

# 用于空分复用的模式复用技术研究

高松, 刘艳, 陈润秋, 韩高峰  
(北京交通大学, 北京 100044)

**摘要:**空分复用技术作为克服单模光纤通信系统容量局限的一种可能解决方案近年来受到日益广泛的重视,具有多种实现方案,例如采用多芯光纤、MIMO技术(Multiple-Input Multiple-Output)、基于多模光纤、空间光学元件的模式复用等。针对空分复用技术,分析了几种模式复用解决方案,阐述原理的同时,介绍了各方案的最新实验结果,最后对各种方案的特点进行了评述。

**关键词:**光纤通信;模式复用;多模光纤;多芯光纤

**中图分类号:**TN929.11 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2014.04.016

## Study on mode multiplexing used in space-division multiplexing

GAO Song, LIU Yan, CHEN Run-qiu, HAN Gao-feng

(School of Electronic Engineering, Beijing JiaoTong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:**Space division multiplexing, as a possible solution to overcome the limitations of single-mode fiber communication system, has attracted more and more attentions in recent years. It has a variety of implementations, such as multicore fiber, MIMO processing, mode-division based on multimode fiber and space optical component. Some solutions of mode multiplexing are analyzed, their principles are elaborated, and the latest progress of each solution is introduced. Finally, the characteristics of the various solutions have been reviewed.

**Key words:**optical fiber communication; mode multiplexing; multimode fiber; multicore fiber

### 1 概述

近年来,虽然传统基于单模光纤(Singlemode Fiber, SMF)的通信系统的容量不断增加,但始终无法突破固有的香农极限。为了使光通信系统容量能进一步的提高,空分复用技术(Space-Division Multiplexing, SDM)便应运而生。SDM技术的最终目的就是使不同的光信号在空间范围内分开传输,互不干扰。由于MMF(Multimode Fiber)中存在很多高阶模式,每个模式都有成为一个独立传输信道的可能,所以基于MMF的空分复用成为现在研究的主流,而采用MMF的空分复用中的关键是如何实现模式复用。

采用多芯光纤来作为SDM技术的解决方案,一

般采用在一个大直径包层里大角度分布几根纤芯来避免能量耦合进入聚合物涂层,每一根纤芯作为一个独立的传输通道<sup>[1-3]</sup>。

如果通过MMF的模式复用技术来实现SDH,可以使用模式选择复用器或滤波器,独立激发出不同的高阶模式,形成相互独立的传输信道<sup>[4]</sup>;也可以利用一些空间光学元件的特性,在MMF中实现特定高阶模式的激发。

**基金项目:**中央高校基本科研业务费专项资金资助(No. 2013JBM005)资助。

**作者简介:**高松(1987-),男,硕士,主要从事光传感器方面的研究工作。E-mail:11120083@bjtu.edu.cn

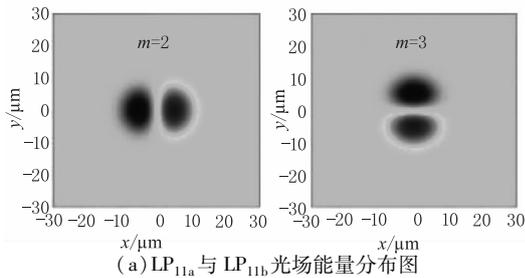
**收稿日期:**2013-06-26; **修订日期:**2013-09-03

在 MMF 中,高阶模式的激发往往会伴随着其他一些不需要的模式的激发,为了克服这一问题,很多 MDM 解决方案会应用只能传输几种模式的少模光纤 FMF (few-mode fiber) [5]。下面就通过具体的 MDM 解决方案来说明如何实现模式复用。

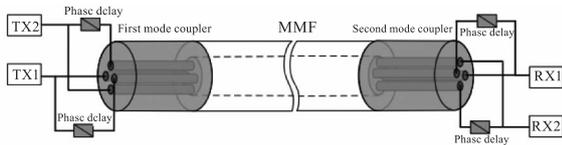
## 2 基于光纤结构的模式复用

### 2.1 多芯光纤结构模式复用器

Chin-ping Yu 教授在文献[6]中通过多芯光纤来将入射光场分布模拟为 MMF 中要激发的高阶模式的光场分布,从而在 MMF 中激发出相应分布的高阶模式,实现模式复用。具体解决方案如图 1 所示。



(a) LP<sub>11a</sub> 与 LP<sub>11b</sub> 光场能量分布图



(b) 多芯光纤模式复用器结构图

图 1 多芯光纤模式复用器原理示意图

图 1(a) 为运用光束传播法计算出的 MMF 前 10 个引导模式中的第 2 个与第 3 个,用  $m=2$  与  $m=3$  表示,它其实就是 LP<sub>11</sub> 模式的两个简并模式。

图 1(b) 中,一个相位控制器和一个模式复用器来模拟  $m=2$  与  $m=3$  的场分布,由 TX1 输入的光模拟  $m=2$  时的光场分布, TX2 中输入的光模拟  $m=3$  时的光场分布。

这样,在 MMF 中就可以激发出 LP<sub>11a</sub> 与 LP<sub>11b</sub> 两个相应的模式,来作为两个不同信道传输信号[7]。此外,可以采用 FMF 来代替 MMF,从而减少不必要的高阶模式的激发。

### 2.2 模式组结构模式复用器

Stefan Schollmann 教授在文献[8]中提出:不同的信号在 MMF 纤芯中的不同位置耦合进入,使得不同的信号在 MMF 中激发出不同的模式组,以此来建立不同的传输信道。在输出端,信号的分离是

通过模式选择装置实现的。具体实施方案如图 2 所示。

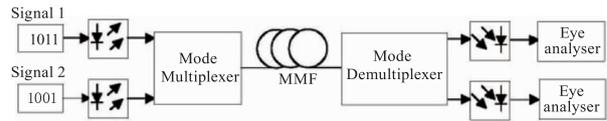


图 2 模式组模式复用器结构图

以两路不同的信号为例 (signal 1, signal 2)。signal 1 在 MMF 纤芯的中心位置处耦合进入,将会在 MMF 中激发低阶模式组; signal 2 在偏移中心位置一段距离处耦合,激发高阶模式组,能量分布如图 3(b) 中黑色线条与灰色线条所示。

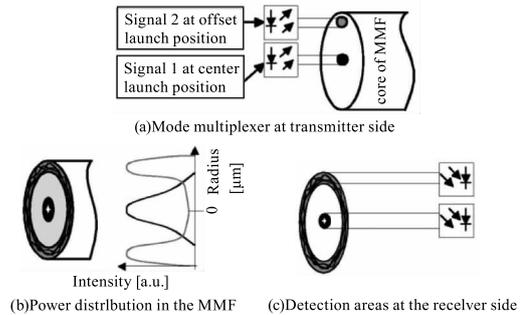


图 3 输出端、MMF 能量分布及探测区域示意图

在输出端,如图 3(c) 所示,可以通过选取不同的检测区域来区分信号,这两个区域分别对应输入端信号在 MMF 纤芯中的耦合位置。

Schollmann 教授在文献[9]中报道了采用这种方法将 10.7Gb/s 的信号传输了 300 m 的实验结果。

埃因霍温科技大学的 H. S. Chen 教授也曾提到过这种思想,与 Stefan Schollmann 教授所不同的是,他采用了三组模式群,实现了  $3 \times 30$ Gbit/s 光模式组复用系统,使光信号传输了 10m<sup>[10]</sup>。

### 2.3 双芯光纤结构模式复用器

这种方法是通过控制光纤复用器相互作用的参数来实现模式复用器与解复用器 (MUX/DEMUX) [11]。

如图 4(a) 所示,模型采用长周期光纤布拉格光栅 (LPFBG) 来将 LP<sub>01</sub> 模式转换为 LP<sub>11</sub> 模式,当光栅周期  $\Lambda$  为 480 $\mu$ m 时,光栅可以将 LP<sub>01</sub> 模式转换为 LP<sub>11</sub> 模式[12]。

在 2 $\times$ 2 的对称光纤复用器中,图 4(b) 和图 4(c) 所示为不同模式的耦合比随着两根纤芯距离的变化曲线,图 4(b) 对应直通臂,图 4(c) 对应交叉臂。可以看出,当相互作用区间长度和纤芯距离为特定值时,可以使 LP<sub>01</sub> 模式的能量基本都保持在直

通臂中,而  $LP_{11}$  模式的能量基本都在耦合臂中,因此,可以将光纤复用器作为模式解复用器 (DEMUX)。由于此过程的可逆性,还可以将光纤复用器作为模式复用器 (MUX)。

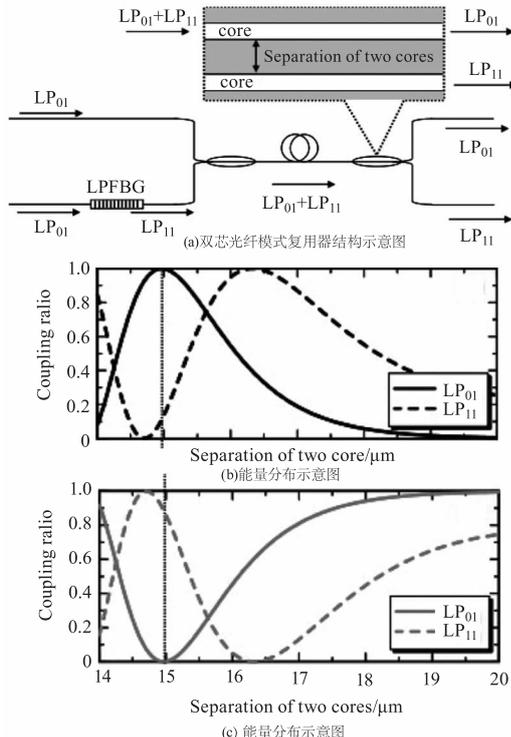


图4 双芯光纤结构模式复用器原理示意图

### 2.4 光圈探针采样结构模式复用

纽伦堡大学教授 H. Bülow 在文献 [13] 中提出了基于光圈探针采样结构的模式复用方案,下面以在接收端的模式解复用器为例来说明其原理,具体结构模型如图 5 所示,由于系统的可逆性,该结构同样可以作为模式复用器。

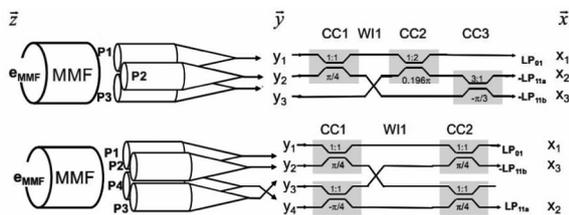


图5 光圈探针结构模式复用器结构示意图

该结构中,MMF 端面与若干个抽样光圈相连接,后面通过一个由定向复用器级联并联组成的 MIMO 全通滤波器,来达到解复用的目的。

抽样向量  $\vec{y} = K \cdot \vec{z}$ ,  $K$  为抽样转换矩阵,一般由光纤特征参数决定,为已知;  $\vec{z}$  为输入矩阵。

为了消除信道串扰,需要将  $K$  矩阵中的各列转换为线性无关的向量组,  $T = R^T \cdot K$ ,  $T$  即为  $K$  矩阵的正交表示,输出端的矩阵表示即为  $\vec{x} = T \cdot \vec{z}$ 。  $R^T$

在图 5 中即为后半部分的 MIMO 全通滤波器,按照一定的规则将各个采样端合理耦合,就能实现模式复用。

H. Bülow 教授在文献 [14] 中将复用模式数增加到了 5 个,并且更加具体说明了如何配置 MIMO 全通滤波器。

## 3 基于空间光学元件的模式复用

### 3.1 相位波片结构模式复用器

文献 [15] 介绍了一种应用相位波片制作的相位全息图模式复用器。

模式复用器的主要作用是将输入端的光束耦合进入 MMF 中的不同模式中,如图 6 所示,0 端口输入的光束直接耦合进入 3MF 的  $LP_{01}$  模式,1 端口和 2 端口都有一个薄全息图来将它们对应耦合进入  $LP_{11}$  模式。模式和相位分布如图 7 所示。

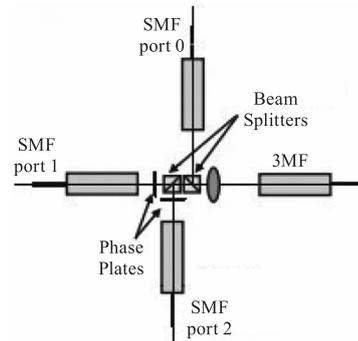


图6 相位波片结构模式复用器结构示意图

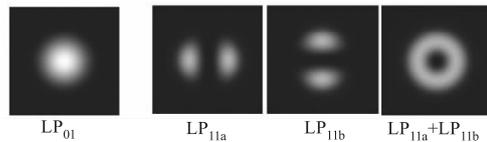


图7 各模能量和相位分布示意图

对于  $LP_{11}$  模式,如图 7 所示,它有两个简并模式,全息图由两个具有  $\pi$  相位差的半波片组成。

模型中使用三个准直器,在 3MF 的端面前设置两个分束器,分别将 0 端口和 2 端口的光耦合至 3MF,3MF 为归一化频率为 5 的折射率下陷分布光纤。

文中采用了一种特殊的方法来评价信道串扰,文献 [16] 采用此文中提出的模型,通过  $6 \times 6$  相干 MIMO 处理,成功进行了 10 km 三模光纤空分复用实验。

### 3.2 SLM (Spatial Light Modulator) 结构模式复用器

文献 [17] 采用了图 8 (a) 所示的模式转换原理,从 SMF 端面到 MMF 端面之间构成 4F 光学系统,利用 4F 系统,可以把相位分布物变换成可以

观察到的光强分布,进行所谓的“相幅转换”。图8(b)为实际应用的模式转换器。LCOS(liquid crystal on silicon)作为衍射元件设置在4F光学系统的傅里叶变换面上对横向光场的相位进行调制,图中从SMF输出的光经左侧透镜准直后经过一透镜,此透镜的作用相当于傅里叶变换,再经过LCOS进行空间相位调制后,通过第二个透镜,相当于进行傅里叶反变换,为了优化转换器的性能,第一个透镜的焦距要和所需模式匹配。通过这种方式,就可以在MMF中激发所需模式,进而实现模式复用。

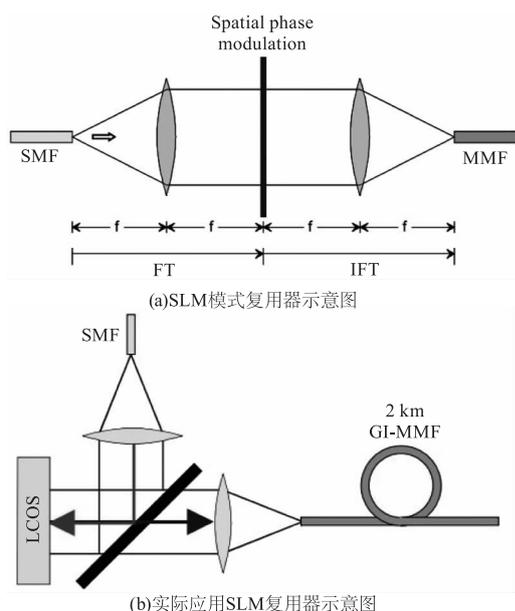


图8 SLM模式复用器及实际应用SLM复用器示意图

#### 4 结论

本文介绍分析了多种不同的MDM解决方案,大致可以分为光纤结构和非光纤结构两大类。

多芯光纤结构模式复用器、相位波片结构模式复用器本质上是通过模拟固定的模式场分布来激发相应模式;双芯光纤结构模式复用器利用两种不同模式在两个纤芯中能量的交换来实现模式复用与解复用;这三类解决方案一般应用在少量模式复用系统之中。模式组结构模式复用器通过激发模式组来实现模式复用,增加不同的耦合位置可以增加激发的模式组数目;光圈探针采样结构模式复用器可以通过配置MIMO全通滤波器来增加复用模式数目;SLM结构模式复用器利用模式转换来实现模式复用,这三类解决方案既可以应用在基于多模光纤的复用系统之中,也适用于少模光纤复用系统。

虽然上述各种模式复用和解复用的方案结构不同,原理不同,但是最终都达到了利用不同模式建立不同信道的目的,使MMF的传输容量得到了大幅提升,为空分复用技术的实现提供了很好的解决方案,也为未来通信系统容量的增加提供了可能。

#### 参考文献:

- [1] B Zhu, T F Taunay, M F Yan, et al. Seven-core multicore fiber transmissions for passive optical network [J]. *Opt. Express*, 2010, 18(11): 11117 - 11122.
- [2] B Zhu, T F Taunay, M F Yan, et al. 70-Gb/s multicore multi-mode fiber transmissions for optical data links [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2010, 22(22): 1647 - 1649.
- [3] B Zhu, T F Taunay, M Fishteyn, et al. Space-, wavelength-, polarization-division multiplexed transmission of 56-Tb/s over a 76.8-km seven-core fiber [C]. *Optical Fiber Communication Conference, OSA Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2011)*, paper PDPB7.
- [4] A R Shah, R C J Hsu, A Tarighat, et al. Coherent optical MIMO (COMIMO) [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2005, 23(8): 2410 - 2419.
- [5] A Li, A A Amin, X Chen, et al. Reception of mode and polarization multiplexed 107-Gb/s COOFDM signal over a two-mode fiber [C]. *Optical Fiber Communication Conference, OSA Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2011)*, paper PDPB8.
- [6] Chin Ping yu, Liou Jiahong, Chiu Yijen, et al. Mode multiplexer for multimode transmission in multimode fibers [J]. *Opt. Express*, 2011, 19(13): 12673 - 12678.
- [7] D H Sim, Y Takushima, Y C Chung. Transmission of 10 - Gb/s and 40 - Gb/s Signals over 3.7 km of Multimode Fiber using Mode-Field Matched Center Launching Technique [C] // *Proceedings of OFC 2007, (Anaheim, USA, 2007)*, OTuL3.
- [8] Stefan Schollmann, Chunmin Xia, Werner Rosenkranz. Experimental investigations of mode group diversity multiplexing on multimode fiber [C]. *Optical Society of America*, 2011.
- [9] Stefan Schollmann, Steven Soneff, Werner Rosenkranz. 10.7 Gb/s over 300 m GI-MMF using a 2 x 2 MIMO system based on mode group diversity multiplexing [C] // *Proceedings of OFC 2007, (Anaheim, USA, 2007)*, OTuL2.
- [10] H S Chen, H P A van den Boom, A M J Koonen. 30 Gbit/s 3 x 3 optical mode group division multiplexing system with

- mode-selective spatial filtering [ C ]. OSA/OFC/NFOEC 2011, OTuL2, 2011.
- [ 11 ] Nobutomo Hanzawa, Kunimasa Saitoh, Taiji Sakamoto, et al. Demonstration of mode-division multiplexing transmission over 10 km two-mode fiber with mode coupler [ C ]. OSA/OFC/NFOEC 2011, OTuL2, 2011.
- [ 12 ] S Savin, et al. Tunable mechanically induced long-period fiber gratings [ J ]. Opt. Lett. , 2000, 25 : 710 – 712.
- [ 13 ] H Bülow. Optical-mode demultiplexing by optical MIMO filtering of spatial samples [ J ]. IEEE Technology Letters, 2012, 24 ( 12 ) : 1045 – 1047.
- [ 14 ] H Bülow, H Al-Hashimi, B Schmauss. Spatial mode multiplexers and MIMO processing [ C ] // Proc. OECC, 2012, paper 5E4\_1.
- [ 15 ] R Ryf, C Bolle, J von Hoyningen-Huene. Optical coupling components for spatial multiplexing in multi-mode fibers [ C ] // Optical Fiber Communication Conference, OSA Technical Digest ( CD ) ( Optical Society of America, 2011 ), paper PDPB12.
- [ 16 ] R Ryf, et al. Space-division multiplexing over 10 km of three-mode fiber using coherent  $6 \times 6$  MIMO processing [ C ]. Proc. Opt. Fiber Commun. Conf. ( OFC ), p. PDPB10, 2011.
- [ 17 ] B Franz, H Bülow. Mode group multiplexing over graded-Index multimode fiber [ J ]. IEEE ICTON ( 2012 ), Th. A1. 3.