

## 光收发机 IQ 损伤宽范围联合估计新型 DSP 方案

辜超, 杨彦甫\*, 张群, 林志颖, 向前

哈尔滨工业大学(深圳)电子与信息工程学院, 广东 深圳 518055

**摘要** 大波特率、高阶调制格式信号的广泛应用使相干光通信系统对收发机中存在的硬件损伤更加敏感,因此迫切需要相应的损伤估计方法。提出了一种新的基于数字信号处理的收发机损伤联合估计方案,该方案可同时监测因光发射机和光接收机硬件不完美引起的光信号同相/正交(IQ)分量幅度、相位不平衡和时钟偏移。该方案首先使用 Godard 定时误差检测器和施密特正交化法估计并补偿了接收机损伤;接着使用最大似然的独立成分分析法和级联的判决引导最小均方(DDLMS)算法分别实现了对发射机损伤不敏感的偏振解复用和载波相位恢复;最后从 DDLMS 的抽头系数中估计出发射机损伤。得益于对发射端 IQ 不敏感的偏振解复用和载波相位恢复,该方案实现了宽范围的损伤监测。仿真结果表明,与传统数字信号处理方案相比,所提方案对发射端幅度、相位不平衡的估计范围分别提升了约 100% 和 33%。

**关键词** 光通信; 不平衡损伤; 偏振解复用; 载波相位恢复

**中图分类号** TN929.11

**文献标志码** A

**doi:** 10.3788/AOS202141.0506001

## New DSP Scheme for Joint Wide-Range Estimation of IQ Impairment in Optical Transceiver

Gu Chao, Yang Yanfu\*, Zhang Qun, Lin Zhiying, Xiang Qian

*Department of Electronic and Information Engineering, Harbin Institute of Technology (Shenzhen), Shenzhen, Guangdong 518055, China*

**Abstract** The wide use of high baudrate and high-order modulation format signals makes coherent optical communication systems more sensitive to hardware impairment in the transceiver, so there is an urgent demand for corresponding impairment estimation scheme. This paper proposes a new joint estimation scheme for transceiver impairment based on digital signal processing, which can simultaneously monitor in-phase/quadrature (IQ) amplitude, phase imbalance, and time skew caused by the hardware imperfections of the optical transmitter and optical receiver. First, the Godard timing error detector and Gram-Schmidt orthogonalization method are used to estimate and compensate for the receiver impairment. Then, the maximum likelihood-based independent component analysis method and cascaded decision-direct least mean square (DDLMS) algorithm are used to achieve polarization de-multiplexing and carrier phase recovery which are insensitive to transmitter impairment. Finally, the transmitter impairment is estimated from the tap coefficients of DDLMS algorithm. The scheme achieves wide range impairment monitoring, which is attributed to polarization de-multiplexing and carrier phase recovery that are insensitive to the IQ of the transmitter. Simulation results demonstrate that the estimation ranges of the amplitude and phase imbalances of the proposed scheme are improved by about 100% and 33% compared with that of the conventional digital signal processing scheme, respectively.

**Key words** optical communications; imbalance impairment; polarization de-multiplexing; carrier phase recovery

**OCIS codes** 060.1660; 060.2330; 060.4510

收稿日期: 2020-08-04; 修回日期: 2020-09-28; 录用日期: 2020-10-10

基金项目: 深圳市科技计划项目(JCYJ20190806142407195)

\* E-mail: yangyanfu@hit.edu.cn

## 1 引言

近年来,云计算与大数据业务等互联网应用蓬勃发展,驱动全球互联网流量持续增长。光纤通信系统通过使用超高波特率、高阶调制格式信号,有效提升了系统频谱效率,支撑互联网海量信息传送。在此背景下,光信号更容易受到硬件损伤的影响,其中由发射机中同相/正交(IQ)调制器或接收机中的混频器及跨阻放大器所引起的 IQ 损伤最为明显,这些损伤包括了 IQ 幅度、相位不平衡及时钟偏移<sup>[1]</sup>。IQ 幅度不平衡会使信号星座图产生横向或纵向拉伸变形;IQ 相位不平衡会使星座图呈现菱形分布;IQ 时钟偏移会使信号的同相与正交分量产生时钟错位。三种损伤均会严重影响信号,进而恶化光通信系统的通信质量。因此,准确监测与估计这些硬件损伤有助于及时地进行系统校正或光电收发模块损伤诊断,对保证光传输系统稳定工作具有非常重要的作用。

针对信号 IQ 不平衡及时钟偏移的估计,现有多种不同技术方案被提出。例如 Liang 等<sup>[2]</sup>在 2019 年提出了一种基于多输入、多输出的损伤估计方法,该方法能同时估计发射端与接收端的 IQ 幅度、相位不平衡及时钟偏移损伤,且获得了较高的估计精度。然而当损伤较大时,整个系统会因为偏振解复用算法无法收敛或因载波相位恢复算法性能恶化而失效,进而造成该方案只能在较小范围内估计发射端 IQ 不平衡损伤。类似的技术方案还包括基于椭圆修正的损伤估计法<sup>[3]</sup>、基于机器学习的损伤估计方法<sup>[4]</sup>等。这些方案大多是着重讨论收发机损伤估计模块本身,并没有探究系统硬件损伤和本征干扰的耦合机理,忽视了收发机损伤对于偏振解复用或载波相位恢复等算法的不利影响,从而导致整体方案的损伤估计范围不足。Zhang 等<sup>[5]</sup>针对这个问题,提出了一种基于独立成分分析的偏振解复用及损伤估计方法,该方法能在较宽范围内估计接收端的不平衡损伤;然而该方案中的偏振解复用算法在频偏损伤存在时无法有效进行,即无法通过频偏隔离收发端不平衡损伤<sup>[6]</sup>,因此无法对接收端与发射端损伤进行联合估计。总之,由于偏振解复用算法及载波相位恢复算法对 IQ 不平衡及时钟偏移损伤较为敏感,现阶段已有方案无法对收发端宽范围 IQ 不平衡及时钟偏移损伤进行联合估计。

本文提出了一种新型数字信号处理(DSP)方案来提升 IQ 不平衡及时钟偏移的估计范围,该 DSP

方案采用基于最大似然的独立成分分析方法(ML-ICA)进行偏振解复用,并使用级联的基于判决引导的最小均方算法(DDLMS)进行载波相位恢复与损伤估计。改进后的 DSP 方案相比传统方案对 IQ 幅度、相位不平衡的估计范围均有大幅增大,能对光收发机 IQ 幅度、相位不平衡及时钟偏移进行宽范围联合估计。

## 2 基本原理

传统 DSP 方案常使用恒模算法(CMA)或其改进算法进行偏振解复用<sup>[7-8]</sup>,使用盲相位搜索算法(BPS)或卡尔曼算法等进行载波相位恢复<sup>[9-11]</sup>。然而,在进行偏振解复用或载波相位恢复时,如果光信号受到发射端 IQ 幅度、相位不平衡及时钟偏移损伤的影响,特别是当损伤较大时,CMA 会无法收敛,BPS 会出现多解的情况,这些问题最终将导致损伤估计算法的整体失效。针对这一关键技术障碍,本文提出了基于最大似然独立成分分析的解偏算法与级联的基于判决引导的最小均方算法,二者分别提高了偏振解复用算法和载波相位恢复算法对 IQ 不平衡损伤的容忍度,使得所提 DSP 方案对 IQ 不平衡及时钟偏移损伤具有更大估计范围。

### 2.1 基于 ML-ICA 的偏振解复用方法

假定观测到的信号为  $\mathbf{x}$ ,源信号为  $\mathbf{s}$ , $\mathbf{A}$  为混合矩阵,则混合向量可以描述<sup>[12]</sup>为

$$\mathbf{x} = \mathbf{A}\mathbf{s}, \quad (1)$$

其概率密度可写为

$$p(\mathbf{x}) = |\det \mathbf{W}| \prod_i p_i(\mathbf{w}_i^T \mathbf{x}), \quad (2)$$

式中: $\det$ 表示矩阵的行列式; $i$ 为观测信号的序号; $\mathbf{W}$ 为 $\mathbf{A}$ 的逆,且可表示为 $\mathbf{W} = [\mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{w}_i, \dots, \mathbf{w}_n]^T$ ,其中 $\mathbf{w}_i$ 为第 $i$ 个观测信号的分离矩阵, $n$ 为观测信号的数目; $T$ 表示求转置; $p_i$ 为独立成分的概率密度。假定对信号 $\mathbf{x}$ 进行了 $N$ 次观测,那么似然度可以通过将 $N$ 个密度估计值相乘得到,似然度记为 $L$ ,把它作为 $\mathbf{W}$ 的函数,即

$$\frac{1}{N} \log_2 L(\mathbf{W}) = E \left[ \sum_{i=1}^n \log_2 p_i(\mathbf{w}_i^T \mathbf{x}) \right] + \log_2 |\det \mathbf{W}|, \quad (3)$$

式中: $E(\cdot)$ 为求均值而非数学期望。观察(3)式可发现模型中信号的概率密度未知,通常研究人员会根据实际情况使用一些简单的密度簇来近似表示信号的概率密度。研究证明,这样的近似并不会影响算法中极大似然估计的一致性。得到信号的概率密

度后,当似然度  $L$  取值最大时,即可认为此时的  $\mathbf{W}$  为最佳分离矩阵。为了求得此分离矩阵  $\mathbf{W}$ ,本文采用自然梯度下降法,先根据(3)式取对数似然度的随机梯度,即

$$\frac{1}{N} \frac{\partial \log_2 L}{\partial \mathbf{W}} = (\mathbf{W}^T)^{-1} + E[\varphi(\mathbf{W}\mathbf{x})\mathbf{x}^T], \quad (4)$$

式中: $\varphi(\cdot)$ 为评分函数,那么第  $i$  次观测的评分函数可表示为

$$\varphi_i = (\log_2 p_i)' = \frac{p_i'}{p_i}, \quad (5)$$

式中: $p_i'$ 为  $p_i$  的导数。那么可以得到最大似然的估计式为

$$\Delta \mathbf{W} \propto (\mathbf{W}^T)^{-1} + E[\varphi(\mathbf{W}\mathbf{x})\mathbf{x}^T]. \quad (6)$$

此时,由于矩阵  $\mathbf{W}$  为正交矩阵<sup>[11]</sup>,可得 $\mathbf{W}^T \mathbf{W} = \mathbf{I}$ 。将(6)式右边乘以 $\mathbf{W}^T \mathbf{W}$ ,即可得到自然梯度法的表达式为

$$\Delta \mathbf{W} \propto \{\mathbf{I} + E[\varphi(\mathbf{W}\mathbf{x})\mathbf{x}^T \mathbf{W}^T]\} \mathbf{W}. \quad (7)$$

有了求取分离矩阵的方法,即可对光信号的两个偏振数据进行分离。光信号的概率密度普遍呈现次高斯分布,因此假设其概率密度为

$$\ln p(\mathbf{Z}) = \alpha - 2 \ln[\cosh(\mathbf{Z})], \quad (8)$$

式中: $\mathbf{Z}$  为光信号; $\alpha$  为常数; $\cosh(\cdot)$  为双曲余弦函数。那么其评分函数为

$$\varphi(\mathbf{Z}) = \tanh(\mathbf{Z}) - \mathbf{Z}. \quad (9)$$

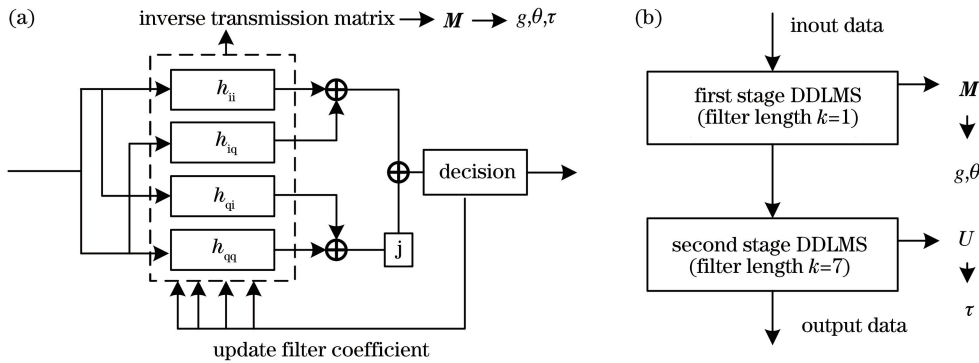


图 1 级联的 DDLMS。(a) DDLMS 流程;(b)级联的 DDLMS 结构

Fig. 1 Cascaded DDLMS. (a) Diagram of DDLMS flow; (b) structure of cascaded DDLMS

如图 1(b)所示,级联的 DDLMS 由两级独立的 DDLMS 组成,在第一级 DDLMS 中, FIR 滤波器的长度被设置为 1,此时该算法能去除载波相位噪声,

相干光通信系统接收的光信号为复信号,当  $\mathbf{Z}$  为复数时, $\varphi(\mathbf{Z})$ 所对应的概率密度与  $\mathbf{Z}$  为实数时的概率密度略微不同。为了更准确地表示概率密度,本文采用将其实部与虚部分开处理的方法。最后结合自然梯度下降法得到总的表达式为

$$\mathbf{Z}_{out} = \mathbf{W}_k \mathbf{Z}_{in}, \quad (10)$$

$$\mathbf{W}_{k+1} = \mathbf{W}_k + \mu \{ \mathbf{I} + \Re[\varphi(\mathbf{Z}_{out,k})\mathbf{Z}_{out,k}^H] \} \mathbf{W}_k, \quad (11)$$

$$\varphi(\mathbf{Z}_{out,k}) = \tanh[\Re(\mathbf{Z}_{out,k})] - \Re(\mathbf{Z}_{out,k}) + \{ \tanh[\Im(\mathbf{Z}_{out,k})] - \Im(\mathbf{Z}_{out,k}) \} j, \quad (12)$$

式中: $\mathbf{Z}_{in}$ ,  $\mathbf{Z}_{out}$ ,  $\mathbf{W}_k$ ,  $k$  分别为输入信号、输出信号、分离矩阵及信号序号; $\Re(\cdot)$ 与  $\Im(\cdot)$  分别为取信号实部与虚部; $\mu$  为迭代步长; $\mathbf{H}$  为共轭转置<sup>[5]</sup>。(11)式是根据(7)式得到的,是自然梯度法的具体表示。利用(9)式分别处理信号的实部和虚部,即可得到(12)式。

## 2.2 级联的直接判决最小均方差算法

如图 1 所示,本文使用级联的 DDLMS 来恢复载波相位并估计 IQ 不平衡及时钟偏移损伤。图 1(a)是所用 DDLMS 的结构, $h_{ii}$ ,  $h_{iq}$ ,  $h_{qi}$ ,  $h_{qq}$  是 4 个长度为  $k$  的有限长冲击响应滤波器(FIR),其组成的矩阵为发射端传输逆矩阵,发射端的损伤均被包含在其中。

同时还能根据 FIR 滤波器的系数得到包含幅度、相位不平衡及载波相位噪声损伤的传输逆矩阵  $\mathbf{M}$ 。逆矩阵  $\mathbf{M}$  可表示为

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi \\ -g \sin \theta \cos \varphi - g \cos \theta \sin \varphi & -g \sin \theta \sin \varphi + g \cos \theta \cos \varphi \end{bmatrix}, \quad (13)$$

式中: $M_{11}$ ,  $M_{12}$ ,  $M_{21}$ ,  $M_{22}$  分别为逆矩阵  $\mathbf{M}$  在对应

矩阵位置上的值; $g$  为幅度不平衡值; $\theta$  为相位不平

衡值; $\varphi$  为相位噪声。由于滤波器长度为 1, 所以此时算法得到的结果没有包含时钟偏移损伤。通过对逆矩阵的元素进行如下计算可得到幅度、相位不平衡值分别为

$$g = \sqrt{(M_{11}^2 + M_{12}^2)/(M_{21}^2 + M_{22}^2)}, \quad (14)$$

$$\theta = \arctan[(M_{12}M_{22} + M_{21}M_{11}) / (M_{11}M_{22} + M_{12}M_{21})]. \quad (15)$$

第二级 DDLMS 中使用的滤波器长度为 7, 通过提取滤波器系数得到的损伤逆矩阵  $\mathbf{U}$  为

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} U_{11} & U_{12} \\ U_{21} & U_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta\left(t + \frac{\tau}{2}\right) & 0 \\ 0 & \delta\left(t - \frac{\tau}{2}\right) \end{bmatrix}, \quad (16)$$

式中: $U_{11}, U_{12}, U_{21}, U_{22}$  为逆矩阵  $\mathbf{U}$  的元素; $t$  为时钟变量; $\delta(\cdot)$  为单位冲击函数; $\tau$  为 IQ 时钟偏移损伤。通过傅里叶变换可将信号在时域的时延转换为频域相位变化, 因此, 将矩阵  $\mathbf{U}$  中元素  $U_{11}, U_{22}$  的傅

里叶变换进行共轭相乘得到

$$\phi(f) = \arg\{\text{FFT}(U_{11}) * \text{conj}[\text{FFT}(U_{22})]\} = -j2\pi f\tau, \quad (17)$$

式中: $\phi(f)$  表示在频率  $f$  处的相位值; $\arg\{\cdot\}$  为取相位操作; $\text{conj}[\cdot]$  为取共轭;  $\text{FFT}(\cdot)$  为傅里叶变换操作。则有

$$\tau = -\frac{1}{2\pi} \frac{d\phi(f)}{df}. \quad (18)$$

由于在第一级 DDLMS 中已经将相位噪声基本清除, 留下的残余相位噪声很小, 不足以影响 IQ 时钟偏移的估计。因此通过这种级联的方法能获得一个较为准确的 IQ 时钟偏移估计值。

### 3 仿真分析

为了探究所提出的两种方法对于 IQ 幅度、相位不平衡及时钟偏移损伤的估计范围及估计精度的影响, 本文采用如图 2 所示的光传输仿真系统。

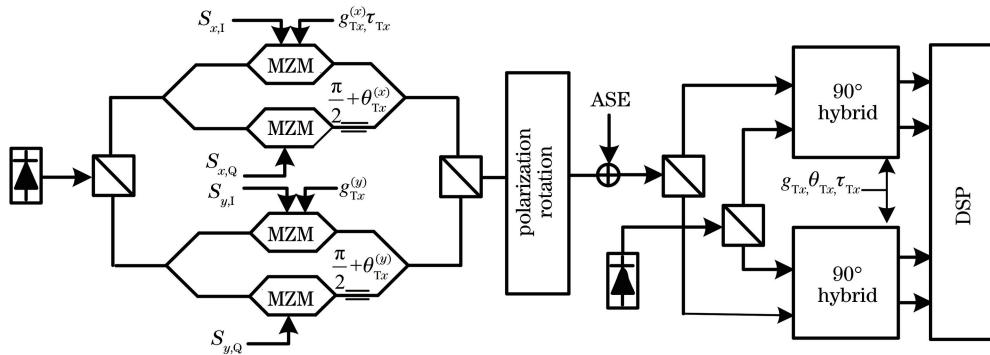


图 2 光传输仿真系统

Fig. 2 Simulation system of optical transmission

图 2 中信号被马赫-曾德尔调制器(MZM)调制, 并受到自发辐射噪声(ASE)的影响。仿真中采用  $28 \text{ Gbaud} \cdot \text{s}^{-1}$  的双偏振 16QAM 信号  $S$ , 该信号为随机生成的信号, 角标  $x, y$  分别代表  $x$  偏振与  $y$  偏振; 角标 I, Q 分别代表信号的同相与正交分量, 该信号在两倍上采样、数模转换、滚降系数为 0.5 的升余弦滤波后, 在 MZM 中先后受到 IQ 幅度不平衡值  $g_{Tx}$ 、相位不平衡值  $\theta_{Tx}$ 、时钟偏移  $\tau_{Tx}$  损伤。在光纤信道中, 仅考虑角度为  $\pi/6$  的固定偏振旋转, 信号进入相干接收机后, 在  $90^\circ$  混频器中受到 IQ 幅度不平衡  $g_{Rx}$ 、相位不平衡  $\theta_{Rx}$  及时钟偏移  $\tau_{Rx}$  的影响。系统中的激光器线宽为 100 kHz, 频偏为 500 MHz, 光信噪比为 24 dB。

本文使用了如图 3 所示的 3 种 DSP 方案来验证 ML-ICA 及级联的 DDLMS 对 IQ 不平衡及时钟

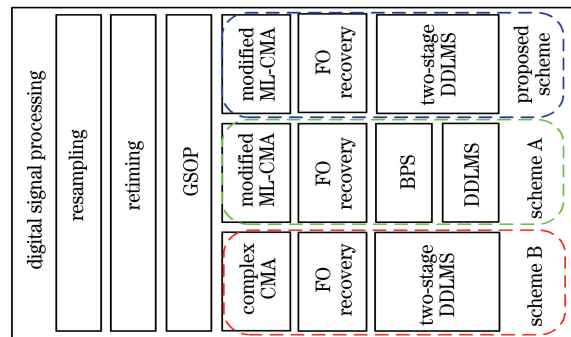


图 3 DSP 算法流程

Fig. 3 Diagram of DSP algorithm flow

偏移损伤对估计范围的影响。其中本文所提出的 DSP 方案同时使用了 ML-ICA 和级联的 DDLMS; 方案 A 使用改进的 ML-ICA 进行偏振解复用, 使用 BPS 进行载波相位恢复, 最后使用 DDLMS 估计损



伤;方案 B 使用传统 CMA 进行偏振解复用,使用级联的 DDLMS 恢复载波相位并估计损伤。三种方案均采用施密特正交化方法(GSOP)来补偿与估计接收端损伤、采用 Max-FFT 方法来恢复频偏(FO)损伤。

为了更好地比较各个 DSP 方案的优劣,首先只考虑一种发射端损伤单独存在时的情况。仿真结果如图 4 所示,图中 Tx 表示发射端。比较本文提出的方案与方案 A,发现二者的差别仅在于载波相位恢复算法与损伤估计算法。从仿真结果中可看出,本文提出的方案对发射端 IQ 幅度不平衡损伤的估

计范围达到 $[-6 \text{ dB}, 6 \text{ dB}]$ ,相比方案 A 的估计范围有 100%的提升,这说明级联的 DDLMS 算法相比传统的 BPS 结合 DDLMS 方案对幅度不平衡有更大的容忍度。比较本文提出的方案与方案 B,发现二者的差别仅在于偏振解复用方法,从仿真结果中可看出,本文提出的方案能在 $[-40^\circ, 40^\circ]$ 的范围内估计发射端相位不平衡,相比方案 B 的估计范围有 33.3%的提升,这说明本文提出的改进的 ML-ICA 偏振解复用算法能容忍更大的相位不平衡损伤。这三种方案对发射端 IQ 时钟偏移损伤的估计范围都较广且较为精确。

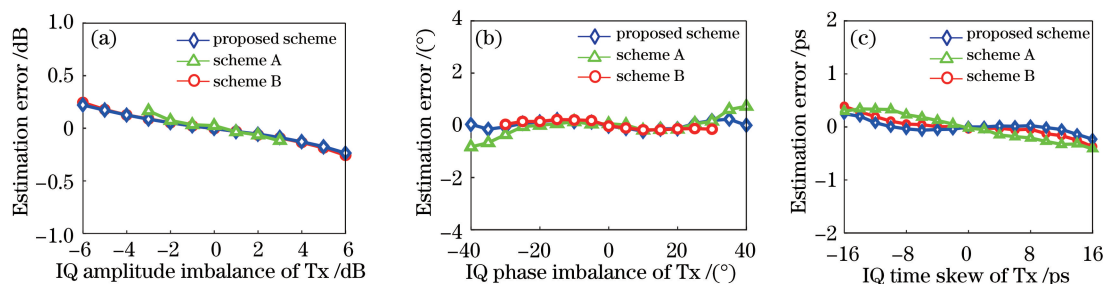


图 4 3 种 DSP 方案的仿真结果。(a)发射端(Tx)IQ 幅度不平衡;(b)发射端 IQ 相位不平衡;(c)发射端 IQ 时钟偏移  
Fig. 4 Simulation results of three DSP schemes. (a) IQ amplitude imbalance of Tx; (b) IQ phase imbalance of Tx; (c) IQ time skew of Tx

接下来,采用本文提出的 DSP 方案仿真了发射端、接收端损伤均存在的情况下的联合估计结果(图 5)。使用施密特正交化方法对接收端的幅度、相位不平衡进行估计与补偿<sup>[13]</sup>;使用 Godard 时钟误差检测器对 IQ 时钟偏移误差进行估计与补偿;图中

Rx 表示接收端。如图 5 所示,在发射端存在 1 dB 幅度不平衡、 $10^\circ$ 相位不平衡、7 ps IQ 时钟偏移,接收端存在 2 dB 幅度不平衡、 $10^\circ$ 相位不平衡、7 ps IQ 时钟偏移损伤的情况下,本文所提出的 DSP 方案仍然能够正常工作。本文所提出的 DSP 方案能在

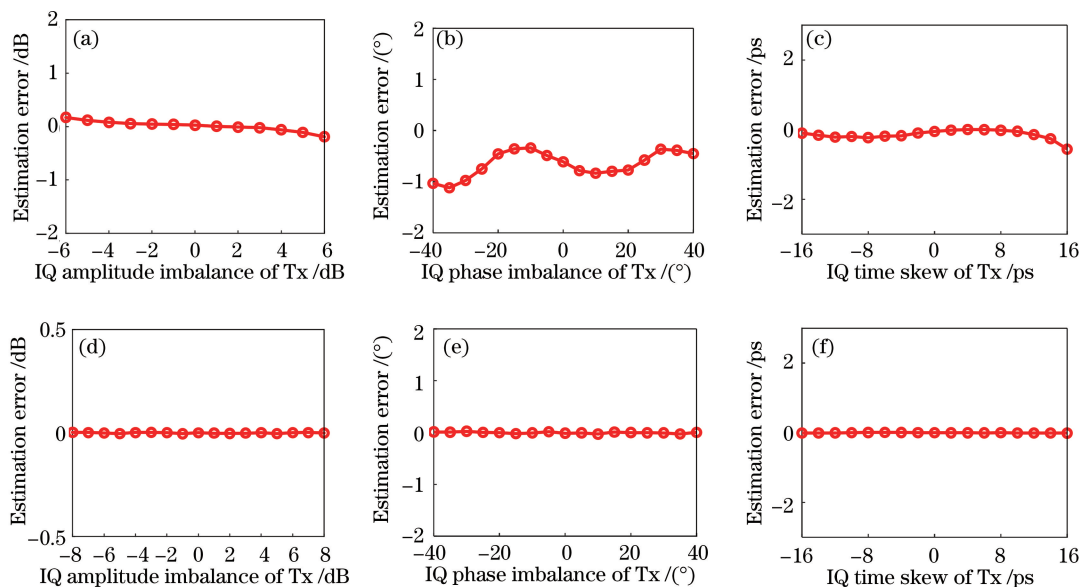


图 5 收发端联合估计时的估计误差。(a)(d) IQ 幅度不平衡;(b)(e) IQ 相位不平衡;(c)(f) IQ 时钟偏移  
Fig. 5 Error of transceiver joint estimation. (a)(d) IQ amplitude imbalance; (b)(e) IQ phase imbalance; (c)(f) IQ time skew

$[-6 \text{ dB}, 6 \text{ dB}]$  的范围内估计发射端的幅度不平衡且估计误差小于  $0.25 \text{ dB}$ , 能在  $[-40^\circ, 40^\circ]$  范围估计相位不平衡且估计误差小于  $1.1^\circ$ , 能在  $[-16 \text{ ps}, 16 \text{ ps}]$  的范围内估计 IQ 时钟偏移损伤且估计误差小于  $0.4 \text{ ps}$ 。对于接收端损伤, IQ 幅度、相位不平衡及时钟偏移的估计范围均较大且估计误差非常小。

## 4 结 论

提出了一种光收发机 IQ 不平衡及时钟偏移损伤的宽范围联合估计方案。该方案根据频偏对收、发端损伤的隔离作用, 完成了对收发机损伤的分离, 进一步通过应用 ML-ICA 和级联的 DDLMS, 提升了偏振解复用算法与载波相位恢复算法对不平衡损伤及 IQ 时钟偏移的容忍度, 最终实现了宽范围 IQ 损伤联合估计。

仿真结果表明, 相比使用 CMA 和 BPS 的传统 DSP 方案, 所提方案对发射端的幅度不平衡的估计范围提升了  $100\%$ , 对发射端的相位不平衡的估计范围提升了  $33.3\%$ , 能以  $0.25 \text{ dB}$  的误差代价估计  $[-6 \text{ dB}, 6 \text{ dB}]$  的发射端幅度不平衡, 能以  $1.1^\circ$  的误差代价估计  $[-40^\circ, 40^\circ]$  的发射端相位不平衡, 能以  $0.4 \text{ ps}$  的误差代价估计  $[-16 \text{ ps}, 16 \text{ ps}]$  的发射端 IQ 时钟偏移。由此可见, 所提方案可对收发机的 IQ 不平衡及时钟偏移损伤进行宽范围联合估计, 可以更好地估计光通信系统硬件损伤, 保证系统性能的可监测性与稳定性。

## 参 考 文 献

- [1] Faruk M S, Savory S J. Digital signal processing for coherent transceivers employing multilevel formats [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(5): 1125-1141.
- [2] Liang J P, Fan Y Y, Tao Z N, et al. Transceiver imbalances compensation and monitoring by receiver DSP [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 48(30): 4830-4839.
- [3] Zhang Q, Yang Y F, Guo C J, et al. Algorithms for blind separation and estimation of transmitter and receiver IQ imbalances [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(10): 2201-2208.
- [4] Dai X, Luo M, Li X. Machine learning aided in-phase/quadrature skew and imbalance calibration for coherent optical transmitters [C]//2019 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). March 3-7, 2019, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2019: W2A.44.
- [5] Zhang Q, Yang Y F, Guo C J, et al. Modulation-format-transparent IQ imbalance estimation of dual-polarization optical transmitter based on maximum likelihood independent component analysis [J]. *Optics Express*, 2019, 27(13): 18055-18068.
- [6] Liang J P, Fan Y Y, Tao Z N, et al. Transceiver in-phase and quadrature imbalance monitoring by two stage MIMO equalizers [C]//2018 Asia Communications and Photonics Conference (ACP), October 26-29, 2018, Hangzhou, China. New York: IEEE Press, 2018: 1-4.
- [7] Nguyen T H, Scalart P, Joindot M, et al. Joint simple blind IQ imbalance compensation and adaptive equalization for 16-QAM optical communications [C]//2015 IEEE International Conference on Communications (ICC), June 8-12, 2015, London, UK. New York: IEEE Press, 2015: 4913-4918.
- [8] Feng Y, Wen H, Zhang H Y. Digital optical coherent detection of polarization-multiplexed differential phase shift keying signal and analysis of adaptive digital polarization demultiplexing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(5): 1268-1273.  
冯勇, 闻和, 张汉一. 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 [J]. *光学学报*, 2010, 30(5): 1268-1273.
- [9] Dai X X, Li X, Luo M, et al. Numerical simulation and experimental demonstration of accurate machine learning aided IQ time-skew and power-imbalance identification for coherent transmitters [J]. *Optics Express*, 2019, 27(26): 38367-38381.
- [10] Li Y Z, Wang M G, Guo Y X, et al. Dual-polarization carrier phase recovery algorithm based on simplified extended Kalman filter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(11): 1106005.  
李耀祖, 王目光, 郭玉箫, 等. 基于简化扩展卡尔曼滤波的双偏振载波相位恢复算法 [J]. *光学学报*, 2019, 39(11): 1106005.
- [11] Zhang J, Qiu Q. High-precision fourth power carrier phase recovery algorithm [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(13): 130604.  
张杰, 邱琪. 一种高精度的四次方载波相位恢复算法 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(13): 130604.
- [12] Aapo H, Juha. K, Erkki O. Independent component analysis [M]. 1st ed. Zhou Z T, Dong G H, Xu X, et al, Transl. Beijing: Electronic Industry Press, 2007: 145-155.  
海韦里恩, 朱哈·卡胡伦, 耳开·欧加. 独立成分分析 [M]. 1 版. 周宗潭, 董国华, 徐昕, 等, 译. 北京: 电子工业出版社, 2007: 145-155.
- [13] Fatadin I, Savory S J, Ives D. Compensation of quadrature imbalance in an optical QPSK coherent receiver [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008, 20(20): 1733-1735.