

激光与光电子学进展

少模光纤强耦合通信系统信号恢复技术综述

龙健宇, 张冰, 杨雄伟, 余建军*

复旦大学通信科学与工程系电磁波信息科学教育部重点实验室, 上海 200433

摘要 采用少模光纤强耦合模分复用技术是大容量光纤通信系统的一种主要方案,而数字信号处理能在数字域补偿信道中带来的损伤,为信号恢复提供了灵活性并进一步提升传输容量。介绍了少模光纤强耦合通信系统中相比单模光纤系统所受到的额外损伤,并介绍了补偿损伤所使用的多输入多输出(MIMO)均衡算法、空时编码(STC)算法、干扰消除算法和最大似然估计算法的工作原理和主要研究进展,同时阐述了当前这些算法在复杂度、传输时延、光传输速率等方面仍存在局限性。结果表明,MIMO均衡算法结合STC有明显优势,在未来大容量长距离少模光纤强耦合通信系统中具有重要的应用意义。

关键词 光通信; 模分复用; 强耦合; 少模光纤; 多输入多输出均衡器; 空时编码; 干扰消除

中图分类号 TN913

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP222826

Survey of Signal Recovery Technique in Few-Mode Fiber Communication System with Strong Mode Coupling

Long Jianyu, Zhang Bing, Yang Xiongwei, Yu Jianjun*

Key Laboratory of EMW Information, Department of Communication Science and Engineering,
Fudan University, Shanghai 200433, China

Abstract The use of few-mode optical fiber strong coupling mode division multiplexing technology is a major solution for large-capacity optical fiber communication systems, and digital signal processing can compensate for channel damage in the digital domain, providing flexibility for signal recovery and further improving transmission capacity. In this paper, the impairments which occur in the few-mode fiber system with strong mode coupling but not in single-mode fiber system are introduced. The recovery techniques for those impairments like multiple input multiple output (MIMO) equalizer, space-time coding (STC), interference cancellation, and maximum likelihood estimation as well as their principles and research results are also introduced. The shortcomings of those algorithms in terms of complexity, delay, and transmission rate are also discussed. The results show that MIMO equalization algorithm combined with STC has obvious advantages. It has important application significance in the high-capacity long-distance few-mode fiber communication system with strong mode coupling in the future.

Key words optical communications; mode division multiplexing; strong mode coupling; few-mode fiber; multiple input multiple output equalizer; space-time code; interference cancellation

1 引言

互联网技术日益发展伴随着互联网流量的急剧增长,这对承担大部分互联网流量传输的光纤通信系统的传输容量和距离提出了进一步的要求。尽管目前被广泛使用的单模光纤搭载上更高阶的调制符号、星座整形以及更高的谱效率方法,容量达到 200 Tb/s 的

级,但因器件带宽、光纤传输损伤等的限制,单模光纤的容量已经逼近香农极限^[1-2],在不久的将来难以进一步适应互联网流量的持续增长。

为了能够进一步增加光纤的容量,研究者提出了能够直接增加空间信道数的模分复用(MDM)技术^[3]。少模光纤强耦合通信系统采用MDM技术,能够允许多个线偏振(LP)模式同时在少模光纤中相对独立地

收稿日期: 2022-10-19; 修回日期: 2022-12-08; 录用日期: 2022-12-12; 网络首发日期: 2022-12-22

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB1800905)、国家自然科学基金(62127802)

通信作者: *jianjun@fudan.edu.cn

传输,从而达到增加光纤容量的目的^[4]。然而,相较于单模光纤,少模光纤多种模式的同时传输不可避免地引入了模间损伤和干扰^[5],例如当不同的 LP 模式同时传输时彼此之间会发生的模式耦合^[6-10]、不同 LP 模式因传输速度的差异而导致的差分模式时延(DMD)^[3,6,8,11-12]和链路中器件等对不同模式的功率衰减不同而产生的模式相关损耗(MDL)^[13-16]等线性损伤,以及模式间的非线性损伤^[17-20]等,这些损伤都极大地限制了少模光纤强耦合系统的传输容量和传输距离的提升。

为了能够减轻或补偿少模光纤强耦合系统的损伤,从而提升系统容量和传输距离,目前常用先进器件和算法两个方面的解决方案。有关器件层面的解决方案,例如设计新的放大器减小 MDL^[21]、使用扰模器增大模式耦合^[22-23]等。与此同时,另一个关键技术是先进的数字信号处理(DSP)算法,例如在少模光纤强耦合下使用多输入多输出(MIMO)均衡器^[24-26]以补偿 DMD,采用空时编码(STC)^[27-28]、干扰消除(IC)算法^[29-31]以及最大似然估计(ML)^[16,32]等方法补偿 MDL 等。

然而,目前先进的 DSP 算法依旧存在诸多局限性。用于解模式耦合和补偿 DMD 的 MIMO 均衡器的复杂度和均衡器抽头数量直接相关,而所需抽头数与信道记忆时间相关;而补偿 MDL 的 STC 需要额外的编码译码器,且增加了数据的冗余进而降低传输速率;IC 算法用于 MDL 补偿时尽管复杂度较低但性能不佳,可靠性较差;ML 算法在补偿 MDL 时复杂度较高。因此,针对于少模光纤强耦合通信系统信号损伤的 DSP 算法有待进一步改进提升。

本文首先介绍限制少模光纤强耦合通信系统容量

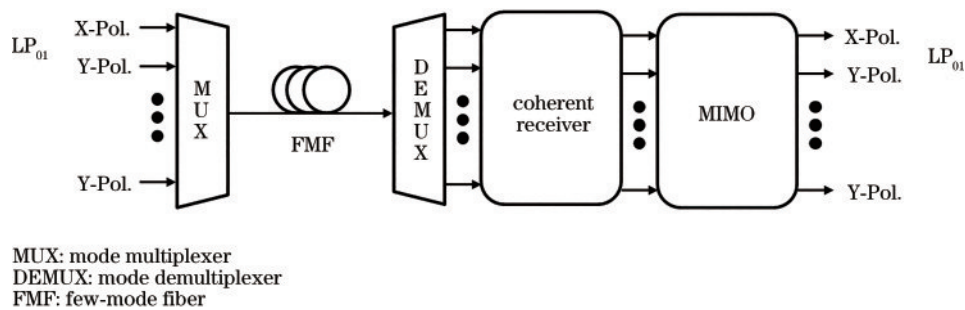


图1 典型的少模光纤强耦合通信系统基本框架

Fig. 1 Schematic of a typical few-mode fiber communication system with strong mode coupling

2.2 损伤类型

2.2.1 模式耦合

在理想的少模光纤中,传输的多个模式之间会具备正交性,也即光功率的耦合不会在模式之间发生,各个模式能够互不干扰地在光纤中独立传输,图 2(a)是理想的光纤中以传输 LP₀₁ 模和 LP₁₁ 模为例的示意图。但在实际中,由于光纤制备误差以及物理弯折等因素,各个模式的正交性通常只能在远小于光

和距离的因素,建立了少模光纤分段化损伤的理论模型,并针对模式耦合、DMD 和 MDL 这些损伤研究了关键 DSP 算法,包括 MIMO 均衡器、STC、IC 和 ML 算法,并对几种算法进行比较,综合讨论几种算法在模式复用数目、单个模式传输速率、光纤传输距离、传输容量等系统性能、系统开销、DSP 复杂度等方面的优缺点,得出了 MIMO 均衡器结合 STC 是补偿当前少模光纤强耦合传输系统损伤较为可靠的 DSP 解决方案的结论,可以为未来的大容量、长距离少模光纤多模式复用的 MDM 传输系统提供发展方向。

2 少模光纤强耦合模分复用传输系统的研究进展

2.1 基本原理

基于强耦合少模光纤的模分复用技术支持多个 LP 模式在单根纤芯中同时传输。理论上,每个 LP 模式可以获得单根单模光纤相当的性能,进而使得单根光纤传输容量倍增^[4]。由于 DMD 在少模光纤通信系统中的补偿相较于其他损伤占用的资源更多、复杂度更高,且补偿 DMD 的复杂度随着 DMD 的累积增大^[7,25,33-34],因此研究者们考虑使用例如扰模器结合循环模式置换(CMP)^[35]等办法实现模式强耦合,增大各个 LP 模式间的模式耦合,尽可能降低 DMD,此后配合接收端的大规模 MIMO 均衡器实现对各个模式信号的可恢复接收,取得了很好的效果^[24,36],图 1 展示了典型的少模光纤强耦合通信系统基本框架。然而限制少模光纤强耦合通信系统传输容量和距离的因素不仅包含 DMD,还有模式耦合、MDL 等,需要进一步讨论它们以及它们的解决方案。

纤铺设长度的距离内保持,这种损伤称为模式耦合,因此模式耦合的发生是不可避免的^[6,37]。模式耦合的发生会带来各个模式之间信号的串扰,导致信号质量急剧下降。以 LP₀₁ 模和 LP₁₁ 模为例,将弯折和误差等带来的轴向折射率的变化沿光纤方向的 z 轴进行傅里叶展开^[3]有

$$\Delta\epsilon(x, y, z) = \int \epsilon_0 \Delta\epsilon_r(x, y, K) \cos(Kz) dK, \quad (1)$$

式中： $\Delta\epsilon_r(x, y, K)$ 是光纤轴向折射率的扰动的频谱分量。这两个模式之间的耦合系数为

$$C_{LP_{01} \leftrightarrow LP_{11}} = \frac{(\omega/c)^2}{\beta} \iint \Delta\epsilon_r(x, y, \beta_{01} - \beta_{11}) \Psi_{01}(x, y) \Psi_{11}^*(x, y) dx dy, \quad (2)$$

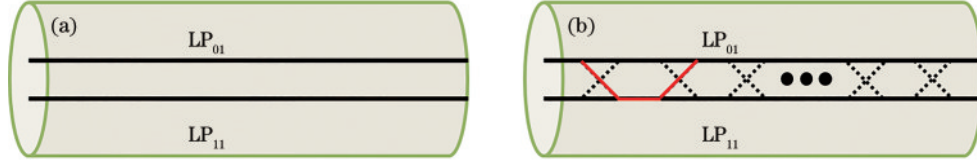


图 2 双模光纤传输 LP_{01} 模和 LP_{11} 模的示意图, 两条平行线分别代表两个模式。(a) 理想的双模光纤内传输两个正交的模式; (b) 实际的光纤中存在模式耦合干扰

Fig. 2 Schematic of a two-mode fiber transmitting LP_{01} and LP_{11} modes, two parallel lines represent two modes. (a) Ideal two-mode fiber transmitting two orthogonal modes; (b) a real fiber that has distributed crosstalk

2.2.2 差分模式时延

除了模式耦合, 少模光纤系统传输的光信号同样面临色散的问题。少模光纤的色散不仅仅包含各个模式的色度色散和偏振模式色散, 还包括模式间色散。模式间色散是由于光纤中传输的各模式传输速度不同而产生的信号展宽现象, 和传输最快与最慢的两个模式通过单位长度光纤的最大时延差有关。随着光纤传输模式和传输距离的增加, 模式间色散导致的信号衰落会变得更为严重。对于长距离模分复用系统而言, 随着传输长度的增加, 模间色散所累积的信号展宽将超过色度色散的影响, 且从色散大小来说, 模式间色散在少模光纤的色散效应中起主导作用。

模式间色散可以由 DMD 来定量地表征, 定义为两模式之间通过同样距离的群延迟比之差, 以 LP_{mp} 模和 LP_{01} 模为例, 其 DMD^[11] 表示为

$$\tau_{DMD} = \tau_{LP_{mp}} - \tau_{LP_{01}} = (n_{g,LP_{mp}} - n_{g,LP_{01}})L/c, \quad (3)$$

式中： $\tau_{LP_{mp}}$ 是 LP_{mp} 模传输的群延时； $n_{g,LP_{mp}}$ 是 LP_{mp} 模的群折射率； L 是光纤总长度； c 是光速。DMD 产生的原因是各个不同模式在光纤中的群折射率不同。在不同的群折射率下, 发送的各个模式的信号经过相同长度的光纤传输, 在到达接收端时所需要的时间各不相同, 即不同模式因为对应群折射率不同而传输速度不同, 存在不同时延差。并且当两个模式之间的群折射率之差较小时, DMD 也随之减小, 光纤的模式耦合强度大^[39]。图 3 是在少模光纤内以传输 LP_{01} 模、 LP_{11a} 模和 LP_{11b} 模三个模式为例的 DMD 示意图。

解决 DMD 最直接的办法是使用 DMD 补偿光纤^[40], 其本质是交替连接 DMD 相反的小段光纤, 使得 DMD 前后抵消。增强模式耦合也是降低 DMD 的一种方式^[4,41]。尽管模式耦合会带来各模式间的串扰, 但当模式彼此间强耦合时, 每一路独立信号在传播常数不同的模式中传输的概率是相等的, 从而理论上能让每一路的信号都可以有几乎相等的延迟^[3]。强耦合和弱耦合是

式中： β_{01} 和 β_{11} 分别是 LP_{01} 模和 LP_{11} 模的传播常数； $\Delta\epsilon_r(x, y, \beta_{01} - \beta_{11})$ 决定了两者的耦合系数大小。当这两个模式的传播常数相差小时, 模式耦合大; 当这两个模式的传播常数相差大时, 模式耦合小^[38]。图 2(b) 是实际的双模光纤中 LP_{01} 模和 LP_{11} 模受模式耦合的传输示意图。

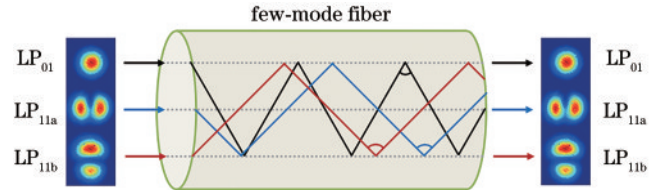


图 3 少模光纤传输三个模式 (LP_{01} 模、 LP_{11a} 模和 LP_{11b} 模) 时的差分模式时延示意图

Fig. 3 Schematic of DMD in a few-mode fiber transmitting three modes (LP_{01} , LP_{11a} , and LP_{11b})

在 MDM 系统中两种对模式耦合与 DMD 处理方式不同的方法: 强耦合通过利用强模式耦合尽可能减小 DMD, 结合 MIMO 补偿模式耦合和 DMD 影响; 弱耦合则尽可能减小模式耦合的干扰, 并设法补偿 DMD。

2.2.3 模式相关损耗

在实际的少模光纤强耦合 MDM 通信系统中, 除了 DMD 和模式强耦合带来的损耗之外, 还存在着一类器件损伤, 即 MDL^[14]。MDL 的产生原因是少模光纤传输链路中的各种器件对不同的传输模式表现出不同的功率衰减, 例如模式复用器、模式解复用器和掺铒光纤放大器等均会产生 MDL。MDL 不仅表现为对不同模式的功率衰减不同, 还会随着光纤传输的距离增加从而累积, 对系统的性能产生严重恶化。

假设整个系统的频率域传输矩阵为 $\mathbf{H}_f(\omega)$, 对 $\mathbf{H}_f(\omega)$ 进行奇异值分解得到

$$\mathbf{H}_f(\omega) = \mathbf{V}_f \mathbf{\Lambda}_f \mathbf{U}_f, \quad (4)$$

式中： \mathbf{V}_f 和 \mathbf{U}_f 均为酉矩阵； $\mathbf{\Lambda}_f$ 为对角方阵且其对角线上的元素为 $\mathbf{H}_f(\omega)$ 的奇异值。那么 MDL^[11,42] 可以定量表示为

$$10 \times \log_{10} \left(\frac{\lambda_{\max}}{\lambda_{\min}} \right), \quad (5)$$

式中： λ_{\max} 和 λ_{\min} 分别是 $\mathbf{H}_f(\omega)$ 的最大特征值和最小特征值。

2.2.4 非线性效应

在少模光纤强耦合通信系统中,少模光纤的非线性除了存在类似于单模光纤中的模内非线性效应以外,还存在模式间的非线性效应^[17]。例如模间自相位调制(SPM)、交叉相位调制(XPM)和四波混频(FWM)等。由于在少模光纤中涉及多个模式,存在模内和模间两种非线性的干扰,推导出解析表达式十分困难,因此研究人员通常采用数值方法仿真求解少模光纤中的非线性效应^[20]。或由于使用强耦合通常可以抑制非线性效应^[19,43],且少模光纤中的模场面积较大,非线性效应相对较小,从而可以直接忽略有关非线性效应的补偿^[44-45]。

2.3 应用于少模光纤强耦合系统的主要数字信号处理补偿算法

2.3.1 多输入多输出均衡器

针对于少模光纤MDM系统模式耦合、DMD等损伤,假设传输的模式个数有 N 个,且每个模式均采用偏振复用,则总共的数据通道个数为 $2N$ 个。

如图4所示,将少模光纤链路按总长度作小段分段化建模^[12,46-47],一共分为 K 小段。假设模式在每个分段内无耦合地线性传输,而仅在分段与分段之间才发生模式耦合,其余加性噪声在链路末端或发送端引入。则 $2N \times 2N$ 的光纤传输信道矩阵 \mathbf{H} 可以表示为

$$\mathbf{H}_{2N \times 2N} = \prod_{k=1}^K \mathbf{A}_k \mathbf{M}_k \mathbf{C}_k = \prod_{k=1}^K \begin{pmatrix} \lambda_{k,1} & & \\ & \ddots & \\ & & \lambda_{k,2N} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{M}_{k,1} & & \\ & \ddots & \\ & & \mathbf{M}_{k,N} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{C}_{k,1,1} & \cdots & \mathbf{C}_{k,1,N} \\ \vdots & & \vdots \\ \mathbf{C}_{k,N,1} & \cdots & \mathbf{C}_{k,N,N} \end{pmatrix}, \quad (6)$$

式中: k 表示各个小分段, $2N \times 2N$ 的对角阵 \mathbf{A}_k 假设了同种空间模式中不同的偏振模式进行相同的无耦合传输,因而包含了每个分段中各个偏振模式下的衰减、群时延和色散影响。 $2N \times 2N$ 的 \mathbf{M}_k 是由 N 个 2×2 矩阵 $\mathbf{M}_{k,n}$ 构成的分块对角阵,其中每个 2×2 分块矩阵 $\mathbf{M}_{k,n}$ 均可以由琼斯矩阵计算得到,以描述没有在 \mathbf{A}_k 中引入的偏振模之间的影响,即描述在每个分段中各个不同的模式下的偏振模之间的耦合和色散。 $2N \times 2N$ 的分块矩阵 \mathbf{C}_k 表示每两个模式之间在每个光纤分段中的

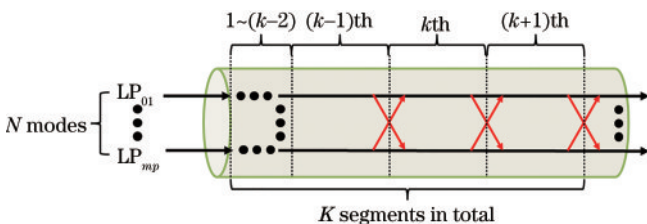


图4 少模光纤链路按小段长度分段化建模,传输 N 个模式示意图

Fig. 4 Schematic of segmentations of few-mode fiber modeling, transmitting N modes

耦合系数,每个分块阵均由 2×2 的矩阵 $\mathbf{C}_{k,m,n}$ 组成,每个分块阵的元素均为两个模式间的耦合系数,其中:在 \mathbf{C}_k 的对角线上的分块矩阵 $\mathbf{C}_{k,n,n}$ 均为对角阵,描述了模式自身的耦合系数;其他不在 \mathbf{C}_k 的对角线上的分块矩阵 $\mathbf{C}_{k,m,n}$ 均为副对角线矩阵,描述了模式间的耦合系数。注意,在 \mathbf{C}_k 中没有引入偏振模之间的耦合和色散,因为已经在 \mathbf{M}_k 中引入。因而使用 $2N \times 2N$ 的MIMO DSP均衡器能较准确地估计信道情况。

MIMO均衡除了可以解模式耦合^[48],在模式强耦合时还可以一并补偿DMD。MIMO均衡器的抽头长度和DMD相关,MIMO均衡器的记忆时长通常需要和DMD相当。因此在实际中应尽可能实现强耦合从而使得DMD降到最低,否则MIMO均衡器中解DMD的有记忆滤波器复杂度将会随着滤波器长度的增加而上升。

用于少模强耦合系统的MIMO均衡器通常可以分为时域均衡器(TDE)和频域均衡器(FDE)两种。

2.3.1.1 时域多输入多输出均衡器

对于MIMO TDE,以传输 $N=3$ 个模式,每个模式均采用偏振复用为例,如图5所示,每一个模式下的每一个偏振态均作为一路输入,各自经色散补偿(CD)之后,通过滤波器完成MIMO均衡,得到数据输出。设 $d_k(n)$, $k=1, \dots, 6$ 为各路期望输出信号, $\mathbf{X}_k(n)$ 为各路输入信号, $y_k(n)$ 为各路输出信号, $e_k(n)$ 为输出信号 $y_k(n)$ 和期望信号 $d_k(n)$ 的误差。则第6路输出结果表示为

$$y_6(n) = \mathbf{X}_1(n) \mathbf{w}_{6,1} + \mathbf{X}_2(n) \mathbf{w}_{6,2} + \cdots + \mathbf{X}_6(n) \mathbf{w}_{6,6}. \quad (7)$$

MIMO TDE抽头的更新方法通常有最小均方算法(LMS)、递归最小二乘法算法(RLS)和变遗忘因子的递归最小二乘法算法(VRLS)等,MIMO均衡器中的滤波器由这些算法进行更新。用于更新抽头的期望输出信号可以直接根据输出信号判决得到,也即使用盲均衡方法,或者也可以使用数据辅助预训练得到。

2.3.1.2 频域多输入多输出均衡器

MIMO FDE使用快速傅里叶变换(FFT)以及快速傅里叶逆变换(IFFT),将输入信号分块变换到频域,将在时域均衡中计算量大的卷积运算变为对应乘法运算,从而大幅度减少算法复杂度^[34,49]。尽管MIMO FDE在频率域中执行时域的卷积操作,但是其滤波器抽头仍需要回到时域中计算误差,再转换到频率域中更新。仍以传输 $N=3$ 个模式,每个模式均采用偏振复用为例,MIMO FDE原理图如图6所示。其抽头更新方法仍包括LMS、RLS和VRLS等算法。

2.3.1.3 多输入多输出均衡器的性能指标

MIMO均衡器的计算复杂度由每个模式每符号所作的复数乘法次数来衡量。MIMO TDE的计算复杂度随滤波器抽头数线性增长,而MIMO FDE呈对数

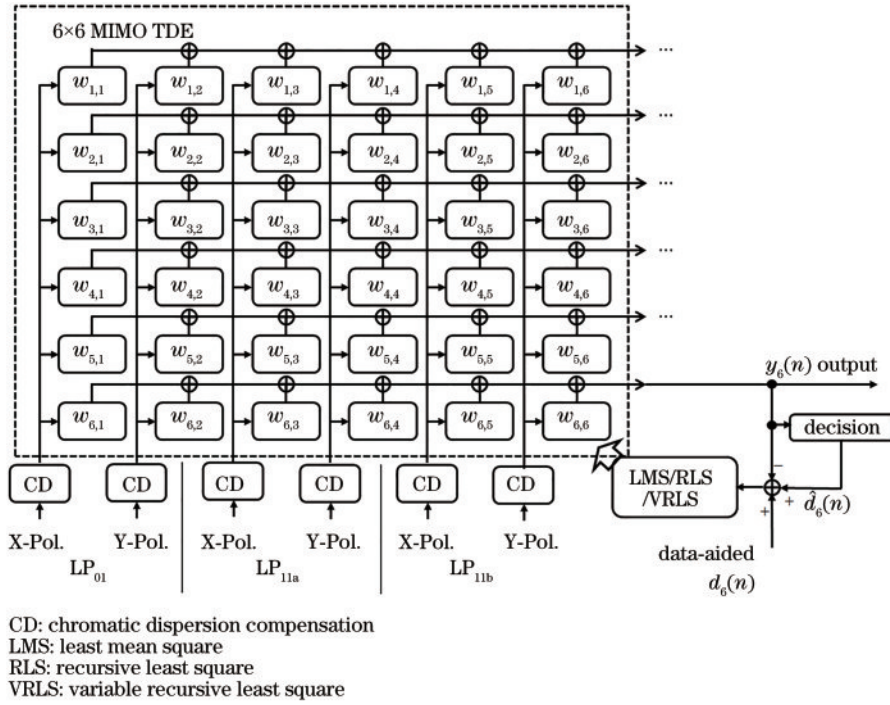


图 5 MIMO TDE 典型原理框图
 Fig. 5 Typical MIMO TDE structure

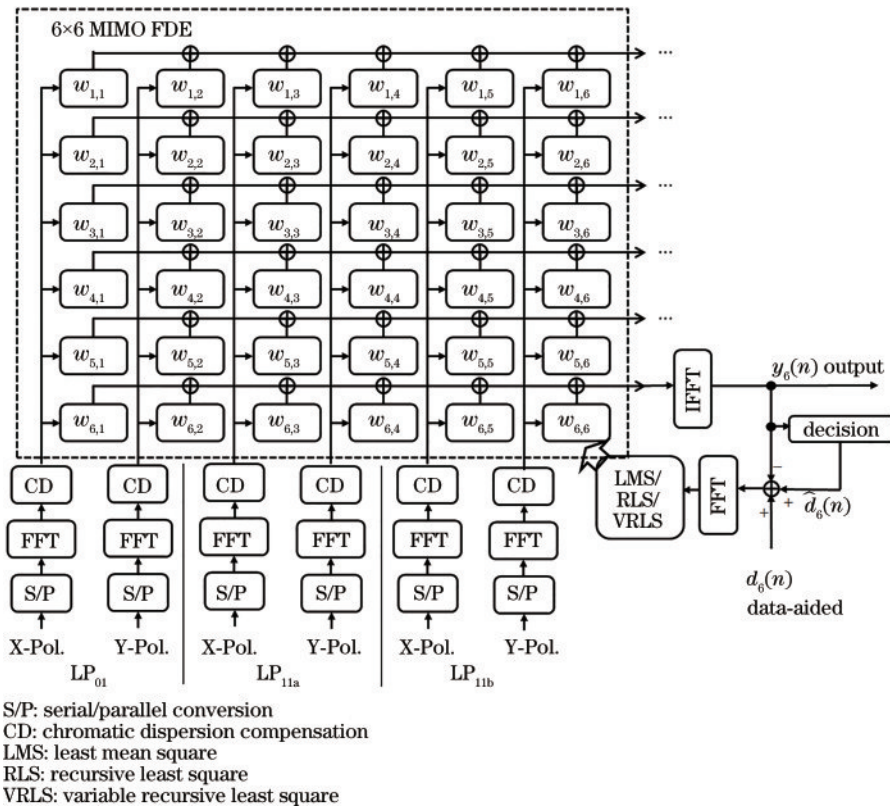


图 6 MIMO FDE 典型原理框图
 Fig. 6 Typical MIMO FDE structure

增长。两者计算复杂度表示为

$$\begin{cases} C_{\text{TDE}} = 3N\tau_{\text{DMD}}LR_s \\ C_{\text{FDE}} = (4 + 4N)\log_2(2\tau_{\text{DMD}}LR_s) + 8N' \end{cases} \quad (8)$$

式中： N 是模式数； τ_{DMD} 是整个光纤链路上累积的

DMD； L 是光纤总长度； R_s 是符号速率。由式(8)得知，在光纤长度增大、模式数量较多、速率增大等情况下，MIMO FDE的计算复杂度的增长显著小于MIMO TDE，因此MIMO FDE通常在计算复杂度上

更具优势。

如表 1 所示,在更新均衡器抽头算法上,LMS 算法具有实现简单、计算量小等优势。LMS 算法主要依赖于收敛因子 μ 的选取:当 μ 选取过大时可以获得较大的收敛速度,但会影响 LMS 的收敛性且增加收敛后的稳定误差;当 μ 选取过小时会影响收敛速度,但可以减小收敛后的稳定误差并且避免不收敛的情况发生。频域的 LMS 与时域 LMS 差别不大,但频域 LMS 中由于使用分块计算输出、分块更新抽头的做法,同时使用整块的误差更新抽头,因此 μ 通常比时域 LMS 选取得要小至少一个数量级以保证算法的稳定性。

相较于 LMS 算法,RLS 算法由于使用最小二乘法从而得到更优的收敛速率,同时有较好的收敛性能和

信号跟踪的能力。然而 RLS 算法的计算较为复杂,需要计算矩阵的逆。RLS 算法中的遗忘因子 λ 的选取通常为小于 1 的常数:当 λ 较小时能够快速遗忘先前的样本,从而提升对数据的追踪能力,然而过小的 λ 时常会造成算法不收敛的情况发生;当 λ 较大时虽然跟踪能力变弱,但对噪声的抵抗能力增强,对信号的估计误差较小。

VRLS 算法一定程度上兼顾了 RLS 算法对遗忘因子 λ 大小的选取问题。变遗忘因子能使得算法收敛的信号估计误差较小,同时又能增强系统的信号跟踪能力。但由于其需要通过非线性函数计算变遗忘因子的取值,因此计算复杂度较 RLS 算法更高。

表 1 三种更新抽头算法的对比

Table 1 Comparison of three algorithms for taps update

Algorithm	Convergence speed	Performance	Complexity
LMS	Slow	Large steady-state error (channel related)	Low
RLS	Fast	Small steady-state error (resistant to noise)	Middle
VRLS	Fast	Small steady-state error (resistant to noise)	High

2.3.1.4 多输入多输出均衡器的主要研究成果

2004 年,Hsu 等^[50]提出了相干光通信中的 MIMO 均衡技术,首次将 MIMO 引入光纤通信中,引起人们

的广泛关注。2005 年,Shah 等^[51]使用了 MIMO 自适应均衡器减轻了符号间干扰的问题。表 2 是在少模强耦合 MDM 系统中使用 MIMO 均衡器进行传输实验的

表 2 使用 MIMO 均衡器在少模光纤强耦合系统中进行传输实验的主要研究成果

Table 2 Main research results of transmission experiments using MIMO equalizer in low-mode fiber strongly coupled systems

Year	Reference	Research institute	Core \times mode	Distance / km	Span length / km	Data rate (Gb/s/ mode/core/ λ)	MIMO taps and types
2011	Ref. [52]	University of Melbourne	1 \times 2	4.5	4.5	107	—
2011	Ref. [53]	Bell Labs	1 \times 2	40	40	112	9-15 TDE
2011	Ref. [54]	Bell Labs	1 \times 3	10	10	112	20-100 TDE
2011	Ref. [24]	Bell Labs	1 \times 3	33	33	112	80-120 TDE
2011	Ref. [55]	NEC Labs	1 \times 3	50	50	112	301 TDE
2011	Ref. [56]	Bell Labs	1 \times 5	40	40	112	—
2012	Ref. [57]	Bell Labs	1 \times 3	96	96	80	120 TDE
2012	Ref. [58]	NEC Labs	1 \times 3	85	85	112	481 TDE
2012	Ref. [59]	Bell Labs	1 \times 3	1200	30	80	400 TDE
2012	Ref. [60]	Bell Labs	1 \times 3	209	209	80	400 TDE
2012	Ref. [61]	Eindhoven University of Technology	1 \times 3	119	119	256	401 TDE
2012	Ref. [62]	Bell Labs	1 \times 6	130	65	80	400-600 TDE
2013	Ref. [63]	Bell Labs	1 \times 6	177	59	160	800 FDE
2014	Ref. [64]	NEC Labs	1 \times 3	500	50	76	511 TDE
2015	Ref. [65]	Technical University of Munich	1 \times 6	74.17	74.17	27.18	—
2016	Ref. [66]	NTT Network Innovation Laboratories	12 \times 3	527	52.7	80	128 FDE
2017	Ref. [67]	Photonic Network System Laboratory	1 \times 3	3500	70	360	600 FDE
2018	Ref. [68]	Eindhoven University of Technology	1 \times 6	590	59	240	NA FDE
2018	Ref. [69]	NTT Network Innovation Laboratories	1 \times 3	1020	51	60	400 FDE
2019	Ref. [70]	NTT Network Innovation Laboratories	12 \times 3	>3000	52.7	24	600 FDE
2019	Ref. [35]	NTT Network Innovation Laboratories	1 \times 3	6316.8	75.2	96	—
2020	Ref. [71]	NTT Network Innovation Laboratories	1 \times 3	3060	51	192	896 FDE

主要成果。其中,2011年,Ryf等^[54]展示了使用MIMO均衡器,实现少模光纤强耦合六通道模分复用系统传输 10 km 的方案。同年,Randel等^[24]实现了 6×6

MIMO均衡下的 6 个传输通道在少模光纤强耦合全干涉系统下的传输,其系统结构及误码率(BER)性能对比如图 7、8 所示。此后 MDM 系统的传输距离不断增

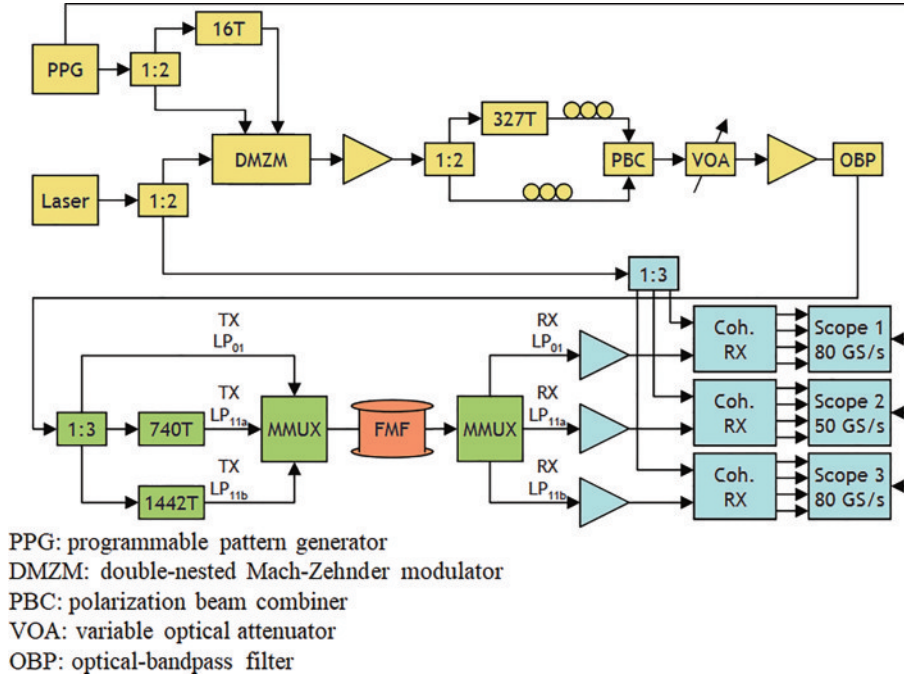


图 7 基于 MIMO TDE 的少模光纤强耦合系统结构图^[24]

Fig. 7 System structure of a few-mode fiber with strong coupling system based on MIMO TDE^[24]

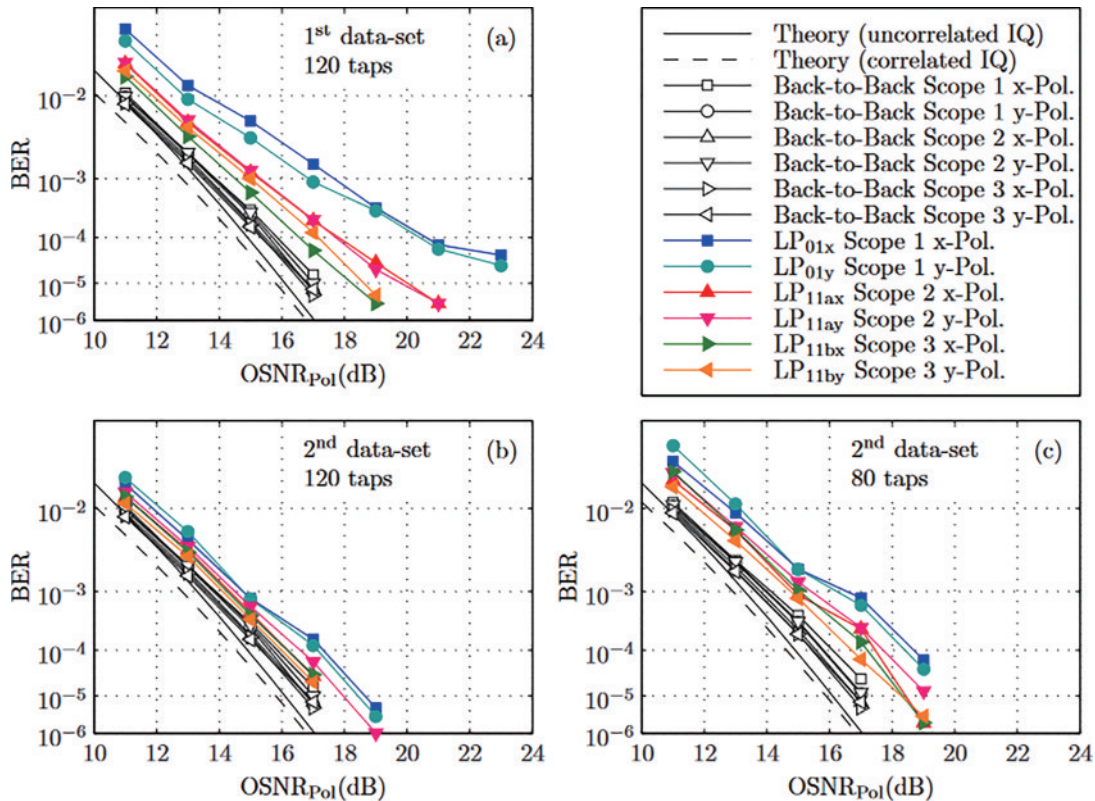


图 8 系统误码率和光功率对应图^[24]。(a)第一组数据的耦合器工作在次优情况,滤波器抽头为 120; (b)(c)第二组数据在最优的耦合条件下,滤波器抽头分别为 120 和 80

Fig. 8 System bit error rate and optical power mapping^[24]. (a) First data set with suboptimal condition, and the filter tap is 120; (b)(c) second data set with optimized coupling condition, the filter taps are 120 and 80, respectively

长, MIMO 规模不断增大, 不难发现随着传输距离的增长, MIMO 的均衡器长度也不断增加, 从最初传输几十千米所需的几十个抽头发展到近期几千千米的几

百甚至接近一千个抽头。表 3 是针对 MDM 系统 MIMO 均衡器算法的研究成果。

表 3 MDM 系统中 MIMO 均衡器算法的主要研究成果
Table 3 Main Research results of MIMO equalizer algorithms in MDM system

Year	Research institute	Research result	Reference
2012	University of Central Florida	Propose single-carrier adaptive FDE for MDM transmission; verify and compare performances of both FDE and TDE	Ref. [25]
2013	Bell Labs	Implement and analyze the complexity of an adaptive FDE for a 12×12 MIMO-SDM transmission system	Ref. [34]
2013	University of Louisiana at Lafayette	Propose modified MIMO FDE LMS algorithm to improve the convergence speed by 30%	Ref. [49]
2014	Eindhoven University of Technology	Using an experimental 3-mode dual polarization coherent transmission setup, the convergence time of the MMSE TDE and FDE can be reduced by approximately 50% and 30%	Ref. [72]
2018	Juniper Networks	Show RLS algorithm in MIMO could improve the convergence speed by 53.7% over conventional frequency domain LMS	Ref. [73]

2.3.1.5 人工智能在多输入多输出均衡器中的应用

人工智能作为近年来算法研究的热点, 也被应用在少模系统的 MIMO 均衡中。一个典型的用于 MDM 系统的人工神经网络 (ANN) 均衡的系统如图 9^[74] 所示。

ANN 的性能可以由其估计出的信道的冲激响应表征。图 10(a) 是两个模式信道的输入冲激响应, 图 10(b)、(c) 分别是目标和输出信道冲激响应。可以看出, 目标信道和输出信道的冲激响应非常接近, 因此该 ANN 均衡器具有较好的补偿模式耦合和 DMD 的

能力。

深度学习神经网络具有较好的非线性补偿能力, 文献[75]中提出一种有监督的深度学习神经网络 (DLNN), 其系统结构图如图 11 所示, DLNN 结构图如图 12 所示。其将 N 路输入分为实部虚部两部分, 此后经过 M 层的网络进行处理。

DLNN、迫零检测器 (ZF) 和逐行半定松弛法 (SDR-RBR) 在两模式的 MDM 系统误码率性能比较图如图 13 所示。结果表明, DLNN 相对其他两种算法有超过 15 dB 的 Q 值提升。

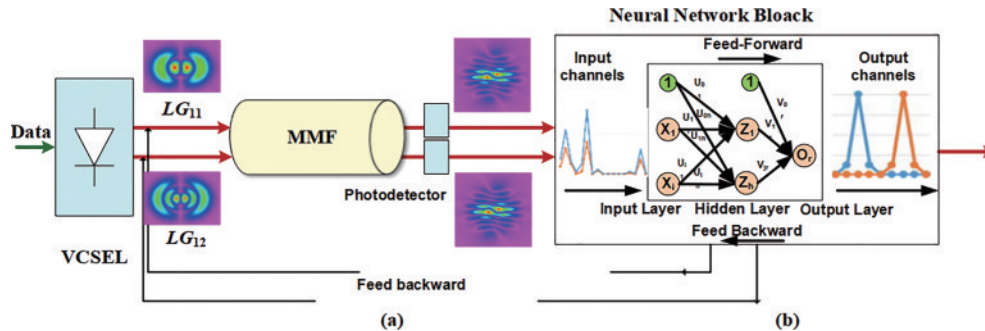


图 9 使用 ANN 均衡器的模分复用系统^[74]

Fig. 9 MDM system with ANN equalizer^[74]

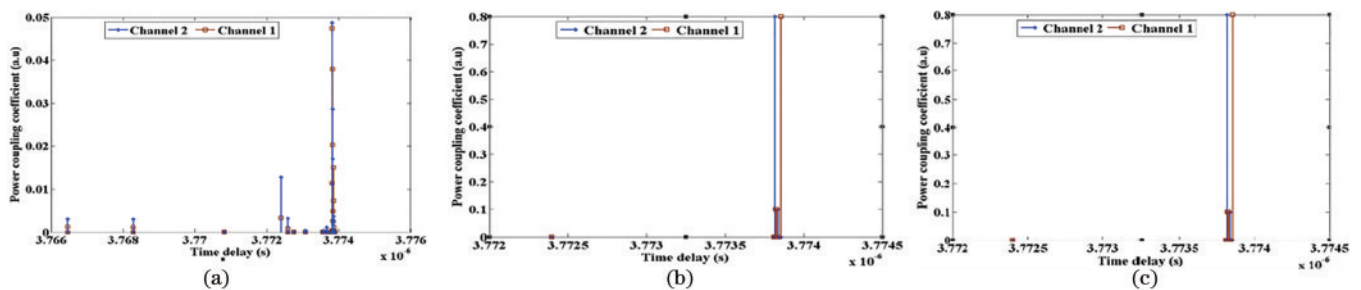


图 10 信道的冲激响应。(a) 输入信道; (b) 目标信道; (c) 输出信道^[74]

Fig. 10 Impulse response of the channel. (a) Input channel; (b) target channel; (c) output channel^[74]

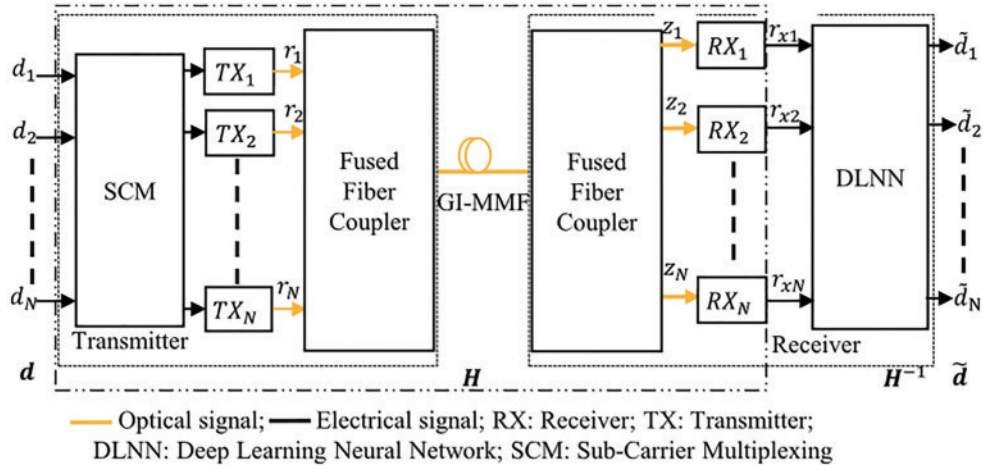


图 11 基于 DLNN 的 MDM 系统^[75]
Fig. 11 MDM system based on DLNN^[75]

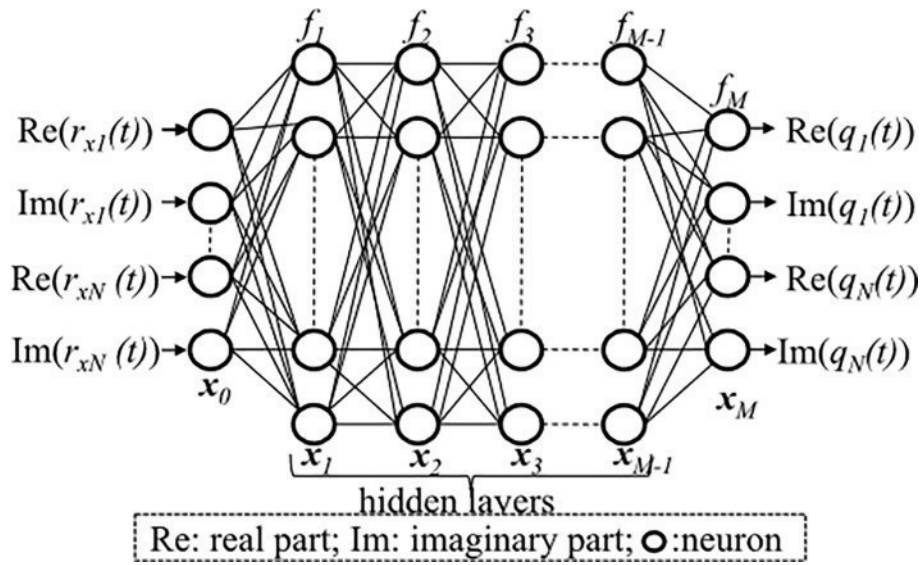


图 12 DLNN 结构^[75]
Fig. 12 Structure of DLNN^[75]

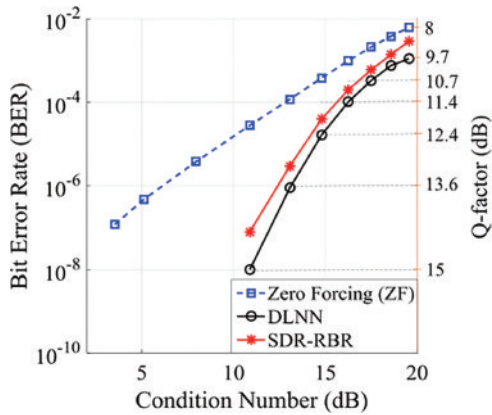


图 13 DLNN、ZF 和 SDR-RBR 的误码率性能^[75]
Fig. 13 BER performance of DLNN, ZF, and SDR-RBR^[75]

尽管人工智能神经网络技术具有性能优良,能够补偿线性和非线性损伤等普适性的优点,但其通常需要海量的数据集进行预训练,训练开销极大,时间较

长,计算成本相比传统 MIMO 算法较高。

2.3.2 空时编码

空时编码^[76]最早用于处理无线通信中 MIMO 系统的多径瑞利衰落问题。STC 补偿主要通过发送端引入时空相关性,充分地利用 MDM 技术中的空间模式和时间分集特性,在不同的时刻上和信道中生成重复的符号,进而降低 MDL 对 MDM 系统的影响^[77]。STC 充分地利用信道时间的自由度,从而提升了通信系统的可靠性。用于补偿 MDL 的 STC 主要有正交空时块码 (OSTBC)^[78] 结构和线状代数码 (TAST)^[79] 结构。

OSTBC 的码字矩阵自身具备正交性从而抵抗多径衰落,其在译码方面具有优势,但其速率随着并行发送的数据通路数目增加而指数递减。Hei 等^[77]讨论了少模光纤强耦合系统下使用 OSTBC 的性能。

TAST 解决了 OSTBC 中符号速率过低的问题,

且使用在 3×3 强耦合 MDM 系统中时和 OSTBC 展现出几乎相同的误比特率性能^[80]。TAST 的构造分为两步,首先若干个调制符号线性组合形成组合码,然后再

将这些组合码分配到码字矩阵中^[80]。以传输 $N=3$ 个模式,每个模式均采用偏振复用,共 6 个通道为例,TAST 码字生成矩阵为

$$\mathbf{X}_{6 \times 6} = \frac{1}{\sqrt{6}} \begin{bmatrix} f_1(\mathbf{s}_1) & \phi^{\frac{5}{6}} f_2(\mathbf{s}_6) & \phi^{\frac{4}{6}} f_3(\mathbf{s}_5) & \phi^{\frac{3}{6}} f_4(\mathbf{s}_4) & \phi^{\frac{2}{6}} f_5(\mathbf{s}_3) & \phi^{\frac{1}{6}} f_6(\mathbf{s}_2) \\ \phi^{\frac{1}{6}} f_1(\mathbf{s}_2) & f_2(\mathbf{s}_1) & \phi^{\frac{5}{6}} f_3(\mathbf{s}_6) & \phi^{\frac{4}{6}} f_4(\mathbf{s}_5) & \phi^{\frac{3}{6}} f_5(\mathbf{s}_4) & \phi^{\frac{2}{6}} f_6(\mathbf{s}_3) \\ \phi^{\frac{2}{6}} f_1(\mathbf{s}_3) & \phi^{\frac{1}{6}} f_2(\mathbf{s}_2) & f_3(\mathbf{s}_1) & \phi^{\frac{5}{6}} f_4(\mathbf{s}_6) & \phi^{\frac{4}{6}} f_5(\mathbf{s}_5) & \phi^{\frac{3}{6}} f_6(\mathbf{s}_4) \\ \phi^{\frac{3}{6}} f_1(\mathbf{s}_4) & \phi^{\frac{2}{6}} f_2(\mathbf{s}_3) & \phi^{\frac{1}{6}} f_3(\mathbf{s}_2) & f_4(\mathbf{s}_1) & \phi^{\frac{5}{6}} f_5(\mathbf{s}_6) & \phi^{\frac{4}{6}} f_6(\mathbf{s}_5) \\ \phi^{\frac{4}{6}} f_1(\mathbf{s}_5) & \phi^{\frac{3}{6}} f_2(\mathbf{s}_4) & \phi^{\frac{2}{6}} f_3(\mathbf{s}_3) & \phi^{\frac{1}{6}} f_4(\mathbf{s}_2) & f_5(\mathbf{s}_1) & \phi^{\frac{5}{6}} f_6(\mathbf{s}_6) \\ \phi^{\frac{5}{6}} f_1(\mathbf{s}_6) & \phi^{\frac{4}{6}} f_2(\mathbf{s}_5) & \phi^{\frac{3}{6}} f_3(\mathbf{s}_4) & \phi^{\frac{2}{6}} f_4(\mathbf{s}_3) & \phi^{\frac{1}{6}} f_5(\mathbf{s}_2) & f_6(\mathbf{s}_1) \end{bmatrix}, \quad (9)$$

式中: ϕ, J, θ 是丢番图系数,按文献[27]的取法, $\phi = \exp(i\pi/12), \mathbf{s}_i, i=1, 2, \dots, 6$ 是前述的 6 个组合码,每个组合码有 6 个元素; $f_n(x) = \sum_{k=1}^6 x_k \cdot (J^{n-1}\theta)^{k-1}$,其中 x_k 是 x 的第 k 个元素, $J = \exp(i2\pi/3), \theta = \exp(i\pi/9)$ 。当模式数增多时,TAST 码的生成矩阵将不断扩大,需要使用的编码器和译码器的规模也会增大。

有关使用 STC,尤其是 TAST 解决 MDM 系统的 MDL 的进展如表 4 所示。其中,2015 年,Awwad 等^[27,89]首次提出在光纤通信中使用 TAST 解决 MDL 造成的衰减问题,图 14 展示了结合 STC 的系统流程图,图 15 则描述了强耦合情况下分别使用 STC 码和多块 STC 码时的系统误码率性能。不难得出,使用 STC 码比只使用 ML 方法对误码率性能的提升更大。

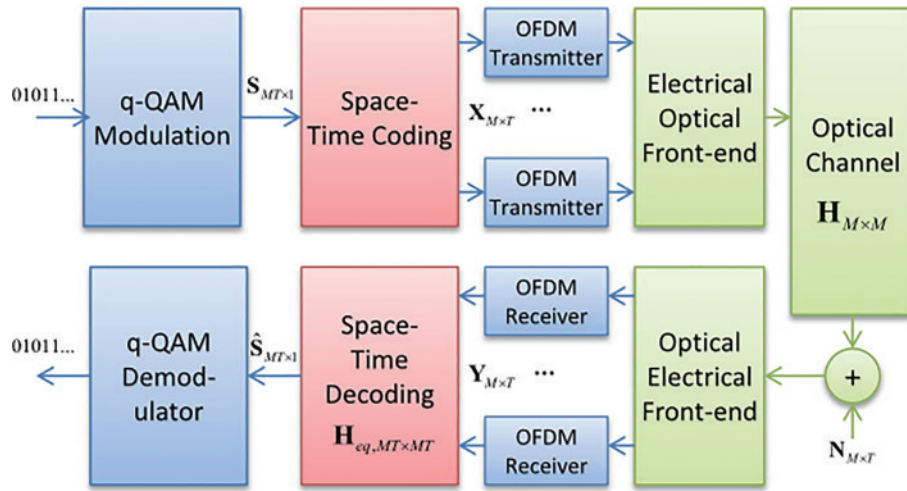
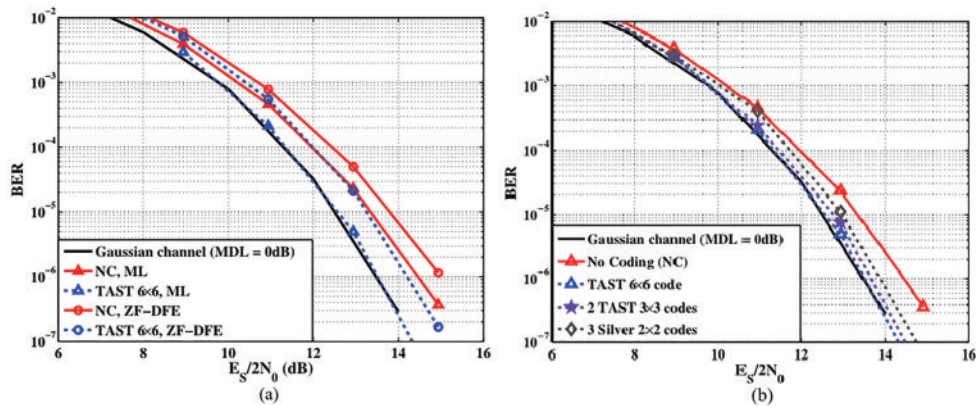
表 4 STC 用于均衡 MDM 系统中 MDL 补偿的主要研究成果

Table 4 Main research results of MDL compensation in MDM system with STC

Year	Research institute	Research result	Reference
2015	TELECOM ParisTech	Propose space-time (ST) coding as a DSP solution to mitigate MDL in the optical channel	Ref. [27]
2016	TELECOM ParisTech	Derive an upper bound that yields the design criterion of space-time codes allowing total mitigation of MDL in SDM	Ref. [81]
2016	Peking University	Propose a STBC with MIMO scheme to mitigate MDL	Ref. [82]
2016	TELECOM ParisTech	Investigate MIMO techniques to reduce the impact of the MDL and DSP solutions based on TAST	Ref. [83]
2016	NTT Network Innovation Laboratories	A method is described for applying space-time coding implemented by Hadamard transform to SDM transmission	Ref. [84]
2017	TELECOM ParisTech	Study a complete transmission scheme, concatenating forward error correction (FEC) and TAST	Ref. [85]
2017	University of Louisiana at Lafayette	Explore the performance of STBC assisted MIMO scheme for modal dispersion and MDL mitigation in SDM systems	Ref. [28]
2017	Xidian University	Orthogonal STBC-based SDM transmission system was investigated to test its efficiency in mitigating MDL	Ref. [77]
2018	University of Waterloo	Propose a new low-complexity, essentially optimal detection algorithm for TAST codes over MMF channels with MDL	Ref. [86]
2019	TELECOM ParisTech	Analyze the performance of TAST over MMF optic channels with the MDL under the ML and ZF detection schemes	Ref. [87]
2019	Xidian University	Propose a method can achieve near-optimal solutions and has a low computational complexity in TAST-assist system	Ref. [88]

2016 年,Shibahara 等^[84]提出了使用 Hadamard 变换在 STC 中解决相同信道的功率衰减问题,Xin 等^[82]提出一种模式交错技术来简化 STC,Weng 等^[28]研究了 TAST 和 MIMO 组合的性能。同年,Amhoud 等^[81]

提出了由 MDL 产生错误概率的上界,从而推导设计出能完全消除 MDL 的 STC 设计准则,此后,他们研究了 STC 结合前向纠错码(FEC)补偿 MDL 的方法^[85,90],此后用实验证实了 STC 能减少 MDL 带来的

图 14 结合 STC 的 MDM 系统结构^[27]Fig. 14 MDM system architecture with STC^[27]图 15 在强耦合下 STC 补偿 MDL 的误码率性能图^[27]。(a) 使用 STC 码; (b) 使用多块 STC 码Fig. 15 BER performance of STC compensating MDL under strong coupling^[27]. (a) With STC; (b) with multi-block STC

误码^[91]。2017年,Hei等^[77]提出了针对 OSTBC 的反线性解码方案,此后他们提出了一种能找到接近最优且极大降低复杂度的 TAST 方法^[88],用于解决 MDM 中的 MDL。

2.3.3 干扰消除

MDL 的另一种消除方式是使用干扰消除方法^[31],其中分为串行干扰消除(SIC)和并行干扰消除(PIC)^[92]方法。此类方法属于非线性检测方法,通常能获得比线性检测更好的性能,但会有差错传播的问题。

1) 串行干扰消除

SIC 先根据接收信号和信道矩阵估计出发送信号向量中的某一个符号,然后根据与该符号相对应的信道信息重构出该符号在接收信号中产生的干扰。再从接收向量中减去这个已经被检测的符号产生的干扰,重复这个过程直到检测出发送信号向量中的所有的发送符号。在这种检测结构中,提升算法性能的关键步骤是在检测较弱符号之前,先消除最强符号产生的干扰,也即将信号按强度大小排序,选择信号强度最大的

信号最先进行干扰消除,最终使得所有通道的信号均避免 MDL 功率带来的不均匀的影响。由于 SIC 对差错传播敏感,因此当信道间信号强度差别较大时,SIC 的性能才会凸显。

2) 并行干扰消除

不同于 SIC, PIC 中需要先利用最小均方误差(MMSE)等方法估计出整个发送信号向量,再在估计出的发送向量中选择一个符号作为最先判决的期望信号,同时利用信道的信息估计出其余符号所受到的干扰。从最初接收到的接收向量减去估计出的干扰后,对此前最先选择的期望信号估计并判决,重复上述过程直到将所有的向量检测完毕。

为了实现长距离的传输,2017年至2018年,Shibahara等^[93-94]改进了 SIC 方法,提出新的 Unreplicated SIC(U-SIC)方法解决 MDL 问题并取得了成功,并且相较于传统的 SIC 方法,U-SIC 已经不需要进行信道估计操作。2019年,Shibahara等^[35]展示了 CMP 结合 U-SIC 方法补偿 DMD 和 MDL,在 3 个模式下的少模光纤中传输 6300 km 的记录。同年,

Shibahara 等^[70]提出 Unreplicated PIC (U-PIC)方法补偿 MDL 并实现 12 芯 3 个模式的少模光纤传输 3600 km 的

记录,其实验结构图和传输指标如图 16 所示。有关 IC 解决 MDM 系统中 MDL 的主要研究成果如表 5 所示。

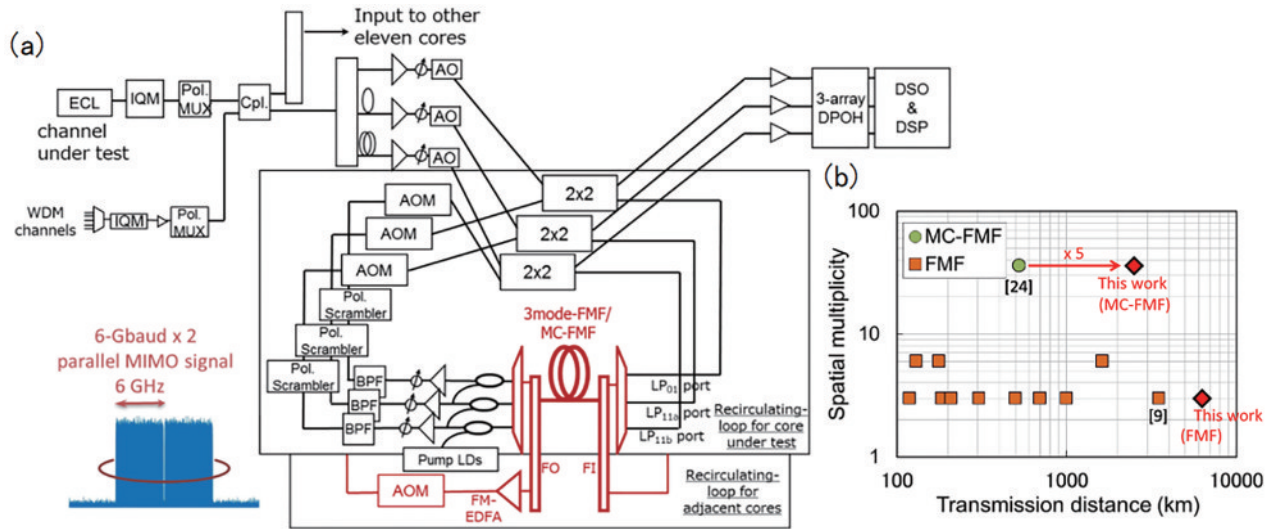


图 16 U-PIC 方法补偿 MDL 实验。(a)实验结构图;(b)传输距离和模分复用指标对比^[70]

Fig. 16 U-PIC method compensates MDL experiment. (a) Experimental structure; (b) comparison of transmission distance and spatial multiplicity^[70]

表 5 IC 用于均衡在 MDM 系统中 MDL 的主要研究成果

Table 5 Main research results of MDL compensation in MDM system with IC

Year	Research institute	Research result	Reference
2017	NTT Network Innovation Laboratories	Unreplicated SIC for MDL-impact mitigation is proposed	Ref. [93]
2018	NTT Network Innovation Laboratories	Analyze the transmission results over 2500 km multicore FMF with unreplicated SIC scheme	Ref. [94]
2019	NTT Network Innovation Laboratories	Demonstrate the reach of transmission of 6300 km for 3-mode FMF with unreplicated SIC scheme	Ref. [35]
2019	NTT Network Innovation Laboratories	Achieve 12-core 3-mode multicore FMF transmission over 3000 km with proposed unreplicated PIC scheme	Ref. [70]

2.3.4 极大似然估计法

另一种用于 MDL 补偿的方法是 ML^[16,32]。ML 算法通过利用信道的先验知识,搜索得到与接收符号最小欧氏距离的符号,实现原理简单。但是 ML 算法通常需要遍历搜索整个可能的符号空间,其计算

复杂度会随着模式数量和调制阶数的增加急剧增长。

Lobato 等^[32]提出利用 ML 算法补偿 MDL,并与其他传统的 ZF 算法和 MMSE 算法以 OSNR 开销作性能对比,其系统框图和结果图如图 17、18 所示。可以看

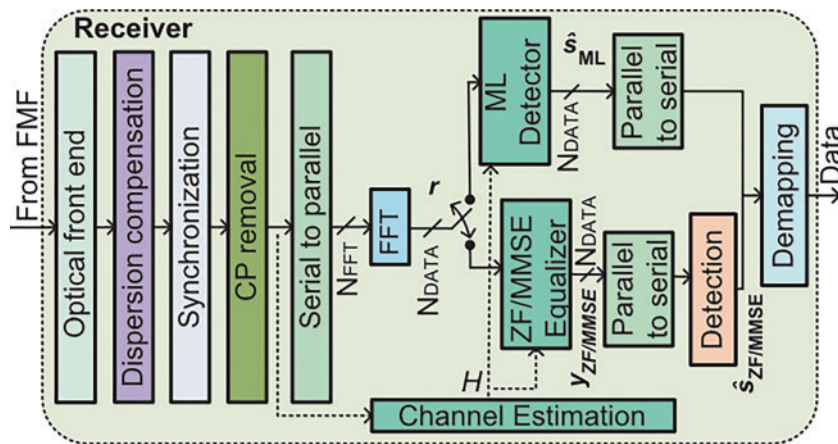
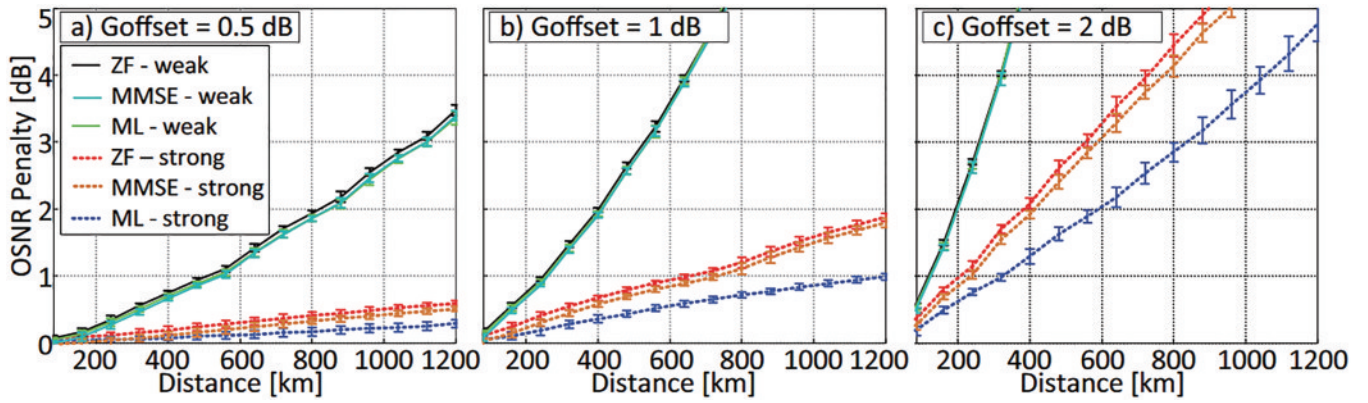


图 17 利用 ML 的系统算法架构^[32]

Fig. 17 System algorithm architecture with ML^[32]

图 18 不同增益差下,ML算法的性能比较^[32]。(a)0.5 dB;(b)1 dB;(c)2 dBFig. 18 Performance comparison of ML algorithm under different gain differences^[32]. (a) 0.5 dB; (b) 1 dB; (c) 2 dB

到,相较于ZF或MMSE算法,使用ML算法在光信噪比的开销上更优。

3 少模光纤强耦合通信系统信号恢复技术的对比和展望

少模光纤强耦合通信系统的信号恢复技术,关系到系统可传输的最高速率和最大容量。虽然上述的几种方法均能对少模光纤强耦合通信系统的性能起到提升作用,但考虑到系统的实用性时,需要考察它们在适用范围、复杂度等方面的优缺点。

在适用的损伤类型上,MIMO算法用于解模式耦合,以及消除DMD。少模光纤强耦合通信系统通常需要MIMO算法解模式强耦合,并实现对DMD的补偿,且必须要求在发射端严格设计器件和少模光纤以减小DMD。STC、IC和ML算法则通常用于减少MDL带来的损伤。

在算法的复杂度和其他方面上,由于MIMO存在大量的FIR,MIMO TDE的复杂度随模式数、光纤长度呈线性增长。MIMO FDE由于在频域中实现卷积

操作,复杂度随模式数呈对数增长,在模式数较多时具有突出的优势。同时结合神经网络的MIMO均衡器有较大的研究前景。STC由于引入了编码,需要在发射和接收端分别添加一个编码和译码器,复杂度适中,且编码本身与光纤长度无关,但编码矩阵的大小和模式数相关,且在各个数据通路增加其他数据通路的冗余信息,会降低系统传输有效信息的速率。而IC的复杂度相对较低,算法本身的执行也不受光纤长度的影响,但IC补偿后的效果受模式数量、光纤长度的影响。ML算法实现原理简单,但其复杂度较高,且补偿效果通常不优于STC。

总体上看,MIMO均衡器对解模式耦合和DMD都有非常可靠的效果。STC引入时间维度和重复,为减轻MDL提供了较为可靠的结果,同时其作为一种编码,具备和其他算法共同使用的高兼容性。IC的次最优、低复杂度是其值得优先考虑的因素,但减轻MDL效果不佳的缺点有待研究人员进一步改善。ML的实现原理简单是一大优势,但其复杂度较大,在计算资源的开销上需要考虑。

表 6 三种MDL补偿算法的对比

Table 6 Comparison of three algorithms for MDL mitigation

Algorithm	Complexity	Advantage	Disadvantage
STC	Middle	High compatibility with other solutions	Additional coder and decoder is required
IC	Low	Suboptimal equalizer	Bad performance
ML	High	Simple principle	High complexity

综上所述,在少模光纤强耦合通信系统中,MIMO用于解模式强耦合以及完成对DMD的补偿,同时使用TAST的STC码对MDL补偿是较为可靠的解决方案。随着相关技术不断成熟,MIMO结合TAST的解决方案有望进一步增大少模光纤强耦合通信系统的速率、容量和传输距离。

4 结束语

少模光纤强耦合通信系统的损伤补偿算法推动了其向大容量、高速率和长距离的发展。尽管目前先进

DSP算法能够实现少模光纤强耦合通信系统较长距离和较大容量的传输,但这些DSP算法依旧存在诸多例如复杂度较高、传输时延过大、额外的硬件资源开销过大或性能较差等局限性,有待进一步提升。本文首先介绍限制少模光纤强耦合通信系统容量和距离的因素,并建立了少模光纤分段化损伤的理论模型。针对模式耦合、DMD和MDL这些损伤研究了几种关键DSP算法,包括MIMO均衡器、STC编码、IC算法以及ML算法,并对它们进行比较,综合讨论几种算法在模式复用数目、单个模式传输速率、光纤传输距离、传

输容量等系统性能、系统开销、DSP 复杂度等方面的优缺点。得出了 MIMO 均衡器结合 STC 是补偿当前少模光纤强耦合传输系统损伤较为可靠的 DSP 解决方案的结论,可以为未来的大容量、长距离少模光纤多模式复用的 MDM 传输系统提供发展方向。

参 考 文 献

- [1] Essiambre R J, Kramer G, Winzer P J, et al. Capacity limits of optical fiber networks[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, 28(4): 662-701.
- [2] Winzer P J, Neilson D T. From scaling disparities to integrated parallelism: a decathlon for a decade[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(5): 1099-1115.
- [3] Li G F, Bai N, Zhao N B, et al. Space-division multiplexing: the next frontier in optical communication[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2014, 6(4): 413-487.
- [4] Sillard P, Bigot-Astruc M, Molin D. Few-mode fibers for mode-division-multiplexed systems[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(16): 2824-2829.
- [5] Antonelli C, Golani O, Shtaf M, et al. Propagation effects in few-mode fibers[C]//2017 European Conference on Optical Communication (ECOC), September 17-21, 2017, Gothenburg, Sweden. New York: IEEE Press, 2017.
- [6] Ho K P, Kahn J M. Mode coupling and its impact on spatially multiplexed systems[M]//Kaminow I P, Li T, Willner A E. *Optical fiber telecommunications*. 6th ed. Amsterdam: Elsevier, 2013: 491-568.
- [7] Arik S Ö, Askarov D, Kahn J M. Effect of mode coupling on signal processing complexity in mode-division multiplexing[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31(3): 423-431.
- [8] Ferreira F, Sygletos S, Ellis A. Impact of linear mode coupling on the group delay spread in few-mode fibers [C]//2015 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), March 22-26, 2015, Los Angeles, CA, USA. New York: IEEE Press, 2015.
- [9] Schulze C, Brüning R, Schröter S, et al. Mode coupling in few-mode fibers induced by mechanical stress[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(21): 4488-4496.
- [10] 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.
- [11] 刘峰. 少模光纤损伤测量及故障检测技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2019.
Liu F. Research on impairment measurement and fault detection technology for few-mode fiber[D]. Changchun: Jilin University, 2019.
- [12] Ho K P, Kahn J M. Statistics of group delays in multimode fiber with strong mode coupling[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2011, 29(21): 3119-3128.
- [13] Ip E, Milione G, Huang Y K, et al. Impact of mode-dependent loss on long-haul transmission systems using few-mode fibers[C]//2016 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), March 20-24, 2016, Anaheim, CA, USA. New York: IEEE Press, 2016.
- [14] Ho K P, Kahn J M. Mode-dependent loss and gain: statistics and effect on mode-division multiplexing[J]. *Optics Express*, 2011, 19(17): 16612-16635.
- [15] Lobato A, Ferreira F, Kuschnerov M, et al. Impact of mode coupling on the mode-dependent loss tolerance in few-mode fiber transmission[J]. *Optics Express*, 2012, 20(28): 29776-29783.
- [16] Lobato A, Ferreira F, Rabe J, et al. On the mode-dependent loss compensation for mode-division multiplexed systems[C]//2013 15th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), June 23-27, 2013, Cartagena, Spain. New York: IEEE Press, 2013.
- [17] Ali A A I, El-Fiqi A E, El-Sahn Z A, et al. Analytical formula of nonlinear interference in few-mode fibers in strong coupling regime[C]//2015 17th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), July 5-9, 2015, Budapest, Hungary. New York: IEEE Press, 2015.
- [18] Xiao Y Z, Essiambre R J, Desgroseilliers M, et al. Theory of intermodal four-wave mixing with random linear mode coupling in few-mode fibers[J]. *Optics Express*, 2014, 22(26): 32039-32059.
- [19] Ferreira F M, Suibhne N M, Sánchez C, et al. Advantages of strong mode coupling for suppression of nonlinear distortion in few-mode fibers[C]//Optical Fiber Communication Conference, March 20-24, 2016, Anaheim, California. Washington, D.C.: Optica Publishing Group, 2016: Tu2E.3.
- [20] Krummrich P M, Brehler M, Rademacher G, et al. Nonlinear impairment scaling in multi mode fibers for mode division multiplexing[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(4): 927-932.
- [21] Liu Y P, Yang Z Q, Wang X T, et al. Gain equalization for few-mode erbium-doped fiber amplifiers via strong mode coupling[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(2): 767.
- [22] Li J, Fontaine N K, Chen H, et al. Design and demonstration of mode scrambler supporting 10 modes using multiplane light conversion[C]//2018 European Conference on Optical Communication (ECOC), September 23-27, 2018, Rome, Italy. New York: IEEE Press, 2018.
- [23] Liu Y P, Jung Y, Yang Z Q, et al. Wideband and low-loss mode scrambler for few-mode fibers based on distributed multiple point-loads[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2021, 13(3): 7100907.
- [24] Randel S, Ryf R, Sierra A, et al. 6×56-Gb/s mode-division multiplexed transmission over 33-km few-mode fiber enabled by 6×6 MIMO equalization[J]. *Optics Express*, 2011, 19(17): 16697-16707.
- [25] Bai N, Li G F. Adaptive frequency-domain equalization for mode-division multiplexed transmission[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(21): 1918-1921.
- [26] 王源泉, 方武良, 陶理, 等. 多模光纤链路中多输入多输出技术的研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, 48(10): 100601.
Wang Y Q, Fang W L, Tao L, et al. Research of

- multiple-input multiple-output(MIMO) technique in multimode fiber links[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(10): 100601.
- [27] Awwad E, Othman G R B, Jaouën Y. Space-time coding schemes for MDL-impaired mode-multiplexed fiber transmission systems[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(24): 5084-5094.
- [28] Weng Y, He X, Yao W, et al. Investigation of adaptive filtering and MDL mitigation based on space-time block-coding for spatial division multiplexed coherent receivers[J]. *Optical Fiber Technology*, 2017, 36: 231-236.
- [29] Kontik M, Ergen S C. Scheduling in successive interference cancellation based wireless ad hoc networks[J]. *IEEE Communications Letters*, 2015, 19(9): 1524-1527.
- [30] 申东, 赵丹, 李强, 等. 针对大规模多输入多输出的动态调整排序串行干扰消除算法[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(11): 1107004.
- Shen D, Zhao D, Li Q, et al. Dynamically adjusted order successive interference cancellation algorithm for massive multiple input multiple output[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(11): 1107004.
- [31] 张天, 李莉, 胡贵军. 基于串行干扰消除的模式复用系统解复用[J]. *中国激光*, 2019, 46(3): 0306001.
- Zhang T, Li L, Hu G J. Demultiplexing of mode-division multiplexing system based on successive interference cancellation[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(3): 0306001.
- [32] Lobato A, Ferreira F, Inan B, et al. Maximum-likelihood detection in few-mode fiber transmission with mode-dependent loss[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, 25(12): 1095-1098.
- [33] Arik S Ö, Askarov D, Kahn J M. MIMO DSP complexity in mode-division multiplexing[C]//2015 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), March 22-26, 2015, Los Angeles, CA, USA. New York: IEEE Press, 2015.
- [34] Randel S, Winzer P J, Montoliu M, et al. Complexity analysis of adaptive frequency-domain equalization for MIMO-SDM transmission[C]//39th European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC 2013), September 22-26, 2013, London, UK. London: Institution of Engineering and Technology, 2013: 801-803.
- [35] Shibahara K, Mizuno T, Lee D, et al. DMD-unmanaged long-haul SDM transmission over 2500-km 12-core \times 3-mode MC-FMF and 6300-km 3-mode FMF employing intermodal interference canceling technique[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(1): 138-147.
- [36] Mori T, Sakamoto T, Wada M, et al. Few-mode fiber for mode-division-multiplexed transmission with MIMO DSP[C]//Asia Communications and Photonics Conference 2013, November 12-15, 2013, Beijing, China. Washington, D. C.: Optica Publishing Group, 2013: AW3C.1.
- [37] Sillard P. Next-generation fibers for space-division-multiplexed transmissions[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(5): 1092-1099.
- [38] 张天. 模式复用系统的模式相关损耗补偿研究[D]. 长春: 吉林大学, 2019.
- Zhang T. Research on compensation technology for mode division multiplexing system with MDL[D]. Changchun: Jilin University, 2019.
- [39] 张艺赢. 短距离模式复用通信系统中新型少模光纤研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2021.
- Zhang Y Y. Research on novel few-mode fibers for short-reach mode division multiplexing communication systems[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2021.
- [40] Palmieri L. Coupling mechanism in multimode fibers[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9009: 90090G.
- [41] Ho K P, Kahn J M. Delay-spread distribution for multimode fiber with strong mode coupling[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(21): 1906-1909.
- [42] Winzer P J, Foschini G J. MIMO capacities and outage probabilities in spatially multiplexed optical transport systems[J]. *Optics Express*, 2011, 19(17): 16680-16696.
- [43] Ferreira F M, Suibhne N M, Sánchez C, et al. Suppression of nonlinear distortion in few-mode fibres using strong mode coupling[C]//2016 21st European Conference on Networks and Optical Communications (NOC), June 1-3, 2016, Lisbon, Portugal. New York: IEEE Press, 2016: 41-45.
- [44] 张双熙. 少模光纤模式复用系统的均衡算法研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2018.
- Zhang S X. Research on equalization technology in few mode fiber mode division multiplexing systems[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2018.
- [45] 刘亚军. 大容量光纤传输系统中模式复用关键技术研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
- Liu Y J. Research on key technology of mode multiplexing in large capacity optical fiber transmission system[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017.
- [46] 赵海远. 少模光纤模式复用传输系统链路分析与信号处理研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2015.
- Zhao H Y. The research on link analyses and signal processing for mode division multiplexing system in few-mode fiber[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2015.
- [47] 黎泉. 基于多模光纤的模式复用—偏振复用及MIMO均衡方法研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2016.
- Li L. The research on PM-MDM technology and MIMO equalization method in multimode fiber[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2016.
- [48] Gruner-Nielsen L, Sun Y, Nicholson J W, et al. Few mode transmission fiber with low DGD, low mode coupling, and low loss[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(23): 3693-3698.
- [49] He X, Zhou X, Wang J Y, et al. A fast convergence frequency domain least Mean Square algorithm for compensation of differential mode group delay in few mode fibers[C]//Optical Fiber Communication Conference/National Fiber Optic Engineers Conference 2013, March 17-21, 2013, Anaheim, California. Washington, D. C.: Optica Publishing Group, 2013: OM2C.4.

- [50] Hsu R C J, Shah A, Jalali B. Coherent optical multiple-input multiple-output communication[J]. *IEICE Electronics Express*, 2004, 1(13): 392-397.
- [51] Shah A R, Hsu R C J, Tarighat A, et al. Coherent optical MIMO (COMIMO) [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2005, 23(8): 2410-2419.
- [52] Li A, Amin A A, Chen X, et al. Reception of mode and polarization multiplexed 107-Gb/s CO-OFDM signal over a two-mode fiber[C]//*Optical Fiber Communication Conference/National Fiber Optic Engineers Conference 2011, March 6-10, 2011, Los Angeles, California. Washington, D. C.: Optica Publishing Group, 2011: PDPB8.*
- [53] Salsi M, Koebele C, Sperti D, et al. Transmission at 2×100 Gb/s, over two modes of 40km-long prototype few-mode fiber, using LCOS-based mode multiplexer and demultiplexer[C]//*2011 Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference, March 6-10, 2011, Los Angeles, CA, USA. New York: IEEE Press, 2011.*
- [54] Ryf R, Randel S, Gnauck A H, et al. Space-division multiplexing over 10 km of three-mode fiber using coherent 6×6 MIMO processing[C]//*Optical Fiber Communication Conference/National Fiber Optic Engineers Conference 2011, March 6-10, 2011, Los Angeles, California. Washington, D.C.: Optica Publishing Group, 2011: PDPB10.*
- [55] Ip E, Bai N, Huang Y K, et al. $88 \times 3 \times 112$ -Gb/s WDM transmission over 50 km of three-mode fiber with inline few mode fiber amplifier[C]//*37th European Conference and Exposition on Optical Communications, September 18-22, 2011, Geneva. Washington, D. C.: Optica Publishing Group, 2011: Th.13.C.2.*
- [56] Koebele C, Salsi M, Milord L, et al. 40km transmission of five mode division multiplexed data streams at 100 Gb/s with low MIMO-DSP complexity[C]//*2011 37th European Conference and Exhibition on Optical Communication, September 18-22, 2011, Geneva, Switzerland. New York: IEEE Press, 2011.*
- [57] 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.
- [58] Ip E, Bai N, Huang Y K, et al. 6×6 MIMO transmission over $50+25+10$ km heterogeneous spans of few-mode fiber with inline erbium-doped fiber amplifier [C]//*Optical Fiber Communication Conference 2012, March 4-8, 2012, Los Angeles, CA, USA. Washington, D. C.: Optica Publishing Group, 2012: OTu2C.4.*
- [59] Randel S, Ryf R, Gnauck A H, et al. Mode-multiplexed 6×20 -GBd QPSK transmission over 1200-km DGD-compensated few-mode fiber[C]//*Optical Fiber Communication Conference (2012) (ECOC), September 16-20, 2012, Los Angeles, CA, USA. New York: IEEE Press, 2012.*
- [60] Ryf R, Mestre M A, Randel S, et al. Mode-multiplexed transmission over a 209-km DGD-compensated hybrid few-mode fiber span[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(21): 1965-1968.
- [61] Sleiffer V A J M, Jung Y, Veljanovski V, et al. 73.7 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-B438.
- [62] Ryf R, Fontaine N K, Mestre M A, et al. 12×12 MIMO transmission over 130-km few-mode fiber[C]//*Frontiers in Optics 2012/Laser Science XXVIII, October 14-18, 2012, Rochester, New York. Washington, D.C.: Optica Publishing Group, 2012: FW6C.4.*
- [63] Ryf R, Randel S, Fontaine N K, et al. 32-bit/s/Hz spectral efficiency WDM transmission over 177-km few-mode fiber[C]//*Optical Fiber Communication Conference/National Fiber Optic Engineers Conference 2013, March 17-21, 2013, Anaheim, California. Washington, D.C.: Optica Publishing Group, 2013: PDP5A.1.*
- [64] Ip E, Li M J, Bennett K, et al. $146\lambda \times 6 \times 19$ Gbaud wavelength and mode division multiplexed transmission over 10×50 km spans of few mode fiber with a gain equalized few mode EDFA[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(4): 790-797.
- [65] Chen Y K, Lobato A, Jung Y, et al. 41.6 Tbit/s C-band SDM OFDM transmission through 12 spatial and polarization modes over 74.17 km few mode fiber[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(7): 1440-1444.
- [66] Shibahara K, Lee D, Kobayashi T, et al. Dense SDM ($12\text{-core} \times 3\text{-mode}$) transmission over 527 km with 33.2-ns mode-dispersion employing low-complexity parallel MIMO frequency-eomain equalization[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(1): 196-204.
- [67] Rademacher G, Ryf R, Fontaine N K, et al. 3500-km mode-multiplexed transmission through a three-mode graded-index few-mode fiber link[C]//*2017 European Conference on Optical Communication (ECOC), September 17-21, 2017, Gothenburg, Sweden. New York: IEEE Press, 2017.*
- [68] van Weerdenburg J, Ryf R, Alvarado-Zacarias J C, et al. 138-Tb/s mode- and wavelength-multiplexed transmission over six-mode graded-index fiber[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(6): 1369-1374.
- [69] Mizuno T, Shibahara K, Ono H, et al. Long-distance PDM-32QAM 3-mode fibre transmission over 1000 km using hybrid multicore EDFA/Raman repeated amplification with cyclic mode permutation[C]//*2018 European Conference on Optical Communication (ECOC), September 23-27, 2018, Rome, Italy. New York: IEEE Press, 2018.*
- [70] Shibahara K, Mizuno T, Lee D, et al. Iterative unreplicated parallel interference canceler for MDL-tolerant dense SDM ($12\text{-core} \times 3\text{-mode}$) transmission over 3000 km[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(6): 1560-1569.
- [71] Shibahara K, Mizuno T, Kawakami H, et al. Full C-band 3060-km DMD-unmanaged 3-mode transmission

- with 40.2-Tb/s capacity using cyclic mode permutation [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(2): 514-521.
- [72] van Uden R G H, Okonkwo C M, Sleiffer V A J M, et al. MIMO equalization with adaptive step size for few-mode fiber transmission systems[J]. *Optics Express*, 2014, 22(1): 119-126.
- [73] He X, Weng Y, Wang J, et al. Fast convergent frequency-domain MIMO equalizer for few-mode fiber communication systems[J]. *Optics Communications*, 2018, 409: 131-136.
- [74] Fazea Y, Sajat M S, Ahmad A, et al. Channel optimization in mode division multiplexing using neural networks[C]//2018 IEEE 14th International Colloquium on Signal Processing & Its Applications, March 9-10, 2018, Penang, Malaysia. New York: IEEE Press, 2018: 173-175.
- [75] Poudel B, Oshima J, Kobayashi H, et al. MIMO detection using a deep learning neural network in a mode division multiplexing optical transmission system[J]. *Optics Communications*, 2019, 440: 41-48.
- [76] El Gamal H, Damen M O. Universal space-time coding [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2003, 49(5): 1097-1119.
- [77] Hei Y Q, Li W T, Xu X C, et al. Orthogonal STBC for MDL mitigation in mode division multiplexing system with MMSE channel estimation[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(10): 1858-1867.
- [78] Tarokh V, Jafarkhani H, Calderbank A R. Space-time block codes from orthogonal designs[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1999, 45(5): 1456-1467.
- [79] Damen M O, El Gamal H, Beaulieu N C. Linear threaded algebraic space-time constellations[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2003, 49(10): 2372-2388.
- [80] 李力. 模分复用系统的 MIMO 检测技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018.
Li L. Research on MIMO detection techniques in MDM systems[D]. Xi'an: Xidian University, 2018.
- [81] Amhoud E M, Othman G R B, Jaouën Y. Design criterion of space-time codes for SDM optical fiber systems[C]//2016 23rd International Conference on Telecommunications (ICT), May 16-18, 2016, Thessaloniki, Greece. New York: IEEE Press, 2016.
- [82] Xin Y C, Tian Y, Hua B, et al. Mode-interleaving method with improved transmission reach for MDL-impaired MDM systems[C]//Asia Communications and Photonics Conference 2016, November 2-5, 2016, Wuhan, China. Washington, D. C.: Optica Publishing Group, 2016: AF2A.99.
- [83] Jaouën Y, Amhoud E M, Othman G R B. Optical MIMO techniques for MDL mitigation in few-mode fiber transmission systems[C]//Asia Communications and Photonics Conference 2016, November 2-5, 2016, Wuhan, China. Washington, D. C.: Optica Publishing Group, 2016: ATh2C.3.
- [84] Shibahara K, Mizuno T, Takara H, et al. Space-time coding-assisted transmission for mitigation of MDL impact on mode-division multiplexed signals[C]//2016 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), March 20-22, 2016, Anaheim, California, USA. Washington, D. C.: Optica Publishing Group, 2016: Th4C.4.
- [85] Amhoud E M, Othman G R B, Jaouën Y. Concatenation of space-time coding and FEC for few-mode fiber systems [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(7): 603-606.
- [86] Damen O, Othman G R B. Near-optimal detection of TAST codes over multimode optical fiber channels[C]//2018 Seventh International Conference on Communications and Networking (ComNet), November 1-3, 2018, Hammamet, Tunisia. New York: IEEE Press, 2018.
- [87] Damen O, Rekaya-Ben Othman G. On the performance of spatial modulations over multimode optical fiber transmission channels[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2019, 67(5): 3470-3481.
- [88] Hei Y Q, Li L, Song W T, et al. Hybrid IRS and DFE detection scheme for MDL-impaired transmission with TAST coding[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(17): 4251-4259.
- [89] Awwad E, Othman G R B, Jaouën Y. Space-time coding and optimal scrambling for mode multiplexed optical fiber systems[C]//2015 IEEE International Conference on Communications, June 8-12, 2015, London, UK. New York: IEEE Press, 2015: 5228-5234.
- [90] El Mehdi A, Jaouën Y, Rekaya Ben-Othman G. Joint space-time coding and FEC for MDL mitigation in few-mode fiber systems[C]//Advanced Photonics 2016 (IPR, NOMA, Sensors, Networks, SPPCom, SOF), July 18-20, 2016, Vancouver. Washington, D. C.: Optica Publishing Group, 2016: JT4A.35.
- [91] Amhoud E M, Othman G R B, Bigot L, et al. Experimental demonstration of space-time coding for MDL mitigation in few-mode fiber transmission systems [C]//2017 European Conference on Optical Communication (ECOC), September 17-21, 2017, Gothenburg, Sweden. New York: IEEE Press, 2017.
- [92] Studer C, Fateh S, Seethaler D. ASIC implementation of soft-input soft-output MIMO detection using MMSE parallel interference cancellation[J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2011, 46(7): 1754-1765.
- [93] Shibahara K, Mizuno T, Miyamoto Y. LDPC-coded FMF transmission employing unreplicated successive interference cancellation for MDL-impact mitigation[C]//2017 European Conference on Optical Communication (ECOC), September 17-21, 2017, Gothenburg, Sweden. New York: IEEE Press, 2017.
- [94] Shibahara K, Mizuno T, Miyamoto Y. Interference cancelling techniques for long-haul MIMO-SDM transmission[C]//Advanced Photonics 2018 (BGPP, IPR, NP, NOMA, Sensors, Networks, SPPCom, SOF), July 2-5, 2017, Zurich. Washington, D. C.: Optica Publishing Group, 2018: SpW1G.4.