

具有模式依赖损耗的模分复用系统的动态信道补偿特性

龚思雨, 张建勇*

北京交通大学光波技术研究所, 北京 100044

摘要 对具有模式依赖损耗(MDL)的光纤模分复用(MDM)传输系统进行仿真,同时考虑了 MDL 与突发干扰对系统性能的影响。分析 MDL 对 4×4 MDM 传输系统的影响,同时施加不同强度的快速干扰。采用自适应算法,即最小方均(LMS)算法和递归最小二乘(RLS)算法,进行快速信道补偿,使用方均误差(MSE)计算信道补偿算法的性能。仿真结果表明:MDL 使系统性能下降;LMS 和 RLS 算法均能补偿动态干扰对系统的影响,但 MDL 使补偿后的系统性能变动较大,即 MSE 的方差变化较大。

关键词 光纤光学; 模分复用; 自适应算法; 多模光纤

中图分类号 TN911.5

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.2306006

Dynamic Channel-Compensation Characteristics of MDM System with Mode-Dependent Loss

Gong Siyu, Zhang Jianyong*

Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

Abstract In this work, we simulate a fiber mode-division multiplexing (MDM) transmission system with mode-dependent loss (MDL), and simultaneously explore the impact of MDL and burst perturbation on system performance. The impact of MDL on a 4×4 MDM transmission system is analyzed with fast perturbation of different intensities applied. Adaptive algorithms containing least mean square (LMS) and recursive least square (RLS) routines are used for fast channel compensation. The performance of these channel-compensation algorithms is calculated using mean square error (MSE). Simulation results show that MDL degrades system performance. Both LMS and RLS algorithms can compensate for the effects of dynamic perturbation on the system; however, MDL causes system performance to change greatly after compensation, i. e., the variance of MSE varies greatly.

Key words fiber optics; mode-division multiplexing; adaptive algorithm; multimode fiber

OCIS codes 060.2330; 060.4230; 120.1880; 070.4340

1 引 言

随着单模光纤的容量日益接近香农极限,单模光纤已经无法满足新时期数据流量的快速增长^[1]。空分复用技术通过增加空间维度、并行传输多路信号来提高系统容量,作为多输入多输出传输(MIMO)的形式,光纤中的空分复用通过将调制数据信号发射到 D 个正交空间和极化波导模式上来利用空间自由度,这种方式也被称作模分复用(MDM)^[2-4]。在长距离 MDM 系统传播中,不同模式之间的耦合给 MDM 系统带来串扰和干扰^[5-6],但 MIMO 信号处理技术可以分离出并行的

数据流。和无线 MIMO 系统中一样,耦合的并行信道可用于提高数据传输速率或增强系统可靠性,从而提供多路复用或分集增益^[7-9]。实际的 MDM 系统会受多种环境干扰,如风、雷击、应力作用^[10]。在单模光纤中,现有多个统计模型可以分析偏振状态随频率或传输距离变化的统计状态^[11-12],其中较早的动态干扰模型为基于偏振模色散(PMD)的铰链模型^[13-15]。Antonelli 等^[16]提出一个简单的两参数模型,用来研究时变 PMD 带来的损伤,并且证明了该模型在模拟与实验中具有良好的一致性。文献[17]把多模光纤中的模式色散视为 PMD 的广义形式,在 D 维斯托克斯空间

收稿日期: 2020-07-03; 修回日期: 2020-08-22; 录用日期: 2020-08-31

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(61671047)

* E-mail: jyzhang@bjtu.edu.cn

中定义了模式色散向量来研究模式色散的特性。文献[18]忽略模式依赖损耗(MDL)的影响,通过结合模式色散和时变模式耦合的影响建立动态MDM模型,并引入一个时标参数来表征MDM系统中的信道变化率。由于MDL会极大地影响MDM系统的性能,因此很有必要研究MDL与动态干扰同时存在的MDM系统性能。由于环境干扰对MDM系统的影响常常是微秒级的,因此需要自适应算法快速补偿MDM信道受环境干扰引起的性能损伤。

本文仿真了具有模式耦合、色散、MDL及动态干扰的MDM系统,且仿真了信号在受干扰的多模MDM系统中的误码性能。采用两种自适应算法对动态干扰进行补偿,并分析了采用补偿算法后MDM系统的动态性能。

2 具有MDL的光纤MDM系统的动态信道模型

一般考虑将 D 个偏振模式端到端的线性MDM系统表示为

$$\mathbf{M} = \prod_{k=1}^N \mathbf{M}^{(k)}, \quad (1)$$

式中: N 为光纤独立段的个数。通过使用大量的光纤独立段($N \gg 1$)对长距离MDM系统建模,对于短距离MDM系统,通常使用少量的光纤独立段($N \approx 1 \sim 2$)。第 k 个部分的传递特性可以描述为矩阵 $\mathbf{M}^{(k)}$,该矩阵是3个 $D \times D$ 矩阵的乘积,其表达式为

$$\mathbf{M}^{(k)} = \mathbf{V}^{(k)} \text{diag} \left[e^{\frac{1}{2}g_1^{(k)} - j\omega\tau_1^{(k)}}, e^{\frac{1}{2}g_2^{(k)} - j\omega\tau_2^{(k)}}, \dots, e^{\frac{1}{2}g_D^{(k)} - j\omega\tau_D^{(k)}} \right] \mathbf{U}^{(k)H}, \quad (2)$$

式中: $(\cdot)^H$ 为埃尔米特共轭; $\mathbf{V}^{(k)}, \mathbf{U}^{(k)}$ 均为考虑模式耦合的西矩阵; $g_l^{(k)}$ 为第 k 个部分第 l 个模式的未耦合模式增益,以dB或对数功率增益单位测量,满足 $g_1^{(k)} + \dots + g_D^{(k)} = 0$; $\tau_l^{(k)}$ 为满足 $\tau_1^{(k)} + \dots + \tau_D^{(k)} = 0$ 的第 l 个模式的非耦合模式群延迟。因为模式色散可以忽略不计或者易于补偿,将 $\tau_l^{(k)}$ 设为 $0^{[1,18]}$ 。

大多数环境扰动只会影响光纤的局部模耦合特性,而不会影响模式增益和模式群速度。因此, $\mathbf{V}^{(k)}, \mathbf{U}^{(k)}$ 可随时间变化。依据文献[18],把外来的突发干扰描述为斜坡函数,其对 $\mathbf{V}^{(k)}, \mathbf{U}^{(k)}$ 的影响可描述为

$$\begin{cases} \mathbf{V}^{(k)}(t) = \exp[\mathbf{V}_{sh}^{(k)}(t)] \\ \mathbf{U}^{(k)}(t) = \exp[\mathbf{U}_{sh}^{(k)}(t)] \\ \mathbf{V}_{sh,ij}^{(k)}(t) = \mathbf{V}_{sh,ij}^{(k)}(t_0) + \mathbf{s}_{ij}^{(k)} \cdot r(t - t_0) \\ \mathbf{U}_{sh,ij}^{(k)}(t) = \mathbf{U}_{sh,ij}^{(k)}(t_0) + \mathbf{s}_{ij}^{(k)} \cdot r(t - t_0) \\ \text{Re}(\mathbf{s}_{ij}^{(k)}), \text{Im}(\mathbf{s}_{ij}^{(k)}) \sim N(0, \sigma_{\text{ramp},k}^2), \mathbf{s}_{ij}^{(k)} = -\mathbf{s}_{ji}^{(k)*}, \\ \sigma_{\text{ramp},k}^2 = \frac{\kappa_D}{(\tau_{\text{env}}^{(k)})^2} \\ \kappa_D \approx 0.154 + \frac{7.361}{D} - \frac{18.255}{D^2} + \frac{34.101}{D^3} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\tau_{\text{env}}^{(k)}$ 为干扰强度,值越小干扰越大,单位是 μs ; t_0 为干扰开始时刻; $r(\cdot)$ 为斜坡函数; $(\cdot)_{sh,ij}$ 为斜埃尔米特矩阵, i 和 j 为矩阵的第 i 行第 j 列; $\text{Re}(\cdot), \text{Im}(\cdot)$ 为复数的实部与虚部; $\mathbf{s}_{ij}^{(k)}$ 为干扰系数。

将缓慢扰动描述为漂移函数,其对 $\mathbf{V}^{(k)}, \mathbf{U}^{(k)}$ 的影响可描述为

$$\begin{cases} \mathbf{V}_{sh,ij}^{(k)}(t + \Delta t) = \mathbf{V}_{sh,ij}^{(k)}(t) + \mathbf{s}_{ij}^{(k)} \cdot \sqrt{\Delta t} \\ \mathbf{U}_{sh,ij}^{(k)}(t + \Delta t) = \mathbf{U}_{sh,ij}^{(k)}(t) + \mathbf{s}_{ij}^{(k)} \cdot \sqrt{\Delta t} \end{cases}, \quad (4)$$

式中: Δt 为信道漂移演变的特征时间步长。

3 信道补偿算法

根据MDM信道传输矩阵, $D \times 1$ 维接收信号矢量的表达式为

$$\mathbf{y} = \mathbf{M} \cdot \mathbf{x} + \mathbf{w}, \quad (5)$$

式中: \mathbf{x} 为 $D \times 1$ 维发送信号; \mathbf{w} 为加性高斯白噪声。

使用最小方均(LMS)算法进行信道补偿,则估计出的信道传输矩阵的迭代更新表达式为

$$\mathbf{H}_{n+1} = \mathbf{H}_n - \mu \cdot (\mathbf{H}_n \cdot \mathbf{x}_n - \mathbf{y}_n) \cdot \mathbf{x}_n^*, \quad (6)$$

式中: μ 为步长因子; $(\cdot)^*$ 为共轭转置; n 为第 n 次迭代。

使用递归最小二乘(RLS)算法进行信道补偿,则估计出的信道传输矩阵的迭代更新表达式为

$$\begin{cases} \mathbf{H}_{n+1} = \mathbf{H}_n + k_n \cdot (\mathbf{H}_n \cdot \mathbf{x}_n - \mathbf{y}_n) \\ k_n = \frac{\mathbf{P}_{n-1} \mathbf{x}_n}{\lambda + \mathbf{x}_n^* \mathbf{P}_{n-1} \mathbf{x}_n} \\ \mathbf{P}_n = \frac{1}{\lambda} (\mathbf{P}_{n-1} - k_n \mathbf{x}_n^* \mathbf{P}_{n-1}) \end{cases}, \quad (7)$$

式中: λ 为遗忘因子; k_n 为卡尔曼增益; \mathbf{P}_n 为逆相关矩阵。

在接收端使用最大似然(ML)检测,表示为

$$\mathbf{x}_{\text{ML}} = \underset{\mathbf{x} \in \theta^D}{\text{argmin}} \|\mathbf{y}_{n+1} - \mathbf{H}_{n+1} \mathbf{x}\|^2, \quad (8)$$

式中： \mathbf{x}_{ML} 为经补偿后的非完美状态信息 ML 检测后的接收信号； Θ^D 为调制信号星座点的全部组合； $\|\cdot\|$ 为欧氏距离。

用方均误差(MSE)作为系统性能指标,表达式为

$$E_{MS} = \|\mathbf{x}_{ML} - \hat{\mathbf{x}}\|^2, \quad (9)$$

式中： $\hat{\mathbf{x}}$ 为训练序列。

MSE 的方差定义为

$$\sigma_{MSE}^2 = \frac{\sum (E_{MS} - \mu_{MSE})^2}{N_x}, \quad (10)$$

式中： μ_{MSE} 为 MSE 的均值； N_x 为 MSE 个数。

4 仿真结果与分析

仿真一种 4 模式的 4×4 MDM 100G 相干光通信传输系统,该系统由 $N = 256$ 的短段串联组成。发送端每微秒发送 25000 个符号,使用正交相移键控(QPSK)符号传输,接收端使用 ML 检测。整个过程考虑了模式耦合与 MDL 的影响,忽略光纤非线性作用。LMS 参数取 $\mu = 0.0008$,RLS 参数取 $\lambda = 0.999$ 。在当前时间步长设定下,LMS 与 RLS 均收敛。设定信噪比(SNR)为 12 dB,MDL 值 $\xi = 0$ dB,干扰形式为突发快速干扰, $\tau_{env} = 5, 20, 40 \mu s$,总时间步数 $T = 500 \mu s$,干扰加在 $T_{start} = 100 \mu s$ 处。 τ_{env} 越小,不同干扰强度的 MSE 曲线斜率越大,变化的速度越快。观察采用 LMS 与 RLS 信道补偿算法前后 MSE 的变化情况,结果如图 1 所示,可知:以干扰前的 MSE 作为基准,施加干扰强度为 $\tau_{env} = 5 \mu s$ 时,MSE 迅速增大到 7 附近振荡; $\tau_{env} = 20, 40 \mu s$ 时,表现出相同的现象,但是 MSE 增大速度依次变小。使用 LMS 与 RLS 算法后的 MSE 都稳定到 0,表明这两种算法在没有 MDL 情况下能够很

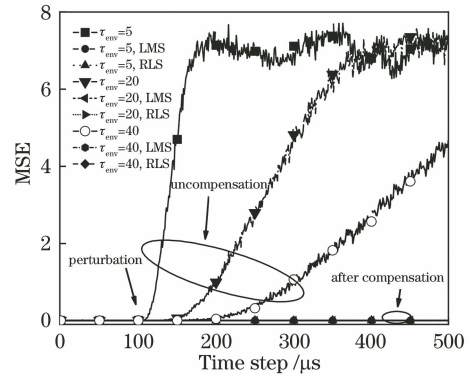


图 1 没有 MDL 时不同干扰强度的 MSE

Fig. 1 MSE with different interference intensities without MDL

好地补偿不同强度的干扰。

为了观察长时间下的追踪特性,设定总时间步数 $T = 10000 \mu s$,干扰加在 $T_{start} = 2000 \mu s$ 处。当 $\tau_{env} = 5 \mu s$ 时,计算不同 MDL 值 $\xi = 0, 5, 10$ dB 时 LMS 与 RLS 算法的 MSE 变化,仿真结果如图 2(a) 所示。由于微秒级系统的 MSE 变化很快,不便于分析,因此对 MSE 结果进行滑动平均,时间窗口为 $500 \mu s$ 。由图 2(b) 可知:随着 ξ 的增大,干扰前的 MSE 值也随之增大,表明 MDL 恶化了 MDM 系统的性能;在干扰补偿后,即 $T_{start} > 2000 \mu s$ 时,MSE 曲线出现起伏,并且起伏的幅度也相应增大;在 $\xi = 0$ dB 时,MSE 值稳定在 0,在 $\xi = 5$ dB 时,MSE 值在 $0 \sim 0.16$ 起伏,在 $\xi = 10$ dB 时,MSE 值在 $0.32 \sim 0.8$ 起伏,这说明在突发干扰很大时,MDL 恶化了补偿算法的性能;而在 $\xi = 5, 10$ dB 时,即使出现起伏,干扰后 MSE 总体保持收敛特性,因此补偿算法仍有效。两种算法出现的起伏同步结果说明,该系统在两种算法下具有相同的性能,故以下例子仅考虑 LMS 的收敛情况。

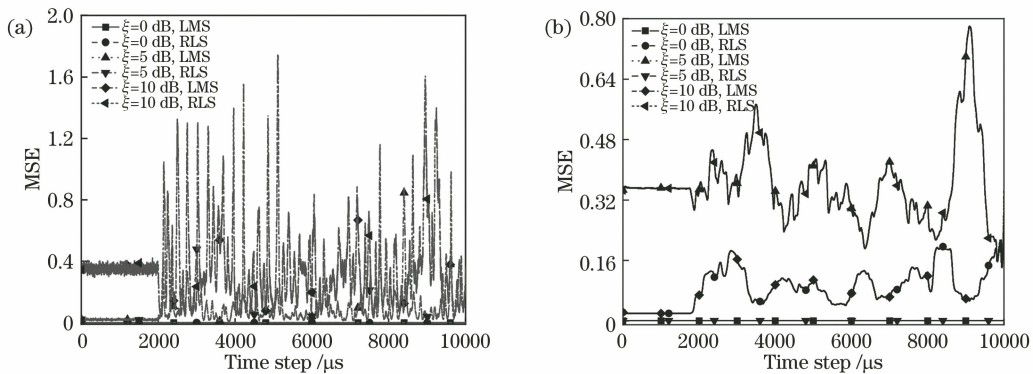


图 2 $\tau_{env} = 5 \mu s$,不同 MDL 的 MSE。(a)滑动平均前;(b)滑动平均后

Fig. 2 MSE of different MDL under $\tau_{env} = 5 \mu s$. (a) Before moving average; (b) after moving average

为了分析 MSE 的起伏,当 $\tau_{\text{env}} = 5 \mu\text{s}$, SNR 为 4, 12 dB 时,计算不同 MDL 值干扰前后的 σ_{MSE}^2 ,结果如表 1 所示。由表 1 可知:提高 SNR 后,干扰后的 σ_{MSE}^2 也降低到接近于 0,这说明提高 SNR 对

LMS 算法补偿干扰有益;在同一 SNR 下, LMS 补偿后的 σ_{MSE}^2 随 MDL 的提高上升了 2~3 个数量级,说明 MDL 恶化了 LMS 补偿算法的性能,但仍然接近 0,表明 LMS 算法可以补偿动态影响。

表 1 $\tau_{\text{env}} = 5 \mu\text{s}$,不同 MDL 的 σ_{MSE}^2

Table 1 σ_{MSE}^2 of different MDL under $\tau_{\text{env}} = 5 \mu\text{s}$

MDL / dB	Uncompensation				LMS compensation			
	Before perturbation		After perturbation		Before perturbation		After perturbation	
	SNR is 4 dB	SNR is 12 dB	SNR is 4 dB	SNR is 12 dB	SNR is 4 dB	SNR is 12 dB	SNR is 4 dB	SNR is 12 dB
0	5.7372×10^{-5}	8.3213×10^{-8}	0.4332	0.6145	5.8755×10^{-5}	8.3693×10^{-8}	5.9660×10^{-5}	8.7389×10^{-8}
5	7.9179×10^{-4}	1.6380×10^{-5}	0.8204	1.0768	8.5715×10^{-4}	1.6232×10^{-5}	0.0349	0.0102
10	0.0014	3.5446×10^{-4}	1.9733	2.2644	0.0016	3.5333×10^{-4}	0.1660	0.0830

最后,计算图 2 对应的误码率(BER)曲线,滑动平均后的仿真结果如图 3 所示。由图 3 可知:在没有进行信道补偿时,误码率迅速上升并接近 1;而在补偿后,即 $T_{\text{start}} > 2000 \mu\text{s}$ 时,误码率随 MDL 的增大出现起伏,但是维持在无干扰的附近,这说明 LMS 可以很好地补偿动态干扰。

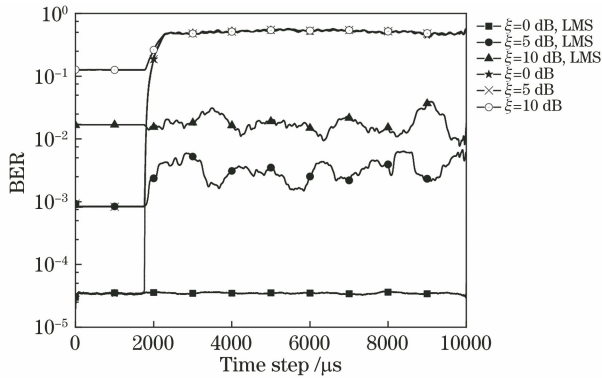


图 3 $\tau_{\text{env}} = 5 \mu\text{s}$,不同 MDL 的 BER

Fig. 3 BER of different MDL under $\tau_{\text{env}} = 5 \mu\text{s}$

5 结 论

分析了 MDL 对动态 MDM 系统中信道补偿算法的影响,对比了 LMS 与 RLS 算法追踪补偿的性能。结果表明:随着 MDL 的提高,两种算法均出现性能恶化;两种算法均具有收敛性,都可以作为具有 MDL 的动态 MDM 信道补偿。由于 LMS 比 RLS 复杂度低,在处理数据的速率上有一定优势^[19],可优先采用 LMS 算法。

参 考 文 献

[1] Ho K P, Kahn J M. Linear propagation effects in mode-division multiplexing systems[J]. Journal of

Lightwave Technology, 2014, 32(4): 614-628.

[2] Shang W, Zhang J Y. Multimode local error criterion of nonlinear Schrodinger equation[J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(4): 0406001.

尚维, 张建勇. 非线性薛定谔方程的多模局部误差计算准则[J]. 光子学报, 2019, 48(4): 0406001.

[3] 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.

[4] Chen J, Wang F, Li Z X, et al. Reducing signal crosstalk in IM-DD-mode-division multiplexing transmission via digital orthogonal filtering[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(8): 0806005.

陈健, 王芳, 李正璇, 等. 利用数字正交滤波降低 IM-DD 模分复用传输中的信号串扰[J]. 光学学报, 2019, 39(8): 0806005.

[5] 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.

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.

[6] Wang Y H, Wu B J, Wan F, et al. Analysis of compensation for inter-mode nonlinear phase modulation in few-mode optical fiber communication systems[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(12): 1206006.

王瑜浩, 武保剑, 万峰, 等. 少模光纤通信系统中模间非线性相位调制的补偿分析[J]. 光学学报, 2019, 39(12): 1206006.

[7] Richardson D J, Fini J M, Nelson L E. Space-division multiplexing in optical fibres [J]. Nature Photonics, 2013, 7(5): 354.

[8] Guo X Y, Zhang K E. Research on STBC MIMO visible light communication system based on

- precoding[J]. *Optical Technique*, 2019, 45(4): 436-442.
- 郭心悦, 张可儿. 基于预编码的 STBC MIMO 可见光通信系统研究[J]. *光学技术*, 2019, 45(4): 436-442.
- [9] 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.
- [10] Choutagunta K, Kahn J M. Dynamic channel modeling for mode-division multiplexing [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(12): 2451-2463.
- [11] Gordon J P, Kogelnik H. PMD fundamentals: polarization mode dispersion in optical fibers [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2000, 97(9): 4541-4550.
- [12] Qin Z Y, Cheng Z G, Zhang Z P, et al. High-speed and real-time measurement of Stokes parameters[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(4): 659-662.
- 覃兆宇, 程兆谷, 张志平, 等. 偏振光斯托克斯参量的高速实时测量技术[J]. *光学学报*, 2007, 27(4): 659-662.
- [13] Schuster J, Marzec Z, Kath W L, et al. Hybrid hinge model for polarization-mode dispersion in installed fiber transmission systems [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(7): 1412-1419.
- [14] Li J L, Biondini G, Kath W L, et al. Outage statistics in a waveplate hinge model of polarization-mode dispersion [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, 28(13): 1958-1968.
- [15] Czegledi C B, Karlsson M, Agrell E, et al. Polarization drift channel model for coherent fibre-optic systems[J]. *Scientific Reports*, 6(1): 21217.
- [16] Antonelli C, Mecozzi A, Brodsky M, et al. A simple analytical model for PMD temporal evolution [C]// 2006 Optical Fiber Communication Conference and the National Fiber Optic Engineers Conference, March 5-10, 2006, Anaheim, CA, USA. New York: IEEE Press, 2006.
- [17] Antonelli C, Mecozzi A, Shtaf M, et al. Stokes-space analysis of modal dispersion in fibers with multiple mode transmission [J]. *Optics Express*, 2012, 20(11): 11718-11733.
- [18] Choutagunta K, Roberts I, Kahn J M. Efficient quantification and simulation of modal dynamics in multimode fiber links [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(8): 1813-1825.
- [19] Arık S Ö, Askarov D, Kahn J M. Adaptive frequency-domain equalization in mode-division multiplexing systems [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(10): 1841-1852.