

# 基于少模光纤布拉格光栅的 模分复用系统实验研究

胡贵军,常玉鑫,韩悦羽,闫 李,王海燕

(吉林大学通信工程学院,吉林长春 130012)

**摘 要:** 本文提出了一种基于少模光纤布拉格光栅(Few-mode FBG)的模分复用通信系统,阐述了基于少模光纤布拉格光栅的模分复用/解复用原理,建立了 $2 \times 2$ 的模分复用实验系统,分别利用 $LP_{01}$ 和 $LP_{11}$ 模作为独立信道,实现了1.25Gbps和622Mbps两路伪随机序列(PRBS)的10km传输实验,给出了传输后的眼图,分析了当激光器波长为1549.228nm时,实验系统的误码特性.实验验证了基于少模光纤布拉格光栅的模分复用通信系统的可行性,为进一步实现长距离高速率的模分复用通信奠定了实验基础.

**关键词:** 光纤通信;模分复用;少模光纤布拉格光栅;少模光纤

**中图分类号:** TN913.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2017)03-0626-06

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2017.03.018

## Experimental Research of Mode Division Multiplexing System Based on Few-mode FBG

HU Gui-jun, CHANG Yu-xin, HAN Yue-yu, YAN Li, WANG Hai-yan

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

**Abstract:** Presents a mode division multiplexing (MDM) system based on few-mode fiber bragg grating (FBG), the principle of the mode multiplexing/demultiplexing based on few-mode FBG is described. A  $2 \times 2$  MDM system is established. The 10 km transmission experiment of the 1.25Gbps and 622Mbps PRBS is achieved successfully, which are carried by  $LP_{01}$  mode and  $LP_{11}$  mode, respectively. The eyediagrams after the 10 km two-mode fiber transmission are given. The BERs for  $LP_{01}$  and  $LP_{11}$  mode channel are analyzed when the laser operates at 1549.228nm. The experimental results prove the feasibility of the mode division multiplexing system based on few-mode FBG, which provides the foundation for the further experiment of mode division multiplexing communication for long distance and high speed rate.

**Key words:** optical communications; mode division multiplexing; few-mode FBG; few-mode fiber

### 1 引言

随着波分复用(Wavelength Division Multiplexing, WDM)<sup>[1,2]</sup>、偏振复用(Polarization Division Multiplexing, PDM)<sup>[3]</sup>、相干接收<sup>[4]</sup>和多维多阶调制<sup>[5]</sup>等技术的广泛使用,单模光纤可能在未来不远的时间内达到可以预见的“带宽耗尽”.随着光纤通信网络日益发展,寻求新型高速大容量光传输机理已成为未来光通信网络面临的重大挑战<sup>[6]</sup>.基于少模光纤的模分复用(Mode Division Multiplexing, MDM)技术的提出就为上述问题提供了一个解决思路,因而越来越受到人们的青睐<sup>[7-10]</sup>.

基于少模光纤的模分复用技术,是指利用少模光纤中有限的正交模式作为独立信道进行信息传送,成倍地提升系统传输容量.由于少模光纤具有比较大的模场面积,因此其非线性容限也很高,这样既提高了传输系统的容量,又规避了非线性效应对系统的影响<sup>[11]</sup>.

现有的模分复用系统结构有基于自由空间光学的模分复用系统<sup>[12]</sup>、基于长周期光纤光栅的模分复用系统<sup>[13]</sup>、基于波导的模分复用系统<sup>[14]</sup>等.其中,基于自由空间光学的模分复用系统,实现了 $6 \times 40$ Gb/s QPSK信号的96km传输<sup>[15]</sup>,在信噪比为13dB左右时,误码率为

$10^{-3}$ ,但其结构相对复杂,难于集成.基于光纤耦合和长周期光纤光栅的模分复用系统,实现了  $2 \times 10\text{Gbps}$  的  $10\text{km}$  传输,在接收功率为  $-13\text{dBm}$  时,误码率达到  $10^{-9}$ ,并且  $10\text{km}$  传输后的眼图非常清晰<sup>[13]</sup>.然而,由于激光器的工作波长为  $1080\text{nm}$ ,并非常用的  $1550\text{nm}$  的通信波段,因而不利于商用化.基于波导结构的模分复用系统虽然很好地实现了模式转换与复用,并且实现了芯片集成化,尤其是非对称 Y 型波导的广泛应用,不仅将 PDM、MDM 有机的结合起来<sup>[16,17]</sup>,更可以实现高速率、QAM、QPSK 调制信号的完美传输<sup>[18]</sup>.但是也存在制作成本高,对制作工艺的要求严苛的缺陷.

本文提出了一种新型的模分复用系统结构,首次将少模光纤布拉格光栅用于模分复用系统中,实现了  $\text{LP}_{01}$  和  $\text{LP}_{11}$  模的有效复用/解复用,并成功实现了  $1.25\text{Gbps}$  和  $622\text{Mbps}$  两路伪随机序列的  $10\text{km}$  传输实验.实验分析了信号经两模光纤传输  $10\text{km}$  后的眼图变化,给出了系统的误码率与接收功率的关系曲线.实验结果证明了基于少模光纤布拉格光栅的模分复用的可行性,其结构简单,制作成本低,易于集成与互联等优点,适用于模分复用通信.

## 2 少模光纤布拉格光栅模分复用/解复用原理

少模光纤布拉格光栅是一种光学衍射器件,当入射光以角度  $\theta_1$  进入少模光纤布拉格光栅时,其衍射光角度  $\theta_2$  可由式(1)算出<sup>[19]</sup>

$$n\sin\theta_2 = n\sin\theta_1 + m \frac{\lambda}{\Lambda} \quad (1)$$

式中,  $\Lambda$  表示少模光纤布拉格光栅周期;  $m$  为衍射级数,在少模光纤布拉格光栅中,  $-1$  级衍射起主要作用,因此设  $m = -1$ ,此时光纤中模式的传播常数  $\beta$  为:

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} n_{\text{eff}} \quad (2)$$

其中,  $n_{\text{eff}} = n_{\text{core}} \sin\theta$ ,  $n_{\text{eff}}$  代表模式的有效折射率,它与模式在光纤中传播的角度  $\theta$  有关.将式(2)带入式(1)中,可得:

$$\beta_1 = \beta_2 + \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (3)$$

上式即为少模光纤布拉格光栅的相位匹配条件,又称为布拉格条件.其中  $\beta_1$  代表入射模式的传播常数;  $\beta_2$  代表入射模式经少模光纤布拉格光栅作用后,耦合到反向传输模式的传播常数.

在仅支持几个模式传输的少模光纤中,耦合只能发生在传播方向相反的两个模式之间.我们给出了一组少模光纤的参数,如表 1 所示.并根据式(4)计算了少模光纤的归一化截止频率  $V$  随波长  $\lambda$  的变化关系<sup>[20]</sup>:

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_{\text{core}}^2 - n_{\text{cladding}}^2} \quad (4)$$

上式中  $a$  表示纤芯的半径,  $n_{\text{core}}$  表示纤芯的折射率,  $n_{\text{cladding}}$  表示包层的折射率,  $\lambda$  为激光器的工作波长.计算出的少模光纤的归一化截止频率随波长的变化关系曲线如图 1 所示.由图 1 可知,当激光器的工作波长为  $1550\text{nm}$  波段时,归一化截止频率  $V$  介于  $2.405$  和  $3.823$  之间,此时所使用的少模光纤支持两个 LP 模式( $\text{LP}_{01}$  模式和  $\text{LP}_{11}$  模式)在纤芯内传输,为两模传输介质.

表 1 少模光纤的相关参数

	参量	数值
少模光纤的相关参数	纤芯直径 ( $\mu\text{m}$ )	13.938
	包层直径 ( $\mu\text{m}$ )	125
	$n_{\text{core}}$	1.5142
	$n_{\text{cladding}}$	1.4571

根据表 1 提供的两模光纤的相关参数,用 OptiGrating 4.2 软件对少模光纤布拉格光栅的耦合波长进行数值模拟,得到的少模光纤布拉格光栅布拉格波长位置及少模光纤布拉格光栅的反射谱,如图 2 所示.图 2(a) 是少模光纤中模式的传播常数曲线,其中  $\pi/\Lambda$  的横线是少模光纤光栅的布拉格条件,某一模式的传播常数曲线与该横线相交,则表明在此波长下,该模式满足少模光纤光栅的布拉格条件,该波长即为该模式的布拉格波长.图 2(b) 为少模光纤布拉格光栅的反射谱,由图 2(a) 的仿真结果可知,少模光纤光栅有 3 个布拉格波长,分别对应图 2(a) 中的  $a$ 、 $b$ 、 $c$  三点处的值.其中  $a$  点处的值表示在此波长下,  $\text{LP}_{11}$  模式满足少模光纤光栅的布拉格条件,  $c$  点处的值表示在该波长下,  $\text{LP}_{01}$  模式满足少模光纤光栅的布拉格条件.而  $b$  点处的值表示  $\text{LP}_{01}$  模式和  $\text{LP}_{11}$  模式发生交叉耦合时的布拉格波长.

由图 2(b) 可知,仿真得到的少模光纤布拉格光栅的反射谱有三个反射峰,反射峰 1 为  $\text{LP}_{11}$  模式的自耦合谐振峰,其中心波长即为  $\text{LP}_{11}$  模式的布拉格波长;反射峰 3 为  $\text{LP}_{01}$  模式的自耦合谐振峰,其中心波长即为  $\text{LP}_{01}$  模式的布拉格波长;而反射峰 2 为  $\text{LP}_{11}$  模式和  $\text{LP}_{01}$  模式的交叉耦合谐振峰,其中心波长为  $\text{LP}_{11}$  模式和  $\text{LP}_{01}$  模式发生交叉耦合时的布拉格波长.当选择激光器的工作波长与  $\text{LP}_{11}$  模式的布拉格波长相匹配时,  $\text{LP}_{11}$  模式被少模光纤布拉格光栅所反射;当选择激光器的工作波长与  $\text{LP}_{01}$  模式的布拉格波长相匹配时,  $\text{LP}_{01}$  模式被少模光纤布拉格光栅所反射.

根据上述的分析,利用上述的少模光纤布拉格光栅的相位匹配特性,可实现  $\text{LP}_{01}$  模和  $\text{LP}_{11}$  模的复用/解复用,其原理框图如图 3 所示.其中,  $\text{LP}_{01}$  模由少模光纤布拉格光栅的 B 端入射,  $\text{LP}_{11}$  模经少模环行器 1 端口入射,从 2 端口出射后由少模光纤布拉格光栅的 A 端入

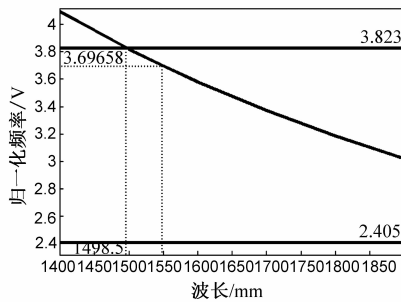


图1 少模光纤的归一化截止频率与工作波长的关系曲线

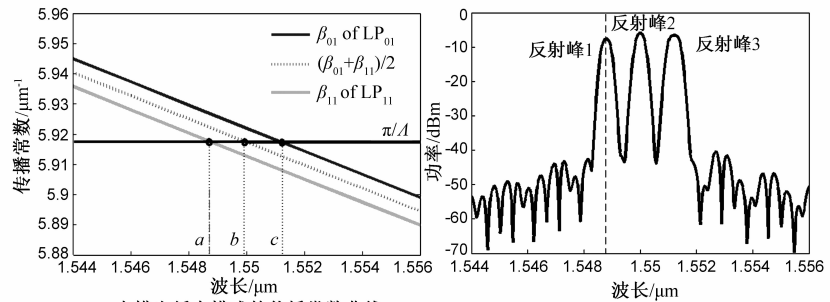


图2 少模光纤布拉格光栅布拉格波长与其反射谱的仿真结果

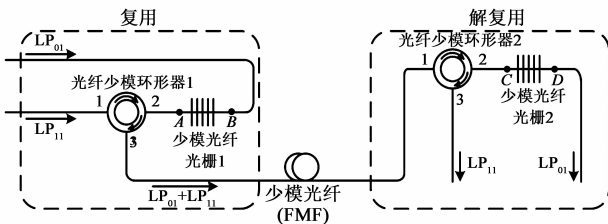


图3 基于少模光纤光栅的模分复用/解复用原理框图

射.当激光器的工作波长与  $LP_{11}$  模的自耦合谐振峰的中心波长相匹配时,使得  $LP_{11}$  模满足少模光纤布拉格光栅的布拉格条件而被反射回 A 端,而  $LP_{01}$  模则由少模光纤布拉格光栅的 A 端透射输出.此时,经少模光纤布拉格光栅反射的  $LP_{11}$  模和透射输出的  $LP_{01}$  模经由光纤少模环形器的 2 端口入射,经 3 端口出射,从而实现了  $LP_{01}$  模与  $LP_{11}$  模的复用过程.

同理,经少模光纤传输一定距离后,利用少模光纤布拉格光栅与光纤少模环形器的方案可分别在少模光纤布拉格光栅的 C 端(由少模环形器的 3 端口输出)和 D 端获得  $LP_{11}$  模和  $LP_{01}$  模,实现模式解复用.

### 3 实验与分析

模分复用传输系统实验图如图 4 所示,信号源 1 为 622Mbps 的伪随机序列,信号源 2 为 1.25Gbps 的伪随机序列(信号源 1 和信号源 2 均采用 All-Link ET10A 型误码分析仪),分别经调制器调制后加载到相同工作波长的激光光束中进行传输.两路光信号通过掺铒光纤放大器(EDFA)放大后分别送入模分复用器(MUX)中,  $LP_{11}$  模式与  $LP_{01}$  模式的复用在模分复用器中实现.其中,采用单模光纤和少模光纤中心熔接的方式使信号 1 以  $LP_{01}$  模承载,而通过单模光纤和少模光纤以偏芯量为  $1.8\mu\text{m}$  的偏芯熔接激发出  $LP_{11}$  模式,从而使信号 2 以  $LP_{11}$  模承载.模分复用/解复用采用少模光纤布拉格光栅和少模环形器来实现,具体结构如图 3 所示.调节可调谐激光器的工作波长,使之与少模光纤布拉格光栅中  $LP_{11}$  模的布拉格波长相匹配,则  $LP_{11}$  模式满足少模光纤布拉格光栅的布拉格条件而被反射,由少模环行

器的 3 端口输出,而  $LP_{01}$  模透过少模光纤光栅经少模环行器 2 口入射后,也在少模环形器 3 端口输出,这样在少模环形器的 3 端口实现了  $LP_{01}$  模和  $LP_{11}$  模式的复用.两路信号复用后在 10km 的少模光纤中传输,经过模式解复用器(DEMUX)解复用后,用光电探测器分别在少模光纤光栅的反射端和透射端探测,最后用安捷伦 DSO80204B 型示波器观测眼图的变化情况.

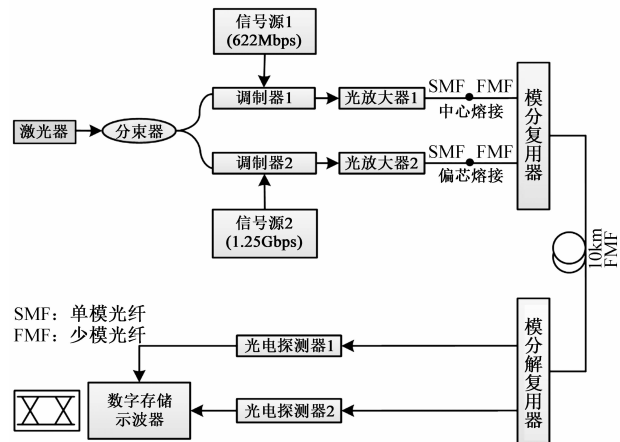


图4 模分复用传输实验系统图

在本实验中,  $LP_{11}$  模式的激发是采用偏芯熔接方式实现的,为验证单模光纤与少模光纤偏芯熔接时能有效激发  $LP_{11}$  模式,我们进行了实验验证.分别用 CCD 成像系统观测中心和偏芯两种熔接方式时,少模光纤输出端的近场光强图案(NFP),测试原理图及测试结果如图 5 所示.

当激光由 SMF 光纤中心( $0\mu\text{m}$ )入射仅支持两种模式的少模光纤时,少模光纤输出端的光斑形状如图 5(a)所示,为一圆形的光斑,与  $LP_{01}$  模式的光场分布是一致的,表明中心入射时,在少模光纤中激发的模式主要为  $LP_{01}$  模.随着偏芯距离的增加,  $LP_{11}$  模式逐渐被激发,而被激发的  $LP_{01}$  模逐渐减少.当偏芯量为  $0.8\mu\text{m}$  时,少模光纤输出端的光斑形状如图 5(b)所示,其光斑有所变大,这是  $LP_{01}$  和  $LP_{11}$  模叠加的结果.当偏芯量为  $1.8\mu\text{m}$  时,少模光纤输出端的光斑形状如图 5(c)所示,

为两个半月形光斑,这与  $LP_{11}$  模简并模的光斑形状是一致的,表明此时少模光纤中激发的主要是  $LP_{11}$  模式.可见,通过一定偏心距的偏芯熔接方式,可以在少模光纤中激发出我们所需的  $LP_{11}$  模.实验中的少模光纤光栅是通过相位掩膜技术制备的,相位掩模板的周期为  $370\text{nm}$ ,3 端口少模环行器是特殊制备的,以确保  $LP_{11}$  模

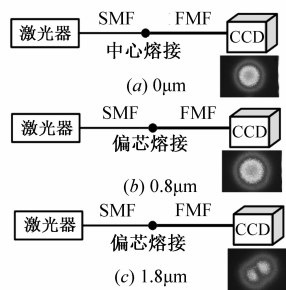


图5 近场光强图案测试原理及结果图 (SMF: 单模光纤 FMF: 少模光纤 CCD: 光束质量分析系统)

实验测得的少模光纤光栅的反射谱与图 2 仿真结果具有一致性,存在三个反射峰,其中反射峰 1 为  $LP_{11}$  模式的自耦合谐振峰,其中心波长为  $1549.16\text{nm}$ .实验中使用日本 Santec 可调谐激光器作为激光光源,可以方便地调谐激光器的输出波长,使之与少模光纤光栅的  $LP_{11}$  模的布拉格波长相匹配.

为了验证只有当激光器的工作波长与  $LP_{11}$  模式的反射峰中心波长匹配程度较好时,才能很好地实现  $LP_{01}$  模式和  $LP_{11}$  模式的复用/解复用,我们使用  $1.25\text{Gbps}$  和  $622\text{Mbps}$  伪随机序列进行传输实验,源信号的眼图分别如图 7 所示.当可调谐激光器的工作波长为  $1548.471\text{nm}$  时(其光谱图如图 6(b) 的左侧峰所示),背对背及  $10\text{km}$  的眼图如图 8、9 所示.由图可知,此时传输后的眼图劣化严重,尤其是  $10\text{km}$  传输后眼图的质量很差,这是由于  $LP_{11}$  模式的布拉格波长为  $1549.16\text{nm}$ ,而可调谐激光器的工作波长为  $1548.471\text{nm}$ ,二者并未很好地匹配,使得少模光纤布拉格光栅中  $LP_{11}$  模式对应的反射率较低,仅有少量的  $LP_{11}$  模信号被少模光纤布拉格光栅所反射,而大部分  $LP_{11}$  模信号透射.透射的  $LP_{11}$  模式信号又会与  $LP_{01}$  模式信号发生耦合,从而对复用端的  $LP_{01}$  模式信号造成影响;而被少模光栅所反射的较低功率的  $LP_{11}$  模信号在传输过程中受系统噪声的影响又相对较大,因此无论是背对背传输还是  $10\text{km}$  传输,  $LP_{01}$  模和  $LP_{11}$  模式接收信号的眼图质量均较差.调节激光器的工作波长为  $1549.228\text{nm}$ (其光谱图如图 6(b) 的右侧峰所示),使之与少模光纤布拉格光栅  $LP_{11}$  模的布拉格波长良好匹配,得到背对背及  $10\text{km}$  传输的眼图分别如图 10、11 所示.由图可知,当可调谐激光器的工作波长与  $LP_{11}$  模的布拉格波长匹配程度较好时,可实现信号的良好传输.

式的有效传输.实验中用日本安立 (Anritsu) MS9710B 型光谱测试仪测试所制备的少模光纤光栅的反射谱和所使用的激光光谱,并用 MATLAB 软件绘制,得到少模光纤光栅的反射谱与激光器的中心波长的对应关系如图 6 所示(为便于说明,将  $1548.471\text{nm}$  激光和  $1549.228\text{nm}$  激光光谱绘制在一张图中).

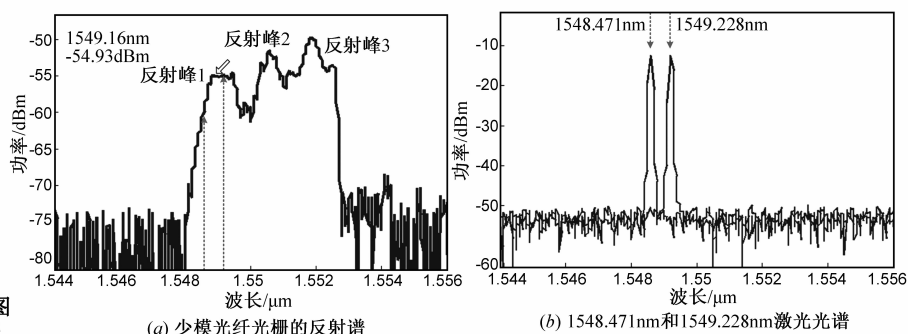


图6 实验结果

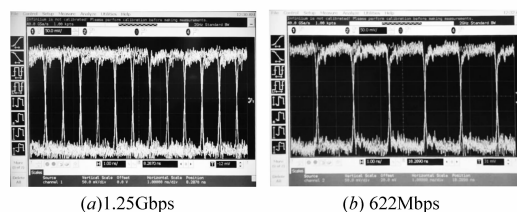


图7 源信号眼图

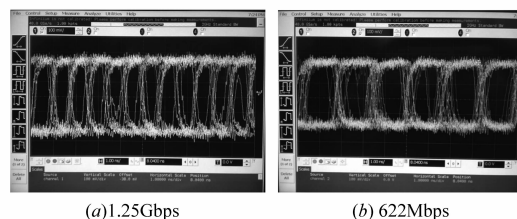


图8 当激光器工作波长为 $1548.471\text{nm}$ 时,背对背传输时信号眼图

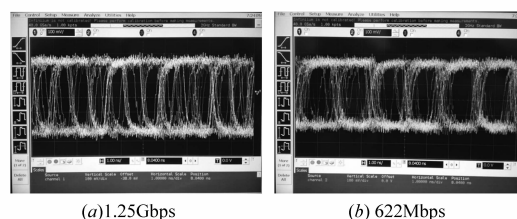


图9 当激光器工作波长为 $1548.471\text{nm}$ 时,  $10\text{km}$ 传输时信号眼图

为进一步说明基于少模光纤布拉格光栅的模分复用通信系统的可行性,实验分析了当激光器的工作波长为  $1549.228\text{nm}$ ,即激光器的工作波长与  $LP_{11}$  模的反射峰的中心波长良好匹配时,  $LP_{01}$  路和  $LP_{11}$  路信号背对背和  $10\text{km}$  传输的误码 (BER) 特性,结果如图 12 所示.当接收功率分别为  $-13.5\text{dBm}$  和  $-11.5\text{dBm}$  时,  $LP_{01}$  路和  $LP_{11}$  路信号  $10\text{km}$  传输后的误码率均可达到  $10^{-3}$ ,均

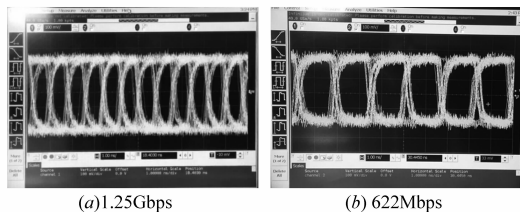


图10 当激光器工作波长为1549.228nm时,背对背传输时信号眼图

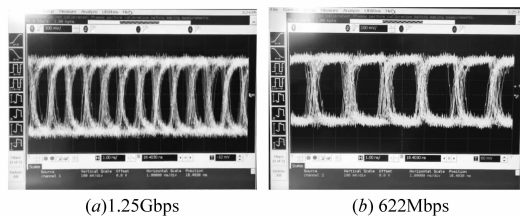


图11 当激光器工作波长为1549.228nm时,10km传输时信号眼图

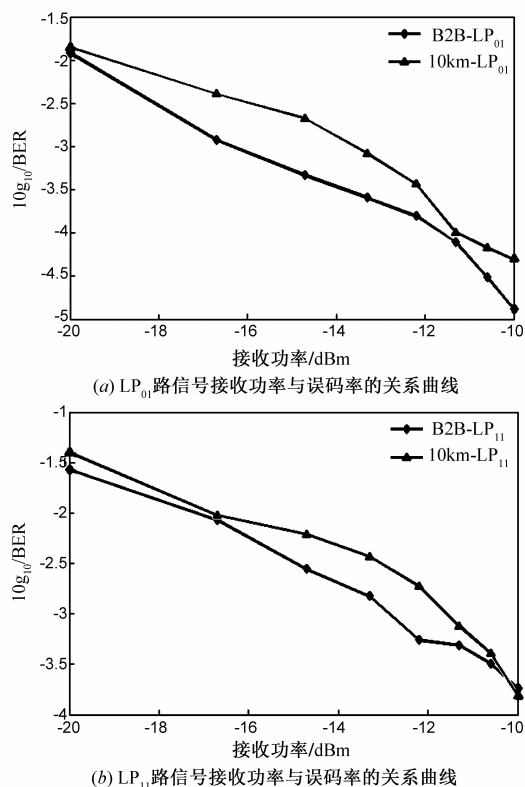


图12 激光器的工作波长为1549.228nm时,系统误码特性

能满足通信系统的要求。

#### 4 结论

本文提出了一种基于少模光纤布拉格光栅的模分复用通信系统,从理论上分析了少模光纤布拉格光栅实现模分复用/解复用的可行性,并实现了1.25Gbps和622Mbps伪随机序列复用10km的传输实验,分析了接收信号和原始发送信号的眼图变化的原因,并测试了实验系统的误码特性.当激光器的工作波长为

1549.228nm,接收功率分别为-13.5dBm和-11.5dBm时,LP<sub>01</sub>路和LP<sub>11</sub>路信号10km传输后的误码率均可达到 $10^{-3}$ .这为实现高速率、长距离的模分复用光传输实验奠定了实验基础,对模分复用通信具有指导意义。

#### 参考文献

- [1] 王健全,张永健,顾婉仪. DM光网络中的共享通道保护方法[J]. 电子学报,2004,32(5):851-853.  
Wang Jianquan, Zhang Yongjian, Gu Wangyi. Shared channel protection in all optical WDM networks[J]. Acta Electronica Sinica, 2004, 32(5): 851-853. (in Chinese)
- [2] 于青,葛宁,董在望. WDM光网络中基于链路的动态组播共享保护算法[J]. 电子学报,2007,35(1):71-73.  
Yu Qing, Ge Ning, Dong Zaiwang. Link-based shared protection algorithm for dynamic multicast sessions in WDM networks[J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(1): 71-73. (in Chinese)
- [3] 李春蕾,张晓光,席丽霞,等. 偏振复用系统中FIR-BP算法有效补偿非线性损伤的实验研究[J]. 中国激光,2013,40(12):1205001.  
Li Chunlei, Zhang Xiaoguang, Xi Lixia, et al. Experimental validation of effective nonlinearity compensation by FIR-BP algorithm in polarization multiplexing system[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(12): 1205001. (in Chinese)
- [4] 王源泉,方武良,陶理,等. 多模光纤链路中多输入多输出技术的研究[J]. 激光与光电子学进展,2011,48(10):12-18.  
Wang Yuanquan, Fang Wuliang, Tao Li, et al. Research of multiple-input multiple-output (MIMO) technique in multimode fiber links[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(10): 12-18. (in Chinese)
- [5] 郝耀鸿,王荣,李玉权,等. 相干光正交频分复用系统偏振效应研究[J]. 光学学报,2013,33(7):122-127.  
Hao Yaohong, Wang Rong, Li Yuquan, et al. Investigation of polarization effect in coherent optical orthogonal frequency division multiplexing system[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(7): 122-127. (in Chinese)
- [6] 姚殊畅,付松年,等. 基于少模光纤的模分复用系统多输入多输出均衡与解调[J]. 物理学报,2013,62(14):253-260.  
Yao Shuchang, Fu Songnian, et al. Demodulation and multi-input multi-output equalization for mode division multiplexing system using a novel few-mode fiber[J]. Acta Phys Sin, 2013, 62(14): 253-256. (in Chinese)
- [7] Bai Neng, Ip Ezra, Huang Yue-Kai, et al. Mode-division multiplexed transmission with inline few-mode fiber amplifier[J]. Opt Express, 2012, 20(3): 2668-2680.
- [8] Ezra Ip, Ming-jun Li, Yue-Kai Huang, et al. 146λ × 6 × 19-Gbaud wavelength and mode division multiplexed transmis-

- sion over 10 × 50-km spans of few-mode fiber with a gain-equalized few mode EDFA[J]. Journal of Lightwave Technology, 2010, 32(4): 790 – 797.
- [9] Philippe Genevaux, Christian Simonneau, Guillaume Labroille, et al. 6-mode spatial multiplexer with low loss and high selectivity for transmission over few mode fiber[A]. Proceedings of Optical Fiber Communication Conference (OFC)[C]. Los Angeles, CA: IEEE, 2015. 1 – 3.
- [10] Li Yuru, Li Jianping, Pan Man, et al. Mode multiplexing and de-multiplexing using few-mode tilted fiber Bragg grating for SDM-WDM transmission system [A]. Proceedings of International Conference on Communication Systems (ICCS)[C]. Macau: IEEE, 2014. 278 – 282.
- [11] 陈艳, 周桂耀, 夏长明, 等. 具有双模特性的大模场面积微结构光纤的设计[J]. 物理学报, 2014, 63(1): 014701-1 – 014701-6.  
Chen Yan, Zhou Guiyao, Xia Changming, et al. Analysis of a novel dual-mode large-mode-area micro-structured fiber[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(1): 014701-1 – 014701-6. (in Chinese)
- [12] 高松, 刘艳, 陈润秋, 等. 用于空分复用的模分复用技术研究[J]. 激光与红外, 2014, 44(4): 424 – 428.  
Gao Song, Liu Yan, Chen Runqiu, et al. Study on mode multiplexing used in space-division multiplexing[J]. Laser & Infrared, 2014, 44(4): 424 – 428. (in Chinese)
- [13] Nobutomo Hanzawa, Kuimasa Saitoh, Taiji Sakamoto, et al. Demonstration of mode-division multiplexing transmission over 10km two-mode fiber with mode coupler[A]. Proceedings of Optical Fiber Communication Conference (OFC)[C]. LOS Angeles: IEEE, 2011. 1 – 3.
- [14] Nobutomo Hanzawa, Kuimasa Saitoh, Taiji Sakamoto, et al. Mode multi/demultiplexing with parallel waveguide for mode division multiplexed transmission [J]. Optics Express, 2014, 22(24): 29321 – 29330.
- [15] Roland Ryf, Sebastian Randel, Alan H. Gnauck, et al. Mode-division multiplexing over 96km of few-mode fiber using coherent 6 × 6 MIMO processing [J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30(4): 521 – 530.
- [16] Christine P. Chen, Jeffrey B. Driscoll, Noam Ophir, et al. First demonstration of polarization multiplexing combined with on-chip mode division multiplexing[A]. Proceedings of Optical Fiber Communication Conference (OFC)[C]. San Francisco: OSA, 2014. Th4A. 3.
- [17] Jeffrey B Driscoll, Christine P Chen, Richard R Grote, et al. A 60Gb/s MDM-WDM Si photonic link with <0.7dB power penalty per channel[J]. Optics Express, 2014, 22(15): 18543 – 18555.
- [18] Chengcheng Gui, Zhonglai Zhang, Dingshan Gao, et al. Experimental demonstration of on-chip silicon two/three mode (de) multiplexer using OFDM 64/128/256-QAM signals[A]. Proceedings of Quantum Electronics and Laser Science Conference (QELS) on Fundamental Science [C]. San Jose: IEEE, 2014. 1 – 2.
- [19] Changgui Lu, Yiping Cui. Fiber bragg grating spectra in multimode optical fibers[J]. Journal of Lightwave Technology, 2006, 24(1): 598 – 604.
- [20] Sillard P, Astruc, Marianne, Boivin D, et al. Few-mode fiber for uncoupled mode-division multiplexing transmissions[A]. Proceedings in 37th European Conference and Exposition on Optical Communications (ECOC)[C]. Switzerland: IEEE, 2011. 1 – 3.

### 作者简介



**胡贵军 (通信作者)** 男, 1970 年 3 月出生, 辽宁绥中人. 博士, 吉林大学教授、博士生导师, 主要从事光通信技术与器件方面的研究工作.  
E-mail: hugj@jlu.edu.cn



**常玉鑫** 男, 1989 年 10 月出生, 黑龙江双鸭山人. 吉林大学通信工程学院在读硕士生, 主要从事模分复用通信方面的研究.  
E-mail: changyuxin1989@163.com



**韩悦羽** 女, 1992 年 8 月出生, 吉林省吉林市人. 吉林大学通信工程学院在读硕士生, 主要从事模分复用通信方面的研究.  
E-mail: hyyhanyueyu@163.com

**闫李** 男, 1987 年 11 月出生, 河南义马人. 吉林大学通信工程学院在读博士生, 主要从事模分复用系统解复用技术的研究.  
E-mail: yanlijlu@163.com

**王海燕** 女, 1973 年 10 月出生, 吉林长春人. 吉林大学通信工程学院教师, 主要从事光器件方面的研究.  
E-mail: wwhyy2004@sina.com