

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2513940

空分复用光纤及器件的测试技术研究进展综述^{*}

王慧慧, 唐苗苗, 刘亚平, 杨志群, 张林

(天津大学精密测试技术及仪器全国重点实验室 天津 300072)

摘要:随着5G时代的到来,现有单模光纤通信网络的容量正逼近其香农极限,难以满足呈指数级增长的网络带宽需求。为突破现有技术瓶颈,基于空间维度拓展的空分复用技术应运而生。该技术通过利用多模光纤、少模光纤、多芯光纤甚至多芯少模光纤中的多个空间信道使单根光纤的传输容量实现数量级提升,同时凭借高空间利用率来有效降低光纤通信系统的尺寸和成本。除了在光纤通信领域作为扩容的新突破口,空分复用技术还为光纤传感领域提供了光纤多维感知的思路,同时在成像领域助力分辨率的提升和增强成像系统的柔性。然而,受工艺缺陷的影响,空分复用光纤和器件中各信道之间容易相互干扰并产生信道差异,导致模式串扰、芯间串扰及模式相关损耗等问题,使空分复用系统的性能提升面临严峻挑战。为确保空分复用光纤及器件的性能达到预期标准,研发高精度表征测试系统尤为重要。本研究系统地介绍了空分复用光纤及其核心器件的关键参数,重点评述了当前主流测试技术,包括多通道光时域反射技术、空间频谱解析技术、固定分析仪技术、相干光频域反射技术、波长扫描干涉技术以及离轴数字全息技术。不同的测试技术在可测对象、参数范围及应用场景上各有侧重。本研究首次系统地总结各项测试技术的优缺点和适用范围,为空分复用待测物的测试方案选择提供依据,并对空分复用测试技术未来的发展提出了展望。

关键词:多芯光纤;少模光纤;多模光纤;空分复用;测试技术;光通信;传感;成像

中图分类号: TH744 TN929.1 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4035

Advances in measurement techniques for space-division multiplexing fibers and devices: A review

Wang Huihui, Tang Miaomiao, Liu Yaping, Yang Zhiqun, Zhang Lin

(State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: With the advent of the 5G era, the capacity of existing single-mode optical fiber communication networks is approaching the Shannon limit, making it increasingly difficult to meet the rapidly growing demand for network bandwidth. To address this challenge, space-division multiplexing (SDM) technology-based on expanding the spatial dimension-has emerged as a promising solution. By multiplexing spatial channels within multimode fibers, few-mode fibers, multi-core fibers, or few-mode multi-core fibers, SDM enables an order-of-magnitude increase in transmission capacity per fiber. Simultaneously, it significantly reduces system footprint and deployment costs through efficient spatial resource utilization. Beyond its transformative role in expanding optical communication capacity, SDM has also introduced new paradigms in multidimensional fiber-optic sensing and catalyzed breakthroughs in high-resolution imaging and system flexibility. However, practical implementation of SDM systems is challenged by mode crosstalk, inter-core crosstalk, and mode-dependent loss—mainly arising from fiber and component fabrication imperfections. These factors can lead to severe inter-channel interference and degradation of overall system performance. To ensure that SDM fibers and devices meet stringent performance requirements, the development of high-precision characterization and testing systems is essential. This paper identifies the key parameters for both SDM fibers and associated devices, and provides a comprehensive review of current mainstream testing techniques, including multi-channel optical time domain reflectometry, spatially and spectrally resolved imaging, fixed analyzer methods, coherent optical frequency domain reflectometry, swept-wavelength interferometry, and off-axis digital holography. Each technique exhibits unique advantages in terms of measurable targets, parameter coverage, and application scenarios. This is the first review to systematically

compare the strengths, limitations, and suitability of various SDM testing technologies, offering practical guidance for selecting appropriate testing strategies for SDM devices. Finally, the paper presents an outlook on the future development trends of SDM characterization and testing technologies.

Keywords: multi-core fiber; few-mode fiber; multi-mode fiber; space-division multiplexing; testing technology; optical communication; sensing; imaging

0 引言

“大数据”、大规模社交网络、实时游戏、高清视频流以及其它宽带应用的兴起,使得对网络容量的需求不断提高^[1]。然而,传统单模光纤通信系统的容量正逐渐逼近非线性香农极限^[2],未来将难以满足通信网络日益增长的容量需求。为了应对这一容量危机,研究人员开展了大量探索工作^[3]。其中,空间维度作为单根光纤未被充分开发的最后一个信息复用维度,引起了广泛关注,空分复用技术应运而生,并成为下一代光通信领域的核心研究方向^[4]。空分复用光纤主要包含多芯光纤^[5]、少模光纤^[6-7]和多模光纤^[8]。近年来,除了在光通信领域取得突破性进展外,空分复用技术也正逐步拓展至其它新技术领域。例如,在光纤传感领域^[9-11],通过利用多芯光纤或少模光纤的多个空间信道,能够实现多维感知或同时获取多路信息的目标^[12-13];在生物医学成像^[14-15]中,该技术能够多角度、多视角地采集数据,从而提高图像的景深、对比度和分辨率^[16-17]。这些应用进一步彰显了空分复用技术广泛的应用价值。然而,由于制备工艺偏差和环境扰动的影响,空分复用光纤及相关器件的空间信道之间会产生耦合效应^[8,18]和信道性能差异,会进一步引发模式相关损耗^[19]、芯间串扰^[20]等,从而导致系统传输容量下降。在空分复用技术出现之前,传统单模光纤系统仅支持单一空间信道,主要关注衰减、色散、非线性以及偏振模式色散等参数,但空分复用光纤及器件具备多个空间信道,上述待测的关键物理参数的空间信道依赖性使得待测参数数量显著增加,而传统单通道测试设备难以满足测试需求。为此,需开发同时表征多个空间信道参数的高精度测试系统,以应对其复杂的测试要求。此外,空分复用光纤对纤芯尺寸等几何参数的变化更加敏感,工艺误差对性能的影响显著增大。因此,研发高精度的表征测试系统对于确保空分复用光纤及器件的设计迭代和制备工艺优化具有至关重要的意义^[21]。

近年来,国内外众多研究人员针对空分复用光纤及器件的高精度表征技术开展了广泛研究,并取得了一定进展,新一代空分复用测试仪器正在推向国际市场^[22]。然而,这些表征技术各自基于不同的原理,适用场景也存在一定差异,且大多数技术仅能测试光纤或器件的单一参数,整体上较为分散,至今尚未有人对其进行系统化总

结。本研究首次系统总结了各项测试技术的优缺点及适用范围,为空分复用光纤或器件的测试方案选择提供依据,促进多参数表征集成化发展,提升空分复用光纤及器件在实际应用中的性能,为相关领域的技术创新和产业化提供新思路与支持。为此,本研究首先介绍空分复用光纤及器件的关键参数;随后系统评述现有表征技术,列表总结其特征;最后,提出研制国产空分复用综合表征平台的展望,并探讨实现该目标面临的技术挑战。

1 空分复用光纤与器件

空分复用光纤主要包括多模光纤、少模光纤和多芯光纤3种类型。空分复用关键器件主要涵盖模式复用/解复用器、扇入扇出器等无源器件,以及光纤放大器等有源器件。光纤及器件的性能决定了空分复用系统传输的容量、可靠性和传输效率。因此,在深入分析具体的表征技术之前,有必要先对空分复用光纤和器件的关键参数进行梳理,以明确表征需求。

1.1 空分复用光纤类型及关键参数

1) 多模光纤与少模光纤

多模光纤是一种支持数十种线性偏振(linear polarization, LP)模式传播的光纤类型,能够在短距离内实现高效传输,图1展示了这些模式的光场分布示意图^[23]。然而,多模光纤具有较高的模式色散和模式串扰,难以实现多个模式的长距离传输,通常需要在接收端通过大规模多输入多输出数字信号处理算法来补偿这些损伤。2015年美国贝尔实验室的Fontaine等^[23]利用30×30的多输入多输出技术,实现了距离为22.8 km的30模光纤信号传输。为了进一步提升传输性能,后续研究人员提出了少模光纤^[24],其保留了多模光纤部分特性的同时,通过限制传输LP模式的数量^[25-26],显著减轻了大规模多输入多输出数字信号处理的负担。模式数量的减少降低了光信号路径的差异和模式色散,支持更长距离的高速传输。

与单模光纤相比,多模光纤和少模光纤显著提升了传输容量,但同时也带来了复杂的、不利的耦合相关效应。其关键参数包括长度、衰减、差分模式群时延、多径干涉、模式相关损耗以及模式耦合,如表1所示,描述了产生这些关键的待测参数的物理机制以及对应的影响。

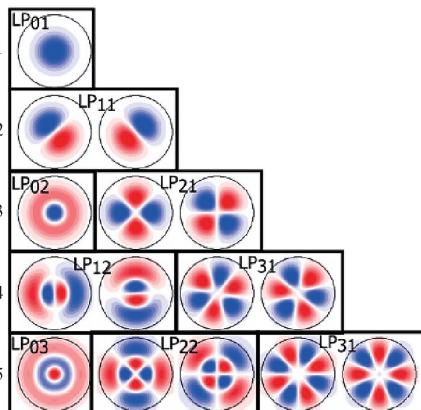
图 1 模分复用系统中 LP 模式光场分布^[23]

Fig. 1 Mode field distributions in LP-mode-based mode-division multiplexing

表 1 多模光纤与少模光纤的关键参数

Table 1 Key parameters of multimode fibers and few-mode fibers

关键参数	物理机制	影响
光纤长度/m	-	信号衰减
衰减 ^[27] /(dB·km ⁻¹)	吸收损耗, 弯曲损耗, 瑞利散射	信噪比降低
模式相关损耗 ^[8,28-29] /dB	各模式损耗差异	传输距离受限
差分模式群时延 ^[30-32] /(ps·km ⁻¹)	各模式群速度差异	多输入多输出均衡的复杂度提高
模式耦合 ^[27,33] /dB	外界扰动, 制造缺陷	信噪比降低
多径干涉 ^[34-35] /dB	模式耦合	脉冲展宽, 误码率升高

2) 多芯光纤

多芯光纤是一种在单根光纤包层内集成多个纤芯的光纤类型, 每个纤芯能够各自携带独立的信息, 图 2 展示了若干多芯光纤的横截面结构图^[36-45]。多芯光纤可以实现每秒高达 Pbits 的传输容量^[4], 其衰减特性与普通单模光纤相近^[46-47], 因此在替换现有系统时不需要增加放大器的数目。多芯光纤有两种类型: 弱耦合多芯光纤 (uncoupled multi-core fiber, UC-MCF) 和强耦合多芯光纤 (coupled multi-core fiber, C-MCF)。在 UC-MCF 的结构设计中, 为了有效抑制芯间耦合, 纤芯间距必须大于 40 μm^[48]。而 C-MCF 的结构设计中, 纤芯间距小于 40 μm, 随着纤芯间减小, 耦合强度逐渐增强, 空间模色散得以降低^[49]。另外, 基于多芯光纤和少模光纤组合的多芯少模光纤(一般为 UC-MCF), 能够进一步将传输容量提高两个数量级, 成为一种有潜力的光纤类型, 2024 年 Xu 等^[50]通过 19 芯 10 模光纤实现了 190 个光信道的同时传输。

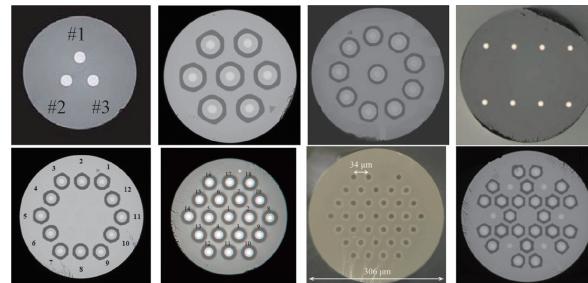
图 2 常见的多芯光纤横截面^[36-45]

Fig. 2 Cross-sectional diagrams of common multi-core fibers

不同的多芯光纤在用途和性能方面有所差异: 多芯少模光纤具备少模光纤的所有关键参数; UC-MCF 的关键参数包括长度、衰减以及芯间耦合, C-MCF 的关键参数包括长度、衰减和空间模式色散。除了与少模光纤重合的参数, 其余参数如表 2 所示。

表 2 多芯光纤的关键参数

Table 2 Key parameters of multi-core fibers

关键参数	物理机制	影响
芯间耦合 ^[51-52] / dB	纤芯的轮廓和排列, 弯曲	传输容量受限、信噪比降低 (UC-MCF)
空间模式色散 ^[53-54] / (ps/√km)	超模群速度差异	数字信号处理算法复杂度升高 (C-MCF)

1.2 空分复用器件及关键参数

1) 模式复用器与解复用器

模式复用器与解复用器是空分复用技术中的核心器件^[55-56], 其功能是将 N 个单模光纤的输入信号高效打入到少模光纤或多模光纤的 N 个独立模式信道中, 经过光纤传输后, 再将这些模式信道的信号解复用到 N 个单模光纤上。图 3 为常见的模式复用器示意图, 主要分为光子灯笼^[56-57]和多平面光转换器^[53-54]。

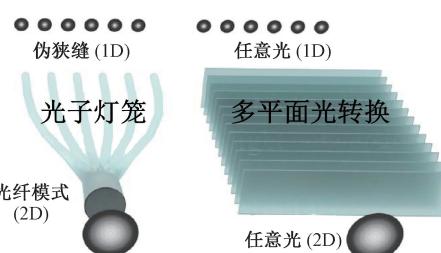
图 3 典型模式复用器^[51]

Fig. 3 Typical mode multiplexer

光子灯笼是一种基于锥形结构的器件, 其作用是实现光在单模波导阵列与多模波导之间的耦合。单模阵列

的几何尺度、折射率分布、锥形过渡区长度、工作波长、毛细管材质及锥度比均会影响整体的模式转换效率。多平面光转换器是一种通过多个相位板对光束进行逐级调制的模式复用器,其仅需要较少的相位平面即可实现任意的空间变换,具有高度灵活性^[58]。Fontaine 等^[59]成功利用 7 个相位板实现了大于 200 个模式的复用。

模式复用器的关键参数包括插入损耗、模式耦合、模式相关损耗以及模式选择性。其中,除模式选择性外,其余关键参数与上文所述空分复用光纤基本一致。模式选择性是模式复用器的特有关键参数,被定义为激发的目标模式与其他模式的总功率之比^[60]。

2) 扇入与扇出

扇入/扇出(fan-in/fan-out, FIFO)是多芯光纤与单模光纤连接的核心复用器件。目前,FIFO 的类型主要有聚合物波导型^[61-62]、自由空间透镜型^[63]、光纤束型^[64]以及熔融拉锥型^[65]等。这些技术各具特点,适配不同的应用场景。例如,聚合物波导型 FIFO 便于集成,自由空间透镜型 FIFO 适用于高精度耦合,光纤束型 FIFO 制造简便,熔融拉锥型 FIFO 具有低损耗的特征。FIFO 的关键参数包括插入损耗、芯间耦合^[66]、回波损耗^[65],这些参数直接决定了扇入扇出在大容量光通信系统中的可靠性。如图 4 所示为典型的扇入扇出器件。

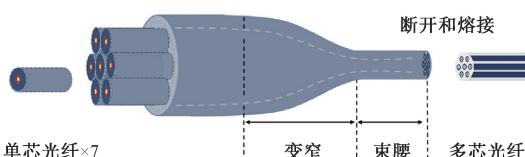


图 4 典型扇入扇出器件^[61]

Fig. 4 Typical FIFO device

3) 放大器

在空分复用系统中,放大器主要分为少模放大器^[67-68]和多芯放大器^[69]两类。少模放大器是一种能够同时放大多个 LP 模式的器件,在补偿链路模式损耗方面起到了至关重要的作用。少模放大器的关键参数包括模式增益、噪声系数以及差分模式增益,其中差分模式增益为最高增益模式与最低增益模式之间的增益差,直接决定了长距离传输之后的信道信噪比差异^[67-68]。因此,少模放大器的模式增益均衡是一项长期的研究课题,对放大器中差分模式增益的表征也成为系统性能评估中的一项重点工作^[69]。

多芯放大器分为纤芯泵浦和包层泵浦两类^[70]。包层泵浦放大器随着纤芯数增加可显著提升效率,而纤芯泵浦放大器虽具有功率效率高、可独立调节单芯增益等优点,但相较于单芯放大器相比并无明显性能提升,应用

吸引力较低。多芯放大器的关键参数包括增益、噪声系数、芯间耦合(常见于弱耦合多芯放大器)和差分模式增益(常见于强耦合多芯放大器^[71])。

2 空分复用光纤及器件的主流测量技术

近年来,空分复用光纤及器件的高精度测量技术不断涌现,本章将系统地介绍几种当前主流的测量技术,包括多通道光时域反射仪(optical time-domain reflectometry, OTDR)技术,用于测量光纤长度、模式耦合及芯间耦合;空间频谱解析技术,用于检测多径干涉与差分模式群时延;固定分析仪技术和相干光频域反射技术,用于测量强耦合多芯光纤的空间模式色散。此外,传输矩阵是一种最全面的测量手段,描述了每个输入模式耦合到每个输出模式的过程。有 2 种提取空分复用光纤或器件传输矩阵的技术,即:波长扫描干涉技术和离轴数字全息技术。综上,这些测量技术构成了空分复用光纤及器件性能评估的坚实框架,为大容量光通信传输提供重要支持。

2.1 多通道光时域反射仪技术

OTDR 技术利用后向瑞利散射光的信号判断光纤长度、衰减、连接点质量和故障位置^[72]。1976 年 Personick^[73]首次提出 OTDR 技术,通过光脉冲的往返时间计算光纤长度,如式(1)所示。

$$L = \frac{c \times t}{2n} \quad (1)$$

式中: L 为光纤长度; c 为光速; t 为传输时间; n 为光纤折射率。然而,对于具备多个空间路径的空分复用光纤,各路径间存在相互耦合,后向瑞利散射光还能揭示模式耦合和芯间耦合的信息,此时需要多通道 OTDR^[74]进行测量。实验原理如图 5 所示:在待测少模光纤中输入 LP_{01} 模式,通过同步多通道 OTDR 的端口分别探测后向瑞利散射光中的 LP_{01} 模式和 LP_{11} 模式的能量,计算后向瑞利散射光信号中 LP_{01} 模式与 LP_{11} 模式之间的能量比值,即可得到沿待测少模光纤的 LP_{01} 模式与 LP_{11} 模式之间的耦合分布情况。

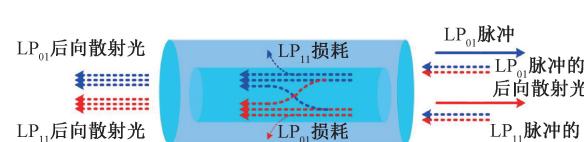


图 5 OTDR 测模式耦合的原理^[74]

Fig. 5 Principle of OTDR-based mode coupling measurement

2014 年 Nakazawa 等^[75]首次采用同步多通道 OTDR 技术对一段长度为 5.9 km 的三模光纤的模式耦合分布

进行测量。该系统具备 40 dB 的动态范围和 10 m 的空间分辨率。实验装置如图 6 所示。多通道 OTDR 的波长设置为 1 550 nm, 从通道 1 发出脉冲宽度为 100 ns 的脉冲光, 经模式耦合器注入到 LP₀₁ 模式。随后, 通过 3 个通道同步检测少模光纤的 3 个模式的后向散射光信号(包括未主动激发的高阶模)。计算后向散射光中高阶模和 LP₀₁ 模式的功率比值得出模式耦合系数。为提升测量动态范围并减小盲区影响, 系统中加入了光隔离装置, 有效抑制了光纤末端菲涅尔反射的干扰。2016 年 Yoshida 等^[76]沿用此同步多通道 OTDR 系统, 测试了少模光纤其中熔接点处的模式耦合特性, 所得结果与传统透射法的一致。

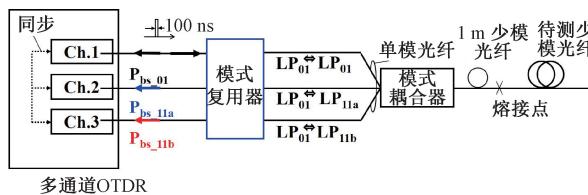


图 6 多通道 OTDR 测量少模光纤模式耦合的实验装置^[77]

Fig. 6 Experimental setup of multi-channel OTDR for mode coupling measurement along a few-mode fiber

在国内, 2016 年 Wang 等^[78]通过建立数学模型深入分析了少模光纤中后向瑞利散射的功率分布规律, 通过搭建多通道 OTDR 系统对一段 3 km 的三模光纤进行实验测试验证了该分布规律。2018 年, Liu 等^[79]基于 OTDR 技术, 结合一对光子灯笼和少模光纤环形器, 有效解决了光纤前端的菲涅尔反射引发的盲区问题, 显著提升了少模光纤的模式耦合测量精度, 实现了对不同类型光纤模式耦合分布式的精确测量。2022 年 Wang 等^[80]进一步优化了这一方法, 通过高纯度的模式耦合器将信号光注入到待测少模光纤中, 精确估算了长度为 6 km 的光纤熔接点处各模式的功率损耗特性。

多通道 OTDR 亦可用于多芯光纤中纤芯间耦合的分布式测量。2012 年 Nakazawa 等^[81]提出了一种 7 通道的 OTDR 技术, 成功实现了对长度为 2.9 km 的 7 芯光纤芯间耦合的分布式表征, 具有高达 50 dB 的动态范围和 100 m 的空间分辨率, 实验装置示意图如图 7 所示。

类似于前文中少模光纤模式耦合的测试, 首先通过纤芯耦合器将信号光打入中间纤芯, 同步接收所有纤芯的后向瑞利散射信号, 然后计算能量比值得到芯间耦合。该技术不仅证明了芯间耦合沿光纤轴向的非均匀分布, 还发现了耦合系数变化与多芯光纤包层直径之间的显著相关性, 为多芯光纤性能的提升提供了重要依据。

在此实验架构的基础上, 2013 年 Yoshida 等^[82]引入光放大器和光掩模装置, 将同步多通道 OTDR 系统的动

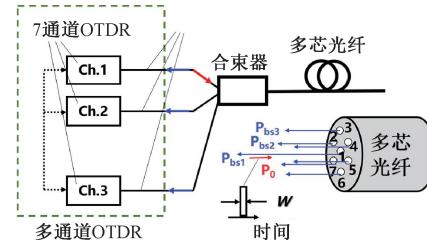


图 7 多通道 OTDR 表征多芯光纤芯间耦合的实验装置^[75]

Fig. 7 Experimental setup of multi-channel OTDR for mode coupling measurement along a multi-core fiber

态范围大幅提升了 20 dB, 成功表征了长度为 10 km 的多芯光纤的芯间耦合。2022 年 Nakagawa 等^[20]在传统 OTDR 基础上, 利用纤芯的回环和双向 OTDR 测量的方法, 同时表征了多芯光纤的芯间耦合和衰减。同年, Kobayashi 等^[83]利用多通道 OTDR 对已铺设的 2 芯光纤进行耦合测量, 有效评估了耦合与弯曲半径的关系。2025 年 Zhao 等^[84]通过单模光纤桥接多芯光纤的始端, 形成多个光纤环回, 通过 OTDR 测试了 41 km 的 7 芯光纤的纤芯耦合。

2.2 空间频谱解析技术

空间频谱解析技术(spatially and spectrally resolved imaging, S²)是由 Nicholson 等^[35]于 2008 年提出的一种大模场光纤表征方法, 用于从空间和光谱两个维度表征光纤中模式的差分模式群时延和多径干涉。该技术通过分析各模式间产生的拍频信号提取差分模式群时延, 实验系统如图 8 所示。将宽带光源发出的光注入待测的大模场光纤中, 出射光经过空间透镜组建的放大系统后, 进入一根楔形单模光纤中。该单模光纤的一端连接光谱仪, 另一端固定在位移台上。通过计算机控制位移台扫描, 能够获取相面上任意点的光谱信息。

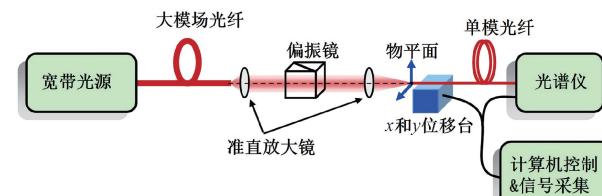


图 8 S² 测试系统实验装置^[35]

Fig. 8 Experimental setup of the S² test system

在少模光纤的出射端面, 光强可表示为:

$$I = I_{01} |\psi_{01}(x, y)|^2 +$$

$$2\text{Re}\{A_{01}A_{mn}^*\psi_{01}(x, y)\psi_{mn}^*(x, y)\} \cos(\Delta\omega \times \Delta\tau_{mn} + \Delta\phi_{mn}) \quad (2)$$

式中: I_{01} 代表 LP₀₁ 模式的光强; $\psi_{01}(x, y)$ 代表 LP₀₁ 的光场分布; m 和 n 代表线性偏振模的模式序数; $\psi_{mn}(x, y)$ 代表 LP_{mn} 的光场分布; $\Delta\omega$ 代表此时的光频率与中心频率

的差值; $\Delta\tau$ 代表 LP_{mn} 与 LP_{01} 的群时延差; $\Delta\Phi_{mn}$ 代表 LP_{mn} 相对于 LP_{01} 的相位差。从式(2)可以看出,出射端面的光场由基模与高阶模叠加构成,其光强会因光频率的变化而发生变化。通过对光谱进行傅里叶变换,可以提取差分模式群时延的信息;通过解析光场中的拍频,可以获得各模式的场分布,如图 9 所示。多径干涉定义为不同模式功率的比值。在通过前述模式解析获得各模式的相对功率后,可依据式(3)进行计算:

$$MPI = 10 \log \left[\frac{\iint I_{mn}(x, y) dx dy}{\iint I_{01}(x, y) dx dy} \right] \quad (3)$$

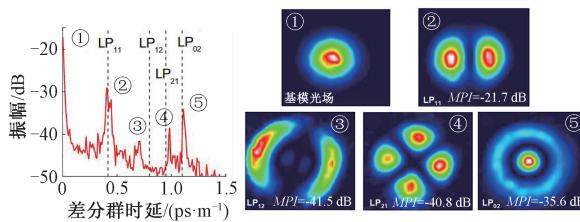


图 9 20 m 大模场光纤测试结果^[35]

Fig. 9 Measurement results of a 20-m-long large-mode-area fiber

2009 年 Nicholson 等^[85]优化了数据处理算法,获得了更为精确的多径干涉。然而这种结合宽带光源与光谱仪的 S² 测试装置,由于包含单模光纤探针和位移台,整体结构较为复杂,测试所需时间较长。2009 年 Blin 等^[86]改进了 S² 实验系统,采用可调谐激光器与电荷耦合器件 (charge-coupled device, CCD) 相机相结合的配置进行实验,显著提高测试速度,如图 10 所示。通过计算机控制可调谐激光器按特定频率间隔进行扫描,同时利用相机采集每个频率点对应的出射光场。这种装置设计更为简洁,可调谐激光器和相机的具备高可控性,测试时间大大减少。目前, S² 技术普遍采用这一组合方式。

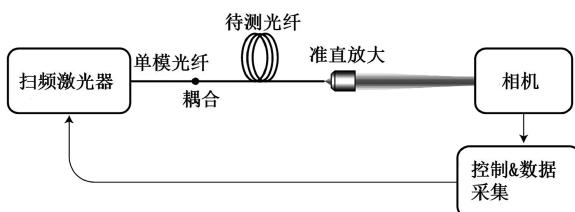


图 10 基于可调谐激光器与 CCD 相机的 S² 系统^[86]

Fig. 10 The S² system based on a tunable laser and a CCD camera

2012 年 Nguyen 等^[87]从理论上证明,在传统 S² 系统中,当待测光纤存在模式数多于两个时,S² 处理结果中会

出现虚假模式。为此,该课题组提出了一种不限于主导模式的替代算法,用于识别和消除这些虚假模式。2014 年 Sevigny 等^[88]将多元统计分析的算法应用于 S² 数据处理,有效地分离了高阶模之间的干涉。2015 年 Leandro 等^[89]通过 S² 系统评估了少模光纤的弯曲损耗,与其他方法相比,它不需要使用模式转换器即可同时得到多个模式的损耗信息。在国内,2016 年 Tan 等^[90-91]搭建了 S² 实验系统并在 CCD 前加入了屏蔽电磁波的装置,提高了 S² 测试的精度;2020 年 Di 等^[92]使用 S² 测试了少模光纤的主模式;2022 年 Yang 等^[93]使用 S² 技术测试了模场适配器与多模光纤连接产生的多径干涉。2024 年 Chen 等^[94]搭建了 S² 系统定量分析了全固态光子带隙光纤输出光束的模式成分。

2.3 固定分析仪技术

固定分析仪 (fixed analyzer, FA) 技术最初是为表征单模光纤中的偏振模色散而开发的一种方法^[95-98]。类比于光纤中偏振模色散,C-MCF 的空间模式色散也可以通过类似测试方法进行测量。图 11 为基于傅里叶变换分析的 FA 测试 C-MCF 中空间模式色散的实验系统图。

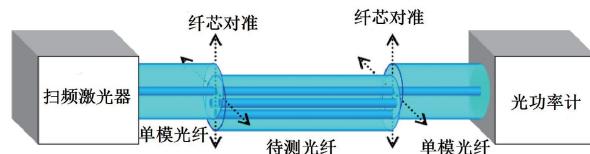


图 11 测试 C-MCF 的空间模式色散的 FA 系统^[54]

Fig. 11 FA system for testing spatial mode dispersion of C-MCF

实验系统中的核心设备包括一台窄线宽波长扫描激光器和一台高速光功率计 (响应时间需 $\leq 20 \mu s$)。波长扫描激光器以 5 pm 的步长测量每个纤芯从 1 520 nm 到 1 580 nm 的透射光谱,随后将采集数据重采样为等频率间隔的光谱,并通过傅里叶变换计算得到超模差分模式时延的概率分布 (如图 12 所示,呈高斯分布)。通过高斯拟合得到自相关函数,其中空间模式色散的定义为差分模式时延分布的二阶矩的平方根^[54,95]。2016 年 Sakamoto 等^[95]制备了具有不同芯间距的同质两芯光纤,并利用 FA 研究了相同弯曲条件下的空间模式色散的变化规律,研究发现当纤芯距为 20 和 25 μm 时,差分模式时延分布呈现类高斯型,表明多芯光纤中存在强耦合;当纤芯距为 40 μm 时,差分模式时延分布的分布表现为单一的尖峰,说明此时纤芯之间的耦合可以忽略不计。2017 年 Aozasa 等^[99]制备了具有均匀扭转的随机 C-MCF,通过 FA 研究了空间模式色散与宏观弯曲的关系。同年, Hayashi 等^[54]测量了空间模式色散随光纤长度和

弯曲的变化趋势,发现在数十公里长的 C-MCF 的空间模式色散远低于少模光纤中 C 波段的差分模式群时延,此外,他们还清晰观察到空间模式色散与光纤曲率呈线性比例关系。2018 年 Sakamoto 等^[100]通过 FA 测试了 12 芯 C-MCF 的空间模式色散。2022 年 Hayashi 等^[101]综述了随机耦合 MCF 技术的进展,描述了随机耦合 MCF 的分类和设计,并介绍了表征随机耦合 MCF 光学特性的方法,其中测试空间模式色散的方法通常为 FA。

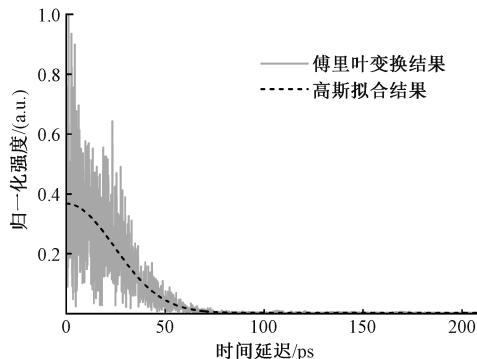


图 12 测试得到的差分模式群时延分布示例

Fig. 12 An example of measured differential mode group delay distributions

2.4 相干光频域反射仪技术

相干光频域反射技术 (coherent optical frequency domain reflectometry, C-OFDR) 是一种极具吸引力的光纤表征技术,其在提升空间分辨率方面具有巨大潜力。1985 年 Nakano 等^[102]首次提出基于迈克尔逊干涉仪结构的 C-OFDR 系统,通过傅里叶变换的时域冲激响应可以确定单模光纤故障位置。自此以后,基于 C-OFDR 技术的表征技术不断发展与完善^[103-104],现已能够有效测试单模光纤的衰减特性、长度以及局部双折射^[105],放大器的分布式增益^[106]等参数。

在空分复用光纤表征领域,C-OFDR 凭借其高分辨率和大动态范围的优势应用于少模光纤中累积差分模式群时延的表征,以及 C-MCF 中空间模式色散的分析。少模光纤中差分模式群时延会因温度和应变等局部环境扰动而发生变化,因此,识别并测试光纤任意位置处的差分模式群时延对光纤布线、光缆安装以及环境变化的监测具有重要意义。2017 年 Ohno 等^[107]首次利用 C-OFDR 技术表征了多芯光纤链路中差分模式群时延的累积效应,图 13 为该方案的原理示意图。

通过 C-OFDR 技术获取不同模式的后向瑞利散射光谱,各模式的光谱位移对应着不同的延迟时间。由于特定的环境扰动发生的位置对于所有模式都是一致的,因此不同模式的同样光谱位移具有的不同延迟时间,与累

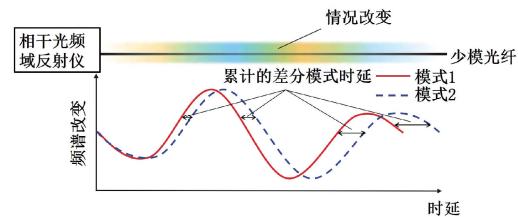


图 13 C-OFDR 测少模光纤中差分模式时延的原理图^[107]

Fig. 13 Conceptual diagram of differential mode group delay measurement in an FMF using the C-OFDR method

积的差分模式群时延相对应。图 14 为该技术的实验系统的示意图。

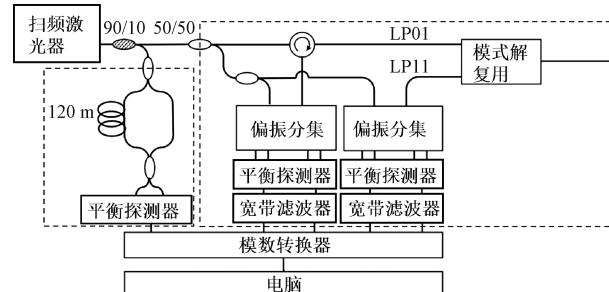


图 14 C-OFDR 的实验装置^[107]

Fig. 14 Experimental setup of C-OFDR

可调谐激光器以 100 nm/s 的速度进行连续波长扫描,其中 10% 的光注入辅助干涉仪 (auxiliary interferometer, AI) 中,用于校正激光器非线性扫描带来的误差,其余光功率则注入主干涉仪。通过模式复用器在待测光纤中激发 LP_{01} 模式,通过解复用器分离出 LP_{01} 和 LP_{11} 模式各自的后向散射光,与参考路的光进行拍频后被接收。每隔 15 min 采集 1 次各个模式的后向瑞利散射光谱,与 15 min 前的散射光谱进行互相关,从而得出不同模式的瑞利散射光谱位移,进而推导出不同位置处的差分模式群时延。最终实现了 20 ps 的差分模式群时延测试精度,测试光纤长度为 150 m。2017 年 Ohno 等^[108]又提出了通过 C-OFDR 测试 C-MCF 的分布式空间模式色散的方案,实验原理如图 15 所示。

通过 C-OFDR 获取 C-MCF 中超模的后向瑞利散射光谱,累积的空间模式色散可通过光纤任意段后向散射幅度的自相关进行表征。根据现有经验,C-MCF 在传输数十公里后,空间模式色散仍维持在亚微秒量级的水平。因此 C-OFDR 凭借其皮秒量级的高分辨率,成为测试分布式空间模式色散的有效手段。实验系统如图 16 所示^[108],与用于表征少模光纤累积差分模式群时延的系统完全一致。测试所得的总空间模式色散与传统的固定分析仪测试结果相符。

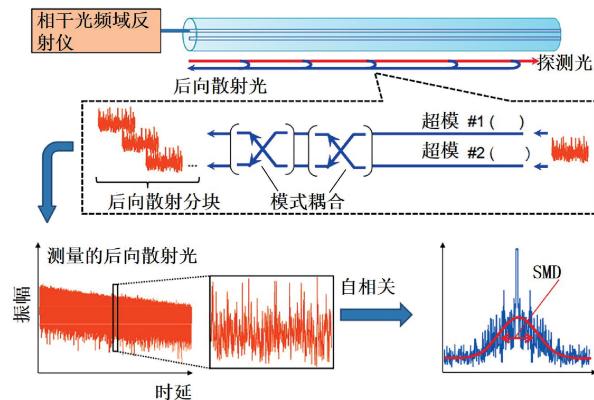


图 15 测试 C-MCF 空间模式色散的 C-OFDR 系统原理^[108]

Fig. 15 Principle of the C-OFDR system for testing spatial mode dispersion of C-MCF

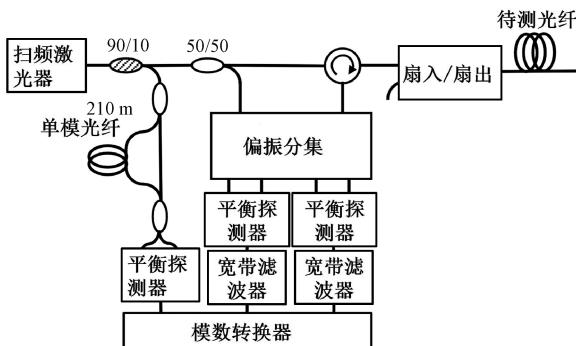


图 16 测试 C-MCF 的空间模式色散的 C-OFDR 实验装置^[108]

Fig. 16 Experimental setup of the C-OFDR system for testing spatial mode dispersion of C-MCF

2.5 波长扫描干涉技术

在空分复用技术的实际应用中,光纤及器件从制备到最终商用,每一个环节都要进行全面的性能表征,这通常需要多种设备和表征系统。为此,研究人员提出了一种高效的替代方案,即波长扫描干涉技术(swept wavelength interferometry, SWI)。SWI 仅需一次波长扫描即可获取空分复用光纤或器件在整个扫描波段内的复传输矩阵。该矩阵描述了每个输入模式耦合到每个输出模式的过程,包含了所有信道振幅和相位的信息。通过进一步奇异值分解,能够得到所有线性参数,比如模式相关损耗、插入损耗等^[22, 109-112]。

2003 年 VanWiggeren 等^[113]首次提出用于多端口器件的 SWI 表征技术,同时表征了阵列波导光栅的四个端口,得到其差分模式群时延、插入损耗和偏振相关损耗的信息。2013 年,随着空分复用技术的逐渐成熟,Fontaine 等^[110]首次提出空间分集的 SWI 系统,在带宽为 110 nm 的范围内,单次扫描得到长度为 4.7 km 少模光纤的 $N \times N$ 传输矩阵,冲激响应的动态范围>80 dB。假如空分复用待测物具备 N 个空间信道,测试实验装置图如图 17 所示^[114]。在实验过程中,可调谐激光器进行连续的波长扫描,光进入干涉仪。波长扫描干涉仪分为 2 路,一路是与待测物长度相匹配的参考臂;另一路为信号臂,包含空分复用待测物。信号光首先经过偏振复用器,被分成两束具有相对延迟的正交偏振光。然后通过分束器分成 N 路,每一路光路中分别加入不同的延迟线;在待测物的输出端,添加另外 N 条延迟线。之后,通过合束器将光束合并,这样能够确保各信道的冲激响应信号在不同时间到达接收端。最终平衡探测器和数字分析仪接收并记录了相干干涉条纹。

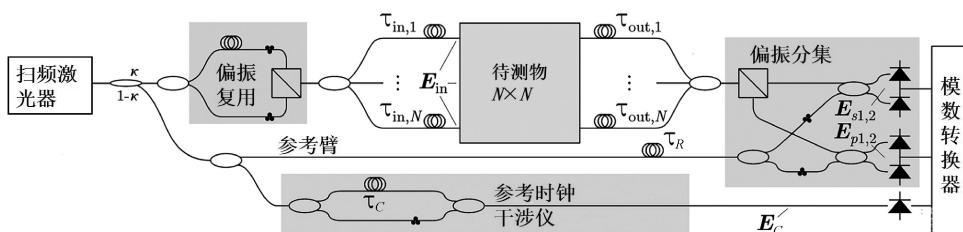


图 17 SWI 测试空分复用光纤或器件的实验装置^[114]

Fig. 17 Experimental setup for SWI testing of space-division multiplexed fibers or devices

假设信号臂中待测物的传输矩阵为 $\mathbf{H}(\omega)$,参考臂的传输矩阵为 $\mathbf{R}(\omega)$,那么干涉信号为 $\mathbf{S}(\omega) = \mathbf{H}(\omega)\mathbf{R}^*(\omega) + [\mathbf{H}(\omega)\mathbf{R}^*(\omega)]^*$ 。通过对 $\mathbf{S}(\omega)$ 进行傅里叶变换恢复 $\mathbf{H}(\omega)$,利用时间窗函数提取出 $\mathbf{H}(\omega)$ 的相位和强度。对 $\mathbf{H}(\omega)$ 进行傅里叶逆变换,可以得到

时域的冲激响应,组成 $N \times N$ 传输矩阵。通过对 $\mathbf{H}(\omega + \delta\omega)\mathbf{H}^{-1}(\omega)$ 的特征值分析^[8, 115]或者提取时域冲激响应的相对位置,能够得到差分模式群时延。通过对矩阵的分解可以得到模式串扰,经过奇异值分解可以计算模式相关损耗、插入损耗等^[114, 116],如式(4)所示。

$$\left\{ \begin{array}{l} MDL = \frac{\max \lambda_i^2(\omega)}{\min \lambda_i^2(\omega)} \\ IL = \overline{\lambda_i^2(\omega)} \\ XT = \frac{\sum \text{Diag}(\mathbf{T})}{\sum (\mathbf{T}) - \sum \text{Diag}(\mathbf{T})} \end{array} \right. \quad (4)$$

式中: $\lambda_i^2(\omega)$ 是奇异值的平方; \mathbf{T} 代表传输矩阵。为了更清晰的描述, 绘制了 SWI 的数据处理流程, 如图 18 所示。

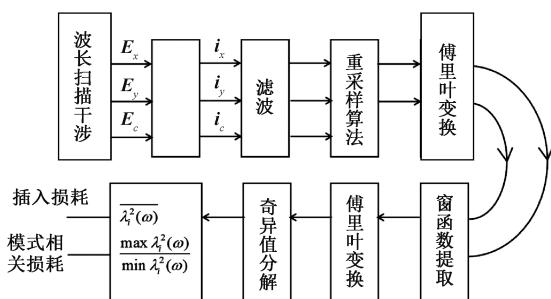


图 18 SWI 的算法流程

Fig. 18 Flowchart of the algorithms using in SWI

针对不同的待测物, SWI 的架构需要不断改进。2013 年 Fontaine 等^[32, 110, 117]通过 SWI 分别表征了长度为 4.7 km 的 3 模光纤、长度为 10 km 的 6 模光纤以及 6 模光子灯笼, 其中光子灯笼通过环形器接入反射型 SWI 进行测试。2016 年 Huang 等^[116, 118]通过改进的反射型 SWI 分布式地测试了弱耦合 6 芯放大器的最佳长度和增益, 以及三模放大器的模式相关增益, 其空间分辨率为 100 μm, 动态范围为 50 dB。同年, Chen 等^[60]通过 SWI 表征了 10 模多平面光转换器的模式相关损耗和模式选择性。2017 年, Rommel 等^[114, 119]通过反射型的 SWI 研究了 36 芯三模光纤中熔接点对模式相关损耗和插入损耗的影响。2019 年 Alvarado-Zacarias 等^[120]将 SWI 与梳状光源相结合, 表征了强耦合多芯放大器的差分模式增益。2019 年 Van Weerdenburg 等^[121]补偿了 SWI 系统中的色

度色散, 提高了冲激响应测试的准确性, 并表征了 39 芯三模光纤。同年, Rommel 等^[122]通过在参考路中增加一路(放置一个偏振片)作为校正信号, 显著改善了 SWI 系统中偏振衰落带来的影响。2020 年 Chen 等^[123]通过在 SWI 中加入超弱光纤布拉格光栅阵列, 消除了激光器非线性扫描引起的相位噪声的影响。2021 年 Deriushkina 等^[124]将 SWI 与双光梳光谱技术结合, 测试了强耦合 3 芯光纤的传输矩阵, 该实验架构不需要额外的辅助干涉仪对激光器的扫描非线性进行校准;同年, 他们通过 SWI 表征了强耦合 7 芯放大器的差分模式增益。2023 年 Wang 等^[125]通过 SWI 测试了不同模式轮循策略下模式轮循器件的传输矩阵, 将这些传输矩阵加入长距离传输仿真中进行比较, 发现两种新的适合长距离传输的模式轮循策略。总之, SWI 技术是一种强有力的空分复用表征工具。

2.6 离轴数字全息技术

2019 年 Mazur 等^[126]首次利用数字全息(digital holography, DH)技术表征长度为 26.5 km 的 45 模长链路空分复用光纤, 测试时间仅需要 0.3 s。相较于 SWI, DH 不仅能够提供空分复用光纤或器件的复传输矩阵, 还能获取各模式的二维模场分布。此外, 其仅需要一个复用器, 无需解复用器即可测试空分复用光纤或器件的传输矩阵, 系统设置更加简单。DH 技术测试空分复用待测物的实验装置图与后续部分算法如图 19 所示^[127]。窄线宽激光器发出的某一波长的光首先被分为两路:一路作为信号路, 另一路作为参考路。在信号路中, 光束首先通过由 1×2 的光开关和偏振控制器构成的偏振复用结构, 生成可切换的两个正交偏振光。随后光束进入 1×N 光开关, 其 N 个输出端口与空分复用器的 N 个空间信道对应的端口一一相连, 用于快速切换激发模式。接着光束通过空分复用器和待测物, 从输出端发出的光经准直扩束后, 与参考路的光束在空间型合束器中发生干涉, 通过沃拉斯顿棱镜实现偏振分集采集, 最后两个偏振的干涉图案同时被 CCD 接收。

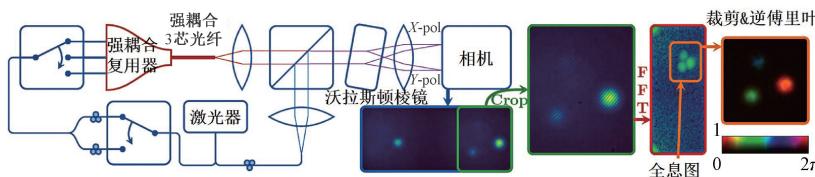


图 19 DH 测试空分复用光纤或器件的实验装置及算法^[127]

Fig. 19 Experimental setup and algorithm for DH testing of space-division multiplexing fibers or devices

CCD 采集到的干涉图首先通过二维窗函数进行主要部分的提取;接着通过傅里叶变换到频域, 提取频域中的

+1 级;然后通过逆傅里叶变换回到空域进行光强和相位的重建。重建的复振幅光场与仿真生成的理想模式交叠

积分得到传输矩阵的各个元素,如式(5)所示。

$$T_{i,j} = \iint M_i(x,y) \times \Phi_j^*(x,y) dx dy \quad (5)$$

式中: M_i 代表重建的第*i*个模式的复振幅场; Φ_j 代表仿真生成的第*j*个理想模式,通过光开关的快速切换,即可得到*N*×*N*的传输矩阵。然后对矩阵能量进行分析得到模式串扰,通过奇异值分解得到模式相关损耗^[126]。

2020年Alvarado-Zacarias等^[128]利用DH测试了45模放大器动态组装过程中的传输矩阵以及各步骤的模式相关损耗和模式串扰。同年Van der Heide等^[127]通过DH表征了强耦合3芯复用器的插入损耗和模式相关损耗,结果显示,在C+L波段内,对于不同的输入端口,插入损耗在0.74~0.91 dB之间波动,模式相关损耗在0.3~0.9 dB之间波动。同年,该团队^[129]通过在DH的参考臂中引入两个偏振光与信号臂光进行干涉,实现了角频域复用,使得信号臂不再需要沃拉斯顿棱镜即可完成偏振分集接收;同时全息图占用更多像素,分辨率得以提升,提高了光场重建的精度。2022年该团队^[130]进一步改进了参考臂光路,在参考臂中加入偏振分束器和反射镜实现了角频域复用,大大简化了空间光路。同年, Van den Hout等^[131]利用改进的DH系统监测了少模光

纤与多模光纤熔接对准的过程,监测到最佳对准时机——此时模式相关损耗最小。2023年Kawai等^[132]通过在参考臂中加入锁相技术,在不需要与信号路进行长度匹配的情况下远程表征了长度为75.2 km的少模光纤。2024年Huang等^[133]对10模放大器的差分模式增益进行表征。总之,DH不仅可以表征光纤和器件,还可以帮助组装自由空间光学设备和空分复用器件。

然而,上述DH系统无法测试光纤的差分模式群时延。2015年Wakayama等^[134-135]首次提出利用低相干DH测试空分复用光纤的差分模式群时延,成功实现了对19芯6模光纤所有纤芯差分模式群时延的测试,其实验装置如图20所示。ASE光源发出的宽带光经带宽为2 nm的带通滤波器滤波后,被分为信号臂和参考臂两路。在信号臂中接入待测空分复用光纤(长度为米级),通过偏置激发出光纤中所有高阶模。在参考臂中引入一个位移台进行光程扫描,以100 μm的步长逐一扫描光纤中各个模式的时间群时延,并采集每个步长对应的干涉图。通过DH重建模场后,对所有像素点进行积分,每个步长的积分值与各模式的时间延迟相对应,可得到差分模式群时延。

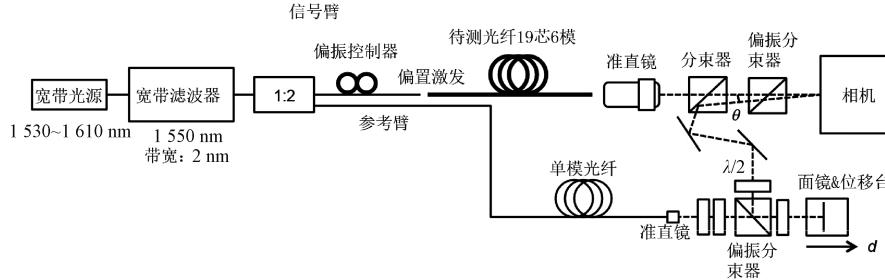


图20 低相干DH实验装置^[134]

Fig. 20 Experimental setup of the low-coherence DH system

3 表征技术的比较与总结

在第2章中系统介绍了测试空分复用光纤及器件的主流技术,包括多通道光时域反射技术、空间频谱解析技术、固定分析仪技术、相干光频域反射技术、波长扫描干涉技术以及离轴数字全息技术。这些技术各具独特的测试原理、适用范围及局限性。本章将从可测对象类型、可测参数、光纤长度、空间分辨率、动态范围、优势与不足等维度,对上述表征技术进行全面对比分析,如表3所示。

多通道光时域反射技术适用于所有类型空分复用光纤的表征测试,实验装置简单。除了能够测量光纤的长度和衰减外,该技术还能表征少模光纤的分布式模式耦合以及强耦合多芯光纤的分布式芯间耦合,测

试范围达到数十公里。然而,该技术受脉冲宽度限制,空间分辨率较差,通常在10 m以上。为提升结果的可靠性,通常需要进行多次实验并取平均值,因而耗时较长。动态范围与待测对象的长度有关,长距离对应更小的动态范围。

空间频谱技术能够有效测量少模光纤的差分模群时延和多径干涉,实验装置简单,但测试参数较为单一。根据奈奎斯特采样定理,激光器的扫频间隔和范围限制了可测群时延的范围,因此该技术适用于长度较短的光纤测试,通常在百米量级。此外,该技术需采集大量图像数据,导致实验耗时常超过10 min且计算量较大。同时,其动态范围较为有限,约为30 dB。

固定分析仪技术可用于测量强耦合多芯光纤的空间模色散,适用于长度达数十公里的光纤。该技术装置简

表3 空分复用光纤及器件测试技术比较

Table 3 Comparison of characterization techniques for space-division multiplexing fibers and devices

表征技术	待测物类型	可测参数	文献	光纤长度	空间分辨率	动态范围/dB	技术比较
多通道光时域反射技术 ^[20,74-84]	少模光纤、多芯光纤	长度、衰减、分布式模式耦合、芯间耦合	[20]	84 km	200 m	10	
			[74]	9.8 km	-	13.01	
			[75]	5.9 km	10 m	40	可测光纤长度:★★★★★
			[78]	10 km	10 m	50	测试速度:★★★☆☆
			[81]	2.9 km	100 m	50	测试参数多样性:★★★☆☆
			[82]	9.7 km	10 m	60	实验装置简单:★★★★★
			[83]	60 km	100 m	-	动态范围:★★★★★
			[84]	41 km	50 m	25	
空间频谱解析技术 ^[35,85-94]	少模光纤	差分模式群时延、多径干涉	[35]	20 m	-	30	可测光纤长度:★☆☆☆☆
			[85]	20 m	-	40	测试速度:★☆☆☆☆
			[88]	80 m	-	30	测试参数多样性:★☆☆☆☆
			[89]	220 m	-	25	实验装置简单:★★★★★
			[90]	100 m	-	30	动态范围:★★☆☆☆
固定分析仪技术 ^[54,95-101]	强耦合多芯光纤	空间模式色散	[54]	41.22 km	-	-	
			[95]	14.3 km	-	-	可测光纤长度:★★★★★☆
			[98]	150 km	-	-	测试速度:★★★★★★
			[99]	2.5 km	-	-	测试参数多样性:★☆☆☆☆
			[100]	3 km	-	-	实验装置简单:★★★★★
			[101]	10.8 km	-	-	动态范围:N/A
相干光频域反射技术 ^[97-103]	少模光纤、强耦合多芯光纤	分布式差分模式时延、分布式空间模式色散	[107]	150 m	0.223 mm	-	可测光纤长度:★★☆☆☆
			[108]	4 km	0.1 mm	-	测试速度:★★★★★☆
							测试参数多样性:★★★☆☆
							实验装置简单:★★★☆☆
波长扫描干涉技术 ^[8,22,32,60,109-125]	少模光纤、多芯光纤、空分复用放大器和复用器等	模式相关损耗、插入损耗、差分模式群时延、模式耦合、模式选择性、芯间耦合、差分模式增益	[109]	4.7 km	-	80	
			[110]	10 km	-	80	可测光纤长度:★★★★☆☆
			[111]	23.4 km	-	40	测试速度:★★★★★★
			[112]	157 m	-	60	测试参数多样性:★★★★★★
			[114]	20 m	-	60	实验装置简单:★☆☆☆☆
			[121]	13.6 km	-	50	动态范围:★★★★★
			[123]	2 km	-	50	
离轴数字全息技术 ^[126-135]	少模光纤、多芯光纤、空分复用放大器和复用器等	模式相关损耗、插入损耗、差分模式群时延、模式耦合、模式选择性、差分模式增益	[126]	26.5 km	-	30	可测光纤长度:★★★★★
			[132]	75.2 km	-	30	测试速度:★★★★★☆
			[135]	10 m	-	30	测试参数多样性:★★★★★☆
							实验装置简单:★★★☆☆

单,易于搭建,测试耗时常小于1 min,但测试参数较为单一。由于测试的空间模式色散是差分模式群时延的统计

结果,因此不具备动态特性参数。

相较于光时域反射技术,相干光频域反射技术能以

更高精度测量光纤的长度和衰减。然而,受激光器相干长度的限制,其测量距离通常小于10 km,且空间分辨率可达毫米量级。对于少模光纤,该技术可实现差分模式群时延的分布式测量;对于强耦合多芯光纤,可实现空间模色散的分布式测量。该技术能够为光纤链路的局部故障检测与定位提供了支持。由于空间模式色散源于差分模式群时延的统计特性,故不具备动态性能参数。

波长扫描干涉技术是一种高效的表征工具,仅需一次扫描即可获取待测光纤及器件所有信道的复传输矩阵,从而提取所有线性参数信息,包括少模光纤和强耦合多芯光纤的模式相关损耗、插入损耗、差分模式群时延和模式耦合、模式复用器的模式选择性、模式耦合和插入损耗以及放大器的模式耦合、芯间耦合和差分模式增益等。该技术可测量的光纤长度受扫描速度和采样率限制,尽管实验装置较为复杂,但全光纤链路设计便于集成。得益于高速可调谐激光器的应用,测试速度很快,通常仅需几秒。结合波长扫描与干涉技术,从而使该方法测试精度高、动态范围大。

离轴数字全息技术相较于波长扫描干涉技术,能够测量二维空间模场分布,仅需复用器而无需解复用器即可完成对空分复用光纤及器件的测试,从而实现空分复用器件组装过程的实时监测。然而,该技术仅能测量单一波长处的传输矩阵。若需测量差分模群时延,则需结合宽带光源和光程扫描技术,难以同时获取所有参数。尽管数字全息技术具有高分辨率的优势,但对光路稳定性要求较高,主要适用于实验室环境下的精细分析,其动态范围约为30 dB。

4 研究展望

纵观当前空分复用表征技术的发展,我国起步较晚,当前测试系统功能单一、集成度低、难以满足空分复用光纤或器件多参数评估的需求。因此,构建一套空分复用光纤测量一体化的综合测试系统具有重要的研究和应用价值。展望未来,构建这样的测试系统需要关注的技术问题为:

- 1) 空间信道分辨测量:具体而言,对于少模光纤需具备模式分辨能力;对于多芯光纤需要实现纤芯信号的分辨。
- 2) 空间信道交叉影响测量:空分复用光纤在拉制及器件制造过程中不可避免的缺陷会导致信道之间的相互耦合,因此,测量系统应具备检测这些耦合效应的能力。
- 3) 分布式测量:空分复用光纤在拉制过程中,温度、压力及拉制速度的各种扰动均可能引发光纤结构沿光传输方向的变化,因此需要对这些扰动进行局部定位分析。
- 4) 统计测量:空分复用光纤及其器件未来不可能仅

局限于理想实验室环境,在实际铺设过程中会受到温度、扭转和弯曲等随机变化的影响,因此测试系统最好配备具备统计特性分析的测量机制。

尽管本研究所述的主流测试方法原理各异,但在设备层面存在一定的共用组件。因此,可以通过集成化设计,将这些测试技术融合,构建出体积更小、成本更低的系统。为实现空分复用光纤或器件多参量的同步评估,综合的测试系统可结合波长扫描干涉技术和数字全息技术。该系统采用模块化架构,如图21所示,包括光源模块、入纤信号处理模块、模式复用/扇入模块、模式解复用/扇出模块、出纤信号处理模块、数据分析模块以及反馈与自动控制模块。

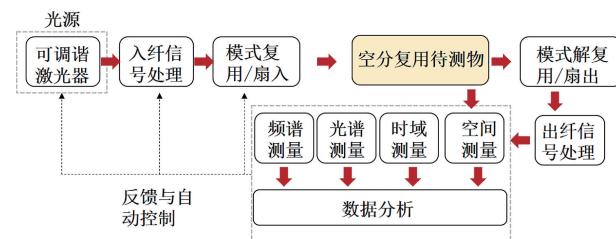


图21 空分复用光纤/器件一体化综合测试系统架构

Fig. 21 Architecture of the integrated test system for space-division multiplexing fiber/device

具体各模块详细描述为:

- 1) 光源模块:采用窄线宽可调谐激光器作为光源,确保测量稳定性并覆盖空分复用光纤的工作波长范围。
- 2) 入纤信号处理模块:对应不同的测试需求,将入纤光调制为脉冲光,连续扫描光或阶跃扫描光。
- 3) 模式复用/扇入模块:支持少模光纤的模式激发和多芯光纤的信号分配。当待测物为少模光纤/器件时,使用模式复用器实现模式选择功能;当待测物为多芯光纤/器件时,使用扇入器实现纤芯信号精准注入的功能。通过光纤延迟线引入空间分集,解决空间信道分辨测量的技术难题。
- 4) 模式解复用/扇出模块:当待测物为少模光纤/器件时,通过模式解复用器将模式信道的信号导出;当待测物为多芯光纤/器件时,使用扇出进行信号的导出。
- 5) 出纤信号处理模块:采用平衡探测器和CCD分别作为光纤型和空间型接收器,结合信号处理技术测量多个空间信道的交叉影响。
- 6) 数据分析模块:集成化分析采集到的数据或图像,包括功率补偿、时间同步/校准、时间窗口/频谱划分、一维/二维傅立叶变换、滤波、拟合和峰值提取等功能。进一步,可引入人工智能算法处理分布式测量和统计数据,通过训练模型预测光纤结构变化趋势,提升系统智能化水平。

7) 反馈与自动控制模块;通过闭环控制实现测试流程自动化,利用实时反馈调整光源波长或模式激发参数。

5 结 论

新一代空分复用系统为传统光纤通信领域带来了一场技术变革。空分复用光纤及器件在未来可广泛应用于光纤通信、自由空间光通信、传感、医学影像、先进制造等多个领域,展现出卓越的潜力与前景。对空分复用光纤及器件进行测试,是设计优化结合工艺迭代全过程中不可或缺的关键环节。经过十几年的发展,各种测试技术不断涌现,不仅服务于上述领域发展,也为精密测量技术的演进带来了一系列新思路。

本研究讨论的测试技术各有侧重,满足不同测试需求。多通道光时域反射技术以长距离、分布式的测量见长,但空间分辨率和环境稳定性不足;空间频谱技术装置简单,适合少模光纤的群时延分析,却受限于参数单一和数据处理负担;固定分析仪技术适用于强耦合多芯光纤的空间模式色散测量,但功能单一;相干光频域反射技术精度高且支持局部故障分析,测量距离却受激光器相干性制约;波长扫描干涉技术通过单次扫描提取全面参数,速度快、精度高,但装置复杂且依赖复用器;离轴数字全息技术则以高分辨率模场分布见长,适合实时监测与实验室精细分析。这些方法在可测对象、参数范围及应用场景上互补,实际选择时需根据测试目标、光纤类型及实验条件权衡优劣,结合具体的测试需求筛选合适的表征方案。未来综合性测试系统的实现不仅能够弥补我国在空分复用测试领域的短板,还将为光纤通信领域、光纤传感领域、成像领域等的未来发展提供坚实支撑。

参考文献

- [1] ESSIAMBRE R J, KRAMER G, WINZER P J, et al. Capacity limits of optical fiber networks [J]. Journal of Lightwave Technology, 2010, 28(4) : 662-701.
- [2] RICHARDSON D J, FINI J M, NELSON L E. Space-division multiplexing in optical fibres [J]. Nature Photonics, 2013, 7(5) : 354-362.
- [3] NIMURA S, TANAKA K, ISHIMURA S, et al. 10.51-Tbit/s multi-channel IF-over-fiber transmission with SDM/WDM/SCM for beyond-5G mobile fronthaul accommodating ultra-high-density antennas [J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2023, 15(8) : C263-C270.
- [4] LI G F, BAI N, ZHAO N B, et al. Space-division multiplexing: The next frontier in optical communication [J]. Advances in Optics and Photonics, 2014, 6(4) : 413-487.
- [5] QIAO G, YANG Y, JI H L, et al. 205.8-Tb/s weakly-coupled 2-mode 7-core transmission over 1 170 km FM-MCF only using 2 × 2 MIMO-DSP [J]. Journal of Lightwave Technology, 2025, 43(4) : 1934-1940.
- [6] MIZUNO T, MIYAMOTO Y. High-capacity dense space division multiplexing transmission [J]. Optical Fiber Technology, 2017, 35: 108-117.
- [7] HOUT M V D, SCIULLO G D, LUÍS R S, et al. Transmission of 273.6 Tb/s over 1 001 km of 15-mode multi-mode fiber using C-band only 16-QAM signals [J]. Journal of Lightwave Technology, 2024, 42(3) : 1136-1142.
- [8] HO K P, KAHN J M. Linear propagation effects in mode-division multiplexing systems [J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(4) : 614-628.
- [9] 于昌新,何彦霖,祝连庆,等. 光纤传感微创手术探针末端三维力测量方法 [J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(1) : 38-45.
- [10] YU CH X, HE Y L, ZHU L Q, et al. Three-dimensional end-force measurement method of optic fiber sensing minimally invasive surgical probe [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(1) : 38-45.
- [11] 张硕,王敏,王珂,等. 针对3×3耦合器幅相非对称的光纤水听器解调方法 [J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(2) : 32-41.
- [12] ZHANG SH, WANG M, WANG K, et al. Signal demodulation of fiber optic hydrophone with asymmetric amplitude and phase of 3×3 coupler [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(2) : 32-41.
- [13] 李智,杨士英. 水声矢量传感器研究进展与挑战 [J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(11) : 1-19.
- [14] LI ZH, YANG SH E. Advances and challenges in underwater acoustic vector sensors [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(11) : 1-19.
- [15] 赵志勇. 空分复用分布式光纤传感技术研究 [D]. 湖北:华中科技大学, 2017.
- [16] ZHAO ZH Y. Investigation of spatial-division multiplexed distributed optical fiber sensing techniques [D]. HuBei: Huazhong University of Science & Technology, 2017.
- [17] ZHAO ZH Y, DANG Y L, TANG M, et al. Enabling simultaneous DAS and DTS through space-division multiplexing based on multicore fiber [J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(24) : 5707-5713.
- [18] 张博伟,何彦霖,王康,等. 基于全方位深层加权轻量化网络的冠脉造影图像超分辨率重建方法 [J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(7) : 200-209.
- [19] ZHANG B W, HE Y L, WANG K, et al. Super resolution reconstruction of coronary angiography images based on the omnidirectional deep weighted lightweight

- network [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument , 2024, 45(7) : 200-209.
- [15] 王语珂, 朱闻睿, 张丽敏, 等. 面向神经血动力与电生理监测的一体化 fNIRS-EEG 成像系统 [J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(4) : 184-192.
- WANG Y K, ZHU W R, ZHANG L M, et al. Integrated neurohemodynamics and electrophysiology imaging system for activation monitoring in daily situations [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument , 2025, 46(4) : 184-192.
- [16] ZHOU CH, ALEX A, RASAKANTHAN J, et al. Space-division multiplexing optical coherence tomography [J]. Optics Express , 2013, 21(16) : 19219-19227.
- [17] HUANG Y Y, JERWICK J, LIU G Y, et al. Full-range space-division multiplexing optical coherence tomography angiography [J]. Biomedical Optics Express , 2020, 11(8) : 4817-4834.
- [18] HO K P, KAHN J M, KAMINOW I P, et al. Mode coupling and its impact on spatially multiplexed systems [J]. Optical Fiber Telecommunications VI , 2013, 17: 1386-1392.
- [19] LOBATO A, FERREIRA F, KUSCHNEROV M, et al. Impact of mode coupling on the mode-dependent loss tolerance in few-mode fiber transmission [J]. Optics Express , 2012, 20(28) : 29776-29783.
- [20] NAKAGAWA M, OHZEKI M, TAKENAGA K, et al. Novel inter-core crosstalk measurement method using a loopback and bidirectional OTDR technique [J]. Journal of Lightwave Technology , 2023, 41(12) : 3842-3848.
- [21] HUANG Y T, HUANG H Z, WU Y, et al. Characterization of ten-mode EDFA using swept wavelength interferometer and digital holography [C]. IEEE Optical Fiber Communications Conference and Exhibition , 2024: 1-3.
- [22] GIFFORD D K, SOLLER B J, WOLFE M S, et al. Optical vector network analyzer for single-scan measurements of loss, group delay, and polarization mode dispersion [J]. Applied Optics , 2005, 44(34) : 7282-7286.
- [23] FONTAINE N K, RYF R, CHEN H SH, et al. 30×30 MIMO transmission over 15 spatial modes [C]. IEEE Optical Fiber Communications Conference and Exhibition , 2015: Th5C. 1.
- [24] BIGOT-ASTRUC M, BOIVIN D, SILLARD P. Design and fabrication of weakly-coupled few-modes fibers [C]. IEEE Photonics Society Summer Topical Meeting Series , 2012: 189-190.
- [25] WANG Y Z, LIU X CH, HUANG Q SH, et al. 10-mode PM-QPSK transmission over 2 320 km enabled by optimized mode permutation strategies [C]. IEEE Optical Fiber Communications Conference and Exhibition , 2024: 1-3.
- [26] SHIBAHARA K, MIZUNO T, DOOWHAN L, et al. DMD-unmanaged long-haul SDM transmission over 2 500-km 12-core × 3-mode MC-FMF and 6 300-km 3-mode FMF employing intermodal interference cancelling technique [C]. IEEE Optical Fiber Communications Conference and Exhibition , 2018: 1-3.
- [27] MORI T, SAKAMOTO T, WADA M, et al. Few-mode fiber technology for mode division multiplexing [J]. Optical Fiber Technology , 2017, 35: 37-45.
- [28] WANG H H, WANG X T, HE Y CH, et al. New mode-group-permutation strategies for MDL reduction in long-haul MDM systems [C]. IEEE Optical Fiber Communications Conference and Exhibition , 2023: 1-3.
- [29] LIU F, HE ZH X, ZHANG W P, et al. Mode dependent loss measurement of few mode fiber based on mode multiplexing power control [J]. IEEE Photonics Technology Letters , 2022, 34(3) : 153-156.
- [30] BAI N, LI G F. Equalizer tap length requirement for mode group delay-compensated fiber link with weakly random mode coupling [J]. Optics Express , 2014, 22(4) : 4247-4255.
- [31] PANG AO D, HU G J, QIN Y, et al. Measurement of differential mode group delay in few-mode fibers based on Fresnel reflection peaks [J]. Applied Optics , 2023, 62(26) : 7044-7049.
- [32] FONTAINE N K. Characterization of multi-mode fibers and devices for MIMO communications [C]. Next-Generation Optical Communication: Components, Sub-Systems, and Systems III. SPIE , 2014, 9009: 52-59.
- [33] RYF R, RANDEL S, GNAUCK A H, et al. Mode-division multiplexing over 96 km of few-mode fiber using coherent 6×6 MIMO processing [J]. Journal of Lightwave Technology , 2012, 30(4) : 521-531.
- [34] YAMAN F, MATEO E, WANG T. Impact of modal crosstalk and multi-path interference on few-mode fiber transmission [C]. IEEE Optical Fiber Communications Conference and Exhibition , 2012: OTu1D. 2.
- [35] NICHOLSON J W, YABLON A D, RAMACHANDRAN S, et al. Spatially and spectrally resolved imaging of modal content in large-mode-area fibers [J]. Optics Express , 2008, 16(10) : 7233-7243.
- [36] RYF R, SIERRA A, ESSIAMBRE R J, et al. Coherent 1 200-km 6×6 MIMO mode-multiplexed transmission over 3-core microstructured fiber [J]. 2011 37th European Conference and Exhibition on Optical Communication , 2011: 1-3.
- [37] TAKENAGA K, ARAKAWA Y, TANIGAWA S, et al.

- Reduction of crosstalk by trench-assisted multi-core fiber [C]. 2011 Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference, 2011: 1-3.
- [38] MATSUO S, TAKENAGA K, ARAKAWA Y, et al. Large-effective-area ten-core fiber with cladding diameter of about 200 μm [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(23): 4626-4628.
- [39] SAKAGUCHI J, AWAJI Y, WADA N, et al. 109-Tb/s ($7 \times 97 \times 172$ -Gb/s SDM/WDM/PDM) QPSK transmission through 16.8 km homogeneous multi-core fiber [C]. 2011 Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference, 2011: 1-3.
- [40] LI M J, HOOVER B, NAZAROV V N, et al. Multicore fiber for optical interconnect applications [C]. IEEE 17th Opto-Electronics and Communications Conference, 2012: 564-565.
- [41] TAKARA H, SANO A, KOBAYASHI T, et al. 1.01-Pb/s (12 SDM/222 WDM/456 Gb/s) crosstalk-managed transmission with 91.4-b/s/Hz aggregate spectral efficiency [C]. European Conference and Exhibition on Optical Communication, 2012: Th. 3. C. 1.
- [42] SAKAGUCHI J, PUTTNAM B J, KLAUS W, et al. 305 Tb/s space division multiplexed transmission using homogeneous 19-core fiber [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31(4): 554-562.
- [43] IGARASHI K, TSURITANI T, MORITA I, et al. Ultra-long-haul high-capacity super-Nyquist-WDM transmission experiment using multi-core fibers [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(5): 1027-1036.
- [44] SAKAGUCHI J, KLAUS W, MENDINUETA J M D, et al. Realizing a 36-core, 3-mode fiber with 108 spatial channels [C]. IEEE Optical Fiber Communications Conference and Exhibition, 2015: Th5C. 2.
- [45] SAITO K, MATSUO S. Multicore fiber technology [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(1): 55-66.
- [46] HAYASHI T, TARU T, SHIMAKAWA O, et al. Low-crosstalk and low-loss multi-core fiber utilizing fiber bend [C]. 2011 Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference, 2011: OWJ3.
- [47] TAKENAGA K, ARAKAWA Y, SASAKI Y, et al. A large effective area multi-core fiber with an optimized cladding thickness [J]. *Optics Express*, 2011, 19(26): B543-B550.
- [48] ZHOU X, XIE CH J. Enabling technologies for high spectral-efficiency coherent optical communication networks [M]. John Wiley & Sons, 2016.
- [49] ANTONELLI C, MECOZZI A, SHTAIF M. The delay spread in fibers for SDM transmission: Dependence on fiber parameters and perturbations [J]. *Optics Express*, 2015, 23(3): 2196-2202.
- [50] XU SH, SHEN L, ZHANG L, et al. Design, fabrication and measurement of 19-core 10-LP-mode fibers with low inter-core crosstalk and low DGD [C]. IEEE Asia Communications and Photonics Conference and International Conference on Information Photonics and Optical Communications, 2024: 1-3.
- [51] CHEN SH, YANG Y L, YANG F, et al. Chromatic dispersion measurement of optical fiber using spectroscopic optical coherence tomography [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2024, 183: 108487.
- [52] CHEN X, HURLEY J E, STONE J S, et al. Chromatic dispersion measurements of single-mode fibers, polarization-maintaining fibers, and few-mode fibers using a frequency domain method [J]. *Photonics*, 2023, 10(2): 215.
- [53] HAYASHI T, TAMURA Y, HASEGAWA T, et al. Coupled multi-core optical fiber suitable for long-haul transmission [J]. *SEI Technical Review*, 2017(85): 19-23.
- [54] HAYASHI T, TAMURA Y, HASEGAWA T, et al. Record-low spatial mode dispersion and ultra-low loss coupled multi-core fiber for ultra-long-haul transmission [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(3): 450-457.
- [55] LABROILLE G, DENOLLE B, JIAN P, et al. Efficient and mode selective spatial mode multiplexer based on multi-plane light conversion [J]. *Optics Express*, 2014, 22(13): 15599-15607.
- [56] FONTAINE N K, CARPENTER J, GROSS S, et al. Photonic lanterns, 3-D waveguides, multiplane light conversion, and other components that enable space-division multiplexing [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2022, 110(11): 1821-1834.
- [57] LEON-SAVAL S G, FONTAINE N K, AMEZCUA-CORREA R. Photonic lanterns for multimode optical communications [J]. *Optical Fiber Technology*, 2017, 35: 46-55.
- [58] CHEN X L, YAN X Y, FANG J CH, et al. Multi-plane light conversion (MPLC) LP mode multiplexer based on grayscale maskless lithography [J]. *Optics Express*, 2024, 32(23): 40305-40314.
- [59] FONTAINE N K, RYF R, CHEN H SH, et al. Laguerre-Gaussian mode sorter [J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 1865.
- [60] CHEN H SH, FONTAINE N K, RYF R. Transfer matrix

- characterization of 10-mode mode-selective spatial multiplexers [C]. IEEE Photonics Society Summer Topical Meeting Series, 2016; 51-52.
- [61] YANG Y, CHENG R T, LIU J X, et al. Low-crosstalk laser-direct-writing FL/FO device for 8×100-Gbps optical interconnection [J]. Optics Express, 2022, 30 (2): 1675-1685.
- [62] CHU J, LI Y, ZHANG L, et al. Low coupling-loss three-dimensional waveguide fan-in/fan-out devices for multi-core fiber [C]. IEEE 20th International Conference on Optical Communications and Networks, 2022: 1-2.
- [63] IGARASHI K, SOMA D, WAKAYAMA Y, et al. Ultra-dense spatial-division-multiplexed optical fiber transmission over 6-mode 19-core fibers [J]. Optics Express, 2016, 24 (10): 10213-10231.
- [64] GAO Y Y, CUI J, JIA J CH, et al. Weakly-coupled 7-core-2-LP-mode transmission using commercial SFP + transceivers enabled by all-fiber spatial multiplexer and demultiplexer [J]. Optics Express, 2019, 27 (11): 16271-16280.
- [65] JI W, SHEN Z H, YU R W, et al. Spacing-tailored multicore fiber interface for efficient FIFO devices [J]. Journal of Lightwave Technology, 2022, 40 (16): 5682-5688.
- [66] LI P, CHEN W, ZHANG J H, et al. Low-loss C-band all-fiber FIFO device by novel bridge fiber [J]. Optical Fiber Technology, 2024, 84: 103755.
- [67] BIGOT L, LE COCQ G, QUIQUEMPOIS Y. Few-mode erbium-doped fiber amplifiers: A review [J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33 (3): 588-596.
- [68] JIANG X R, WU B J, JIANG X L, et al. Modal gain characteristics of few-mode erbium-doped fiber amplifiers with pump mode beating [J]. Optics & Laser Technology, 2025, 181: 111881.
- [69] FONTAINE N K, HUANG B, EZNAVEH Z S, et al. Multi-mode optical fiber amplifier supporting over 10 spatial modes [C]. IEEE Optical Fiber Communications Conference and Exhibition, 2016: Th5A. 4.
- [70] OHTSUKA T, SAKUMA H, SUGANUMA T, et al. Optical amplifiers using multicore erbium doped optical fibers [J]. Sumitomo Electric Technical Review, 2022, 94: 82-87.
- [71] FONTAINE N K, LOPEZ J E A, CHEN H SH, et al. Coupled-core optical amplifier [C]. IEEE Optical Fiber Communications Conference and Exhibition, 2017: Th5D. 3.
- [72] CHAMPAVÈRE A. New OTDR measurement and monitoring techniques [C]. IEEE Optical Fiber Communications Conference and Exhibition, 2014: W3D. 1.
- [73] PERSONICK S D. Photon probe—an optical-fiber time-domain reflectometer [J]. Bell System Technical Journal, 1977, 56 (3): 355-366.
- [74] 刘峰. 少模光纤损伤测量及故障检测技术研究 [D]. 吉林: 吉林大学, 2019.
- [75] LIU F. Research on impairment measurement and fault detection technology for few-mode fiber [D]. Jilin: Jilin University, 2019.
- [76] 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.
- [77] YOSHIDA M, HIROOKA T, NAKAZAWA M. Mode coupling measurement at a splice point between few-mode fibers using a synchronous multi-channel OTDR [C]. IEEE Optical Fiber Communications Conference and Exhibition, 2016: Th1J. 4.
- [78] NAKAZAWA M, YOSHIDA M, HIROOKA T. Measurement of mode coupling distribution along a few-mode fiber using a synchronous multi-channel OTDR [C]. IEEE Optical Fiber Communications Conference and Exhibition, 2014: W3D. 7.
- [79] WANG ZH, WU H, HU X L, et al. Rayleigh backscattering in few-mode optical fibers [C]. IEEE Optical Fiber Communications Conference and Exhibition, 2016: W4F. 6.
- [80] LIU F, HU G, SONG C, et al. Simultaneous measurement of mode dependent loss and mode coupling in few mode fibers by analyzing the Rayleigh backscattering amplitudes [J]. Applied Optics, 2018, 57 (30): 8894-8902.
- [81] WANG H Y, LI X Q, JIN L Q, et al. Evaluation of splicing quality in few-mode optical fibers [J]. Optics Communications, 2022, 507: 127596.
- [82] NAKAZAWA M, YOSHIDA M, HIROOKA T. Nondestructive measurement of mode couplings along a multi-core fiber using a synchronous multi-channel OTDR [J]. Optics Express, 2012, 20 (11): 12530-12540.
- [83] YOSHIDA M, HIROOKA T, NAKAZAWA M, et al. Detailed comparison between mode couplings along multi-core fibers and structural irregularities using a synchronous multi-channel OTDR system with a high dynamic range [J]. Optics Express, 2013, 21 (24): 29157-29164.
- [84] KOBAYASHI Y, SUGANUMA T, HAYASHI T, et al. Characterization of inter-core crosstalk of multi-core fiber as a function of bending radius with multi-channel

- OTDR[C]. IEEE 27th OptoElectronics and Communications Conference and International Conference on Photonics in Switching and Computing, 2022; 1-3.
- [84] ZHAO X S, BO T W, TAN ZH W, et al. OTDR enabled multiple-loopback measurement of inter-core crosstalk in MCF[J]. Journal of Lightwave Technology, 2025, 43(6): 2897-2903.
- [85] NICHOLSON J W, YABLON A D, FINI J M, et al. Measuring the modal content of large-mode-area fibers[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2009, 15(1): 61-70.
- [86] BLIN S, NGUYEN D M, NGUYEN T N, et al. Simple modal analysis method for multi-mode fibers[C]. 35th European Conference on Optical Communication. IEEE, 2009; 1-2.
- [87] NGUYEN D M, BLIN S, NGUYEN T N, et al. Modal decomposition technique for multimode fibers[J]. Applied Optics, 2012, 51(4): 450-456.
- [88] SEVIGNY B, LE COCQ G, CARRERO C C C, et al. Advanced S^2 imaging: Application of multivariate statistical analysis to spatially and spectrally resolved datasets[J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(23): 4606-4612.
- [89] LEANDRO L, GRÜNER-NIELSEN L, ROTTWITT K. Mode resolved bend-loss analysis in few-mode fibers using spatially and spectrally resolved imaging[J]. Optics Letters, 2015, 40(20): 4583-4586.
- [90] TAN F Z, ZHAO J, MO Q, et al. A modified spatial and spectral (S^2) imaging system based on electromagnetic disturbance mitigation[C]. Asia Communications and Photonics Conference, 2015: ASu2A.43.
- [91] 谭凤泽. 基于空间和频谱解析(S^2)少模光纤测试技术研究[D]. 天津:天津大学, 2017.
TAN F Z. Few-mode fiber testing technique based on spatially-and spectrally-resolved imaging (S^2)[D]. Tianjin: Tianjin University, 2017.
- [92] DI Z X, YANG ZH Q, LIU Y P, et al. Measurement of principal modes in few-mode fibers by S^2 method[J]. IEEE Photonics Journal, 2020, 12(2): 1-8.
- [93] YANG L B, YANG ZH Q, XU T, et al. Low-loss mode field adapter using reverse tapering for fundamental mode transmission over MMFs[C]. IEEE Optical Fiber Communications Conference and Exhibition, 2022; M4E. 7.
- [94] CHEN X, HUANG SH M, HUANG L J, et al. Extended S^2 diagnosis of mode degradation in fiber components through group delay stretching[J]. Optics Letters, 2024, 49(19): 5583-5586.
- [95] SAKAMOTO T, MORI T, WADA M, et al. Fiber twisting-and bending-induced adiabatic/nonadiabatic super-mode transition in coupled multicore fiber[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(4): 1228-1237.
- [96] GAMATHAM R R G, GIBBON T B, WU L, et al. Investigation of the fixed analyzer technique for polarization mode dispersion measurements on optical fibres[J]. SATNAC Proceedings, 2007: 120.
- [97] WILLIAMS P A, WANG C M. Corrections to fixed analyzer measurements of polarization mode dispersion[J]. Journal of Lightwave Technology, 1998, 16(4): 534-541.
- [98] MOTUZ R, MUNSTER P, FILKA M. PMD study & measurement-fixed analyzer method[J]. Journal of Communications Software and Systems, 2015, 11(4): 199.
- [99] AOZASA S, SAKAMOTO T, NOZOE S, et al. Bending radius dependence of spatial mode dispersion in randomly coupled multi-core fiber[C]. IEEE Optical Fiber Communications Conference and Exhibition, 2017: Th1H. 4.
- [100] SAKAMOTO T, AOZASA S, MORI T, et al. Twisting-rate-controlled 125 μm cladding randomly coupled single-mode 12-core fiber[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(2): 325-330.
- [101] HAYASHI T, SAKAMOTO T, YAMADA Y, et al. Randomly-coupled multi-core fiber technology[J]. Proceedings of the IEEE, 2022, 110(11): 1786-1803.
- [102] NAKANO H, HOTATE K. Optical system for real-time processing of multiple matrix product[J]. Electronics Letters, 1985, 21(10): 435-437.
- [103] TSUJI K, SHIMIZU K, HORIGUCHI T, et al. Coherent optical frequency domain reflectometry for a long single-mode optical fiber using a coherent lightwave source and an external phase modulator[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1995, 7(7): 804-806.
- [104] ITO F, FAN X Y, KOSHIKIYA Y. Long-range coherent ofdr with light source phase noise compensation[C]. 9th International Conference on Optical Communications and Networks, 2010: 5-8.
- [105] HUTTNER B, REECHT J, GISIN N, et al. Local birefringence measurements in single-mode fibers with coherent optical frequency-domain reflectometry[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1998, 10(10): 1458-1460.
- [106] WEGMULLER M, OBERSON P, GUINNARD O, et al. Distributed gain measurements in Er-doped fibers with high resolution and accuracy using an optical frequency domain reflectometer[J]. Journal of Lightwave

- Technology, 2000, 18(12): 2127-2132.
- [107] OHNO S, IIDA D, TOGE K, et al. Nondestructive characterization of differential mode delay in few-mode fiber link using Rayleigh backscattering spectral shifts [C]. IEEE Optical Fiber Communications Conference and Exhibition, 2017: 1-3.
- [108] OHNO S, TOGE K, IIDA D, et al. Distributed spatial mode dispersion measurement along strongly coupled multicore fibers based on the correlation analysis of Rayleigh backscattering amplitudes [J]. Optics Express, 2017, 25(24): 29650-29658.
- [109] FONTAINE N K. Characterization of space-division multiplexing fibers using swept-wavelength interferometry [C]. IEEE Optical Fiber Communications Conference and Exhibition, 2015: 1-3.
- [110] FONTAINE N K, RYF R, MESTRE M A, et al. Characterization of space-division multiplexing systems using a swept-wavelength interferometer [C]. 2013 Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference, 2013: 1-3.
- [111] JIANG SH L, MA L, ZHANG ZH P, et al. Design and characterization of ring-assisted few-mode fibers for weakly coupled mode-division multiplexing transmission [J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(23): 5547-5555.
- [112] OHNO S, IIDA D, TOGE K, et al. High-resolution measurement of differential mode delay of few-mode fiber using phase reference technique for swept-frequency interferometry [J]. Optical Fiber Technology, 2018, 40: 56-61.
- [113] VANWIGGEREN G D, BANEY D M. Swept-wavelength interferometric analysis of multiport components [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2003, 15(9): 1267-1269.
- [114] ROMMEL S, MENDINUETA J M D, KLAUS W, et al. Few-mode fiber, splice and SDM component characterization by spatially-diverse optical vector network analysis [J]. Optics Express, 2017, 25(19): 22347-22361.
- [115] HEFFNER B L. Automated measurement of polarization mode dispersion using Jones matrix eigenanalysis [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1992, 4(9): 1066-1069.
- [116] HUANG B, CHEN H SH, FONTAINE N K, et al. Characterization of space-division multiplexing amplifiers using a swept wavelength coherent reflectometer [C]. IEEE Optical Fiber Communications Conference and Exhibition, 2016: W4F.2.
- [117] FONTAINE N K, RYF R. Characterization of mode-dependent loss of laser inscribed photonic lanterns for space division multiplexing systems [C]. 18th Opto Electronics and Communications Conference held jointly with 2013 International Conference, 2013: MR2_2.
- [118] HUANG B, CHEN H SH, FONTAINE N K, et al. Spatially and spectrally resolved gain characterization of space-division multiplexing amplifiers with coherent swept-wavelength reflectometry [J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(4): 741-747.
- [119] ROMMEL S, MENDINUETA J M D, KLAUS W, et al. Analysis of few-mode multi-core fiber splice behavior using an optical vector network analyzer [C]. European Conference on Optical Communication, 2017: 1-3.
- [120] ALVARADO-ZACARIAS J C, MATTE-BRETON C, RYF R, et al. Characterization of coupled-core fiber amplifiers using swept-wavelength interferometer [C]. IEEE Optical Fiber Communications Conference and Exhibition, 2019: Th1B.6.
- [121] VAN WEERDENBURG J, ROMMEL S, MENDINUETA J M D, et al. Enhanced modal dispersion estimation enabled by chromatic dispersion compensation in optical vector network analysis [J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(16): 4001-4007.
- [122] ROMMEL S, VAN WEERDENBURG J, MENDINUETA J M D, et al. Polarization equalization in optical vector network analysis for SDM fiber characterization [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2019, 31(24): 1917-1920.
- [123] CHEN H SH, FONTAINE N K, ALVARADO-ZACARIAS J C, et al. Multiport swept-wavelength interferometer with laser phase noise mitigation employing a broadband ultra-weak FBG array [J]. Optics Letters, 2020, 45(21): 5913-5916.
- [124] DERIUSHKINA E, SALGADO I R, MAZUR M, et al. Characterisation of a coupled-core fiber using dual-comb swept-wavelength interferometry [C]. European Conference on Optical Communication, 2021: 1-4.
- [125] WANG H H, WANG X T, HE Y CH, et al. New mode-group-permutation strategies for MDL reduction in long-haul MDM systems [C]. IEEE Optical Fiber Communications Conference and Exhibition, 2023: 1-3.
- [126] MAZUR M, FONTAINE N K, RYF R, et al. Characterization of long multi-mode fiber links using digital holography [C]. IEEE Optical Fiber Communications Conference and Exhibition, 2019: W4C.5.
- [127] VAN DER HEIDE S, ALVARADO-ZACARIAS J C, FONTAINE N K, et al. Low-loss low-mdl core multiplexer for 3-core coupled-core multi-core fiber [C]. IEEE Optical Fiber Communications Conference and

Exhibition, 2020: 1-3.

- [128] ALVARADO-ZACARIAS J C, FONTAINE N K, RYF R, et al. Assembly and characterization of a multimode EDFA using digital holography [C]. IEEE Optical Fiber Communications Conference and Exhibition, 2020: Th1H. 6.
- [129] VAN DER HEIDE S, VAN ANROOIJ R, VAN DEN HOUT M, et al. Exploiting angular multiplexing for polarization-diversity in off-axis digital holography [C]. European Conference on Optical Communications, 2020: 1-4.
- [130] VAN DER HEIDE S, VAN ESCH B, VAN DEN HOUT M, et al. Optical field characterization using off-axis digital holography [C]. IEEE Optical Fiber Communications Conference and Exhibition, 2022: M3Z. 6.
- [131] VAN DEN HOUT M, VAN DER HEIDE S, BRADLEY T, et al. Alignment of free-space coupling of few-mode fibre to multi-mode fibre using digital holography [C]. European Conference on Optical Communication, 2022: We5. 5.
- [132] KAWAI A, SHIMIZU S, SHIBAHARA K, et al. Remote Digital holographic characterization of a 75.2 km few-mode fiber without reference wave transfer [C]. IEEE Optical Fiber Communications Conference and Exhibition, 2023: 1-3.
- [133] HUANG Y T, HUANG H Z, WU Y, et al. Characterization of ten-mode EDFA using swept wavelength interferometer and digital holography [C]. IEEE Optical Fiber Communications Conference and Exhibition, 2024: 1-3.
- [134] WAKAYAMA Y, TAGA H, LGARASHI K, et al. DMD measurement of 114-SDM transmission fibre using low-coherence interferometry with digital holographic processing [C]. European Conference on Optical Communication, 2015: 1-3.
- [135] ABE Y, OKAMOTO A, OGAWA K, et al. Collective measurement of DMD in 6-mode 19-core fiber using low-coherence digital holography [C]. Next-Generation Optical Communication, 2020, 11309: 9-14.

作者简介



王慧慧,2019 年于天津工业大学获得学士学位,现为天津大学博士研究生,主要研究方向为光纤表征测试技术,数字全息技术,波长扫描干涉技术。

E-mail:huihuiw@tju.edu.cn

Wang Huihui received her B. Sc. degree from Tiangong University in 2019. Now she is a Ph. D. candidate at Tianjin University. Her main research interests include optical fiber characterization technology, digital holography, and swept-wavelength interferometry.



刘亚平(通信作者),2016 年于华中科技大学获得学士学位,2021 年于天津大学获得博士学位,现为天津大学副研究员,主要研究方向为大容量光纤通信技术和高性能全光计算技术。

E-mail:liuyp@tju.edu.cn

Liu Yaping (Corresponding author) received her B. Sc. degree from Huazhong University of Science and Technology in 2016 and received her Ph. D. degree from Tianjin University in 2021. Now she is an associate professor at Tianjin University. Her main research interests include high-capacity optical fiber communication technology and high-performance all-optical computing technology.



张林,2001 年于清华大学获得学士学位,2004 年于清华大学获得硕士学位,2011 年于美国南加州大学获得博士学位,现为天津大学教授、博士生导师。主要研究方向为芯片集成智能感知、集成非线性光学与宽带光源、光通信与光交叉互连、超轻薄成像与空间光场调控等。

E-mail:lin_zhang@tju.edu.cn

Zhang Lin received his B. Sc. degree from Tsinghua University in 2001, received his M. Sc. degree from Tsinghua University in 2004, and received his Ph. D. degree from the University of Southern California in 2011. Now he is a professor and doctoral supervisor at Tianjin University. His main research interests include on-chip intelligent sensing, integrated nonlinear optics and broadband sources, optical communications and interconnects, as well as imaging and light manipulation.