

基于 MIMO 预均衡的模分复用无源光网络模式间串扰的消除方法

欧阳远江, 张倩武*, 黄焯恬, 段帅航, 袁珂晨, 李迎春, 宋英雄, 汪敏

上海大学通信与信息工程学院特种光纤与光接入网重点实验室, 特种光纤与先进通信国际合作联合实验室, 上海 200444

摘要 为解决模分复用无源光网络(MDM-PON)模式间串扰的问题,本文提出了一种基于多输入多输出(MIMO)预均衡的串扰消除方法。利用帧头插入的时分训练序列,在接收端相干检测后估计信道的冲激响应,并将其用于发送端 MIMO 均衡器抽头系数的计算。采用线偏振(LP)模式的模分复用(MDM)传输仿真系统对所提方法进行验证,并将所提方法与基于迫零(ZF)预编码的串扰消除方法进行了对比。结果表明:连接 5 km 少模光纤(FMF)时,与迫零预编码相比,MIMO 预均衡使各模式(LP₀₁、LP₁₁、LP₂₁、LP₃₁)信号的误码率在满足 7% 硬判决-前向纠错(HD-FEC)门限时的发送光功率分别降低了 3.0 dB、4.1 dB、1.2 dB 和 9.2 dB。另外,考虑到光纤色度色散的影响,本文进一步提出了带色散预补偿的 MIMO 预均衡器结构,该结构可以实现对色散的补偿。

关键词 光通信; 无源光网络; 模分复用; 多输入多输出; 预均衡; 模式串扰

中图分类号 TN915.62

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL220688

1 引言

无源光网络(PON)以成本低、带宽容量大等优点成为光接入网的主要解决方案之一,基于时分复用的 PON 目前已被广泛用于商业化部署^[1-2]。此外,基于波长和频率等复用维度的新型 PON 架构也相继被提出并用于扩展网络规模和提高网络容量^[3-4]。然而,随着近年来高清视频点播、在线会议等终端用户带宽需求的持续增长,现有 PON 技术将面临容量瓶颈。近期,基于少模光纤(FMF)的模分复用(MDM)技术被提出,该技术有望通过引入模式这一新的复用维度进一步提升 PON 的容量,从而支持更高的传输速率和更多的用户数量^[5-6]。对于以模式划分用户的模分复用无源光网络(MDM-PON)^[7]来说,FMF 中的模式串扰会导致其下行传输链路中加载在不同模式上的用户信号相互干扰,从而影响传输性能^[8]。

针对如何解决 MDM 传输中的模式串扰问题,国内外已有相关研究。对于 MDM-PON 这类短距离传输系统,一般使用基于模群或线偏振(LP)模式的弱耦合传输方案^[9]。在此基础上,改进光纤折射率分布等参数或增加纤芯数目可以实现低串扰特性的 FMF^[10-12]。然而,这类器件在设计、制造工艺上通常较为复杂。使用数字信号处理(DSP)消除串扰是另一种方法,这种方法

通常需要在接收端同时接收所有模式并使用多输入多输出(MIMO)均衡^[13-16]。该方法并不适合 MDM-PON 场景下点到多点的结构特点,因为每个用户接收所有模式信号将导致接收端的复杂度和成本增加。

本课题组拟在发送端采用 DSP 方法解决上述问题。常用的 DSP 方法有线性预编码技术,包括迫零(ZF)预编码^[17]、最大比传输等^[18]。2018 年,美国贝尔实验室的 Chen 等^[19]利用单端信道估计和线性预编码在 20 m 多模光纤中实现了 6 个空间偏振模式的传输。2021 年,上海大学的富惠雯等^[20]在基于 IM-DD 的模群复用系统中使用基于单端信道估计的预编码方法实现了 2 个 LP 模式的 500 m FMF 传输。2021 年,中山大学的 Huang 等^[21]在基于轨道角动量模式的水下无线光通信系统中利用 ZF 预编码消除了由湍流引起的模式间串扰,实现了 4 个模式的传输。在上述研究中,基于线性预编码的串扰消除方法无法解决符号间干扰(ISI)问题。随着传输距离和传输速率增加,ISI 的影响将变大,使用线性预编码将无法获得良好的性能。除了模式串扰之外,FMF 中的模式色散和差分模式群时延会进一步引入 ISI,因此需要在补偿模式串扰的同时对 ISI 问题进行处理。

针对上述问题,本文提出了一种基于 MIMO 预均衡的 MDM-PON 下行传输模式串扰消除方法。利用

收稿日期: 2022-03-21; 修回日期: 2022-05-01; 录用日期: 2022-05-10; 网络首发日期: 2022-05-20

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB2900800)、上海市科委重点项目(20511102400)、上海市自然科学基金(20ZR1420900)、高等学校学科创新引智计划(D20031)

通信作者: *zhangqianwu@shu.edu.cn

帧头插入的时分训练序列,在接收端相干检测^[22]后使用自适应算法对 MIMO 信道的冲激响应进行估计。发送端利用反馈的信道参数基于迫零准则计算 MIMO 均衡器的抽头系数。在使用 LP 模式的 MDM 传输仿真系统中对所提方法进行验证,结果显示:与基于 ZF 预编码的串扰消除方法对比,所提方法在光背靠背(OBTB)、5 km FMF 两种情况下均具有更好的性能。另外,本文还提出了带色散预补偿的 MIMO 预均

衡结构,该结构可以实现对光纤色度色散的补偿,进一步提高了所提方法的性能。

2 基本原理

本文提出的基于 MIMO 预均衡的 MDM-PON 下行链路模式串扰消除方法的原理如图 1 所示,该图主要由发送端、模分信道、各模式接收端以及信道参数估计反馈几部分构成。

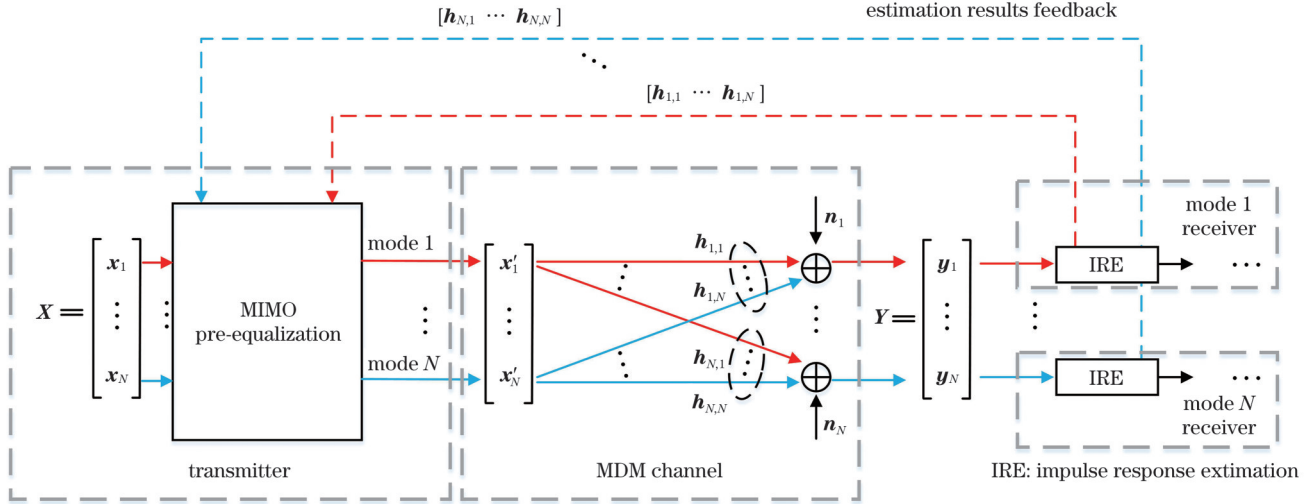


图 1 基于 MIMO 预均衡的 MDM-PON 下行链路模式串扰消除原理图

Fig. 1 Principal diagram of MIMO pre-equalization based mode crosstalk mitigation in MDM-PON downlink

由于模分信道中模式串扰、模式色散以及差分模式群时延等因素的影响,发送端第 i 个模式到接收端第 j 个模式间的信道冲激响应用向量 $h_{i,j}$ 表示。使用 N 个模式传输时,将发送信号表示为 $X = [x_1^T \ x_2^T \ \dots \ x_N^T]^T$ 。在不进行 MIMO 预均衡的情况下,通过模分信道后的接收信号 $Y = [y_1^T \ y_2^T \ \dots \ y_N^T]^T$ 满足

$$y_i = \sum_{j=1}^N h_{i,j} * x_j + n_i, \quad 1 \leq i, j \leq N, \quad (1)$$

式中: x_j, y_i 表示各模式发送、接收信号的向量; n_i 为接收端加性噪声向量; $*$ 代表卷积操作。

式(1)表明各模式接收信号中实际包含由 $h_{i,j} (i \neq j)$ 引入的其他模式信号的串扰。MDM-PON 中使用模式区分用户,因此下行链路各接收端仅对应接收一个模式的信号,此时串扰的存在会影响接收性能。要通过发送端预处理消除串扰就需要已知任意一对发送、接收模式间的信道冲激响应。针对 MDM-PON 下行链路点到多点的结构特点,本文采用在帧头插入时分训练序列的方法在各模式接收端实现对信道冲激响应的估计,使用的帧结构如图 2 所示。信道参数可以通过 MDM-PON 上行传输链路反馈回发送端,用于后续 MIMO 预均衡。

时分训练序列要求在帧头划分出与使用的模式数量相等的时隙(slot),并且每个时隙与一个模式相对应。对于各模式发送帧,在其帧头对应的时隙内插入

训练序列 t_{train}^i 。经模分信道传输后,各模式接收帧中除了对应的接收训练序列 $r_{\text{train}}^{(i,j)} (i=j)$ 外,还包含其他模式的串扰 $r_{\text{train}}^{(i,j)} (i \neq j)$ 。由于发送帧中不同模式的训练序列位于不同的时隙,因此接收帧中某一时隙内的接收信号可由式(2)计算得到。接收端利用不同时间隙内的接收信号和已知的发送信号,采用最小均方(LMS)自适应算法对信道冲激响应进行估计。

$$r_{\text{train}}^{(i,j)} = h_{i,j} * t_{\text{train}}^{(j)} + n_i, \quad 1 \leq i, j \leq N. \quad (2)$$

在此基础上,本文采用图 3(a)所示的线性 MIMO 均衡器进行预均衡。使用 N 个模式时,该结构由 $N \times N$ 个有限冲激响应(FIR)均衡器构成。使用 MIMO 均衡器能够消除模式相关性因素对信号造成的影响,包括模式耦合引起的串扰以及由模式色散、差分模式群时延导致的 ISI。然而,除了上述因素以外,光纤中的色度色散也会引起 ISI,并会导致接收端无法对模式选择性因素的影响进行准确估计,此时发送端 MIMO 预均衡需要同时对包括色度色散在内的所有因素的影响进行消除。考虑到光纤中的色度色散的影响具有比较稳定的特点,本文进一步提出了如图 3(b)所示的带色散预补偿的两阶段 MIMO 预均衡结构。该结构在发送端预先消除色度色散的影响,使得接收端估计结果更加准确,此时 MIMO 均衡器只需要对模式选择性因素的影响进行补偿即可。不同于单模光纤(SMF),FMF 中的各 LP 模式具有不同的色散系数。

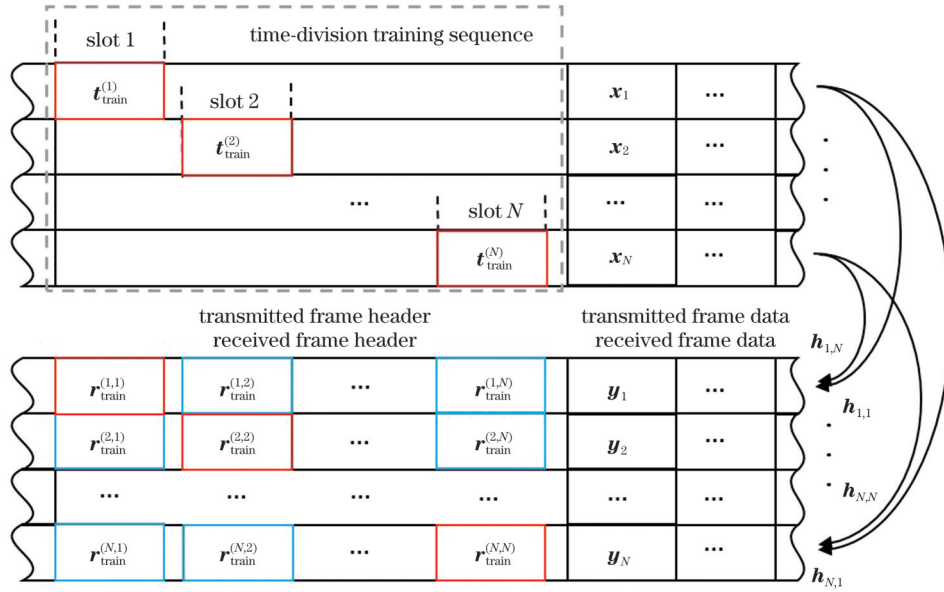


图 2 用于 MDM-PON 下行链路信道冲激响应估计的帧结构

Fig. 2 Frame structure for MDM-PON downlink channel impulse response estimation

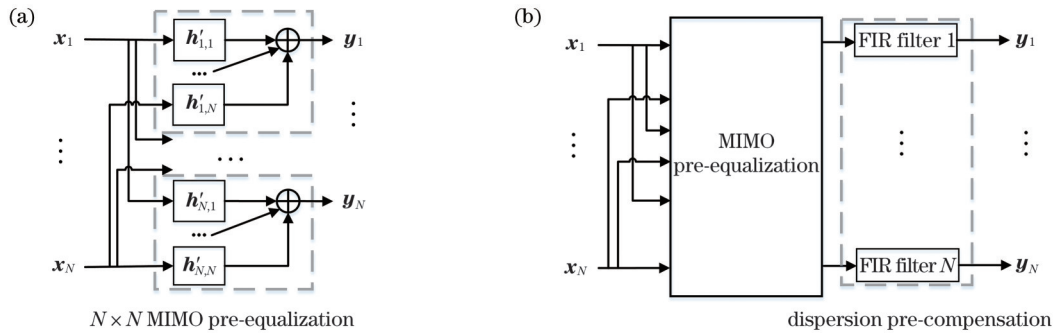


图 3 发送端 MIMO 预均衡器结构。(a) 不带色散预补偿; (b) 带色散预补偿

Fig. 3 MIMO pre-equalizer structure at the transmitter. (a) Without dispersion pre-compensation; (b) with dispersion pre-compensation

对于 MIMO 均衡器的各路输出, 需要根据其对应模式的色散系数分别进行色散预补偿。该过程使用固定抽头系数的 FIR 滤波器实现, 抽头系数可以根据色散冲激响应计算得到^[23]。

在进行预均衡之前, 发送端基于迫零准则利用接收端反馈的信道参数计算 MIMO 均衡器的抽头系数,

该过程如图 4 所示。利用快速傅里叶变换(FFT)将长度为 L 的信道冲激响应 $h_{i,j}$ 变换到频域得到 $H_{i,j}$, 并分别对各频率分量处信道频率响应值 $H_{i,j}^{(k)}$ 构成的大小为 $N \times N$ 的矩阵求逆。将经过逆运算之后的信道频率响应 $H_{i,j}'$ 变换回时域得到 MIMO 均衡器中各 FIR 均衡器对应的抽头系数向量 $h'_{i,j}$ 。

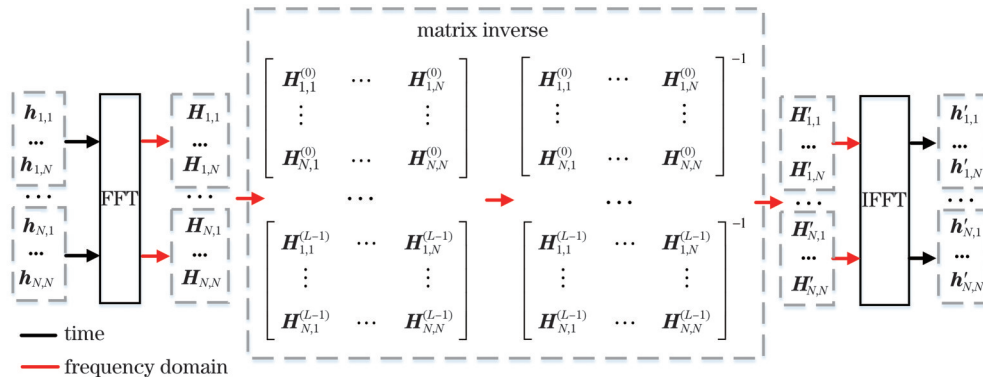


图 4 发送端 MIMO 预均衡器抽头系数的计算过程

Fig. 4 Tap coefficient calculation process for MIMO pre-equalizer at the transmitter

3 仿真验证和结果分析

为验证本文提出的基于 MIMO 预均衡的 MDM-PON 模式间串扰消除方法的有效性,使用 VPI Transmission Maker 搭建了如图 5 所示的 MDM 传输仿真系统,并使用 MATLAB 对数据进行离线 DSP。仿真中使用的 FMF 相关参数设置如表 1 所示^[24],该光纤支持 LP₀₁ 到 LP₁₂ 共 6 个 LP 模式。为保证弱耦合条件,仅选择 LP₀₁、LP₁₁、LP₂₁ 和 LP₃₁ 作为传输模式。

仿真中使用模式复用器 (Mode MUX) 的 LP₀₁、LP_{11a}、LP_{21a}、LP_{31a} 端口作为各模式的输入,使用模式解复用器 (Mode DeMUX) 的 LP₀₁、LP_{11a}+LP_{11b}、LP_{21a}+LP_{21b}、LP_{31a}+LP_{31b} 端口作为各模式的输出。并且,将模式复用器的输入/输出耦合系数矩阵按表 2 进行设置^[24],用于仿真由复用/解复用器引入的模式串扰。需要指出的是,本文主要研究模式串扰的影响,因此未考虑具有模式依赖性的插入损耗等因素的影响。

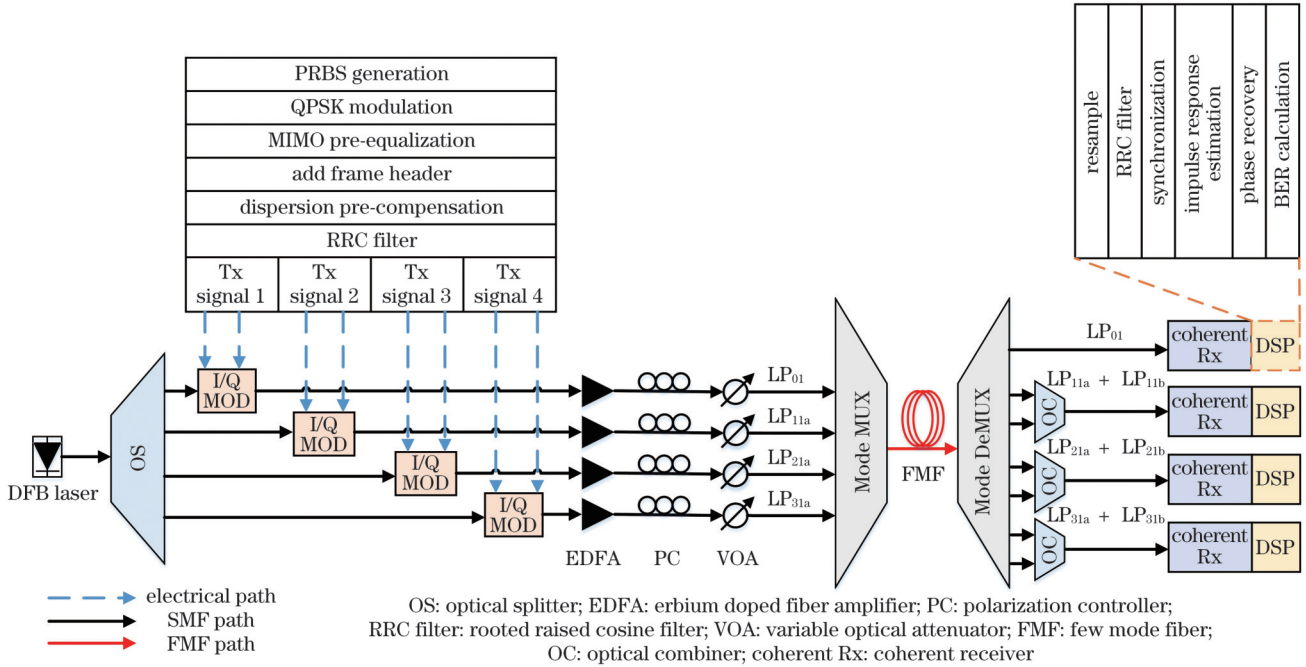


图 5 使用 LP 模式的 MDM 传输仿真系统框图

Fig. 5 Block diagram for MDM transmission simulation system using linear polarization mode

表 1 仿真中使用的 FMF 的相关参数

Table 1 Parameters of FMF used in simulation

Parameter	Content
Transversal index profile	Step index
Core refractive index	1.46
Index contrast	0.008
Core diameter / μm	16
Effective index (LP ₀₁ , LP ₁₁ , LP ₂₁ , LP ₀₂ , LP ₃₁ , LP ₁₂)	1.458, 1.456, 1.453, 1.452, 1.45, 1.449
Attenuation / (dB·km ⁻¹)	0.2
Chromatic dispersion / (ps·nm ⁻¹ ·km ⁻¹) (LP ₀₁ , LP ₁₁ , LP ₂₁ , LP ₀₂ , LP ₃₁ , LP ₁₂)	25, 28, 29, 25, 23, -48

在发送端,由 MATLAB 程序生成 4 路符号速率为 25 Gbaud 的 QPSK 发送信号 (Tx signal), 分别对应 LP₀₁、LP₁₁、LP₂₁ 和 LP₃₁ 模式。其中,每个模式分别使用长度为 2¹⁶ 的 PRBS 序列进行 QPSK 调制,生成发送符号。所有模式的发送符号都需要进行 MIMO 预均衡处理,均衡器抽头系数用接收端反馈的信道参数计算得到。对于预均衡处理后的发送符号,添加对应模式

的时分训练序列帧头,构成完整的发送帧,并以 4 倍采样率进行上采样。其中,帧头各模式对应时隙内插入长度为 500 个符号的训练序列。对于带色散预补偿的两阶段 MIMO 预均衡,还需要根据各模式的色散系数对 MIMO 均衡器输出的每路信号单独进行色散预补偿。最后通过滚降系数为 0.05 的根升余弦 (RRC) 滤波器得到最终的发送信号。发送端采用 IQ 调制,将生

表 2 仿真中 Mode MUX 耦合系数矩阵

Table 2 Coupling coefficient matrix of Mode MUX in simulation

Input	Output			
	LP ₀₁	LP _{11a}	LP _{21a}	LP _{31a}
LP ₀₁	1.00	0.10	0.08	0.09
LP _{11a}	0.09	1.00	0.08	0.08
LP _{21a}	0.06	0.14	1.00	0.10
LP _{31a}	0.06	0.08	0.15	1.00

成的 4 路 QPSK 信号的实部、虚部分别连接至 IQ 调制器(IQ-MOD)的对应端口。使用中心波长为 1550 nm、线宽为 100 kHz 的分布式反馈(DFB)激光器作为光源。将激光器的输出光功率设置为 13 dBm,激光通过分光比为 25:25:25:25 的光分路器(OS)分为 4 路,分

表 3 OBTB、5 km FMF 下,Mode MUX 输入、Mode DeMUX 输出间的功率转移矩阵

Table 3 Power transfer matrix between Mode MUX input and Mode DeMUX output under OBTB and 5 km FMF

Input power / dBm	Output power / dBm							
	LP ₀₁		LP ₁₁		LP ₂₁		LP ₃₁	
	OBTB	FMF	OBTB	FMF	OBTB	FMF	OBTB	FMF
0(LP ₀₁)	-0.03	-1.31	-22.62	-20.70	-24.76	-21.33	-23.40	-20.22
0(LP ₁₁)	-20.98	-19.37	-3.07	-5.92	-24.80	-21.40	-24.80	-20.73
0(LP ₂₁)	-24.48	-20.82	-19.92	-19.28	-3.08	-5.38	-22.58	-19.81
0(LP ₃₁)	-24.19	-20.70	-24.61	-21.26	-19.51	-18.98	-3.09	-3.65

接收端对模式解复用器输出的各路信号分别进行相干接收,接收机的带宽为 37.5 GHz,之后在 MATLAB 中对接收信号进行离线 DSP。该过程首先通过重采样调整接收信号到 2 倍采样率,并通过滚降系数为 0.05 的 RRC 滤波器进行滤波,接着利用各模式对应的发送帧帧头训练序列以求自相关的方式进行帧同步。接收帧中的帧头部分用于信道冲激响应估计,数据部分在使用 Viterbi-Viterbi 算法进行相位恢复后用于误码率计算。

在 MDM-PON 中,传输链路同时包含 FMF 和 SMF,其中在局端的光线路终端(OLT)到小区之间使用 FMF 传输,而从模式解复用器输出到用户侧光网络单元(ONU)之间使用 SMF 传输^[25]。对于 PON 来说,其传输距离一般在 20~60 km 范围内^[26],而目前 MDM-PON 研究中采用的 FMF 长度大多在 10 km 以内^[7,27-28]。本文中的仿真系统采用 5 km FMF 作为少模传输链路。仿真过程侧重于对提出的用于解决 MDM-PON 中模式间串扰问题的方法的有效性进行验证和分析,因此仅考虑 MDM-PON 中少模链路的影响而未加入单模链路。由于仿真中仅采用 5 km FMF 作为传输信道,传输过程的功率损耗小,并且在接收端使用接收灵敏度高的相干接收方式,因此发送端使用的发送光功率很小。在 -20 dBm 到 -44 dBm 范围内调整发送光功率,对 OBTB 和 5 km FMF 两种情况下各模式的传输性能进行分析,采用 7% HD-FEC 的误码率门限,即 3.8×10^{-3}

别作为各模式信号的光载波。调制器输出先经过掺铒光纤放大器(EDFA)进行放大,之后经由偏振控制器(PC)和可调节光衰减器(VOA)进入模式复用器的对应端口。其中,放大器的输出光功率设置为 0 dBm,偏振控制器和可调节光衰减器分别用于调整信号的偏振态和发送光功率。

模式复用器输出的少模信号分别在 OBTB 和 5 km FMF 两种情况下传输。两种情况下从复用器各输入端口到解复用器各输出端口间的功率转移矩阵如表 3 所示,该矩阵通过固定某个模式的发送光功率为 0 dBm 测量所有模式的接收光功率得到。需要注意的是,由于仿真中 LP₁₁、LP₂₁、LP₃₁ 三个模式的信号均由模式复用器中对应的简并模端口(LP_{11a}、LP_{21a}、LP_{31a})进入,因此耦合进 FMF 后的光功率与 LP₀₁ 模式相差约 3 dB。

的误码率(R_{BE})。首先测量得到了两种情况下无串扰(w/o crosstalk)、有串扰(w/crosstalk)传输误码率随发送光功率变化的曲线,如图 6 所示。

无串扰传输是指每次仅发送、接收同一个模式的信号,而有串扰传输是指每次发送、接收所有模式的信号。两种方法下误码率的差别可以反映信号受模式串扰影响的程度。在 OBTB 情况下,信号仅受模式复用/解复用器中串扰的影响。有串扰传输时 LP₀₁、LP₁₁、LP₂₁、LP₃₁ 模式信号满足误码率门限时的发送光功率相比无串扰传输时分别提高了 1 dB、2.8 dB、2.5 dB 和 2 dB。其中,LP₀₁ 模式相比其他三个模式有更低的插入损耗,因此受串扰的影响更小。连接 5 km FMF 后,各模式的有串扰传输性能进一步降低,此时 LP₀₁ 模式信号满足误码率门限时的发送光功率相比无串扰传输时提高了 2.8 dB,而其他三个模式信号的有串扰传输误码率曲线只能接近或刚好位于门限且无法随发送光功率的增加而继续降低。以上结果表明,来自 FMF 中的模式串扰的影响要大于来自模式复用/解复用器中的模式串扰,是导致当前系统中各模式有串扰传输性能降低的主要因素。

在上述分析的基础上,本文进一步研究了 OBTB 和 5 km FMF 两种情况下使用 MIMO 预均衡方法前后有串扰传输误码率的变化,并将其与基于 ZF 预编码的串扰消除方法的结果进行了对比。图 7 所示为各模式在两种情况下有串扰传输、使用 MIMO 预均衡、使用 ZF 预编码时误码率随发送光功率变化的曲线。

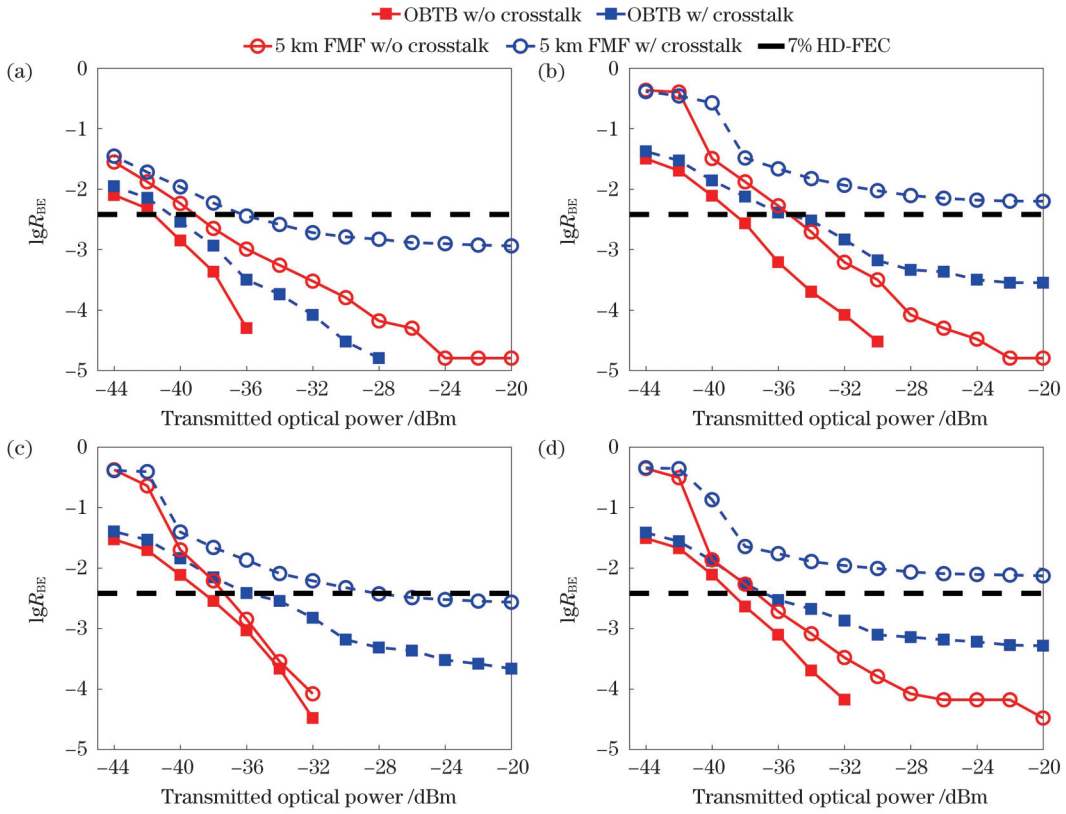


图 6 OBTB 和 5 km FMF 下有无串扰误码率随发送光功率的变化。(a)LP₀₁模式;(b)LP₁₁模式;(c)LP₂₁模式;(d)LP₃₁模式

Fig. 6 BER versus transmitted optical power with or without crosstalk under OBTB and 5 km FMF. (a) LP₀₁ mode; (b) LP₁₁ mode; (c) LP₂₁ mode; (d) LP₃₁ mode

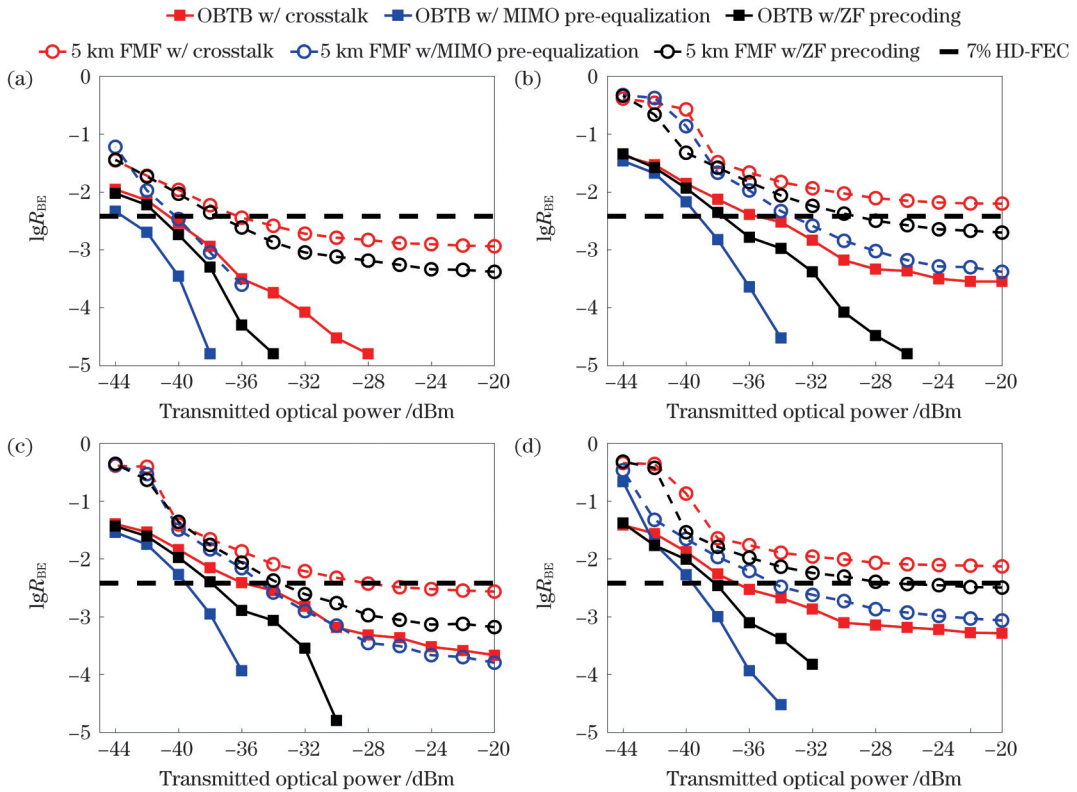


图 7 OBTB 和 5 km FMF 下有串扰、MIMO 预均衡和 ZF 预编码时误码率随发送光功率的变化。(a)LP₀₁模式;(b)LP₁₁模式;(c)LP₂₁模式;(d)LP₃₁模式

Fig. 7 BER versus transmitted optical power with crosstalk, with MIMO pre-equalization and with ZF precoding under OBTB and 5 km FMF. (a) LP₀₁ mode; (b) LP₁₁ mode; (c) LP₂₁ mode; (d) LP₃₁ mode

可以看到,在使用 MIMO 预均衡、ZF 预编码后,各模式有串扰传输误码率都有所降低。在 OBTB 情况下, MIMO 预均衡使 LP₀₁、LP₁₁、LP₂₁、LP₃₁ 模式信号达到误码率门限时的发送光功率相比 ZF 预编码分别降低了 1.6 dB、1.2 dB、1.5 dB 和 1.4 dB; 在 5 km FMF 情况下, MIMO 预均衡使 LP₀₁、LP₁₁、LP₂₁、LP₃₁ 模式信号达到误码率门限时的发送光功率相比 ZF 预编码分别降低了 3.0 dB、4.1 dB、1.2 dB 和 9.2 dB。这表明在 OBTB 和 5 km FMF 两种情况下 MIMO 预均衡的效果好于 ZF 预编码。在上述结果中,连接 FMF 时 MIMO 预均衡带来的性能改善相比 ZF 预编码更显著,且 FMF 条件下的改善效果相比 OBTB 更加明显。这是由于连接 FMF 后,模分信道中除模式串扰外还存在模式色散以及差分模式群时延,这会导致信号在传输过程中出现 ISI。ZF 预编码虽然能够降低各模式信号间

的串扰,但无法消除信号中存在的 ISI,而 MIMO 预均衡在降低串扰的基础上采用多抽头 FIR 均衡器,能够有效消除 ISI。另外,在基于发送端预处理的串扰消除方法中,信道估计结果的准确性也会影响方法的性能。对比基于 ZF 预编码的串扰消除方法使用的最小二乘信道估计,本文采用的基于最小均方算法的自适应信道估计受加性噪声的影响更小,因此估计结果更加准确。

FMF 中传输的信号除了会受到模式串扰的影响外还会受到光纤色度色散的影响。本文提出了带色散预补偿的发送端 MIMO 预均衡结构,并对连接 5 km FMF 情况下各模式有串扰传输误码率以及在 MIMO 预均衡基础上使用色散预补偿前后的误码率进行了分析,测得的误码率随发送光功率变化的曲线如图 8 所示。

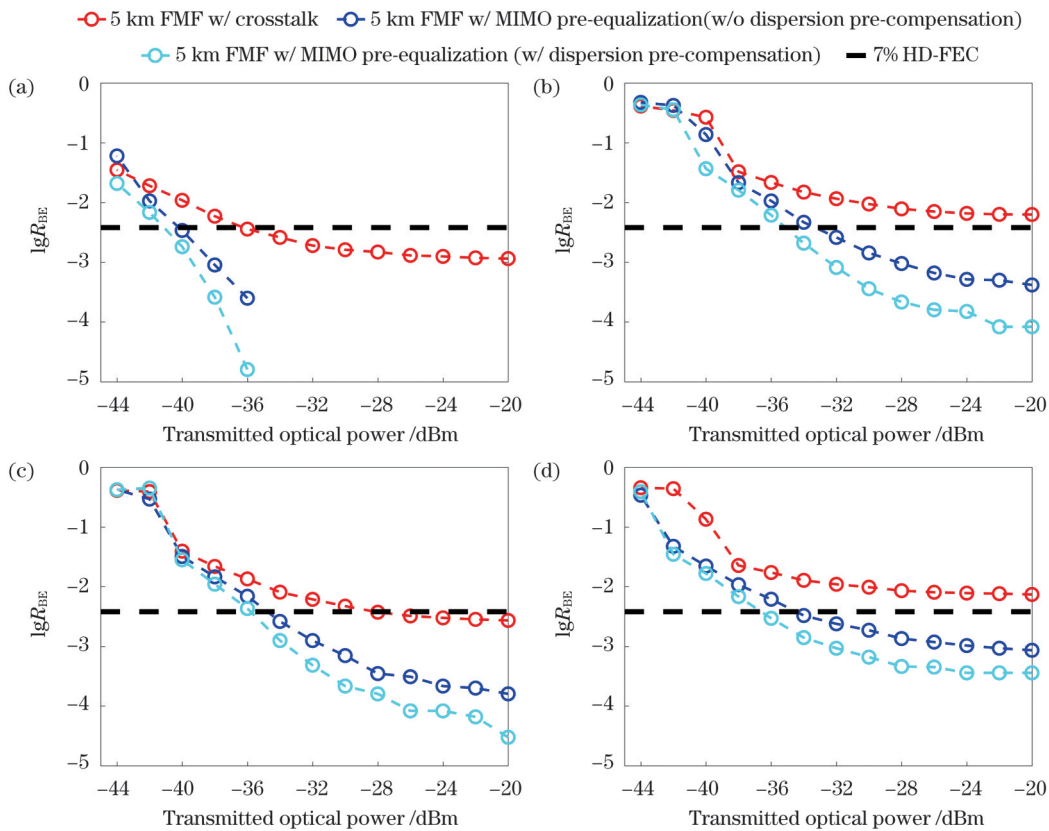


图 8 5 km FMF 下有串扰、不带色散预补偿 MIMO 预均衡和带色散预补偿 MIMO 预均衡误码率随发送光功率的变化。(a)LP₀₁ 模式;(b)LP₁₁ 模式;(c)LP₂₁ 模式;(d)LP₃₁ 模式

Fig. 8 BER versus transmitted optical power with crosstalk and MIMO pre-equalization (with or without dispersion pre-compensation) under 5 km FMF. (a) LP₀₁ mode; (b) LP₁₁ mode; (c) LP₂₁ mode; (d) LP₃₁ mode

由图 8 可以看到,使用色散预补偿后各模式信号达到误码率门限时的发送光功率相比不使用色散预补偿方法分别降低了 0.9 dB、2.0 dB、1.2 dB 和 2.4 dB。这表明在 MIMO 预均衡基础上对各模式信号进行色散预补偿能够带来性能上的进一步提升。这是由于在预先消除色度色散影响后接收端能够对模分信道中模式串扰、模式色散和差分模式群时延的影响进行

更加准确的估计,从而使得 MIMO 预均衡能够更好地消除 ISI。二者结合能够使发送端的预处理性能进一步提升。另外也可以看到使用色散预补偿前后的性能提升相比使用 MIMO 预均衡前后的性能提升更小,这是由于即使在不使用色散预补偿的情况下 MIMO 预均衡也能够对色度色散引起的 ISI 进行部分消除。

4 结 论

本文提出了基于 MIMO 预均衡的 MDM-PON 模式间串扰消除方法。搭建了相应的仿真系统,在 OBTB 和 5 km FMF 两种情况下对所提方法的有效性进行了验证,并将所提方法与基于 ZF 预编码的串扰消除方法进行了对比。结果表明:使用 4 个 LP 模式 (LP_{01} 、 LP_{11} 、 LP_{21} 、 LP_{31}) 进行 4×25 Gbaud QPSK 传输时,在 OBTB 情况下, MIMO 预均衡使各模式信号误码率达到 7% HD-FEC 门限时的发送光功率相比 ZF 预编码分别降低了 1.6 dB、1.2 dB、1.5 dB 和 1.4 dB;在 5 km FMF 情况下, MIMO 预均衡使各模式信号误码率达到 7% HD-FEC 门限时的发送光功率相比 ZF 预编码分别降低了 3.0 dB、4.1 dB、1.2 dB 和 9.2 dB。上述结果证明了所提方法可以有效减轻 MDM-PON 下行传输链路中的模式串扰。对于除模式串扰外由模式色散、差分模式群时延引起的 ISI, MIMO 预均衡具有比线性预编码更好的消除效果。另外,针对光纤色度色散的影响,添加色散预补偿使 MIMO 预均衡方法的性能有了进一步提升。本文所提方法可为 MDM-PON 提供技术支撑,但仍然存在一些问题。本文仅考虑了少模链路的影响,未对包含单模链路在内的完整 MDM-PON 传输链路下的功率预算等性能指标进行分析。另外,本文主要采用仿真的方式进行研究,还需要进一步进行实验,验证所提方法的有效性。以上问题都将在接下来的工作中进行讨论。

参 考 文 献

- [1] Li B R, Zhang K, Zhang D C, et al. DSP enabled next generation 50G TDM-PON[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2020, 12(9): D1-D8.
- [2] 于培华, 李正璇, 许岩, 等. Super-PON 系统中 SRS 串扰的仿真分析[J]. 中国激光, 2022, 49(3): 0306003.
Yu P H, Li Z X, Xu Y, et al. Simulation analysis of SRS crosstalk in super-PON system[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(3): 0306003.
- [3] 马子洋, 吴琼琼, 李启华, 等. 超密集波分复用无源光网络的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(5): 0500006.
Ma Z Y, Wu Q Q, Li Q H, et al. Ultra-dense wavelength division multiplexing passive optical network[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(5): 0500006.
- [4] Weng Z K, Chi Y C, Wang H Y, et al. 75-km long reach dispersion managed OFDM-PON at 60 Gbit/s with quasi-color-free LD[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(12): 2394-2408.
- [5] Richardson D J, Fini J M, Nelson L E. Space-division multiplexing in optical fibres[J]. Nature Photonics, 2013, 7(5): 354-362.
- [6] 张强, 郭玉彬, 陈嘉轲, 等. 基于相位调制-相干检测的模式复用通信实验[J]. 中国激光, 2020, 47(3): 0306001.
Zhang Q, Guo Y B, Chen J K, et al. A communication experiment using mode division multiplexing with phase modulation-coherent detection[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(3): 0306001.
- [7] Li J H, Ren F, Hu T, et al. Recent progress in mode-division multiplexed passive optical networks with low modal crosstalk[J]. Optical Fiber Technology, 2017, 35: 28-36.
- [8] Hu T, Li J H, Zhang Y C, et al. Wavelength-insensitive weakly coupled FMFs and components for the MDM-GPON[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2018, 30(14): 1277-1280.
- [9] Liu H Y, Wen H, Zacarias J C A, et al. 3×10 Gb/s mode group-multiplexed transmission over a 20 km few-mode fiber using photonic lanterns[C] // 2017 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), March 19-23, 2017, Los Angeles, CA, USA. New York: IEEE Press, 2017.
- [10] Ge D W, Gao Y Y, Yang Y, et al. A 6-LP-mode ultralow-modal-crosstalk double-ring-core FMF for weakly-coupled MDM transmission[J]. Optics Communications, 2019, 451: 97-103.
- [11] Wang G R, Zhang J W, Zhang H, et al. A low crosstalk multi-core few-mode fiber with composite refractive index profile and air-hole embedded trench assistance[J]. Optics Communications, 2021, 499: 127258.
- [12] 雷晓, 任芳, 张艺赢, 等. 面向模分复用的沟槽-纳米孔辅助双包层弱耦合少模光纤[J]. 光学学报, 2021, 41(23): 2306003.
Lei X, Ren F, Zhang Y Y, et al. Trench-nanopore assisted double-clad weakly coupled few-mode fiber for mode division multiplexing[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(23): 2306003.
- [13] 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): 7201512.
- [14] Chen S, Li S H, Fang L, et al. OAM mode multiplexing in weakly guiding ring-core fiber with simplified MIMO-DSP[J]. Optics Express, 2019, 27(26): 38049-38060.
- [15] 张天, 李莉, 胡贵军. 基于串行干扰消除的模分复用系统解复用[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.
- [16] 朱子岳, 赵梦鑫, 张一尘, 等. 高速 IM-DD 模分复用通信系统中基于神经网络的 MIMO 均衡技术[J]. 光学学报, 2021, 41(14): 1406003.
Zhu Z Y, Zhao M X, Zhang Y C, et al. MIMO equalization technology based on neural network in high-speed IM-DD mode division multiplexing transmission system[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(14): 1406003.
- [17] Pham T V, Le-Minh H, Pham A T. Multi-user visible light communication broadcast channels with zero-forcing precoding[J]. IEEE Transactions on Communications, 2017, 65(6): 2509-2521.
- [18] Dutta B, Budhiraja R, Koilpillai R D, et al. Analysis of quantized MRC-MRT precoder for FDD massive MIMO two-way AF relaying[J]. IEEE Transactions on Communications, 2019, 67(2): 988-1003.
- [19] Chen H, Fontaine N K, Ryf R, et al. Remote mode-forming over multimode fiber employing single-ended channel estimation[C] // 2018 European Conference on Optical Communication (ECOC), September 23-27, 2018, Rome, Italy. New York: IEEE Press, 2018.
- [20] 富惠雯, 朱子岳, 陈健. 基于预编码的模群复用信号串扰抵消技术[J]. 光学学报, 2021, 41(6): 0606003.
Fu H W, Zhu Z Y, Chen J. Crosstalk mitigation technology in mode group division multiplexing transmission based on precoding[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(6): 0606003.
- [21] Huang G X, Zhang L, Feng Y. A zero-forcing precoder and mode modulation aided orbital angular momentum multiplexing transceiver for underwater transmissions[C] // 2021 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC), July 28-30, 2021, Xiamen, China. New York: IEEE Press, 2021.
- [22] 李赞, 李正璇, 黄新刚, 等. 基于相位调制本振的相干检测系统[J]. 光学学报, 2021, 41(20): 2006001.
Li Y, Li Z X, Huang X G, et al. Coherent detection system based on phase-modulated local oscillator[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(20): 2006001.
- [23] Gou P Q, Zhao L, Wang K H, et al. Nonlinear look-up table

- pre-distortion and chromatic dispersion pre-compensation for IM/DD PAM-4 transmission[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(5): 7203307.
- [24] Hu T, Li J H, Ge D W, et al. Weakly coupled 4-mode step-index FMF and demonstration of IM/DD MDM transmission[J]. *Optics Express*, 2018, 26(7): 8356-8363.
- [25] Li J H, Hu T, Ren F, et al. Hybrid passive optical network enabled by mode-division-multiplexing[C]//2015 14th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON), July 3-5, 2015, Nanjing. New York: IEEE Press, 2015.
- [26] Dixit A, Lannoo B, Das G, et al. Flexible TDMA/WDMA passive optical network: energy efficient next-generation optical access solution[J]. *Optical Switching and Networking*, 2013, 10(4): 491-506.
- [27] Hu T, Li J H, Zhu P K, et al. Experimental demonstration of passive optical network based on 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.
- [28] Ren F, Li J H, Hu T, et al. Experimental demonstration of 3-mode MDM-PON transmission over 7.4-km low-mode-crosstalk FMF[C]//2016 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), March 20-24, 2016, Anaheim, CA, USA. New York: IEEE Press, 2016.

MIMO Pre-Equalization Based Mode Crosstalk Mitigation Method in Mode Division Multiplexing Passive Optical Network

Ouyang Yuanjiang, Zhang Qianwu*, Huang Yetian, Duan Shuaihang, Yuan Kechen,
Li Yingchun, Song Yingxiong, Wang Min

Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Joint International Research Laboratory of Specialty Fiber Optics and Advanced Communication, School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China

Abstract

Objective Passive optical networks (PON) have become one of the main solutions for optical access networks because of their low cost and large bandwidth capacity. With the continuous increase in bandwidth demand, such as high-definition videos and online conferences, in recent years, existing PON technology has faced capacity bottlenecks. Recently, few-mode fiber (FMF)-based mode-division multiplexing (MDM) technology has been proposed, which is expected to further improve the capacity of PON by introducing a new multiplexing dimension to support higher transmission rates and more users. However, for the mode-division multiplexing passive optical network (MDM-PON), which divides users by mode, the mode crosstalk in the FMF causes the user signals to be loaded on different modes to interfere with each other, which affects the transmission performance. To further improve the transmission performance of the MDM-PON, we propose a MIMO pre-equalization based mode crosstalk mitigation method for the MDM-PON and build a simulation system with VPI Transmission Maker for verification.

Methods Owing to the point-to-multipoint structure of the MDM-PON downlink, it is impossible to simultaneously receive and eliminate mode crosstalk for all modes at the receiver. Therefore, an MIMO pre-equalization based mode crosstalk mitigation method is proposed in this study. To estimate the downlink channel impulse response, we design a time-division training sequence that is inserted into the frame header. The time-division training sequence consists of the same number of time slots as the modes, and each time slot corresponds to only one mode and contains the corresponding training symbol sequence. The receiver of each mode uses coherent detection and adopts a training sequence-based least mean square (LMS) adaptive algorithm for channel estimation. The channel estimates are fed back to the transmitter for pre-equalization. The transmitter-side MIMO equalizer used in this study has a linear structure and uses the feedback channel impulse response to calculate the tap coefficients based on the zero-forcing (ZF) criterion. Considering the inter symbol interference (ISI) caused by fiber chromatic dispersion, we use cascaded FIR filters after the MIMO equalization for pre-compensation at the transmitter. Because the impulse response and dispersion coefficient of the chromatic dispersion are known, the tap coefficients of the FIR filter used for dispersion pre-compensation can be directly calculated.

Results and Discussions By adjusting the transmitted optical power in the range of -20 dBm to -44 dBm, we analyze the performance of each mode under OBTB and 5 km FMF transmission, during which the bit error rate (BER) threshold of 7% hard decision forward error correction (HD-FEC) is adopted. The curves of the BER with respect to the transmitted optical power with and without crosstalk under the OBTB and 5 km FMF are shown in Fig. 6. When the BER meets the 7% HD-FEC threshold, compared with transmission without crosstalk, the transmitted optical power of each mode is increased by 1 dB, 2.8 dB, 2.5 dB, and 2 dB in transmission with crosstalk. After connecting the 5 km FMF, the transmitted optical power of the LP₀₁ mode is increased by 2.8 dB compared with the transmission without crosstalk. The BER curves of the other three modes can only be close to or at the threshold. The above results show that the influence of the mode crosstalk from the FMF is greater than that of the mode multiplexer/demultiplexer, which is the main factor of performance degradation in the current system. We further study the BER performance before and after using MIMO pre-equalization and compare it with the ZF-pre-coding based crosstalk mitigation. According to the results in Fig. 7, after using MIMO pre-equalization and ZF pre-coding, the BER performance of each mode in transmission with and

without crosstalk is improved. When the BER meets the 7% HD-FEC threshold, compared with the ZF pre-coding, the transmitted optical power of each mode using MIMO pre-equalization is reduced by 1.6 dB, 1.2 dB, 1.5 dB, and 1.4 dB under OBTB and is reduced by 3.0 dB, 4.1 dB, 1.2 dB, and 9.2 dB under 5 km FMF. The above results show that MIMO pre-equalization performs better than ZF pre-coding in both cases because it can eliminate the ISI caused by modal dispersion and the differential mode group delay after connecting the FMF. Additionally, the adaptive channel estimation used in MIMO pre-equalization is more accurate than the least squares (LS) estimation used in ZF pre-coding. Considering the influence of fiber chromatic dispersion, we analyze the BER performance before and after using pre-dispersion compensation based on MIMO pre-equalization. As shown in Fig. 8, when the BER meets the 7% HD-FEC threshold, the transmitted optical power of each mode using pre-dispersion compensation is 0.9 dB, 2.0 dB, 1.2 dB, and 2.4 dB less than without pre-dispersion compensation.

Conclusions We propose an MIMO pre-equalization based mode crosstalk mitigation method for MDM-PONs and build a simulated MDM transmission system for verification. In both cases of OBTB and 5 km FMF transmission, we compare the performance of the proposed method with that of ZF pre-coding based crosstalk mitigation method. The results show that when using four LP modes (LP_{01} , LP_{11} , LP_{21} , LP_{31}) for 4×25 Gbaud QPSK transmission and the BER meets a 7% HD-FEC threshold, compared with the ZF pre-coding, the transmitted optical power of each mode using MIMO pre-equalization is reduced by 1.6 dB, 1.2 dB, 1.5 dB, and 1.4 dB under OBTB, whereas it is reduced by 3.0 dB, 4.1 dB, 1.2 dB, and 9.2 dB under 5 km FMF. The above results demonstrate that the proposed method can effectively mitigate the mode crosstalk in MDM-PONs and exhibits better performance for ISI caused by modal dispersion and differential modal group delay compared with linear pre-coding. Moreover, considering the influence of fiber chromatic dispersion, the performance of MIMO pre-equalization is further improved after cascading dispersion pre-compensation.

Key words optical communications; passive optical network; mode division multiplexing; multiple input multiple output; pre-equalization; mode crosstalk