

# 基于投影直方图的 CO-OFDM 系统盲相位噪声 补偿算法

马俊洁, 孙腾霖, 李正璇\*, 徐悦婷, 汪敏, 张倩武

上海大学上海先进通信与数据科学研究院特种光纤与光接入网重点实验室, 上海 200072

**摘要** 提出了一种改进的盲相位噪声补偿算法——两阶投影直方图(two-stage PH)算法。利用一系列均匀分布的测试相位对接收信号进行相位旋转,将得到的信号向实轴投影,获取投影直方图;统计投影中心附近星座点的数量,以数量最多对应的测试相位作为粗相移值;以粗相移值为中心均匀取一定数量的测试相位,重复一阶投影直方图的估计步骤,得到精确的相移值进行相位补偿。通过基于光梳状谱的双向相干光正交频分复用无源光网络(CO-OFDM-PON)实验系统对该算法的性能进行了验证。结果表明:该方法对  $10 \times 8$  Gbit/s 的 CO-OFDM 系统的公共相位噪声有很好的补偿效果,将 16 正交振幅调制(16QAM) CO-OFDM 系统的误码率降低至少 2 个数量级。该算法测试相位的个数仅需一阶投影直方图算法测试相位个数的  $1/4$ ,极大地降低了系统的复杂度,可用于 CO-OFDM 系统的公共相位噪声补偿。

**关键词** 光通信; 相干光正交频分复用; 投影直方图; 公共相位噪声估计

**中图分类号** TN929.18

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201838.0406001

## Blind Phase Noise Compensation Algorithm for CO-OFDM System Based on Projection Histogram

Ma Junjie, Sun Tengfen, Li Zhengxuan, Xu Yueting, Wang Min, Zhang Qianwu

*Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Shanghai Institute for Advanced Communication and Data Science, Shanghai University, Shanghai 200072, China*

**Abstract** An improved blind phase noise compensation algorithm, two-stage projection histogram (PH) algorithm, is proposed. Firstly, we use a series of uniformly distributed test phases to rotate the phase of the received signal, and project the received signal onto the real axis to obtain the projected histogram; secondly, we count the number of constellation points near the projection center and take the test phase with the largest number as the coarse phase shift value; thirdly, we consider coarse phase shift value as the center, take a certain number of test phases uniformly, repeat the estimation steps of the one-stage PH, and obtain the accurate phase shift value for phase compensation. The performance of the proposed algorithm is experimentally verified in the coherent optical orthogonal frequency division multiplexing passive optical network (CO-OFDM-PON) system based on optical comb. The results show that the proposed algorithm has a good compensation effect on the common phase noise of  $10 \times 8$  Gbit/s CO-OFDM system, and the bit error rate (BER) is reduced by at least two orders of magnitude. Compared with the one-stage PH algorithm, the proposed algorithm need only  $1/4$  number of test phases, which greatly reduces the complexity of the system and can be used to common phase noise compensation for CO-OFDM systems.

**Key words** optical communications; coherent optical orthogonal frequency division multiplexing; projection histogram; common phase noise estimation

**OCIS codes** 060.1660; 060.2380; 060.4080; 100.5070

**收稿日期:** 2017-09-26; **收到修改稿日期:** 2017-10-30

**基金项目:** 国家自然科学基金(61420106011, 61601279, 61601277)、上海市科委项目(17010500400, 15530500600, 16511104100, 16YF1403900)

**作者简介:** 马俊洁(1992—),女,硕士研究生,主要从事光接入网方面的研究。E-mail: mjj925599493@163.com

**导师简介:** 汪敏(1953—),男,硕士,教授,博士生导师,主要从事光接入网方面的研究。E-mail: wangmin@staff.shu.edu.cn

\* **通信联系人.** E-mail: antlzx@shu.edu.cn

## 1 引 言

相干光正交频分复用(CO-OFDM)是一种适应于未来超高速、长距离光通信的技术,其将正交频分复用、光通信系统以及相干检测结合起来,具有高频谱效率以及较强的抗色度色散与抗偏振模色散能力<sup>[1-5]</sup>。但是,相对于单载波传输系统而言,相干光正交频分复用系统作为一种多载波系统,其符号持续时间更长,具有较高的峰均比,因此对激光器相位噪声非常敏感<sup>[6-7]</sup>。激光器相位噪声主要表现在两方面,公共相位误差(CPE)和载波间干扰(ICI),二者都严重降低了相干 OFDM 系统的性能。所以,对于相干正交频分复用系统而言,能够准确估计并有效补偿相位噪声尤为重要。

CO-OFDM 系统的相位噪声补偿分为 CPE 相位噪声补偿和 ICI 相位噪声补偿。针对载波间干扰,已有研究人员提出了几种 ICI 相位噪声补偿算法,文献[8]提出了一种 A-CPEC 盲相位噪声算法,该方法将平均能量盲(Avg-BL)算法和公共相位误差分割补偿(CPEC)算法相结合,有效补偿宽线宽 CO-OFDM 系统的载波间干扰,并且其频谱利用率较高,对宽线宽 CO-OFDM 系统具有重要意义。文献[9]提出了两种新的低复杂度的光相位噪声抑制算法,即非决策辅助子符号光相位噪声抑制(NDA-SPS)算法和部分决策辅助子符号光相位噪声抑制(PDA-SPS)算法。前者由于没有决策误差的累积,可以实现高性能的时域子符号光相位抑制,但是该方法需要 16 个导频,频谱效率低。为了提高系统的频谱效率,笔者又提出了 PDA-SPS 方法,该方法采用专门设计的合成型导频子载波,生成用于子符号光相位估计的无乘法观测矩阵,并将导频数降低一半。这两种方法同其他子符号算法相比,具有更高的线宽容忍性,并且其复杂度更低,利于硬件的实现。

近年来,对于公共相位噪声估计算法的研究已经趋于成熟,目前已有的 CPE 相位噪声估计算法主要分为两类:基于导频和训练序列的相位估计算法和盲相位估计算法。基于导频辅助(PA)的公共相位估计算法因其准确率高和复杂度低的特点,被广泛应用于 CO-OFDM 系统中,但该方法需要占用部分数据子载波,使系统的频带利用率降低<sup>[10]</sup>。文献[11]提出了一种改进型基于导频的相位补偿算法,该方法通过设置与数据子载波相关的导频,将导频的开销降低一半。但是该方法仍然需要至少 6 个

子载波才能达到很好的补偿效果。Xu 等<sup>[12]</sup>提出了一种新的使用主成分分析(PCA)法的基于特征向量扩展(EBE)的相位噪声抑制方法,该方法对四进制正交幅度调制(4QAM) CO-OFDM 系统具有很好的补偿效果。与基于 OBE (Orthogonal Basis Expansion)的相位噪声抑制方法不同,该方法通过使用 PCA 分析相位噪声,可以更好地跟踪相位噪声。并且该方法中使用的特征向量仅随激光器的线宽而改变。因此一旦激光器固定,无须改变特征向量,实现起来更为简单。但为了消除载波间干扰的影响,该方法使用了 60 个导频,降低了系统的频谱效率。为了更好地补偿相位噪声,提高系统性能,文献[13]提出了一种盲公共相位噪声补偿算法——盲相位搜索(BPS)算法,该方法的基本思想是利用一组测试相位,通过穷举的方式获得最接近真实的相位噪声的相位值,从而补偿噪声的影响。BPS 算法适应于任何正交幅度调制(QAM)的调制格式,并且具有较高的估计精度,但是其算法复杂度高,通常不被多载波的 OFDM 系统采用。文献[14]提出了一种新的公共相位补偿算法——最小矩形框(MBB)算法,该方法将星座图看作二维平面中的图像,利用图像倾斜检测技术实现相位估计和补偿,降低了计算复杂度。另外,该方法采用伪导频的方法,在一个导频子载波上仅使用两个比特的符号,相比导频方法提高了频谱效率。

文献[15]中笔者曾提出一种基于投影直方图的盲相位估计(PH)算法,该方法不使用任何导频,极大地提高了系统的频谱效率。在性能上该算法可获得与盲相位搜索(BPS)算法一样的公共相位噪声补偿效果,而其算法复杂度比盲相位搜索算法更低。为进一步降低算法的复杂度,本文提出了一种改进型基于投影直方图的盲相位估计算法——两阶投影直方图(two-stage PH)算法。两阶投影直方图算法首先将测试相位步长设置为较大的值,以粗略估计出相位噪声所在的范围,然后选取满足精度的较小的角度作为第二阶的测试相位步长,这样既可以达到比较高的测试精度,又可以将测试相位的个数减少,大幅度降低了算法的复杂度。通过基于光梳状谱的 10×8 Gbit/s 的 CO-OFDM-PON 下行相干检测实验系统对两阶投影直方图算法进行了论证。研究表明:该算法对 16QAM CO-OFDM 信号的公共相位噪声具有很好的补偿效果,并且其与一阶投影直方图(one-stage PH)算法相比,测试相位的个数仅为一阶投影直方图算法中测试相位个数的 1/4,极

大地降低了算法的复杂度。

## 2 改进型投影直方图算法的基本原理

### 2.1 投影直方图(PH)算法基本原理

公共相位噪声使频域内各子载波都具有相同的相位噪声分量,因此在同一个符号内所有子载波相位偏移几乎相同,在星座图上表现为星座点的旋转。基于投影直方图的相位估计方法将星座图中的星座点看作文本图像中的黑像素点,使相干 OFDM 系统的相位估计问题可以转换为图像倾斜检测问题,从而利用图像处理技术实现公共相位噪声的估计及补偿。

假设 CO-OFDM 系统已经完成了理想的窗口同步和载波频率同步,则经平衡接收机相干解调后的频域接收信号可表示为<sup>[16]</sup>

$$R_{ik} = \exp(j\varphi_i) \cdot H_k \cdot S_{ik} + n_{ik} + \epsilon_{ik}, \quad (1)$$

式中: $R_{ik}$ ,  $S_{ik}$  分别为接收端信号和发送端信号; $H_k$  为信道频域传输函数; $n_{ik}$  为加性高斯白噪声, $\epsilon_{ik}$  为相位噪声引起的载波间的干扰; $\varphi_i$  为第  $i$  个符号的公共相位噪声。为了估计公共相位噪声  $\varphi_i$ ; 文献[15]提出了一种基于投影直方图的公共相位噪声估计方法,其基本原理如图 1 所示。

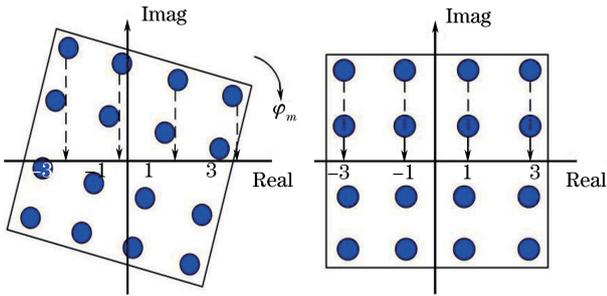


图 1 投影直方图算法原理示意图

Fig. 1 Schematic of the PH algorithm

对于调制格式为 16QAM 的星座图,在实轴有 4 个投影中心:  $-3, -1, 1, 3$ 。考虑到计算的复杂度和可行性,采用统计方法估计公共相位误差,通过计算投影中心附近星座点的个数判断相位噪声的大小。当星座图无旋转即接收信号无相位噪声时,向实轴投影后的星座点大多分布在投影中心附近,在投影直方图上的表现为有 4 个明显的峰值;而当接收信号存在相位噪声时,星座点的投影范围变大,投影中心附近星座点变少,投影直方图无明显峰值。具体实现步骤如下。

1) 将  $0 \sim \pi/2$  均匀的分成  $M$  份作为测试相位,测试相位  $\varphi_m$  可表示为

$$\varphi_m = \left( \frac{m}{M} - \frac{1}{2} \right) \times \frac{\pi}{2}, m \in \{0, 1, \dots, M-1\}. \quad (2)$$

2) 随后将每个测试相位作为补偿相位进行相位补偿,得到补偿后的信号  $r'_{ik}$ 。对于每个补偿后的信号,将其星座图中的星座点向实轴投影,获取投影直方图。投影可用 Radon 变换<sup>[17]</sup>表示:

$$R_{\varphi_m}(x') = \int f(x', y') dx' = \int f(x \cos \varphi_m - y \sin \varphi_m, x \sin \varphi_m + y \cos \varphi_m) dx, \quad (3)$$

式中: $x, y$  分别为补偿前信号实轴和虚轴的值; $x'$  为补偿后实轴的值。通过(3)式可求出补偿后实轴上的投影值。

3) 得到补偿后的投影直方图后,投影中心附近星座点的数量可表示为

$$s(\varphi_m) = \sum_{-3-i}^{-3+i} s_{-3}(\varphi_m) + \sum_{-1-i}^{-1+i} s_{-1}(\varphi_m) + \sum_{1-i}^{1+i} s_1(\varphi_m) + \sum_{3-i}^{3+i} s_3(\varphi_m), i \leq 10, \quad (4)$$

式中, $2i$  为求星座点数量和的求和宽度。求和宽度的示意图如图 2 所示,以投影中心 1 为例,将  $0 \sim 2$  均匀分成 20 份,  $\sum_{1-i}^{1+i} s_1(\varphi_m)$  表示以 1 为中心左右各  $i$  份( $i \in [0, 10]$ )的范围内星座点的数量。

4) 依次求出每个投影中心附近星座点的数量后,得到 4 个投影中心附近所有星座点的和,数量最多对应的测试相位即为最优估计相位。

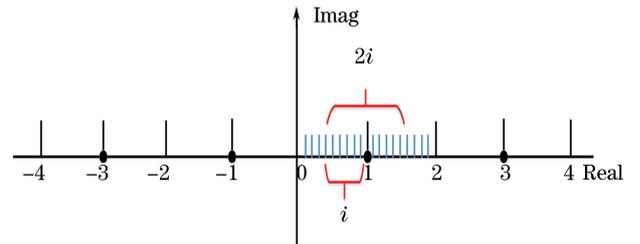


图 2 求和宽度  $2i$  示意图

Fig. 2 Schematic of length of summing interval  $2i$

### 2.2 两阶投影直方图算法基本原理

为进一步优化投影直方图算法的性能,降低算法复杂度,提出了一种两阶投影直方图算法。图 3 展示了两阶投影直方图算法的框图。对于每一阶相位估计,其输入信号都为  $r_{ik}$ , 如 2.1 节所述,通过一系列均匀分布的测试相位对输入信号进行相位旋转,随后将旋转得到的星座图向实轴投影,得到投影直方图,最后通过计算投影中心附近星座点的数量判断相位噪声的大小。

在第 1 阶投影直方图中,通过(2)式对输入信号进行粗略的相位估计,得到粗相移角  $\varphi_1$ ,  $\varphi_1$  可用于

确定第 2 阶测试相位的大小,即<sup>[18]</sup>

$$\varphi'_b = \frac{b}{M \times B} \times \frac{\pi}{2} + \varphi_1, \quad (5)$$

$$b \in \left\{ -\frac{B}{2}, -\frac{B}{2} + 1, \dots, \frac{B}{2} \right\},$$

式中: $M$  为第 1 阶测试相位的个数; $B$  为第 2 阶测试相位的个数,且  $B$  为偶数。从(5)式可以看出,第 2 阶包含  $B+1$  个测试相位,但是当  $b=0$  时, $\varphi'_b =$

$\varphi_1$ ,该测试相位在第 1 阶已被估计过,因此第 2 阶投影直方图算法中,实际所用测试相位的个数为  $B$ 。从(2)式和(5)式不难看出,只要第 1 阶投影直方图算法估计的测试相位是正确的,那么本文提出的两阶投影直方图算法使用  $M+B$  个测试相位的估计精度等同于一阶投影直方图  $M \times B$  个测试相位的估计精度,这极大地减少了测试相位的个数,从而降低了算法复杂度。

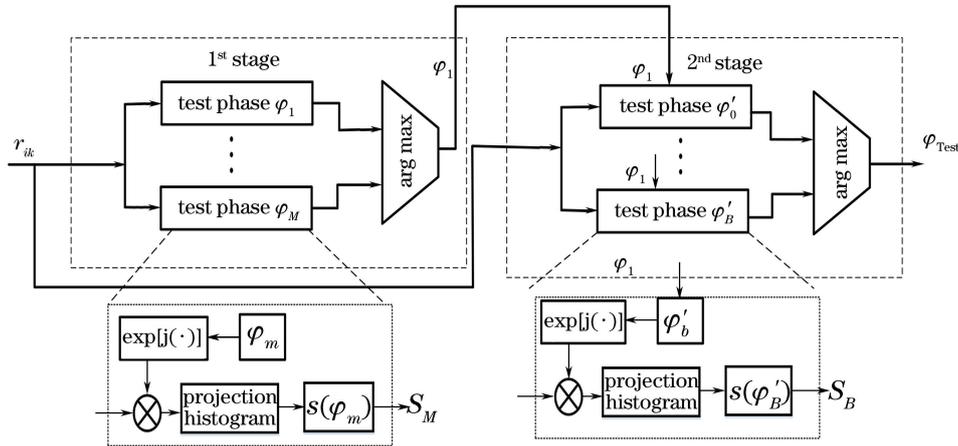


图 3 提出的两阶投影直方图算法框图

Fig. 3 Block diagram of the proposed two-stage PH algorithm

### 3 相干 OFDM-PON 系统

基于光梳状谱发生器的双向相干 OFDM-PON 的系统原理如图 4 所示。该系统不同于传统的相干 OFDM-PON 系统,不采用独立激光器,而采用光梳状谱发生器作为系统的光源<sup>[19-21]</sup>。如图所示,光梳状波发生器产生 16 根光波谱线,相邻波长信道的间隔为 0.1 nm,即频率间隔为 12.5 GHz。来自光梳的波长为  $\lambda_1$  的光波被偏振分束器分成偏振态正交的两束光波,分别用作下行 OFDM 信号的信号光和导频光波。信号光波的调制方式是标准的正交(IQ)调制,形成载波抑制的单边带光谱。波长为  $\lambda_2$  的光波既作为相干检测的本振光(LO),又在分光后作为反射式无源光网络(PON)中的上行种子光,供反射和上行信号调制之用。系统中采用一个相位调制器(PM),对本振光( $\lambda_2$ )作相位调制,抑制光纤中的受激布里渊散射(SBS)。 $\lambda_1$  与  $\lambda_2$  之差为 0.1 nm,对应 12.5 GHz 的频差,所以相干光接收机的输出为 12.5 GHz 的中频载波及 OFDM 下边带信号。在光线路终端(OLT)的导频光波支路接有可调的光延迟线,如果信号光波和导频光波支路的光学时延相等,则中频光载波和 OFDM 下边带信号中含有相同的光相位噪声,在下变频时可以抵消。但在实际实验中,由于信号光波

和导频光波光学时延未能达到完全相同且受光放大器等器件的影响,光相位噪声抵消之后的残留噪声仍然需要通过数字信号处理方式来估计。

信号光  $\lambda_1$  和本振光  $\lambda_2$  分别经掺铒光纤放大器(EDFA)放大再经波分复用器(WDM)耦合后送入 25 km 的单模光纤中传输。在光网络单元(ONU)中,两路光波经波分复用器分离后进入相干接收机,进行相干检测,并将中频信号通过下变频方式转换为基带信号。最后通过 20 GSa/s 的示波器(DSP)对接收到的电信号进行采样,并在 Matlab 中实现后续的相位估计等数字信号处理。

### 4 算法性能分析

为了进一步阐述提出的两步投影直方图算法的优点,采用 16 QAM 调制信号进行实验分析,每帧包含 80 个 OFDM 符号,每个符号有 64 个数据子载波,信号带宽 2 GHz,信号速率约为 8 Gbit/s,由于光梳状谱作为光源,在实验中使用 10 根谱线,总的下行传输速率可以达到  $8 \text{ Gbit/s} \times 10 = 80 \text{ Gbit/s}$ 。利用 20 GSa/s 的示波器采集时域信号,共采集数据 186 帧。对于投影直方图算法,影响估计精度的主要因素有两个:测试相位的数量  $M$  和投影中心附近点数的求和宽度  $2i$ 。为了得到更好的估计精度,首先

对求和宽度  $2i$  进行研究。图 5 为光功率分别为  $-26$  dBm 和  $-30$  dBm 时两种算法的误码率 (BER,  $R_{BE}$ ) 随求和宽度  $2i$  的变化曲线, 其中一阶投影直方图算法采用 16 个测试相位, 两阶投影直方图算法采用 ( $M=8, B=8$ ) 的相位组合方式, 图中 FEC 为前向纠错码。从图中可以看出, 当求和宽度  $2i$  为 2 和 20 时, 两阶投影直方图算法的误码率甚至比一阶投

影直方图算法高, 这主要是因为当求和宽度过大或者过小时, 两阶投影直方图中进行第 1 阶粗相位估计时估计不准确, 导致第 2 阶估计时偏差太大, 从而误码率变大。当求和宽度为 12 时, 两种算法的误码率都较低, 所以本文所有后续研究均采用求和宽度为 12, 这样可以保证本文提出的算法能够更为准确的估计相位噪声。

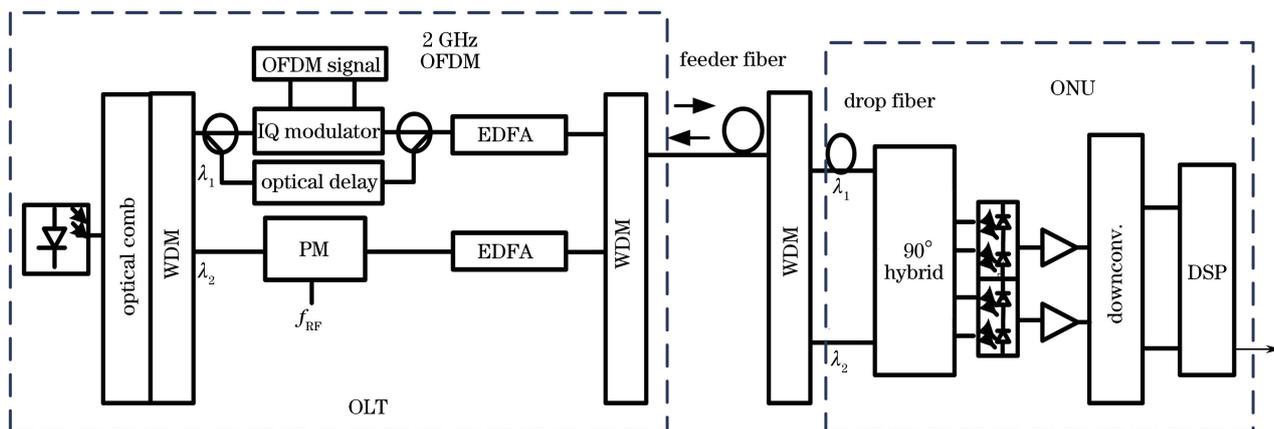


图 4 基于光梳状谱的 CO-OFDM-PON 传输系统框图

Fig. 4 Block diagram of CO-OFDM-PON transmission system based on optical comb

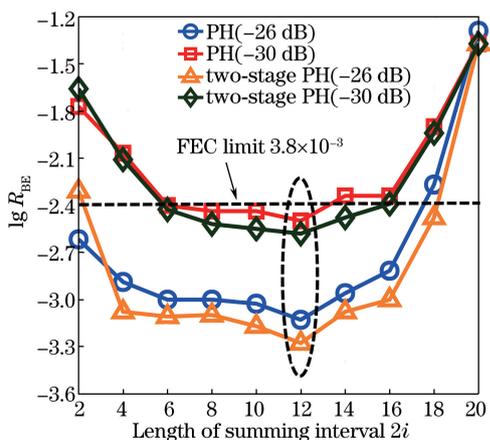


图 5 两种算法的误码率随求和宽度  $2i$  变化曲线

Fig. 5 BER of two algorithms versus different lengths of summing interval  $2i$

图 6 为接收光功率为  $-26$  dBm 时接收端接收到的信号星座图以及对应的投影直方图。图 6(a) 为未使用任何相位补偿算法的接收信号星座图。从图中可以看出, 由于相位噪声的影响, 经过解调后的接收信号星座图发生旋转, 偏离原始位置, 并且星座点发散, 不同象限的点发生混叠, 此时系统的误码率为  $1.55 \times 10^{-2}$ , 严重影响了信号的解调。图 6(b)、图 6(c) 分别为经过 one-stage PH 算法 ( $M=16$ ) 和 two-stage PH 算法 ( $M=8, B=8$ ) 补偿后的接收信号星座图。相比较图 6(a), 图 6(b)、图 6(c) 中的星

座点的发散现象得到了很大程度的抑制。图 6(c) 相比图 6(b) 星座点得到了进一步收敛, 此时误码率为  $4.77 \times 10^{-4}$ , 相比未补偿时误码率降低了两个数量级, 极大地提高了系统的性能。图 6(d) 为补偿前接收信号星座图对应的投影直方图, 可以看出 4 个投影中心附近星座点的数量相对较少, 直方图无明显峰值。图 6(e)、图 6(f) 为对应的补偿后的投影直方图, 有 4 个明显的峰值, 投影中心附近星座点较为集中。

图 7(a) 为一阶投影直方图算法和两阶投影直方图算法的 BER 随测试相位个数的变化曲线, 对于两阶投影直方图算法, 横坐标代表两阶所用的测试相位个数之和。当测试相位和为 24 时, 两个算法的误码率的下降趋势逐渐趋于平缓。而且, 两阶投影直方图算法中测试相位为 16 时 ( $M=8, B=8$ ) 的误码率为  $4.77 \times 10^{-4}$ , 与一阶投影直方图算法 64 个测试相位时的误码率几乎一致。因此, 本文提出的改进方法复杂度最多可降低为原来的 1/4。图 7(b) 对几种常用盲公共相位噪声估计算法的性能进行了比较, 从图中可以看出, 同样采用 16 个测试相位, 在光功率为  $-26$  dBm 时, 两阶投影直方图算法的误码率 ( $4.77 \times 10^{-4}$ ) 相比一阶投影直方图算法 ( $8.83 \times 10^{-4}$ ) 降低了一半左右。一阶投影直方图算法与盲相位搜索算法 (BPS) 以及最小矩形框算法 (MBB) 性

能大体一致,但 BPS 算法复杂度更高,为更具体地说明本文提出的算法在降低计算复杂度方面的优势,以误码率为  $4.77 \times 10^{-4}$  时的测试相位数为例, one-stage PH 算法、BPS 算法和 MBB 算法均采用 64 个测试相位, two-stage PH 算法采用 16 个测试相位(8+8),假设一共有  $N$  个符号,则 4 种算法的复杂度计算如表 1 所示,表中  $N_{ML}$  为平滑滤波器长度。从表 1 可以看出, BPS 算法需要更多的加法器、乘法器和判决器,相比 PH 算法,其复杂度更高,系统代价比较大,一般用在单载波系统中。One-stage PH 算法与 MBB 算法在复杂度方面相差不多, PH 算法略优于 MBB 算法。而 two-stage PH 算法相比

one-stage PH 算法,由于测试相位个数的减少,其算法复杂度大幅度降低,有利于硬件的实现。相比前几种估计方法,最大似然比估计(ML)方法估计性能最差,因此,在公共相位噪声估计的研究中,该算法一般不单独使用,而是经常作为二级相位估计算法,用在其他算法之后补偿残余相位噪声。各种算法的 BER 由小到大的顺序为 two-stage PH、one-stage PH、BPS、MBB、ML,复杂度由小到大的顺序为 ML、two-stage PH、one-stage PH、MBB、BPS。无论从性能还是硬件实现的复杂度两方面考虑,本文提出的算法对于 CO-OFDM 系统的公共相位噪声估计都是一种不错的选择。

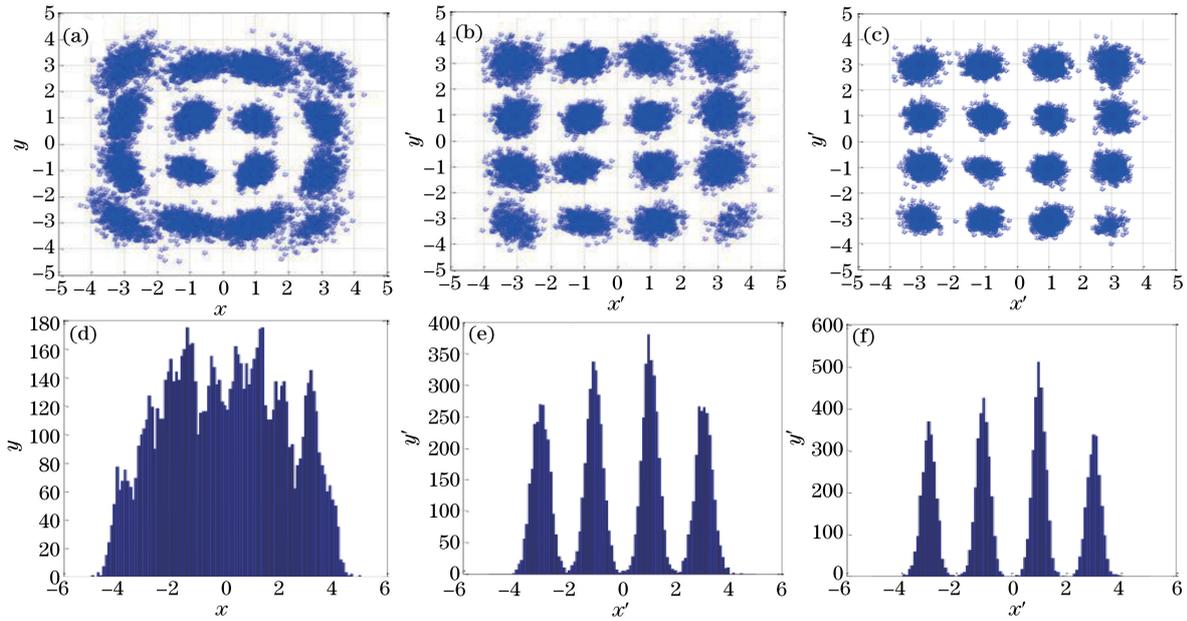


图 6 接收光功率为  $-26$  dBm 时接收端接收到的信号星座图及对应的投影直方图。(a)无相位补偿算法的星座图; (b)一阶投影直方图算法补偿后的星座图(16 个测试相位); (c)两阶投影直方图算法补偿后的星座图(8+8 个测试相位); (d)无相位补偿算法的投影直方图; (e)一阶投影直方图算法补偿后的投影直方图; (f)两阶投影直方图算法补偿后的投影直方图

Fig. 6 Signal constellation diagrams and projection histograms obtained by receiver when receiving optical power is  $-26$  dBm. (a) Constellation without phase compensation algorithm; (b) constellation with one-stage PH algorithm (16 test phases); (c) constellation with two-stage PH algorithm (8+8 test phases); (d) projection histogram without phase compensation algorithm; (e) projection histogram with one-stage PH algorithm; (f) projection histogram with two-stage PH algorithm

表 1 计算复杂度比较

Table 1 Comparison of computational complexity

Method	Multiplexer	Adder	Comparator	Decision
ML	$2N$	$N(2N_{ML}-2)$	0	$N$
BPS	$6 \times 64N + 4N$	$6 \times 64N - 64 + 2N + 2$	$64N$	$64N + N$
MBB	$4 \times 64N + 4N + 64$	$2 \times 64N + 2 \times 64 + 2N$	$64 \times 4N + 64$	0
One-stage PH	$4 \times 64N$	$2 \times 64N$	$64N + 8 \times 64N$	0
Two-stage PH	$4 \times 16N$	$2 \times 16N$	$16N + 8 \times 16N$	0

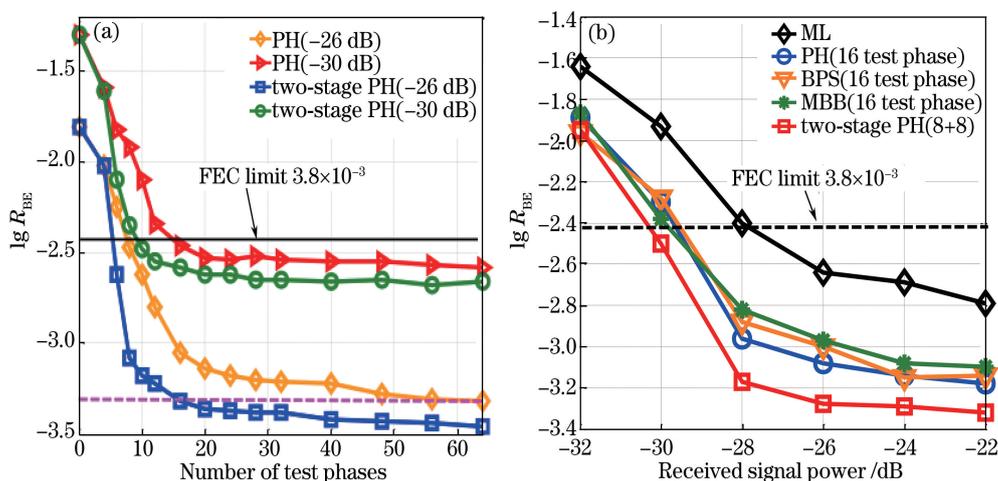


图 7 (a) 2 种算法误码率随测试相位个数变化曲线; (b) 5 种公共相位噪声补偿算法的误码率

Fig. 7 (a) BER of the two algorithms versus different number of test phases;

(b) BER of five common phase noise compensation algorithms

## 5 结 论

提出一种新的基于两阶投影直方图的盲相位噪声补偿算法,该方法在图像处理技术中是一种常用的文本图像倾斜检测方法。与其他盲相位估计算法一样,该算法仍然需要一定数量的测试相位进行相位搜索,但是该方法采用两级投影,极大地减少了测试相位的个数,降低了算法的复杂度。通过基于光梳状谱的  $10 \times 8$  Gbit/s 16QAM CO-OFDM-PON 下行相干检测实验系统对该算法的性能进行了验证。结果表明:该方法相比一阶投影直方图算法只需要 16 个测试相位就可以达到很好的估计精度,并且相比 BPS 算法和 ML 算法,该算法具有更好的补偿效果,因此从复杂度和估计性能两方面考虑,该算法对 CO-OFDM 系统的公共相位补偿具有重要的意义。

## 参 考 文 献

- [1] Armstrong J. OFDM for optical communications[J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(3): 189-204.
- [2] Shieh W, Bao H, Tang Y. Coherent optical OFDM: theory and design[J]. Optics Express, 2008, 16(2): 841-859.
- [3] Buchali F, Dischler R, Liu X. Optical OFDM: a promising high-speed optical transport technology[J]. Bell Labs Technical Journal, 2009, 14(1): 125-146.
- [4] Bo T, Huang L, Chan C K. Common phase estimation in coherent OFDM system using image processing technique[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(15): 1597-1600.
- [5] Pan M, Zhang X, Li J, *et al.* Data-aided linear fitting blind phase estimation method for coherent optical OFDM system[J]. Photonic Network Communications, 2016, 31(2): 316-320.
- [6] Gao L N, Liu J F, Zeng X Y, *et al.* Joint phase equalization in optical orthogonal frequency division multiplexing system[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(1): 0106004.  
高丽娜, 刘剑飞, 曾祥烨, 等. 一种光正交频分复用系统的联合相位均衡方法[J]. 光学学报, 2012, 32(1): 0106004.
- [7] Wang L Z, Tang X F, Zhang X G, *et al.* Blind phase estimation algorithms based on decision-directed and decision-feedback in PDM-CO-OFDM systems[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(3): 0305001.  
王凌子, 唐先锋, 张晓光, 等. PDM-CO-OFDM 系统中基于判决引导与判决反馈的盲相位估计算法[J]. 中国激光, 2014, 41(3): 0305001.
- [8] Ren H L, Kang S Y, Lu J, *et al.* Blind phase noise compensation in large linewidth coherent optical orthogonal frequency division multiplexing systems[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(1): 0106005.  
任宏亮, 康少源, 卢瑾, 等. 大线宽相干光正交频分复用系统中盲相位噪声补偿[J]. 光学学报, 2017, 37(1): 0106005.
- [9] Hong X, Hong X, Zhang J, *et al.* Low-complexity linewidth-tolerant time domain sub-symbol optical phase noise suppression in CO-OFDM systems[J]. Optics Express, 2016, 24(5): 4856-4871.
- [10] Yi X, Shieh W, Tang Y. Phase estimation for coherent optical OFDM[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2007, 19(12): 919-921.

- [11] Le S T, Kanesan T, McCarthy M E, *et al.*. Experimental demonstration of data-dependent pilot-aided phase noise estimation for CO-OFDM[C]//Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), 2014: 14546603.
- [12] Xu Z, Tan Z, Yang C. Eigenvector basis expansion based phase noise suppression method for CO-OFDM systems[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2017, 29(13): 1124-1127.
- [13] 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.
- [14] Bo T, Huang L, Chan C K. Common phase estimation in coherent OFDM system using image processing technique[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(15): 1597-1600.
- [15] Ma J J, Li Z X, Xu Y T, *et al.*. Projection histogram assisted common phase estimation algorithm in coherent optical OFDM system[C]. Opto-Electronics and Communications Conference (OECC) and Photonics Global Conference (PGC), 2017: 17373632.
- [16] Shieh W, Yang Q, Ma Y. 107 Gb/s coherent optical OFDM transmission over 1000-km SSMF fiber using orthogonal band multiplexing [J]. Optics Express, 2008, 16(9): 6378-6386.
- [17] Cheng L, Yao W, Li B. Improved projection profile based algorithm for skew detecting in document images[J]. Journal of Image and Graphics, 2015, 20(1): 29-38.
- 程立, 姚为, 李波. 基于投影轮廓的文本图像倾斜检测[J]. 中国图象图形学报, 2015, 20(1): 29-38.
- [18] Zhuge Q B, Chen C, Plant D V. Low computation complexity two-stage feedforward carrier recovery algorithm for M-QAM[C]//2011 and the National Fiber Optic Engineers Conference. Optical Fiber Communication Conference and Exposition, 2011: 12050029.
- [19] Wang M, Zhang Q W, Zhang L, *et al.*. All optical OFDM-PON architecture based on centralized comb source for 125 Gbit/s access network[J]. Journal of Shanghai University (Natural Science), 2012, 18(1): 1-6.
- 汪敏, 张倩武, 张林, 等. 基于中心化梳状光源的 125 Gbit/s 全光 OFDM-PON 接入网架构[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2012, 18(1): 1-6.
- [20] Kuang C X, Chen R R, Song Y X, *et al.*. Research on throughput potential of OFDM-PON uplink based on RSOA [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(9): 0906002.
- 邝彩霞, 陈荣荣, 宋英雄, 等. 基于反射式半导体光放大器的 OFDM-PON 上行通道吞吐潜力[J]. 光学学报, 2016, 36(9): 0906002.
- [21] Chen R R, Kuang C X, Ma J J, *et al.*. Algorithm research of coherent optical OFDM system based on optical comb[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(7): 0706003.
- 陈荣荣, 邝彩霞, 马俊洁, 等. 基于光梳状波的相干光正交频分复用-无源光网系统的算法[J]. 光学学报, 2017, 37(7): 0706003.