

文章编号: 0258-7025(2008)12-1966-04

# 多模光纤模式群分集复用系统

王晋飞 胡贵军 曲仁慧 何晓东

(吉林大学通信工程学院, 吉林 长春 130012)

**摘要** 多模光纤(MMF)已成为“最后一千米”短距离通信的理想介质,但多模光纤的模间色散限制了其传输能力。模式群分集复用(MGDM)是种光路的多输入多输出(MIMO)技术,该技术利用多模光纤中不同的模式群作为相互独立的信道来传输多路信号,极大地提升了多模光纤的传输能力。设计实现了一个基于75 m梯度型多模光纤(GI-MMF)直接检测的两路 MGDM 通信系统,不同模式群的激发利用选择模式激发实现,利用偏置连接器和多模耦合器实现模式群的复用及解复用,并利用该系统实现了模拟视频信号和非归零码(NRZ)数字信号的传输。

**关键词** 光通信;模式群分集复用;多输入多输出;梯度多模光纤;选择模式激发

**中图分类号** TN 915.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20083512.1966

## Multimode Fiber Communication System Based on Mode Group Diversity Multiplexing

Wang Jinfei Hu Guijun Qu Renhui He Xiaodong

(College of Communications Engineering, Jilin University, Changchun, Jilin 130012, China)

**Abstract** Multimode fiber (MMF) has become an ideal medium to realize the short distance communication of “the last kilometer”. But the severe mode dispersion of the MMF limits its transmission ability. Mode group diversity multiplexing (MGDM) is an optical multiple-input multiple-output (MIMO) technique that aims at creating independent communication channels over a MMF and using subsets of propagating modes. This technique enables to carry a number of signals and greatly enhances the transmission capacity of the MMF. A 2-input 2-output direct detection MGDM communication system over 75 m graded-index multimode fiber (GI-MMF) is designed. The excitation of different mode groups is realized by using selective mode excitation. The multiplexing and demultiplexing are realized by offset connectors and mode couplers. The transmission of an analog video signal and a non-return-to-zero (NRZ) digital signal is demonstrated with this system.

**Key words** optical communication; mode group diversity multiplexing; optical multiple-input multiple-output; graded-index multimode fiber; selective mode excitation

## 1 引言

随着通信业务的不断增长,光纤到户、光纤到桌面已经是通信发展的必然趋势,但“最后一千米”的短距离通信一直是通信网的瓶颈,因而受到人们广泛关注。多模光纤(MMF)具有数值孔径大、易于连接、配套的器件成本较低等优点,成为短距离光纤通信的首选。特别是商用的垂直腔面发射激光器(VCSEL),价格与发光二极管(LED)接近,其圆形的光束端面和高调制速率又补偿了LED的不足,使多模光纤的应用更具生机。但多模光纤存在严重

的模间色散,使其传输能力受限<sup>[1,2]</sup>。为此,人们提出了一些提高多模光纤传输能力的新技术,主要有选择模式激发技术、电色散补偿技术、多载波复用技术、正交频分复用技术等。这些技术均以克服色散为出发点,忽视了对多模光纤众多模式的利用。

近年来,有学者提出了基于模式群分集复用(MGDM)的光纤通信技术<sup>[3,4]</sup>。该技术的核心思想是利用选择模式激发技术分别激发多模光纤的多个不同模式群,在单根多模光纤中产生一些相互独立的并行通信信道,实现多路信号的同时传输。与传

收稿日期:2008-04-03; 收到修改稿日期:2008-05-15

作者简介:王晋飞(1984—),男,山西人,硕士研究生,主要从事光通信方面的研究。E-mail:wj03@yahoo.cn

导师简介:胡贵军(1970—),男,辽宁人,博士,教授,主要从事光电子及光纤通信方面的研究。

E-mail:huguijun2000@yahoo.com.cn (通信作者)

统方法的不同之处是,该方法并非试图克服模间色散,而是有效利用多模光纤的多模特性,从而提升传输能力。但是,至今为止的 MGDM 多模光纤系统所传输的信息都是两路相同制式的数据信号,信号的解复用多采用透镜系统与光电检测器阵列相结合的方式,较为复杂,实用性不强<sup>[5-8]</sup>。

本文设计实现了一个两路复用直接探测的 MGDM 光纤通信实验系统,利用多模耦合器实现模式群的复用及解复用,仅借助出射端面不同模式群光场分布的空间差异性实现两路信号的分离,简单实用。利用该系统实现了模拟视频信号和数字信号的同时传输。

## 2 基本原理

从通信的角度看,由于多模光纤可传输多种模式,因而比单模光纤有着更大的信道容量<sup>[9,10]</sup>。然而,通常情况下多模光纤的众多模式被同时激发,由于模间色散的原因导致了信道容量的降低。若利用选择模式激发技术只激发有限数量的不同模式群,每个模式群作为一个传输信道,分别用来传输不同业务,即模式群分集复用,从而极大提高多模光纤传输能力,实现大容量信息传输。

选择模式激发可以通过改变窄线宽光束在多模光纤入射端面的垂直入射位置来实现<sup>[11]</sup>。激发光束在纤芯中心处垂直入射即中心激发,以较大的偏心量垂直入射即偏置激发。不同的激发位置可以激发不同的模式群,并在光纤的出射端面形成不同的近场强度图案(NFP)<sup>[12-17]</sup>。

梯度折射率多模光纤(GI-MMF)中的光线可由两个光线不变量表征

$$k = n(r) \frac{dz}{ds} = n(r) \cos \theta(r), \quad (1)$$

$$h = \frac{r}{a} n(r) \sin \theta(r) \cos \Phi(r), \quad (2)$$

式中  $a$  为纤芯半径;  $n(r)$  为 GI-MMF 的折射率分布函数;  $\theta(r)$  为半径  $r$  处光线路径的切线和轴向间的夹角;  $\Phi(r)$  为纤芯横截面内光线路径切线投影和周向间的夹角。消去(1),(2)式中的  $\theta(r)$ ,可以得到

$$\cos \Phi(r) = \frac{a}{r} \frac{h}{[n^2(r) - k^2]^{1/2}}. \quad (3)$$

中心激发时,激发光束主要是穿越光纤轴线的子午光线,即(3)式中  $\Phi(r) = \pi/2$ ,  $h = 0$ , NFP 由纤芯中心径向扩展至某一外径  $r_1$  处(由  $k$  决定),形成盘状;偏置激发时,激发光束主要是偏斜光线,其路

径为螺旋线,交替地与  $r = r_0$  的内散焦面和  $r = r_1$  的转折点散焦面相切,即 NFP 为介于这两个散焦面间的环状<sup>[10]</sup>。由两散焦面上  $\Phi(r) = 0$  可知,  $r_0$  和  $r_1$  可表示为

$$n^2(r) - k^2 - h^2 \frac{a^2}{r^2} = 0. \quad (4)$$

对平方律折射率分布的 GI-MMF, 出射端环状 NFP 分布的内径  $r_0$  和外径  $r_1$  (中心激发时  $r_0 = 0$ ) 分别为

$$\begin{cases} \frac{r_0}{a} = \frac{1}{\text{NA} \sqrt{2}} [(n_0^2 - k^2) - \\ \sqrt{(n_0^2 - k^2)^2 - (2h\text{NA})^2}]^{1/2}, \\ \frac{r_1}{a} = \frac{1}{\text{NA} \sqrt{2}} [(n_0^2 - k^2) + \\ \sqrt{(n_0^2 - k^2)^2 - (2h\text{NA})^2}]^{1/2} \end{cases}, \quad (5)$$

式中 NA 为光纤的理论数值孔径,  $n_0 = n(0)$ 。

图 1 为研究选择模式激发条件下 GI-MMF 出射端 NFP 分布的实验方案。光源为波长为 650 nm 的激光二极管,发出连续光。激光二极管的出射光耦合入 1 m 长的标准单模光纤(SMF)用来实现模式群的选择激发。所用的受激光纤为 75 m 的芯包直径 62.5/125  $\mu\text{m}$ , NA = 0.2793 的 GI-MMF。SMF 与 GI-MMF 间的偏心距利用微调架(MP)控制。中心激发的径向偏移量为 0  $\mu\text{m}$ ,只激发低阶模式群;偏置激发的径向偏移量为 26  $\mu\text{m}$ ,只激发高阶模式群。

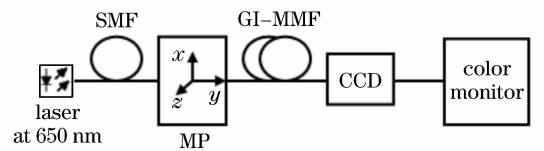


图 1 观察选择激发下 GI-MMF 出射端 NFP 分布的实验方案

Fig. 1 Experimental setup for observing the near-field pattern (NFP) at the output of GI-MMF under selective excitation

实验结果如图 2 所示。在光纤横截面上,中心激发时光能量主要集中在纤芯中心附近;偏置激发时光能量主要分布在靠近芯包界面的区域,而纤芯中心处光强较弱,形成圆环状分布。不同的光强分布显示了充足的空间差异性,可以在单根 GI-MMF 中形成一些沿径向分布的并行通信信道,实现不同信号格式的业务同时传输。

两路模式群分集复用系统如图 3 所示。发射端的两路光信号分别以不同的偏心量选择激发多模光

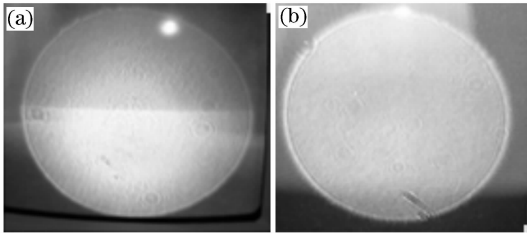


图 2 GI-MMF 出射端面的近场强度图案。(a) 中心激发; (b) 偏置激发

Fig. 2 NFP at the output of the GI-MMF. (a) central excitation; (b) offset excitation

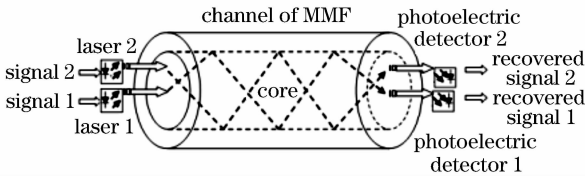


图 3 两路 MGDGM 通信系统示意图

Fig. 3 Diagram of the 2-input MGDGM communication system

纤的两个不同模式群,如光信号 1 在纤芯中心处激发低阶模式群,光信号 2 在较大的偏心量处激发高阶模式群,实现模式群的复用;在该系统的接收端对两路信号解复用,可利用不同模式群的 NFP 分布规律进行空间选择性接收,即通过在如图 3 所示的不同探测区域放置光电探测器实现,低阶模式群可在纤芯中心处接收,而高阶模式群可在纤芯外围的环状区域接收<sup>[18,19]</sup>。

### 3 实验研究

#### 3.1 实验方案

图 4 为两路模式群分集复用通信系统实验方案。两路源信号分别与直流偏置信号叠加后加载到相应的激光器驱动上,以直接强度调制方式调制 650 nm 激光器。偏置信号的加入是为了使激光器工作在其线性工作区。两个激光器的输出分别通过 1 m 长的标准单模光纤与中心激发连接器(将单模光纤以偏心距  $0 \mu\text{m}$  与多模光纤相熔接制成)和偏置激发连接器(将单模光纤以偏心距  $26 \mu\text{m}$  与多模光纤相熔接制成)的单模光纤端相连,以实现两个不同模式群的选择激发。之后两个连接器的多模输出端分别通过多模耦合器的两臂耦合入 75 m 长、芯包直径为  $62.5/125 \mu\text{m}$  的多模光纤,从而实现模式群的复用。模式群的解复用仅通过空间选择性接收方法实现。与复用相反,解复用使用多模分路器、中心探测连接器(中心激发连接器的反向运用)和偏置探测

连接器(偏置激发连接器的反向运用,其最佳偏心量经多次试验测定为  $26 \mu\text{m}$ )实现。两探测连接器的输出端分别与光电探测器(PD)相连,之后再检测到的信号分别送入相应的信号处理单元解调,并利用监视器及示波器进行测试分析。

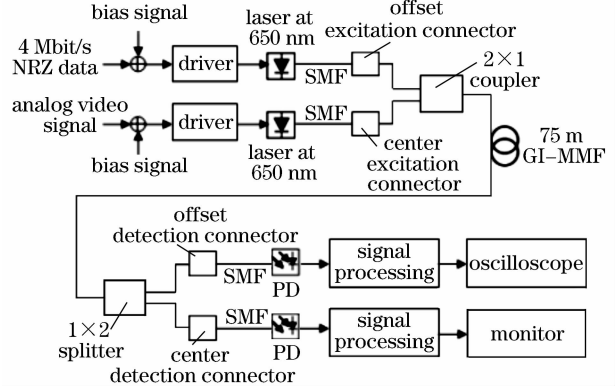


图 4 两路 MGDGM 通信系统设计图

Fig. 4 Experimental setup for the 2-input MGDGM communication system

#### 3.2 实验结果

利用低阶模式群传输模拟视频信号,高阶模式群传输 4 Mbit/s 非归零(NRZ)码数字信号,观察了所设计的直接探测的模式群分集复用光纤通信系统同时传输不同制式信号的通信效果。为了进行比较,先进行单信道通信实验,然后进行双信道同时传输实验。发送信号如图 5 所示,单信道及双信道通信的接收信号如图 6,7 所示。显然,单信道通信效果很好,图像清晰、眼图开度很大。但是双信道传输效果较差,视频图像有些模糊不清,其眼图也表现出串扰的存在。另外,由于在 GI-MMF 中传输时,低阶模式群的能量损耗较小,而高阶模式群的能量损耗相对较大,使得中心激发通信的效果明显优于偏置激发。

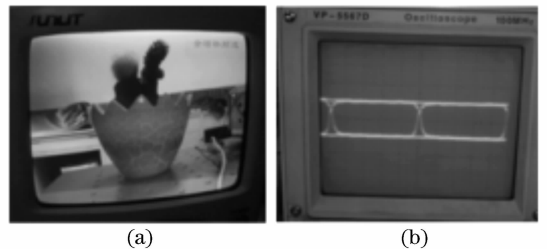


图 5 发送信号图像。(a) 初始的模拟视频信号图像; (b) 初始的数字信号眼图

Fig. 5 Images of the initial signals. (a) the image of the initial analog video signal; (b) the eye diagram of the initial NRZ data signal

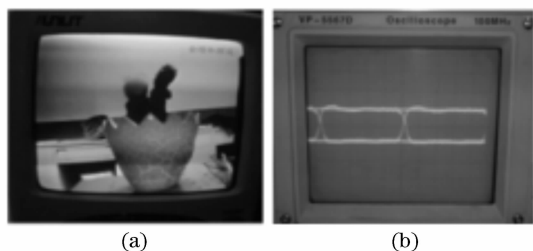


图6 单信道通信时的接收信号。(a) 接收到的模拟视频图像;(b) 接收到的数字信号眼图

Fig. 6 Received signals of the single-channel communication, (a) the image of the received analog video signal; (b) the eye diagram of the received NRZ data signal

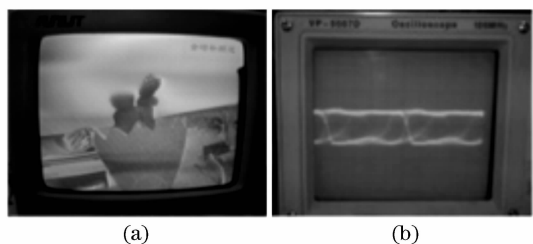


图7 双信道通信时的接收信号。(a) 接收到的模拟视频图像;(b) 接收到的数字信号眼图

Fig. 7 Received signals of the simultaneous transmission, (a) the image of the received analog video signal; (b) the eye diagram of the received NRZ data signal

## 4 结 论

对模式群分集复用技术做了初步研究,设计实现了一个直接探测的两路模式群分集复用光纤通信系统,利用偏置连接器和耦合器组成复用与解复用器,实现了模拟视频信号和 NRZ 码数字信号的同时传输,从实验上验证了利用模式群分集复用在多模光纤上同时传输两路不同制式信号的可行性。在今后的工作中将重点研究复用与解复用器的优化,以及利用接收端信号处理电路消除串扰的方法。

## 参 考 文 献

- M. Webster, L. Raddatz, I. H. White *et al.*. A statistical analysis of conditioned launch for gigabit ethernet links using multimode fiber [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1999, **17**(9): 1532~1541
- Zhang Yongsheng, Xie Zhiguo, Zheng Rongsheng *et al.*. Mode coupling in polymer optical fiber and its enhancement to transmission bandwidth [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(9): 1234~1238  
张永生,谢志国,郑荣升等. 聚合物光纤中的模式耦合及其对带宽的提高[J]. *中国激光*, 2006, **33**(9):1234~1238
- H. R. Stuart. Dispersive multiplexing in multimode fiber [J]. *Science*, 2000, **289**:281~283
- T. Koonen, H. P. A. van den Boom, I. T. Monroy *et al.*. High capacity multi-service in-house networks using mode group diversity multiplexing [C]. *Proc. of OFC 2004*, Los Angeles, CA, Feb. 22~27, paper FG4
- C. P. Tsekrekos, M. de Boer, A. Martinez *et al.*. An experimental investigation of the mode group diversity multiplexing technique [C]. *IEEE LEOS Benelux Symposium 2005*, Mons, Belgium, Dec. 2005
- Stefan Schöllmann, Steven Soneff, Werner Rosenkranz. 10.7 Gb/s over 300 m GI-MMF using a  $2 \times 2$  MIMO system based on mode group diversity multiplexing [C]. *OFC/NFOEC 2007*, Conference on Volume, Issue, 25~29, March 2007. 1~3
- C. P. Tsekrekos, A. Martinez, F. M. Huijskens *et al.*. Mode group diversity multiplexing transceiver design for graded-index multimode fibres [C]. *Proc. of ECOC 2005*, Glasgow, UK, Sept. 25~29, paper We4. 113
- C. P. Tsekrekos, A. M. J. Koonen. Mode-selective spatial filtering for increased robustness in a modegroup diversity multiplexing link [J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(9):1041~1043
- Maxim Greenberg, Moshe Nazarathy, Meir Orenstein. Data parallelization by optical MIMO transmission over multimode fiber with intermodal coupling [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2007, **25**(6):1503~1514
- Piao Dazhi, Chen Xinqiao, Lu Guizhen. Study of optical multiple input and multiple output capacity [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2007, **18**(8):915~918  
朴大志,陈新桥,袁贵祯. 光多输入多输出系统信道容量的研究 [J]. *光子 • 激光*, 2007, **18**(8):915~918
- L. Raddatz, I. H. White, D. G. Cunningham *et al.*. An experimental and theoretical study of the offset launch technique for the enhancement of the bandwidth of multimode fiber links [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1998, **16**(3):324~331
- C. P. Tsekrekos, R. W. Smink, B. P. de Hon *et al.*. Near-field intensity pattern at the output of silica-based graded-index multimode fibers under selective excitation with a single-mode fiber [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(7):3656~3664
- Yang Chun, Bi Xiaofeng, Guan Zhiqiang. Optical power distribution in multimode polymer optical fiber under offset launching [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(9):1259~1264  
杨春,毕晓峰,管志强. 偏心激励聚合物光纤横截面的光功率分布 [J]. *光学学报*, 2004, **24**(9):1259~1264
- Hongyu Ma, Huadong Cheng, Wenzhuo Zhang *et al.*. Generation of a hollow laser beam by a multimode fiber [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(8):460~462
- Fan Ji, Lixin Xu, Feng Li *et al.*. Simulation and experimental research on polymer fiber mode selection polished coupler [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(1):16~18
- Charles K. Asawa, Henry F. Taylor. Propagation of light trapped within a set of lowest-order modes of graded-index multimode fiber undergoing bending [J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(13):2214~2220
- Y. Daido, E. Miyauchi, T. Iwama *et al.*. Determination of modal power distribution in graded-index optical waveguides from near-field patterns and its application to differential mode attenuation measurement [J]. *Appl. Opt.*, 1979, **18**(13):1793~1802
- Yang Chun, Wang Yong, Xu Changqing. Separate detection of degenerated mode group of multimode fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(10):1459~1463  
杨春,王勇,徐长青. 多模光纤中简并模式群的分别探测 [J]. *光学学报*, 2006, **26**(10):1459~1463
- Alan Pak Tao Lau, Lei Xu, Ting Wang. Performance of receivers and detection algorithms for modal multiplexing in multimode fiber systems [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2007, **25**(6):1503~1514