

# 少模光纤通信系统中模间非线性相位调制的补偿分析

王瑜浩, 武保剑\*, 万峰, 文峰

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

**摘要** 考虑少模光纤中自相位调制和交叉相位调制效应对导波光传播特性的影响, 给出了相应非线性耦合模方程的解析解, 并用于计算少模光纤的非线性系数和分析少模光纤通信系统的非线性补偿。以支持两个线偏振(LP)模的四相相移键控(QPSK)信号系统为例, 仿真分析了模式损耗和非线性效应对模分复用系统性能的影响, 重点分析了模间相位调制的补偿作用和补偿算法的适应性。研究表明, 补偿后能够正确解调 QPSK 信号所容许的模式损耗偏离会随着其参考值的增加而增大, 少模光纤通信系统中非线性补偿效果主要受限于模间非线性系数, 其所容许的最大偏离为  $0.146 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 。

**关键词** 光通信; 少模光纤; 交叉相位调制; 非线性补偿

中图分类号 TN913.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.1206006

## Analysis of Compensation for Inter-Mode Nonlinear Phase Modulation in Few-Mode Optical Fiber Communication Systems

Wang Yuhao, Wu Baojian\*, Wan Feng, Wen Feng

Key Laboratory of Optical Fiber Sensing and Communications, Ministry of Education, School of Information and Communication Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 611731, China

**Abstract** Considering the influences of self-phase modulation and cross-phase modulation on the propagation characteristics of guided light in few-mode fibers, we present the analytic solution of the corresponding nonlinear coupled mode equation, which is used to calculate the nonlinear coefficients of few-mode fibers and analyze the nonlinear compensation in few-mode optical fiber communication systems. Taking four-phase phase shift keying (QPSK) signal systems which supports two linearly polarized (LP) modes as an example, the influences of mode loss and nonlinear effects on the mode division multiplexing system is analyzed by simulation, and the compensation effectiveness for inter-mode phase modulation and the adaptability of the compensation algorithm are also discussed in detail. Research results show that, for correct demodulation of QPSK signals after compensation, the maximum allowable misalignment of mode loss increases with the increasing reference value, and the nonlinear compensation effect in the few-mode optical fiber communication system is limited by the inter-mode nonlinear coefficient. The maximum allowable deviation of the inter-mode nonlinear coefficient is  $0.146 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ .

**Key words** optical communications; few-mode fiber; cross-phase modulation; nonlinear compensation

**OCIS codes** 060.4370; 060.2605; 060.4510; 070.4340

## 1 引 言

随着云计算、大数据和移动互联网技术的高速发展,全球带宽需求呈现爆炸式增长<sup>[1]</sup>。由于光纤非线性效应的存在,传统单模光纤的传输容量已经达到香农极限,寻找新的参数维度成为研究热点。

空分复用技术(SDM)可以极大地增加信息传输容量,主要有多芯光纤(MCF)<sup>[2-3]</sup>和少模光纤(FMF)<sup>[4-5]</sup>两种有效的实现方式。与单模光纤通信系统类似,非线性效应也会使 FMF 通信系统中的信号劣化,传输容量减小。因此,基于 FMF 的空分复用链路传输系统往往也会采用多输入多输出

收稿日期: 2019-04-04; 修回日期: 2019-07-17; 录用日期: 2019-08-23

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB1801001)

\* E-mail: bjwu@uestc.edu.cn

(MIMO)数字信号处理技术来消除模间串扰<sup>[6-7]</sup>。

光纤中的非线性效应起源于三阶极化率,它是引起诸如三次谐波产生、四波混频(FWM)、自相位调制(SPM)和交叉相位调制(XPM)等现象的原因<sup>[8]</sup>,也是限制光纤传输距离和信号速率进一步提高的重要因素。光纤中的大部分非线性效应来源于SPM和XPM,只有满足相位匹配条件时,三次谐波产生和FWM非线性过程才有可能发生<sup>[9]</sup>。就光纤通信系统的非线性补偿而言,2008年,Mateo等<sup>[10]</sup>提出数字后向传播(DBP),用于单模光纤非线性的补偿;2012年,Chen等<sup>[11]</sup>使用数字相位共轭补偿单模光纤非线性效应的方法,从实验上实现了速率为40 Gbit/s、调制方式为相干光正交频分复用-正交幅度调制(CO-OFDM-16QAM)、传输距离为10400 km的传输;2013年,Essiambre等<sup>[12]</sup>实验研究了XPM对FMF传输的影响;2017年,Brehler等<sup>[13]</sup>研究了波分复用(WDM)信道数对模分复用(MDM)传输系统非线性的影响;同年,王卓等<sup>[14]</sup>推导了磁光非线性光纤萨尼亚克结构的传输矩阵,实验研究了萨尼亚克结构磁光调制和非线性光控光开关功能;2018年,Mishra等<sup>[15]</sup>通过研究发现高阶模间非线性作用可以提高全光晶体管的工作效率;同年,吴金达等<sup>[16]</sup>针对高阶QAM和大线宽CO-OFDM系统,提出了一种基于广义回归神经网络(GRNN)的非线性均衡算法;2019年,Rademacher

等<sup>[17]</sup>利用16QAM信号在36 km长的三模光纤中进行实验,探究了模间非线性(模间XPM)对Q因子的影响。上述文献主要研究了单模光纤的非线性补偿和FMF的非线性,而针对FMF非线性补偿的研究还比较少。

本文聚焦SPM和XPM对FMF传输的影响,推导了SPM和XPM影响下导波光幅度和相位的解析表达式,将其用于光纤损耗系数和非线性系数的测量计算。针对两模光纤MDM系统,描述了SPM和XPM的解析式补偿方法,研究了模间相位调制补偿方法的适应性,即补偿后系统容许模式损耗或非线性系数的变化范围。研究表明,补偿后能够正确解调正交相移键控(QPSK)信号所容许的模式损耗偏离会随着其参考值的增加而增大,所容许的模间非线性系数偏离值为 $0.146 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 。

## 2 非线性演化方程的解析解

具有不同模式的两束或者多束导波光在FMF中传输时,可能会发生SPM、XPM、FWM等非线性效应。其中,FWM现象的产生依赖于相位匹配条件,在多数情况下无需考虑,以下只考虑FMF中SPM和XPM效应对导波光传播特性的影响。对于多个模式的相同线偏振连续光波情形,导波光复包络满足如下非线性演化方程<sup>[8]</sup>,即

$$\begin{cases} \frac{dA_1}{dz} = -\frac{\alpha_1}{2}A_1 + \frac{i\omega_1}{c}\left(f_{11}|A_1|^2A_1 + 2\sum_{k=2}^m f_{1k}|A_k|^2A_1\right) \\ \frac{dA_2}{dz} = -\frac{\alpha_2}{2}A_2 + \frac{i\omega_2}{c}\left(f_{22}|A_2|^2A_2 + 2\sum_{k=1, k \neq 2}^m f_{2k}|A_k|^2A_2\right) \\ \vdots \\ \frac{dA_m}{dz} = -\frac{\alpha_m}{2}A_m + \frac{i\omega_m}{c}\left(f_{mm}|A_m|^2A_m + 2\sum_{k=1}^{m-1} f_{mk}|A_k|^2A_m\right) \end{cases}, \quad (1)$$

式中: $A_m$ 为导波光复包络; $z$ 为非线性光纤长度; $\omega_l$ 为光场的频率; $\alpha_l$ 为模式损耗系数;下标 $l=1, 2, 3, \dots, m$ 表示模式指数;模场的交叠积分 $f_{kj}$ 可表示为

$$f_{kj} = \iint n_2 |F_k(x, y)|^2 |F_j(x, y)|^2 dx dy, \quad k, j = 1, 2, \dots, m, \quad (2)$$

其中 $n_2$ 为非线性折射率系数, $F_k(x, y)$ 表示相应光纤模式的归一化横向分布。与单模光纤相比,多模光纤增加了模式维度,导致相应的非线性演

化方程中非线性系数发生了改变,不同模式以及它们之间的非线性系数可表示为 $\gamma_{kj} = \omega_k f_{kj} / c \approx n_2 \omega_k / (cA_{\text{eff}})$ ,其中, $A_{\text{eff}} = n_2 / f_{kj}$ 为有效模场面积。

将模场的复包络表示为 $A_l = \sqrt{P_l} \exp(i\varphi_l)$ 的形式,其中, $P_l$ 和 $\varphi_l$ 分别为导波光场的功率和相位。由(1)式可知,导波光的功率满足

$$P_l = P_{l0} \exp(-\alpha_l z) = P_{l0} - \alpha_l P_{l0} z_{\text{eff},l}, \quad (3)$$

式中: $P_{l0}$ 表示初始功率; $z_{\text{eff},l} = [1 - \exp(-\alpha_l z)] / \alpha_l$ 为有效光纤长度。导波光的相位解析解表达式为

$$\varphi_l = \varphi_{l0} + \gamma_{ll} P_{l0} z_{\text{eff},l} + 2 \sum_{k \neq l}^m \gamma_{lk} P_{k0} z_{\text{eff},k}, \quad (4)$$

式中： $\varphi_{l0}$  表示初始相位。(3)式和(4)式描述了 FMF 中导波光场幅度和相位的非线性演化规律，它们依赖于模式损耗系数和非线性系数，两个系数的模式相关性是区分单模情形的重要因素，其中，模场的非线性相移  $\Delta\varphi_l = \varphi_l - \varphi_{l0}$ 。

以 LP<sub>01</sub> 和 LP<sub>11</sub> 两模光纤为例，通过龙格-库塔<sup>[18]</sup>数值方法计算(1)式，以验证其解析解(3)式和(4)式的正确性。设两个模式具有相同的导波光波长  $\lambda_0 = 1550$  nm，它们的初始功率和相位分别为  $P_{10} = P_{10} = 100$  mW 和  $\varphi_{10} = \varphi_{20} = 0$  rad。利用文献<sup>[19]</sup>提供的各个模场的归一化交叠积分，若取非线性折射率  $n_2 \approx 2.6 \times 10^{-20}$  m<sup>2</sup>·W<sup>-1</sup>，LP<sub>01</sub> 的非线性系数  $\gamma_{11} = 1.78$  W<sup>-1</sup>·km<sup>-1</sup>，则由模场的归一化交叠积分与非线性系数之间的关系可计算出 LP<sub>11</sub> 模的非线性系数  $\gamma_{22} = 1.33$  W<sup>-1</sup>·km<sup>-1</sup>，两个模式间的非线性系数  $\gamma_{12} = 0.88$  W<sup>-1</sup>·km<sup>-1</sup>。另外，选择 LP<sub>01</sub> 和 LP<sub>11</sub> 模式的损耗系数分别为  $\alpha_1 = 0.2$  dB·km<sup>-1</sup> 和  $\alpha_2 = 0.3$  dB·km<sup>-1</sup>。根据上述参数，图 1 画出了 LP<sub>01</sub> 模式的光功率和光场相位在 FMF 中的演化，可以看出解析解与数值结果是一致的。

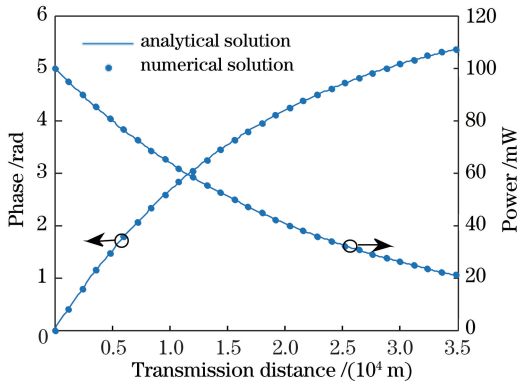


图 1 FMF 中 LP<sub>01</sub> 模式的光场复包络演化  
Fig. 1 Evolution of optical field complex envelope for LP<sub>01</sub> mode in FMF

### 3 损耗系数与非线性系数的测量

对于连续波情形，可用模式损耗和非线性系数表示 FMF 的传输特性，同时它们也是影响光纤通信系统性能的重要参数<sup>[20]</sup>。由(3)式和(4)式可知，如果能够测量出 FMF 传输中各个模式的功率和相位变化，就可以知道模式损耗系数和非线性系数。下面仍以 LP<sub>01</sub> 和 LP<sub>11</sub> 两模光纤系统为例加以说明。

由(2)式可知，非线性系数依赖于模场分布。一般而言，基模 LP<sub>01</sub> 的非线性系数  $\gamma_{11}$  比其他非线性系数  $\gamma_{12}$  和  $\gamma_{22}$  的稳定性更好<sup>[21]</sup>。因此，保持  $\gamma_{11}$  的值近似不变，讨论高阶模式的非线性系数  $\gamma_{12}$  和  $\gamma_{22}$  的测量。

由(3)式可得 LP<sub>01</sub> 和 LP<sub>11</sub> 模式的损耗系数为

$$\begin{cases} \alpha_1 = -\ln(P_1/P_{10})/L, \\ \alpha_2 = -\ln(P_2/P_{20})/L, \end{cases} \quad (5)$$

式中： $L$  为 FMF 的长度。由(5)式可知，模式损耗系数仍可采用传统方法测量，即利用发送光功率和接收光功率来进行计算。进一步地，由(4)式可计算非线性系数  $\gamma_{12}$  和  $\gamma_{22}$ ，计算公式为

$$\begin{cases} \gamma_{12} = \frac{\Delta\varphi_1 - \gamma_{11} P_{10} L_{\text{eff},1}}{2P_{20} L_{\text{eff},2}}, \\ \gamma_{22} = \frac{\Delta\varphi_2 - 2\gamma_{12} P_{10} L_{\text{eff},1}}{P_{20} L_{\text{eff},2}}, \end{cases} \quad (6)$$

式中： $\Delta\varphi_1$  ( $\Delta\varphi_2$ ) 和  $L_{\text{eff},1}$  ( $L_{\text{eff},2}$ ) 分别为 LP<sub>01</sub> (LP<sub>11</sub>) 的非线性相移和等效光纤长度。

### 4 FMF 通信系统的非线性补偿

以支持两个 LP 模的四相 QPSK 信号系统为例，仿真分析模式损耗和非线性效应对 MDM 系统性能的影响，表明模间相位调制的补偿作用。两模光纤通信系统的基本结构和仿真框图如图 2 所示。

多模激光器发出的两个模式的连续光波，经过光相位调制器后分别产生两路 QPSK 信号，其相位分别为  $\theta_A = (\pi + A\pi/2) \bmod(2\pi)$  和  $\theta_B = (\pi + B\pi/2) \bmod(2\pi)$ ，它们分别对应 A 和 B 两个 4 进制数字基带信号 (A, B 信号序号标为 0, 1, 2, 3)。MDM 器将两束已调光耦合到 FMF 进行传输，模式解复用器再将两个模式的光波从 FMF 中解复用出来，FMF 的非线性效应使输出光场相位变化为  $\theta_1 = \theta_A + \Delta\varphi_1$  和  $\theta_2 = \theta_B + \Delta\varphi_2$ ，直接在光域或经过电域进行相位补偿后可以得到  $\tilde{\theta}_A$  和  $\tilde{\theta}_B$ 。补偿不完全会导致补偿后相位  $\tilde{\theta}_A$  和  $\tilde{\theta}_B$  与实际相位信息  $\theta_A$  和  $\theta_B$  发生偏离。对于 QPSK 信号，要求星座点偏离理想参考位置不超过  $\pi/4$ 。对  $\tilde{\theta}_A$  和  $\tilde{\theta}_B$  作出判决后，解调出对应的 A 和 B 的 4 进制数字基带信号。单模光纤系统中直接的光域相位补偿可通过光相位共轭器实现<sup>[22]</sup>，而电域的相位补偿需经相干探测后在数字信号处理 (DSP) 部分完成<sup>[10]</sup>。在 DSP 模块中，利用第 2 节给出的解析式

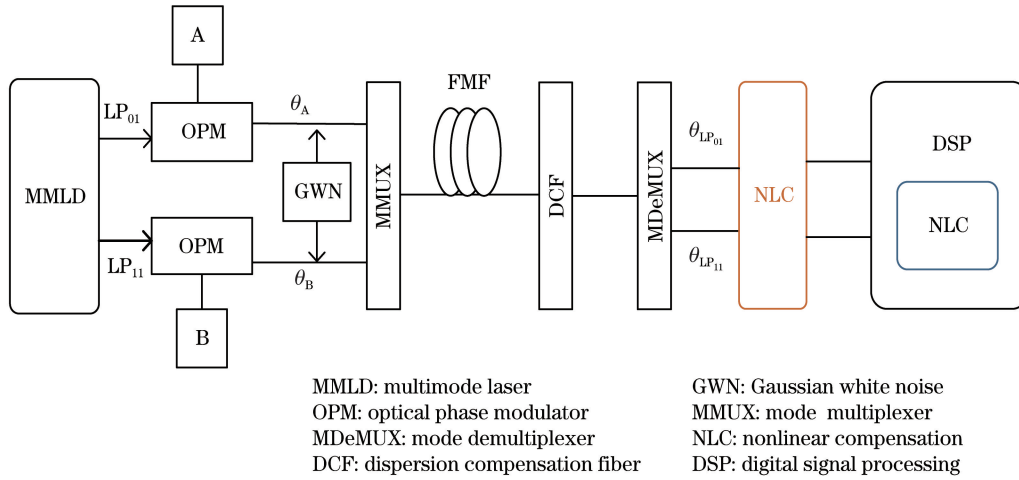


图 2 两模光纤通信系统结构

Fig. 2 Structure of two-mode optical fiber communication system

计算出非线性相移  $\Delta\varphi_l$ , 求出  $\exp(-i\Delta\varphi_l)$  的采样值, 并与光电转换信号的复包络采样值相乘, 获得非线性相位补偿后的数字信号, 然后进行相位解调处理。

采用光通信仿真软件和数值建模联合仿真计算的方法来验证少模通信系统的非线性相位补偿过程。信号收发系统采用光通信仿真软件中的模块, 少模非线性光纤信道和 DSP 补偿采用数值建模的方式对采样信号进行离线数字信号处理。设  $LP_{01}$  和  $LP_{11}$  模导波光波长为 1550 nm, 输入光功率  $P_{10} = P_{20} = 100$  mW。在每个输入导波光场幅度上叠加一个高斯白噪声(图 2), 信号质量可用误差矢量幅度(EVM)来评判<sup>[23]</sup>。EVM 定义为误差矢量信号与参考信号的均方根值(RMS)之比, 即

$$E_{VM} = \frac{\text{RMS}(|A_{out} - A_{s,out}|)}{\text{RMS}(|A_{s,out}|)} \times 100\%, \quad (7)$$

式中:  $A_{out}$  和  $A_{s,out}$  分别为有、无噪声输入时输出闲频光的光场复包络, 可由(3)式和(4)式计算得到。在有、无非线性补偿两种情形下, 两个模式信号经 FMF 传输后输出的 EVM 随输入信噪比(SNR)的变化如图 3 所示, 其中, FMF 的参数与上文一致, 光纤长度  $L = 35$  km。由图 3 可知, 输入 SNR 越大, 输出信号星座图的 EVM 越小, 输出信号质量越好, 这与事实相符。经过非线性相位补偿后, 输出信号的 EVM 可降低约 80%, 由此表明 FMF 通信系统中非线性补偿的必要性。

## 5 补偿算法的适应性分析

FMF 通信中, 高阶模式的模场分布对环境温

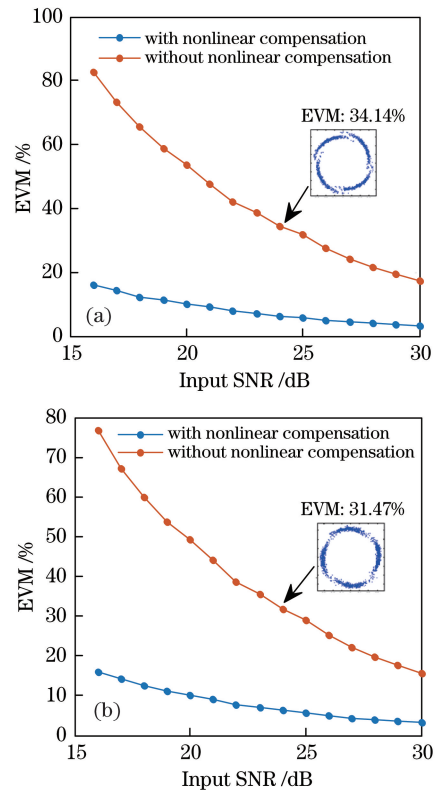


图 3 非线性补偿对星座图质量的影响。

(a)  $LP_{01}$ ; (b)  $LP_{11}$

Fig. 3 Effect of nonlinear compensation on constellation map quality. (a)  $LP_{01}$ ; (b)  $LP_{11}$

度、光纤形变等因素更为敏感<sup>[21]</sup>, 而非线性系数又与模场交叠积分密切相关。因此, 本研究主要考虑  $\gamma_{12}$  和  $\gamma_{22}$  的变化对少模传输系统的影响。光纤的模式损耗系数和非线性系数不断地变化, 会影响非线性模间 XPM 的补偿效果。电域的非线性相位补偿依赖于模式损耗系数和非线性系数的非实时测量, 即每隔一段时间需要通过训练序列等方法对模式损

耗系数和非线性系数的值进行学习。因此,有必要考察非线性补偿效果对模式损耗系数和非线性系数变化的适应性,一旦超过相应参数的临界值则触发学习过程。

首先,以  $\gamma_{22}$  偏离其参考值  $1.33 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$  的情形为例,考察两个模式的非线性相位补偿效果。当输入光信号的 SNR 为 24 dB 时,两个模式信号的输出 EVM 值随  $\gamma_{22}$  偏离程度的变化曲线如图 4 所示。由图 4 可以看出,LP<sub>11</sub> 模式的 EVM 会随着  $\gamma_{22}$  偏离指数增大,而 LP<sub>01</sub> 光场的信息不受参数  $\gamma_{22}$  的影响。可见,当参数偏离到一定程度时就需要重新设定参考值。

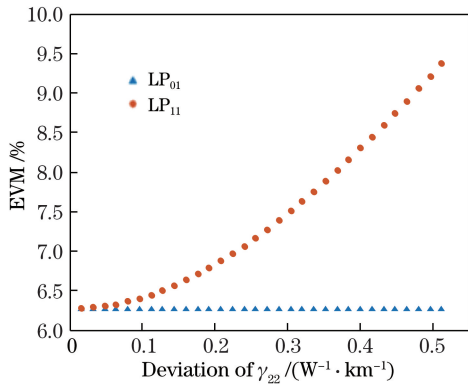


图 4 输出光场信号质量 EVM 随  $\gamma_{22}$  偏离值的变化曲线

Fig. 4 Relationship between deviation of  $\gamma_{22}$  and output signal quality EVM

对于 QPSK 信号,要求星座点偏离理想参考位置不超过  $\pi/4$ ,在此条件下可以定义模式损耗系数和非线性系数相对于其参考值所允许的最大偏离  $\Delta\alpha_i$  和  $\Delta\gamma_{i2}$ ,  $i=1,2$  分别对应于 LP<sub>01</sub> 和 LP<sub>11</sub>。 $\Delta\alpha_i$  和  $\Delta\gamma_{i2}$  的大小与其参考值的关系如图 5 所示。由图 5(a)可以看出,模式损耗的参考值越大,可容忍的偏离也会增大,然而大的模式损耗会限制 FMF 系统的传输距离。由图 5(b)可知,所允许的非线性系数最大偏离不依赖于其参考取值,这与(6)式揭示的规律一致,所允许的最大偏离  $\Delta\gamma_{22}$  和  $\Delta\gamma_{12}$  分别为  $0.503 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$  和  $0.146 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 。由  $\Delta\gamma_{22} \gg \Delta\gamma_{12}$  可知,FMF 通信系统中非线性相位补偿方法的有效性主要取决于模间非线性系数的变化  $\Delta\gamma_{12}$ 。

## 6 结 论

考虑 FMF 中 SPM 和 XPM 效应对导波光传播

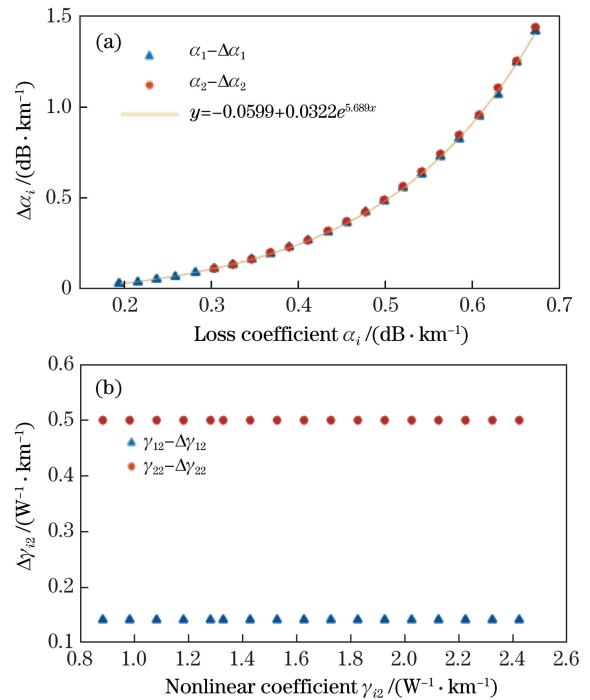


图 5 工作点的最大偏离。(a)  $\Delta\alpha_i$  随损耗系数的变化;  
(b)  $\Delta\gamma_{i2}$  随非线性系数的变化

Fig. 5 Maximum deviation of the work point. (a)  $\Delta\alpha_i$  as a function of loss coefficient; (b)  $\Delta\gamma_{i2}$  as a function of nonlinear coefficient

特性的影响,推导出多个模式的导波光复包络幅度和相位解析式表达,并通过数值方法和解析方法的对比验证了非线性方程解析式表达的正确性。从非线性方程解析解的结果出发,提出两模光纤中损耗系数和非线性系数的测量和计算方法。以支持两个 LP 模的四相 QPSK 信号系统为例,仿真分析了模式损耗和非线性效应对 MDM 系统性能的影响,并提出了模间相位调制补偿方法,该方法使系统星座图 EVM 的值降低 80%。对非线性相位补偿的适应性进行分析,发现相位补偿后能够正确解调 QPSK 信号所容许的模式损耗偏离会随着其参考值的增加而增大,所容许的模间非线性系数偏离为  $0.146 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 。

## 参 考 文 献

- [1] Ferreira F, Jansen S, Monteiro P, *et al.* Nonlinear semi-analytical model for simulation of few-mode fiber transmission[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(4): 240-242.
- [2] Li S H, Wang J. Supermode fiber for orbital angular momentum (OAM) transmission[J]. Optics Express, 2015, 23(14): 18736-18745.

- [3] Mizuno T, Takara H, Sano A, *et al.* Dense space-division multiplexed transmission systems using multi-core and multi-mode fiber[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(2): 582-592.
- [4] Ferreira F M, Fonseca D, da Silva H J A. Design of few-mode fibers with M-modes and low differential mode delay[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(3): 353-360.
- [5] Li H S, Ren G B, Lian Y D, *et al.* Broadband orbital angular momentum transmission using a hollow-core photonic bandgap fiber[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(15): 3591-3594.
- [6] Li R L, Fang W L, Tang C J, *et al.* An optical MIMO transmission system over 80 km of two-mode fiber using DSP [J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 8309: 83091A.
- [7] Zhang X, Li Y, Du W T, *et al.* Compensation of mode coupling of mode-division multiplexing transmission system with MIMO CMA [C] // *Asia Communications and Photonics Conference 2013*, November 12-15, 2013, Beijing, China. Washington, D.C.: OSA, 2013: AW3E.1.
- [8] Agrawal G P. *Nonlinear fiber optics, applications of nonlinear fiber optics*[M]. Jia D F, Yu Z H, Transl. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010: 12-28, 171-173.  
Agrawal G P. *非线性光纤光学原理及应用*[M]. 贾东方, 余震虹, 译. 2 版. 北京: 电子工业出版社, 2010: 12-28, 171-173.
- [9] Wan F, Wu B J, Cao Y M, *et al.* Study on phase matching condition at pump depletion in four-wave mixing[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48(2): 0219001.  
万峰, 武保剑, 曹亚敏, 等. 四波混频泵浦消耗过程的相位匹配条件研究[J]. *光子学报*, 2019, 48(2): 0219001.
- [10] Mateo E, Zhu L K, Li G F. Impact of XPM and FWM on the digital implementation of impairment compensation for WDM transmission using backward propagation[J]. *Optics Express*, 2008, 16(20): 16124-16137.
- [11] Chen X, Liu X, Chandrasekhar S, *et al.* Experimental demonstration of fiber nonlinearity mitigation using digital phase conjugation[C] // *Optical Fiber Communication Conference*, March 4-8, 2012, Los Angeles, California, United States. Washington, D.C.: OSA, 2012: OTh3C.1.
- [12] Essiambre R J, Mestre M A, Ryf R, *et al.* Experimental observation of inter-modal cross-phase modulation in few-mode fibers [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, 25(6): 535-538.
- [13] Brehler M, Krummrich P M. Impact of WDM channel count on nonlinear effects in MDM transmission systems[C] // *Optical Fiber Communication Conference*, March 19-23, 2017, Los Angeles, California, United States. Washington, D.C.: OSA, 2017: Th2A.63.
- [14] Wang Z, Wu B J, Wen F, *et al.* Magnetic control characteristics of nonlinear fiber Sagnac structure[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(10): 1023001.  
王卓, 武保剑, 文峰, 等. 非线性光纤萨尼亚克结构的磁控特性[J]. *光学学报*, 2017, 37(10): 1023001.
- [15] Mishra V, Haldar R, Mondal P, *et al.* Efficient all-optical transistor action in short-length multimode optical fibers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(13): 2582-2588.
- [16] Wu J D, Lu J, Ren H L, *et al.* Nonlinear equalizer based on general regression neural network in coherent optical OFDM system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(9): 0906002.  
吴金达, 卢瑾, 任宏亮, 等. 基于广义回归神经网络的 CO-OFDM 系统非线性均衡 [J]. *光学学报*, 2018, 38(9): 0906002.
- [17] Rademacher G, Luis R S, Puttnam B J, *et al.* Investigation of intermodal nonlinear signal distortions in few-mode fiber transmission [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(4): 1273-1279.
- [18] Zhang D F. *MATLAB neural network application design*[M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2012: 315.  
张德丰. *MATLAB 神经网络应用设计*[M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2012: 315.
- [19] 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.
- [20] Palais J C. *Fiber optic communications*[M]. Wang J P, Liu J, Wen C H, *et al.*, Transl. 5th ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011: 103-136.  
Palais J C. *光纤通信*[M]. 王江平, 刘杰, 闻传花, 等, 译. 5 版. 北京: 电子工业出版社, 2011: 103-136.
- [21] Liang X. *Characteristic analysis and development of novel few mode fiber and related devices*[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016: 21-62.  
梁骁. *新型少模光纤波导特性分析及其器件的研制*[D]. 北京: 北京交通大学, 2016: 21-62.
- [22] Bu Y, Wang X Z. Suppression of pulse impairments due to cross-phase modulation by frequency domain phase conjugation [J]. *Acta Physica Sinica*, 2005,

54(10): 4747-4753.

步扬, 王向朝. 基于频域相位共轭技术的交叉相位调制所致失真的复原[J]. 物理学报, 2005, 54(10): 4747-4753.

[23] Cao Y M, Wu B J, Wan F. Hybrid operators of

three-channel optical phase[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(12): 1206005.

曹亚敏, 武保剑, 万峰. 三通道光相位混合运算器[J]. 光学学报, 2018, 38(12): 1206005.