

## 模分复用系统中盲均衡算法的均衡性能研究

王芳, 延凤平, 秦齐, 常欢, 任文华

### Research on equalization performance of blind equalization algorithms in mode-division multiplexing system

引用本文:

王芳, 延凤平, 秦齐, 常欢, 任文华. 模分复用系统中盲均衡算法的均衡性能研究[J]. *激光技术*, 2024, 48(1): 48–53.

WANG Fang, YAN Fengping, QIN Qi, et al. Research on equalization performance of blind equalization algorithms in mode-division multiplexing system[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2024, 48(1): 48–53.

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### 1. 基于改进的AdaBoost无线光通信信号检测算法

引用本文: 贺锋涛, 王乐莹, 王晓波, 等. 基于改进的AdaBoost无线光通信信号检测算法[J]. *激光技术*, 2023, 47(5): 659–665.

### 2. 改进蝙蝠算法的紫外光引导无人机路径规划

引用本文: 赵太飞, 容开新, 王一琼, 等. 改进蝙蝠算法的紫外光引导无人机路径规划[J]. *激光技术*, 2023, 47(5): 678–685.

### 3. 孔径接收下各向异性海洋湍流UWOC系统误码分析

引用本文: 贺锋涛, 王清杰, 张建磊, 等. 孔径接收下各向异性海洋湍流UWOC系统误码分析[J]. *激光技术*, 2021, 45(6): 762–767.

### 4. 单脉冲锁模光纤激光器输出特性的数值研究

引用本文: 王健, 唐信, 林静, 等. 单脉冲锁模光纤激光器输出特性的数值研究[J]. *激光技术*, 2017, 41(6): 784–787.

### 5. 基于级联马赫-曾德尔调制器的太赫兹通信系统

引用本文: 和亮. 基于级联马赫-曾德尔调制器的太赫兹通信系统[J]. *激光技术*, 2016, 40(6): 787–790.

文章编号: 1001-3806(2024)01-0048-06

## 模分复用系统中盲均衡算法的均衡性能研究

王芳<sup>1</sup>, 延凤平<sup>1\*</sup>, 秦齐<sup>1</sup>, 常欢<sup>2</sup>, 任文华<sup>1</sup>

(1. 北京交通大学 电子信息工程学院, 北京 100044, 中国; 2. 北京理工大学 信息与电子学院, 北京 100081, 中国)

**摘要:** 恒模算法(CMA)是一种广泛应用于模分复用系统的算法,可对系统中模式耦合、差分模式群时延和色散等损伤因素进行均衡补偿,进而得到理想信号。为了研究 CMA 算法在强耦合模分复用系统中的均衡性能,采用功率耦合理论搭建 6×6 模分复用系统模型,并在接收端使用 CMA 和修正的恒定模数算法(MCMA)对系统输出信号进行均衡,获得了星座图、均方根误差(RMSE)值和误比特率(BER)。结果表明,在星座图方面,MCMA 可以减少散点,使星座点更紧凑;在 RMSE 方面,MCMA 均衡后的信号的 RMSE 值小于 CMA 均衡后得到的 RMSE 值,说明 MCMA 均衡后的数据离散程度较低;在 BER 方面,当 BER 为  $10^{-3}$  时,MCMA 要求的光信噪比比 CMA 低 1.0 dB,因此,MCMA 的均衡效果优于 CMA。该研究结果为强耦合模分复用系统中的均衡算法提供了一些参考。

**关键词:** 光通信;盲均衡;均方误差;误比特率

中图分类号: TN929.11

文献标志码: A

doi: 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2024.01.008

## Research on equalization performance of blind equalization algorithms in mode-division multiplexing system

WANG Fang<sup>1</sup>, YAN Fengping<sup>1\*</sup>, QIN Qi<sup>1</sup>, CHANG Huan<sup>2</sup>, REN Wenhua<sup>1</sup>

(1. School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. School of Information and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** The constant modulus algorithm (CMA) is a popular algorithm for mode-division multiplexing systems to equalize and compensate for impairments such as mode coupling, differential mode group delay, and dispersion in the system to obtain the desired signal. In order to study the equalization performance of the CMA in the strong coupling mode-division multiplexing system, the power coupling theory was used to build a 6×6 mode-division multiplexing system model and use the CMA and modified constant modulus algorithm (MCMA) at the receiving end to equalize the system output signal and obtain the constellation diagrams, root mean square error (RMSE) values and bit error rate (BER). The results show that in terms of the constellation diagram, MCMA can reduce scatter points and make constellation points more compact; in terms of RMSE, the RMSE value of the signal after MCMA equalization is smaller than the RMSE obtained after CMA equalization, indicating that the data dispersion level after MCMA equalization is low; in terms of BER, when BER is  $10^{-3}$ , the optical signal-to-noise ratio required by MCMA is 1.0 dB lower than that of CMA, therefore, MCMA equalization outperforms CMA. The results of this study provide some references for the equalization algorithm in the strong coupling mode-division multiplexing system.

**Key words:** optical communication; blind equalization; mean square error; bit error rate

## 0 引言

随着 5G、大数据和云计算等现代技术的快速发展<sup>[1]</sup>,全球互联网流量正在急速增长。由于传统单模光纤的非线性效应,其系统容量已达到香农极限<sup>[2]</sup>,不能应对目前的“容量危机”,因此必须寻找新的复用维度,即空间维度。空分复用在光纤领域的主要实现

技术方法有两种,即基于多芯光纤的空分复用技术<sup>[3-4]</sup>和基于少模光纤的模分复用技术<sup>[5-6]</sup>。基于少模光纤的模分复用技术可以极大地扩展通信容量,但同时传输过程中会出现模式耦合、差分模式群时延(differential mode group delay, DMGD)、色散等问题,从而影响接收数据的准确性<sup>[7-8]</sup>。将无线领域的多输入多输出(multiple-input multiple-output, MIMO)均衡<sup>[9-10]</sup>思想引入光纤领域,可以有效解决这一问题。常用的 MIMO 均衡算法有递推最小二乘法(recursive least square, RLS)算法、最小均方(least mean square, LMS)算法和

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2021YFB2800904)

\* 通信作者: fpyan@bjtu.edu.cn

收稿日期:2022-11-22;修回日期:2023-03-14

恒模算法 (constant modulus algorithm, CMA), RLS 和 LMS 是非盲均衡算法, 需要训练序列, 而 CMA 是盲均衡算法, 不需要训练序列。CMA 根据发送信号的统计量就可迭代更新均衡器的抽头系数, 实现信号的恢复, 这是它的一大优势。CMA 被广泛应用于恒模信号<sup>[11]</sup>, 效率高、实时性好、具有良好的收敛性<sup>[12]</sup>。

目前已有大量的工作研究 CMA 算法在各类系统中的应用。例如, ZHANG 等人<sup>[13]</sup>在典型的电话信道上研究比较 CMA 和变步长 CMA 的性能, 变步长 CMA 能较好地平衡收敛速度和剩余误差。XUE 等人<sup>[14]</sup>在无线信道上比较 CMA 和修正的恒定模数算法 (modified constant modulus algorithm, MCMA) 的均衡效果, 结果表明, MCMA 可以加快收敛速度。QIN 等人<sup>[15]</sup>研究 CMA 对 100 Gbit/s 双偏振正交相移键控 (dual-polarization quadrature phase shift keying, DP-QPSK) 光信号传输系统中色散的补偿作用, 证明该算法具有良好的收敛性能和收敛速度。JIN 等人<sup>[16]</sup>建立  $2 \times 2$  的弱耦合少模复用系统, 并利用频域 CMA 和 MCMA 算法进行均衡, 结果表明, 频域 CMA 和 MCMA 算法均适用于模分复用系统的均衡, 并且频域 MCMA 的均衡性能优于频域 CMA。不同于参考文献<sup>[16]</sup>, 本文中采用强耦合 6 模复用系统, 发送端模式数增加, 需要将时域 CMA 和 MCMA 算法扩展为  $12 \times 12$  的 MIMO 结构, 另外由于相同滤波器权值和迭代步长下, 强耦合使算法收敛难度增大, 因此, 需要利用传输参数对均衡滤波器进行粗略初始化, 并重新调整滤波器权值和迭代步长。

本文作者采用具有强模式耦合的 3 模光纤作为传输通道。在考虑色散、群延迟和模式串扰的前提下, 研究在模分复用系统中 CMA 和 MCMA 对输出信号均衡性能的影响, 其中传输信号由 3 个双偏振的正交相移键控信号组成, 光纤通道为 3 模光纤。

## 1 原理

经过 CMA 均衡后的输出信号可能存在一定的相位误差, 单独使用时, 需要加入相位恢复模块。MCMA 可以修正 CMA 造成的相位旋转, 同时能在误比特率方面得到一定改善。本文作者在基于强耦合少模光纤的模分复用系统中比较了 CMA 和 MCMA 的均衡效果。接下来分别对两种算法的原理进行介绍。

### 1.1 CMA

CMA 的基本思想<sup>[17]</sup>如下: 恒模信号通过理想光纤信道传输后仍具有恒模特性, 但实际的光纤信道存在损耗、色散等损伤, 需要使用算法更新均衡器的抽头

系数, 使信号重新具有恒模特性。

图 1 所示是 CMA 的示意图<sup>[18]</sup>。图中,  $x(n)$  表示发送信号,  $h(n)$  表示传输信道的脉冲响应,  $n(n)$  表示加性高斯白噪声,  $y(n)$  表示经过信道传输后的接收信号, 即均衡器的输入信号,  $w(n)$  表示均衡器的抽头系数,  $z(n)$  表示均衡器的输出信号,  $\hat{z}(n)$  表示判决器的输出信号。

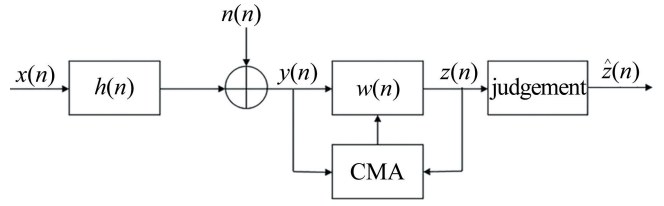


图 1 CMA 示意图<sup>[18]</sup>

Fig. 1 Diagram of CMA<sup>[18]</sup>

CMA 的代价函数为<sup>[19]</sup>:

$$J(n) = E[(|z(n)|^2 - R_2)^2] \quad (1)$$

式中:  $E[\cdot]$  是期望函数;  $R_2$  为 CMA 模值, 是一个常数。  $R_2$  可表示为:

$$R_2 = \frac{E[|x(n)|^4]}{E[|x(n)|^2]} \quad (2)$$

由式(1)可知, 代价函数只包含了接收信号的幅度信息, 没有包含相位信息。因此, 发送信号通过复数信道后会出现相位偏移。

误差函数表示为:

$$e(n) = z(n)(|z(n)|^2 - R_2) \quad (3)$$

根据梯度下降法, 可得均衡器  $w(n)$  的权向量迭代过程如下:

$$\begin{aligned} w(n+1) &= w(n) - \mu \cdot \nabla J(n) = \\ &= w(n) - \mu \cdot z(n)(|z(n)|^2 - R_2) \cdot y^*(n) = \\ &= w(n) - \mu \cdot e(n) \cdot y^*(n) \end{aligned} \quad (4)$$

式中:  $\mu$  表示迭代步长;  $y^*(n)$  表示对  $y(n)$  进行共轭运算。CMA 的迭代步长  $\mu$  是常数, 其大小决定算法的收敛速度。

### 1.2 MCMA

MCMA 算法的原理是把式(1)的代价函数的实虚部分开, 再分别计算<sup>[20]</sup>:

$$J(n) = \text{Re}(J(n)) + \text{Im}(J(n)) \quad (5)$$

其中:

$$\text{Re}(J(n)) = E[(|\text{Re}(z(n))|^2 - \text{Re}(R_2))^2] \quad (6)$$

$$\text{Im}(J(n)) = E[(|\text{Im}(z(n))|^2 - \text{Im}(R_2))^2] \quad (7)$$

式中:  $\text{Re}(\cdot)$  和  $\text{Im}(\cdot)$  分别表示实部、虚部。  $\text{Re}(R_2)$ 、 $\text{Im}(R_2)$  可以表示为:

$$\text{Re}(R_2) = \frac{E[|\text{Re}(x(n))|^4]}{E[|\text{Re}(x(n))|^2]} \quad (8)$$

$$\text{Im}(R_2) = \frac{E[|\text{Im}(x(n))|^4]}{E[|\text{Im}(x(n))|^2]} \quad (9)$$

误差函数定义如下:

$$e(n) = \text{Re}(e(n)) + \text{Im}(e(n)) \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \text{Re}(e(n)) = \\ \text{Re}(z(n)) [|\text{Re}(z(n))|^2 - \text{Re}(R_2)] \quad (11) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Im}(e(n)) = \\ \text{Im}(z(n)) [|\text{Im}(z(n))|^2 - \text{Im}(R_2)] \quad (12) \end{aligned}$$

MCMA 的代价函数同时包含信号的幅度和相位信息,能够有效修正信号经过复信道后引起的相位旋转。

### 1.3 性能指标

收敛速度和均方误差(mean square error, MSE)是盲均衡算法的两个主要性能指标<sup>[21]</sup>,这两个指标都可以从 MSE 曲线得到。通常情况下, MSE 被定义为期望

数据和均衡后数据对应点误差的平方和的均值,用  $\sigma$  表示,表达式如下:

$$\sigma(n) = E[e^2(n)] = E\{[\hat{z}(n) - z(n)]^2\} \quad (13)$$

在 CMA 和 MCMA 算法中,  $\sigma(n)$  一般定义为  $|e(n)|$ 。

## 2 仿真系统结构

为了分析 CMA 和 MCMA 的性能,利用 VPI 仿真软件,基于功率耦合理论搭建了一个 3 模模分复用系统,系统结构如图 2 所示。在仿真中,  $6 \times 56$  Gbit/s 的 DP-QPSK 信号通过模式复用器在具有  $LP_{01}$ 、 $LP_{11,a}$  和  $LP_{11,b}$  光纤模式的 3 模光纤中传输, 3 种模式之间只发生强耦合。该系统的传输距离为 80 km, 光信号在传输过程中还受到色度色散、偏振模色散和模式群时延的影响,具体参数值如表 1 所示。最后,信号经过一个放大器和一个模式解复用器,接收机得到受损信号。

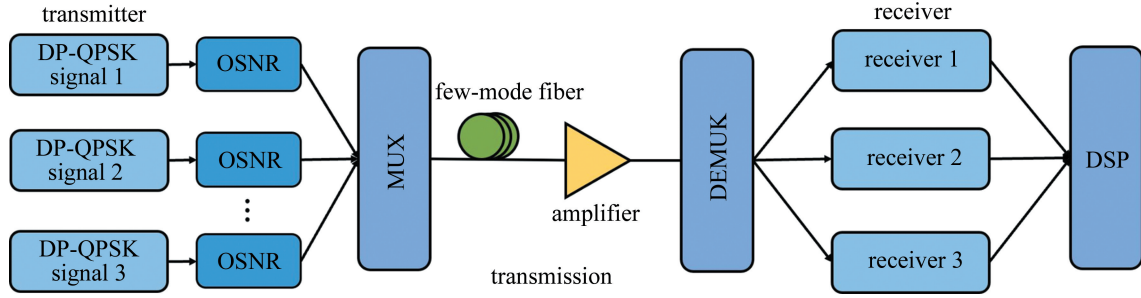


图 2 基于少模光纤的模分复用系统

Fig. 2 Mode-division multiplexing system model based on few-mode fiber

表 1 参数设置

Table 1 Parameter settings

parameter name	parameter value
bit rate	56 Gbit/s
bit sequence length	32768
total fiber length	80 km
fiber dispersion coefficient	20 ps/(nm · km)
polarization mode dispersion	0.05 ps/(km) <sup>1/2</sup>
DMGD ( $LP_{11,a}$ , $LP_{11,b}$ - $LP_{01}$ )	130 ps/km

在本次仿真中,激光器线宽被设置为 100 kHz。

对于传输后的受损信号需要进行一系列数字信号处理(digital signal processing, DSP),才能恢复原始信号,主要包括模数转换(analog-to-digital converter, ADC)、色散补偿(CD compensation)、MIMO 均衡和载波相位估计(carrier phase estimation)。DSP 的实现流程如图 3 所示。其中, MIMO 均衡是本文中的研究重点。

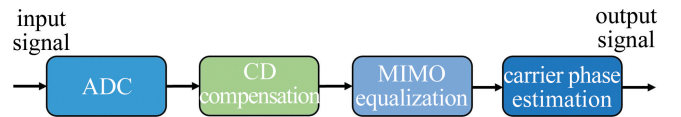


图 3 DSP 流程图

Fig. 3 Flow chart of DSP

## 3 仿真结果分析

CMA 对接收端的受损信号进行均衡补偿,其中传输信号为 DP-QPSK 信号,光信噪比(optical signal-to-noise ratio, OSNR)为 20 dB。算法的稳态误差大小和收敛速度快慢受迭代步长的影响。图 4 所示是选择不同迭代步长时 CMA 的 MSE 曲线。其中均衡器的长度为 122,迭代步长分别为 0.0007、0.0005 和 0.0001。为方便起见,这里只显示  $LP_{01,x}$  的 MSE 曲线。

由图 4 可知,当迭代步长较大时,收敛速度较快,但稳态误差也较大;当迭代步长较小时,稳态误差小,

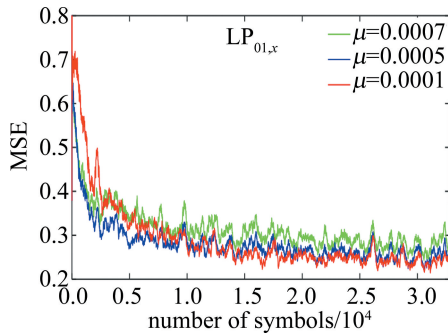


图 4 不同迭代步长的 CMA 算法曲线图

Fig. 4 Convergence curves of CMA for different iteration steps

但收敛速度也较慢。因此,在选择迭代步长时,需要在收敛速度和稳态误差之间权衡。

图 5 所示是使用 CMA 均衡前后的信号星座图的比较结果。基于上述分析,步长选择为 0.0005,均衡器的长度为 122。

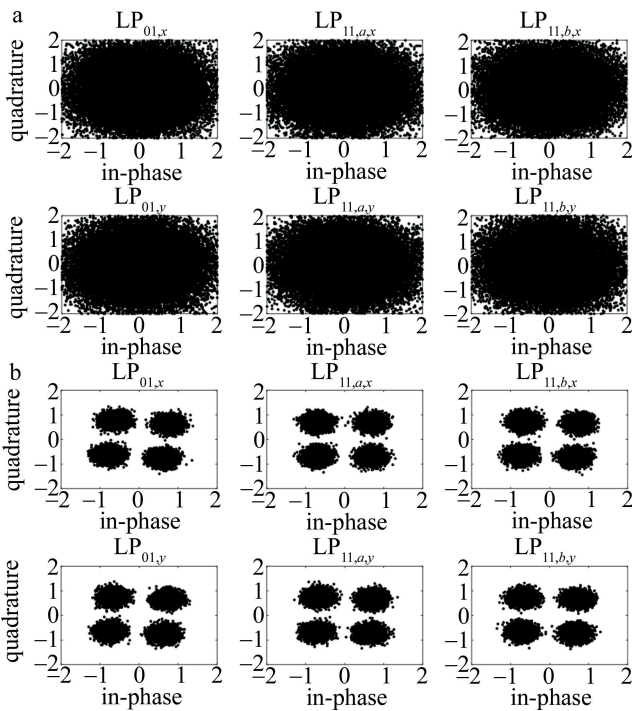


图 5 信号星座图

a—均衡前 b—CMA 均衡后

Fig. 5 Signal constellation diagram

a—before equalization b—after CMA equalization

图 5a 描述了均衡前的接收信号的星座图。在色散、模式耦合和模式时延的影响下,6 个信号都出现了严重的振幅和相位失真,信号星座点分散,信息无法被有效传输。图 5b 显示了 CMA 均衡后信号的星座图。与图 5a 相比,CMA 成功恢复了模式信号。计算了星座图的色散程度,即计算 4 个相位状态中每个相位的均方根误差(root mean square error, RMSE),结果如图

6 所示。图 6 中的数值表明, RMSE 值都接近 0.2, 低于最大值 2, 可以判断 6 路模式信号的 RMSE 值很小, 说明数据比较集中。

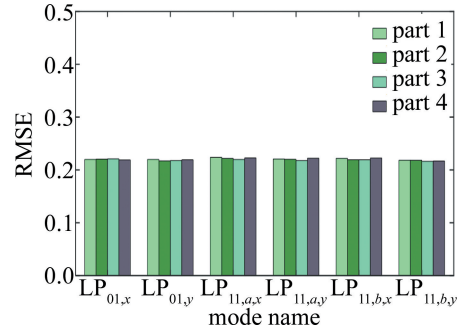


图 6 不同模式的 RMSE 值

Fig. 6 RMSE values for different modes

下面将 MCMA 的均衡性能与 CMA 的均衡性能进行比较,其中传输信号为 DP-QPSK 信号,OSNR 为 19 dB,选择的步长为 0.0005,均衡器的长度为 122。

图 7 所示是分别使用 CMA 和 MCMA 均衡后的 MSE 收敛曲线。比较结果可知,使用 MCMA 均衡产生的稳态误差较小。为方便起见,只显示 LP\_11,a,y 的 MSE 曲线。

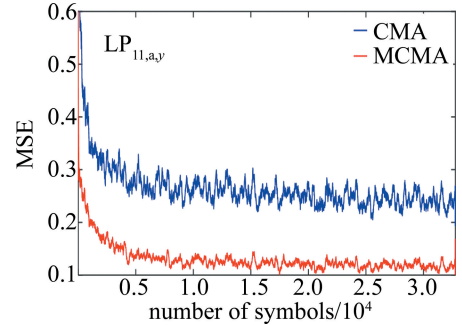


图 7 CMA 和 MCMA 收敛性能的比较

Fig. 7 Comparison of CMA and MCMA convergence performance

图 8a 所示是使用 CMA 均衡后的信号星座图,可以看出,信号基本恢复,但仍有大量散点。图 8b 所示是使用 MCMA 均衡后的信号星座图,比较可知,星座图散点减少,信号恢复更理想。

接下来,继续用 RMSE 来衡量 CMA 和 MCMA 均衡后的星座图的离散程度,如图 9 所示。比较图 9a 和图 9b 可以看出,MCMA 均衡后的信号的离散程度比 CMA 均衡后的信号低,数据更集中。

图 10 所示是 CMA 和 MCMA 分别用于均衡时,误比特率(bit error rate, BER)随 OSNR 的变化曲线。在相同的 OSNR 下,MCMA 在误比特率方面优于 CMA;对于 10<sup>-3</sup> 的误比特率,CMA 需要 17.5 dB,MCMA 需要 16.6 dB,即 MCMA 比 CMA 提高了 0.9 dB。

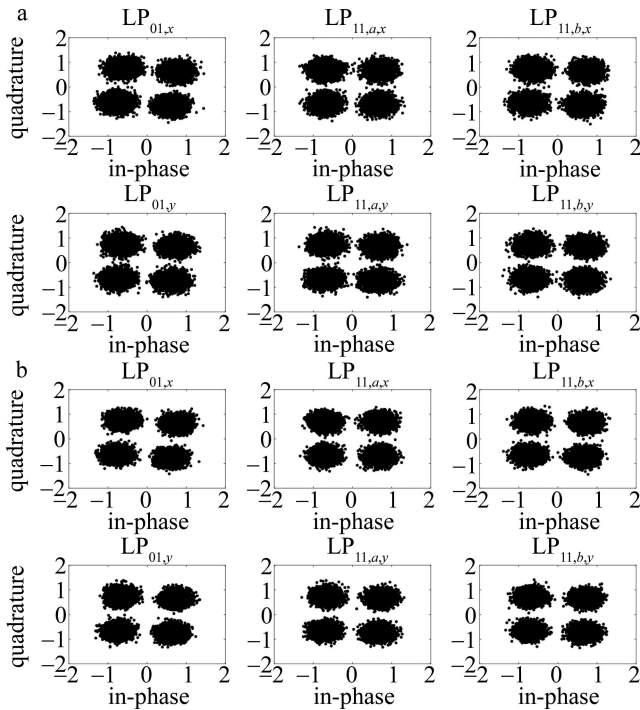


图8 均衡后信号星座图

a—使用 CMA b—使用 MCMA

Fig. 8 Constellation diagrams after equalization

a—with CMA b—with MCMA

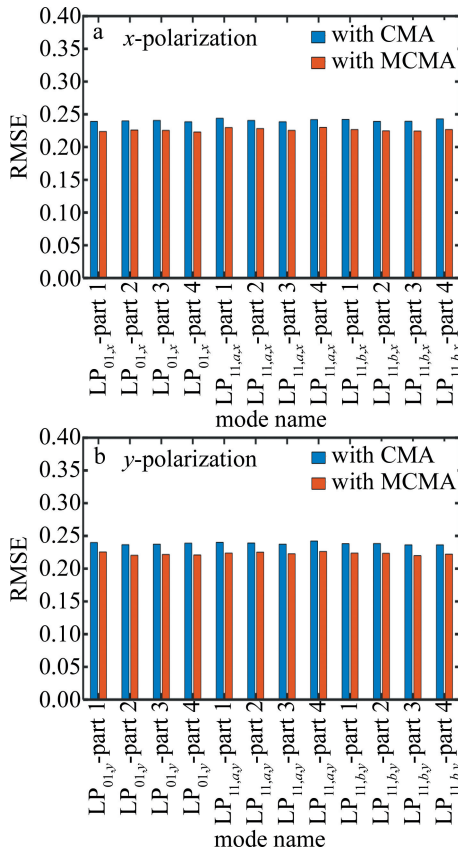


图9 CMA, MCMA 均衡后不同模式的 RMSE 值

Fig. 9 RMSE values for different modes after CMA, MCMA equalization

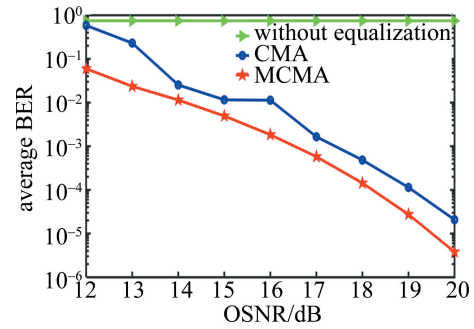


图10 80 km 传输距离下平均误比特率与光信噪比

Fig. 10 Average BER vs. OSNR at 80 km transmission distance

当传输距离增加到 120 km,对 CMA 和 MCMA 均衡性能进行了比较,如图 11 所示。随着传输距离的增加,系统误比特率随之增大,但与 CMA 相比,MCMA 仍能提高系统性能。对于  $10^{-3}$  的误比特率,CMA 需要 18.6 dB,而 MCMA 需要 17.6 dB,即 MCMA 与 CMA 相比有 1.0 dB 的改善。

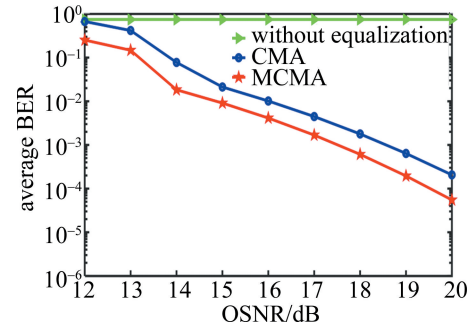


图11 120 km 传输距离下平均误比特率与光信噪比

Fig. 11 Average BER vs. OSNR at 120 km transmission distance

DMGD 的大小会影响模分复用系统的信号传输质量。当选定传输距离为 100 km,比较了 DMGD 长度对性能的影响,如图 12 所示。随着 DMGD 从 130 ps/km 增加到 260 ps/km,系统性能有所下降,但 MCMA 在误比特率方面仍然优于 CMA。这表明在 DMGD 方面,MCMA 比 CMA 有更好的均衡性能。

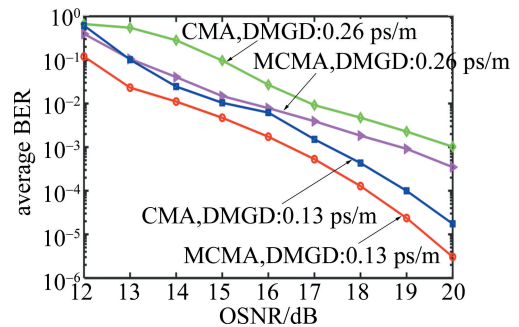


图12 100 km 传输距离下平均误比特率与光信噪比

Fig. 12 Average BER vs. OSNR at 100 km transmission distance

## 4 结 论

利用 VPI 仿真平台建立强耦合 6×6 模分复用系统并传输 DP-QPSK 信号,在接收端应用 CMA 和 MCMA 算法对信号进行均衡,通过增加传输距离和 DMGD,比较了 CMA 和 MCMA 的均衡效果。结果表明,MCMA 的均衡效果优于 CMA,主要体现在收敛曲线、RMSE 和误比特率方面。与 CMA 相比,MCMA 可以得到较小的稳态误差和较小的 RMSE 值。此外,对于  $10^{-3}$  的误比特率,MCMA 与 CMA 相比表现出约 1.0 dB 的改善。研究结果还表明,在长距离模分复用系统中,CMA 是一种有效的对抗强模式耦合的均衡算法,而 MCMA 的均衡效果优于 CMA。

### 参 考 文 献

- [1] CHEN J K, HU G J, HAN Y Y. Communication experimental system with 3×3 mode division multiplexing based on photonic lantern[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(11): 1106009(in Chinese). 陈嘉轲, 胡贵军, 韩悦羽. 基于光子灯笼的 3×3 模分复用通信实验系统[J]. 中国激光, 2017, 44(11): 1106009.
- [2] FANG Y, HU G J, GONG C L, *et al.* Mode demultiplexing based on cascaded independent component analysis for mode division multiplexing system with high mode group delay[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(8): 0806001(in Chinese). 方妍, 胡贵军, 宫彩丽, 等. 高模式群时延模分复用系统的级联独立成分分析解复用技术研究[J]. 中国激光, 2016, 43(8): 0806001.
- [3] TU J J, LI Ch H. Review of space division multiplexing fibers[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(1): 0106003(in Chinese). 涂佳静, 李朝晖. 空分复用光纤研究综述[J]. 光学学报, 2021, 41(1): 0106003.
- [4] LI Ch, 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 Lasers, 2017, 44(2): 0206001(in Chinese). 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.
- [5] YAO Sh Ch, FU S N, ZHANG M M, *et al.* Demodulation and multi-input multi-output equalization for mode division multiplexing system using a novel few-mode fiber[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(14): 261-268(in Chinese). 姚殊畅, 付松年, 张敏明, 等. 基于少模光纤的模分复用系统多输入多输出均衡与解调[J]. 物理学报, 2013, 62(14): 261-268.
- [6] RYF R, RANDEL S, GNAUCK A H, *et al.* Mode-division multiplexing over 96 km of few-mode fiber using coherent 6 × 6 MIMO processing[J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30(4): 521-531.
- [7] HO K P, KAHN J M. Linear propagation effects in mode-division multiplexing systems[J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(4): 614-628.
- [8] BAI N, LI G F. Adaptive frequency-domain equalization for mode-division multiplexed transmission[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(21): 1918-1921.
- [9] VAN U, ROY G H, OKONKWO C M, *et al.* MIMO equalization with adaptive step size for few-mode fiber transmission systems[J]. Optics Express, 2014, 22(1): 119-126.
- [10] CHE X J, LIANG Zh Ch, LIU X M. Receiving characteristics of indoor MIMO visible light communication[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2016, 37(2): 242-249(in Chinese). 车晓杰, 梁忠诚, 刘学明. 室内 MIMO 可见光通信的接收特性[J]. 发光学报, 2016, 37(2): 242-249.
- [11] GODARD D. Self-recovering equalization and carrier tracking in two-dimensional data communication systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 1980, 28(11): 1867-1875.
- [12] CHEN Y, ZHENG W X. Design of H-infinity filters for Markovian jump delayed systems[C]//IEEE 10th International Conference on Signal Processing. New York, USA: IEEE, 2010: 267-270.
- [13] ZHANG L Y, CHEN L, SUN Y Sh. Variable step-size CMA blind equalization based on non-linear function of error signal[C]//WRI International Conference on Communications and Mobile Computing. Los Alamitos, USA: IEEE, 2009: 396-399.
- [14] XUE W, YANG X N, ZHANG Zh Y. A variable step size blind equalization algorithm for QAM signals[C]//2010 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology. Cambridge, USA: IEEE, 2010: 1801-1804.
- [15] QIN J Y, LIU Ch W, HUANG Zh P, *et al.* An improved CMA for dispersion compensation in 100 Gbps DP-QPSK optical signal transmission system[J]. Optik, 2017, 136: 480-486.
- [16] JIN W N, WANG M G. Frequency-domain blind equalization algorithm simulation for mode-division multiplexing system[J]. Electro-Optic Technology Application, 2018, 33(1): 60-65(in Chinese). 靳伟娜, 王目光. 模分复用系统频域盲均衡算法仿真[J]. 光电技术应用, 2018, 33(1): 60-65.
- [17] KIKUCHI K. Performance analyses of polarization demultiplexing based on constant-modulus algorithm in digital coherent optical receivers[J]. Optics Express, 2011, 19(10): 9868-9880.
- [18] DEMIR M A, OZEN A. A novel variable step size adjustment method based on autocorrelation of error signal for the constant modulus blind equalization algorithm[J]. Radioengineering, 2012, 21(1): 37-45.
- [19] TREICHLER J, AGE E B. A new approach to multipath correction of constant modulus signals[J]. IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1983, 31(2): 459-472.
- [20] OH K N, CHIN Y O. Modified constant modulus algorithm; Blind equalization and carrier phase recovery algorithm[C]//Proceedings IEEE International Conference on Communications ICC'95. Seattle, USA: IEEE, 1995: 498-502.
- [21] WANG J B, XIE X X, CAO L L, *et al.* Fractionally spaced equalizer for indoor visible light communication system[J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(1): 24-30. 王俊波, 谢秀秀, 曹玲玲, 等. 室内可见光通信中的分数间隔均衡技术[J]. 光学精密工程, 2012, 20(1): 24-30.