

基于实虚交替导频的CO-OFDM-OQAM通信系统激光器相位噪声抑制方法

赵航宇 王道斌 张硕 黄全盛 温坤 李广富 元丽华

Laser phase noise suppression method for a CO-OFDM-OQAM communication system with real-imaginary-alternate pilots

ZHAO Hang-yu, WANG Dao-bin, ZHANG Shuo, HUANG Quan-sheng, WEN Kun, LI Guang-fu, YUAN Li-hua

引用本文:

赵航宇, 王道斌, 张硕, 黄全盛, 温坤, 李广富, 元丽华. 基于实虚交替导频的CO-OFDM-OQAM通信系统激光器相位噪声抑制方法[J]. *中国光学*, 2024, 17(4): 950-958. doi: 10.37188/CO.2023-0230

ZHAO Hang-yu, WANG Dao-bin, ZHANG Shuo, HUANG Quan-sheng, WEN Kun, LI Guang-fu, YUAN Li-hua. Laser phase noise suppression method for a CO-OFDM-OQAM communication system with real-imaginary-alternate pilots[J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(4): 950-958. doi: 10.37188/CO.2023-0230

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0230>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

可见光通信中正交频分复用调制技术

Orthogonal frequency division multiplexing modulation techniques in visible light communication

中国光学 (中英文). 2021, 14(3): 516 <https://doi.org/10.37188/CO.2020-0051>

基于Yb:CALGO晶体激光器的偏振复用

Polarization-multiplexing of a laser based on a bulk Yb:CALGO crystal

中国光学 (中英文). 2023, 16(6): 1475 <https://doi.org/10.37188/CO.EN-2023-0005>

单波长激光通信终端的隔离度

Isolation of single wavelength laser communication terminals

中国光学 (中英文). 2023, 16(5): 1137 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0253>

空间激光干涉仪激光抖动噪声抑制研究

Noise suppression of laser jitter in space laser interferometer

中国光学 (中英文). 2021, 14(6): 1426 <https://doi.org/10.37188/CO.2021-0045>

长春光机所高速垂直腔面发射激光器研究进展

Research progress of high-speed vertical-cavity surface-emitting laser in CIOMP

中国光学 (中英文). 2022, 15(5): 946 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0136>

运动探测及可见光通信一体化氮化物光电子芯片

Integrated Nitride optoelectronic chip for motion detection and visible light communication

中国光学 (中英文). 2023, 16(5): 1257 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0028>

文章编号 2097-1842(2024)04-0950-09

基于实虚交替导频的 CO-OFDM-OQAM 通信系统 激光器相位噪声抑制方法

赵航宇, 王道斌*, 张 硕, 黄全盛, 温 坤, 李广富, 元丽华
(兰州理工大学理学院, 甘肃兰州 730050)

摘要:针对偏移正交幅度调制的相干光正交频分复用 (CO-OFDM-OQAM) 通信系统, 本文提出了一种基于实虚交替导频的相位噪声抑制算法。该算法利用激光器相位噪声的性质和固有虚部干扰 (IMI) 系数的对称性规律设计全新的实虚交替导频, 结合线性拟合, 能够准确估计每个频域符号的公共相位误差 (CPE)。由于是在频域进行补偿, 与时域相位噪声抑制算法相比, 计算复杂度大幅下降。搭建了有效速率为 65 GBits/s 的偏振复用 CO-OFDM-OQAM 系统的数值仿真平台, 研究了不同激光器线宽和子载波个数下系统的传输性能, 考察了所提方法对相位噪声的抑制效果。获得的结果证实: OSNR 固定为 25 dB, 子载波总数分别为 256、512 和 1024 时, 误码率达到 FEC 极限时所需要的线宽分别为 801.1、349 和 138.4 kHz。对于使用 16-QAM 调制格式、子载波个数为 256 或 512 的系统, 能较好补偿激光器的相位噪声, 而且不会影响功率峰均比。

关键词: 偏振复用; 相位噪声; 正交频分复用; 光通信系统

中图分类号: TN913.7 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2023-0230

Laser phase noise suppression method for a CO-OFDM-OQAM communication system with real-imaginary-alternate pilots

ZHAO Hang-yu, WANG Dao-bin*, ZHANG Shuo, HUANG Quan-sheng,
WEN Kun, LI Guang-fu, YUAN Li-hua

(School of Science, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

* Corresponding author, E-mail: cougarlz@lut.edu.cn

Abstract: A phase noise suppression algorithm based on real-imaginary-alternate pilots was proposed for a coherent optical orthogonal frequency division multiplexing communication system with offset quadrature amplitude modulation (CO-OFDM-OQAM). The algorithm uses the properties of laser phase noise and the intrinsic imaginary interference (IMI) symmetry law to design real-imaginary-alternate pilots. In combination with a linear fitting, it can accurately estimate the common phase error (CPE) for CO-OFDM-OQAM. As the compensation was performed in the frequency domain, the computational complexity was significantly reduced compared to the time-domain phase noise suppression algorithms. A numerical simulation plat-

收稿日期: 2023-12-20; 修订日期: 2024-01-17

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 62141505, No. 61367007); 甘肃省自然科学基金 (No. 20JR10RA154)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 62141505, No. 61367007); Natural Science Foundation of Gansu Province (No. 20JR10RA154)

form was built for a polarization multiplexed CO-OFDM-OQAM system with an effective bit rate of 65 Gbits/s. Through it, the transmission performance of the system with different laser linewidths and numbers of subcarriers was studied, and the suppression effect of the proposed method on phase noise was examined. The results obtained confirm that the linewidths required to reach the FEC limit for BER are equal to 801.1, 349, and 138.4 kHz for a fixed OSNR of 25 dB and a total number of subcarriers of 256, 512, and 1024, respectively. For the system using a 16-QAM modulation format with 256 or 512 subcarriers, it compensates well for the laser phase noise without affecting the power peak-to-average ratio.

Key words: polarization-division-multiplexing; phase noise; orthogonal frequency division multiplexing; optical communication system

1 引言

随着移动通信、互联网、物联网等领域的迅猛发展,对高效、可靠的数据传输和频谱资源的充分利用需求不断增加。相干正交频分复用(OFDM)作为一种多载波调制技术满足这些需求,因为它能够将数据分成多个子载波,并将它们同时传输,从而提高了通信系统的吞吐量。与基于循环前缀的正交频分复用(CP-OFDM)通信系统相比,基于偏移正交幅度调制(Offset-QAM)的正交频分复用系统(OFDM-OQAM)使用了时频聚焦特性更加优良的原型滤波器。虽然CP-OFDM在光纤通信领域已获得广泛应用,但是OFDM-OQAM带外能量泄漏更小、频谱效率更高,所以被认为是CP-OFDM的代替方案之一^[1-9]。

在相干光通信系统中,激光器的相位噪声(Phase Noise, PN)是一种非常重要的物理损伤。相位噪声会使光信号的相位随时间发生随机波动,引起公共相位误差(Common Phase Error, CPE),还会引起子载波间干扰(Inter Carrier Interference, ICI)^[10],从而使接收端的星座图表现出强烈地旋转与发散,最终导致系统传输质量严重劣化。研究人员已经提出了多种针对CP-OFDM的相位噪声补偿方案,然而这些方法都无法直接应用于CO-OFDM-OQAM系统^[11]。这是因为CO-OFDM-OQAM只满足实数域正交性条件,不满足复数域正交性条件,相位噪声补偿和信道均衡过程均会受到固有虚部干扰(Intrinsic Imaginary Interference, IMI)。IMI的存在使得CO-OFDM-OQAM系统的数字信号处理方法与其它相干光通信系统有很大的不同。

目前,CO-OFDM-OQAM系统的相位噪声补偿方法可以分为两类:盲估计法^[12]和非盲估计法。非盲估计法是通过在频域符号中插入已知的导频来对相位噪声进行估计和补偿的。盲估计方法则不需要借助导频信息进行相位噪声估计,其频谱效率不会降低,但是计算复杂度高。早在2014年,文献[13]就讨论了多载波Offset-QAM系统的相位噪声跟踪问题,作者将载波相位恢复(Carrier Phase Recovery, CPR)方案以反馈的方式纳入自适应信道均衡。2015年,针对Offset-QAM Nyquist波分复用系统,文献[14]提出了一种盲相位搜索(Blind Phase Search, BPS)算法。它是一种前馈式盲估计方案,并在4-QAM、16-QAM系统中进行了实验验证。两年后,该课题组缩减了该方法的计算复杂度,提出了垂直BPS(V-BPS)算法^[15]。文献[13-15]存在一个共同的问题,即考虑的子载波数量非常少,最少为4个,最多为7个。然而,随着子载波数量的增加,在一个符号持续时间内,PN有明显变化,不能被忽略。在这种情况下,文献[13-15]的方法就不再适用。Nguyen TH解决了CO-OFDM-OQAM在子载波数量较大时的PN消除问题^[12],并提出了一种改进的BPS算法。在传统的BPS算法中,星座点之间的距离是通过复数的平方来计算的,而在改进的BPS算法(M-BPS)中,星座点之间的距离是在实平面内进行的。文献[12]根据最大似然估计原理给出了该方法的理论证明。考虑的子载波数量涵盖256、512、2048。2015年,Fang^[16]等人通过研究发现:在CO-OFDM-OQAM系统中,PN引起的ICI比传统CP-OFDM系统更为复杂。基于正交基扩展原理,他为偏振复用CO-OFDM-OQAM系统

(PDM-CO-OFDM-OQAM) 设计了一种时域 PN 抑制方法。尽管该方法可以抑制 CPE 和 ICI, 但其计算复杂度需要进一步优化。Nguyen T T^[17] 等人在 2018 年提出了一种基于导频编码的 PN 补偿方法。他们报告称, 在 200 kHz 的激光线宽下, 对于具有 256 个子载波的 32 GBaud/s CO-OFDM-OQAM 系统, 该方法可以提供与文献 [12] 的 M-BPS 算法相当的 PN 补偿效果, 同时大大降低了算法复杂性。然而, 该方法的预编码过程牺牲了 3.1% 的频谱效率。一年后, You B Y^[18] 进一步扩展了这项工作。他们利用导频编码对载波频率偏移和相位噪声进行了联合估计。数值模拟结果表明, 该方法可以正确估计和补偿高达 10 GHz 的载波频偏和线宽高达 1 MHz 的相位噪声^[18]。除上述工作外, 卡尔曼滤波器也可用于补偿 CO-OFDM-OQAM 系统的相位噪声^[19-20]。

本文重点研究了基于导频的 PDM-CO-OFDM-OQAM 相位噪声补偿方法。首先, 为 CO-

$$\mathbf{r}[\mathbf{k}] = \exp[j\phi(\mathbf{k})] \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} a_{m,n} g\left[k - n\frac{M}{2}\right] \exp\left[j2\pi m\left(k - \frac{KM-1}{2}\right)/M\right] \exp\left(j\pi \frac{m+n-2mn}{2}\right), \quad (1)$$

式中, $g[k]$ 代表脉冲成型滤波器, K 是 $g[k]$ 的重叠因子, 子载波个数为 M , 时间序列为 N 。 $\phi(\mathbf{k})$ 是附

$$\hat{a}_{m,n} = \sum_k \mathbf{r}[\mathbf{k}] g\left[k - n\frac{M}{2}\right] \exp\left[-j2\pi m\left(k - \frac{KM-1}{2}\right)/M\right] \exp\left(-j\frac{m+n-2mn}{2}\right) = \sum_p \sum_q a_{m+p,n+q} \eta_{p,q}, \quad (2)$$

其中, $\eta_{p,q} = \sum_k \exp[j\phi(\mathbf{k})] g\left[k - (n+q)\frac{M}{2}\right] g\left[k - n\frac{M}{2}\right] \exp\left[j2\pi p\left(k - \frac{KM-1}{2}\right)/M\right] \exp\left[j\pi \frac{p+q-2(pn+qm+pq)}{2}\right]$,

(p, q) 代表时频格点 $(0, 0)$ 的一阶最近邻区域。从式 (2) 可以看出, $\phi(\mathbf{k})$ 会引起相位的随机扰动, 影响 $a_{m,n}$ 的解调过程, 降低系统的传输质量。在时域, PN 的影响以复变量的 e 指数函数形式出现, 可以看作是乘性噪声。在频域, PN 的影响可以分离为两部分: 第一部分将导致所有符号产生一个共同的旋转角, 即公共相位误差 CPE; 第二部分导致不同子载波之间出现干扰, 即 ICI, 不同符号的 ICI 并不相同。

虽然, 激光器相位噪声是随机变化的, 但它仍然满足一定的统计学规律, 可以看作是一个维纳随机过程, 即 Wiener-Lévy 过程:

$$\phi(m) = \phi(m-1) + \Delta\phi(m), \quad (3)$$

其中, m 是时间采样点序号, $\Delta\phi(m) \sim N(0, 2\pi\Delta f T_s)$

OFDM-OQAM 提出了新的导频设计方案, 即实虚交替导频。接着, 详细阐述了利用这种新方案补偿 CPE 的基本原理。光纤信道中出现相位噪声时, 实数导频在复平面上会发生旋转, 相对于实轴的旋转角即为相位噪声。与实数导频类似, 虚数导频相对于虚轴的旋转角也等于相位噪声。对实数导频和虚数导频的旋转角进行平均后可获得相位噪声的准确估计值。最后, 搭建了有效速率为 65 GBits/s 的 PDM-CO-OFDM-OQAM 系统的数值仿真平台, 验证了所提方法的 CPE 补偿能力, 进一步研究了激光器线宽、光信噪比 (OSNR)、子载波总数对补偿效果的影响。

2 算法原理

为了突出重点, 暂时忽略色散等其它信道损伤的影响。考虑相位噪声后, 在每个偏振态上, CO-OFDM-OQAM 的接收端信号可以写为:

加在接收信号上的激光器相位噪声。为了解调出 $a_{m,n}$, 需要执行如下操作:

是一个零均值的高斯随机过程, 方差等于 $2\pi\Delta f T_s$ 。 Δf 是发射端激光器和本振激光器的总线宽, T_s 是码元周期。激光器相位噪声对任何一种相干光通信系统都有较严重的影响, 而对直接探测光通信系统的影响则较小。图 1 展示了激光器线宽不断增加时, CO-OFDM-OQAM 信号在复平面上的旋转和扩散情况。从图 1 可以看出: 与其它相干系统相比, CO-OFDM-OQAM 系统存在相位噪声和固有虚部干扰的相互叠加, CPR 问题变得更加复杂, 需要采取有效的方法消除和补偿由此产生的影响。

为了利用导频估计相位噪声, 假设 CO-OFDM-OQAM 系统的子载波总数较少, 符号持续时间短, 则相位噪声可近似为常数, 有如下近似:

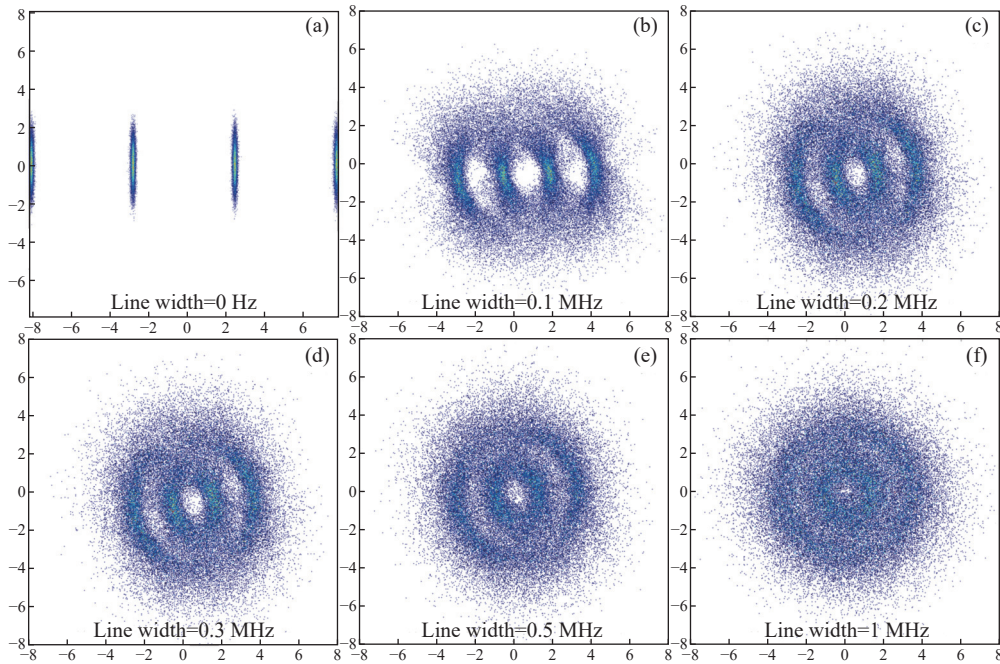


图 1 OFDM-OQAM 系统中信号受激光器线宽的影响。(a)线宽为 0; (b)线宽为 0.1 MHz; (c)线宽为 0.2 MHz; (d)线宽为 0.3 MHz; (e)线宽为 0.5 MHz; (f)线宽为 1 MHz

Fig. 1 The effect of the laser linewidth on the signal in the OFDM-OQAM system. The line width is (a) 0; (b) 0.1 MHz; (c) 0.2 MHz; (d) 0.3 MHz; (e) 0.5 MHz; (f) 1 MHz

$$\sum_k \exp[j\phi(k)] g\left[k-n\frac{M}{2}\right] g\left[k-n\frac{M}{2}\right] \approx \exp\left(j\bar{\phi}_n^{\text{CPE}}\right) \sum_k g\left[k-n\frac{M}{2}\right] g\left[k-n\frac{M}{2}\right] \quad (4)$$

将式 (4) 代入式 (2) 后进一步可得:

$$\hat{a}_{m,n} = \sum_p \sum_q a_{m+p,n+q} \eta_{p,q} = a_{m,n} \eta_{0,0} + \sum_{(p,q) \neq (0,0)} a_{m+p,n+q} \eta_{p,q} \approx \exp\left(j\bar{\phi}_n^{\text{CPE}}\right) a_{m,n} \tilde{\eta}_{0,0} + \sum_{(p,q) \neq (0,0)} \exp\left(j\bar{\phi}_{n+q}^{\text{CPE}}\right) a_{m+p,n+q} \tilde{\eta}_{p,q} = \exp\left(j\bar{\phi}_n^{\text{CPE}}\right) \left\{ a_{m,n} \tilde{\eta}_{0,0} + \sum_{(p,q) \neq (0,0)} a_{m+p,n+q} \tilde{\eta}_{p,q} \right\} \quad (5)$$

为了估计式 (5) 中的 $\bar{\phi}_n^{\text{CPE}}$, 本文为 CO-OFDM-OQAM 设计了一种频域相位噪声补偿算法, 它使用了实虚交替的梳状导频, 如图 2(彩图见期刊电子版)所示。实值导频用红色五角星表示, 虚值导频用蓝色五角星表示, 白色圆形代表零值子载波, 蓝色圆形代表有效载荷。每组导频占据 3 个子载波频域位置, 中间为实虚交替的导频值, 两侧为零值子载波构成的保护间隔, 用于消除导频与有效载荷之间的干扰, 多组导频等间距插入所有子载

波中。实值导频记作 p_{real} , 虚值导频记作 p_{imag} , 从图 2 可知, 每个实值导频的一阶最近邻是两个虚值导频, 由式 (5) 可知, 该位置的接收信号为:

$$\hat{p}_{\text{real}} = \exp\left[j\bar{\phi}(k)\right] \left(p_{\text{real}} + p_{\text{imag}} \xi_{m,n}^{m,n-1} + p_{\text{imag}} \xi_{m,n}^{m,n+1} \right), \quad (6)$$

其中: $\xi_{m,n}^{m,n\pm 1}$ 为固有虚部干扰, 由于 p_{imag} 和 $\xi_{m,n}^{m,n\pm 1}$ 均为纯虚数, 所以上式圆括号内是实数。再考虑虚值导频, 每个虚值导频的一阶最近邻是两个实值导频, 由式 (5) 可知, 该位置的接收信号为:

$$\hat{p}_{\text{imag}} = \exp\left[j\bar{\phi}(k)\right] \left(p_{\text{imag}} + p_{\text{real}} \xi_{m,n}^{m,n-1} + p_{\text{real}} \xi_{m,n}^{m,n+1} \right). \quad (7)$$



图 2 本文提出的相位噪声补偿方法导频结构图

Fig. 2 Pilot structure diagram of the proposed phase noise compensation method

由于 p_{imag} 的周围格点处都是实数, $\xi_{m,n}^{m,n\pm 1}$ 均为虚数, 所以上式圆括号内是纯虚数。

在本文所提算法中, 实值导频载入的是幅度为 $\pm 1, \pm 3, \pm 5, \dots$ 的调幅信号, 在传输之前, 这些实值导频在复平面上是一条经过原点与实轴重合的直线。虚值导频载入的是值为 $\pm 1j, \pm 3j, \pm 5j, \dots$ 的调幅信号, 在传输之前, 这些虚值导频在复平面上是一条经过原点与虚轴重合的直线, 如图 3(a) (彩图见期刊电子版) 所示。当导频受到相位噪声的干扰后, 由式 (6) 和式 (7) 可以看出, 实值导频会围绕实轴整体旋转, 而虚值导频也会围绕虚轴整体旋转, 它们的旋转角度即为相位噪声引起的 CPE (图 3(b), 彩图见期刊电子版)。在接收端, 解调后将导频位置的数据提取出来, 并将这些数据与原点一起进行线性拟合, 得到两条直线。这两条直线分别与实轴和虚轴所成的夹角即为 CPE 的估计值。

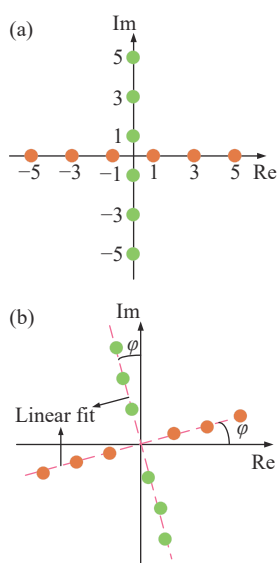


图 3 在导频中载入的 AM 信号

Fig. 3 The AM signal loaded in the pilot

最后, 使用估计出的 CPE 对这一符号周期的信号进行补偿:

$$\hat{r}_n = r_n \cdot \exp(-j\phi) \quad (8)$$

式中, r_n 是第 n 个符号的基带接收信号, \hat{r}_n 是经过相位噪声补偿的信号, ϕ 为相位噪声旋转角度的估计值。将补偿相位噪声之后的脉冲幅度调制 (Pulse Amplitude Modulation, PAM) 信号转换为 QAM 信号, 即可恢复原始信息。本文所提补偿算法的流程如图 4 所示。

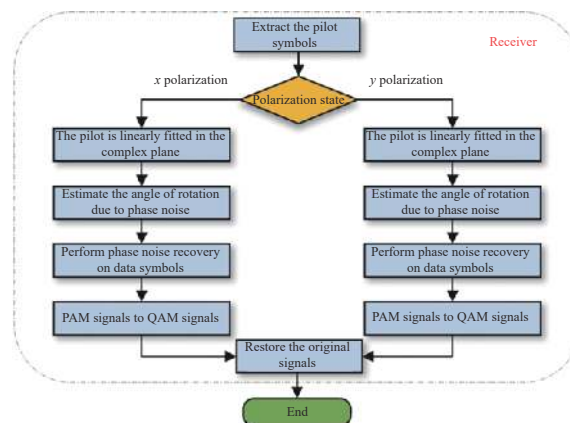


图 4 本文所提相位噪声补偿算法流程图

Fig. 4 Flowchart of the proposed phase noise compensation algorithm

3 结果分析与讨论

为了分析本文方法的相位噪声补偿效果, 搭建了 PDM-CO-OFDM-OQAM 通信系统的数值仿真平台, 具体如图 5 所示。该系统的时域采样速率设定为 20 Gsamples/s, 调制格式为 16-QAM, 激光器的中心频率为 193.4 THz, 激光器线宽和子载波数目均可变。首先, 生成 X 和 Y 偏振的伪随机二进制序列 (PRBS), 经串并变换后, 进行 16-QAM 星座映射。复数信号经过 Offset-QAM 模块处理后转换为实值信号, 插入如图 2 所示的实虚交替导频后, 输入 IFFT 模块和综合滤波器组, 完成频域到时域的转换, 获得时域波形。将经过数模转换器 (DAC) 处理的基带电信号加载到双平行马赫-曾德尔调制器 (DPMZM) 的射频端口上, 对光载波进行 IQ 调制。偏振合束器 (PBC) 将 X 和 Y 偏振 DPMZM 输出的光信号合并, 然后输入光纤信道中进行传输。在接收端, 偏振分束器 (PBS) 将光信号分成两路偏振分支信号, 使用零差相干探测方法实现光电转换过程, 获得基带电信号。偏振复用相干接收机包括两个 90° 光学混频器和 4 组平衡光电探测器, 本振激光器的输出功率为 20 dBm, 线宽可调。接收端的数字信号处理模块主要包括: 分析滤波器组、FFT 模块、信道均衡、相位噪声补偿和 16-QAM 逆映射。最后, 恢复出二进制比特序列进行误比特率计算。

首先, 研究了不同激光器线宽对所提方法相位噪声补偿效果的影响, 如图 6~图 7 (彩图见期刊电子版) 所示。激光器的总线宽从 100 kHz 增加

至 300 kHz, 测试了不同线宽下, PDM-CO-OFDM-OQAM 的误码率随 OSNR 的变化情况。

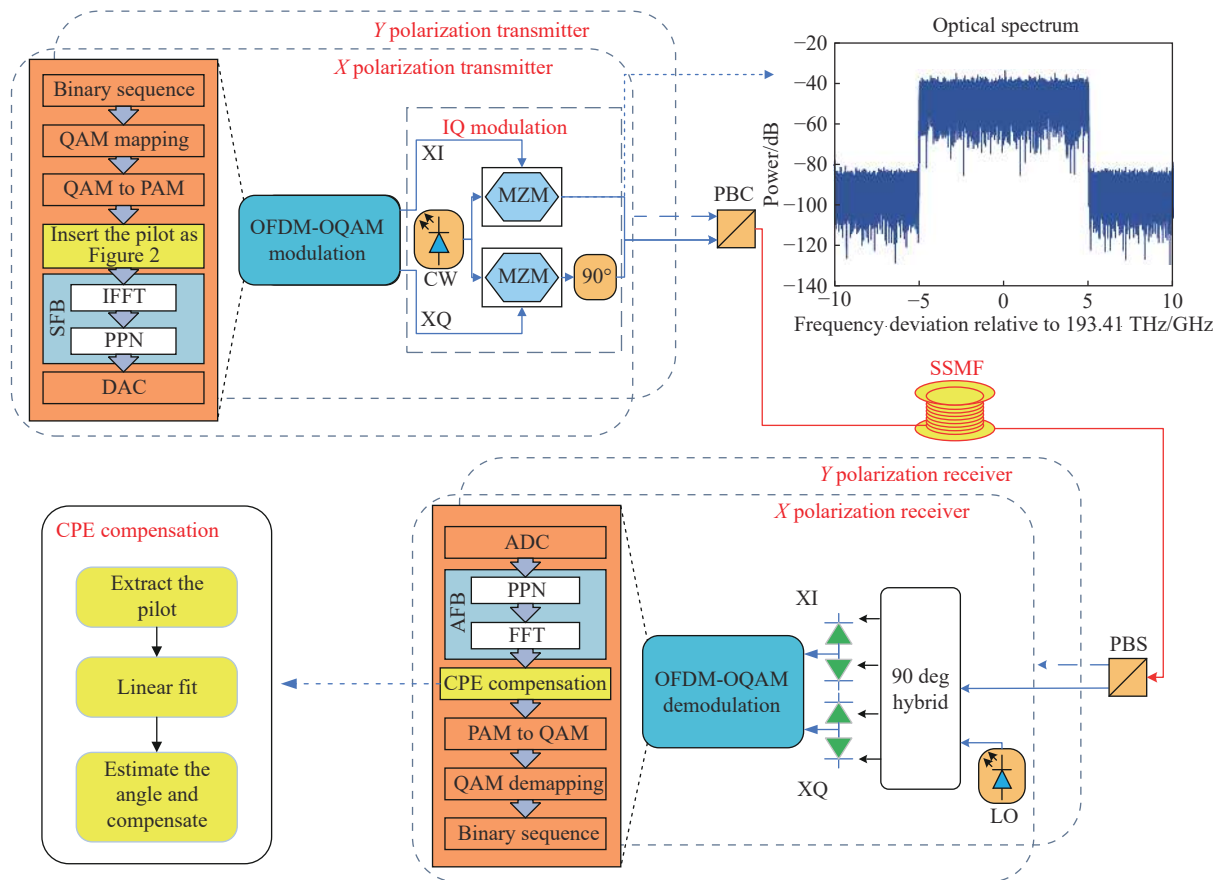


图 5 PDM CO-OFDM-OQAM 系统原理示意图, 插图显示了它的光谱和补偿流程

Fig. 5 Schematic diagram of PDM CO-OFDM-OQAM system, with insets showing its optical spectra and compensation process

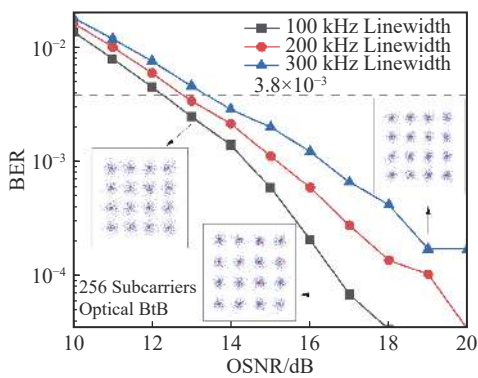


图 6 子载波数为 256, 光背靠背时, 不同激光器线宽的误码率性能

Fig. 6 The bit error rate performance of different laser linewidths with the subcarrier number 256 when light is back-to-back

图 6 展示的是子载波总数为 256 时的误码率曲线。从图 6 可以看出, 给定激光器线宽时, 随着 OSNR 逐渐增大, 误码率逐渐减小。在给定的

OSNR 下, 激光器总线宽越大, 则误码率越高。当激光器总线宽分别为 100 kHz、200 kHz 和 300 kHz 时, 误码率达到硬判决前向纠错码极限 (Forward Error Correction, FEC) 所需要的 OSNR 分别等于 12.3、12.8 和 13.4 dB。

图 7 展示的是子载波总数为 512 时的误码率曲线。可见, 给定线宽或 OSNR 时, 误码率曲线的变化趋势与图 6 相同。当激光器总线宽分别为 100 kHz、200 kHz 和 300 kHz 时, 误码率达到 FEC 极限时所需要的 OSNR 分别等于 13.7、15.3 和 18.3 dB。

接着, 将 OSNR 固定为 25 dB, 测试了不同子载波总数下误码率随激光器线宽的变化情况, 结果如图 8 所示。

从图 8 可以看出, 子载波总数取定值时, 随着激光器线宽的增加, 误码率性能逐渐劣化。子载波总数分别为 256、512 和 1024 时, 误码率达到

FEC 极限时所需要的线宽分别等于 801.1、349 和 138.4 kHz。由此可知,如果给定激光器总线宽,子载波总数越大,则误码率越高。这是因为子载波总数增大时,时域符号的持续时间也会延长,相位噪声引起的 ICI 急剧增加,导致相位噪声补偿效果变差。此时,仅补偿 CPE 是不够的,还需要对 ICI 进行有效补偿。现代相干光通信系统使用的外腔激光器(ECL)通常具有 100 kHz 左右的线宽。众所周知,线宽越大,激光器相位噪声的影响则越大;反之,则影响越小。因此,本文所提方法完全能够应用于线宽小于 100 kHz 时的相位噪声补偿。本文方法能够补偿的最大线宽与多种因素有关,包括子载波数量、导频个数等。从图 8 可以看出,当子载波数量为 256 时,本文所提方法能够补偿的最大线宽可以达到 800 kHz。

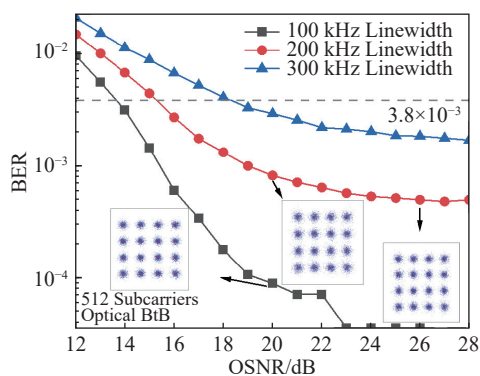


图 7 子载波数为 512,光背靠背时,不同激光器线宽的误码率性能

Fig. 7 The bit error rate performance of different laser linewidths with subcarrier number 512 when light is back-to-back

最后,测试了不同实虚交替导频组数目对相位噪声补偿性能的影响。为了达到这个目的,将接收端 OSNR 固定为 25 dB,子载波总数固定为 512,激光器总线宽取为 100 kHz,每个频域符号内插入的实虚交替导频组数目从 1 逐渐增大至 5,然后测量误码率的变化情况,结果如图 9 所示。从图 9 可以看到,只使用 1 组实虚交替导频时,相位噪声估计过程只能使用一个数据点与原点进行拟合,相位噪声估计精度较差,误码率性能也不理想。随着实虚交替导频组数目的增加,参与拟合的数据点增多,误码率性能逐渐改善。当实虚交替导频组数目增加到 4 组及以上时,误码

率几乎不随导频组数目的变化而变化。因此,在保证相位噪声补偿效果的前提下,本文所提方法只需在每个频域符号内插入 4 组实虚交替导频即可。

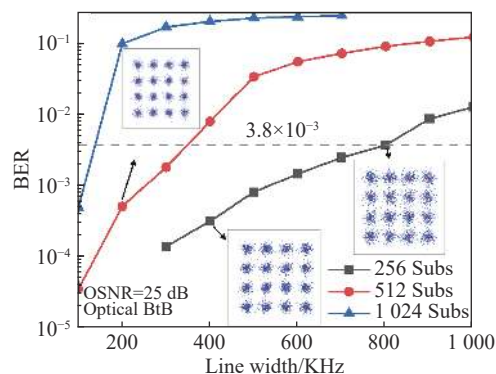


图 8 OSNR 为 25 dB,光背靠背时,本方法在不同子载波数目下的误码率性能

Fig. 8 The bit error rate performance for proposed method under different subcarrier numbers with OSNR 25 dB when light is back-to-back

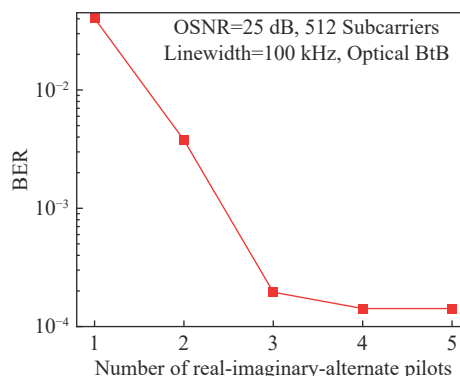


图 9 不同导频组数目对误码率性能的影响

Fig. 9 The influence of different pilot groups on bit error rate performance

本文所提方法的有效性可以通过实验进行验证,图 10 给出了所使用的实验系统示意图。一台 ECL 激光器发射出来的光载波由 PBS 分解为 X 偏振光和 Y 偏振光,分别入射到两个 IQ 光调制器中。这两个 IQ 光调制器的射频信号来自于任意波形发生器(AWG)生成的 OFDM-OQAM 电信号。PBC 将两路光信号合并后发射到光信道中进行传输。在接收端,相干探测器将光信号转化为电信号,经过重新采样后,将其存储在高速数字示波器中。最后,采用离线方式执行本文所提的数字信号处理算法,完成相位噪声补偿和信号解调。

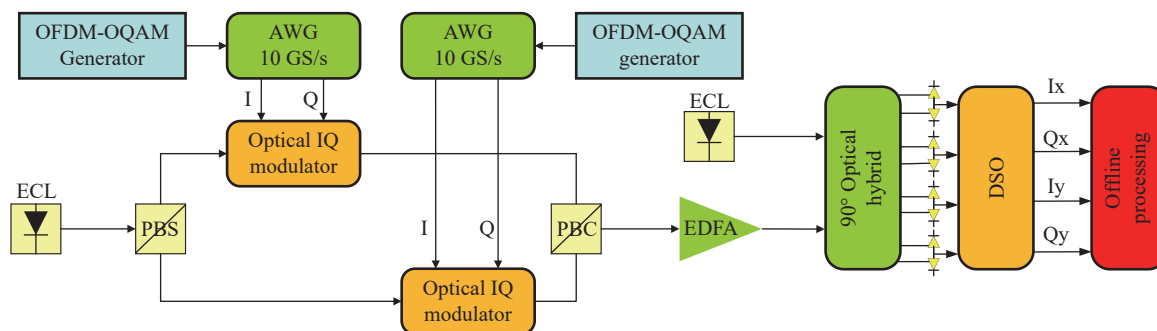


图 10 本文方法的验证实验方案图。AWG 代表任意波形发生器, I 代表同相分量, Q 代表正交分量, DSO 代表高速数字存储示波器, ECL 代表外腔激光器

Fig. 10 Experimental scheme to validate the method proposed in this paper. Acronym key: AWG, Arbitrary Waveform Generator; I, In-phase; Q, quadrature; DSO, digital storage oscilloscope; ECL, External Cavity Laser.

4 结 论

本文为 PDM-CO-OFDM-OQAM 系统提出了基于实虚交替导频的相位噪声补偿方法。该工作的主要创新点在于设计了全新的实虚交替导频方案。通过抽取实值/虚值导频相对于实轴/虚轴的旋转角来估计 CPE。实值和虚值导频均为随机调幅信号, 因此也可以携带客户数据, 而且不会影响信号的峰均功率比。搭建了 PDM-CO-OFDM-

OQAM 通信系统的数值仿真平台, 详细研究了不同激光器线宽、子载波总数和实虚交替导频组数目下该方法的相位噪声补偿效果。研究结果表明: 当子载波总数低于 512 时, 该方法能够对 PDM-CO-OFDM-OQAM 系统的相位噪声进行有效地补偿。子载波总数为 256、512 时, 误码率达到 FEC 极限时所需要的线宽分别等于 801.1、349 kHz。本文结果能够为相干光多载波通信系统的相位噪声补偿设计提供有益的参考。

参考文献:

[1] XIANG B Q, LI F. Joint cancellation of phase noise and clipping noise for OFDM[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2023, 72(2): 1806-1814.

[2] HU SH CH, KANG K, WANG H F, *et al.*. Low complexity blind detection in OFDM systems with phase noise[J]. *Digital Signal Processing*, 2022, 129: 103638.

[3] 徐宪莹, 岳殿武. 可见光通信中正交频分复用调制技术[J]. *中国光学*, 2021, 14(3): 516-527.

XU X Y, YUE D W. Orthogonal frequency division multiplexing modulation techniques in visible light communication[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(3): 516-527. (in Chinese).

[4] KESKIN M F, WYMEERSCH H, KOIVUNEN V. Monostatic sensing with OFDM under phase noise: from mitigation to exploitation[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2023, 71: 1363-1378.

[5] DODANE D, SANTACRUZ J P, BOURDERIONNET J, *et al.*. Optical phase-locked loop phase noise in 5G mm-wave OFDM ARoF systems[J]. *Optics Communications*, 2023, 526: 128872.

[6] XUE ZH J, LI SH Y, LI J D, *et al.*. OFDM radar and communication joint system using opto-electronic oscillator with phase noise degradation analysis and mitigation[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2022, 40(13): 4101-4109.

[7] 管海军, 刘云清, 张凤晶. 基于数字相位恢复算法的正交相移键控自由空间相干光通信系统[J]. *中国光学*, 2019, 12(5): 1131-1138.

GUAN H J, LIU Y Q, ZHANG F J. Coherent free-space optical communication system with quadrature phase-shift keying modulation using a digital phase recovery algorithm[J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(5): 1131-1138. (in Chinese).

[8] SREEDHAR T V S, MEHTA N B. Inter-numerology interference in mixed numerology OFDM systems in time-varying fading channels with phase noise[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2023, 22(8): 5473-5485.

[9] KESKIN M F, MARCUS C, ERIKSSON O, *et al.*. On the impact of phase noise on monostatic sensing in OFDM ISAC systems[C]. *2023 IEEE Radar Conference (RadarConf23)*, IEEE, 2023: 1-6.

- [10] SREEDHAR T V S, MEHTA N B. Refined bounds for inter-carrier interference in OFDM due to time-varying channels and phase noise[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2022, 11(12): 2522-2526.
- [11] ALAGHBARI K A, LIM H S, AZIZ N H A, *et al.*. Design and validation of the physical layer functions of FBMC/OQAM transceiver with improved residual phase error correction[J]. *IEEE Access*, 2022, 10: 97381-97393.
- [12] NGUYEN T H, LOUVEAUX J, GORZA S P, *et al.*. Simple feedforward carrier phase estimation for optical FBMC/OQAM systems[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(24): 2823-2826.
- [13] FICKERS J, GHAZISAEIDI A, SALSI M, *et al.*. Multicarrier offset-QAM for Long-Haul coherent optical communications[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(24): 4671-4678.
- [14] TANG H Y, XIANG M, FU S N, *et al.*. Feed-forward carrier phase recovery for offset-QAM Nyquist WDM transmission[J]. *Optics Express*, 2015, 23(5): 6215-6227.
- [15] LU J N, FU S N, TANG H Y, *et al.*. Vertical blind phase search for low-complexity carrier phase recovery of offset-QAM Nyquist WDM transmission[J]. *Optics Communications*, 2017, 382: 212-218.
- [16] FANG X, ZHANG F. Phase noise estimation and suppression for PDM CO-OFDM/OQAM systems[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(10): 1837-1846.
- [17] NGUYEN T T, LE S T, NISSEL R, *et al.*. Pseudo-pilot coding based phase noise estimation for coherent optical FBMC-OQAM transmissions[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(14): 2859-2867.
- [18] YOU B Y, YANG L, LUO F G, *et al.*. Joint carrier frequency offset and phase noise estimation based on pseudo-pilot in CO-FBMC/OQAM system[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, 11(1): 7201611.
- [19] NGUYEN T H, PEUCHERET C. Kalman filtering for carrier phase recovery in optical offset-QAM Nyquist WDM systems[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(12): 1019-1022.
- [20] WANG X B, YANG L, LUO F G, *et al.*. Adaptive EKF based estimation method for phase noise in CO-OFDM/OQAM system[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 204931-204940.

作者简介:



王道斌(1976—),男,甘肃兰州人,博士,副教授,硕士生导师,2012年于北京邮电大学信息光子学与光通信国家重点实验室获得工学博士学位,主要从事光纤通信和微纳光子学方面的研究。
E-mail: cougarlz@lut.edu.cn