

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2024.01.008

光纤线性偏振模式组合对模分复用系统的影响研究

张振鹤, 刘丰年, 夏志鸿, 朱俊辉, 卢珂兵

(湖南工业大学 计算机学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 在纤芯直径为 $50\text{ }\mu\text{m}$ 的多模光纤中研究了7个光纤线性偏振(LP)模式的6种四模式组合对模分复用系统的影响。这7个LP模式由已报道的3个低阶模式(LP_{01} 、 LP_{11} 、 LP_{21})和4个传播常数(β)相差较大的模式(LP_{02} 、 LP_{12} 、 LP_{13} 、 LP_{14})组成, 根据模式光斑形状及耦合特性选择6种不同的四模式组合并在Optisystem平台进行仿真。结果表明, 在进行模分复用短距离传输时, 选择 LP_{01} 、 LP_{11b} 、 LP_{12a} 以及 LP_{21b} 的模式组合, 其 Q 因子最高, 眼图效果最好, 即该模式组合传输效果最佳。

关键词: 多模光纤; 线性偏振模式; 模分复用; Optisystem 仿真

中图分类号: TN913.7

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2024)01-0055-07

引文格式: 张振鹤, 刘丰年, 夏志鸿, 等. 光纤线性偏振模式组合对模分复用系统的影响研究[J]. 湖南工业大学学报, 2024, 38(1): 55-61.

Research on the Influence of Fiber Linear Polarized Mode Combination on Mode Division Multiplexing System

ZHANG Zhenhe, LIU Fengnian, XIA Zhihong, ZHU Junhui, LU Keping

(College of Computer Science, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: A research has been carried out on the influence of six four-mode combinations of seven fiber linear-polarization (LP) modes on the mode division multiplexing system in the multi-mode fiber with a core diameter of $50\text{ }\mu\text{m}$. The seven-LP modes are composed of three reported low-order modes (LP_{01} , LP_{11} , LP_{21}) and four modes (LP_{02} , LP_{12} , LP_{13} , LP_{14}) with significant differences in propagation constants (β). Six different four-mode combinations are selected according to the pattern spot shape and mode coupling characteristics, followed by a simulation test on the Optisystem platform. The results show that with short distance transmission performed in modular division multiplexing, the mode combination of LP_{01} , LP_{11b} , LP_{12a} and LP_{21b} is characterized with the highest Q factor and the optimal eye diagram effect, indicating that this mode combination achieves the best transmission effect.

Keywords: multi-mode fiber; linear-polarized mode; mode division multiplexing; Optisystem simulation

收稿日期: 2022-11-13

基金项目: 湖南省自然科学基金省市联合基金资助项目(2022JJ50067, 2021JJ50049); 湖南省教育厅科学研究基金资助项目(21C0405, 20C0589, 19C0578)

作者简介: 张振鹤, 男, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为光子技术与现代光通信, 智能光纤传感,

E-mail: 2448938062@qq.com

通信作者: 刘丰年, 女, 湖南工业大学教授, 博士, 硕士生导师, 主要研究方向为光纤激光技术, 激光脉冲放大, 光信号传输及光纤传感, E-mail: 836354185@qq.com

0 引言

近年来,人们对通信容量需求不断增大,在一系列高性能光电器件和光通信技术发展推动下,单根单模光纤的系统容量上升超过了 5 个数量级,现已高达 101.7 Tbit/s^[1-3],但单模光纤的通信容量目前已经接近非线性香农极限,无法满足互联网带宽日益增长的需求^[4]。基于以上原因,寻找一种新型高速大容量光传输技术已成为光通信网络面临的一个巨大挑战^[5]。而多模光纤(multi-mode fiber, MMF)可在给定的工作波长上传输多种模式,突破了单模光纤非线性香农极限的瓶颈,因此基于 MMF 传输的模分复用(mode division multiplexing, MDM)系统受到广泛的关注。美国 Bell 实验室的 H. R. Stuart^[6]、陈诗^[7]等将携带独立信号的两路光束同时注入普通 MMF 实现了 1 km 稳定传输,证明了 MDM 技术的可行性。C. P. Tsekrekos 等^[8]提出了一种简单的可减少 MDM 传输时串扰的光学方法。S. Randel 等^[9]结合多入多出技术,提出了对基于少模光纤传输的 MDM 系统进行容量控制的原理。R. Ryf 等^[10]在普通 MMF 上实现了系统容量为 18 Tbit/s 的 3 个空间模式的长距离传输,且证明了 6 个空间模式的 MDM 传输距离为 17 km 时,单信道传输速率为 720 Gbit/s。J. J. A. Van Weerdenburg 等^[11]在纤芯直径为 50 μm 的 MMF 上实现了 10 个空间模式的 40 km 传输,并设想利用低阶模式实现大容量长距离的 MDM 传输。Li J. P. 等^[12]在 20 m 的 OM2-MMF 上采用波分-模分复用系统实现了速率为 Tbit/s 量级的传输,该研究发现基于强度调制-直接检测技术,并采用普通 MMF 传输的 MDM 系统在高速、短距离传输中仍具有潜力。

目前已经有许多在普通 MMF 中实现多通道 LP 模式复用传输的实验研究成果^[8-15],但已有关于 MDM 传输的研究主要集中在提高通信容量方面,且多为几个低阶模式的模分复用传输研究。在 MDM 系统中,选用不同模式组合进行传输,以及对不同模式组合的信号传输质量进行比较方面的研究较少。为解决上述问题,本文分析了光纤传输的模式特性,选取已报道的 3 个低阶模式(LP₀₁、LP₁₁、LP₂₁)和传播常数相差较大的 4 个模式(LP₀₂、LP₁₂、LP₁₃、LP₁₄),将以上 7 个 LP 模式根据模式光斑形状和耦合特性组建 6 种四模式组合,通过研究这 6 种四模式组合的复用传输并进行信号传输质量比较,提出在短距离内采用强度调制-直接检测技术能够实现信号高质量传输的模式组合机制。

1 理论基础

对于折射率分布为阶跃型的光纤而言,其折射率分布为

$$n(r) = \begin{cases} n_1, & 0 \leq r \leq a; \\ n_2, & r > a. \end{cases} \quad (1)$$

式中: n_1 为纤芯折射率; n_2 为包层折射率; a 为光纤纤芯半径。

对阶跃型光纤采用矢量法进行分析,根据麦克斯韦方程组和波动方程组可得出光纤模式——矢量模,电场和磁场的纵向分量 E_z 和 H_z 分别满足如下方程:

$$\frac{d^2 E_z}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dE_z}{dr} + \left(n(r)^2 k_0^2 - \beta^2 - \frac{\nu^2}{r^2} \right) E_z = 0, \quad (2)$$

$$\frac{d^2 H_z}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dH_z}{dr} + \left(n(r)^2 k_0^2 - \beta^2 - \frac{\nu^2}{r^2} \right) H_z = 0. \quad (3)$$

式(2)(3)中: $n(r)$ 为光纤横截面折射率; k_0 为波矢; β 为传播常数; ν 为贝塞尔函数的阶数,也称为方位角模数。

横向分量 E_r 、 E_ϕ 、 H_r 、 H_ϕ 分别用 E_z 、 H_z 表示为

$$E_r = -\frac{j}{K^2} \left(\beta \frac{\partial E_z}{\partial r} + \omega \mu \frac{1}{r} \frac{\partial H_z}{\partial \phi} \right), \quad (4)$$

$$E_\phi = -\frac{j}{K^2} \left(\frac{\beta}{r} \frac{\partial E_z}{\partial \phi} - \omega \mu \frac{\partial H_z}{\partial r} \right), \quad (5)$$

$$H_r = -\frac{j}{K^2} \left(\beta \frac{\partial H_z}{\partial r} - \omega \epsilon \frac{n(r)^2}{r} \frac{\partial E_z}{\partial \phi} \right), \quad (6)$$

$$H_\phi = -\frac{j}{K^2} \left(\frac{\beta}{r} \frac{\partial H_z}{\partial \phi} + \omega \epsilon n(r)^2 \frac{\partial E_z}{\partial r} \right). \quad (7)$$

式(4)~(7)中: ϵ 、 μ 分别为介电常数和磁导率; ω 为角频率; $K^2 = n(r)^2 k_0^2 - \beta^2$ 。

由于波动方程中的各系数都是待定的,因此对波动方程进行求解时理论上会得到许多组解,即每个本征值 β 都对应光纤中允许稳定存在的一种电磁场分布,这些分布被称为导模(或本征模式)。这就表明光在光纤中传输会同时存在多种形式的传输场。

根据光纤中支持导模的电磁场分布特征,可以将本征模式分成 4 种类型,为 TM_{0n} 模式、TE_{0n} 模式、HE_{mn} 模式和 EH_{mn} 模式。纵向电场分量 E_z 不为 0 而纵向磁场分量 H_z 为 0 时为 TM_{0n} 模式,称为横磁模;纵向电场分量 E_z 为 0 而纵向磁场分量 H_z 不为 0 时为 TE_{0n} 模式,称为横电模;纵向电场分量 E_z 和纵向磁场分量 H_z 都不为 0 时为混合模,即 HE_{mn} 和 EH_{mn} 两种模式。其中, m 为电磁场分量在角向的形式变化, n 为模场强度沿径向出现的极大值和零点数目。

下面介绍标量模（或线性偏振模）。由于实际中光纤纤芯和包层的折射率差很小，因此用相对折射率表示为

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \quad (8)$$

相对折射率 $\Delta \ll 1$ 的光纤为弱导光纤，在弱导近似条件下，取 $n_1 \approx n_2$ ，光纤中的电磁波在横向上近似为线性偏振态，因此横向电场和横向磁场在整个横截面上偏振方向处处相同且不变，这种电磁场模式被称为标量模（或线性偏振模）。LP 模式的偏振方向可以沿 x 轴或 y 轴，当偏振方向为沿 y 轴时， E_x 分量恒等于 0， H_y 分量近似为 0，其另外两个横向电磁场分量 E_y 和 H_x 的解如下：

$$E_y = A \begin{cases} \frac{J_m\left(\frac{Ur}{a}\right)}{J_m(U)} \cos m\varphi \exp(-j\beta z), & 0 \leq r \leq a; \\ \frac{K_m\left(\frac{Wr}{a}\right)}{K_m(W)} \cos m\varphi \exp(-j\beta z), & r > a. \end{cases} \quad (9)$$

$$H_x = -A \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} \begin{cases} \frac{n_1 J_m\left(\frac{Ur}{a}\right)}{J_m(U)} \cos m\varphi \exp(-j\beta z), & 0 \leq r \leq a; \\ \frac{n_2 K_m\left(\frac{Wr}{a}\right)}{K_m(W)} \cos m\varphi \exp(-j\beta z), & r > a. \end{cases} \quad (10)$$

式 (9) (10) 中： U 和 W 均为横向传播常数； J_m 为 m 阶第一类 Bessel 函数； K_m 为 m 阶第二类变型 Hankel 函数； A 为常数，与激励条件有关。

同理可得 LP 模式沿 x 轴方向偏振时磁场分量的解。某些模式的空间分布和传播常数相同，在描述光纤波导中光场的传播特性时是等价的，可以看作同一种模式，即这些模式是简并的。对于矢量模，当 $m \neq 0$ 时， HE_{mn} 或 EH_{mn} 模式均包含两个高度简并即传播常数 β 相同的奇模和偶模，且奇模和偶模在空间各点的偏振方向保持相互正交。对于标量模，当 $m > 0$ 时，电磁场分量沿角向的变化形式有两种，其偏振方向可以沿 x 轴或 y 轴方向，因此每个 LP_{mn} 模式都具有四重简并态；而 $m=0$ 对应的 LP_{0n} 模式仅包含两种偏振变化，即为两重简并^[16]。与矢量模类似，不同阶数的 LP 模式之间也是相互正交的，因此在设计 MDM 系统时可以选用 LP 模式。LP 模式可以近似为两个传播常数存在差异的本征模式进行叠加而形成的，即 LP_{mn} 可以看作是 $HE_{(m+1, n)}$ 模和 $EH_{(m-1, n)}$ 模的线性叠加。

模式之间耦合大致可以分为两类，一类是简并模的耦合，另一类是非简并模的耦合。简并模之间的耦合是因为光纤的半径方向的折射率分布不均匀引起的，而非简并模式之间的耦合是由光纤的轴向折射率分布不均匀引起的。当具有相同简并度的简并群在传输过程中进行模式耦合时，模式串扰现象比较严重，从不同简并度中选择不同模式进行模分复用仿真实验，结果发现 LP_{01} 、 LP_{11b} 、 LP_{12a} 、 LP_{21b} 的模式组合传输效果最佳。因此，研究光纤线性偏振模式组合对模分复用具有指导意义。

2 仿真实验与讨论

图 1 所示为 MDM 系统的框架图。

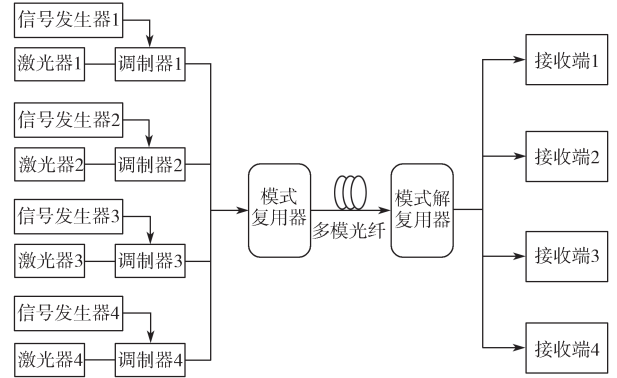


图 1 MDM 系统框架图

Fig. 1 Frame diagram of the MDM system

如图 1 所示，该系统框架由发射模块（包括光调制器、激光器、信号发生器）、模式复用/解复用模块、MMF（折射率分布为抛物线型）以及接收模块组成。在发射模块部分，每个激光器的 LP 模式选择不一样，其余器件参数设置相同。首先，通过光调制器将电信号转换为相应的光信号，各路信号经调制器调制后传送到模式复用器，将不同模式信号耦合到一起，接着在 MMF 中进行传输，到达模式解复用器后，对各个模式信号进行解复用，再分别传送到每个接收机并进行分析。MDM 系统采用强度调制-直接检测技术。

根据 MDM 系统框架图对仿真器件的选型：工作波长为 850 nm 的空间激光器、单极性不归零（non-return-to-zero, NRZ）码 M-Z 型调制器、模式复用器、多模光纤、模式解复用器以及光接收机。

2.1 Optisystem 仿真相关器件的参数选择

表 1 所示为仿真实验器件的相关参数设置，除表中参数需要改变外，其余参数的设置以 Optisystem 仿真平台的初始数据为准。

表 1 器件主要参数

Table 1 Main parameters of devices

Device	Name	Value
Spatial CW Laser	Frequency	850 nm
	Mode polarization	x
	Pol. X Power ratio array	Fiber LP
MZ Modulator Analytical	Extinction ratio	30dB
	Negative signal chirp	NO
	Symmetry factor	-1
NRZ Pulse Generator	Rectangle shape	Exponential
	Format for pulse range	Min/Max
Ideal Mux	Number of input ports	4
	Loss	0 dB
Measured-Index Multimode Fiber	Length	1 km
Spatial Demultiplexer	Reference Wavelength	850 nm
	Number of wavelengths	1
	Filter type	Bessel
Spatial Demultiplexer	Number of spatial modes	4
	Frequency	850 nm
Spatial optical Receiver	-	-

2.2 仿真实验与结果分析

根据 MDM 系统的框架图在 Optisystem 平台构建对应的仿真图，MDM 系统仿真结构如图 2 所示。在 MDM 系统仿真过程中，对发射模块设置不同的参数，改变四路光信号模式，组成不同的四模式组合。表 2 给出了仿真实验所用到的 6 种四模式组合及各模式的光斑图，通过对 6 组模式的仿真实验结果（ Q 因子、误码率 BER（bit error ratio）、眼图）进行分析，得出传输质量最佳的模式组合。

表 2 实验模式组及各模式光斑图

Table 2 Experimental mode groups and spot patterns of each mode

组 数	模式 1	模式 2	模式 3	模式 4
第 1 组模式	LP ₀₁	LP ₀₂	LP _{12a}	LP _{11b}
第 2 组模式	LP ₀₁	LP ₀₂	LP _{21b}	LP _{11b}
第 3 组模式	LP ₀₁	LP _{11a}	LP _{14b}	LP _{21b}
第 4 组模式	LP ₀₁	LP _{11b}	LP _{14b}	LP _{21b}
第 5 组模式	LP ₀₁	LP _{11b}	LP _{13a}	LP _{21b}
第 6 组模式	LP ₀₁	LP _{11b}	LP _{12a}	LP _{21b}

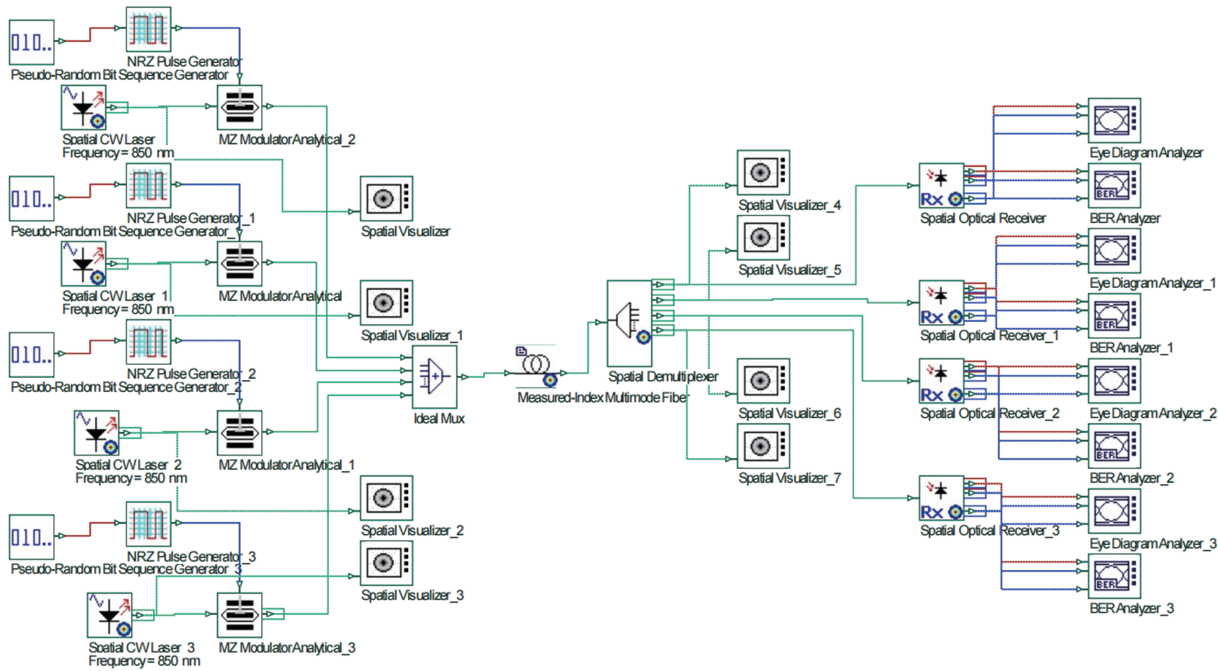


图 2 MDM 系统仿真图

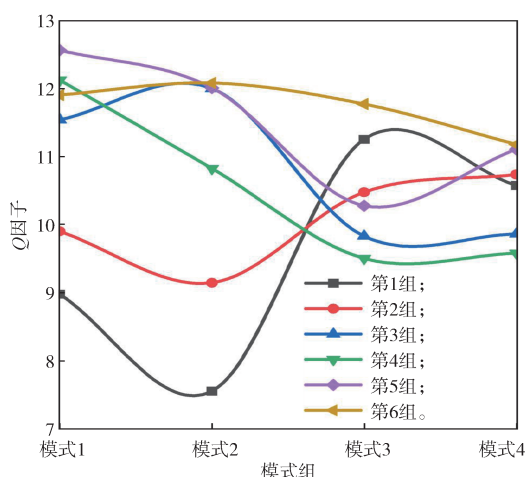
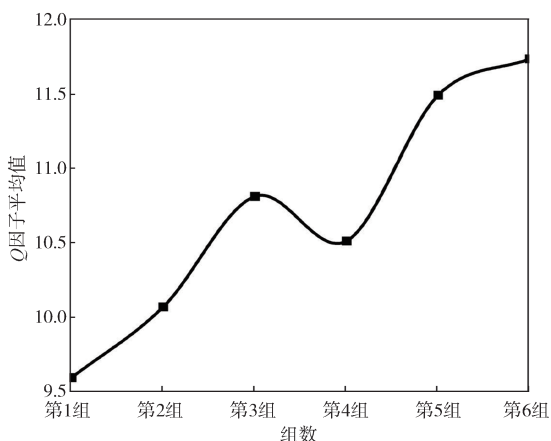
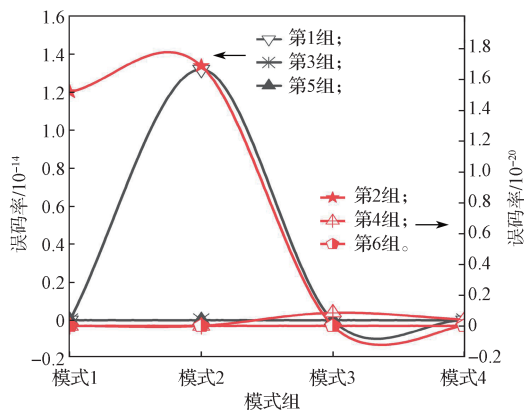
Fig. 2 Simulation diagram of the MDM system

图 3 为各模式组合仿真后得到的 Q 因子对比图，其中图 3a 为 6 组模式组合中各个模式的 Q 因子大小分布。由图 3 可知，第 1、2 组的 Q 因子数值偏小，而在 Q 因子数值较大的第 3、4、5、6 组中，第 6 组的 Q 因子值分布最为稳定。为更清楚地分析各模式组的 Q 因子值平均水平，再对 6 种模式组合的 Q 因

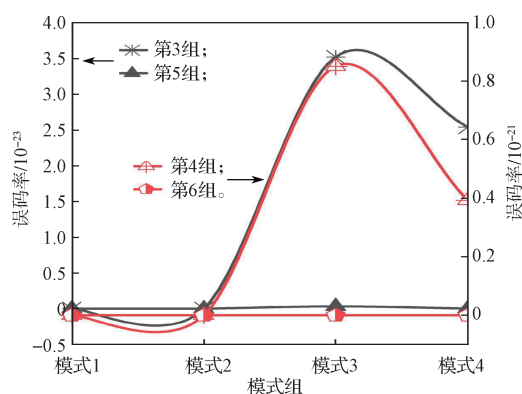
子求平均值，结果如图 3b 所示，可知第 6 组的平均 Q 因子数值最大。由以上结果分析可得：第 6 组模式的传输质量最佳。

如图 4 所示为各模式组合传输后得到的信号 BER（bit error ratio）对比图。

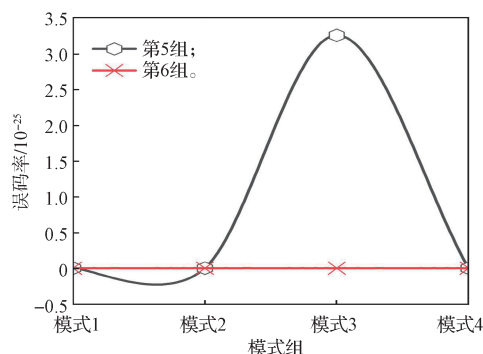
首先, 对图 4a 中 6 组数据进行比较与分析, 可以得知, 第 1、2 组模式中的 BER 较高; 然后对第 3、4、5、6 组模式进行比较与分析, 所得结果如图 4b 所示, 由此可以得知, 第 5、6 组模式的 BER 较低; 最后, 对第 5、6 组模式的 BER 进行比较与分析, 结果如图 4c 所示, 可得第 6 组的 BER 最低, 即第 6 组信号传输质量最好。

a) Q 因子对比图b) 平均 Q 因子对比图图 3 各模式组合的 Q 因子对比Fig. 3 Q -factor comparison for various mode combinations

a) 第 6 组模式



b) 第 3、4、5、6 组模式



c) 第 5、6 组模式

图 4 各模式组合的 BER 对比

Fig. 4 BER comparison for various mode combinations

附表 1 为 6 种模式组合进行仿真实验所得到的各个线性偏振模式的眼图结果。观察分析附表 1 中的眼图: 第 1、2 组中各模式因模式光斑分布形状近似 (表 2 可分析), 得到的眼图效果很差; 第 3、4 组中各模式光斑分布形状不同, 两组模式简并度间隔较大 (LP_{14b} 和 LP_{21b} 简并度间隔为 5), 眼图效果有所改善; 而在第 5 组模式中, 各模式简并度的间隔较小 (LP_{13a} 和 LP_{21b} 简并度间隔为 2), 眼图效果更好, 信号传输质量得到提高; 第 6 组模式中, 各模式光斑分布形状不同且简并度相邻 (各模式简并度间隔为 1), 模式串扰最小, 信号传输质量最好。

综上所述, 当 LP_m 模式的光斑分布形状近似且各模式的简并度相同 (即具有相近的相位传播常数和群时延) 时, 在进行传输时会发生明显的模式串扰, 使得信号传输质量降低; 而当 LP_m 模式的光斑分布形状差异较大且各模式的简并度不同时, 信号传输质量会得到提高, 但各模式简并度之间的间隔差别太大, 又会严重影响传输质量。因为高阶模式光斑在横向场上的能量分散, 与低阶模式传输时更容易引起模式串扰, 而当各模式简并度间隔在一定范围之内 (例如各模式简并度相邻), 信号的传输质量会得到明显的提高。

3 结语

通过分析光纤线性偏振模式的基础理论, 利用模式耦合(串扰)特性, 在已报道的低阶模式(LP_{01} 、 LP_{11} 、 LP_{21})基础上, 选择传播常数相差较大的 LP_{02} 、 LP_{12} 、 LP_{13} 和 LP_{14} 4个模式与之组合, 以4个模式为一组(共6种四模式组合)进行模分复用传输, 并在Optisystem中进行仿真实验。结果表明: 第6种模式组合(LP_{01} 、 LP_{11b} 、 LP_{12a} 、 LP_{21b})因各模式光斑分布形状不同且简并度具有一定差异(间隔为1), 在复用传输时模式串扰最小, 使得其 Q 因子值最高, 眼图效果最佳。这4个模式在所设计的MDM系统中传输时为最佳传输模式组合。因此, 这一结论对MDM系统中的光纤线性偏振模式选择及组合具有指导价值。此研究传输距离为1 km, 增大传输距离的相关研究会在今后的实验中进行。

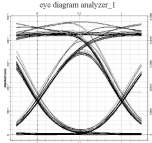
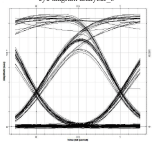
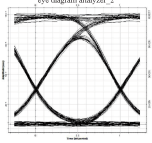
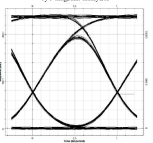
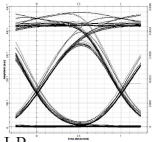
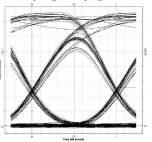
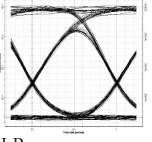
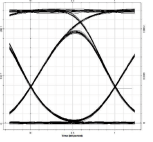
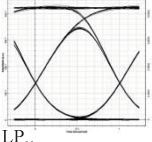
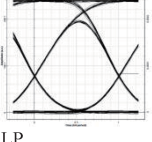
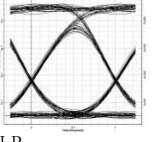
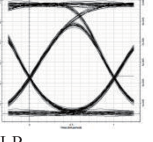
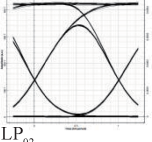
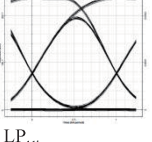
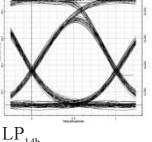
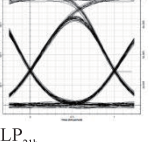
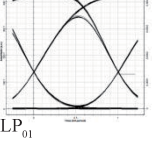
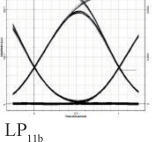
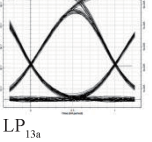
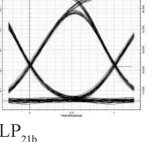
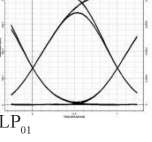
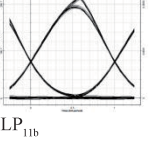
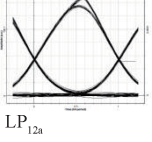
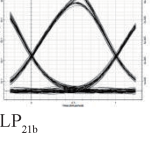
参考文献:

- [1] ESSIAMBRE R J, TKACH R W. Capacity Trends and Limits of Optical Communication Networks[J]. Proceedings of the IEEE, 2012, 100(5): 1035-1055.
- [2] QIAN D Y, HUANG M F, IP E, et al. High Capacity/Spectral Efficiency 101.7 TB/s WDM Transmission Using PDM-128QAM-OFDM over 165 km SSMF within C- and L-Bands[J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30(10): 1540-1548.
- [3] MITRA P P, STARK J B. Nonlinear Limits to the Information Capacity of Optical Fibre Communications[J]. Nature, 2001, 411: 1027-1030.
- [4] 李超, 赵健, 王伟, 等. 4×100 Gbit/s 少模光纤长距离准单模双向传输的实验研究[J]. 中国激光, 2017, 44(2): 285-290.
LI Chao, ZHAO Jian, WANG Wei, et al. 4×100 Gbit/s Long-Distance Quasi-Single-Mode Bi-Directional Transmission with Few-Mode Fiber[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(2): 285-290.
- [5] LI A, CHEN X, AL AMIN A, et al. Space-Division Multiplexed High-Speed Superchannel Transmission over Few-Mode Fiber[J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30(24): 3953-3964.
- [6] STUART H R. Dispersive Multiplexing in Multimode Optical Fiber[J]. Science, 2000, 289: 281-283.
- [7] 陈诗. 模分复用光纤的理论设计及应用研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.
CHEN Shi. Theoretical Design and Application Research of Mode Division Multiplexing Fiber[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2020.
- [8] TSEKREKOS C P, KOONEN A M J. Mode-Selective Spatial Filtering for Increased Robustness in a Mode Group Diversity Multiplexing Link[J]. Optics Letters, 2007, 32(9): 1041-1043.
- [9] 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.
- [10] RYF R, FONTAINE N K, CHEN H, et al. Mode-Multiplexed Transmission over Conventional Graded-Index Multimode Fibers[J]. Optics Express, 2015, 23(1): 235-246.
- [11] VAN WEERDENBURG J J A, VELAZQUEZ BENITEZ A M, VAN UDEN R G H, et al. 10 Spatial Mode Transmission over 40 km 50 μ m Core Diameter Multimode Fiber[C]// Optical Fiber Communication Conference. Anaheim: OSA, 2016: 1-3.
- [12] LI J P, HU J K, ZOU D D, et al. Terabit Mode Division Multiplexing Discrete Multitone Signal Transmission over OM2 Multimode Fiber[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2020, 26(4): 1-8.
- [13] WITTEK S, RYF R, FONTAINE N K, et al. Mode-Multiplexed Transmission Within and Across Mode Groups of a Multimode-Fiber[C]// Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2019. San Diego: OSA, 2019: M2I. 2.
- [14] BERDAGUÉ S, FACQ P. Mode Division Multiplexing in Optical Fibers[J]. Applied Optics, 1982, 21(11): 1950-1955.
- [15] RYF R, FONTAINE N K, WITTEK S, et al. High-Spectral-Efficiency Mode-Multiplexed Transmission over Graded-Index Multimode Fiber[C]//2018 European Conference on Optical Communication (ECOC). Rome: IEEE, 2018: 1-3.
- [16] 王健, 陈诗. 基于传统光纤的涡旋光复用通信研究进展[J]. 应用科学学报, 2020, 38(4): 559-578.
WANG Jian, CHEN Shi. Progress in Vortex-Multiplexed Communications Based on Conventional Fibers[J]. Journal of Applied Sciences, 2020, 38(4): 559-578.

(责任编辑: 申剑)

附表 1 六组模式组合的眼图对比

Table 1 Eye diagram comparison between the six mode combinations

组数	模式 1	模式 2	模式 3	模式 4
第 1 组模式	eye diagram analyzer_1  LP₀₁	eye diagram analyzer_3  LP₀₂	eye diagram analyzer_2  LP_{12a}	eye diagram analyzer  LP_{11a}
第 2 组模式	eye diagram analyzer_1  LP₀₁	eye diagram analyzer_3  LP₀₂	eye diagram analyzer_2  LP_{21b}	eye diagram analyzer  LP_{11a}
第 3 组模式	eye diagram analyzer_1  LP₀₁	eye diagram analyzer_3  LP_{11a}	eye diagram analyzer_2  LP_{14b}	eye diagram analyzer  LP_{21b}
第 4 组模式	eye diagram analyzer_1  LP₀₂	eye diagram analyzer_3  LP_{11b}	eye diagram analyzer_2  LP_{14b}	eye diagram analyzer  LP_{21b}
第 5 组模式	eye diagram analyzer_1  LP₀₁	eye diagram analyzer_3  LP_{11b}	eye diagram analyzer_2  LP_{13a}	eye diagram analyzer  LP_{21b}
第 6 组模式	eye diagram analyzer_1  LP₀₁	eye diagram analyzer_3  LP_{11b}	eye diagram analyzer  LP_{12a}	eye diagram analyzer_3  LP_{21b}