

少模光纤熔接点处模式耦合测量

陈威成, 胡贵军, 刘峰, 陈翠光, 王勃然

吉林大学通信工程学院, 吉林 长春 130012

摘要 在少模光纤的模分复用(MDM)系统中,少模光纤之间的熔接不可避免。精确测量少模光纤熔接点处的模式耦合,可以为评估熔接质量和定位系统故障提供可靠依据。基于背向瑞利散射原理,分析了少模光纤熔接点处模式耦合特性,基于光子灯笼结构和光纤环形器建立了少模光纤熔接点耦合测量系统,成功测试了两段3模光纤(长度分别为0.9 km和9.8 km)熔接点处的模式耦合。实验结果表明:当偏移量为1.5 μm 和2.0 μm 时,熔接点处模式耦合分别为-14.9 dB和-13.9 dB。

关键词 光纤通信; 模分复用; 少模光纤; 熔接点; 模式耦合

中图分类号 TN913.7 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.1206005

Measurement of Mode Coupling at a Splice Point Between Few-Mode Fiber

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

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

Abstract In mode division multiplexing systems based on few-mode fibers, it is inevitable to carry out the fusion splice between the few-mode fibers. Precise measurement of mode coupling at each splice point can provide reliable bases for evaluating welding-quality and positioning faults of the system. We analyze the mode coupling characteristics at a splice point between few mode fibers based on Rayleigh backscattering theory, then build a measurement system of mode coupling at a splice point based on the structure of a photonic lantern and an optical circulator, and successfully measure the mode coupling at a splice point between two pieces of three modes fibers (the lengths are 0.9 km and 9.8 km, respectively). The experimental results show that the mode couplings at the splice point are respectively -14.9 dB and -13.9 dB with the offset distances of 1.5 μm and 2 μm .

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

OCIS codes 060.2300; 060.2330; 060.2270; 060.2310

1 引言

随着通信行业的飞速发展,大数据、云计算、物联网和移动互联网等新兴产业不断兴起,为了满足各种宽带业务对光网络容量的要求,发展新的扩容技术是光纤通信发展的必然趋势,其中采用少模光纤(FMF)的模分复用(MDM)技术便是行之有效的方法之一。模分复用技术以少模光纤为传输媒质,利用少模光纤中有限个正交模式作为独立信道实现多路信号的并行传输,可极大地提高系统容量^[1-4]。然而,少模光纤存在模式耦合(MC)^[5]、差分模群时延(DMGD)^[6-7]和模式相关损耗(MDL)^[8]等损伤,这些损伤是影响MDM系统传输性能和传输距离的主要因素。其中,模式耦合的存在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;而且在少模光纤的模分复用系统中,少模光纤之间的熔接

收稿日期: 2017-06-01; **收到修改稿日期:** 2017-07-11

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: 陈威成(1993—),男,硕士研究生,主要从事少模光纤传输特性测量方面的研究。

E-mail: cchenweicheng@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。

E-mail: hugj@jlu.edu.cn(通信联系人)

不可避免,尤其是长距离传输的情况。两段光纤进行熔接时,会引入一定的轴向偏移,导致较大的模式耦合。通过测量少模光纤熔接点处的模式耦合大小,不仅可以评估熔接质量,还可以对模分复用系统进行故障定位。目前,测量模式耦合的方法主要有空间和光谱解析成像法^[9]、波长扫描干涉法^[10]、脉冲响应法^[11]和背向散射法^[12-13]等。其中,背向散射法是利用光纤中的背向散射现象,将测量光脉冲注入光纤后,在光注入端接收背向散射光信号,分析各个模式背向散射光的功率关系,从而测得模式耦合大小。背向散射法实验结构简单,对光纤链路不具破坏性,因此受到广大光学工作者的青睐。1976年,Barnoski等^[14]采用背向散射技术对多模光纤的损耗进行了分布式测量。1984年,Nakazawa等^[15]利用背向散射法对保偏光纤的偏振模耦合进行了测量。2014年,澳大利亚墨尔本大学Li等^[16]利用可重构的布里渊时域反射仪和模式复用器建立了少模光纤背向散射测量系统,成功测量了3 km少模光纤模式耦合的纵向分布信息。2016年,日本东北大学的Yoshida等^[17]利用背向散射法测量了少模光纤熔接点处的模式耦合大小。2016年,天津大学Wang等^[12]建立背向散射数学模型,并对数学模型加以实验验证,成功测量了4.75 km 3模光纤的模式耦合。

本文基于背向瑞利散射原理,分析了少模光纤熔接点处的模式耦合特性,建立了基于光子灯笼和光纤环形器的少模光纤熔接点耦合测量系统,成功测试了两段3模光纤熔接点处的模式耦合大小。

2 测量原理

如图1所示,假设两段3模光纤(支持LP₀₁、LP_{11a}和LP_{11b}3个模式)在熔接时,发生了偏移量为*d*的轴向偏移。此时,光纤中存在两种模式耦合。一种是由于扰动、制造工艺不完善等原因引起的沿光纤径向分布的随机耦合,这种随机耦合的模式耦合大小由介电张量矩阵和背向散射系数矩阵共同决定,对于3模光纤,

介电张量矩阵 $\mathbf{K}^{[18]}$ 可以表示为
$$\begin{bmatrix} 1 & K_{01,11} & K_{01,11} \\ K_{01,11} & 1 & K_{11a,11b} \\ K_{01,11} & K_{11a,11b} & 1 \end{bmatrix}$$
, 背向散射系数矩阵 $\mathbf{k}_{bs}^{[17]}$ 可以表示为

$$\begin{bmatrix} k_{bs01} & 0 & 0 \\ 0 & k_{bs11} & 0 \\ 0 & 0 & k_{bs11} \end{bmatrix}$$
, 其中 k_{bs01} (k_{bs11}) 是以 LP₀₁ (LP₁₁) 模为激发模时 LP₀₁ (LP₁₁) 模的背向散射系数,即背向

散射光 LP₀₁ (LP₁₁) 模在少模光纤 0 km 处功率与初始激发功率的比值。另一种模式耦合是由于熔接点的轴

向偏移导致的,由轴向偏移引起的模式耦合的耦合系数矩阵设为 $\mathbf{C} = \begin{bmatrix} C_{01} & C_{XT} & C_{XT} \\ C_{XT} & C_{11} & C_{11a,11b} \\ C_{XT} & C_{11a,11b} & C_{11} \end{bmatrix}$, 其中 C_{01} 是以

LP₀₁ 模为激发模时的耦合损耗, C_{11} 是以 LP₁₁ 模为激发模时的耦合损耗, C_{XT} 为两个模式之间的耦合大小。由于 LP_{11a}、LP_{11b} 为简并模,模场相互正交,可认为 LP₀₁ 模与 LP_{11a} 模和 LP_{11b} 模在熔接点处的模式耦合大小相同,均为 C_{XT} 。另外,简并模相互正交,所以耦合很小,近似为 0,即 $C_{11a,11b} = 0$ 。

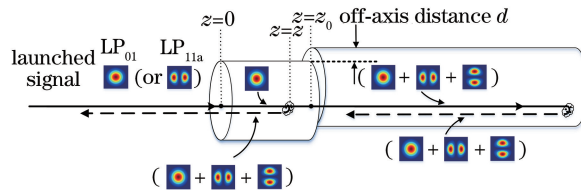


图1 轴向偏移为*d*时两段少模光纤熔接示意图

Fig. 1 Schematic for splicing two FMFs with off-axis distance of *d*

对于3模光纤,测量熔接点处模式耦合大小,即求出 C_{XT} 值。为此需要利用已知信息建立一个含有3个

等式的方程组。首先假设光纤的传输损耗矩阵为 $\mathbf{L}(z) = \begin{bmatrix} \exp(-\alpha_{01}z) & 0 & 0 \\ 0 & \exp(-\alpha_{11}z) & 0 \\ 0 & 0 & \exp(-\alpha_{11}z) \end{bmatrix}$, 利

用微分思想,在熔接点前,即 $z = z_0 - \Delta z$ 处,各个模式的背向散射功率为

$$\begin{bmatrix} P_{bs01}(z_0 - \Delta z) \\ P_{bs11a}(z_0 - \Delta z) \\ P_{bs11b}(z_0 - \Delta z) \end{bmatrix} = \mathbf{L}(z_0) \times \mathbf{K} \times \mathbf{k}_{bs} \times \mathbf{L}(z_0) \times \begin{bmatrix} P_{01}(0) \\ P_{11a}(0) \\ P_{11b}(0) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

在熔接点后,即 $z = z_0 + \Delta z$ 处,各个模式的背向散射功率为

$$\begin{bmatrix} P_{bs01}(z_0 + \Delta z) \\ P_{bs11a}(z_0 + \Delta z) \\ P_{bs11b}(z_0 + \Delta z) \end{bmatrix} = \mathbf{L}(z_0) \times \mathbf{C} \times \mathbf{K} \times \mathbf{k}_{bs} \times \mathbf{C} \times \mathbf{L}(z_0) \times \begin{bmatrix} P_{01}(0) \\ P_{11a}(0) \\ P_{11b}(0) \end{bmatrix}. \quad (2)$$

当 LP_{01} 模作为激发模时, LP_{01} 模熔接点前后模式的功率相对变化可以表示为

$$\delta_1 = \frac{P_{bs01_01}(z_0 - \Delta z) - P_{bs01_01}(z_0 + \Delta z)}{P_{bs01_01}(z_0 - \Delta z)} = 1 - 10^{-\Delta_1/10}, \quad (3)$$

式中 $\Delta_1 = -10 \lg \frac{P_{bs01_01}(z_0 + \Delta z)}{P_{bs01_01}(z_0 - \Delta z)}$; LP_{11a} 模的背向散射功率相对变化可以表示为

$$\delta_2 = \frac{P_{bs01_11a}(z_0 - \Delta z) - P_{bs01_11a}(z_0 + \Delta z)}{P_{bs01_11a}(z_0 - \Delta z)} = 1 - 10^{-\Delta_2/10}, \quad (4)$$

式中 $\Delta_2 = -10 \lg \frac{P_{bs01_01a}(z_0 + \Delta z)}{P_{bs01_01a}(z_0 - \Delta z)}$ 。

当 LP_{11a} 模作为激发模时, LP_{11a} 模的背向散射功率相对变化可以表示为

$$\delta_3 = \frac{P_{bs11a_11a}(z_0 - \Delta z) - P_{bs11a_11a}(z_0 + \Delta z)}{P_{bs11a_11a}(z_0 - \Delta z)} = 1 - 10^{-\Delta_3/10}, \quad (5)$$

式中 $\Delta_3 = -10 \lg \frac{P_{bs11a_11a}(z_0 + \Delta z)}{P_{bs11a_11a}(z_0 - \Delta z)}$ 。

将(1)、(2)式代入(3)~(5)式中,可以得到

$$1 - C_{01}^2 - 2(1 + k_{bs11}/k_{bs01}) K_{01_11} C_{XT} C_{01} - 2(k_{bs11}/k_{bs01}) (1 + K_{11a_11b}) C_{XT}^2 - \delta_1 = 0, \quad (6)$$

$$1 - C_{01} C_{11} - \frac{1}{K_{01_11}} [C_{01} + (k_{bs11}/k_{bs01}) C_{11} (1 + K_{11a_11b})] C_{XT} - 2(k_{bs11}/k_{bs01}) C_{XT}^2 - \delta_2 = 0, \quad (7)$$

$$1 - C_{11}^2 - (1 + k_{bs01}/k_{bs11}) K_{01_11} C_{11} C_{XT} - (k_{bs01}/k_{bs11}) C_{XT}^2 - \delta_3 = 0, \quad (8)$$

由(6)~(8)式可知,只要知道 K_{01_11} 、 K_{11a_11b} 、 k_{bs11}/k_{bs01} 、 Δ_1 、 Δ_2 、 Δ_3 这些参数的值,就可以通过求解方程组,得到熔接点处模式耦合值 C_{XT} 。

熔接点处发生轴向偏移的背向瑞利散射曲线如图2所示,图中 z_0 处即为熔接点的位置, Δ_1 、 Δ_2 、 Δ_3 分别代表熔接点处背向散射功率的突变量。图2(a)为 LP_{01} 模作为激发模时获得的 LP_{01} 模、 LP_{11a} 模的背向瑞利散射功率分布图,图2(b)为 LP_{11a} 模作为激发模时获得的 LP_{11a} 模和 LP_{11b} 模的背向瑞利散射功率分布图。

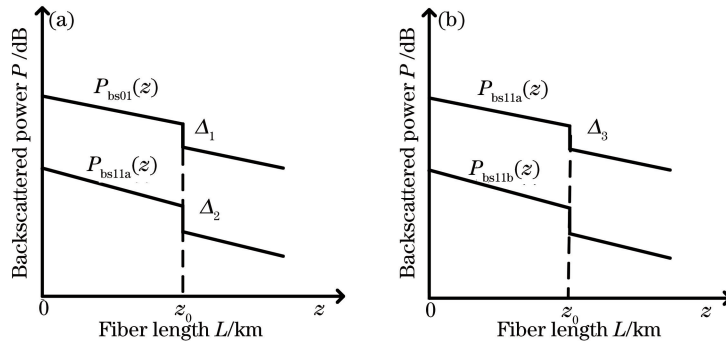


图2 背向瑞利散射功率分布。(a) LP_{01} 模作为激发模; (b) LP_{11a} 模作为激发模

Fig. 2 Rayleigh backscattering power distribution. (a) LP_{01} mode excited; (b) LP_{11a} mode excited

从图2可知, Δ_1 、 Δ_2 、 Δ_3 的值可以通过测量熔接点前后背向散射光功率的突变量求得。由于求得是 k_{bs11}/k_{bs01} 的值,由背向散射系数定义可知 k_{bs11}/k_{bs01} 消去了初始激发功率,所以 k_{bs01} 可以看作 LP_{01} 模为激发模时 LP_{01} 模在 $z=0$ 处的背向散射功率值; k_{bs11} 可以看作 LP_{11} 模作为激发模时 LP_{11} 模在 $z=0$ 处的背向散射

功率; $K_{01,11}$ 是 LP_{01} 模为激发模时光纤 0 km 处 LP_{11} 背向散射功率与 LP_{01} 背向散射功率的差值(dB 为单位); $K_{11a,11b}$ 是 LP_{11a} 模为激发模时光纤 0 km 处 LP_{11b} 背向散射功率与 LP_{11a} 背向散射功率的差值(dB 为单位)。

可见,通过测量少模光纤各个模式的背向瑞利散射曲线,可以得到求解方程(6)~(8)式所需的各个参数,进而求出少模光纤熔接点处模式耦合 C_{XT} 。

3 实验测量系统

本文所建立的少模光纤熔接点处模式耦合测量实验系统如图 3 所示。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、宽度为 300 ns 的脉冲信号,驱动电光调制器(EOM)将分布反馈式(DFB)半导体激光器发出的波长为 1550 nm 的连续光调制为相应的光脉冲信号。调制好的光脉冲信号从 1 口进入光纤环形器并由 2 口输出,然后通过 LP_{01} 口(或 LP_{11a} 或 LP_{11b} 口)进入光子灯笼进行模式转换,输出相应的激发模式 LP_{01} 模(或 LP_{11a} 或 LP_{11b} 模)。激发模式 LP_{01} 模(或 LP_{11a} 或 LP_{11b} 模)注入待测少模光纤(FUT,待测光纤由两段参数相同、长度分别为 0.9 km 和 9.8 km 的 3 模光纤组成,两段少模光纤采用偏芯熔接方式进行熔接),待测光纤中产生的激发模式及耦合模式的背向散射光经光子灯笼进行空间模式分解,通过 2 口进入环形器并由 3 口输出,然后,利用光电探测器进行光电探测得到电信号,再由数字示波器进行高速采样和存储。最后,利用 MATLAB 算法计算得到少模光纤熔接点处的模式耦合大小。考虑系统背向散射信号十分微弱以及测量精度要求,本次实验系统光源采用飞博源公司的 DFB 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。调制器采用 Thorlabs 公司的型号为 LN56S-FC 电光调制器,工作波长为 1525~1605 nm,插入损耗为 4 dB,偏置电压的调节范围为 -8~8 V,输出光功率为 -5 dBm~10 dBm。任意波形发生器采用 RIGOL 公司型号为 DG1032 的发生器,输出频率为 30 MHz,采样率为 200 MSa/s。环形器是从上海瀚宇公司订制的单模光纤环形器,环形器 a、b、c 端口 1 到端口 2 的插入损耗分别为 0.64 dB,0.47 dB,0.67 dB,端口 2 到端口 3 的插入损耗分别为 0.55 dB,0.59 dB,0.46 dB。光电探测器采用飞博源公司的型号为 IAM-6020 的 InGaAs 光电探测器,工作波长为 900~1700 nm,在波长 1550 nm 处电流响应度为 8.5 A/W。示波器使用的是 Lecroy 公司的 SDA 11000,支持 4 个数据通道,最大采样率为 40 GSa/s。

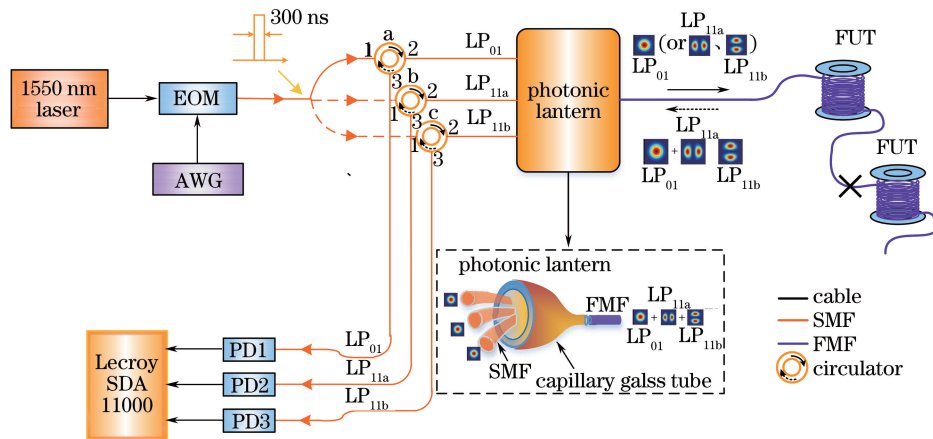


图 3 少模光纤熔接点模式耦合测量实验系统

Fig. 3 Experimental measurement system of mode coupling at a splice point based on few-mode fiber

表 1 少模光纤相关参数

Table 1 Related parameters of few-mode fiber

Parameter	Core diameter / μm	Cladding diameter / μm	Cut-off frequency	Core refractive index	Cladding refractive index
Value	13.938	125	3.71	1.4630	1.4571

本实验中模式转换器和模式解复用器采用的是从 Olkin Optics 公司定制的全光纤光子灯笼。光子灯笼模式转换器/模式解复用器结构如图 3 所示,若干根单模光纤的纤芯被围在一根毛细玻璃管中,毛细玻璃管

的折射率比纤芯折射率略高。在纤芯拉锥过程中,光波最初在单模光纤纤芯中,经过拉锥导引,因纤芯直径逐渐缩小,光波由纤芯导入到包层材料中,形成了新的少模光纤的纤芯,这样一根少模光纤就包含所有单模光纤中的传输信息。光子灯笼的模式选择性是通过控制入射单模光纤的传播常数实现的。其中,简并模的分离是通过控制入射单模光纤的尺寸实现的。光波经过锥形结构时发生模态转换,不同单模光纤中入射的基模会转变为特定的高阶模式,各模式在锥形体的末端处复用并通过少模光纤出射端输出。光子灯笼采用拉锥技术,具有插入损耗低、结构稳定和易于集成等优点,可实现模式转换和复用/解复用功能。实验使用光子灯笼 LP₀₁口、LP_{11a}口和 LP_{11b}口的插入损耗分别为 3.495 dB,1.784 dB,2.654dB。

4 实验结果与分析

首先测量轴向偏移量为 1.5 μm 偏芯熔接时,少模光纤熔接点处模式耦合。图 4 给出了 LP₀₁模为激发模时,LP₀₁模和 LP_{11a}模式的背向瑞利散射功率分布图。图 5 为 LP_{11a}模为激发模时,LP_{11a}和 LP_{11b}模式的背向瑞利散射功率分布图。

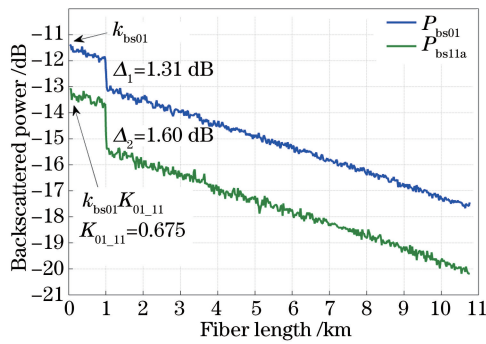


图 4 LP₀₁模为激发模时,LP₀₁、LP_{11a}

模式的背向瑞利散射功率分布($d=1.5\ \mu\text{m}$)

Fig. 4 Backscattering power distribution of the LP₀₁ and LP_{11a} modes with LP₀₁ mode excited ($d=1.5\ \mu\text{m}$)

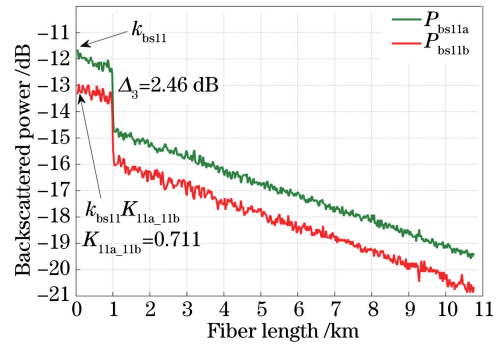


图 5 LP_{11a}模为激发模时,LP_{11a}、LP_{11b}

模式的背向瑞利散射功率分布($d=1.5\ \mu\text{m}$)

Fig. 5 Backscattering power distribution of the LP_{11a} and LP_{11b} modes with LP_{11a} mode excited ($d=1.5\ \mu\text{m}$)

根据熔接点处模式耦合测量原理,由图 4、图 5 测得 k_{bs11}/k_{bs01} 、 K_{01_11} 、 K_{11a_11b} 的值分别为 0.895、0.675、0.711; Δ_1 、 Δ_2 、 Δ_3 分别为 1.31 dB,1.60 dB,2.46 dB,代入(6)~(8)式,求得 $C_{XT} = -14.9$ dB。

改变轴向偏移量为 2.0 μm,重新熔接后,分别测量以 LP₀₁、LP_{11a}模为激发模时少模光纤中各个模式背向瑞利散射功率的分布情况,测量结果如图 6 和图 7 所示。

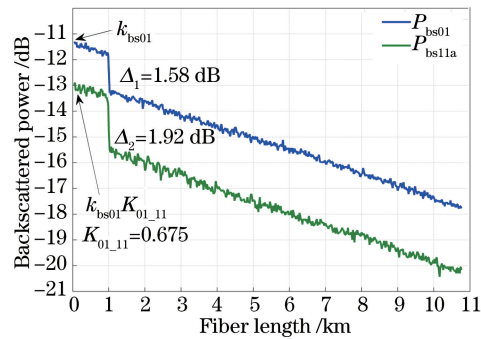


图 6 LP₀₁模为激发模时,LP₀₁、LP_{11a}

模式的背向瑞利散射功率分布($d=2.0\ \mu\text{m}$)

Fig. 6 Backscattering power distribution of the LP₀₁ and LP_{11a} modes with LP₀₁ mode excited ($d=2.0\ \mu\text{m}$)

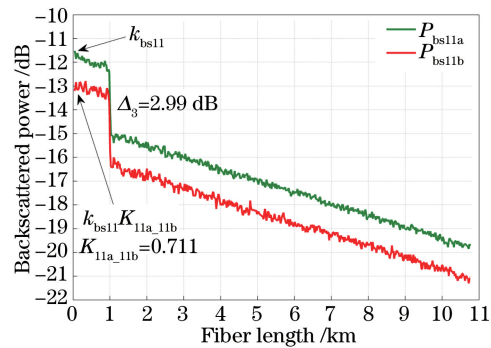


图 7 LP_{11a}模为激发模时,LP_{11a}、LP_{11b}

模式的背向瑞利散射功率分布($d=2.0\ \mu\text{m}$)

Fig. 7 Backscattering power distribution of the LP_{11a} and LP_{11b} modes with LP_{11a} mode excited ($d=2.0\ \mu\text{m}$)

根据熔接点处模式耦合测量原理,测得的 k_{bs11}/k_{bs01} 、 K_{01_11} 、 K_{11a_11b} 的值分别为 0.895、0.675、0.711; Δ_1 、 Δ_2 、 Δ_3 分别为 1.58 dB,1.92 dB,2.99 dB,代入方程,求得 $C_{XT} = -13.9$ dB。实验结果如表 2 所示。

表 2 背向散射法测量少模光纤模式耦合结果

Table 2 Mode-coupling between FMFs measured with backscattering method

$d/\mu\text{m}$	δ_1	δ_2	δ_3	C_{XT} (Present method)
2.0	0.305	0.357	0.498	0.0409 (−13.9 dB)
1.5	0.260	0.308	0.568	0.0327 (−14.9 dB)

本文实验系统测量的背向散射信号极其微弱,易受器件或环境影响而产生误差,主要为单模环形器、光子灯笼各口的插入损耗以及功率突变量的测量误差,光子灯笼本身串扰、外界震动、温度变化以及光纤微弯损耗等因素影响引起的误差。通过对多次测量结果分析,各误差源引起的综合误差约为 ± 0.093 dB。

5 结 论

理论分析了基于背向散射的少模光纤熔接点处模式耦合的测量原理,搭建了一种基于光子灯笼和光纤环形器的少模光纤熔接点处模式耦合测量系统,成功测试了两段 3 模光纤(长度分别为 0.9 km 和 9.8 km)熔接偏移量为 1.5 μm 和 2.0 μm 时熔接点处的模式耦合大小,分别为 −14.9 dB 和 −13.9 dB。该方法对传输系统不具破坏性,且简便易实现,可为评估光纤熔接质量和故障定位提供依据,在少模光纤传输系统测量方面具有较好的应用前景。本文提出的基于背向瑞利散射的少模光纤熔接点处模式耦合测量系统还适用于少模光纤模式耦合测量、少模光纤模式相关损耗测量、少模光纤差分模时延测量以及少模光纤模场直径测量。

参 考 文 献

- [1] Li Chao, Zhao Jian, Wang Wei, *et al.* 4×100 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. 4×100 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 fibers[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] Wei C, Hu J, Menyuk C. Bending-induced mode coupling in chalcogenide negative curvature fibers[J]. Optics Express, 2016, 24(11): 12228.
- [6] Sillard P, Molin D, Bigot-Astruc M, *et al.* Low-differential-mode-group-delay 9-LP-mode fiber [J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(2): 425-430.
- [7] 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.
- [8] Ip E, Milione G, Huang Y K, *et al.* Impact of mode-dependent loss on long-haul transmission systems using few-mode fibers[C]. Optical Fiber Communication Conference, 2016, W4I: W4I.4.
- [9] Jespersen K, Li Z, Gruner-Nielsen L, *et al.* Measuring distributed mode scattering in long few-moded fibers [C]. Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC/NFOEC), 2012 and the National Fiber Optic Engineers Conference. IEEE, 2012: 12760699.
- [10] Fontaine N K. Characterization of space-division multiplexing fibers using swept-wavelength interferometry[C]. Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference, 2015, W4I: W4I.7.
- [11] 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 and Exhibition. IEEE, 2014: 14560413.

-
- [12] Wang Z, Wu H, Hu X, *et al.* Rayleigh scattering in few-mode optical fibers[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 35844.
- [13] 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.
- [14] Barnoski M K, Jensen S M. Fiber waveguides: A novel technique for investigating attenuation characteristics [J]. Applied Optics, 1976, 15(9): 2112-2115.
- [15] 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-Optics Image Science and Vision, 1984, 1(3): 285-292.
- [16] Li A, Hu Q, Che D, *et al.* Measurement of distributed mode coupling in a few-mode fiber using a Brillouin optical time domain reflectometer[C]. European Conference on Optical Communication. IEEE, 2014: 14768350.
- [17] Yoshida M, Hirooka T, Nakazawa M. Mode coupling measurement at a splice point between few-mode fibers using a synchronous multi-channel OTDR[C]. Optical Fiber Communication Conference, 2016, Th1J: Th1J.4.
- [18] 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.