

# 面向模分复用系统的遗传-MIMO均衡参数优化技术

赵天烽, 文峰\*, 冯变霞, 武保剑, 许渤, 邱昆

(电子科技大学信息与通信工程学院光纤传感与通信教育部重点实验室, 四川成都 611731)

**摘要:** 在模分复用系统的数字信号处理单元中, 多输入多输出 (Multi-Input Multi-Output, MIMO) 均衡技术可用于补偿由各类模式相关噪声引起的信号误码率 (Bit Error Rate, BER) 劣化问题。而 MIMO 均衡算法的工作性能严重依赖于步长因子  $\mu$  以及抽头数  $K$ , 因此在固化均衡器之前, 确定 MIMO 均衡算法中  $\mu$ - $K$  参数组合的最优值至关重要。为提高参数优化效率, 提出了一种基于遗传算法 (Genetic Algorithm, GA) 的 MIMO 均衡参数优化方案, 即遗传-MIMO (GA-MIMO), 在保证最小 BER 输出的同时降低参数优化过程所需的计算开销。为验证 GA-MIMO 的工作性能, 构建了基于 10 km 六模光纤的点对点通信实验系统, 使用新方案补偿并行通信的六路数据, 并与最速下降法和迭代算法进行性能比较。实验结果表明, 所提 GA 方案可实现 MIMO 均衡中最高 99.98% 的最优  $\mu$ - $K$  参数命中率, 且 GA-MIMO 算法的全局搜索性使其相比于最速下降法和迭代算法可最多分别节省 86.14% 和 90.3% 的均衡算法调用次数, 有效降低了确定最优  $\mu$ - $K$  参数组合时的计算开销。

**关键词:** 模分复用; 多输入多输出; 遗传算法; 少模光纤; 最小均方误差

**基金项目:** 国家重点研发计划 (No.2018YFB1801001)

**中图分类号:** TN913.7

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0372-2112(2024)05-1601-08

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.12263/DZXB.20230241

## Genetic Algorithm Based MIMO Equalization Parameter Optimization Technology for Mode-Division Multiplexed System

ZHAO Tian-feng, WEN Feng\*, FENG Bian-xia, WU Bao-jian, XU Bo, QIU Kun

(Key Laboratory of Optical Fiber Sensing and Communication Networks, Ministry of Education, University of Electronics Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 611731, China)

**Abstract:** In the digital signal processing unit of the mode-division multiplexed system, the multi-input and multi-output (MIMO) equalization technology is usually used to compensate for the signal bit error rate (BER) degradation disturbed by various mode-dependent noises. The performance of MIMO equalization algorithm depends heavily on the step size factor  $\mu$  and the number of taps  $K$ , so before welding the equalizers, it's important to determine the optimal value of  $\mu$ - $K$  combination in MIMO equalization algorithm. A genetic algorithm (GA) based MIMO equalization parameter optimization scheme, namely GA-MIMO, is proposed to improve the efficiency of the parameter optimization, which is used to reduce the computational costs required during parameter optimization with the minimum BER output. In order to verify the performance of GA-MIMO, a point-to-point communication experimental system based on 10 km six-mode fiber is constructed. The new scheme is used to compensate the parallelly transmitted six-channel data, and the performance is compared with the steepest descent method and iterative algorithm. The experimental results show that the proposed GA scheme achieves the hit rate of the optimal  $\mu$ - $K$  parameters in MIMO equalization up to 99.98%, and the global search function of GA algorithm helps save the number of calls to the equalization algorithm of 86.14% and 90.3% compared with the steepest descent algorithm and iterative algorithm, respectively, effectively reducing the computational cost of locating  $\mu$ - $K$  parameters.

**Key words:** mode-division multiplexing; multi-input and multi-output; genetic algorithm; few-mode fiber; least mean square

**Foundation Item(s):** National Key Research and Development Program of China (No.2018YFB1801001)

## 1 引言

5G、云计算、物联网和大数据等新兴技术的蓬勃发展,使现行的基于标准单模光纤(Standard Single Mode Fiber, SSMF)的通信系统出现日益显著的容量瓶颈<sup>[1,2]</sup>. 在下一代光纤通信网络中,如何对网络容量进行大规模扩容成为了亟待解决的重要问题<sup>[3,4]</sup>. 模分复用(Mode-Division Multiplexed, MDM)技术,利用少模光纤(Few-Mode Fiber, FMF)中正交的空间模式作为新维度,通过空域独立信道实现数据的并行传输,具有突破传统单模光纤通信系统中非线性香农极限的巨大潜力<sup>[5-7]</sup>. 然而,除了固有的传输损耗和色散等噪声外,FMF中还存在诸如模式耦合、差分群时延(Differential Group Delay, DGD)和模式差分损耗(Mode-Dependent Loss, MDL)等模式相关噪声,其使得各空间信道中的信号之间发生能量串扰以及时序错位,限制了MDM系统的传输性能<sup>[8,9]</sup>. 为补偿由模式相关噪声引起的信号质量劣化,通常需要在MDM系统接收端引入多输入多输出(Multi-Input Multi-Output, MIMO)均衡模块<sup>[10,11]</sup>. 而MIMO均衡算法中的两个重要参数(即步长因子 $\mu$ 和抽头数 $K$ )的取值,对算法的训练复杂度及均衡后信号的误码率起着至关重要的作用<sup>[11]</sup>. 因此,快速且准确地定位MIMO均衡算法的最优 $\mu$ - $K$ 参数组合,可有效提升MDM系统的有效性. 此外,当系统的传输环境受到微扰而产生变化时,快速地调整均衡算法中的参数以适配新的传输环境有利于提升MDM系统的可靠性.

目前有关MDM系统中MIMO均衡算法的工作主要围绕减少均衡规模或改进算法模型来展开<sup>[12-15]</sup>. 文献[12]提出了一种Partial MIMO均衡方案,在基于所设计的弱耦合MDM系统中,部署MIMO均衡模块处理模组内耦合,而忽略微弱的模组间耦合,以减少均衡器的计算尺度,降低均衡算法的计算复杂度. 此外,文献[13]采用MIMO Free方案实现了两模复用信号的高速传输,彻底规避了由MIMO均衡所带来的计算成本. 然而,无论是Partial MIMO还是MIMO Free方案的实施都对MDM系统中的少模器件,如模式复用/解复用器、少模光纤和少模放大器等,有着近乎苛刻的性能要求. 因此,目前上述方案只适用于短距MDM传输系统中. 另一方面,为了降低MIMO均衡算法计算复杂度并提高均衡器的稳定性,研究人员提出了变步长均衡算法<sup>[14,15]</sup>. 虽然可以在一定程度上降低均衡器收敛所需的计算复杂度,但使用这些算法时用于确定最优参数值的计算复杂度仍无可避免.

本文为降低在确定MIMO均衡参数时的计算复杂度,提出了基于遗传算法(Genetic Algorithm, GA)的MIMO均衡参数优化方案,即遗传-MIMO(GA-MIMO).

该方案利用GA中优胜劣汰的自然选择规则,实现MIMO均衡算法中 $\mu$ - $K$ 参数组合的快速定位,有利于均衡器对传输环境的变化作出实时响应. 此外,本文还搭建了基于10 km六模光纤的模分复用点对点传输系统,以验证所提方案的性能. 与基于最速下降法(Steepest Descent Algorithm, SDA)的方案进行对比分析后发现,所提方案在进化过程中具有更快的收敛速度和更高的命中概率 $P_{hit}$ ,在5 000次测试中 $P_{hit}$ 最高可达99.98%. GA算法的全局搜索功能有助于提高该方案的效率,且相比于SDA算法和迭代算法,该方案每次命中最优值时所需调用MIMO均衡算法的次数最高可节省86.14%和90.3%. 最后,该方案在25组数据中表现出良好的适配性,本文所提GA-MIMO方案相比于迭代算法降低所有测试数据组的计算开销,且误码率(Bit Error Rate, BER)劣化在 $4.356 \times 10^{-6}$ 以内.

## 2 基于GA的MIMO参数优化方案

在MDM系统中,MIMO均衡模块通常被部署在系统接收端,以补偿传输过程中由各类模式相关噪声引起的信号劣化. 而MIMO均衡模块中的均衡器往往需要经过多次反馈以收敛到稳定的工作状态. 按照是否需要训练数据对均衡器进行预训练,可将反馈算法分为数据辅助型<sup>[16]</sup>和非数据辅助型<sup>[17]</sup>. 而相比于非数据辅助型,数据辅助型算法凭借更小的输出误差和更稳定的收敛过程等优势,往往被应用于具有复杂噪声模型的系统<sup>[18]</sup>. 因此,本文考虑使用数据辅助型算法中典型的频域最小均方(Frequency Domain Least Mean Square, FD-LMS)算法作为均衡器的反馈算法.

在基于FD-LMS的均衡模块中,对数据进行的处理操作主要包括以下几步:

(1)预处理输入数据. 对 $P$ 路输入数据进行二倍重采样后,将每一路数据分为奇、偶两个分支,并对每一分支中的数据按照抽头数 $K$ 的大小分为若干数据块. 分别定义第 $i$ 个端口的第 $n$ 个奇、偶数据块为 $x_{io}(n)$ 和 $x_{ie}(n)$ .

(2)生成频域数据块 $X_{im}(n)$ . 根据50%重叠保留法<sup>[15]</sup>,频域数据块定义为 $X_{im}(n) = \text{FFT}[x_{im}(n-1), x_{im}(n)]$ ,其中, $m$ 表示为奇/偶分支.

(3)生成输出数据块. 根据式(1)生成输出频域块 $Y_i(n)$ ,其中, $W$ 表示均衡器. 因此,由式(1)可知,每个端口对应 $2P$ 个均衡器,系统中共 $2P^2$ 个均衡器.

$$Y_i(n) = \sum_{j=1}^P X_{jc}(n) \cdot W_{jic}(n) + X_{jo}(n) \cdot W_{jio}(n) \quad (1)$$

(4)训练均衡器. 根据步骤(3)中的输出数据,可以计算出与期望数据之间的误差 $e_i(n)$ . 均衡器的更新可

由式(2)表示,其中, $\mu$ 为步长因子; $\Gamma_{im}(n)$ 为基于FD-LMS算法和 $e_i(n)$ 计算得出的反馈项<sup>[11]</sup>.

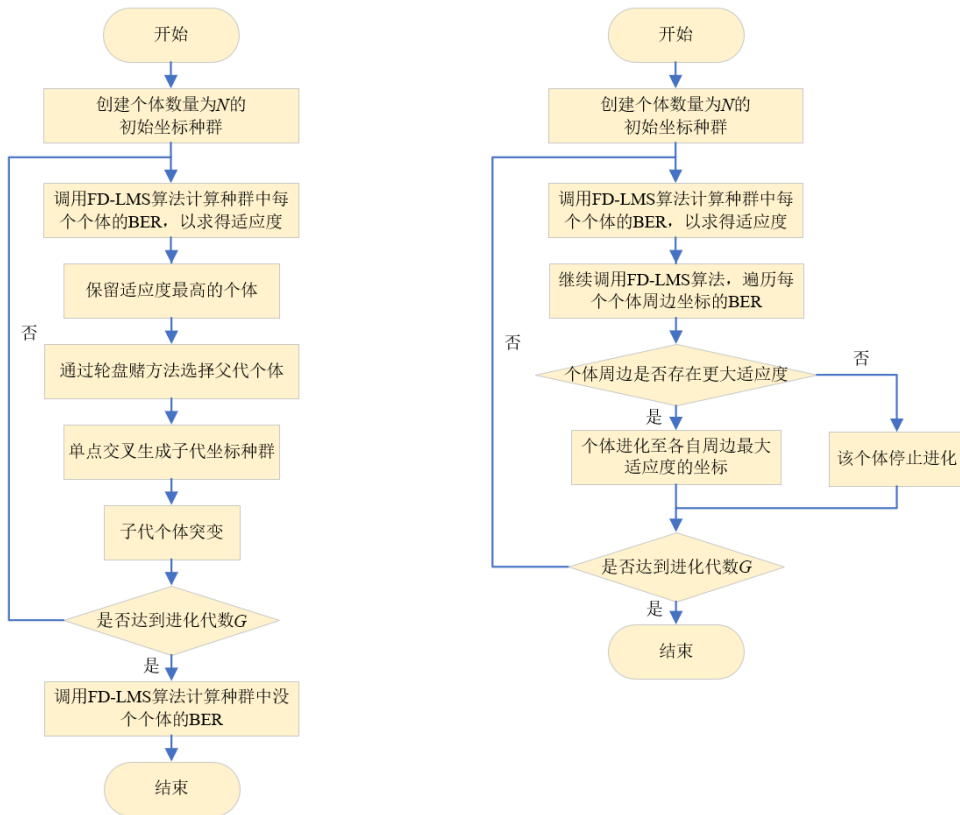
$$W_{ijm}(n+1) = W_{ijm}(n) + \mu \Gamma_{im}(n) \quad (2)$$

综上所述, $\mu$ - $K$ 参数组合的不同取值会直接影响MIMO均衡过程中的每一个步骤,从而产生不同的误码率均衡结果.因此在固化MIMO均衡器之前,确定最小输出BER所对应的参数组合是必要的环节.而在优化参数的过程中,需要大量地调用均衡算法以确定每种参数组合下的BER.为降低该环节中的计算开销,提出了基于GA的MIMO均衡参数优化方案.

图1(a)为所提方案的流程.在方案开始之前,需要粗略地选取 $\mu$ 、 $K$ 的取值范围,从而形成一个二维的参数平面,且该平面中每一个坐标点对应一组参数组合.本文中设定 $\mu$ 的取值范围为 $[1 \times 10^{-6}; 2 \times 10^{-6}; 1 \times 10^{-4}]$ , $K$ 的取值范围为 $[50; 20; 950]$ ,其中 $2 \times 10^{-6}$ 和20为取值步长.由于GA的基本思想是对编码后的种群进行自然选择,因此本文采用二进制格雷码对具有个体数量为 $N$ 的初始种群进行编码.进化开始后,首先调用 $N$ 次FD-LMS算法以求得种群中每个坐标点均衡后的BER,并以此计算每个个体的适应度,本文中定义适应度为BER的倒数,即BER越小所对应的适应度越大.采用精英保留策略,将该代种群中具有最高适应度的个体

遗传给下一代.接着采用轮盘赌方法选择父代个体,并通过单点交叉的方式生成下一代种群,其中交叉概率 $P_c = 0.9$ <sup>[19]</sup>.最后,所生成的子代个体会以 $P_m = 0.05$ 的概率发生突变, $P_m$ 为突变概率.一般情况下, $P_c$ 和 $P_m$ 的存在有利于算法中产生新的个体,以便增加种群的多样性.而当 $P_c$ 或 $P_m$ 的值过大时,适应度高的个体将会易于突变,破坏了算法的稳定性;当 $P_c$ 或 $P_m$ 的值过小时,会阻碍算法的全局搜索,使得算法难以收敛.当达到预设的进化代数要求时,则结束进化流程,解码并计算最后一代个体的BER,其中最小BER所对应的参数组合为该方案的输出.

如上所述,本文中的MIMO均衡参数优化问题可归纳为如何高效地在 $\mu$ - $K$ 平面寻找最小BER的坐标点.因此,选择经典的多元平面最值寻找算法——最速下降法(Steepest Descent Algorithm, SDA)作为比较算法.图1(b)给出了优化MIMO均衡参数时使用SDA的算法流程,以对比分析所提方案的性能.其中心思想为个体在进化过程中向着其周围最低BER的坐标点处移动,而当个体周围坐标的BER均大于其自身时,则停止进化.当进化结束后,输出所有个体中最小BER所对应的坐标.因此,SDA算法中每个个体在进化时需要多次调用FD-LMS算法以确定其周围所有坐标点的BER.此



(a) 基于GA的MIMO参数优化流程

(b) 基于SDA的MIMO参数优化流程

图1 MIMO参数优化方案流程

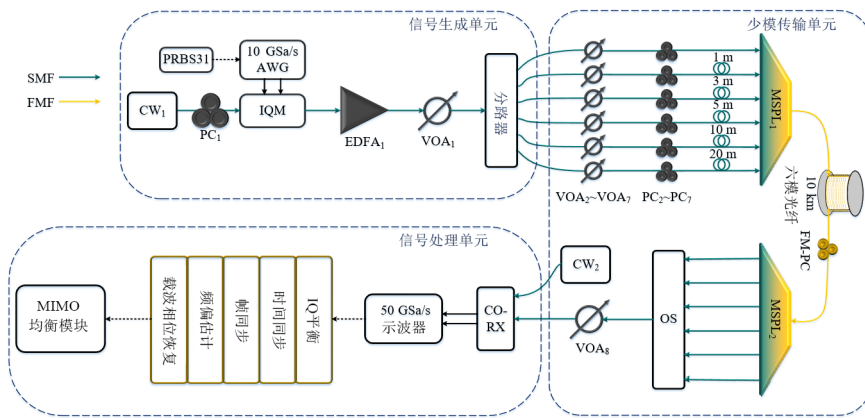
外,由于SDA算法不具有全局搜索功能,所有个体是独立进化的,使得该算法易陷入局部最优解.除SDA算法外,还考虑了迭代算法作为所提的方案的对比较法,其主要思想为调用FD-LMS算法遍历 $\mu$ - $K$ 平面上的所有坐标点,并输出最小BER所对应的参数组合.因此,该方案的优点为可以100%保证最优参数的输出.

综上所述,在应用不同算法的MIMO均衡参数优化方案中,可靠性和有效性是衡量方案性能的重要指标.由于算法中具有随机性,可以以命中最优均衡参数的概率来体现方案一个方面的可靠性.此外,由于实验传输环境受到微扰因素的影响具有时变性,还可以将优化方案应用于多组测试数据,以输出结果的稳定程度来体现方案另一方面的可靠性.而对于方案的有效性,可分析其在保证最优参数输出的情况下,所需调用均衡算法的次数,所需调用次数越少,有效性越高,反之亦然.本文的第4节将对所提GA-MIMO方案的有效性

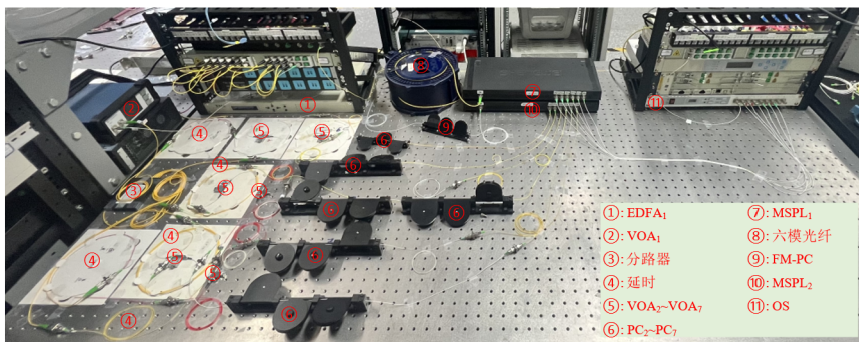
和可靠性进行分析.

### 3 六模复用传输系统

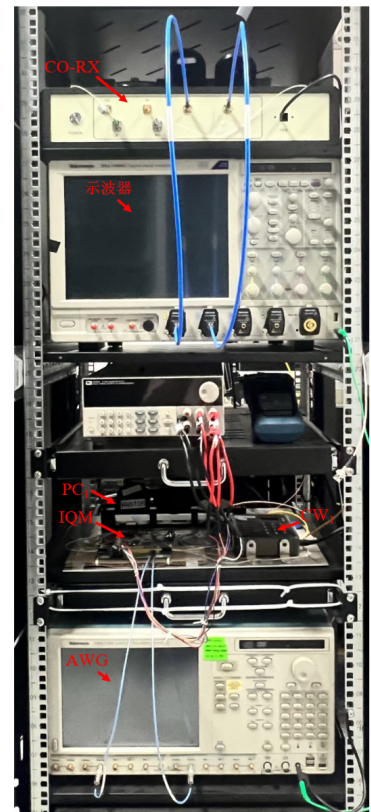
图2(a)为所搭建的六模点对点传输系统实验结构示意图,其按照功能可分为三个子单元:信号生成单元、少模传输单元和信号处理单元.在信号生成单元中,波长连续激光器(Continuous Wavelength,  $CW_1$ ),生成的1550.3 nm的连续光和采样速率为10 GSa/s的任意波形发生器(Arbitrary Waveform Generator, AWG)生成的电信号分别注入IQ调制器(IQ Modulator, IQM)的光输入端口和电输入端口,并由IQM调制生成10 Gb/s的QPSK光信号.所生成的光信号经过掺铒光纤放大器(Erbium-Doped Fiber Amplifier,  $EDFA_1$ )的预放大和可调光衰减器(Variable Optical Attenuator,  $VOA_1$ )的功率控制后注入1×6的分路器中,将其分为六路功率基本相同的光信号.



(a) 示意图



(c) 传输装置实物图



(b) 收发机实物图

图2 六模复用点对点传输实验

在少模传输单元中,六路光信号经过各自的VOA、偏振控制器(Polarization Controller, PC)和光延迟后注入模式选择光子灯笼(Mode-Selective Photonics Lantern,  $MSPL_1$ )的六个单模端口,且输入光功率均为8 dBm,并被转换成模式分别为 $LP_{01}$ 、 $LP_{11a}$ 、 $LP_{11b}$ 、 $LP_{21a}$ 、

$LP_{21b}$ 和 $LP_{02}$ 的光信号.系统中所采用的10 km六模光纤为长飞公司制造的渐变型光纤<sup>[20]</sup>,在经过其传输后,少模光信号由 $MSPL_2$ ,再次转变为六路并行的单模光信号,并依次经过光开关(Optical Switch, OS)发送给信号处理单元.值得注意的是,在少模传输单元中,由于少

模器件对光信号具有偏振相关性,因此使用单模偏振控制器PC<sub>2</sub>~PC<sub>7</sub>和少模偏振控制器(Few-Mode Polarization Controller, FM-PC)来联合调节传输过程中的模式耦合强度.

在信号处理单元中,相干接收机(COherent Receiver, CO-RX)将探测到的光信号转换为电信号后交由采样率为50 GSa/s的实时示波器采集数据.最后,所采集的数据再经过数字信号处理(Digital Signal Processing)算法(IQ平衡、时间同步、帧同步、频率载波估计和载波相位恢复)处理后,由基于FD-LMS算法的MIMO均衡模块来补偿模式相关噪声引起的信号质量劣化.

在实验系统中,实验装置可分为放置在机架上的收发机和放置在光学平台上的传输装置,分别如图2(b)和(c)所示.其中图2(b)所示的收发机部分主要负责信号的产生与接收,而图2(c)所示的传输装置主要负责信号的分路、功率控制和传输.

#### 4 性能分析

为验证所提基于GA的MIMO参数优化方案的性能,采用SDA算法和迭代算法作为对照,并分别利用其对第3节所搭建的六模复用传输系统中的MIMO均衡参数进行优化.此外,为了从多个角度来验证所提方案的性能,测试了三种算法在具有不同参数时的多种输出指标,分析结果如图3所示.

图3(a)和(b)表示两算法在不同条件下测试次数 $T_{\text{test}}=5000$ 时命中最优 $\mu$ - $K$ 参数组合的次数 $T_{\text{hit}}$ 变化情况.其中图3(a)为GA算法和SDA算法在不同个体数量 $N$ 时,命中次数与进化代数 $G$ 的关系,图3(b)为两算法在不同的 $G$ 下,命中次数与 $N$ 的关系.由图3可知,当 $N$ 或 $G$ 之一比较小时,由于种群中的个体无法进行充分有效的进化,无论是GA算法还是SDA算法的稳定性均不强,命中最优坐标点的次数 $T_{\text{hit}}$ 较低,及命中率 $P_{\text{hit}}=T_{\text{hit}}/T_{\text{test}}$ 较低.由图3(a)中 $G<25$ 和图3(b)中 $N<10$ 的部分可知,GA算法的曲线斜率要大于SDA算法,说明当 $N$ 或 $G$ 开始增加时,虽然两算法的稳定性都随之增强,但GA算法明显提升得更快.且在图3(a)中,当 $G=22$ 时, $N=10$ 的GA算法的命中率开始高于 $N=20$ 的SDA算法,而当 $G=30$ 时,其命中率又开始高于 $N=30$ 的SDA算法.在图3(a)的右半部分,两算法基本已经收敛,且 $N>20$ 的GA方法可实现最高99.98%的命中率,而SDA算法最高命中率为88.18%.在图3(b)中,GA算法依旧实现了最高99.98%的命中率,而此时SDA算法的最高命中率为87.12%.

由上述分析可知,在应用MIMO参数优化方案的过程中,存在没有命中最优值的情况.为了衡量方案的复

杂性,定义 $C_{\text{LMS}}$ 为平均每次命中最优值时所需调用FD-LMS算法的次数,其计算公式如式(3)所示,其中, $T_{\text{test}}$ 为测试次数5000; $C_{\text{mean}}$ 为在 $T_{\text{test}}$ 次测试中,调用FD-LMS算法的平均次数.由式(3)可知,当 $C_{\text{mean}}$ 固定时, $P_{\text{hit}}$ 越大,则 $C_{\text{LMS}}$ 越小,即算法复杂度越低.

$$C_{\text{LMS}} = \frac{C_{\text{mean}}}{P_{\text{hit}}} = C_{\text{mean}} \times \frac{T_{\text{test}}}{T_{\text{hit}}} \quad (3)$$

图3(c)和(d)分别为GA算法和SDA算法调用FD-LMS的次数随 $G$ 和 $N$ 的变化关系.由图3(c)中可以看出GA算法在 $G$ 开始增加后,其所需调用FD-LMS算法的次数 $C_{\text{LMS}}$ 骤降后趋于平稳.结合图3(a)可知,其骤降的原因为前期的 $T_{\text{hit}}$ 曲线斜率较大,即命中概率 $P_{\text{hit}}$ 的提升较快.而当 $P_{\text{hit}}$ 平稳后, $C_{\text{LMS}}$ 的值也随之平稳.而对于SDA算法,由于其非常容易掉进局部最优陷阱,一旦陷入局部最优点后,相应的个体会停止进化,不再产生额外的调用次数,因此该算法的 $C_{\text{mean}}$ 和 $T_{\text{hit}}$ 随 $G$ 的变化规律大致相同,导致其 $C_{\text{LMS}}$ 变化不明显.此外,由图3(c)中的数据计算得出, $N=10, 20$ 和 $30$ 的GA算法分别较其对应的SDA算法降低了77.05%、55.28%和38.58%的 $C_{\text{LMS}}$ .若使用迭代算法来确定最优参数组合,则需要遍历 $\mu$ - $K$ 平面中的所有坐标点.而由第3节可知,预设的 $\mu$ - $K$ 平面共2400个坐标点,即 $C_{\text{LMS}}=2400$ .因此,相比于迭代算法,图3(c)中的GA算法最少所需的 $C_{\text{LMS}}=383.5$ ,即最多可降低84.02%的调用次数.在图3(d)中,GA算法所对应的 $C_{\text{LMS}}$ 随 $N$ 的增加呈现先降后升的趋势,是由于当 $N$ 较小时,个体数量的增加会有效地提升算法的全局搜索能力,从而增加 $P_{\text{hit}}$ ,而当其全局搜索能力达到上限后,继续增加的个体数量会带来 $C_{\text{LMS}}$ 的冗余.而对于不具备全局搜索能力的SDA算法来说,通过增加个体数量来增加 $C_{\text{mean}}$ 的同时并不能有效提升 $P_{\text{hit}}$ ,因此会出现 $C_{\text{LMS}}$ 结果正比于 $N$ 的情况.此外,相比于所对应的SDA算法结果中所需的最少 $C_{\text{LMS}}$ , $G=10, G=25$ 和 $G=40$ 的GA算法分别可以节省26.18%、77.92%和86.14%的 $C_{\text{LMS}}$ ,而相比于迭代算法,GA算法最高可节省90.3%的 $C_{\text{LMS}}$ .值得注意的是,当系统的工作条件(例如,传输距离和调制格式等)发生变化时,虽然FD-LMS算法中BER与 $\mu$ - $K$ 组合之间的分布关系会随之改变,但并不会影响 $G$ 和 $N$ 对GA算法全局搜索性能的影响,因此GA-MIMO方案中上述 $T_{\text{hit}}$ 和 $C_{\text{LMS}}$ 随 $N$ 和 $G$ 之间的趋势不会被改变.

图3(e)和(f)分别给出了GA和SDA两算法在5000次测试中的平均BER输出随进化代数和个体数量的变化情况.由图3(e)可以看出,一方面,GA算法的平均输出BER的收敛速度要快于SDA算法.另一方面,经过充分进化后,GA算法的输出BER可以逼近最小值 $\text{BER}_{\text{min}}=2.178 \times 10^{-2}$ ,满足 $2.4 \times 10^{-2}$ 的20%前向纠错

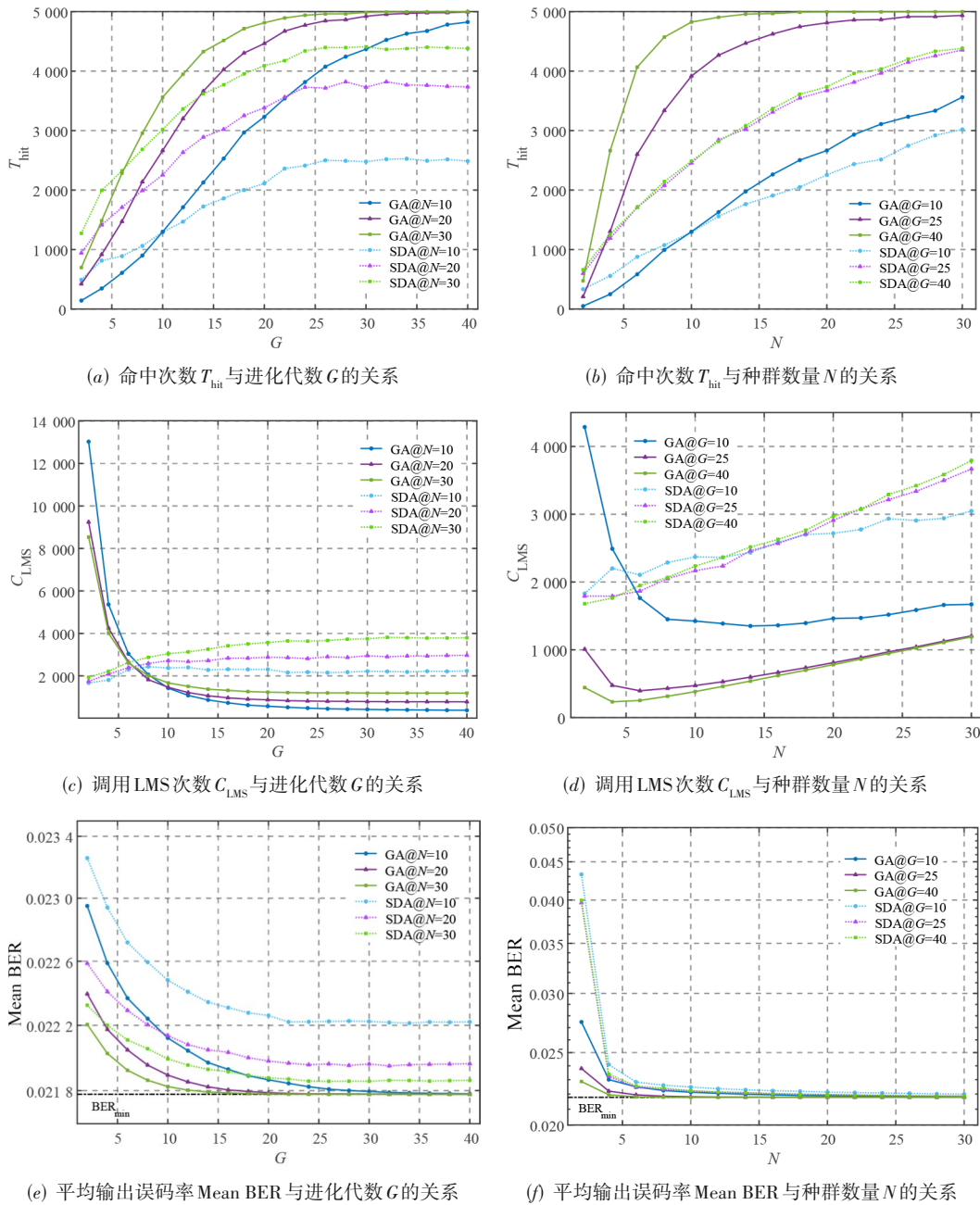


图3 各MIMO参数优化方案下的性能

码(Forward Error Correction, FEC)门限,而SDA算法收敛后的输出BER则与 $BER_{min}$ 之间有明显的差距.而结合图3(b)和(f)分析可知,当 $N$ 较小时,虽然两算法的命中次数基本一致,但GA算法所输出的平均BER远低于SDA算法,说明GA算法收敛所需的进化成本(进化代数 $G$ 和个体数量 $N$ )也要低于SDA算法.

图4给出了GA算法和SDA算法在进化前后个体在 $\mu$ - $K$ 平面的分布情况,以对比观察GA算法的全局搜索能力.在开始时,两算法均随机生成种群位置,如图4(a)所示,其中红色圆形表示基于GA算法的个体,

绿色矩形表示基于SDA算法的个体.两算法在初始时无论在BER较大抑或是BER较小的地方均有分布.如图4(b)所示,为经过 $G=40$ 次进化后,两算法个体的分布情况,其中黄色三角形表示两算法同时有个体位于该坐标点下.由图可知在经过充分进化后,GA算法中几乎所有的个体都处于 $\mu$ - $K$ 平面中BER较低的右下角,而基于SDA算法进化的个体由于无法跳出局部最优,因此有些个体被困在坐标系的左上角,无法充分发挥出个体数量的优势来确定最优的均衡参数.此外,由于GA算法具有突变属性,使得个别个体处于坐标系

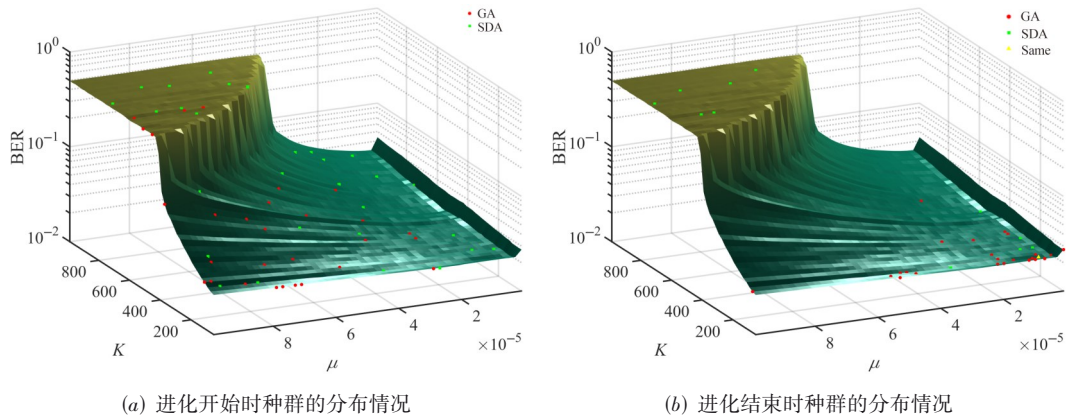
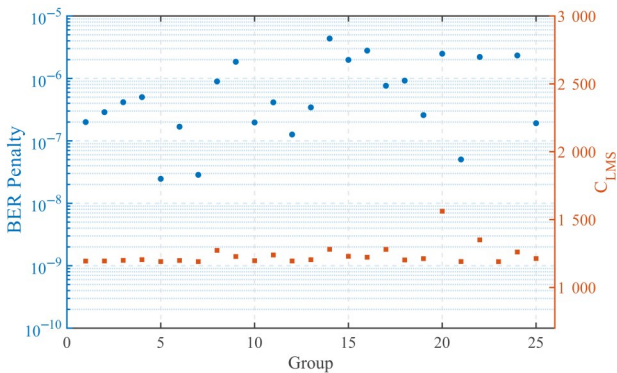


图4 GA算法和SDA算法中的种群在不同进化时刻的分布情况

的其他位置,以实现全局搜索的功能。

最后,为分析所提方案的适配性,对25组数据进行测试,其中每组数据均以 $N=30, G=40$ 的GA算法测试了5 000次,并在图5中给出了该方案下每组数据的BER劣化(即平均BER输出与最小BER之间的差值)和每次命中最优参数时所需调用FD-LMS算法的次数。由图5可知,在多组数据的测试结果中,由GA算法所引起BER劣化微乎其微,且第14组数据所对应的最大BER劣化仅为 $4.356 \times 10^{-6}$ 。此外,GA算法在多组数据中始终可以保持良好的稳定性,每组数据对应的 $C_{LMS}$ 基本一致,且最大的 $C_{LMS}$ 为第20组数据的1 562次,相较于迭代算法节省34.92%。

图5 25组测试数据下GA算法产生的误码率劣化BER Penalty和每次命中最优参数值时所需调用FD-LMS算法的次数 $C_{LMS}$ 

## 5 结论

本文提出了一种基于GA的模分复用系统MIMO均衡参数优化方案,以降低在确定最优MIMO均衡参数时的计算复杂度,并在所搭建的基于10 km六模光纤模分复用系统中验证其性能。首先,在与SDA算法对比后发现,GA算法在进化过程中具有更快的收敛速度,且最高命中率 $P_{hit}$ 可达到99.98%。其次,GA算法的全局搜索能力使该方案有效降低所需的 $C_{LMS}$ ,较SDA算法和迭

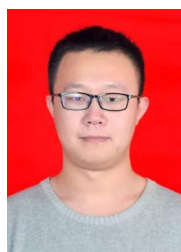
代算法最多分别减少86.14%和90.3%。最后,该方案还展现了良好的适配性,在25组独立测试的数据中,最大的BER劣化仅为 $4.356 \times 10^{-6}$ ,且相比于迭代算法最少节省34.92%的 $C_{LMS}$ 。

## 参考文献

- [1] RANAWEERA C, WONG E, NIRMALATHAS A, et al. 5G C-RAN with optical fronthaul: An analysis from a deployment perspective[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(11): 2059-2068.
- [2] KARMAKAR K K, VARADHARAJAN V, NEPAL S, et al. SDN-enabled secure IoT architecture[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(8): 6549-6564.
- [3] ZHOU Y R, KEENS J, WAKIM W. High capacity innovations enabling scalable optical transmission networks[J]. Journal of Lightwave Technology, 2023, 41(3): 957-967.
- [4] 刘焕淋, 胡俊岭, 任杰, 等. 基于光路负载均衡和邻域匹配的串扰感知资源分配方法[J]. 电子学报, 2022, 50(11): 2746-2753.  
LIU H L, HU J L, REN J, et al. Crosstalk aware resource allocation method based on lightpath load balancing and neighborhood matching[J]. Acta Electronica Sinica, 2022, 50(11): 2746-2753. (in Chinese)
- [5] PUTNAM B J, RADEMACHER G, LUÍS R S. Space-division multiplexing for optical fiber communications[J]. Optica, 2021, 8(9): 1186.
- [6] DU J B, SHEN W H, LIU J C, et al. Mode division multiplexing: From photonic integration to optical fiber transmission[J]. Chinese Optics Letters, 2021, 19(9): 091301.
- [7] RICHARDSON D J, FINI J M, NELSON L E. Space-division multiplexing in optical fibres[J]. Nature Photonics, 2013, 7(5): 354-362.
- [8] ZHAO T F, WEN F, WU B J, et al. Mode-coupling in-

- duced crosstalk optimization in a graded-index six-mode fiber[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2022, 14(4): 1-8.
- [9] FERREIRA F M, COSTA C S, SYGLETOS S, et al. Semi-analytical modelling of linear mode coupling in few-mode fibers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(18): 4011-4022.
- [10] SHIBAHARA K, MIZUNO T, LEE D, et al. Advanced MIMO signal processing techniques enabling long-haul dense SDM transmissions[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(2): 336-348.
- [11] WANG F B, XU J, XU B. MIMO equalization for few-mode fiber transmission systems[C]//2019 18th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOCN). Piscataway: IEEE, 2019: 1-3.
- [12] BEPPU S, SOMA D, SUMITA S, et al. 402.7-Tb/s MDM-WDM transmission over weakly coupled 10-mode fiber using rate-adaptive PS-16QAM signals[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(10): 2835-2841.
- [13] 唐胜龙, 武保剑, 严伟, 等. 光子灯笼模分复用系统 MIMO-free 高速传输实验[J]. *光子学报*, 2023, 52(1): 87-95.
- TANG S L, WU B J, YAN W, et al. High speed MIMO-free transmission experiment of mode division multiplexing system with photonic lanterns[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2023, 52(1): 87-95. (in Chinese)
- [14] HE X, WENG Y, PAN Z Q. A step-size controlled method for fast convergent adaptive FD-LMS algorithm in few-mode fiber communication systems[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(22): 4422-4428.
- [15] HU G J, HUANG C B. A variable step-size unconstrained adaptive FD-LMS algorithm for MDM transmission[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10(2): 1-12.
- [16] SLEIFFER V A J M, JUNG Y, VELJANOVSKI V, et al. 737 Tb/s ( $96 \times 3 \times 256$ -Gb/s) mode-division-multiplexed DP-16QAM transmission with inline MM-EDFA[J]. *Optics Express*, 2012, 20(26): B428.
- [17] PITTALÀ F, HAUSKE F N, YE Y B, et al. Data-aided frequency-domain  $2 \times 2$  MIMO equalizer for 112 gbit/s PDM-QPSK coherent transmission systems[C]//Optical Fiber Communication Conference. Washington: OSA, 2012: OM2H.4.
- [18] KUSCHNEROV M, CHOUAYAKH M, PIYAWANNO K, et al. Data-aided versus blind single-carrier coherent receivers[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2010, 2(3): 387-403.
- [19] 王文笙, 宁提纲, 裴丽, 等. 基于遗传算法的少模光纤放大器增益均衡[J]. *光学学报*, 2021, 41(9): 27-34.
- WANG W S, NING T G, PEI L, et al. Gain equalization of few-mode fiber amplifier based on genetic algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(9): 27-34. (in Chinese)
- [20] 长飞光纤公司产品中心. 少模光纤产品详情[EB/OL]. (2022-11-11)[2023-10-15]. <https://en.yofc.com/view/2351.html>.

#### 作者简介



**赵天烽** 男, 1996 年出生. 现为电子科技大学信息与通信工程学院博士研究生. 主要研究方向为空分复用传输系统的优化与性能监控.

E-mail: m18242105581@163.com

**文峰** 男, 1982 年出生. 现为电子科技大学信息与通信工程学院副教授. 主要研究方向为空分复用系统信号处理及光再生技术与应用.

E-mail: fengwen@uestc.edu.cn

**冯变霞** 女, 2000 年出生. 现为电子科技大学信息与通信工程学院硕士研究生. 主要研究方向为空分复用传输系统的优化.

E-mail: 202222011238@std.uestc.edu.cn