

文章编号: 0253-2239(2010)08-2208-06

多模光纤中基于模斑整形和反馈均衡的传输性能研究

方武良 邵宇丰* 张俊文 黄博 黄德修 迟楠

(复旦大学通信科学与工程系专用集成电路与系统国家重点实验室, 上海 200433)

摘要 总结了多模光纤用于数据通信的优缺点, 并分析多模光纤在未来高速大容量长距离无源光接入网(PON)中应用的可行性。从弱导光纤波导理论出发, 忽略模内色散以及非线性效应的影响, 建立多模光纤的简化模型, 并在该简化多模光纤模型的基础上, 采用仿真实验的方式, 对一些改善多模光纤传输性能的技术: 偏心注入, 改变模斑尺寸, 环形注入以及判决反馈均衡进行了分析, 研究和比较。实验结果证明, 采用模斑整形(主要是环形注入)与反馈均衡结合的方式可以有效地改善多模光纤的传输性能, 使得 10 Gb/s 信号在多模光纤中传输超过 1 km。

关键词 多模光纤; 模间色散; 模斑整形; 判决反馈均衡

中图分类号 TN929.1 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103008.2208

Research on the Transmission Properties for Multi-Mode Fiber Based on Launching Optical Field Shaping and Feedback Equalization

Fang Wuliang Shao Yufeng Zhang Junwen Huang Bo Huang Dexiu Chi Nan

(State Key Laboratory of Application Specific Intergrated Circuits and System,

Department of Communication Science and Technology, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract The feasibility for the applying of multimode fiber (MMF) in the future long haul, high bit-rate, and large capacity PON is analyzed, and the strengths and weakness of MMF are summarized. Then, initiating from the waveguide theory in the weakly guiding fiber and neglecting the intra-modal dispersion as well as nonlinearity, a simple model for multimode fiber is built, based on which analysis, research and comparison through simulation experiments on some performance improving techniques of MMF are made: offset launching, mode size changing, ring launching and feedback equalization. The simulation results demonstrated that the combination of field shaping (mainly ring launching) and feedback equalization can obviously improve the transmission properties of MMF, because of which, the 10 Gb/s data can travel in the MMF for more than 1 km.

Key words multi-mode fiber; inter-modal dispersion; optical field shaping; feedback decision equalization

1 引言

光网络已经成为 21 世纪国家的重要经济命脉, 光网络的科研前沿突破, 会对国家信息产业的国际竞争力、国民经济的快速可持续发展产生深远的影响, 具有重要的战略意义。目前我国光纤通信已得到了充分发展, 通信网、互联网、广电网正在向网际

互联协议(IP)化、宽带化和多媒体化发展, 三网融合的进程正在加快, 固定光网络通信和移动通信正在向更高速率和下一代通信网络发展^[1~4]。

有望作为未来无源光接入网理想介质的多模光纤, 相比于单模光纤具有如下的优点: 1) 芯径粗, 易于校准, 使用多模光纤(MMF)可以大大地降低光纤

收稿日期: 2009-08-26; 收到修改稿日期: 2009-10-16

基金项目: 国家 973 计划(2010CB328300)、国家自然科学基金(600837004, 60777010)、国家 863 计划(2009AA01Z253, 2007AA01Z260)和曙光学者基金资助课题。

作者简介: 方武良(1986—), 男, 硕士研究生, 主要从事光纤通信系统方面的研究。E-mail: fangwuliang2005@163.com

导师简介: 迟楠(1974—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事光纤通信系统与器件等方面的研究。

E-mail: nanchi@fudan.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: shaoyufeng@fudan.edu.cn

接头的制作成本;2)能够容忍大的弯曲损耗,大大降低了铺设成本;3)制作工艺简单,价格便宜;4)可以直接与光源特别是垂直腔面发射激光器(VCSEL)直接耦合。另外,多种行业标准^[5],都将多模光纤作为局域网传输介质或内配线使用。而且使用 VCSEL 光源的 IEEE 新一代 10 Gb 以太网标准就是使用新一代的多模光纤。这表明,多模光纤在局域网应用中必将有很大的发展空间,有可能是未来光无源接入网的理想传输介质。

然而多模光纤具有一个致命的缺点,即其众多模式之间的模间色散。当模间色散引起的光脉冲展宽大于码元宽度时,信号衰落基本上无法被恢复。模间色散在传输高速率信号或者传输长距离的时候表现得更加明显。目前多模光纤的传输带宽积大约只有 400 Mb/(s·km),10 Gb/s 的窄高斯光束在多模光纤中只能传输 30~40 m,这远远没有达到目前局域网传输的大容量长距离传输的要求。

模间色散的影响严重制约了多模光纤在局域网中的广泛使用,针对此,Ning Guan 等^[6]提出一种新型的色散补偿光纤以补偿模间色散;Z. Haas 等^[7]提出模式滤除法使得多模光纤中仅有少数几个模式传输;L. Raddatz 等^[8]提出偏心入射可以有效地改善多模光纤的传输性能;T. K. Woodward 等^[9,10]提出使用副载波复用(SCM)方式可以增大多模光纤的带宽距离(BL)积;X. Zhao 等^[11]和 R. A. Panicke 等^[12]指出电子均衡的方式能够有效地消除模间色散效应的影响;Q. Xiang 等^[13]提出使用波分复用(WDM)的方式在不增加系统复杂性的情况下可以有效提高多模光纤的通信容量。本文提出一种新型的基于模斑整形和判决反馈均衡的方案,并且通过仿真实验证明其能够有效地改善多模光纤的传输性能。

2 原理和论证系统

将渐变型光纤中的场分成角向函数 $\exp(il\beta)$ 与径向函数 $E(r)$ 的乘积,其中 $E(r)$ 满足方程

$$\hat{L}E = \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial E}{\partial r} \right) - \frac{l^2}{r^2} E + \epsilon(r) k_0^2 E \right] = n_{\text{eff}}^2 k_0^2 E, \quad (1)$$

$$\hat{L}E = L_{i,j} E_j = n_{\text{eff}}^2 E_j, \quad (2)$$

式中 \hat{L} 是微分算符, l 是角向系数, k_0 为波矢量, $k_0 = 2\pi/\lambda$, n_{eff} 为有效传播系数。在求解该方程的时候,在弱导条件下,可以认为互相正交的偏振态之间具有相同的传播常数,从而方程中与偏振模耦合相关的项可以忽略掉。作此近似后,可以求出一种场分量表达式

以及相应的本征值方程都大大简化了的新模式,线偏振模 LP_{lm} 。每个线偏模都可以表示为相应的精确模式 $HE_{l+1,m}$ 与 $EH_{l-1,m}$ 的线性叠加。线偏模中的第一个下标 l 代表角向参数,第二个下标 m 代表特征方程的根, m 较小的模式具有大的传播常数。

在多模光纤中不仅存在模间色散(空间色散),还存在模内色散(频率色散),如波导色散,偏振模色散等,但是模间色散是多模光纤中最主要的色散效应。在数值计算过程中,有选择地忽略模内色散,以使计算过程简单而仍能反映主要规律。考虑到并不是所有的导模都能在光纤中存在的,这取决于光源的性质和光源与光纤之间的连接耦合关系。定义模式耦合系数 η_{lm} 为入射光束和每个光纤模式之间的重叠积分

$$\eta_{lm} = \frac{\left| \iint r E_l E_{lm}^* dr d\phi \right|^2}{\left(\iint r |E_l|^2 dr d\phi \right) \left(\iint r |E_{lm}|^2 dr d\phi \right)} = \frac{\left| \iint r e_l e_{lm}^* dr d\phi \right|^2}{\left(\iint r |e_l|^2 dr d\phi \right) \left(\iint r |e_{lm}|^2 dr d\phi \right)}, \quad (3)$$

式中 E_l, E_{lm} 分别表示未归一化的输入光的和导模的电场, e_l, e_{lm} 则表示归一化的输入的和导模的电场。数值计算过程中,将多模光纤的全部导模的场分布函数作为一完整矢量系,这样,任意形状的输入光场都可以看作是导模场的线性叠加,线性系数即为耦合系数。

另外,在仿真过程中,多模光纤中的非线性效应被认为是次要矛盾,可以忽略,这样就可以认为各个模式是正交互不影响的。在光纤的输出端口,每个模式的复振幅可以写成

$$A_{lm}(z = L, f) = \exp\left[-\frac{\alpha(f)}{2}\right] \exp[j\Delta\varphi(f, L)] A_{lm}(z = 0, f), \quad (4)$$

式中 $\alpha(f)$ 表示某个波长上的功率损耗因子, $\Delta\varphi(f, L)$ 代表相位延迟因子。即每个模式都有互相独立的相位延迟和振幅损耗。由于各模式是彼此正交的,在输出端口要得到总的输出效果,只需要直接把每个模式的强度值线性叠加即可

$$A(z = L, t) = \sqrt{P(z = L, t)} \\ P(z = L, t) = \sum_{l,m} \eta_{l,m} |A_{l,m}(z = L, t)|^2, \quad (5)$$

式中 η_{lm} 为 LP_{lm} 模的耦合系数。

仿真系统结构如图 1 所示,其中 LD 为激光光源,PD 为光电探测器,CR 为时钟恢复单元,DFE 为判决反馈均衡器。激光器输出的激光经过强度调制

器后由耦合的单模光纤送出来,经过模斑整形注入多模光纤,在多模光纤中传输一段距离后由光电探

测器接收转化为电信号,之后电信号被送往判决反馈均衡器进行模间色散的补偿。

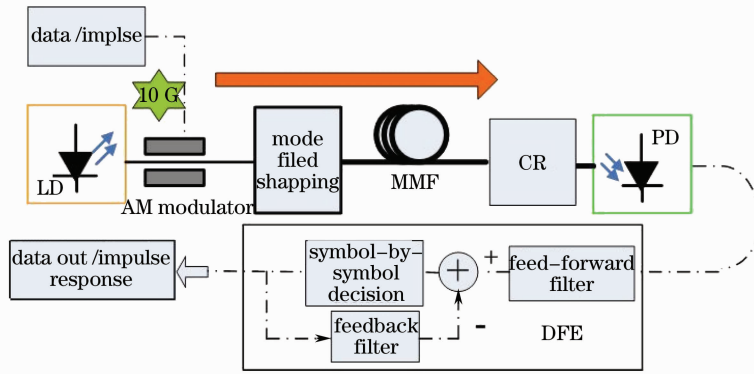


图1 系统结构框图

Fig. 1 System configuration

3 结果及分析

主要考察多模光纤在不同模斑形状光场注入情况下的脉冲响应以及传输性能。在这里提到的不同模斑形状包括:与多模光纤纤轴具有不同偏移量的小高斯光斑[如图2(a)所示],具有不同模斑大小的高斯光斑以及具有不同内外径参数的均匀环形光斑[如图2(b)所示]。需要说明的是,本文所提到的多模光纤的纤芯直径为 $50\ \mu\text{m}$,包层直径为 $125\ \mu\text{m}$,传输的数据比特率均为 $10\ \text{Gb/s}$ 。

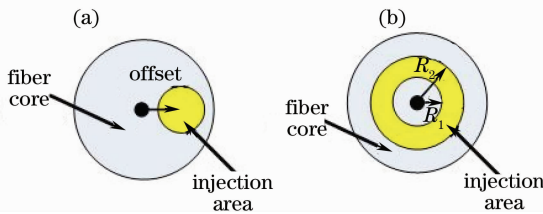


图2 偏心注入与环形注入

Fig. 2 Offset launching and ring launching

3.1 偏心注入

定义高斯光斑的模斑尺寸为其半峰全宽,小高斯光斑的尺寸为 $3\ \mu\text{m}$,与标准单模光纤的模斑尺寸相对应。仿真结果发现,当小高斯光斑与多模光纤纤轴的偏移量变化时,多模光纤输出光波的眼图也会跟着变化,即传输性能在变化。

图3中的4个子图分别表示了4个不同的偏移点处,多模光纤传输 $150\ \text{m}$ 的眼图。衡量眼图质量有以下几个重要的参数:眼睛开启度,眼皮厚度,交叉点发散度以及正负极性对称度等,这里取眼睛开启度作为定量分析眼图质量的对象。

把经过光电探测器接收电信号眼图的眼睛开启

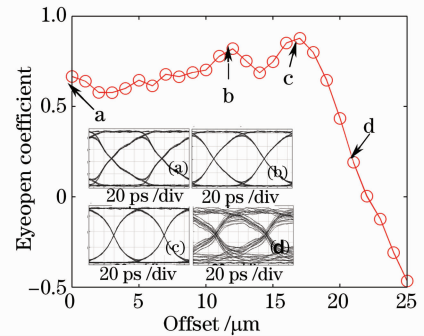


图3 不同偏移量的高斯光斑注入情况下,输出波形眼睛开启度曲线及眼图

Fig. 3 Eyeopen coefficient curve and eye diagrams during gauss field launching with vary offsets

度 O_E 定义为

$$O_E = \frac{\text{Min}(U_1) - \text{Max}(U_0)}{\text{Max}(U_1) - \text{Min}(U_0)}, \quad (6)$$

式中 U_1, U_0 分别表示最佳判决点处信元1和信元0的幅度值。图3中的曲线描述了眼图开启度随着偏移量变化的情况。分析图3可以看到,小高斯光场与多模光纤适当偏移耦合,能够有效地改善输出眼图的质量。眼图开启度曲线有一个最大值点,此最大值点对应的偏移量为 $17\ \mu\text{m}$,即此时可获得最佳的传输性能。

表1表示了中心注入与偏心 $17\ \mu\text{m}$ 注入情况下的模式群耦合系数,可以看到偏心注入情况下,多模光纤中激励更多的高阶模式,但是相邻主模式群(即耦合系数较大的模群)序号差小,这就意味着小的群时延差,所以模间色散效应要比中心入射条件下小得多。

表 1 中心注入和偏心 17 μm 注入时的模式群耦合系数
Table 1 Couple coefficients of mode groups when offset are 0 and 17 μm

Mode group	Couple coefficient	
	Offset: 0	Offset: 17 μm
3	$3.526981923540872 \times 10^{-1}$	$5.496132311777745 \times 10^{-5}$
4	$4.067201811577460 \times 10^{-35}$	$8.491508064516849 \times 10^{-4}$
5	$2.310470320644834 \times 10^{-1}$	$6.007049143683702 \times 10^{-3}$
6	$2.897845437700419 \times 10^{-34}$	$2.538939596701708 \times 10^{-2}$
7	$1.493349430412466 \times 10^{-1}$	$7.057352489489047 \times 10^{-2}$
8	$2.902787359369142 \times 10^{-35}$	$1.336250371047386 \times 10^{-1}$
9	$9.597935320210728 \times 10^{-2}$	$1.723359319764608 \times 10^{-1}$
10	$2.737132466620680 \times 10^{-34}$	$1.478058087131488 \times 10^{-1}$
11	$6.059859370791277 \times 10^{-2}$	$8.640661229795803 \times 10^{-2}$
12	$3.890870073659332 \times 10^{-34}$	$5.548763809015843 \times 10^{-2}$
13	$1.472444110830519 \times 10^{-2}$	$2.562761124101897 \times 10^{-3}$

仿真中发现,在中心入射的情况下,改变高斯光斑的大小,多模光纤的传输性能也会相应的发生变化,如图 4 所示。对于设定的这种简化模型的多模光纤,当模斑半峰全宽为 9 μm 时,多模光纤中激射最少的模式群,得到的眼图质量最好,几乎可以与单模光纤相比拟。

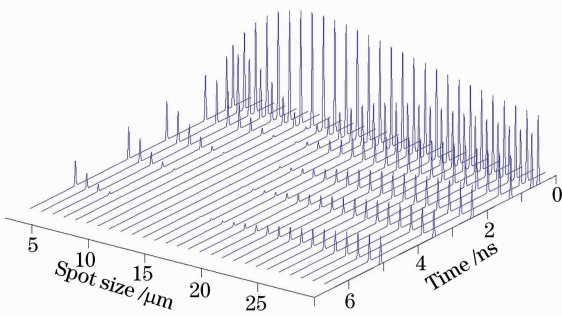


图 4 不同尺寸的高斯光斑入射时 3 km 多模光纤的输出脉冲响应图

Fig. 4 Impulse responses for 3 km MMF with varied input mode spot sizes

3.2 环形注入

对均匀环形光斑注入的情况进行了细致深入的研究。这里的均匀环形光斑是一种抽象出来的理想情况,实际上是不可能实现的。研究均匀环形光斑,是想通过这种简化的模型,以期发现环形结构参数的变化给输出性能带来的影响。

图 5 分别表示了当 $W = R_2 - R_1 = 10 \mu\text{m}$ [如图 2(b)所示], R_1 由 0 变化至 25 μm , 均匀环形脉冲在多模光纤中的传输性能。需要说明的是,测试多模光纤传输性能时,添加了时钟恢复模块,即将输出脉冲的时间点位置进行了搬移,搬移后最大峰值功率脉冲与输入脉冲的时间点重合。而且为了保证各个

模群相对于最大功率模群的时间位置不超过观察窗口,光纤的长度范围为 0~1500 m,并且选择了合适的输入脉冲时刻。从图 5 可以看到,随着内环半径 R_1 的增大,激射的主要模式向高阶移动,这和 Gaussian 光场偏移注入的情况是类似的。和偏心注入不同的是,环形注入的情况下激发的模式主要是 LP_{0m} 模,而且模式总数少,即便是在 $R_1 = 25 \mu\text{m}$ (此时光场照射在包层上)时也是如此。环形光场的这种特性使得它特别适合在多模光纤中传输。可以看到,均匀环形光场很适合在多模光纤中传输,在传输 1500 m 以内的距离里,除了 $R_1 = 15 \mu\text{m}$ 和 $R_1 = 20 \mu\text{m}$ 两种情况下光脉冲分成了两个,其他情况下,光脉冲能够在传输过程中保持小的展宽。而对于 $R_1 = 15 \mu\text{m}$ 与 $20 \mu\text{m}$ 两种情况,分成的两路主要光脉冲的峰值功率比值以及单位距离的时间差都是固定的,这样就可以很容易把输出波形写成输入波形与脉冲响应的卷积形式

$$y(t) = x(t) \otimes [a_1 \delta(t - \tau_1)] + a_2 \delta[t - \tau_2], \quad (7)$$

得到的输出波形的频域表达式为

$$X(\omega) = \frac{Y(\omega)}{a_1 \exp(-j\omega\tau_1) + a_2 \exp(-j\omega\tau_2)} = \frac{a_1^{-1} \exp(j\omega\tau_1) Y(\omega)}{1 + (a_2/a_1) \exp[-\omega(\tau_2 - \tau_1)]}. \quad (8)$$

这样简单的形式,可以通过电子均衡的方法很好地恢复得到原始数据。

图 6 为多模光纤在偏心注入和环形注入的模场分布,其中图 6(c), (d) 分别表示了当 $R_1 = 20 \mu\text{m}$ 时多模光纤中传输的两个主要模式的模场能量分布图。

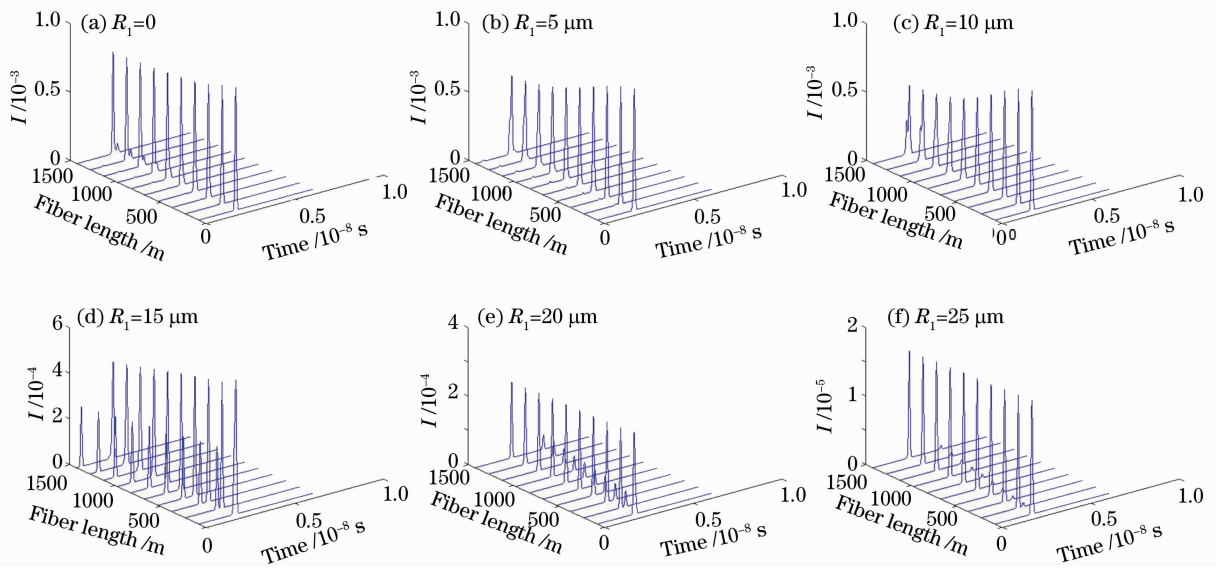


图 5 不同环形注入情况下多模光纤中的脉冲传输图

Fig. 5 Impulse response for different ring launchings with fiber length

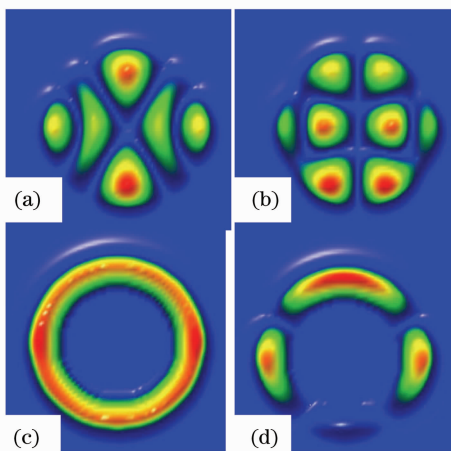


图 6 多模光纤在偏心注入(a),(b)和环形注入(c),(d)情况下一些模式的模场分布图

Fig. 6 Power distributions of some modes for MMF during offset launching (a), (b) and ring launching (c), (d)

3.3 判决反馈均衡

在接收机端,尝试通过判决反馈均衡(DFE)来补偿多模光纤模间色散带来的波形失真。判决反馈均衡器是一种非线性均衡器,它的基本思路为:一旦一个信息符号被检测并被判定后,就可在检测后续符号之前预测并且消除由这个信息符号带来的码间串扰。其结构图如图 1 中 DFE 区域所示。图 7 中的方形点标记曲线代表着 $R_1 = 20 \mu\text{m}$, $W = 10 \mu\text{m}$ 的环形光斑在多模光纤中传输 5 km 未经过均衡的误码率(BER) n_{BER} 曲线,而圆形点标记曲线则代表该环形光场传输 5 km 后经过均衡的 BER 曲线。对比这两条曲线不难证明,环形注入时,接收机处使用判决反馈均衡使得接收机灵敏度至少提高了 9 dB。

图 7(a),(b)子图分别表示均衡前后的眼图。可以发现经过均衡眼图质量得到了极大的提高。仿真实验中发现,10 Gb/s 的数据,在小高斯光斑中心注入的情况在多模光纤中传输不到 20 m,在偏移 $11 \mu\text{m}$ 注入的情况下,有所改善,能够传输 40 m,如果在接收机处使用判决反馈均衡,传输距离则能大大增加。偏心注入传输 260 m 均衡前后的眼图如图 7(c),(d)子图所示。

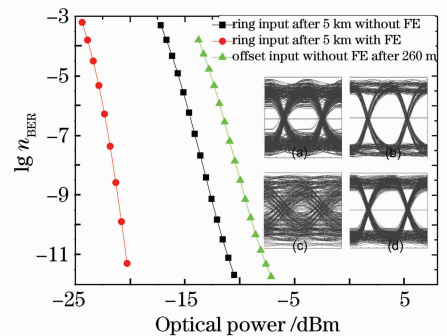


图 7 环形入射以及偏心入射的误码率曲线图

Fig. 7 BER curves for ring launching and offset launching

3.4 讨论

比较图 7 中的环形注入(方形点标记)与偏心注入(三角形点标记)BER 曲线,不难发现,环形注入比偏心注入更能有效地改善多模光纤的传输性能。而对于环形光场的产生,文献[14]提出使用锥形空心光纤对单模光纤的输出光斑做模斑变换即可得到适于多模光纤中传输的环形光场,文献[15]中则提到采用刻蚀的方法使得垂直腔面发射激光器直接输出环形光斑,可见环形光场的产生不会是本文方案

的大障碍。

3.1 节中讨论偏心入射时发现,当偏移量超过 $17\ \mu\text{m}$ 后,多模光纤的传输性能急剧下降,多模光纤中传输的高阶模式数量多,群时延差大。图 6(a), (b) 分别表示当偏置量为 $20\ \mu\text{m}$ 时,多模光纤中存在的两个高阶模式的模场分布图,这种情形对于单输入单输出系统(SISO)很不理想,但是在多输入多输出(MIMO)系统中则是非常理想的情况,可见仍然有其用武之地。

4 结 论

为了能够在未来高速长距离光无源接入网中使用廉价的多模光纤作为传输媒介,对提高多模光纤传输容量的方法进行了深入的研究,提出了一种基于模斑整形(主要是环形注入)和反馈均衡技术的新方案。经过仿真实验发现,这种方案能够有效地改善多模光纤的传输性能,使得 $10\ \text{Gb/s}$ 的高速率信号在多模光纤中传输 $1\ \text{km}$ 以上。

参 考 文 献

- Shao Yufeng, Li Jia, Cheng Lili *et al.*. Four serial differential phase-shift keying modulation formats for $100\ \text{Gbit/s}$ transmission applications [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(3): 574~580
邵宇丰, 李 佳, 程黎黎 等. 四种级联差分相位调制码的 $100\ \text{Gbit/s}$ 传输[J]. *中国激光*, 2009, **36**(3): 574~580
- Shao Yufeng, Chen Lin, Wen Shuangchun *et al.*. A novel scheme for generation of optical dark return-to-zero label signals [J]. *Acta Optical Sinica*, 2007, **27**(9): 1580~1584
邵宇丰, 陈 林, 文双春 等. 产生暗归零码光标标记信号的新方案[J]. *光学学报*, 2007, **27**(9): 1580~1584
- Shao Yufeng, Wen Shuangchun, Chen Lin *et al.*. Additional application of modified duobinary return-to-zero signal in a label switching optical system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(8): 1201~1207
邵宇丰, 文双春, 陈 林 等. 改进型双二进制归零码信号在标记交换系统中的新应用[J]. *中国激光*, 2008, **35**(8): 1201~1207
- Yufeng Shao, Shuangchun Wen, Lin Chen *et al.*. A staggered differential phase-shift keying modulation format for $100\ \text{Gbit/s}$ applications[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(17): 12937~12942
- Shi Xinliang, Hu Guijun, Tan Chengzhi *et al.*. Analysis of multimode fiber band-pass characteristics [J]. *J. Jilin University*, 2007, **25**(1): 30~35
史新亮, 胡贵军, 檀承志 等. 多模光纤带通特性分析 [J]. *吉林大学学报*, 2007, **25**(1): 30~35
- Ning Guan, Katsuhiko takenaga, Shoichiro Matsuo *et al.*. Multimode fibers for compensating intermodal dispersion of graded-index multimode fibers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2004, **22**(7): 1714~1718
- Z. Haas, M. A. Santoro. A mode-filtering scheme for improvement of the bandwidth-distance product in multimode fiber systems [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1993, **11**(7): 1125~1131
- L. Raddatz, I. H. White, D. G. Cunningham *et al.*. An experimental and theoretical study of the offset launch technique for enhancement of the bandwidth of multimode fiber links [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1998, **16**(3): 324~331
- T. K. Woodward, S. Hunsche, A. J. Ritger *et al.*. Statistical analysis of subcarrier-modulated transmission over $300\ \text{m}$ of $62.5\ \mu\text{m}$ -core-diameter multimode fiber[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2005, **23**(8): 2380~2398
- T. K. Woodward, S. Hunsche, A. J. Ritger *et al.*. 1-Gb/s BPSK transmission at $850\ \text{nm}$ over $1\ \text{km}$ of $62.5\text{-}\mu\text{m}$ -core multimode fiber using a single 2.5-GHz subcarrier[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(3): 382~384
- X. Zhao, F. S. Choa. Demonstration of 10-Gb/s transmissions over a 1.5-km -long multimode fiber using equalization techniques [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002, **14**(8): 1187~1189
- R. A. Panicker, J. P. Wilde, J. M. Kahn *et al.*. $10\times 10\ \text{Gb/s}$ DWDM transmission through $2.2\ \text{km}$ multimode fiber using adaptive optics [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(15): 1154~1156
- Q. Xiang, Y. Zhao, Y. Chai *et al.*. Schematic studies of $10\ \text{Gb/s}$ transmission over multimode fibers[C]. Proc. IEEE, 1999, TUR2: 271~272
- C.-A. Bunge, S. Choi, K. Oh. Analysis of ring launching scheme using hollow optical fibre mode converter for $10\ \text{Gbps}$ multimode fibre communication [J]. *Opt. Fiber Technol.*, 2006, **12**: 48~58
- L. J. Sargent, M. Webster, I. H. White *et al.*. Simple technique for bandwidth enhancement of multimode fibre links using controlled spatial emission from vertical cavity surface emitting lasers [J]. *Electron. Lett.*, 1998, **34**(21): 2038~2039