

基于 GSOP 的正交不平衡损伤估计算法研究

周娴, 高天宇, 霍佳皓, 申晓杰, 卢东旭, 皇甫伟, 涂佳静, 隆克平

(北京科技大学计算机与通信工程学院人工智能研究院, 北京 100083)

摘 要: 为实现高速光通信系统高效低成本测试的目标, 基于施密特正交化过程 (GSOP, Gram-Schmidt orthogonalization procedure), 提出了一种适用于偏振复用—多进制正交幅度调制 (PDM-MQAM) 相干光通信系统的正交不平衡损伤估计 (IQ-ImEstimation, IQ imbalance estimation) 算法。根据同相信号和正交信号两路信号功率关系及相关性, 设计幅度失配估计和相位失配估计 2 种方案。通过对 34 GBaud PDM-MQAM 相干光通信系统进行仿真与实验, 验证了 IQ-ImEstimation 算法的正确性和有效性。

关键词: 正交不平衡损伤估计; 多进制正交幅度调制; 相干光通信系统; 数字信号处理

中图分类号: TN911.6

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-436x.2018157

Research on IQ imbalance estimation algorithm based on GSOP

ZHOU Xian, GAO Tianyu, HUO Jiahao, SHEN Xiaojie, LU Dongxu,

HUANGFU Wei, TU Jiajing, LONG Keping

Institute of Artificial Intelligence School of Computer and Communication Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

Abstract: In order to satisfy the demand of the efficiency and low cost measurement for high rate optical communication system, the IQ-ImEstimation algorithm was proposed for IQ imbalance estimation in the PDM-MQAM coherent optical communication system based on GSOP. Two estimation schemes include amplitude impairment and phase impairment were designed by utilizing the power and correlation. Finally, a 34 GBaud PDM-MQAM system was simulated and experimentalized. The results indicate that the IQ-ImEstimation algorithm is accuracy and effective.

Key words: IQ-ImEstimation, MQAM, coherent optical communication system, digital signal processing

1 引言

近年来, 研究人员对高速光通信系统的研究如火如荼, 取得了一系列突破性进展。依靠成熟的数字信号处理技术和相干检测方案, 光通信系统传输速率得到了快速提升。然而随着传输速率的提升和调制码型的复杂化, 系统损伤测试复杂度和校准难度呈指数级增加趋势。其中, 系统中 IQ 两路信号偏置点的设置不正确、3 dB 耦合器分光比不对称、

PD (photo detector) 响应度的变化、混频器各路信号之间的不平衡等环节引入的正交不平衡 (IQ imbalance) 损伤会使系统性能恶化, 还会影响后续 DSP 模块正常工作^[1-2]。针对这一现状, 对于不同模型, 研究人员提出了不同的解决方案, 包括基于 GSOP 的 IQ 补偿算法^[3]、基于最大信噪比估计 (MSEM, maximum SNR estimation method) 的 IQ 补偿算法^[4]、复值—多进多出 (MIMO, multiple input multiple output) 自适应均衡器^[5]、Löwdin 正交化算

收稿日期: 2018-05-02; 修回日期: 2018-09-03

通信作者: 周娴, zhouxian219@gmail.com

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61671053, No.61871030); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (No.FRF-BD-17-015a)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61671053, No.61871030), The Central University Basic Business Expenses Special Fording for Scientific Research Project (No.FRF-BD-17-015a)

法^[6]等,均可有效地对 IQ imbalance 进行补偿。但是目前缺少针对 IQ imbalance 损伤的估计算法,在系统进行损伤估计时缺少衡量标准,若使用传统的仪器仪表进行损伤测试,测试成本高,不适合进行大规模部署。

针对上述研究现状,本文基于 GSOP 原理,通过分析信号 IQ 分支的功率变化及其相关性变化,提出了一种幅度与相位正交不平衡检测估计算法。该算法估计性能与调制格式无关,在仿真与实验中分别对 QPSK、8QAM、16QAM 等调制方式进行了验证。实验结果表明,该算法对以上 3 种调制方式均可有效估计系统中存在的 IQ imbalance 损伤,且估计精度优良、误差较小。

2 针对 PDM-MQAM 相干光通信系统的正交不平衡损伤估计

PDM-MQAM 相干光通信系统整体框架如图 1 所示。其中,图 1(a)为系统结构框架,包含发射机、背靠背 (BTB, back to back) 信道以及接收端,图 1(b)为接收端 DSP 处理流程。

2.1 正交不平衡效应的理论模型

在发射端,首先利用偏振分束器 (PBS, polarization beam splitter) 将光源分解为 2 路正交的偏振光 (记为 X 偏振态和 Y 偏振态),并分别对 2 路 34 GBaud MQAM 电信号使用马赫增德尔调制器 (MZM, Mach-Zehnder modulator) 进行相位调制,

调制后的光信号分别表示为 E_x 和 E_y 。 E_x 和 E_y 经偏振合束器 (PBC, polarization beam combiner) 耦合成为 1 路 34 GBaud PDM-MQAM 光信号 E_s 。

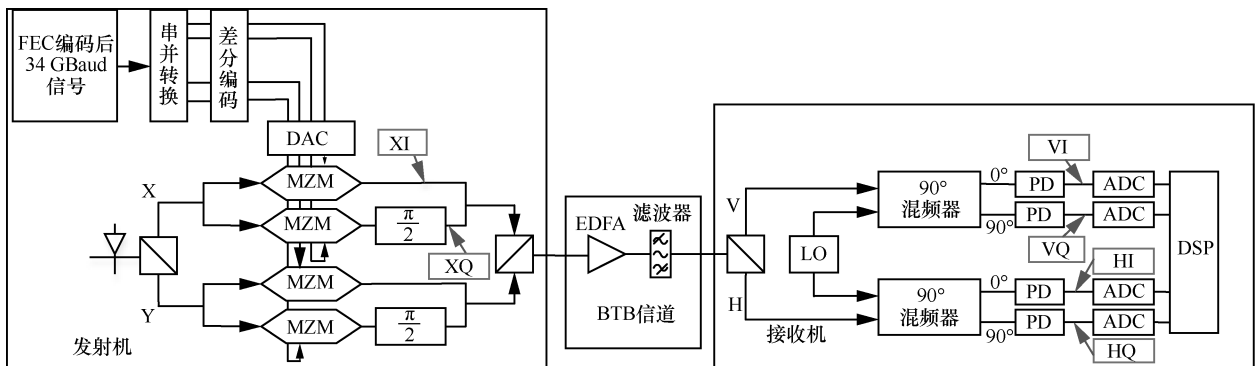
光信号经过掺铒光纤放大器 (EDFA, erbium doped fiber amplifier) 放大后,在接收端利用光分束器将接收的光信号 E_r 分为 2 路偏振态信号 E_{rv} 和 E_{rh} ,同样本振信号 LO 经过光分束器也被分为 2 路正交的偏振信号。紧接着对 2 束偏振光分别用 2 个 90° 混频器进行光相干接收,混频器输出信号将分别利用光电检测器进行平衡光检测,将光强度信息转换为电信号。

在理想情况下,以 v 偏振态为例,相干接收机接收后输出信号可表示为

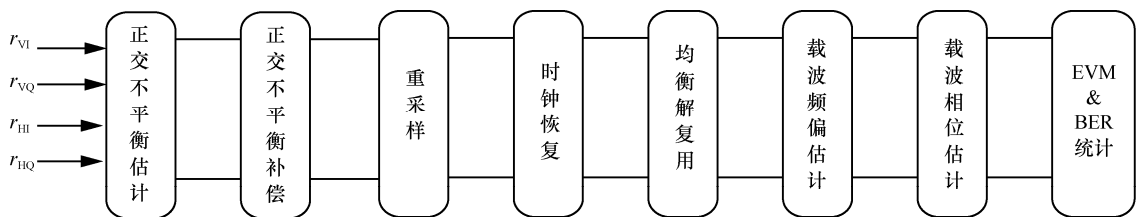
$$\begin{cases} VI \propto \text{Re}\{E_{rv}E_{LO}^*\} \\ VQ \propto \text{Im}\{E_{rv}E_{LO}^*\} \end{cases} \quad (1)$$

其中, Re 为取实部, Im 为取虚部, E_{LO}^* 为本振光源的共轭, VI 和 VQ 分别为光检测电流的 I 路分量和 Q 路分量。

在整个传输系统中,一些环节有可能会引入 IQ imbalance 损伤,例如, IQ 2 路偏置点的设置不正确、3 dB 耦合器分光比不对称、PD 响应度的变化、混频器各路之间的不平衡等。经过 90° 混频器平衡接收后的输出信号,存在 IQ imbalance 损伤模型可等效为^[7]



(a) PDM-MQAM 系统结构框架



(b) DSP 处理流程

图 1 PDM-MQAM 相干光通信系统整体框架

$$\begin{cases} VI \propto \text{Re}\{E_r E_{LO}^*\} = \cos \theta_v(t) + \Delta n \\ VQ \propto \alpha \text{Im}\{E_r E_{LO}^* \exp(j\theta)\} = \\ \alpha [\cos(\theta) \sin \theta_v(t) + \sin(\theta) \cos \theta_v(t)] + \Delta n \end{cases} \quad (2)$$

其中, α 为 IQ 两路信号之间的幅度失配因子, θ 为 IQ 两路信号之间的相位失配因子, Δn 为高斯白噪声, $\theta_v(t)$ 为接收到的信号中 v 偏振态的相位信息, $\cos \theta_v(t)$ 为 I 路信号, $\sin \theta_v(t)$ 为 Q 路信号。

2.2 正交不平衡损伤估计算法原理

PDM-MQAM 系统接收机 DSP 处理流程如图 1(b)所示。DSP 处理核心算法主要包括 IQ-ImEstimation 算法、IQ imbalance 补偿算法、重采样过程、时钟同步算法、自适应均衡偏振解复用、频偏估计算法及载波相位恢复算法。

1) IQ 幅度失配估计原理

为了得出 α 的估计值 α' , 考虑将 $\cos \theta_v(t)$ 与 $\cos(\theta) \sin \theta_v(t) + \sin(\theta) \cos \theta_v(t)$ 消除。首先求出信号同相分量 (I 路) 功率的均值为

$$P_I = \overline{VI^2(t)} = \overline{[\cos \theta_v(t) + \Delta n]^2} \approx \overline{\cos^2 \theta_v(t)} \quad (3)$$

随后求出信号正交分量 (Q 路) 功率的均值为

$$\begin{aligned} P_Q &= \overline{VQ^2(t)} = \overline{\{\alpha [\cos(\theta) \sin \theta_v(t) + \sin(\theta) \cos \theta_v(t)] + \Delta n\}^2} \\ &\approx \overline{\alpha^2 \sin^2 [\theta_v(t) + \theta]} \end{aligned} \quad (4)$$

其中, $\overline{(\bullet)}$ 表示取均值运算, $\overline{\sin^2 [\theta_v(t) + \theta]}$ 与 $\overline{\cos^2 \theta_v(t)}$ 相比增加了一个初始相位 θ , 但功率均值仍相等, 二者可消去, 结合式(3)和式(4)可得出如下关系

$$\alpha' \approx \sqrt{\frac{P_Q}{P_I}} = \sqrt{\frac{\alpha^2 \sin^2 [\theta_v(t) + \theta]}{\cos^2 \theta_v(t)}} = \alpha \quad (5)$$

2) IQ 相位失配估计原理

通过 GSOP 原理可知, 向量 \mathbf{u} 在 \mathbf{v} 上的投影为 \mathbf{u}' , 即

$$\mathbf{u}' = \frac{\mathbf{u} \cdot \mathbf{v}}{|\mathbf{v}|} \frac{\mathbf{v}}{|\mathbf{v}|} \quad (6)$$

其中, $|\bullet|$ 表示取向量的模。将这一原理应用在本系统中可得

$$VQ^0(t) = \frac{\rho}{P_I} VI(t) = \frac{\rho}{P_I} [\cos \theta_v(t) + \Delta n] \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \rho &= \overline{VI(t)VQ(t)} = \overline{[\cos \theta_v(t) + \Delta n][\alpha \sin(\theta_v(t) + \theta) + \Delta n]} \\ &\approx \alpha \overline{\cos \theta_v(t) \sin(\theta_v(t) + \theta)} \end{aligned} \quad (8)$$

其中, $VQ^0(t)$ 为 $VQ(t)$ 投影在 $VI(t)$ 上的分量, ρ 为 2 路信号的相关性。

联合式(2)中 Q 路表达式中包含的 I 路信息 $\sin(\theta) \cos \theta_v(t)$, 可得

$$\alpha \sin(\theta) \cos \theta_v(t) + \Delta n \approx \frac{\rho}{P_I} \cdot [\cos \theta_v(t) + \Delta n] \quad (9)$$

忽略噪声 Δn , 可得 θ 的估计值 θ' 为

$$\theta' \approx \arcsin\left(\frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\rho}{P_I}\right) \quad (10)$$

3 基于 GOSP 的正交不平衡估计算法的仿真与实验

3.1 正交不平衡损伤估计仿真结果与分析

本文设计的 34 GBaud PDM-MQAM 相干光通信系统由 Matlab 软件和 VPI 软件搭建。系统中主要器件的参数如表 1 所示。

表 1 34 GBaud PDM-MQAM 仿真系统主要参数

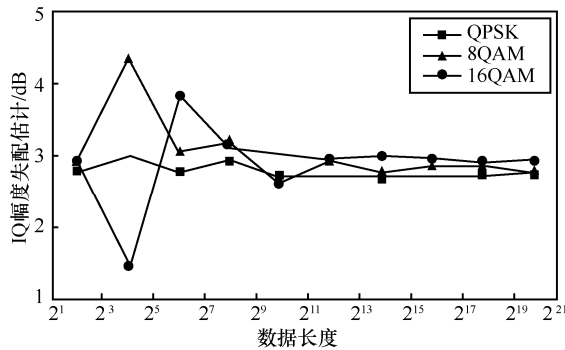
参数	值
调制方式	QPSK/8QAM/16QAM
波特率/GBaud	34
RIN 噪声/(dB·Hz ⁻¹)	-160
PD 热噪声/(pA·Hz ^{-0.5})	20
光信噪比/dB	16/19/22
收发机带宽/GHz	25
激光器线宽/kHz	100
PD 响应率/(A·W ⁻¹)	1
PD 暗电流/nA	10
数据长度	2 ¹²

1) 数据长度对算法估计性能影响

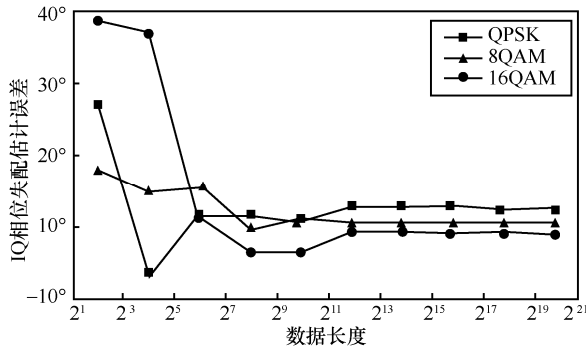
在进行仿真及实验之前, 本文就数据长度对算法精度的影响进行了仿真实验。3 种调制方式双偏振态下光信噪比 (OSNR, optical signal noise ratio) 取 $BER=10^{-4}$ 时对应的理论值, QPSK 对应 OSNR 理论值取为 16 dB, 8QAM 对应 OSNR 理论值取为 19 dB, 16QAM 对应 OSNR 理论值取为 22 dB。IQ 相位失配设置为 60°, IQ 幅度失配设置为 3 dB, 仿真结果如图 2 所示。

由于数据长度与幅度失配估计误差关系不能突出问题所在, 图 2(a)给出了数据长度与 IQ 幅度失配估计的关系, 在数据量较小的情况下, 在计算 IQ 两路信号的功率均值时, 由于数据点的缺失和不均

匀, 会使 P_I 和 P_Q 方差过大, 同时在噪声的影响下, 会导致 α' 出现较大波动。随着调制阶数的增加, 这一问题更加显著。图 2(b) 给出了数据长度与 IQ 相位失配估计误差的关系。在计算 IQ 2 路信号的相关性 ρ 时, 由于数据点的缺失和不均匀, 会使 ρ 误差过大, 同时在噪声的影响下, 导致算法估计误差放大。随着调制阶数的增加, 这一问题更加突出。综合图 2 结果可知, 当数据量取大于或等于 2^{12} 时, 可避免数据长度对算法的影响, 使算法保持良好的估计性能, 在随后的实验中实验数据长度取 2^{12} 。



(a) 数据长度与IQ幅度失配估计关系



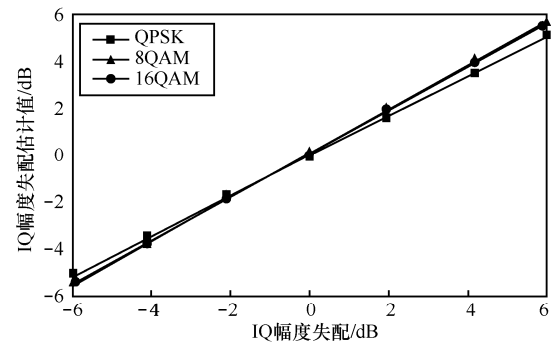
(b) 数据长度与IQ相位失配估计误差关系

图 2 数据长度与算法估计性能关系

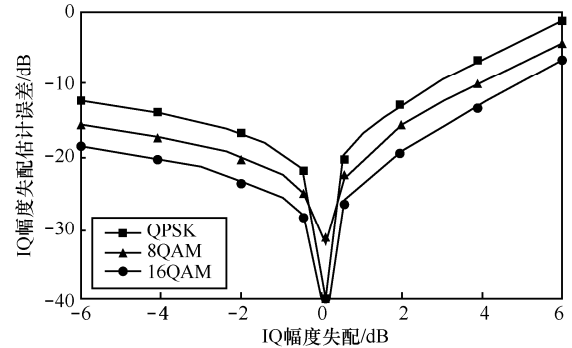
2) IQ 幅度失配估计仿真结果

本文对 3 种调制方式进行了 IQ 幅度失配仿真实验, 包括 IQ 幅度失配估计与 IQ 幅度失配估计误差, 仿真结果如图 3 所示, 其中, IQ 幅度失配估计误差换算为 dB 值表示。

从图 3 可以看出, 幅度失配估计方案在 IQ 幅度失配估计范围较广 ($-6\text{dB}, 6\text{dB}$), 且 IQ 幅度失配估计误差小于 1 dB 时, 可有效估计系统中 IQ 幅度失配程度。在式(5)中 P_I 与 P_Q 进行相消, 同时将 IQ 2 路相位信息 $\theta_v(t)$ 消去, α' 估计精度仅受噪声 Δn 影响, 与调制格式无关。随着 OSNR 增加, IQ 幅度失配估计误差减小。



(a) IQ幅度失配估计

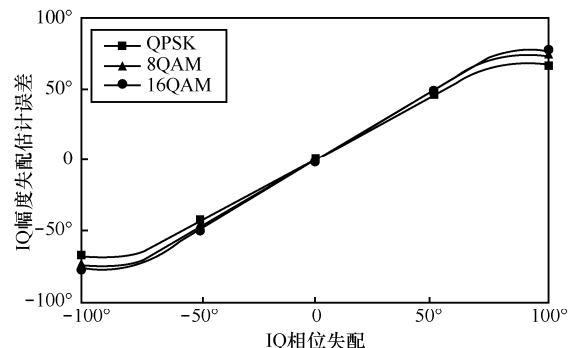


(b) IQ幅度失配估计误差

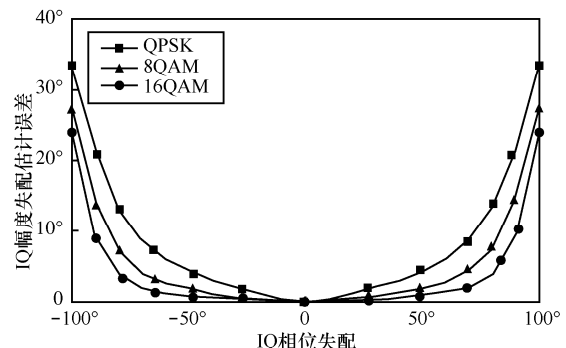
图 3 IQ 幅度失配仿真结果

3) IQ 相位失配估计仿真结果

本文对 3 种调制方式进行了 IQ 相位失配仿真实验, 包括 IQ 相位失配估计与 IQ 相位失配估计误差, 仿真结果如图 4 所示。



(a) IQ相位失配估计



(b) IQ相位失配估计误差

图 4 IQ 相位失配仿真结果

根据图 4 仿真结果可知，相位失配估计方案在 IQ 在相位失配估计范围较广 ($-60^\circ, 60^\circ$) 时，可有效估计系统中 IQ 相位失配程度。图 4(a) 中的 90° 处存在拐点，是因为信号在旋转超过 90° 后，进入另一象限，这是由算法中存在三角函数运算而导致的。其中， \arcsin 函数的值域为 $[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]$ ，因此相位误差估计值 θ' 会出现拐点，且出现 100° 估值与 80° 估值相等的情况，从而导致图 4(b) 中 IQ 相位失配 100° 处估计误差增大。

式(10)中， ρ 和 P_I 取值受不同调制方式的影响，但在不同调制格式下二者仍成比例关系， $\frac{\rho}{P_I}$ 的取值范围为 $[-1, +1]$ ，由此可知 IQ 相位失配估计性能与调制方式无关，仅受噪声 Δn 影响。其中 P_I 含有噪声项 Δn ， P_I 与 $OSNR$ 成反比。随着 $OSNR$ 增大，IQ 相位失配估计误差减小。

3.2 正交不平衡损伤估计实验结果与分析

在联合仿真平台 VPI 与 Matlab 中验证了原理的正确性后，搭建了 34 GBaud MQAM 通信实验平台，整体实验系统框架如图 5 所示。利用 PRBS 产生长度为 2^{15} 数据，使用任意波形发生器 (AWG, arbitrary

waveform generator) (实验设备型号: keysight M9502A) 将数据上采样到 85 GSample/s, 升余弦滚降系数为 0.2, 输入 IQ 调制模块 (实验设备型号: Fujitsu FTM7962EP) 进行调制, 激光器采用外腔半导体激光器 (ECL, external cavity laser) (实验设备型号: N7714A)。在接收端通过光相干接收机 (实验设备型号: Fujitsu FIM24706EB) 将信号与本振光耦合, 最后用示波器 (实验设备型号: Agilent DSA-X-96204Q) 对数据进行实时采集, 采样率为 80 GSample/s。采集后的离散样值, 交由 Matlab 离线处理。由于实验设备中难以引入精确的正交不平衡损伤及调整精确 $OSNR$, 因此本文在进行 DSP 处理之前引入损伤及调整 $OSNR$ (QPSK 信号对应 $OSNR$ 为 13 dB, 8QAM 信号对应 $OSNR$ 为 16 dB, 16QAM 信号对应 $OSNR$ 为 19 dB), 引入损伤形式如式(2)所示。

利用相干光通信实验平台对 3 种调制方式进行了验证, 图 6 为 IQ 幅度失配估计实验结果, 图 7 为 IQ 相位失配估计结果。实验结果验证了该算法的有效性, IQ 幅度失配估计可有效估计范围为 $(-6\text{dB}, 6\text{dB})$, 估计误差小于 1; IQ 相位失配估计可有效估计范围为 $(-60^\circ, 60^\circ)$ 。

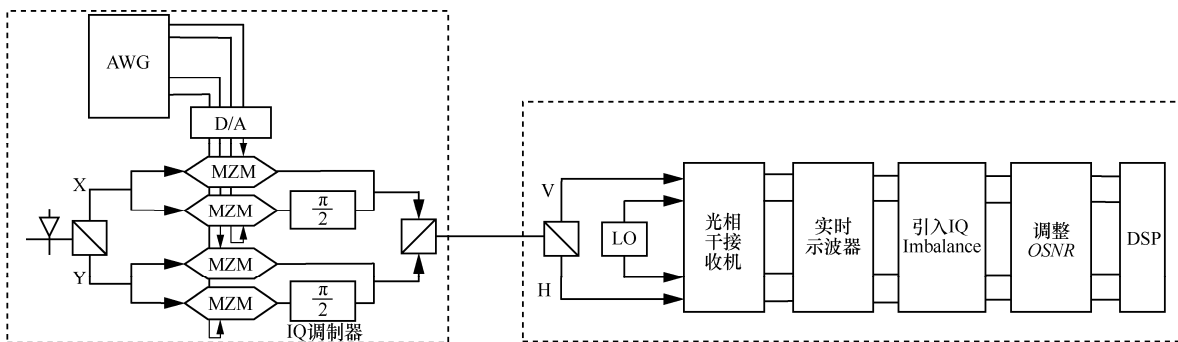


图 5 34 GBaud PDM-MQAM 相干光通信实验平台系统框架

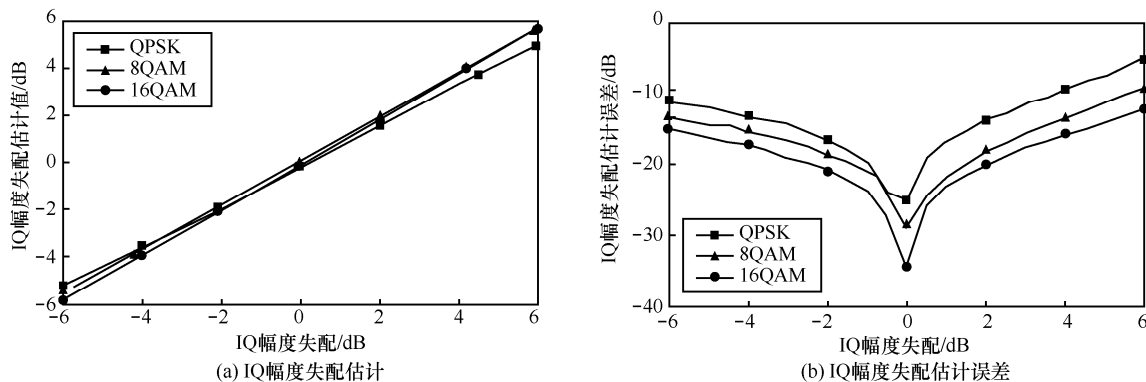


图 6 IQ 幅度失配估计实验结果

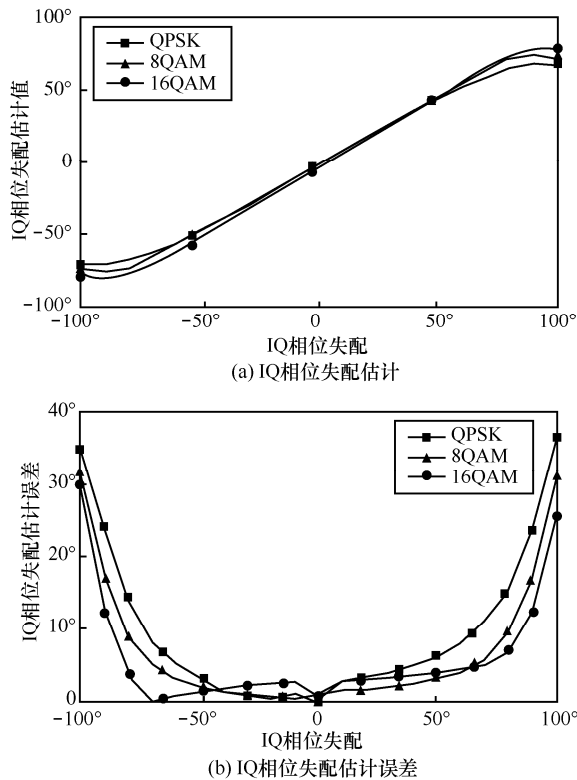


图 7 IQ 相位失配估计实验结果

4 结束语

为了满足高速光通信系统高效低成本测试的需求，对于目前相干光通信系统中信号所受到的 IQ Imbalance 损伤进行了研究，基于 GSOP 提出了一种 IQ-ImEstimation 算法。该接收机损伤估计算法可有效评估相干光通信系统中的 IQ Imbalance 损伤，与传统的仪器仪表测试比较而言，可大幅度降低测试成本。通过搭建 34 GBaud PDM-MQAM 仿真与实验平台，对本文提出的 IQ-ImEstimation 算法进行验证，根据仿真与实验结果可知，该正交不平衡损伤估计算法可有效估计 IQ 幅度失配损伤以及 IQ 相位失配损伤。通过进一步仿真实验及原理分析，该 IQ-ImEstimation 算法估计性能受噪声影响较大，但与调制方式无关。该算法估计范围广，估计误差较低，有望成为未来相干光通信系统性能测试的优选方案之一。

参考文献：

[1] SUN H C, CHUNG H S, KIM K, et al. Impact of quadrature imbalance in optical coherent QPSK receiver[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2009, 21(11):709-711.
 [2] CHUNG H S, SUN H C, KIM K, et al. Effect of IQ mismatch compensation in an optical coherent OFDM receiver[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2010, 22(5):308-310.

[3] FATADIN I, SAVORY S J, IVES D, et al. Compensation of quadrature imbalance in an optical QPSK coherent receiver[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2008, 20(20):1733-1735.
 [4] NGUYEN T H, GOMEZ-AGIS F, GAY M, et al. IQ imbalance compensation based on maximum SNR estimate in coherent QPSK systems[C]// International Conference on Transparent Optical Networks. 2014:1-4.
 [5] FARUK M S, KIKUCHI K. Compensation for in-phase/quadrature imbalance in coherent-receiver front end for optical quadrature amplitude modulation[J]. IEEE Photonics Journal, 2013, 5(2): 7800110-7800110.
 [6] MAYER I. On Löwdin's method of symmetric orthogonalization[J]. International Journal of Quantum Chemistry, 2002, 90(1):63-65.
 [7] 周娴. 100 Gbps PM-(D)QPSK 相干光传输系统 DSP 算法研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2011.
 ZHOU X. Research on DSP algorithms of 100 Gbps PM-(D)QPSK optical coherent transmission system[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2011.

[作者简介]



周娴 (1982-), 女, 重庆人, 北京科技大学教授, 主要研究方向为数字信号处理、光通信系统理论与结构、高速光传输理论与技术。



高天宇 (1993-), 男, 河北石家庄人, 北京科技大学硕士生, 主要研究方向为数字信号处理、高速相干光通信系统性能检测。

霍佳皓 (1989-), 男, 河北邢台人, 北京科技大学博士生, 主要研究方向为数字信号处理、短距离光传输。

申晓杰 (1993-), 男, 北京人, 北京科技大学硕士生, 主要研究方向为数字信号处理、短距离光传输。

卢东旭 (1991-), 男, 山东泰安人, 北京科技大学博士生, 主要研究方向为数字信号处理、短距离光传输。

皇甫伟 (1975-), 男, 河南开封人, 北京科技大学副教授, 主要研究方向为无线自组网、网络测量技术。

涂佳静 (1986-), 女, 江西南昌人, 北京科技大学讲师, 主要研究方向为空分复用技术、特种光纤设计、光纤传感。

隆克平 (1968-), 男, 四川成都人, 北京科技大学教授, 主要研究方向为光互联网络及交换技术、新一代网络理论与技术、无线移动通信、网络新业务与安全。