

基于背向瑞利散射的少模光纤模式耦合测量

陈翠光, 胡贵军, 刘峰, 王勃然, 陈威成

吉林大学通信工程学院, 吉林 长春 130012

摘要 少模光纤的模式耦合引起模分复用(MDM)系统传输性能劣化,是造成MDM技术难以在实际中大规模应用的主要因素之一。精确测量少模光纤模式耦合系数和量化分析模式耦合与系统性能之间的关系,可以为系统的损伤补偿提供可靠依据。分析了当前少模光纤模式耦合测量方法的利弊,并基于背向瑞利散射原理建立了一种模式转换器/解复用器和光纤环形器结构的少模光纤模式耦合测量系统,通过与多输入多输出功率分析的测量结果进行对比,验证了所提系统的测量性能。实验结果表明,所提系统较好地实现了对9.8 km少模光纤模式耦合分布的测量,且测量结果稳定。

关键词 光通信; 模分复用; 少模光纤; 模式耦合

中图分类号 TN913.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0806002

Measurement of Mode Coupling in Few-Mode Fiber Based on Rayleigh Backscattering

Chen Cuiguang, Hu Guijun, Liu Feng, Wang Boran, Chen Weicheng

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

Abstract Mode coupling in few-mode fiber may cause the transmission performance deterioration of a mode division multiplexing (MDM) system, which is one of the major factors limiting MDM technology to be applied in practice on a large scale. Precise measurement of mode coupling coefficient in few-mode fiber and quantitative analysis on the relationship between mode coupling and the performance of MDM system can provide reliable basis for the system-damage compensation. The advantages and disadvantages of the present measuring methods for mode coupling in few-mode fiber are analyzed, and a measurement system of mode coupling in few-mode fiber with the structure of mode transverter/demultiplexer and an optical fiber circulator based on the Rayleigh backscattering theory is built. By compared with the measurement results of multiple-input-multiple-output power analysis, the measurement performance of the proposed system has been verified. The experimental results show that the proposed system can realize the measurement of the mode coupling distribution in few-mode fiber with the fiber length of 9.8 km, and the measurement results are stable.

Key words optical communications; mode division multiplexing; few-mode fiber; mode coupling

OCIS codes 060.2330; 060.2300; 060.2270; 060.2310

1 引言

光通信网络带宽的需求量随着云计算、大数据、物联网、4/8K视频以及虚拟现实/增强现实等新技术的广泛应用呈爆炸式增长,然而当前光通信网络对时间、幅度、频率、相位、偏振态等自由度的利用已接近极限,

收稿日期: 2017-03-06; 收到修改稿日期: 2017-04-11

基金项目: 国家自然科学基金(61575078,61177066)、吉林省科技发展计划(20140203009GX)、吉林省发改委产业技术研究专项(2014Y087)

作者简介: 陈翠光(1992—),女,硕士研究生,主要从事少模光纤传输特性测量方面的研究。

Email: chencuiguangcgcg@163.com

导师简介: 胡贵军(1970—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事光纤通信技术和器件等方面的研究。

Email: hugj@jlu.edu.cn(通信联系人)

通信系统容量的增速已远落后于互联网流量需求的增速。为了应对光通信网络的带宽危机,基于少模光纤的模分复用(MDM)技术应运而生。在MDM技术中,有限个正交模式作为独立信道在少模光纤中并行传递信息,成倍地提升了系统容量^[1-4]。然而,MDM技术始终未能在实际中被广泛应用,其主要原因是作为传输介质的少模光纤存在模式耦合、差分模群时延和模式相关损耗等损伤,限制了MDM系统的传输性能^[5]。模式耦合使原本独立的传输信道之间发生能量交换,造成信道串扰,导致系统传输性能恶化、传输距离受限,因此模式耦合是限制MDM系统传输性能的根本原因^[6-7]。对模式耦合沿光纤径向分布的测量不仅可以为MDM系统的损伤补偿提供重要依据,而且可以通过测量结果量化模式耦合与少模光纤参数之间的关系,实现少模光纤结构的优化设计。

随着MDM技术研究进程的不断加快,模式耦合测量方法的研究也飞速发展。目前,测量模式耦合的方法主要有空间光谱解析成像法、波长扫描干涉法、脉冲响应法和背向散射法等。其中,空间光谱解析成像法无法确定串扰发生的具体位置,而且成像系统复杂度较高^[8];波长扫描干涉法的动态范围可以达到80 dB以上,但测试中需要使用延迟线,增加了系统的复杂度和成本^[9];脉冲响应法可以测量出少模光纤的模式耦合分布情况,但目前最大动态范围为30 dB^[10-11]。基于背向散射的模式耦合测量法是一种单端测量方法,利用光脉冲在光纤中传输的背向散射效应来反映光纤的传输特性^[12]。1983年,Nakazawa等^[13-14]利用背向散射技术测量偏振模耦合,并在2014年对此方法进行扩展,使用基于背向散射原理制成的光时域反射仪(OTDR)和模式耦合器构建背向散射法,测量出5.9 km少模光纤模式耦合的纵向分布信息,空间分辨率为10 m,动态范围超过40 dB^[15]。2016年,Wang等^[16]建立了少模光纤背向、前向瑞利散射数学模型,为少模光纤OTDR提供了理论基础,同时利用OTDR和自制的模式复用/解复用器搭建实验测量系统,验证了所建理论模型的正确性。

利用搭建的实验系统实现了9.8 km三模光纤模式耦合分布情况的测量。实验表明,该系统测量结果稳定、可靠性好、操作简单、实用性强,在少模光纤模式耦合测量方面具有良好的应用前景。

2 背向瑞利散射测量模式耦合原理

光纤制造工艺缺陷会使其存在材质掺杂不均匀和芯径不圆等问题,并使其折射率发生随机变化,导致光在传输过程中出现散射现象。光纤中的散射是造成光纤损耗的一个主要因素,其中由于瑞利散射造成的损耗约占总损耗的90%^[17-18]。另外,少模光纤材质掺杂不均匀和芯径不圆等问题,也会导致模式耦合的发生。瑞利散射方向是向着四周的,通常将沿正向和反向传播的散射光分别称为前向瑞利散射光和背向瑞利散射光^[19],二者不仅散射强度一致,偏振态和模态也相同。因此,当某特定模式的光以一定功率在少模光纤中传输时,通过测量分析各个模式背向散射光功率之间的关系,即可得出光纤的模式耦合特性。

当光脉冲以模式*i*注入光纤时,若忽略偏振态的影响,并将瑞利散射视为离散过程,则在光纤入射端接收到模式*j*的背向瑞利散射功率随光纤距离变化的关系为^[16]

$$P_{bs_{ij}} = P_0 \alpha_s B_{ij} \bar{v} \Delta T \exp(-2\alpha z), \quad (1)$$

其中

$$\bar{v} = \frac{v_{gi} v_{gj}}{v_{gi} + v_{gj}}, \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{\alpha_i + \alpha_j}{2}, \quad (3)$$

式中 v_{gi} 和 v_{gj} 分别为模式*i*和模式*j*的群速度, α_i 和 α_j 分别为模式*i*和模式*j*的损耗系数, $P_{bs_{ij}}$ 为以模式*i*为激发模时模式*j*的背向瑞利散射功率, P_0 为入射光脉冲的峰值功率, α_s 为散射总功率与入射功率的比值, B_{ij} 为模式*j*的背向散射功率与总背向散射功率的比值, ΔT 为脉冲宽度, z 为光在光纤中的传输距离。

(1)式适用于 $2\alpha v \Delta T \ll 1$ 的情况。

模式*i*和模式*j*沿光纤纵向的功率比 $\eta_{i,j}(L)$ 可以由背向散射功率 P_{bs_j} 与 P_{bs_i} 的比值得出,即

$$\eta_{i,j}(L) = \frac{P_{bs_j}}{P_{bs_i}} = 2h_{i,j}L + K, \quad (4)$$

式中 $h_{i,j}$ 为从模式 i 到模式 j 的模式耦合系数; L 为光纤长度; K 为常数, 由模式耦合系数自相关函数的傅里叶变换和模式复用/解复用器自身的串扰决定。(4)式适用于 $h_{i,j}L \ll 1$ 的情况。对两模式之间的功率耦合比随光纤长度的分布曲线进行线性拟合, 拟合直线的斜率即为模式耦合系数, 此时 K 值的影响可忽略^[14]。由于

$$B_{01,11a} = B_{11a,01} = B_{01,11b} = B_{11b,01}, \quad (5)$$

式中 $B_{01,11a}$ 为当 LP_{01} 模被激发时 LP_{11a} 模的背向散射功率占总背向散射功率的比值, $B_{11a,01}$ 为当 LP_{11a} 模被激发时 LP_{01} 模的背向散射功率占总背向散射功率的比值, $B_{01,11b}$ 为当 LP_{01} 模被激发时 LP_{11b} 模的背向散射功率占总背向散射功率的比值, $B_{11b,01}$ 为当 LP_{11b} 模被激发时 LP_{01} 模的背向散射功率占总背向散射功率的比值, 因此理论上模式耦合系数也具有相应的关系^[16]。线偏振(LP_{11a} 和 LP_{11b})模属于简并模, 二者之间的耦合为强耦合, 因此(4)式不再适用。在光纤中传输 L km 后, 模式 i 到模式 j 的串扰 $C_{i,j}$ 可以表示为

$$C_{i,j} = 10 \lg(h_{i,j}L)。 \quad (6)$$

3 实验装置

实验中采用的少模光纤模式耦合测量实验装置图如图 1 所示。该实验系统主要对激光器功率、发射脉冲的宽度和重复频率以及光电探测器(PD)的响应度有特殊要求。对于单模光纤而言, 瑞利散射光功率比入射光功率低约 60 dB, 由于本实验系统是对少模光纤中激发模和耦合模的背向瑞利散射光进行测量, 背向瑞利散射光的功率要比单模光纤中的瑞利散射光的功率低得多, 因此, 该实验测量系统要求激光器的发射功率至少为毫瓦量级, PD 的响应灵敏度需达到纳瓦量级。脉冲宽度和重复频率的设定与所测量的光纤长度有关, 要求光脉冲在一个周期的时间内可在光纤中传播一个来回, 脉冲宽度的选择要充分考虑到系统的空间分辨率和动态范围。所测量的光纤长度为 9.8 km, 为了获得更好的测量效果, 采用的脉冲宽度为 300 ns, 重复频率为 4 kHz。

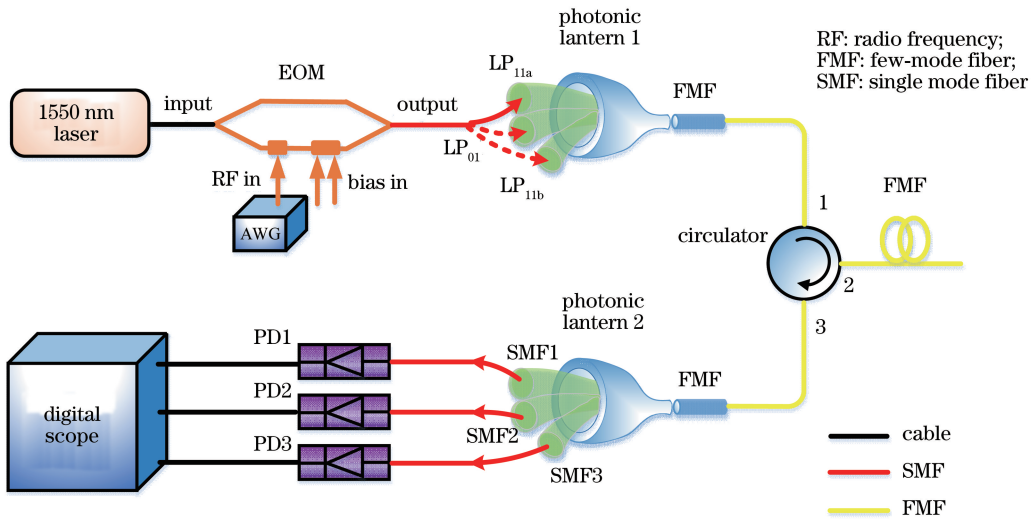


图 1 少模光纤模式耦合测量实验装置图

Fig. 1 Experimental setup of mode coupling measurement in few-mode fiber

光源采用的是分布反馈式半导体激光器, 中心波长为 1550.16 nm, 输出功率为 10 mW, 线宽为 3 MHz。首先, 设置任意波形发生器(AWG)的参数, 使其产生重复频率为 4 kHz、脉冲宽度为 300 ns 的脉冲信号, 电光调制器(EOM)将连续激光器发出的连续光调制为相应参数的光脉冲信号。EOM(型号为 LN56S-FC, Thorlabs 公司, 美国)的工作波长范围为 1525~1605 nm, 插入损耗为 4 dB, 偏置电压的调节范围为 -8~8 V。AWG 型号为 DG1032(生产公司, 生产国), 输出频率为 30 MHz, 采样率为 200 MSa·s⁻¹。调制好的脉冲信号经 LP_{01} 模口(LP_{11a} 模口或 LP_{11b} 模口)进入模式转换器, 激发出 LP_{01} 模(LP_{11a} 模或 LP_{11b} 模)。激发模经 1 口进入少模环形器, 从少模环形器 1 口进入的光由 2 口输出, 之后被注入 9.8 km 的测试少模光纤

(FUT)。该环形器是从上海瀚宇公司订制的 S/N:W160510091660 型少模光纤环形器,1 口到 2 口的插入损耗为 0.98 dB,2 口到 3 口的插入损耗为 0.75 dB,回波损耗为 55 dB。环形器 2 口的尾纤与 FUT 采用中芯熔接方式,以确保熔接产生的损耗和串扰接近最小限度。FUT 中沿路返回的背向散射光经 2 口进入环形器后从 3 口输出,利用模式解复用器完成混合模式的解复用过程。接着,使用 PD 对模式解复用器各口进行光电转换,将 LP₀₁ 模、LP_{11a} 模和 LP_{11b} 模的功率变化转换为电流随时间的变化。PD(型号 IAM-6020,飞博源公司,中国)的工作波长为 900~1700 nm,1550 nm 处的电流响应度为 8.5 A·W⁻¹。通过示波器对变化的数据进行高速采集后,再进行线下数字信号处理算法的处理,最终得到测试光纤各模式间的模式耦合系数。示波器(Lecroy SDA 11000 Lecroy 公司,美国)支持 4 个数据通道,最大采样率为 40 GSa/s。

本实验中模式转换器和模式解复用器使用的是从 Olkin Optics 公司定制的全光纤六模光子灯笼,具有插入损耗低、结构稳定及易于集成等优点,而且具有模式选择性,可实现模式转换和复用/解复用功能。光子灯笼的输入光纤为单模光纤,输出尾纤为少模光纤,并采用拉锥技术。当基模态的光信号从不同模式的端口注入光子灯笼时,在输出端便会得到相应模式的光信号,图 2(a)~(c)分别为基模光从 LP₀₁ 模口、LP_{11a} 模口或 LP_{11b} 模口入光时,使用图像传感器测得光子灯笼输出尾纤处的模式态图。系统搭建前测得 1 号和 2 号光子灯笼 LP₀₁ 模口、LP_{11a} 模口和 LP_{11b} 模口的插入损耗分别为 2.479,1.744,2.721 dB 和 3.495,1.784,2.654 dB。

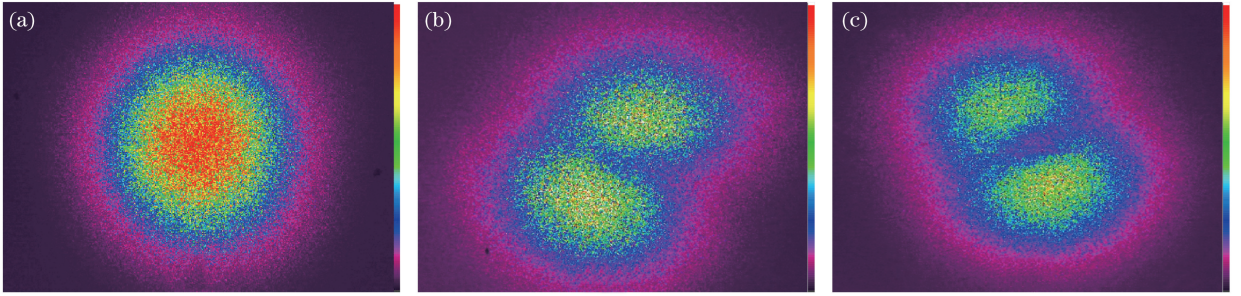


图 2 从(a) LP₀₁模口、(b) LP_{11a}模口和(c) LP_{11b}模口入射时光子灯笼输出尾纤的模式态图

Fig. 2 Modal graphs of photonic lantern's output pigtail injected from (a) LP₀₁, (b) LP_{11a} and (c) LP_{11b}

实验测量所用的少模光纤可支持 LP₀₁ 模、LP_{11a} 模和 LP_{11b} 模 3 个模式的传输,相关参数为:纤芯直径为 13.938 μm,包层直径为 125 μm,归一化截止频率为 3.71 Hz,纤芯折射率为 1.4630,包层折射率为 1.4571。

4 实验结果和分析

调制好的光脉冲信号经 LP₀₁ 模口进入模式转换器,以 LP₀₁ 模作为激发模注入 9.8 km 三模光纤。进入模式转换器前,光脉冲的重复频率为 4 kHz,脉冲宽度为 300 ns。背向散射功率数据的采集由示波器完成,通过数字信号处理将与时间相关的数据转换为与距离相关的数据。由于背向散射信号相当微弱,受噪声影响较大,因此需要对多组数据求取平均值并进行滤波处理,以减弱随机噪声的影响。考虑到光子灯笼和环形器自身的模式相关损耗对实验结果会有影响,在数据处理时需对实验结果进行补偿。图 3 为以 LP₀₁ 模作为激发模注入光纤时数据处理的结果,图 3(a)为 LP₀₁ 模、LP_{11a} 模和 LP_{11b} 模背向散射的功率分布图,图 3(b)为 LP_{11a} 模与 LP₀₁ 模的模式耦合比 $\eta_{01,11a}$ 随传输距离的分布曲线,图 3(c)为 LP_{11b} 模与 LP₀₁ 模的模式耦合比 $\eta_{01,11b}$ 随传输距离的分布曲线。从图中可以看出,LP_{11a} 模和 LP_{11b} 模波形的斜率与 LP₀₁ 模不同,这是由少模光纤对 LP₀₁ 模和 LP₁₁ 模的损耗系数不同导致的。

考虑到少模光纤对各模式的损耗系数的差异,计算模式耦合比时,对光纤的模式相关损耗加以补偿,补偿后的模式耦合比为

$$\eta_{01,11} = \frac{P_{bs,11}}{P_{bs,01}} \exp [(\alpha_{11} - \alpha_{01}) L], \quad (7)$$

式中 $\eta_{01,11}$ 为当 LP₀₁ 模被激发时,LP₁₁ 模的背向散射功率与 LP₀₁ 模的背向散射功率的比值。由图 3 可见,波形大致呈线性,模式耦合系数 h 为拟合直线的斜率。经计算得出,LP₀₁ 模到 LP_{11a} 模、LP₀₁ 模到 LP_{11b} 模的耦合系数 $h_{01,11a}$ 、 $h_{01,11b}$ 分别为 -26.40 dB·km⁻¹ 和 -24.59 dB·km⁻¹。经过 9.8 km 少模光纤传输后,LP₀₁ 模到

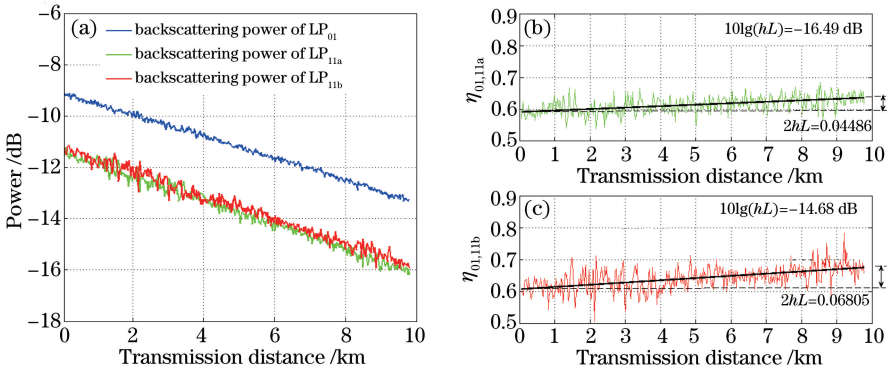


图 3 以 LP₀₁ 模为激发模的测量结果。(a) LP₀₁ 模、LP_{11a} 模和 LP_{11b} 模的背向散射功率分布图；(b) LP_{11a} 模与 LP₀₁ 模的模式耦合比随传输距离的分布曲线；(c) LP_{11b} 模与 LP₀₁ 模的模式耦合比随传输距离的分布曲线
Fig. 3 Measurement results when LP₀₁ is used as excitation mode. (a) Backscattering power distribution of LP₀₁, LP_{11a} and LP_{11b} modes; (b) distribution curve of mode coupling ratio between LP_{11a} and LP₀₁ modes along transmission distance; (c) distribution curve of mode coupling ratio between LP_{11b} and LP₀₁ modes along transmission distance

LP_{11a} 模、LP_{11b} 模的模式串扰 $C_{01,11a}$ 、 $C_{01,11b}$ 分别为 -16.49 dB 和 -14.68 dB。

为探讨模式耦合是否具有对称性，即 LP₀₁ 模到 LP_{11a} 模的模式耦合系数 $h_{01,11a}$ 与 LP_{11a} 模到 LP₀₁ 模的模式耦合系数 $h_{11a,01}$ 是否相同，将 LP_{11a} 模作为激发模注入测试光纤，对测量结果进行计算分析。图 4(a) 为以 LP_{11a} 模为激发模注入光纤时 LP₀₁ 模、LP_{11a} 模和 LP_{11b} 模的背向散射功率分布图，图 4(b) 为 LP_{11a} 模到 LP₀₁ 模的模式耦合比 $\eta_{11a,01}$ 随传输距离的分布曲线，图 4(c) 为 LP_{11a} 模到 LP_{11b} 模的模式耦合比 $\eta_{11a,11b}$ 随传输距离的分布曲线。由于 LP_{11b} 模与 LP_{11a} 模属于简并模，二者之间为强耦合，此时(4)式不再适用，图 4(c) 标出的串扰值不具有实际意义。经计算得出，LP_{11a} 模到 LP₀₁ 模的模式耦合系数 $h_{11a,01} = -27.08$ dB·km⁻¹。

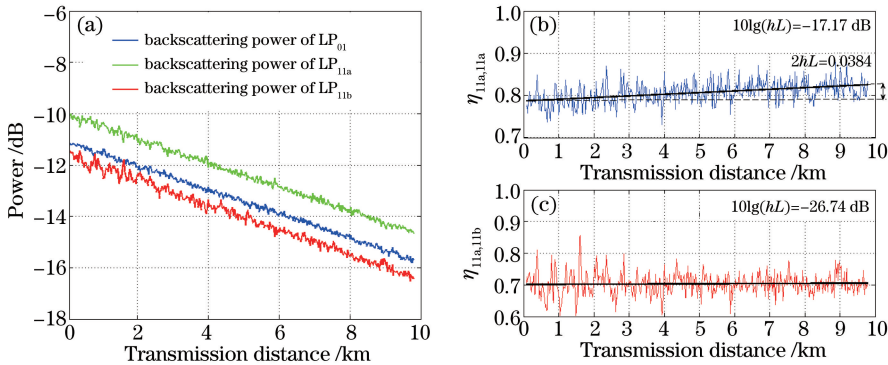


图 4 以 LP_{11a} 模为激发模的测量结果。(a) LP₀₁ 模、LP_{11a} 模和 LP_{11b} 模的背向散射功率分布图；(b) LP₀₁ 模与 LP_{11a} 模的模式耦合比随传输距离的分布曲线；(c) LP_{11a} 模与 LP_{11b} 模的模式耦合比随传输距离的分布曲线

Fig. 4 Measurement results when LP_{11a} is used as excitation mode. (a) Backscattering power distribution of LP₀₁, LP_{11a} and LP_{11b} modes; (b) distribution curve of mode coupling ratio between LP₀₁ and LP_{11a} modes along transmission distance; (c) distribution curve of mode coupling ratio between LP_{11a} and LP_{11b} modes along transmission distance

同样地，将 LP_{11b} 模作为激发模注入测试光纤，所得测量结果如图 5 所示，图 5(a) 为以 LP_{11b} 模作为激发模注入光纤时 LP₀₁ 模、LP_{11a} 模和 LP_{11b} 模背向散射的功率分布图，图 5(b) 为 LP₀₁ 模到 LP_{11b} 模的模式耦合比 $\eta_{11b,01}$ 随传输距离的分布曲线，图 5(c) 为 LP_{11a} 模到 LP_{11b} 模的模式耦合比 $\eta_{11b,11a}$ 随传输距离的分布曲线。同理，图 5(c) 标出的串扰值无实际意义。

为验证实验结果的可靠性，换用多输入多输出(MIMO)的测量结构，在光纤首末两端均接入光子灯笼，使用光功率计测出末端光子灯笼各口的功率，计算模式串扰值和耦合系数。利用两种方法测量模式耦合系数的结果如表 1 所示。由表可见，搭建的基于背向散射的测量系统与传统采用 MIMO 测量结构得到的测量

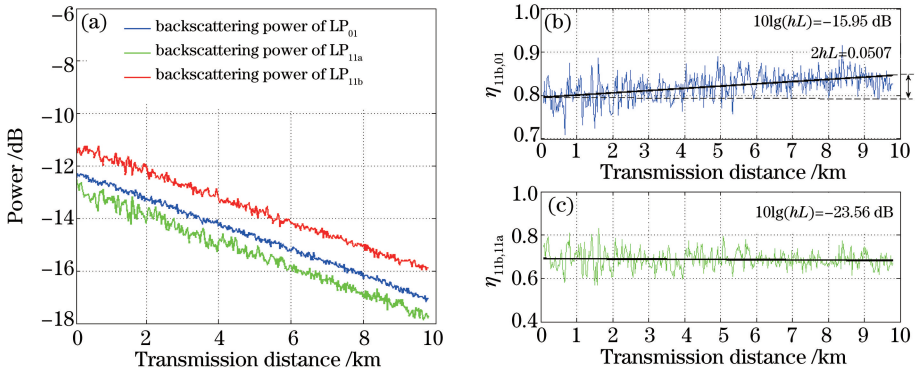


图 5 以 LP_{11b} 模为激发模的测量结果。(a) LP₀₁ 模、LP_{11a} 模和 LP_{11b} 模的背向散射功率分布图；(b) LP₀₁ 模与 LP_{11b} 模的模式耦合比随传输距离的分布曲线；(c) LP_{11a} 模与 LP_{11b} 模的模式耦合比随传输距离的分布曲线
Fig. 5 Measurement results when LP_{11b} is used as excitation mode. (a) Backscattering power distribution of LP₀₁, LP_{11a} and LP_{11b} modes; (b) distribution curve of mode coupling ratio between LP₀₁ and LP_{11b} modes along transmission distance; (c) distribution curve of mode coupling ratio between LP_{11a} and LP_{11b} modes along transmission distance

结果相比,模式耦合系数差值在 $\pm 1.07 \text{ dB}\cdot\text{km}^{-1}$ 以内。由结果对比可以看出,LP₀₁ 模到 LP_{11a} 模、LP_{11b} 模的模式耦合系数 $-26.40 \text{ dB}\cdot\text{km}^{-1}$ 和 $-24.59 \text{ dB}\cdot\text{km}^{-1}$ 分别与 LP_{11a} 模、LP_{11b} 模到 LP₀₁ 模的模式耦合系数 $-27.08 \text{ dB}\cdot\text{km}^{-1}$ 和 $-25.86 \text{ dB}\cdot\text{km}^{-1}$ 相符,表明模式耦合具有对称性。

表 1 9.8 km 三模光纤的平均模式耦合系数测量结果对比

Table 1 Comparison of measurement results of average mode coupling coefficients of 9.8 km three-mode fiber $\text{dB}\cdot\text{km}^{-1}$

Method	$h_{01,11a}$	$h_{01,11b}$	$h_{11a,01}$	$h_{11a,11b}$	$h_{11b,01}$	$h_{11b,11a}$
Present method	-26.40	-24.59	-27.08	—	-25.86	—
MIMO method	-25.33	-25.16	-26.45	—	-26.62	—

实验系统测量的信号极其微弱,易受器件或环境影响而产生误差,主要为少模环形器和光子灯笼各口的插入损耗测量误差、因光纤切割端面存在微小角度使得熔接点处产生的误差以及外界震动、微扰、温度变化等环境影响引起的误差。通过分析多次测量结果,得到各误差源引起功率的综合误差约为 $\pm 0.52 \text{ dB}$ 。

5 结 论

理论分析了基于背向散射的模式耦合测量法的可行性,搭建了一种基于模式转换器/解复用器和光纤环形器结构的少模光纤模式耦合测量系统,成功测量出 9.8 km 少模光纤的模式串扰及其沿光纤纵向的分布信息,得出了测试光纤的模式耦合系数,为光纤的质量评估提供了可靠的依据。该测量方法的相关限制因素主要包括光源的功率和光电探测器的灵敏度,该实验测量系统要求激光器的发射功率至少是毫瓦量级,并且要求光电探测器的响应灵敏度达到纳瓦量级。

所提出的基于背向瑞利散射的少模光纤模式测量系统可以应用在光纤质量鉴定、MDM 通信系统中光纤传输特性的检测等方面,在少模光纤结构设计优化、少模光纤建模以及 MDM 系统损伤补偿研究等方面也有重要的辅助作用。搭建的测量系统性能参数与 OTDR 法无较大差别,但商用 OTDR 在光脉冲产生和光接收的方式上较为固定,难以支撑少模光纤在更大动态范围参数提升方面的需求。相比之下,所提出的系统更易在光脉冲产生和光接收方式上进行扩展,可进一步提高系统的动态范围,这也是下一步将要开展的工作。

参 考 文 献

[1] Li Chao, Zhao Jian, Wang Wei, *et al.* $4\times 100 \text{ Gbit/s}$ long-distance quasi-single-mode bi-directional transmission with few-mode fiber[J]. Chinese J Lasers, 2017, 44(2): 0206001.
李超, 赵健, 王伟, 等. $4\times 100 \text{ Gbit/s}$ 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): 0206001.

- [2] Berdagué S, Facq P. Mode division multiplexing in optical fibers[J]. *Applied Optics*, 1982, 21(11): 1950-1955.
- [3] Richardson D J, Fini J M, Nelson L E. Space-division multiplexing in optical fibres[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(5): 354-362.
- [4] Fang Yan, Hu Guijun, Gong Caili, *et al.* Mode demultiplexing based on cascaded independent component analysis for mode division multiplexing system with high mode group delay[J]. *Chinese J Lasers*, 2016, 43(8): 0806001.
方 妍, 胡贵军, 宫彩丽, 等. 高模式群时延模分复用系统的级联独立成分分析解复用技术研究[J]. *中国激光*, 2016, 43(8): 0806001.
- [5] Xie Yiwei, Fu Songnian, Zhang Hailiang, *et al.* Design and optimization of mode differential group delay for few-mode fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(9): 0906010.
谢意维, 付松年, 张海亮, 等. 少模光纤模式差分群时延的设计与优化[J]. *光学学报*, 2013, 33(9): 0906010.
- [6] Antonelli C, Mecozzi A, Shtaif M, *et al.* Random coupling between groups of degenerate fiber modes in mode multiplexed transmission[J]. *Optics Express*, 2013, 21(8): 9484-9490.
- [7] 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.
- [8] Jespersen K, Li Z, Gruner-Nielsen L, *et al.* Measuring distributed mode scattering in long few-moded fibers[C]. *Optical Fiber Communication Conference*, 2012: OTh31.4.
- [9] Fontaine N K, Ryf R, Mestre M A, *et al.* Characterization of space-division multiplexing systems using a swept-wavelength interferometer[C]. *Optical Fiber Communication Conference/National Fiber Optic Engineers Conference*, 2013: OWIK.2.
- [10] Maruyama R, Kuwaki N, Matsuo S, *et al.* Experimental evaluation of mode conversion ratio at splice point for two-mode fibers and its simulated effect on MIMO transmission[C]. *Optical Fiber Communications Conference*, 2014: M3F.6.
- [11] Jin Jie, Liu Fei, Li Kejia. Design of optical multi-wavelength selector based on finite impulse response[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(10): 102302.
金 杰, 刘 菲, 李可佳. 基于有限长脉冲响应的光多波长选择器设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, 48(10): 102302.
- [12] Lü Yuelan, Xing Yongwei. Investigation on rayleigh scattering waveform in phase optical time domain reflectometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(8): 0819001.
吕月兰, 行永伟. 相位光时域反射计瑞利散射波形特性研究[J]. *光学学报*, 2011, 31(8): 0819001.
- [13] Nakazawa M, Shibata N, Tokuda M, *et al.* Measurements of polarization mode couplings along polarization-maintaining single-mode optical fibers[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1984, 1(3): 285-292.
- [14] Nakazawa M, Tokuda M, Negishi Y. Measurement of polarization mode coupling along a polarization-maintaining optical fiber using a backscattering technique[J]. *Optics Letters*, 1983, 8(10): 546-548.
- [15] Nakazawa M, Yoshida M, Hirooka T. Measurement of mode coupling distribution along a few-mode fiber using a synchronous multi-channel OTDR[J]. *Optics Express*, 2014, 22(25): 31299-31309.
- [16] Wang Z, Wu H, Hu X L, *et al.* Rayleigh scattering in few-mode optical fibers[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 35844.
- [17] Sun Hong, Fang Junxin. Theory of polaritons in disordered materials and Rayleigh scatterings in SiO_2 and GeO_2 glasses [J]. *Acta Optica Sinica*, 1988, 8(2): 97-104.
孙 弘, 方俊鑫. 无序材料中的电磁耦合场量子理论及 SiO_2 和 GeO_2 玻璃中光的瑞利散射损耗[J]. *光学学报*, 1988, 8(2): 97-104.
- [18] Tajima K. Low-loss optical fibers realized by reduction of Rayleigh scattering loss[C]. *Optical Fiber Communication Conference and Exhibit*, 1998: 6026377.
- [19] Zhang Xuping, Zhang Yixin, Wang Feng, *et al.* Ultra-long fully distributed optical fiber sensor based on Rayleigh scattering effect[J]. *Chinese J Lasers*, 2016, 43(7): 0700002.
张旭苹, 张益昕, 王 峰, 等. 基于瑞利散射的超长距离分布式光纤传感技术[J]. *中国激光*, 2016, 43(7): 0700002.