

OFDM-OAM 复用通信中基于线性回归的串扰消除方案

刘旻雯^{1,2,3}, 李迎春^{1,2,3}

(1.上海大学 特种光纤与光接入网重点实验室,上海 200444;2.上海大学

特种光纤与先进通信国际合作联合实验室,上海 200444;3.上海大学 上海先进通信与数据科学研究院,上海 200444)

摘要:为减小轨道角动量(OAM)复用信号在自由空间传输过程中的模式间串扰,提出一种串扰消除方案。在传输基于16进制正交幅相调制的正交频分复用(16QAM-OFDM)信号的双路OAM复用自由空间光通信链路中,使用基于梯度下降的线性回归方案缓解OAM模式间串扰,恢复原始信号。实验结果表明:该串扰消除方案使接收到的双路16QAM-OFDM信号的星座点集中在16QAM参考点周围,且每个子载波的误码率(BER)接近于没有串扰时的BER;当串扰功率约为-23.5dBm时,前向纠错码(FEC)门限 3.8×10^{-3} 处的功率代价至少降低了3dB。

关键词:OAM复用;串扰消除;OFDM;线性回归

中图分类号:TN929.11 文献标识码:A 文章编号:1002-5561(2019)01-0005-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.01.002

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Crosstalk cancellation scheme based on linear regression in OFDM-OAM multiplex communication

LIU Minwen^{1,2,3}, LI Yingchun^{1,2,3}

(1. Key laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

2. Joint International Research Laboratory of Specialty Fiber Optics and Advanced Communication, Shanghai University, Shanghai 200444, China; 3. Shanghai Institute for Advanced Communication and Data Science, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: In order to reduce the modal crosstalk of orbital angular momentum(OAM) multiplexed signals in free space, this paper proposes a crosstalk mitigation scheme. It uses the gradient descent based linear regression in 16 quadrature amplitude modulation orthogonal frequency division multiplexing (16QAM-OFDM) carrying dual-channel OAM multiplexed FSO communication links. The scheme can mitigate crosstalk between OAM modes and recover the original signal. The experimental results show that the proposed scheme concentrates the constellation points of the received dual 16QAM-OFDM signals around the 16QAM reference point, and the bit error rate(BER) of each subcarrier is close to the BER without crosstalk. The power penalty at the forward error correction (FEC) threshold of 3.8×10^{-3} is reduced by 3dB when the crosstalk power is -23.5dBm.

Key words: OAM multiplexing; crosstalk reduction; OFDM; linear regression

0 引言

随着通信数据流量的快速增长,基于传统的复用通信技术很难满足人们对通信容量的巨大需求。为

收稿日期:2018-09-10。

基金项目:国家自然科学基金(批准号:61601279,61601277,61420106011,61635006)资助;上海市科技发展基金(批准号:17010500400,16511104100,18511103400,15530500600,16YF1403900)资助。

作者简介:刘旻雯(1995-),女,硕士研究生,主要研究方向是OAM光束的生成与解调、OAM复用通信、大气湍流下OAM的变化、OFDM信号处理、双通道信号同步、信道估计、信道编码和PAM4调制信号传输。获校级学业奖学金一等奖一项、学业奖学金三等奖一项。



此,近年来提出一种基于轨道角动量(OAM)的空分复用技术^[1]。拥有OAM的涡旋光束具有独特的螺旋相位波前结构。携带不同拓扑电荷数的OAM光束具有不同的OAM模式,由于不同OAM模式之间相互正交,因此OAM光束可以作为数据载体进行高效的复用与解复用。目前,许多学者已将OAM复用技术应用于光纤通信、无线通信与自由空间光通信中^[2-4]。如果将OAM与其它自由度相结合使用,例如幅度、波长和偏振等,系统的传输容量将得到进一步提高^[5,6]。

当涡旋光束在自由空间中传输时,容易受到大气湍流的影响,引发螺旋相位波前畸变^[7]。在自由空间OAM复用通信链路中,大气湍流不但会引起每个

OAM 模式的功率损耗,也会引发不同 OAM 模式之间的模式串扰,造成不同 OAM 信道间的信道干扰^[8]。国内外已经提出许多关于 OAM 模式间串扰消除的方法并加以证明,例如低密度奇偶校验编码(LDPC)调制方案和多用户检测(MUD)方法^[9,10]。但在强串扰作用下,LDPC 编码和 MUD 的效果略差。此外,4×4 多输入多输出(MIMO)均衡技术也可用于缓解串扰,实验表明传输 QPSK 信号时,在误码率为 3.8×10^{-3} (前向纠错码 FEC 门限)处的功率代价至少减少了 4dB^[11]。除了上述数字信号处理(DSP)方法外,基于泽尼克多项式的随机梯度下降(SPGD)算法可用于产生相位校正图样,校正被湍流扭曲的 OAM 光束的螺旋相位^[12]。这种方法可以改善接收到的 OAM 解调信号的质量,但需要额外的空间光调制器(SLM)。

为了提高数据传输速率,本文在双通道 OAM 复用自由空间光链路中传输基于 16 进制正交幅相调制的正交频分复用(16QAM-OFDM)信号,将正交导频数据插入到双路 OFDM 帧数据中,利用线性回归的方法消除双路信道间的信道串扰,并根据接收到的两路 OFDM 导频序列,采用自适应步长的梯度下降算法优化了建立的线性回归方程。

1 基于线性回归的串扰消除理论

线性回归是最基本和最常用的预测分析方法,通过观测数据求解线性方程可以研究自变量和因变量之间的数学关系^[13]。对于双通道 OAM 复用通信系统,两路信号间的串扰可看作是信号的线性叠加^[10],我们引入两个线性回归方程来估计两路原始传输信号:

$$\begin{cases} \hat{T}_x = \theta_{xx} \cdot R_x + \theta_{xy} \cdot R_y \\ \hat{T}_y = \theta_{yx} \cdot R_x + \theta_{yy} \cdot R_y \end{cases} \quad (1)$$

其中, $\theta(\theta_{xx}, \theta_{xy}, \theta_{yx}, \theta_{yy})$ 是待调整的参数, $\hat{T}_x$ 和 $\hat{T}_y$ 是估计出的两路原始信号, R_x 和 R_y 是接收到的信号。为了估计 $\hat{T}_x$ 、 $\hat{T}_y$ 和参考信号 T_x 、 T_y 之间的差异,我们定义式(2)所示的代价函数 J_x 和 J_y ,用以计算第 i 个点的估计值与原始值的差的平方及其所有点的均值。对于完美信号,这两个代价为零。因此,代价函数的值越小,两路信号恢复得越好。

$$\begin{cases} J_x = \frac{1}{2m} \sum_{i=1}^m (\hat{T}_x^i - T_x^i)^2 \\ J_y = \frac{1}{2m} \sum_{i=1}^m (\hat{T}_y^i - T_y^i)^2 \end{cases} \quad (2)$$

梯度下降算法是将训练数据进行线性拟合的一种有效方法^[14]。为了使代价沿着函数梯度下降的方向降低,我们求得 J_x 和 J_y 相对于 θ 的偏导数,其中 $\text{conj}()$ 表示共轭,并且根据接收到的信号同时更新参数 θ_{xx} 、 θ_{xy} 、 θ_{yx} 、 θ_{yy} 。第 $i+1$ 次参数迭代更新表达式如下:

$$\begin{cases} \theta_{xx}^{i+1} = \theta_{xx}^i - \alpha \cdot \text{conj}(R_x^i) \cdot (\theta_{xx}^i \cdot R_x^i + \theta_{xy}^i \cdot R_y^i - T_x^i) \\ \theta_{xy}^{i+1} = \theta_{xy}^i - \alpha \cdot \text{conj}(R_y^i) \cdot (\theta_{xx}^i \cdot R_x^i + \theta_{xy}^i \cdot R_y^i - T_x^i) \\ \theta_{yx}^{i+1} = \theta_{yx}^i - \alpha \cdot \text{conj}(R_x^i) \cdot (\theta_{yx}^i \cdot R_x^i + \theta_{yy}^i \cdot R_y^i - T_y^i) \\ \theta_{yy}^{i+1} = \theta_{yy}^i - \alpha \cdot \text{conj}(R_y^i) \cdot (\theta_{yx}^i \cdot R_x^i + \theta_{yy}^i \cdot R_y^i - T_y^i) \end{cases} \quad (3)$$

其中, α 是学习步长。当 α 较大时,梯度下降算法会快速收敛,但容易错过代价的全局最小值。当 α 较小时,收敛速度较慢。为了提高收敛速率,在本文中,两路 16 进制正交幅相调制(16QAM)发射信号相位是正交的,我们使用与两路估计信号的相位角度差相关的自适应 α 。第 i 次迭代的 α 值表示为:

$$\alpha^i = \sqrt[3]{\left| \cos \left(\text{angle}(\hat{T}_x^i) - \text{angle}(\hat{T}_y^i) \right) \right|} \quad (4)$$

其中, $\text{angle}()$ 表示估计信号的相位角。在多次迭代后,学习步长逐渐趋近于 0,代价在最小值附近稳定,此时得到的回归方程用于均衡数据信号。当前导频序列计算出的参数可以作为下一组导频序列迭代的初始值,适当地减少迭代次数。

2 16QAM-OFDM-OAM 复用自由空间光通信实验系统

为了验证所提出的基于线性回归的 OAM 复用自由空间光通信的串扰消除方法,本文采用双路 OFDM-OAM 复用/解复用实验平台,其系统框图如图 1 所示。

在发送端,任意波形发生器(AWG)产生两路不同的 16QAM-OFDM 时域电信号,电 OFDM 信号经过低

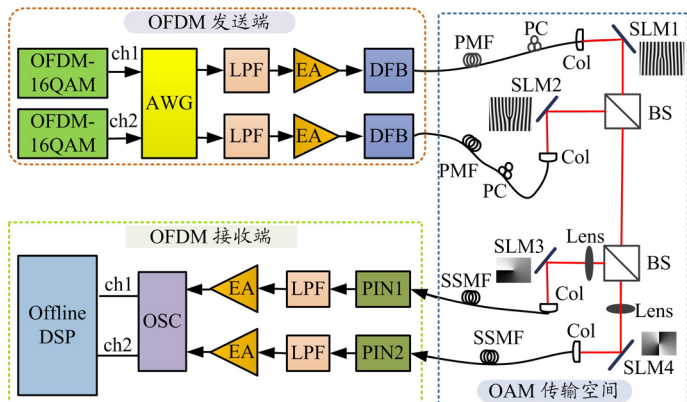


图 1 16QAM-OFDM-OAM 双路复用系统框图

通滤波器(LPF)后送入分布反馈激光器(DFB)进行电光调制。调制出的波段为 1550nm 的高斯光信号,该信号经过保偏光纤(PMF)和准直头(Col)后进入自由空间,入射至加载了叉形光栅的空间光调制器(SLM),生成 OAM 光束。两路 OAM 光束分别携带拓扑电荷-1 和+2,通过光束分离器(BS),形成一束复合涡旋光(OAM-1,OAM-2)实现 OAM 复用,并传输一段距离。

在接收端,复合涡旋光经过 BS 后产生两束复合涡旋光:(OAM-1,OAM-2)和(OAM+1,OAM+2),两束涡旋光分别通过焦距 $f=15\text{cm}$ 的凸透镜聚焦到 SLMs 中心处,SLM 加载了相位全息图,将相应模式的 OAM 光解调为高斯光束。解调后的光束经过标准单模光纤(SSMF)进行空间滤波,最后用光电二极管(PIN)对光信号进行强度调制直接检测(IM-DD),并将两路离散信号同时储存在数字存储示波器(OSC)中,用作离线处理(offline DSP)。

OFDM 发送端和接收端的数字信号处理过程分别如图 2(a)和图 2(b)所示。将伪随机二进制序列(PRBS)映射为 16QAM 调制格式后,利用厄米对称和 64 点快速傅里叶逆变换(IFFT)产生时域 OFDM 实数信号。所传输的 OFDM 信号由导频序列(PS)、训练序列(TS)、循环前缀(CP)以及数据构成,如图 2(c)所示,其相关系数设置如下:FFT 点数为 64 点,有效数据子载波序号为 2~29,调制格式为 16QAM,OFDM 循环前缀约 8 个点。其中导频序列使用的是块状导频结构,用于信道估计,其结构图如图 2(d)所示。由于 OFDM 信号在采样的过程中会发生频域相位旋转且湍流的实时变化会导致串扰改变,因此,可以根据实际情况对导频序列的插入频率进行调整。在实验中,每组导频序列均衡后续的 10 帧数据,为了加快梯度下降算法的收敛速度,两路 OFDM 信号相同子载波上的导频 16QAM 数据在频域上相位是正交的。在接收端,OFDM 信号的离线 DSP 首先实现导频同步、符号同步、去除 CP 和 64 点 FFT,基于接收到的 PS 和参考的 PS,在每个子载波上建立线性回归方程并做优化,均衡后续相应子载波上的符号数据后进行星座图解映射。最后,通过比较串扰消除前后的星座图和比特误码率(BER)来评估解串扰方案的性能。

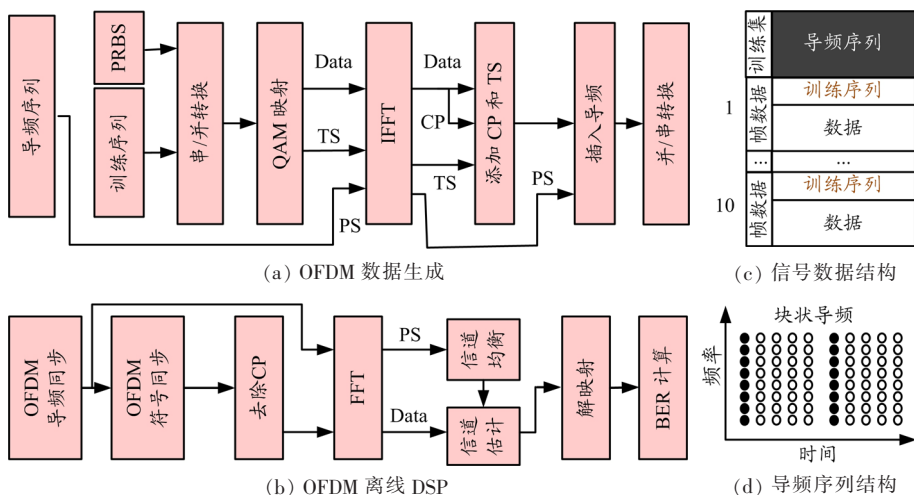


图 2 OFDM 数据处理过程和 OFDM 数据结构

3 基于线性回归的串扰消除方案实验验证

本文搭建了双通道 OAM 复用/解复用实验平台,验证基于线性回归的串扰消除方案的特性。不同串扰大小作用下,信道 OAM-1 和 OAM-2 随着接收光功率改变的 BER 变化曲线如图 3 所示。对于信道 OAM-1,接收光功率在-19.5~-15dBm 之间变化,对于信道 OAM-2,接收光功率在-18.5~-14dBm 之间变化。当只

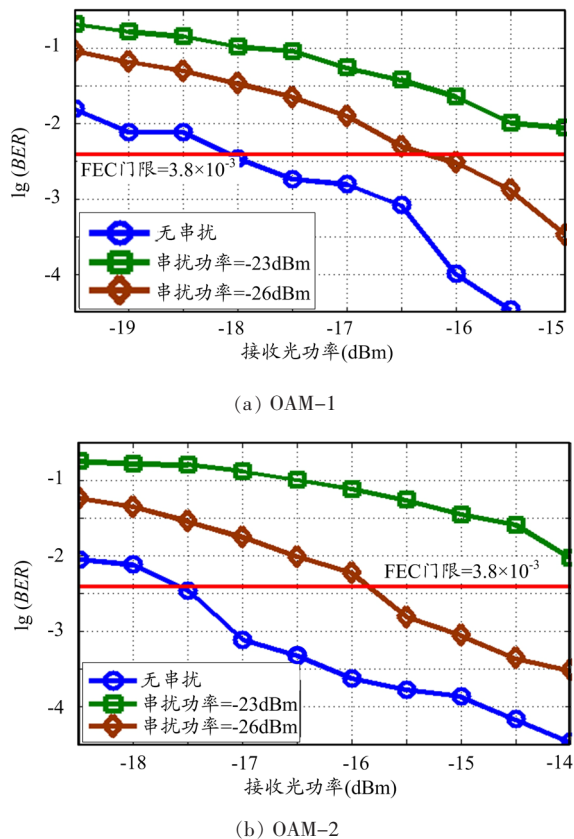


图 3 不同接收光功率下的 BER

传送 OAM-1 或 OAM-2 的光信号时,该路信号不受来自另一路信号的干扰。随着串扰功率的加强,BER 整体增加。当串扰功率大于 -23dBm 时,在所测接收光功率范围内 BER 始终无法达到 FEC 门限(3.8×10^{-3})。

当两个 OAM 模式的涡旋光束同轴传输时,其中一路光功率增大,会导致该路信号质量改善,同时对另一路信号的串扰也会增加。使用串扰消除方案前、后两路信号的星座图分别如图 4 和图 5 所示,其中信道 OAM-1 的星座图为红色;信道 OAM-2 的星座图为蓝色。信道 OAM-2 的接收光功率保持在 -16dBm 左右,信道 OAM-1 的光功率分别为 -15dBm 、 -17dBm 和 -19dBm 。未进行串扰消除时,星座点在 16QAM 参考点周围分布较为混乱;使用串扰消除方案后,两路信号的星座点清晰可见,误差矢量幅度(EVM)也有所下降。这表明本文的串扰消除方案可以在一定程度上恢复 16QAM-OFDM-OAM 复用系统的两路信号。

当来自信道 OAM-1 的串扰功率为 -24dBm ,信道 OAM-2 的接收光功率为 -16.5dBm 时,信道 OAM-2 每个子载波的 BER 特性如图 6 所示。未使用解串扰方案时,所有有效子载波的 BER 超过 FEC 门限,维持在 -1 数量级左右。使用串扰消除方案后,各子载波的 BER

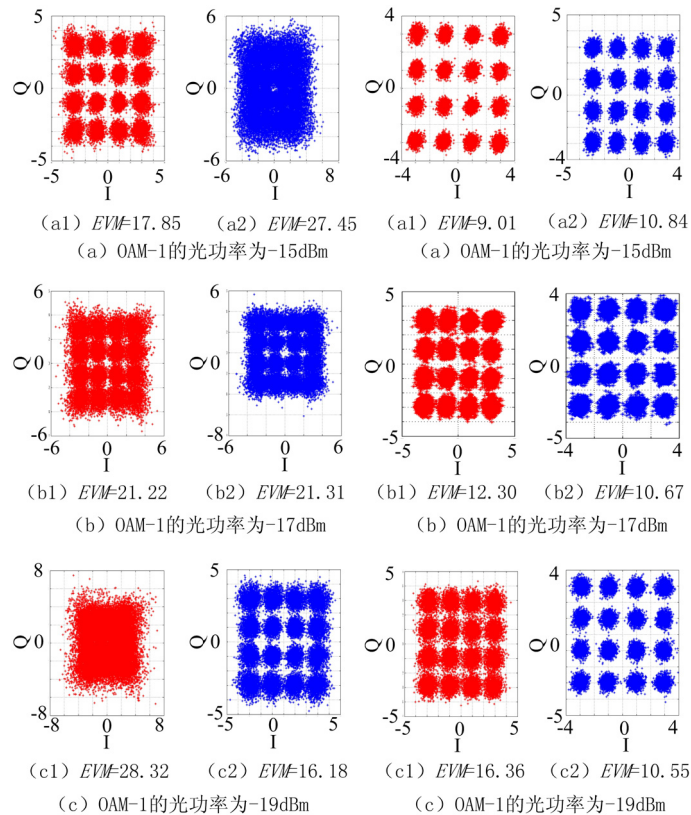


图 4 使用串扰消除方案前

接收端两路 OFDM 信号的星座图

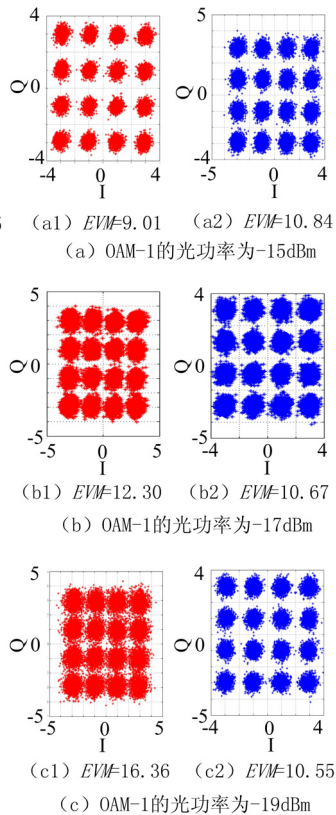


图 5 使用串扰消除方案后

接收端两路 OFDM 信号的星座图

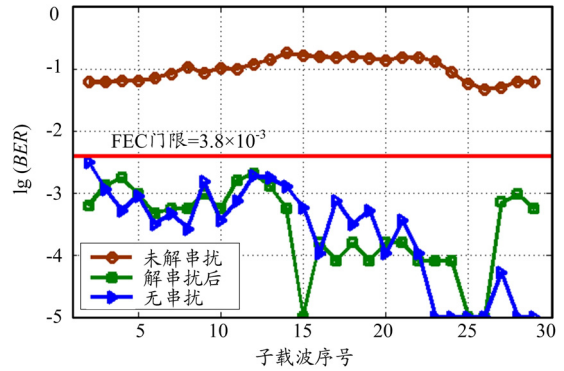
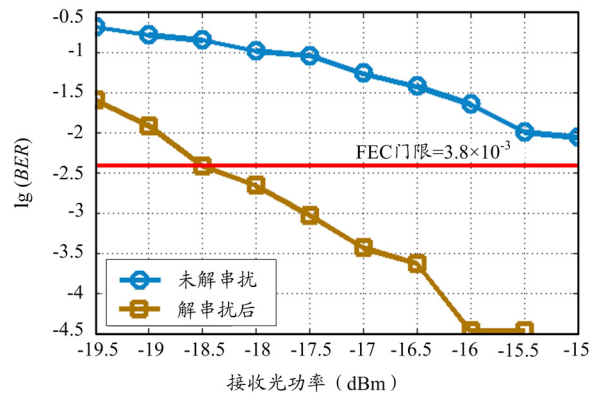


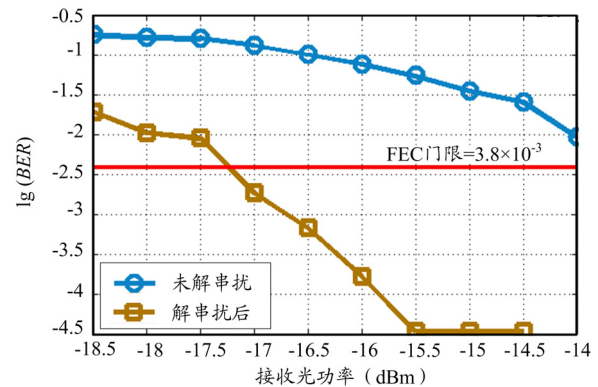
图 6 每个有效子载波上的信号 BER

明显下降,接近于不受串扰影响下的 BER。

不同接收光功率下两路信号的 BER 曲线如图 7 所示。图 7(a)表明串扰功率为 -23dBm 时信道 OAM-1 的 BER 特性,未使用串扰消除方案时,随着接收光功率增加,BER 逐渐下降,但在所测光功率范围内无法达到 FEC 门限;串扰消除后,BER 下降了近 2 个数量级,并且在光功率约为 -18.5dBm 时达到 FEC 门限。图 7(b)表明串扰功率为 -24dBm 时信道 OAM-2 的 BER 特性,使用串扰消除方案后,其 BER 至少下降 1 个数量级,达到 FEC 门限处的光功率约 -17.25dBm 。

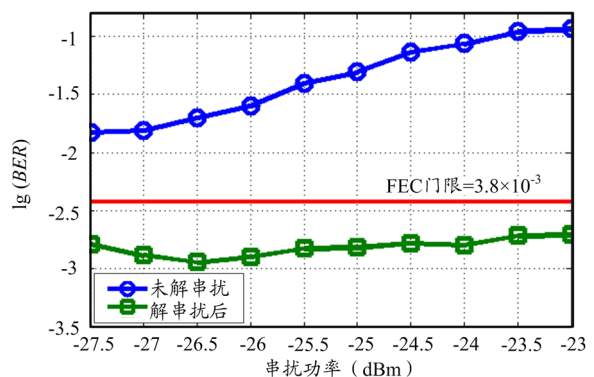


(a) OAM-1

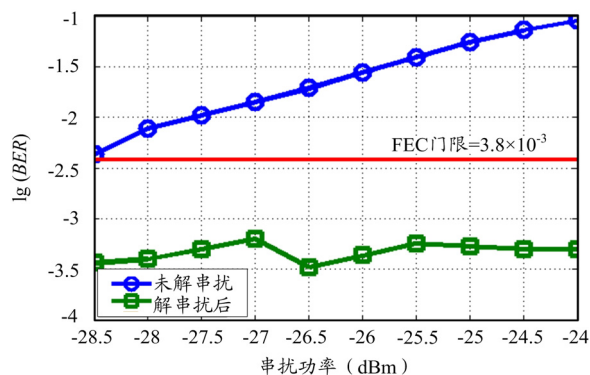


(b) OAM-2

图 7 不同接收光功率下的 BER



(a) OAM-1



(b) OAM-2

图 8 不同串扰功率下的 BER

我们也测量了不同串扰功率下的 BER 性能。当信道 OAM-1 的接收光功率为 -18dBm 时, BER 曲线如图 8(a) 所示。随着串扰功率降低, BER 逐渐下降, 消除串扰后, BER 保持在 -2.7 的数量级左右。信道 OAM-2 在光功率为 -17dBm 时的 BER 曲线图如图 8(b) 所示。未使用串扰消除方案时, 其 BER 高于 3.8×10^{-3} , 线性回归后, BER 维持在 -3.3 的数量级左右。从以上实验结果可以看出, 当信号功率比串扰功率大 5dB 时, 线性回归串扰消除方案也具有优异的性能。

4 结束语

为了减小 OFDM-OAM 复用通信系统中的模式间串扰, 本文利用基于梯度下降算法的多变量线性回归方法进行信道估计。使用所提出的串扰消除方案后, 每个有效子载波信号 BER 接近没有串扰的 BER。其次, 在不同串扰功率的影响下, BER 可以稳定地保持在 FEC 门限以下, 并且两路信号的星座图更清晰。实验结果表明, 采用基于线性回归的串扰消除方案是一种恢复接收信号、提高双通道 OAM 复用通信质量的有效方法。

参考文献:

- [1] TSEKREKOS C P, KOONEN A M. Mode-selective spatial filtering for increased robustness in a mode group diversity multiplexing link [J]. Optics Letters, 2007, 32(9): 1041–1043.
- [2] MILIONE G, HUANG H, LAVERY M, et al. Orbital-angular-momentum mode (de)multiplexer: a single optical element for MIMO-based and non-MIMO-based multimode fiber systems[C]//Optical Fiber Communication Conference, Mar. 9–13, 2014, San Francisco, United States. San Diego: OSA, 2014.
- [3] YAN Y, XIE G, LAVERY M P J, et al. High-capacity millimetre-wave communications with orbital angular momentum multiplexing [J]. Nature Communications, 2014(5): 4876–1–4876–9.
- [4] WANG J, YANG J Y, FAZAL I M, et al. Terabit free-space data transmission employing orbital angular momentum multiplexing[J]. Nature Photonics, 2012, 6(7): 488–496.
- [5] WANG J, LI S, LI C, et al. Ultra-high 230bit/s/Hz spectral efficiency using OFDM/OQAM 64-QAM signals over pol-muxed 22 orbital angular momentum (OAM) modes[C]//Optical Fiber Communication Conference, Mar. 9–13, 2014, San Francisco, United States. San Diego: OSA, 2014.
- [6] IGARASHI K, TSURITANI T, MORITA I, et al. Super-Nyquist-WDM techniques for ultra-long-haul high-capacity optical fiber transmission systems [C]//Opto-Electronics and Communications Conference IEEE, Jun. 28–Jul. 2, 2015, Shanghai, China. Piscataway: IEEE, 2015.
- [7] TYLER G A, BOYD R W. Influence of atmospheric turbulence on the propagation of quantum states of light carrying orbital angular momentum [J]. Optics Letters, 2009, 34(2): 142–144.
- [8] REN Y, HUANG H, XIE G, et al. Atmospheric turbulence effects on the performance of a free space optical link employing orbital angular momentum multiplexing[J]. Optics Letters, 2013, 38(20): 4062–4065.
- [9] DJORDJEVIC I B. LDPC-coded OAM modulation and multiplexing for deep-space and near-Earth optical communications [C]//International Conference on Space Optical Systems and Applications, Mar. 11–13, 2011, Santa Monica, CA, USA. Piscataway: IEEE, 2011.
- [10] ZOU L, WANG L, ZHAO S, et al. Turbulence mitigation scheme based on multiple-user detection in an orbital-angular-momentum multiplexed system [J]. Chinese Physics B, 2016, 25(11): 316–323.
- [11] HUANG H, CAO Y, XIE G, et al. Crosstalk mitigation in a free-space orbital angular momentum multiplexed communication link using 4×4 MIMO equalization [J]. Optics Letters, 2014, 39(15): 4360–4363.
- [12] XIE G, REN Y, HUANG H, et al. Phase correction for a distorted orbital angular momentum beam using a Zernike polynomials-based stochastic-parallel-gradient-descent algorithm [J]. Optics Letters, 2015, 40 (7): 1197–1200.
- [13] BARGIELA A, PEDRYCZ W, NAKASHIMAC T. Multiple regression with fuzzy data[J]. Fuzzy sets and systems, 2007, 158(19): 2169–2188.
- [14] PARVATHY R, DEVI R R. Gradient descent based linear regression approach for modeling PID parameters [C]//International Conference on Power Signals Control&Computations, Jan. 6–11, 2014, Thrissur, India. Piscataway: IEEE, 2014.