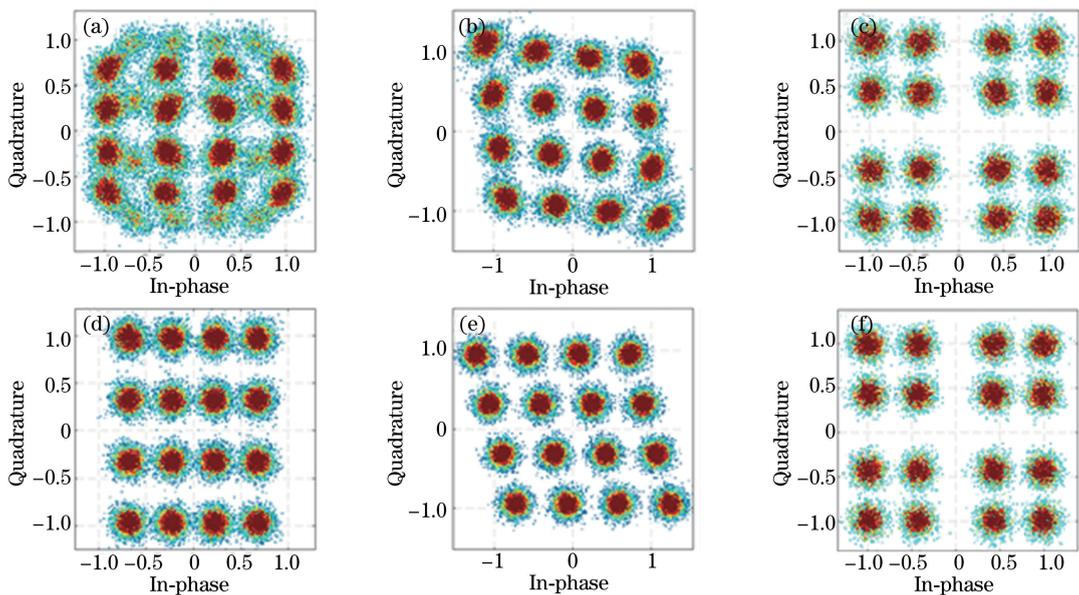


图 5 DSP 处理恢复的星座图。(a)、(b)、(c) 分别为用标准星座点恢复的 I-Q 增益不平衡、I-Q 相位误差、I-Q 幅度分布不均匀的星座图; (d)、(e)、(f) 分别为用聚类星座点恢复的 I-Q 增益不平衡、I-Q 相位误差、I-Q 幅度分布不均匀的星座图

Fig. 5 Distorted constellations after DSP. Constellations of (a) I-Q gain imbalance signal, (b) I-Q phase error signal, and (c) I-Q amplitude uneven distribution signal processed reference to the standard constellation; constellations of (d) I-Q gain imbalance signal, (e) I-Q phase error signal, and (f) I-Q amplitude uneven distribution signal processed reference to the cluster centroid constellation

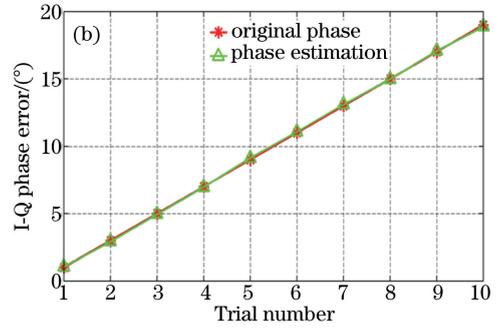
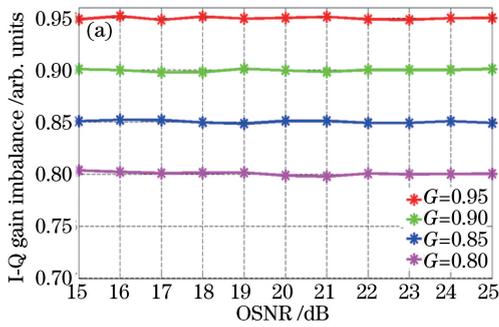


图 6 不同 OSNR 下对畸变情况的估计值。(a) I-Q 增益不平衡系数估计值; (b) I-Q 相位误差系数估计值
Fig. 6 Estimated values of distortion with different OSNRs. (a) Estimated values of I-Q gain imbalance coefficient; (b) estimated values of I-Q phase error

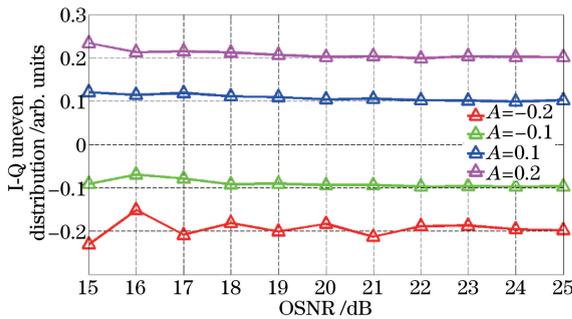


图 7 不同 OSNR 下 I-Q 幅度分布不均匀系数估计图
Fig. 7 Estimated values of I-Q amplitude uneven distribution with different OSNRs

4 实验验证

搭建了实验系统并进行实验验证,使用任意波形发生器(泰克公司 AWG7122C 型)生成方形

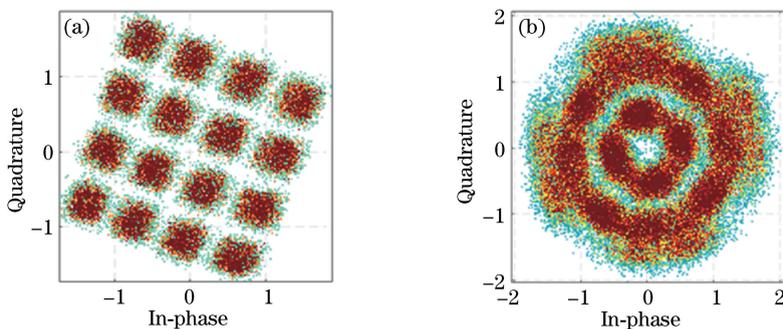


图 8 (a) 光纤链路相等时接收信号星座图; (b) 光纤链路不等时接收信号星座图
Fig. 8 Constellations of received signal with (a) equal fiber link and (b) unequal fiber link

图 9 表明,本实验系统和算法成功地恢复了三种畸变信号的星座图。

实验扫描了 I-Q 增益不平衡系数分别为 1.00、0.95、0.90、0.85、0.80、0.75 时的估计值,结果如图 10(a)所示,横轴为理论值,纵轴为估计值。蓝色虚线为倾斜角度为 45° 的虚线,理想情况下的数据点在该曲线上,实验数据点为红色星状点,这些数据

16QAM 信号,数据长度为 500 kbit,码元调制速率为 3 Gbaud,经过光纤链路传输进入到相干接收机中,用数字串行分析仪(泰克公司 DSA72004C)采集数据,将接收到的数据进行线下处理。

在信号光链路和本振光链路长度基本相等(均为 4 m 左右)时,接收信号仅作时钟恢复处理的星座图如图 8(a)所示,信号在时间窗口内只具有一个恒定的相位噪声,星座图非常清晰;图 8(b)为光纤链路长度不相等的情况,信号光传输链路为 4 m 长的保偏光纤,本振光传输链路为 4 m 保偏光纤加上 1 km 单模光纤,可以看到图中的信号相位噪声非常严重,是无法进行聚类分析的。

使用聚类算法和 BPS 算法对 I-Q 增益不平衡、I-Q 幅度分布不均匀和 I-Q 相位误差三种发射机信号畸变时的信号进行恢复,恢复结果如图 9 所示。

点在理想曲线附近,表明 I-Q 增益不平衡系数估计值和理论值非常接近,说明 I-Q 增益不平衡系数在 0.75 到 1.00 的范围内时,聚类算法可以准确估计出 I-Q 增益不平衡系数。

对于 I-Q 幅度分布不均匀的情况,实验测算了系数分别为 $+0.20$ 、 $+0.10$ 、 0 、 -0.10 、 -0.15 、 -0.20 时的估计值,如图 10(b)所示,横轴为理论值,纵轴

为估计值。实验数据点为红色星状点,这些数据点在理想曲线附近,表明 I-Q 幅度分布不均匀系数估计值和理论值十分接近,说明 I-Q 幅度分布不均匀

系数在 $+0.20$ 到 -0.15 范围内时,能准确估计出 I-Q 幅度分布不均匀系数;对于系数为 -0.20 的情况,估计值和理论值差别较大,与仿真结果一致。

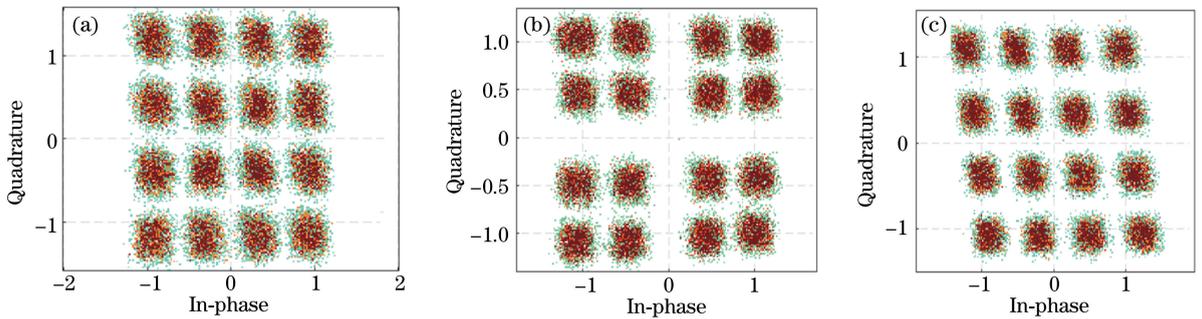


图 9 三种畸变信号恢复后星座图。(a) I-Q 增益不平衡;(b) I-Q 幅度分布不均匀;(c) I-Q 相位误差

Fig. 9 Recovery constellations of (a) I-Q gain imbalance signal, (b) I-Q amplitude uneven distribution signals, and (c) I-Q phase error signal

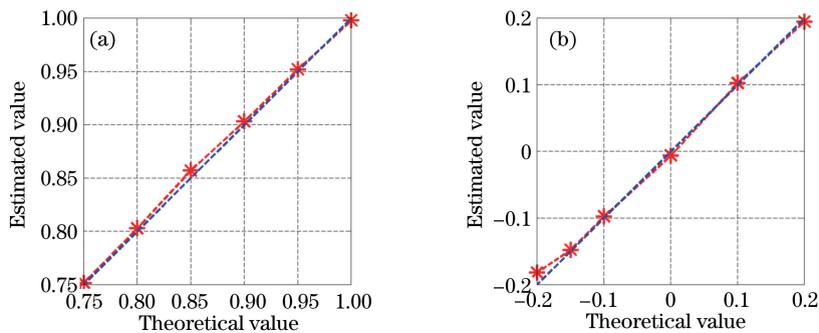


图 10 不同情况下畸变信号的估计值和理论值。(a) I-Q 增益不平衡;(b) I-Q 幅度分布不均匀

Fig. 10 Estimated values and theoretical values of distorted signals in different circumstances.

(a) I-Q gain imbalance signal; (b) I-Q amplitude uneven distribution signals

5 结 论

提出一种新型的相干检测与发射机畸变评估方法,解决了传统系统中信号畸变条件下的信号恢复及畸变评估的问题。首先本振光源和信号光源使用同一个光源,调整光传输链路和本振光传输链路的长度,使之基本相等,相干检测时拍频的相位项可近似为缓慢变化,在较长时间窗口内保持相位差恒定,这使得对采集长度较长的数据进行聚类分析成为可能;同时借助聚类分析获取星座图中心位置信息,对畸变信号的畸变情况进行智能评估,准确补偿相干拍频过程中的恒定相位差。研究了 I-Q 增益不平衡、I-Q 幅度分布不均匀和 I-Q 相位误差三种发射机畸变因素的影响,仿真和实验结果均表明,该 K-means-BPS 算法可以成功对三种畸变的 16QAM 信号进行载波相位恢复并准确得到相应的畸变系数, I-Q 增益不平衡系数的精确估计范围是 0.75 至 1.00 , I-Q 幅度分布不均匀系数的估计范围是 -0.15

到 $+0.20$, I-Q 相位误差的估计角度是 0° 到 $+19^\circ$ 。为发射机模块调试、损伤评估提供了一种智能、灵活、简单的技术解决方案。

参 考 文 献

- [1] Jacobs S A, Marsland R A. Constellation recovery and impairment evaluation through minimization of the blind EVM[J]. Optics Express, 2016, 24(19): 21708-21721.
- [2] Wang D W. Some applications of DSP algorithm to coherent optical communications system [D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2013: 14-15.
王大伟. 数字信号处理算法在相干光通信系统中的应用研究[D]. 浙江: 浙江大学, 2013: 14-15.
- [3] van Weerdenburg J, van Uden R, Sillekens E, *et al.* Cluster analysis of received constellations for optical performance monitoring [C]. 42nd European Conference on Optical Communication, Proceedings of VDE, 2016: 779-781.

- [4] Fludiger C R S, Kupfer T. Transmitter impairment mitigation and monitoring for high baud-rate, high order modulation systems [C]. 42nd European Conference on Optical Communication, Proceedings of VDE, 2016: 256-258.
- [5] 单广军, 刘德明, 李劲, 等. 一种 QAM 光矢量信号产生及零差解调装置: 201210537275. X[P]. 2013-04-17.
- [6] Hartigan J A. A K-means clustering algorithm: Algorithm AS 136[J]. Applied Statistics, 1979, 28: 126-130.
- [7] Zhou W Z, Chen G L, Du S S, *et al.* An improved iterative closest point algorithm using clustering[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(5): 051202.
周文振, 陈国良, 杜珊珊, 等. 一种聚类改进的迭代最近点配准算法[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(5): 051202.
- [8] Pfau T, Hoffmann S, Noé R. Hardware-efficient coherent digital receiver concept with feedforward carrier recovery for M-QAM constellations [J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(8): 989-999.
- [9] Tang Y J, Dong Y J, Ren H L, *et al.* Phase noise compensation algorithm based on Kalman filtering in time and frequency domains for CO-OFDM system [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(9): 0906002.
唐英杰, 董月军, 任宏亮, 等. 基于时频域卡尔曼滤波的 CO-OFDM 系统相位噪声补偿算法[J]. 光学学报, 2017, 37(9): 0906002.
- [10] Arbab V R, Saghari P. Effects of fiber impairments on constellation diagrams of optical phase modulated signals [J]. Optical Engineering, 2012, 51(4): 045008.
- [11] Agrawal G P. Fiber-optic communication systems [M]. Jia D F, Xin X J, Transl. Beijing: Publishing House of Electronics Industry Press, 2016: 120-122.
阿戈沃. 光纤通信系统[M]. 贾东方, 忻向军, 译. 北京: 电子工业出版社, 2016: 182-190.
- [12] Schmogrow R, Nebendahl B, Winter M, *et al.* Error vector magnitude as a performance measure for advanced modulation formats [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(1): 61-63.
- [13] Li C, Zhao J, Wang W, *et al.* 4×100 Gbit/s long-distance quasi-single-mode Bi-directional transmission with few-mode fiber[J]. Chinese Journal of Laser, 2017, 44(2): 0206001.
李超, 赵健, 王伟, 等. 4×100 Gbit/s 少模光纤长距离准单模双向传输的实验研究[J]. 中国激光, 2017, 44(2): 0206001.