

文章编号: 1005-5630(2026)02-0051-09

DOI: 10.3969/j.issn.1005-5630.202412270115

# 基于空间和频谱分辨的光纤简并模式测量方法

郭军军, 刘家辰, 胡海峰

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

**摘要:** 本文对空间-频谱光纤模式测量方法进行了扩展, 使其适用于简并模式的分析。根据光纤中不同模式之间的群时延差特点, 从理论上推出了基模与高阶模以及高阶模与高阶模之间的光谱干涉公式, 并进行了相应的模拟计算与分析。利用奇异值分解法对有效折射率相同的模式进行了分析, 判定了光纤中简并模式的存在, 并对简并模式进行了求解, 实现了对光纤中所有模式的测量。此外还搭建了实验系统, 对少模光纤进行模式测量研究, 利用 CCD 相机采集光谱干涉信号, 通过傅里叶变换得到频谱分布, 分析得到光纤中各模式横向分布情况。

**关键词:** 光纤模式; 群时延差; 光谱干涉; 奇异值分解法

**中图分类号:** TN253 **文献标志码:** A

## Fiber degenerate mode measurement method based on spatial and spectral resolution

GUO Junjun, LIU Jiachen, HU Haifeng

(School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** This paper extends the spatial-spectral fiber mode measurement method to make it applicable for the analysis of degenerate modes. By leveraging the characteristic group delay differences among different modes in optical fibers, the paper theoretically derived the spectral interference formulas between the fundamental mode and higher-order modes, as well as among higher-order modes, and conducted corresponding simulation calculations and analyses. Singular value decomposition (SVD) was utilized to analyze modes with the same effective refractive index, to determine the existence of degenerate modes in the fiber, and to solve for these degenerate modes, thereby achieving the measurement of all modes in the fiber. An experimental system was established to conduct mode measurement on few-mode fibers. The spectral interference signals were captured using a CCD camera, and the frequency distribution was obtained through Fourier transform. The lateral distribution of each mode in the fiber was analyzed.

收稿日期: 2024-12-27

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (62075132); 国家自然科学基金青年科学基金项目 (12404386)

第一作者: 郭军军 (1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为复杂光场调控。E-mail: 223330732@st.usst.edu.cn

通信作者: 刘家辰 (1995—), 女, 讲师, 研究方向为纳米光子学、集成光电子学等。

E-mail: liujiachen@usst.edu.cn

**Keywords:** fiber mode; group delay difference; spectral interference; singular value decomposition method

随着光纤通信的快速发展,有关光纤通信信息容量的需求也在逐渐扩大。少模光纤的模分复用<sup>[1]</sup>技术利用光纤中多个模式传递信息,可有效提高光纤网络的容量;同时,其大模场面积通过降低光功率密度,也能减小光纤激光器中的光学非线性效应<sup>[2]</sup>。为实现光纤激光器的单模工作,以改善光束质量<sup>[3]</sup>,需要对光纤模式的功率进行分解。因此,对少模光纤模式进行精确测量是一项关键任务。此外,光纤模式的分析在色散补偿器<sup>[4]</sup>、光纤模式转换器<sup>[5]</sup>、偏振控制仪<sup>[6]</sup>等方面具有重要作用。

多种用于光纤模式测量的技术被陆续提出和采用。最早采用的是侧发射技术<sup>[7]</sup>。该技术通过蚀刻光纤来控制包层厚度和等效势垒厚度。这种控制方法既可激发光纤中的高阶模,也能测量其相对功率。2007年出现的低相干反射技术<sup>[8]</sup>不仅能测量模式的功率,还能测量少模光纤的群延迟以及色散值。随后出现的三镜环形谐振器<sup>[9]</sup>通过挤压光纤产生高阶模,使各光纤模式可以表示为谐振器的几个本征模式的叠加,通过测量谐振腔模式就可以计算出基模和高阶模的功率。有研究提出了基于空间和频谱分辨成像法(fiber mode measurement method based on spatial and spectral resolution),简称S<sup>2</sup>法<sup>[10-13]</sup>。它可以用来确定激发模式的横向分布、相对相位。该方法可以在光纤参数未知的情况下,采集被测光纤输出端横截面上的光强值,然后对该区域每个位置的光强值进行频率扫描,再根据扫描所得的光谱曲线做傅里叶变换<sup>[14-15]</sup>。利用傅里叶变换后的振幅时延图和相位时延图中的数据信息对各个模式进行求解,即可得基模和高阶模的光强分布,以及高阶模与基模的相位差<sup>[16-17]</sup>。但现有工作无法判断光纤模式是否存在简并,也无法将简并模式从光纤模场中有效分离出来<sup>[18-19]</sup>。

本文提出利用S<sup>2</sup>法来求解简并模式的测量方法。利用该方法可以判断某一光纤模式是否存在简并,并能够对存在简并的模式进行分析测量。这是对现有S<sup>2</sup>法的改进和扩展。本研究提

出的简并模式分解方法在保持模式正交性的同时实现简并模式的有效分解,显著提升了分解精度。该方法为光纤模式测量<sup>[20]</sup>提供了新思路,有望推动该领域的发展。该方法首先对入射光场进行调控,完成不同光纤入射模场下S<sup>2</sup>法的测量;接着,以这些测量数据作为样本进行奇异值分解;最后,对光纤模式是否存在简并进行判断,并完成简并模式的分解。搭建了基于空间和频谱分辨测量的光纤模式测量实验装置。选用少模光纤进行实验测试,结果表明:采用基于空间和频谱分辨测量的光纤模式测量方法,可以确定少模光纤中激发模式的横向分布;基于机器学习理论,利用奇异值分解可判断模式是否存在简并模式、确定简并模式的数量,并求解其光场分布。

## 1 实验内容

### 1.1 实验理论

根据电磁波理论,光纤中的导模电场为

$$E_{mn}(x, y, \omega, t) = E_{mn}(x, y) \cdot \exp(i\omega \cdot n_{mn} \cdot L - i\omega t) \quad (1)$$

式中:  $E_{mn}(x, y)$  为模式的振幅;  $(i\omega \cdot n_{mn} \cdot L - i\omega t)$  为模式的相位;  $\omega$  为频率;  $L$  为传播距离;  $t$  为传播时间;  $n_{mn}$  为有效折射率;  $mn$  为模式的阶数(取值可以是 01、11、21 等), 大于光纤包层折射率, 而小于芯层折射率, 其值可以利用光纤的特征方程求解。由于光纤中的光是沿光纤方向传播的, 因此传播方向上的距离就是光纤的长度  $L$ 。根据波导理论, 在光纤中的导模光场为

$$E(x, y, \omega, t) = \sum_{mn} c_{mn} \cdot E_{mn}(x, y) \cdot \exp(i\omega \cdot n_{mn} \cdot L - i\omega t) + c_{01} \cdot E_{01}(x, y) \cdot \exp(i\omega \cdot n_{01} \cdot L - i\omega t) \quad (2)$$

式中:  $c_{mn}$  为光纤中不同模式的占比系数;  $c_{01}$  为基模的占比系数;  $E_{01}(x, y)$  为基模的振幅;  $n_{01}$  为基模的有效折射率。基于空间和频谱分辨的光纤模式测量方法, 求出各个模式的相对光强

分布以及高阶模与基模的相位差。

将基模的光强定义为参考量, 高阶模的光强采用参考量来表示。求解出参考量及参考量和其他高阶模之间的关系, 就能够求得各个高阶模的光强分布。从基模和高阶模之间的光谱干涉公式出发, 推导出用于光纤模式测量的  $S^2$  法的理论公式。其前提条件是基模能量占主导。在此条件下, 高阶模与高阶模的干涉项可近似忽略。测量得到的光纤模式相位是基模与基模之间的相对相位。假设基模光场分布在光纤截面上是等相位的, 可对光纤中不同模式的相位分布进行测量。

设基模振幅  $c_{01} \cdot E_{01}(x, y)$  为参考量,  $a_{mn}(x, y)$  是基模和其他高阶模之间的关系, 定义其为空间位置系数, 具体表达式为

$$I(x, y, \omega) = E(x, y, \omega) \cdot E^*(x, y, \omega) = c_{01}^2 \cdot I_{01}(x, y) \cdot \left[ 1 + \sum_{(m,n) \neq (0,1)} a_{mn}(x, y) \cdot a_{mn}^*(x, y) \right] + c_{01}^2 \cdot I_{01}(x, y) \cdot \left[ \sum_{\substack{(m,n) \neq (0,1), \\ (p,q) \neq (0,1)}} a_{pq}^*(x, y) \cdot \exp[i\omega \cdot \tau_{pq}] \right] + c_{01}^2 \cdot I_{01}(x, y) \cdot \left[ \sum_{\substack{(p,q) \neq (0,1), \\ (m,n) \neq (0,1)}} a_{mn}(x, y) \cdot \exp[-i\omega \cdot \tau_{mn}] \right] + c_{01}^2 \cdot I_{01}(x, y) \cdot \sum_{\substack{(m,n) \neq (0,1), \\ (p,q) \neq (0,1), \\ (m,n) \neq (p,q)}} a_{mn}(x, y) \cdot a_{pq}^*(x, y) \cdot \exp[i\omega(\tau_{pq} - \tau_{mn})] \quad (6)$$

式中:  $I_{01}(x, y)$  为基模光强分布;  $(p, q)$ 、 $(m, n)$  为模式的阶取值, 如  $(0, 1)$ 、 $(0, 2)$ 、 $(1, 1)$

$$a_{mn}(x, y) = \frac{c_{mn} \cdot E_{mn}(x, y)}{c_{01} \cdot E_{01}(x, y)} \quad (3)$$

利用式 (3), 可以求出基模与高阶模之间光强关系, 具体关系式为

$$c_{mn}^2 \cdot I_{mn}(x, y) = |a_{mn}(x, y)|^2 \cdot c_{01}^2 \cdot I_{01}(x, y) \quad (4)$$

将式 (3) 代入到式 (2), 可得

$$E(x, y, \omega, t) = c_{01} \cdot E_{01}(x, y) \cdot \exp(i\omega \cdot n_{01} \cdot L - i\omega t) \left[ 1 + \sum_{mn} a_{mn}(x, y) \cdot \exp(i\omega \cdot \tau_{mn}) \right] \quad (5)$$

式中,  $\tau_{mn} = (n_{mn} - n_{01}) \cdot L \cdot c^{-1}$ , 为高阶模相对于基模的群时延差。通过干涉场与其共轭相乘, 得出干涉场强度为

等; \* 表示共轭。对光谱干涉强度作傅里叶变换

$$F(x, y, \tau) = c_{01}^2 \cdot F_{01}(x, y, \tau) \cdot \left[ 1 + \sum_{(m,n) \neq (0,1)} |a_{mn}(x, y)|^2 \right] + c_{01}^2 \cdot \sum_{\substack{(m,n) \neq (0,1), \\ (p,q) \neq (0,1)}} a_{pq}^*(x, y) \cdot F_{01}(x, y, \tau - \tau_{pq}) + c_{01}^2 \cdot \sum_{\substack{(p,q) \neq (0,1), \\ (m,n) \neq (0,1)}} a_{mn}(x, y) \cdot F_{01}(x, y, \tau + \tau_{mn}) + c_{01}^2 \cdot \sum_{\substack{(m,n) \neq (0,1), \\ (p,q) \neq (0,1), \\ (m,n) \neq (p,q)}} a_{mn}(x, y) \cdot a_{pq}^*(x, y) \cdot F_{01}(x, y, \tau - \tau_{pq} + \tau_{mn}) \quad (7)$$

式中:  $F_{01}(x, y, \tau)$  为  $I_{01}(x, y)$  的傅里叶变换。式 (7) 中的第 2 项和第 3 项是基模与高阶模之间的干涉, 最后一项是基模与高阶模之间的干涉。图 1 所示为空间上任意一点  $(x, y)$  理论上仿真出来的光谱图和傅里叶变换后的振幅群时延差图。所选取的光纤纤芯直径为  $18.5 \mu\text{m}$ , 折射率为 1.468 7。包层折射率为 1.462 8, 数值孔径 (NA) 为 0.13, 光纤长度为 40 m。当波长为  $1.549 \mu\text{m}$  时, 归一化频率为 4.934 5。光纤中存在  $LP_{01}$ 、 $LP_{02}$ 、 $LP_{11}^o$ 、 $LP_{11}^e$ 、 $LP_{21}^o$ 、 $LP_{21}^e$  6 种模式, 其

中  $LP_{11}^o$ 、 $LP_{11}^e$  和  $LP_{21}^o$ 、 $LP_{21}^e$  是两组简并模式, 基模能量占比 81%。

图 1 (b) 中群时延差  $\tau_1$ 、 $\tau_2$ 、 $\tau_3$  处的 3 个尖峰, 分别是高阶模  $LP_{11}$ 、 $LP_{21}$ 、 $LP_{02}$  与  $LP_{01}$  模式干涉形成的。定义  $f_{mn}(x, y)$  为  $F(x, y, \tau)$  在  $\tau$  取  $\tau_{mn}$  时的模值比上  $\tau$  取 0 时的模值, 其具体表达式为

$$f_{mn}(x, y) = \frac{|F(x, y, \tau_{mn})|}{|F(x, y, 0)|} = \frac{|a_{mn}(x, y)|}{1 + \sum_{(m,n) \neq (0,1)} |a_{mn}(x, y)|^2} \quad (8)$$

将上式化简得

$$|a_{mn}(x,y)| = a_{fm}(x,y) \left[ 1 - \sqrt{1 - 4 \sum_{(p,q) \neq (0,1)} f_{pq}^2(x,y)} \right] \cdot \left[ 2 \cdot \sum_{(p,q) \neq (0,1)} f_{pq}^2(x,y) \right]^{-1} \quad (9)$$

利用式(9)可以求出基模与高阶模之间空间位置系数的模值。通过式(4)和式(9)可以求出少模光纤中所有模式在空间位置上每个点的光强值。具体关系式为

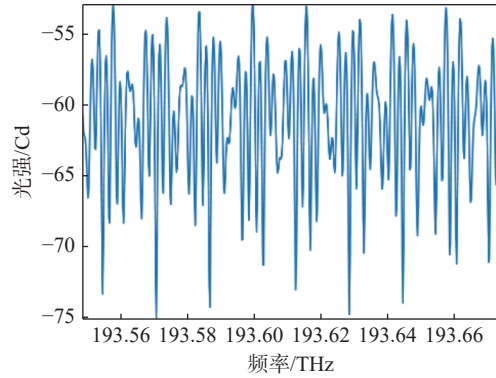
$$\sum_{\omega} c_{01}^2 \cdot I_{01}(x,y,\omega) = \frac{1}{1 + \sum_{mn} |a_{mn}(x,y)|^2} \cdot \sum_{\omega} I(x,y,\omega) \quad (10)$$

$$\sum_{\omega} c_{mn}^2 \cdot I_{mn}(x,y,\omega) = \frac{|a_{mn}(x,y)|^2}{1 + \sum_{mn} |a_{mn}(x,y)|^2} \cdot \sum_{\omega} I(x,y,\omega) \quad (11)$$

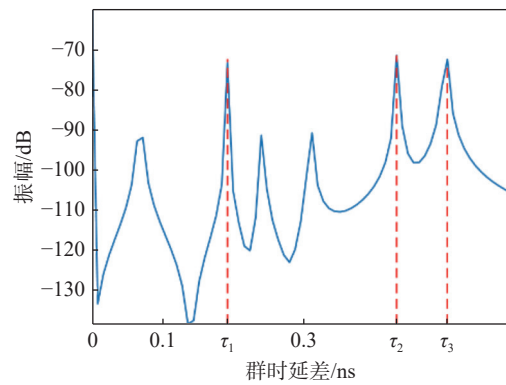
式中,  $\sum_{\omega} I(x,y,\omega)$  为对干涉场强  $I(x,y,\omega)$  的频率积分。将式(6)作傅里叶变换, 取其相位, 当  $\tau = \tau_{mn}$  时, 函数值就是  $LP_{mn}$  模与  $LP_{01}$  模的相位差。

### 1.2 简并模式的求解理论

所采用的光纤为圆柱形。由于圆形具有对称性, 且测试光纤是少模光纤, 为了便于分析讨论, 考虑设定一种特定的少模光纤。该光纤一具有  $LP_{01}$ 、 $LP_{02}$ 、 $LP_{11}^o$ 、 $LP_{11}^e$ 、 $LP_{21}^o$ 、 $LP_{21}^e$  6 种模式。其中,  $LP_{11}^o$  和  $LP_{11}^e$  互为简并模式, 它们的有效折射率相等;  $LP_{21}^o$  和  $LP_{21}^e$  也互为简并模式, 它们的有效折射率也相等。但它们空间位置上每个点的振幅不同。基于空间和频谱分辨的光纤模式测量方法是利用群时延差来对模式进行分解的。由于互相简并的两个模式的群时延差是相同的, 因此利用傅里叶变换求解出来的模式是一个加和的复合模式。因此, 需要对该复合模式进一步分解。当  $LP_{11}^o$  和  $LP_{11}^e$  互为简并模式时, 其电场为



(a) 某探测点光强随频率变化的光谱曲线



(b) 傅里叶变换后的振幅群时延差曲线

图 1 少模光纤仿真得到的干涉结果

Fig. 1 The interference results obtained from the simulation of few-mode fibers

$$E(x,y,L,\omega,t) = [c_{11}^o \cdot E_{11}^o(x,y) + c_{11}^e \cdot E_{11}^e(x,y)] \cdot \exp(i\omega \cdot n_{11} \cdot L - i\omega t) \quad (12)$$

式中:  $E_{11}^o(x,y)$  和  $E_{11}^e(x,y)$  分别为  $LP_{11}^o$  和  $LP_{11}^e$  模式的振幅, 互相正交;  $c_{11}^o$  和  $c_{11}^e$  为模式的占比系数。由式(12)可知, 互为简并的两个模式  $LP_{11}^o$  和  $LP_{11}^e$  的电场表示式组合成一个新的电场模式。该电场的振幅大小为  $E_{11}^o(x,y)$  和  $E_{11}^e(x,y)$  的加和。利用基于空间和频谱分辨的光纤模式测量方法求解时, 根据群延迟差特点只能求出两个简并模式加和起来的组合模式的光强和相位, 利用图 1(b) 中的峰值可求出  $LP_{11}^o$  和  $LP_{11}^e$  简并模式的空间位置系数为

$$|a_{11}(x,y)| = |a_{11}^o(x,y) + a_{11}^e(x,y)| \quad (13)$$

式中,  $a_{11}^o(x,y)$  和  $a_{11}^e(x,y)$  分别是  $LP_{11}^o$  和  $LP_{11}^e$  模式的空间位置系数。由于  $E_{11}^o(x,y)$  和  $E_{11}^e(x,y)$  互为正交,  $a_{11}^o(x,y)$  和  $a_{11}^e(x,y)$  也互为正交, 因此式(11)可以改写为

$$\sum_{\omega} c_{11}^2 \cdot I_{11}(x, y, \omega) = \frac{|a_{11}^o(x, y) + a_{11}^e(x, y)|^2 \cdot \sum_{\omega} I(x, y, \omega)}{1 + |a_{02}(x, y)|^2 + |a_{11}^o(x, y) + a_{11}^e(x, y)|^2 + |a_{21}^o(x, y) + a_{21}^e(x, y)|^2} \quad (14)$$

式(14)与式(11)的区别为, 用  $|a_{11}^o(x, y) + a_{11}^e(x, y)|$  代替了  $|a_{11}(x, y)|$ 。实际上, 由于光纤是圆柱形的, 所以  $LP_{11}^o$  和  $LP_{11}^e$  模式的群时延相同, 振幅不同, 从而导致这两个模式的振幅叠加在一起。因此, 可用  $a_{11}^o(x, y)$  和  $a_{11}^e(x, y)$  这两个空间位置系数之和代替  $a_{11}(x, y)$ 。通过式(14)可知, 基于空间和频谱分辨的光纤模式测量方法只能求出由两个相互正交的模式加和起来的复合模式的光强, 同样相位差求得的也是复合后的。该理论推导过程可以扩展到对未知模式数量光纤的分析中。

本文介绍了一种数据处理方法——奇异值分解(singular value decomposition, SVD)法。它一般适用于数据降维、图像压缩、信号处理等领域, 其计算复杂度与矩阵的规模有关, 取决于矩阵的行数和列数。SVD 法的优势在于它能够严格保证简并模式之间的正交性。为实现入射光场的调控, 假设在窄频率带宽范围内光纤模式保持不变, 在此范围内取多个子频带进行  $S^2$  模式测量。将每次测得的结果进行归类, 对不同入射模场条件下求得的同一模式的不同模场数据进行整理。将这些光场数据重新排列成长度为  $l^2$  的列向量。采集  $M$  个这样的列向量, 组成一个复矩阵

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} x_1^1 & x_1^2 & \cdots & x_1^M \\ x_2^1 & x_2^2 & \cdots & x_2^M \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{l^2}^1 & x_{l^2}^2 & \cdots & x_{l^2}^M \end{pmatrix}_{l^2 \times M} \quad (15)$$

矩阵  $\mathbf{A}$  的列数( $M$ )为样本数量, 行数为采样数据。定义矩阵  $\mathbf{C} = \mathbf{A} \times \mathbf{A}^\dagger$ , 式中  $\mathbf{A}^\dagger$  是矩阵  $\mathbf{A}$  的共轭转置。然后将矩阵  $\mathbf{C}$  进行奇异值分解, 求出其奇异值  $V = \{V_1, V_2, \dots, V_{l^2}\}$ , 对应每个奇异值的向量为  $N = \{N_1, N_2, \dots, N_{l^2}\}$ 。据奇异值分解原理, 最大奇异值对应的向量就是简并模式的光场信息。需要补充说明的是, 本文提出的分析方法不仅适用于二重简并, 也适用于具有更高简并度的光纤模式的分析。

## 2 实验装置

基于空间和频谱分辨的光纤模式测量方法的实验装置如图 2 所示。其主要由可调谐激光器 (TSL-550, Santec, 1 480~1 630 nm)、裸纤适配器、少模光纤 (纤芯直径  $d=18.5 \mu\text{m}$ , 数值孔径 0.13, 长度  $L=50 \text{ m}$ )、物镜 (40 $\times$ , 数值孔径 0.65)、偏振片 (通光孔径  $\phi=21.5 \text{ mm}$ )、CCD 相机 (Bobcat-640-GE, Xenics, 分辨率 640 $\times$ 512) 等组成。选择物镜数值孔径(0.65)大于测试光纤数值孔径(0.13)的目的是确保从测试光纤出射的光能够被物镜全部收集。激光器发出的光经法兰耦合进入待测少模光纤后, 从光纤另一端出射的光依次通过物镜进行准直和放大, 再经偏振片将各模式光的偏振态调整一致, 最后由 CCD 相机采集各点的光强值。通过频率扫描, 测得光强随频率变化曲线。对该曲线作傅里叶变换分析, 求解出光纤中的各个模式。实验中, 频率的扫描范围为 193.050 1~193.422 5 THz, 频率间隔为 0.000 7 THz, 频率采样点数为 532 个。选择该频率范围及间隔的目的是为了在频域信号中能够清晰分辨出各个模式的群时延差, 从而提高群时延差测量的准确性。

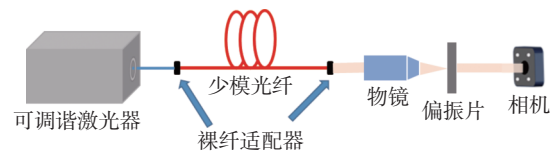


图 2 基于空间和频谱分辨的光纤模式测量方法的实验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the experimental setup based on a spatially and spectrally resolved optical fiber pattern measurement method

## 3 实验结果

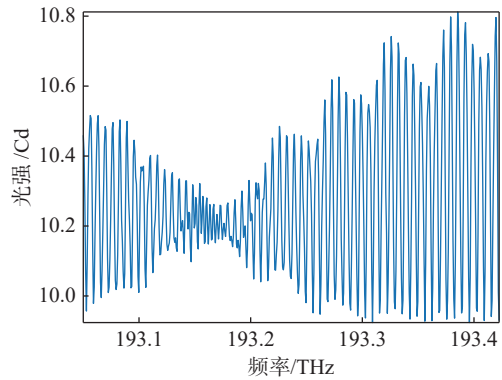
实验采用四模阶跃型光纤, 长 50 m, 纤芯直径为  $18.6 \mu\text{m}$ , 数值孔径为 0.13。其在 1 500~

1 600 nm 共有 4 个模式： $LP_{01}$  模式、 $LP_{11}$  模式、 $LP_{21}$  模式和  $LP_{02}$  模式。测得的实验结果见图 3。

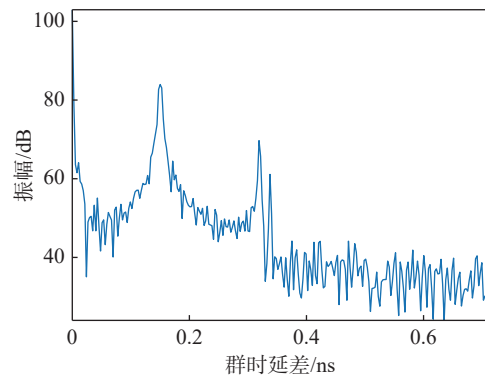
测得光纤出射端面上某一点的光强随光源频率变化的曲线，结果如图 3(a)所示。对该曲线作傅里叶变换，得到如图 3(b)所示的振幅群时延差曲线。图 3(b)所示曲线中，横坐标为 0 处的峰是由干涉光强中不随频率变化的常量经傅里叶变换后得到的，而另外 3 个比较高的峰则是由基模与高阶模的干涉效应所产生。由于基模能量占主导，所以高阶模与基模干涉形成的峰比较高，而高阶模与高阶模之间的干涉形成的峰比较低。选取振幅群时延差曲线中 4 个最高峰值，再结合  $S^2$  法，计算得出光纤传播各个模式的光强和相位分布结果，如图 4 所示。

图 4 展示了各模式的光强分布及相较于基模的相位差，与理论结果基本一致。

对于简并模式的处理，本文假设在窄频率带宽范围内光纤模式保持不变，实验中频率为 188.09~193.42 THz(对应波长 1 551~1 590 nm)。在该范围内取 5 个子频带 (188.09~188.68 THz、189.27~189.87 THz、191.69~192.31 THz、192.31~192.92 THz 和 193.05~193.42 THz)，分别进行 5 次  $S^2$  模式测量。在整个测量过程中，保持测量装置和光纤静止，以提高测量系统的稳定性和测量结果的可靠性。将每次测量的光纤模式光强和相位结果中同模式的光场信息放入一个矩阵中，得到 4 个矩阵，然后对每个矩阵进



(a) 某点的光强随频率变化曲线



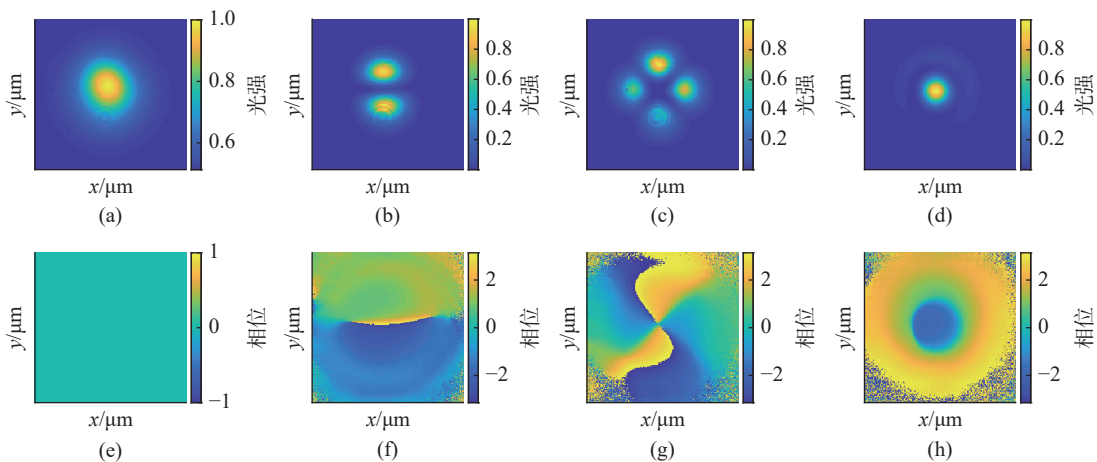
(b) 傅里叶变换后的振幅群时延差曲线

图 3 基于空间和频谱分辨光纤模式测得的干涉结果

Fig. 3 Interference results measured in the fiber mode measurement experiment based on spatial and spectral resolution

行奇异值分解，可求出每个矩阵的奇异值和对应的向量，结果如图 5 所示。

从图 5 可知， $LP_{01}$  和  $LP_{02}$  模式奇异值分解



(a)~(d)为  $LP_{01}$ 、 $LP_{11}$ 、 $LP_{21}$  和  $LP_{02}$  模式的相对光强分布；(e)~(h)为高阶模与基模的相位差分布。

图 4 基于空间和频谱分辨光纤模式测得的光强和相位差

Fig. 4 The results measured from the fiber mode measurement experiment based on spatial and spectral resolution

后只有一个最大奇异值, 其余奇异值近似为 0, 由此说明这两个模式不存在简并。这两个模式对应的特征图案与理论结果基本一致, 验证了该测量方法的有效性。 $LP_{11}$  和  $LP_{21}$  模式奇异值分解后有两个最大奇异值, 其余奇异值近似为 0, 说明这两个模式存在二重简并, 其特征图案与理论结果基本一致。

为了验证该方法对噪声的鲁棒性, 对  $LP_{01}$ 、 $LP_{02}$ 、 $LP_{11}$  和  $LP_{21}$  模式样本进行加噪声处理后, 再进行 SVD 分解, 结果如图 6 所示。

在扫描过程中引入大小为 13 dB 的噪声后, 利用重构算法对焦点场进行重构, 并分析噪声对重构精度的影响。结果显示, 在一定噪声范围内, 重构算法的抗干扰能力比较理想。

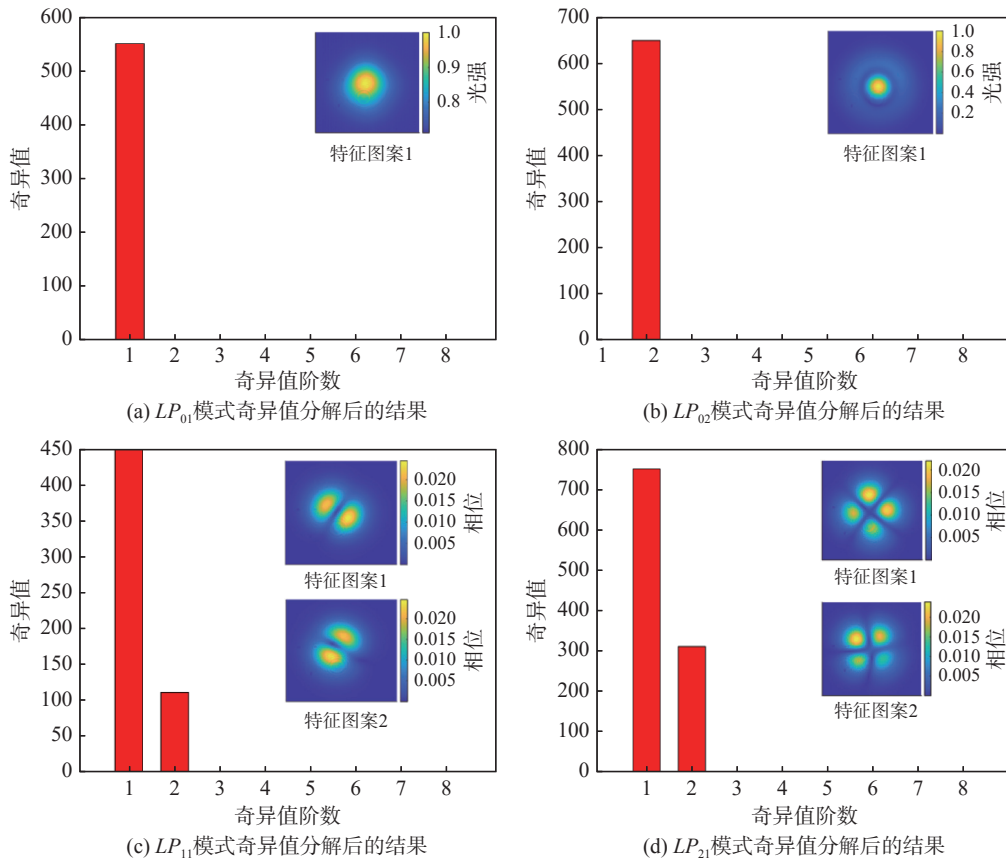
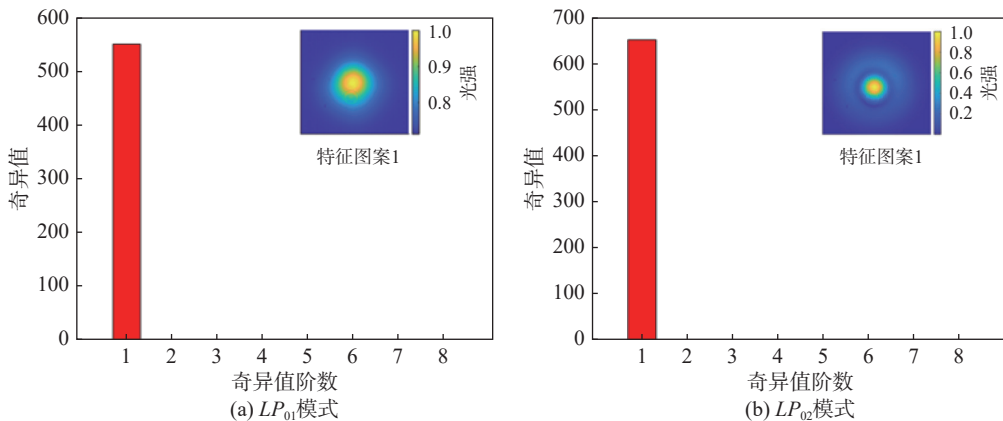


图 5 简并模式分解实验结果  
Fig. 5 Results of experimental data in degenerate modes



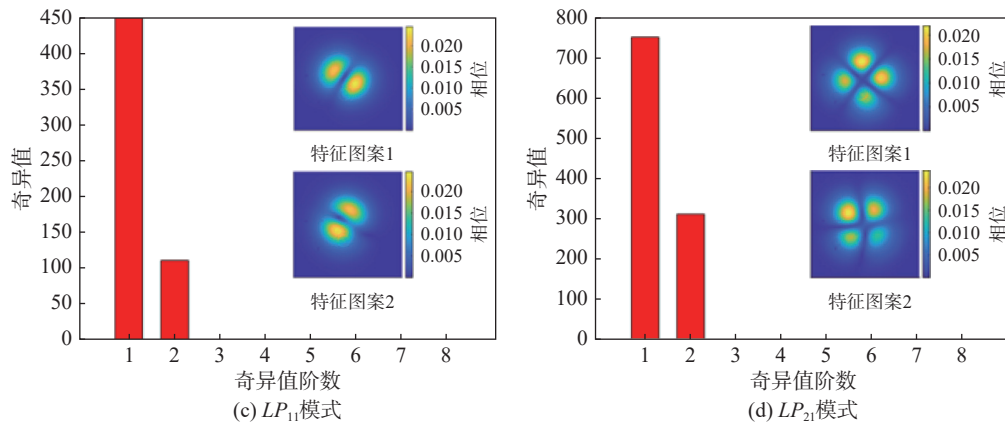


图 6 加入噪声(13 dB)后 SVD 分解结果

Fig. 6 SVD decomposition results after adding noise (13 dB)

## 4 讨 论

采用一种基于空间和频谱分辨的光纤模式测量方法对少模光纤模式进行了测量和分析。利用光纤中传输的激发模式具有不同群时延的特点,建立了基模与高阶模之间干涉的理论模型,给出了模式重建分析的方法。本文的创新点在于:利用奇异值分解法对简并模式进行特征提取,根据提取的奇异值和对应向量来判断简并模式的个数,并实现简并模式的分解,对现有  $S^2$  光纤模式测量方法进行了扩展。同时,利用相应的光学仪器搭建了一套完备的实验装置,对少模光纤的模式分布进行了实验研究。结果表明,采用本文提出的方法可以实现光纤模式的测量。与现有方法相比,该方法可以对模式是否存在简并进行判断,且能在保持正交性的同时对简并模式进行有效分解。另外,对光纤中可能存在的有效折射率相近的近简并模式而言,在传统  $S^2$  测量方法中,需要采用更为密集的频率分格扫描来完成模式的分析。本文提出的方法有助于在较粗略的频率分格测量中判断光纤中是否存在近似简并模式,保证光纤模式实验分析的完备性。实验所面临的问题是,难以使基模能量占据主导地位。为解决这一问题,将单模光纤与少模光纤熔接,成功实现了少模光纤中基模能量占主导的状态,有效解决了上述实验难题。后续将针对不同偏振态(如相互正交偏振态等)开展模式测量工作,为相关研究和应用奠定基础。对不同偏振态模式的

测量,能为通信网络和传感网络领域的研究提供关键数据支持,为该领域研究提供重要依据。

## 参考文献:

- [1] BERDAGUÉ S, FACQ P. Mode division multiplexing in optical fibers[J]. *Applied Optics*, 1982, 21(11): 1950 – 1955.
- [2] CAI P J, LIAO T Q. Multi-wavelength fiber laser based on highly erbium-doped fiber and nonlinear effects in SMF[J]. *Optik*, 2020, 206: 164257.
- [3] WU F Y, ZHONG S, WANG X, et al. Improving the beam quality of single-grating spectrally combined fiber lasers with adaptive optics[J]. *Applied Optics*, 2023, 62(31): 8248 – 8260.
- [4] POOLE C D, WIESENFELD J M, DIGIOVANNI D J, et al. Optical fiber-based dispersion compensation using higher order modes near cutoff[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1994, 12(10): 1746 – 1758.
- [5] RAMACHANDRAN S, WANG Z Y, YAN M. Bandwidth control of long-period grating-based mode converters in few-mode fibers[J]. *Optics Letters*, 2002, 27(9): 698 – 700.
- [6] RAMACHANDRAN S, DAS M, WANG Z, et al. High extinction, broadband polarisers using long-period fibre gratings in few-mode fibres[J]. *Electronics Letters*, 2002, 38(22): 1327 – 1328.
- [7] SZCZEPANEK P S, BERTHOLD III J W. Side launch excitation of selected modes in graded-index optical fibers[J]. *Applied Optics*, 1978, 17(20): 3245 – 3247.
- [8] HAMEL P, JAOUËN Y, GABET R, et al. Optical low-

- coherence reflectometry for complete chromatic dispersion characterization of few-mode fibers[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(9): 1029 – 1031.
- [9] ANDERMAHR N, THEEG T, FALLNICH C. Novel approach for polarization-sensitive measurements of transverse modes in few-mode optical fibers[J]. *Applied Physics B*, 2008, 91(2): 353 – 357.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] NGUYEN D M, BLIN S, NGUYEN T N, et al. Modal decomposition technique for multimode fibers[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(4): 450 – 456.
- [13] OTTO H J, JANSEN F, STUTZKI F, et al. Improved modal reconstruction for spatially and spectrally resolved imaging( $S^2$ )[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31(8): 1295 – 1299.
- [14] 胡丽荔, 冯国英, 董哲良. 基于空间和频谱分辨的光纤模式测量方法 [J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(8): 2517 – 2522.
- [15] HU H F, LI Z H, ZHU Y L, et al. Non-degenerate mode power decomposition in optical fiber without prior knowledge[J]. *Optik*, 2020, 206: 164354.
- [16] Gao H, Hu H, Zhan Q. Generation and applications of spectral-spatially correlated principal mode in multimode fibers[J]. *Optica*, 2024, 11(2): 205 – 213.
- [17] Sharma V, Brandmüller D, Bütow J, et al. Universal photonic processor for spatial mode decomposition[J]. *Nature Communications*, 2025, 16(1): 7982.
- [18] Sánchez-Montes A R, Singh S, Márquez A, et al. Nonlinear modal decomposition of structured light[J]. *Optics Express*, 2025, 33(19): 41261 – 41270.
- [19] Mangini F, Ferraro M, Tonello A, et al. High-temperature wave thermalization spoils beam self-cleaning in nonlinear multimode GRIN fibers[J]. *Optics Letters*, 2023, 48(18): 4741 – 4744.
- [20] Hu X, Wu J, Gao Y. A review of structural health monitoring for flexible composite materials[J]. *Applied Composite Materials*, 2025, 32(2): 431 – 471.

(编辑: 李晓莉)