

激光与光电子学进展

基于双向瑞利散射的单模光纤多参数同时测量方法

刘峰*, 史毅, 葛镇昂, 李浩

温州大学电气与电子工程学院, 浙江 温州 325035

摘要 光纤多参数同时测量是加速低损耗、低非线性等光纤研发效率的关键。为此,提出一种基于双向瑞利散射的单模光纤多参数同时测量方法,可实现光纤多参数同时精确测量。基于背向瑞利散射原理建立了多参数同时测量系统,成功测试了 1 km 光纤的模场直径、有效模场面积、纤芯直径、相对折射率差、截止波长、衰减系数等参数的分布特性,其测量值分别为 $9.24\ \mu\text{m}$ 、 $66.22\ \mu\text{m}^2$ 、 $8.28\ \mu\text{m}$ 、 0.323% 、 $1.258\ \mu\text{m}$ 、 $0.196\ \text{dB/km}$,并分别与传统测量方法进行了比较。实验结果表明,所提方法与传统方法测量结果基本一致,但实现了多参数分布测量且测量结果稳定。

关键词 光通信; 瑞利散射; 光纤参数; 同时测量

中图分类号 TN913.7

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP220894

Multi-Parameter Measurement Method of Single Mode Fiber Based on Bidirectional Rayleigh Scattering

Liu Feng*, Shi Yi, Ge Zhen'ang, Li Hao

College of Electrical and Electronic Engineering, Wenzhou University, Wenzhou 325035, Zhejiang, China

Abstract Multi-parameter synchronous measurement of optical fiber is the key to accelerate the rapid development of optical fiber towards the direction of low loss, low nonlinearity, and so on. In this paper, a multi-parameter synchronous measurement method of single-mode fiber based on bidirectional Rayleigh scattering is proposed, which can realize synchronous and accurate measurement of fiber multi-parameter. Based on the principle of Rayleigh backscattering, the optical fiber multi-parameter measurement synchronous measurement system is established, and the distribution of parameters such as mode field diameter, effective mode field area, core diameter, relative refractive index difference, cut-off wavelength, and attenuation coefficient of 1 km optical fiber are successfully tested, and the measured values are $9.24\ \mu\text{m}$, $66.22\ \mu\text{m}^2$, $8.28\ \mu\text{m}$, 0.323% , $1.258\ \mu\text{m}$, and $0.196\ \text{dB/km}$, respectively, and are compared with traditional measurement methods. Experimental results show that the proposed method is basically consistent with the traditional measurement method, and the multi-parameter distribution measurement is achieved and the measurement results are stable.

Key words optical communication; Rayleigh scattering; fiber parameter; synchronous measurement

1 引言

在全球数据流量呈爆发式增长的背景下,发展新传输技术是学术界和工业界竞相研究和角逐的热点,采用高维调制方式改善频谱效率和降低单位比特成本成为目前单模光纤系统扩容的关键^[1-4],这必然对系统光信噪比(OSNR)提出更高的要求,尤其对于长跨距而言,OSNR急剧劣化^[5]。因此,研发低损耗、低非线性的纯硅光纤(PSCF)从而提升 OSNR 成为亟须解决的问题,并且高效、简单、精确且低成本的光纤多

参数同时测量方案也显得极其重要。

目前,针对不同光纤参数测量具有不同的技术方案,如:针对色散测量采用时域法、频域法、背向散射法;光纤损耗利用截断法及背向散射法;有效模场面积及模场直径常采用近场扫描法、远场扫描法、可变孔径法等;折射率分布采用近场扫描、纵向干涉、聚焦法及背向散射法等;光纤的截止波长可以采用传输功率法进行测量等。从已有的研究现状可以看出,目前针对光纤不同参数的测量已有较多报道且测量精度、稳定性均趋近成熟。但是,上述技术方案均是实现对单一

收稿日期: 2022-02-04; 修回日期: 2022-03-09; 录用日期: 2022-03-29; 网络首发日期: 2022-04-10

基金项目: 国家自然科学基金(62105246)、温州市基础性科研项目(G20210010)

通信作者: liufeng@wzu.edu.cn

参量的测量,无法满足多参数同时测量的需求,与此同时,部分测量方法的成本、系统复杂度较高且无法测量参数分布特性等。因此,有必要探寻简单易行且能够实现光纤多参数同时测量的方法。其中,背向散射法作为一种非破坏性测量方法,将窄脉冲光注入到被测光纤中,然后通过测量光纤 LP₀₁ 模式背向瑞利散射及菲涅耳反射光功率,并通过量化分析光纤参数与背向散射幅值分布的关系,实现光纤参量测量,该方法结构简单,实用性强,目前已逐步应用于单模、少模及多芯光纤参数的测量。如 1997 年,日本 NTT 实验室 Kazuhide 等^[6]采用四波长双向光时域反射仪(OTDR)对单模光纤的色散分布进行无损测量,该技术对波分多路复用器(WDM)和有限差分多路复用器(FDM)光通信系统的设计具有一定意义。2006 年,日本大阪府立大学 Ohashi^[7]提出一种基于光时域反射技术的光纤相对折射率测量方法,该方法适用于同一链路不同类型光纤相对折射率差测量。2014 年,日本大阪府立大学 Ohashi 等^[8]报道了基于 OTDR 的多芯光纤有效模场直径、相对折射率差及色散等参数的测量。2016 年,日本 NTT 实验室 Nakamura 等^[9]提出一种基于 OTDR 技术的少模光纤 LP₁₁ 模式模场直径测量。同年,日本大阪府立大学 Ohashi 等^[10]报道了基于双向 OTDR 的两模光纤高阶空间模式的有效模场面积测量。近年来,本课题

组采用 OTDR 技术实现了少模光纤损伤参数模式耦合、差分模式群时延、模型相关损耗等光纤特性参数的同步测量^[11-12]。该方法在光纤参数测量方面具有一定优势,国内外研究学者纷纷致力于光纤特性参数测量这一方面的研究并提出相应的优化方案。

本文基于背向瑞利散射原理,建立了多参数同时测量理论模型,搭建了双向背向瑞利散射多参数同时测量系统,成功实现了 1 km 光纤模场直径、有效模场面积、相对折射率差、截止波长、纤芯直径、衰减系数等多参数的同时测量,实验结果表明,该方法测量结果稳定、可靠性好、操作简单、实用性强,在加快低损耗、低非线性的纯硅芯光纤研发方面具有良好的应用前景。

2 实验原理与装置

图 1 为基于双向瑞利散射的单模光纤多参数同时测量原理图,该方法可用于测量由被测光纤(FUT)和两段参考光纤(光纤 A、B)组成光纤链路的纵向光纤参数分布,具体通过测量并分析光纤双向 LP₀₁ 空间模式背向瑞利散射光功率 $P_{bs}(z)$ 与 $P'_{bs}(L-z)$,即可实现光纤模场直径、有效模场面积、纤芯直径、相对折射率差、截止波长等参数的同时精确测量,其中参考光纤 A、B 参数已知且存在一定差异。

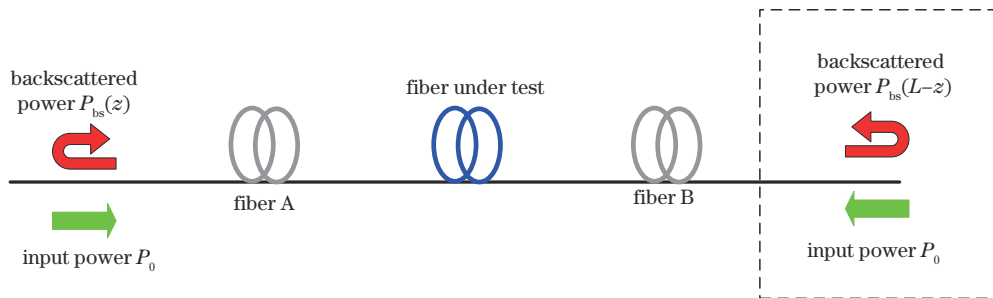


图 1 基于双向瑞利散射的光纤多参数同时测量方法原理图

Fig. 1 Principle diagram of fiber multi-parameter synchronous measurement method based on bidirectional Rayleigh scattering

假设在光纤链路两端注入光纤的脉冲功率为 P_0 , 脉冲宽度为 τ , 速度为 ν , 如图 1 所示, 则光纤链路两端测量到的 LP₀₁ 空间模式背向瑞利散射功率可表示为

$$P_{bs}(z) = P_0 \alpha_s(z) B(z) \frac{\nu\tau}{2} \exp(-2\alpha z), \quad (1)$$

$$P'_{bs}(L-z) = P_0 \alpha_s(z) B(z) \frac{\nu\tau}{2} \exp[-2\alpha(L-z)], \quad (2)$$

式中: $\alpha_s(z)$ 表示背向瑞利散射系数, 其纵向变化可忽略不计, 可看作与距离 z 无关的常数 α_s ; α 为衰减系数; $B(z)$ 为背向捕获率; L 为链路长度。FUT 一端测得背向散射功率 $S_{bs}(z) = 10\log P_{bs}(z) = -2\alpha z + 10\log[P_0 \alpha_s(z) B(z) \nu\tau/2]$, 然后对背向瑞利散射线性拟合, 即可得到光纤衰减系数 α 。FUT 另一端测量可得 $S'_{bs}(z) = 10\log P'_{bs}(z)$, 然后进行半对数处理可得

$$\xi(z) = \frac{S_{bs}(z) + S'_{bs}(L-z)}{2} = 10\log[\alpha_s B(z)] + 10\log(P_0 \frac{\nu\tau}{2}) - 5\log[\exp(2\alpha L)]. \quad (3)$$

通过理论分析可知, 背向散射捕获率 $B(z)$ 由光纤参数确定^[10], 其具体可以表示为

$$B(z) = \frac{3}{2} \cdot \left[\frac{\lambda}{2\pi n_1 w(z)} \right]^2 = \frac{3}{2} \cdot \left[\frac{\lambda \sqrt{2\Delta(z)}}{v_c} \frac{1}{\lambda_c(z)} \frac{a(z)}{w(z)} \right]^2, \quad (4)$$

式中: n_1 为光纤纤芯折射率; $w(z)$ 为模场直径; $\Delta(z)$ 为相对折射率差; $a(z)$ 为纤芯直径; $\lambda_c(z)$ 为截止波长; v_c 为截止频率。将式(4)代入式(3)可得

$$\xi(z) = 10\log(\alpha_s) - 20\log[2w(z)] + \xi_0, \quad (5)$$

式中： $\xi_0 = 10 \log(P_0 \frac{v\tau}{2}) - 5 \log[\exp(2\alpha L)] + 10 \log\left[\frac{3}{2}(\lambda/\pi n_1)^2\right]$, 其值为常数。则由式(5)可得 $\xi(z)$ 在参考光纤 A z_0 处的归一化方程表示为

$$\zeta(z) = \xi(z) - \xi(z_0) = 20 \log \left[\frac{2w(z_0)}{2w(z)} \right]. \quad (6)$$

同理可得, 归一化 $\zeta(z)$ 在参考光纤 B z_1 处的归一化方程表示为

$$\zeta(z_1) = \xi(z_1) - \xi(z_0) = 20 \log \left[\frac{2w(z_0)}{2w(z_1)} \right]. \quad (7)$$

由式(6)与式(7)可得光纤模场直径、有效模场面积、纤芯直径、相对折射率差、截止波长等参数计算模型, 表示为

$$\psi_i(z) = \psi_i(z_0) \left[\frac{\psi_i(z_1)}{\psi_i(z_0)} \right]^{\frac{\zeta(z)}{\zeta(z_1)}}, \quad (8)$$

式中: $\psi_i(z)$ ($i = 1, 2, \dots, 5$) 分别代表被测光纤模场直径 $\psi_1(z)$ 为 $2w(z)$ 、有效模场面积 $\psi_2(z)$ 为 $A_{\text{eff}}(z)$ 、纤芯直径 $\psi_3(z)$ 为 $a(z)$ 、有效折射率差 $\psi_4(z)$ 为 $\Delta(z)$ 以及截止波长 $\psi_5(z)$ 为 $\lambda_c(z)$ 。 $\psi_i(z_0)$ 与 $\psi_i(z_1)$ 分别代表

参考光纤 A、B 相应的参数值。

根据上述构建的光纤多参数综合测量理论模型, 本文搭建了基于双向背向瑞利散射的光纤多参数同时测量系统, 仅通过测量光纤两端背向瑞利散射功率 $P_{\text{bs}}(z)$ 与 $P'_{\text{bs}}(L-z)$, 即可实现多参数同时精确测量, 具体实验系统结构如图 2 所示。首先, 设置信号发生器(SG)输出重复频率为 $f = 10 \text{ kHz}$ 、脉冲宽度为 $\tau = 100 \text{ ns}$ 的脉冲信号, 驱动电光调制器(EOM)将分布式反馈(DFB)半导体激光器发出波长 $\lambda = 1550 \text{ nm}$ 的连续光波调制成为承载相关信息的光脉冲信号, 已调制光脉冲利用光纤环形器的单向传输特性, 单一受激模式 LP_{01} 模式由光纤环形器端口 1 进入光纤环形器并由端口 2 输出, 并由 Port A 端注入被测光纤 FUT。被测光纤 FUT 中受激模式 LP_{01} 的背向瑞利散射光由端口 2 返回光纤环形器并由端口 3 输出进入光电探测器(PD)进行光电转换, 并将探测到的电信号通过示波器进行数据采样平均处理。然后, 切换至 Port B 端口, 同理测得由 FUT 另一端测量得到的背向瑞利散射曲线。最后, 对采集的双向背向瑞利散射功率进行数字信号处理, 即可实现光纤多参数的同时测量。

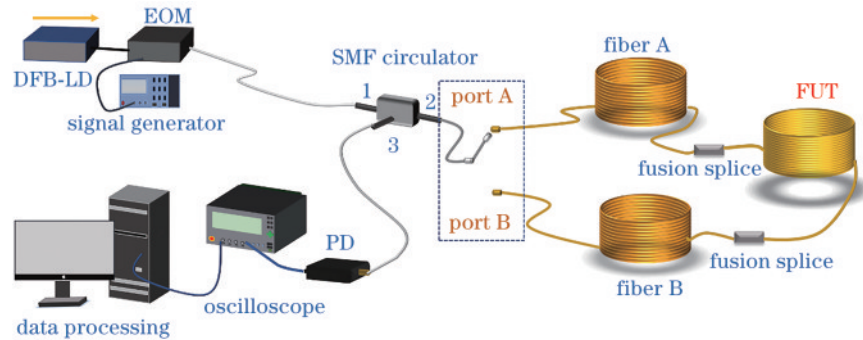


图 2 基于双向瑞利散射的光纤多参数同时测量系统

Fig. 2 Experimental setup of multi-parameter synchronous measurement system for optical fiber based on bidirectional Rayleigh scattering

3 实验结果与分析

实验中采用长度为 1 km 的单模光纤作为被测光纤, 两段 2 km 光纤 A 和 B 作为参考光纤, 表 1 给出了参考和被测光纤的相关参数, 其参数由传统测量方法测得。设置脉宽为 100 ns、重复频率为 10 kHz 的光脉冲信号, 分别经 A 端和 B 端注入被测光纤, 获得背向瑞利散射功率 $P_{\text{bs}}(z)$ 与 $P'_{\text{bs}}(L-z)$, 如图 3(a) 所示, 然后, 根据式(3)可得光纤 LP_{01} 模式背向瑞利散射功率半对数 $\xi(z)$ 分布, 如图 3(b) 所示。

根据所构建的理论模型[式(8)], 并结合图 3 测量结果, 可分别测得被测光纤 FUT 模场直径 $2w(z)$ 、有效模场面积 $A_{\text{eff}}(z)$ 、有效折射率差 $\Delta(z)$ 、截止波长 $\lambda_c(z)$ 及纤芯直径 $a(z)$, 光纤参数测量分布如图 4 所示。图 4(a) 为被测光纤在 1550 nm 波段处的模场直径

表 1 参考光纤 A、B 及被测光纤参数

Table 1 Parameters of reference fiber A and fiber B, and fiber under test

Fiber parameter	Fiber A	FUT	Fiber B
Attenuation coefficient / ($\text{dB} \cdot \text{km}^{-1}$)	0.195	0.198	0.193
Mode fiber radius $w / \mu\text{m}$	10.20	9.21	9.88
Effective mode field area $A_{\text{eff}} / \mu\text{m}^2$	81.6	66.4	76.3
Core diameter $a / \mu\text{m}$	8.25	8.25	8.28
Relative refractive index difference, $\Delta / \%$	0.325	0.329	0.323
Cutoff wavelength $\lambda_c / \mu\text{m}$	1.255	1.255	1.258

分布情况, 通过对测量分布结果平均处理可得模场直径测量结果为 $9.24 \mu\text{m}$, 实验结果与变孔径技术测量值 $9.21 \mu\text{m}$ 基本一致, 如表 1 所示。

图 4(b) 给出了有效模场面积 $A_{\text{eff}}(z)$ 随被测光纤

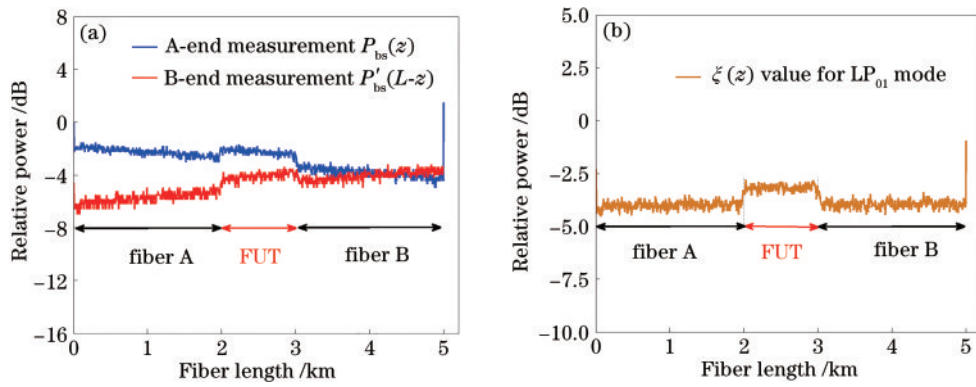


图 3 LP_{01} 模式背向散射功率半对数 $\xi(z)$ 值测量结果。(a) 双端背向散射功率测量结果; (b) 由图 (a) 处理获得的 LP_{01} 模式 $\xi(z)$ 值
 Fig. 3 Measurement results of semi-logarithmic value $\xi(z)$ of backscattering power in LP_{01} mode. (a) Measurement results of double-end backscattering power; (b) LP_{01} mode $\xi(z)$ value obtained from processing in Fig. (a)

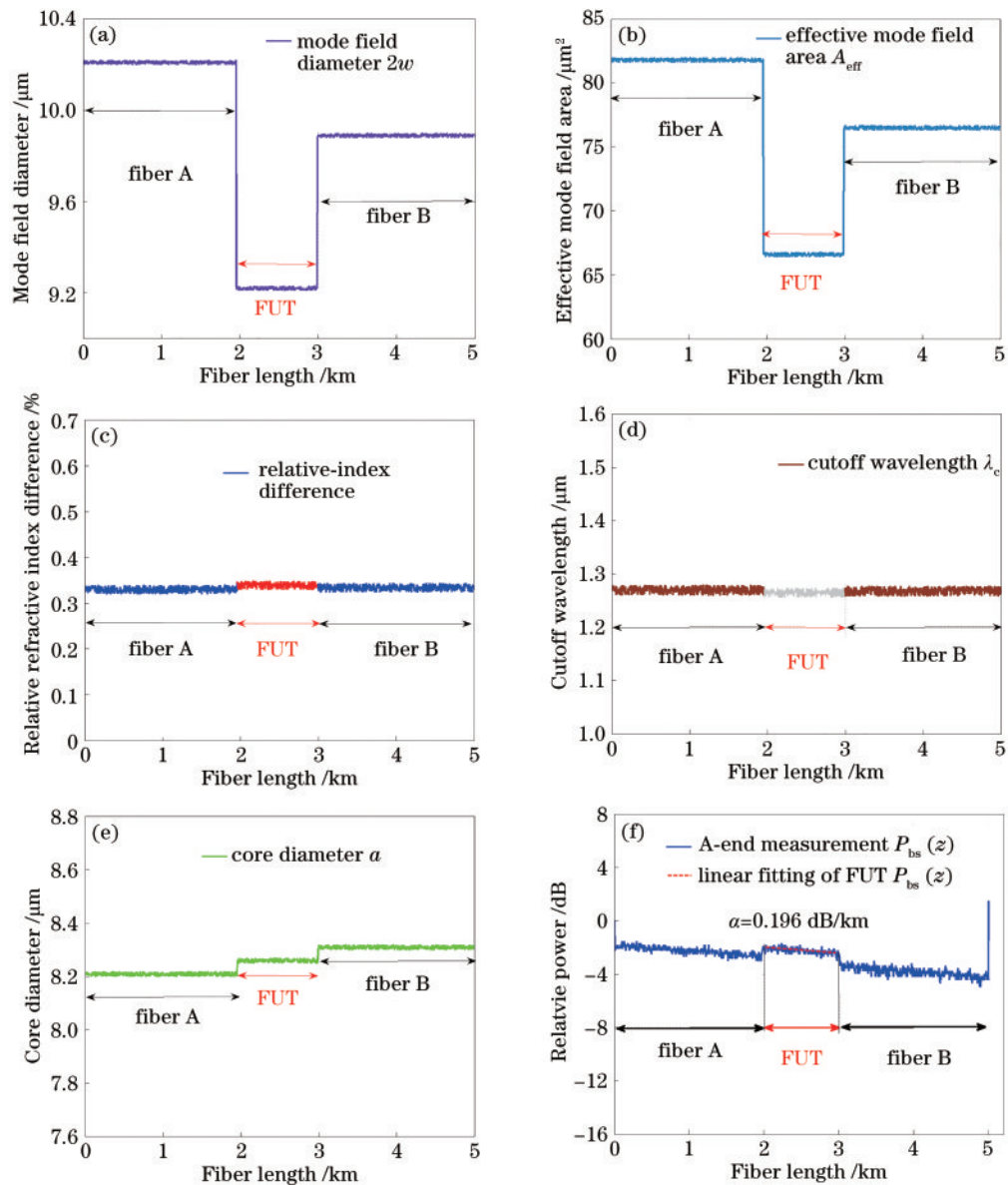


图 4 光纤各参数测量分布结果。(a) 模场直径; (b) 有效模场面积; (c) 相对折射率差; (d) 截止波长; (e) 纤芯直径; (f) 衰减系数
 Fig. 4 Measurement distribution results of optical fiber parameters. (a) Mode field diameter; (b) effective mode field area; (c) relative refractive index difference; (d) cutoff wavelength; (e) core diameter; (f) attenuation coefficient

FUT 长度的分布情况,在 1.55 μm 波长处测量均值为 66.22 μm^2 ,估算的有效模场面积与传统测量方法得到的有效面积 66.4 μm^2 吻合较好,如表 1 所示。同理,我们对光纤有效折射率差 $\Delta(z)$ 进行了测量分析,测量结果如图 4(c) 所示,测量值为 0.323%,该方法实现了光纤折射率的分布测量,且测量结果与传统测量方法结果基本一致。

接下来,针对光纤截止波长 $\lambda_c(z)$ 、纤芯直径 $a(z)$ 及衰减系数 α 进行了测量分析,测量结果分别如图 4(d)~(f) 所示,其在 1550 nm 波段测量结果分别为 8.28 μm 、1.258 μm 及 0.196 dB/km。同时与传统测量结果进行了对比分析,测量结果基本吻合,如表 1 所示,进一步说明了本文所提方案的可行性。本文采用的被测光纤与参考光纤参数偏差较小,导致被测光纤测量结果与参考光纤相应参数分布曲线区分度较低。同时,本实验采用激光器为单一波长,涉及光纤色散相关参数需要多波长实验条件,进而本文未对光纤色散进行展开测量。

4 结 论

本文提出并实验验证了基于双向瑞利散射的光纤多参数同时测量方法,解决了单一参数测量、系统复杂度及成本较高等问题。实验搭建了双向瑞利散射光纤多参数同时测量系统,对 1 km 光纤 τ_w 、 A_{eff} 、 a 、 Δ 、 λ_c 及 α 参数分布进行了同时测量,并将测试结果与传统光纤测量结果进行分别比较。结果表明,测试结果与传统方法测量基本一致,但是该方法实现了多参数的同时测量且不具破坏性,简便易实现,成本低。为评估光纤质量提供可靠依据,在加快低损耗、低非线性的纯硅芯光纤研发方面具有良好的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Rademacher G, Puttnam B J, Luis R S, et al. 10.66 peta-bit/s transmission over a 38-core-three-mode fiber[C]//2020 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), March 8-12, 2020, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2020.
- [2] 涂佳静, 李朝晖. 空分复用光纤研究综述[J]. 光学学报, 2021, 41(1): 0106003.
Tu J J, Li Z H. Review of space division multiplexing fibers[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(1): 0106003.

- [3] Puttnam B J, Luis R S, Rademacher G, et al. 0.61 Pb/s S, C, and L-band transmission in a 125 μm diameter 4-core fiber using a single wideband comb source[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(4): 1027-1032.
- [4] 裴丽, 李祉祺, 王建帅, 等. 空分复用光纤放大器增益均衡技术研究进展[J]. 光学学报, 2021, 41(1): 0106001.
Pei L, Li Z Q, Wang J S, et al. Review on gain equalization technology of fiber amplifier using space division multiplexing[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(1): 0106001.
- [5] Yamamoto Y, Kawaguchi Y, Hirano M. Low-loss and low-nonlinearity pure-silica-core fiber for C- and L-band broadband transmission[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(2): 321-326.
- [6] Kazuhide N, Masaharu O, Mitsuhiro T. Chromatic dispersion distribution measurement along a single-mode optical fiber[J]. Journal of Lightwave Technol, 1997, 15(7): 1095-1101.
- [7] Ohashi M. Novel OTDR technique for measuring relative-index differences of fiber links[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2006, 18(24): 2584-2586.
- [8] Ohashi M, Miyoshi Y, Kubota H, et al. Longitudinal fiber parameter measurements of multi-core fiber using OTDR[J]. Optics Express, 2014, 22(24): 30137-30147.
- [9] Nakamura A, Okamoto K, Koshikiya Y, et al. Effective mode field diameter for LP11 mode and its measurement technique[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(22): 2553-2556.
- [10] Ohashi M, Asuka S, Miyoshi Y. Effective area Measurement of two-mode fiber using bidirectional OTDR technique[C]//2016 21st OptoElectronics and Communications Conference (OECC) held jointly with 2016 International Conference on Photonics in Switching (PS), July 3-7, 2016, Niigata, Japan. New York: IEEE Press, 2016.
- [11] 陈威成, 胡贵军, 刘峰, 等. 少模光纤熔接点处模式耦合测量[J]. 光学学报, 2017, 37(12): 1206005.
Chen W C, Hu G J, Liu F, et al. Measurement of mode coupling at a splice point between few-mode fiber[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(12): 1206005.
- [12] 陈翠光, 胡贵军, 刘峰, 等. 基于背向瑞利散射的少模光纤模式耦合测量[J]. 中国激光, 2017, 44(8): 0806002.
Chen C G, Hu G J, Liu F, et al. Measurement of mode coupling in few-mode fiber based on Rayleigh backscattering[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(8): 0806002.