

多模光纤中基于压缩传感的光谱探测*

孟凡^{1)†} 张云佐¹⁾ 冯巍巍¹⁾ 吴鹏飞¹⁾ 邹戈胤²⁾

1) (石家庄铁道大学信息科学与技术学院, 石家庄 050043)

2) (石家庄邮电职业技术学院培训部, 石家庄 050021)

(2020年1月3日收到; 2020年4月7日收到修改稿)

随着集成光学器件的发展, 昂贵、笨重的商用光谱仪迫使人们更加热衷于对高性能、集成化和低成本的光谱计进行研究. 本研究基于多模干涉图案对单波长的强烈依赖特性, 采用压缩传感算法实现了对任意形状信号光谱的探测. 该锥形光纤光谱计具有 20 pm 的光谱分辨率和 200 nm 以上的探测带宽, 光谱重建结果显示了其优异的同色异谱效应, 为今后便携式和多功能的片上集成系统提供了有效途径.

关键词: 多模光纤, 光谱计, 压缩传感

PACS: 42.81.-i, 42.79.-e, 42.30.-d

DOI: 10.7498/aps.69.20200014

1 引言

近些年来, 光导纤维被广泛研究和应用在非线性光学^[1-5]、通信传输^[6-8]、环境传感^[9-13]以及光谱探测^[14-17]等方面. 在光谱探测方面, 商用光谱仪主要通过光栅、棱镜等色散组件将不同频谱分量导向已标定好的探测器阵列, 通过绘制光子数与波长值(空间位置)的函数关系达到光谱探测的功能, 但具有昂贵、庞大和笨拙等缺点. 随着光学器件的多样性和集成化发展, 具有微纳尺寸的高性能光谱计受到越来越多的关注. 高性能光谱计大致可分为波导耦合型光谱计和空间耦合型光谱计两种类型, 前者主要将不同光谱成分引导至标定位置的谐振腔中, 通过不同位置的强度值获得待测光谱信息; 后者是将不同光谱成分产生的强度图案集与待测信号图案进行矩阵运算处理, 得到的一维向量即为待测光谱信息, 该类光谱计利用相关处理算法换取了更加优异的性能指标. Redding 等^[15]通过探测

多模光纤输出端干涉散斑图像, 在 4 cm 长度的光纤上实现了 350 nm 的探测带宽和 1 nm 的光谱分辨率, 但该器件容易受到外界干扰, 性能也不够理想. Hornig 等^[17]采用拉锥空心光纤中产生的辐射流和截止点进行波长标定, 在近 100 nm 探测带宽内实现了 10 pm 的光谱分辨率, 工作原理决定了该器件易受耦合条件和偏振状态的影响.

本文设计并制作了基于锥形多模光纤的光谱计, 通过探测器阵列收集锥形光纤辐射且具有波长依赖特性的模式干涉图案, 可以实现对任意形状光源谱线的重建. 在强度干涉图案上进行空间通道的优化采样后, 再对单波长校样矩阵和待测光源产生的强度图案进行压缩传感算法处理, 在 430—630 nm 的可见光范围内实现 20 pm 光谱分辨率的同时, 得到最优光谱重建误差为 0.02. 该研究成果不仅为高性能、低成本和便携式光谱计的设计提供参考借鉴, 也为多功能“片上实验室”系统的构架带来了可能途径.

* 河北省自然科学基金青年基金(批准号: A2020210001)、石家庄铁道大学基本科研业务费项目青年科研创新专项(批准号: ZQK202008)和国家自然科学基金(批准号: 61702347)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: mengfan3426@126.com

2 基于压缩传感算法的光谱重建模型

2.1 理论模型

当具有单一频率 f 的光信号进入多模光纤后, 会激发出众多相互干涉的传输模式, 它们的传播常数 $\beta(m, n)$ 取决于各模式阶数 m 和 n , 即

$$\beta_{m,n} = n_1 k_0 [1 - 2(m + 2n)^2 \Delta / N]^{1/2}, \quad (1)$$

其中, $k_0 = 2\pi f / c$ 是自由空间的波数, f 和 c 分别为相应的频率和波长; m 和 n 为模式指数; N 为所能支持的最大模式数; $\Delta = (n_1 - n_2) / n_1$, n_1 和 n_2 分别为纤芯和包层的折射率. 因此, m 和 n 的所有组合数量即为 N 值, 它们相互干涉构成与波长 λ (或频率 f) 相对应的特征强度分布图案, 即

$$I(f, x, y, t) = |E(f, x, y, t)|^2 = \left| \sum_{m,n} A_{m,n}(x, y) \cos(2\pi f t - \beta_{m,n} z + \phi_{m,n}(x, y)) \right|^2, \quad (2)$$

其中 $A_{m,n}(x, y)$ 和 $\phi_{m,n}(x, y)$ 分别为入射光在位置点 (x, y) 的初始振幅和相位. 在光谱计的探测带宽内对 Y 个波长数值 (频谱通道) 进行扫描后, 可以得到与波长值对应的强度分布图案集. 在每个图案空间选取 X 个采样位置 (空间通道), 组成维度为 $X \times Y$ 的二维矩阵, 即校样矩阵 C . 为了选取最优的空间通道, 将所有列向量进行内积运算得到相关函数曲线, 以其信噪比为目标函数, 通过采样点局部优化算法, 可以确定 X 的最优数值和空间通道间距. 校样矩阵包含了每个波长值下多模干涉产生的空间信息, 同时也表征着不同器件和测量系统的特性.

当一束包含众多频率分量 (f_1, f_2, \dots, f_X) 的待测信号进入多模光纤时, 将产生总的强度分布图案. 根据电磁场理论可知, 不同频率分量产生的传播模式之间相互独立, 且当频率间隔足够小时, 所有频率处功率和趋向于总功率 P . 在该图案中选取相应的 X 个空间通道 $(P_1, P_2, \dots, P_X)^{-1}$, 它与校样矩阵 C 具有如下关系:

$$P_x = \sum_{x=1}^X C_{xy} P(\lambda_y), \quad (3)$$

即

$$\begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \vdots \\ P_X \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & \cdots & C_{1Y} \\ C_{21} & C_{22} & \cdots & C_{2Y} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{X1} & C_{X2} & \cdots & C_{XY} \end{pmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P(\lambda_1) \\ P(\lambda_2) \\ \vdots \\ P(\lambda_Y) \end{bmatrix},$$

这里 C_{xy} ($y = 1, 2, \dots, Y$) 是第 y 个波长的第 x 个空间通道的校样权值, $P(\lambda_y)$ 为第 y 个波长对应的幅度值. 对上式进行基于奇异值分解的 Moore-Penrose 伪逆矩阵运算, 信号低于某一阈值的矩阵元素 (视为噪声) 重置为零 (C_{yx}^+), 得到最小二乘方解 $P(\lambda_y) = C_{yx}^+ P_x$. 实验中 $P = \{P_x\}$ 由探测器获得, $P(\lambda) = \{P(\lambda_y)\}$ 可通过设置激光器进行自动扫描. 在原始解 $P_0(\lambda)$ 的基础上, 需要多次重复非线性优化步骤来求解最小的能量函数^[18-20]

$$E = \|CP(\lambda) - P\|_2 = \sum_x \left| \sum_y C_{yx} P(\lambda_y) - P_x \right|^2. \quad (4)$$

为了衡量光谱重建效果, 定义重建误差对该光谱计和商用光谱计的探测结果进行对比:

$$\mu = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_y [P'(\lambda) - P(\lambda)]^2} / \left[\frac{1}{M} \sum_y P'(\lambda) \right], \quad (5)$$

$$M = \frac{\Delta\lambda}{\delta\lambda}, \quad (6)$$

其中, $P'(\lambda)$ 为商用光谱仪的测量结果, $P(\lambda)$ 为该光谱计测量结果, M 为频谱通道数目, $\Delta\lambda$ 为探测带宽, $\delta\lambda$ 为频谱通道间隔. 当优化 μ 值达到最小时, 即可完成光谱重建 (探测) 过程.

2.2 实验系统

基于多模光纤的光谱探测系统如图 1(a) 所示. 各种类型的光源 (用于校样的窄带光源和待测的宽谱光源) 通过光学透镜组合 (入射端 H_1) 将光信号耦合进入锥形多模光纤中, 众多模式相互干涉后形成多模干涉图案并由光纤侧面泄漏出来 (g). 信号通过放大倍数为 $17\times$ 、数值孔径为 0.4 的显微物镜 (接收端 H_c) 后由可见光相机 (型号 Photometrics CoolSNAP K4, 像素数为 2048×2048 , 尺寸为 $7.4 \mu\text{m} \times 7.4 \mu\text{m}$, 积分时间设置为 5ms) 单次拍摄成像. 这里得到的干涉图案 $g' = H_1 \cdot g \cdot H_c$ 由测量系统本身和器件共同决定. 多模光纤采用 Thorlabs 公司 AFS105/125y 型号的裸光纤, 在氢气焰流技术下拉制成长度 1mm 、直径 $30-80 \mu\text{m}$ 的锥形结构, 固定封装后供测量使用. 当用窄带激

光脉冲进行波长扫描时,可以观察到多模干涉图案无规律、流动性的闪烁现象,图 1(b) 所示为窄带激光器分别设置波长为 635.0, 635.5, 636.0 和 636.5 nm 时得到的模式干涉图像,具有明显的波长依赖特性.为了获取校样矩阵 C ,可以设置激光器在探测带宽内以特定的波长间隔进行扫描,通过计算不同波长下干涉图像的内积来优化选择空间通道.由于

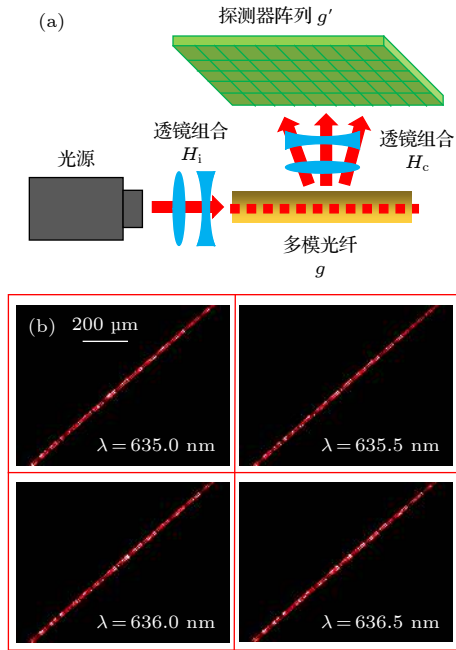


图 1 (a) 基于多模光纤的光谱探测系统示意图; (b) 不同波长下得到的模式干涉图案
 Fig. 1. (a) The structural diagram of spectroscopy detection based on the multimode fiber; (b) the multimode interference patterns at different wavelengths.

模式干涉图案与耦合条件、偏振状态等高度相关,可以通过存储不同情况下的多个校样矩阵或自动优化装置参数下的一个校样矩阵来降低光谱的重建误差.

实验系统测量得到校样矩阵和待测信号图案后,可以利用图 2 所示的压缩传感网络进行处理:将 Y 个频谱通道下的每个图案选取内积优化后的 X 个空间通道,得到 $X \times Y$ 的校样矩阵存储在压缩传感网络中.随后,利用已知光谱的信号对该网络进行训练,包括噪声阈值设置、通道权值(入射端激光功率动态范围和接收端相机动态响应范围引入的频谱通道偏差)校正和能量函数优化等,得到该器件对应的压缩传感网络.当待测信号生成 $X \times 1$ 的强度干涉图案后,与校样矩阵进行 Moore-Penrose 伪逆矩阵变换、最小二乘方运算等,同时考虑重建误差和能量函数两个非线性约束条件,即得到理想的重建光谱.校样矩阵的获取和传感网络训练可以在最初执行一次,后续光谱探测只需通过程序自动运算,时间在几秒以内.

3 实验测量结果

在光谱分辨率的标定中,将一对 c 的波长间隔逐渐增加并进行重建.由于波长间隔远大于激光线宽,后者对分辨率的影响可以忽略不计.当波长间隔为 20 pm 时,这对脉冲的重建光谱可以分辨,即两个归一化重建光谱的交点低于峰值的一半,也就

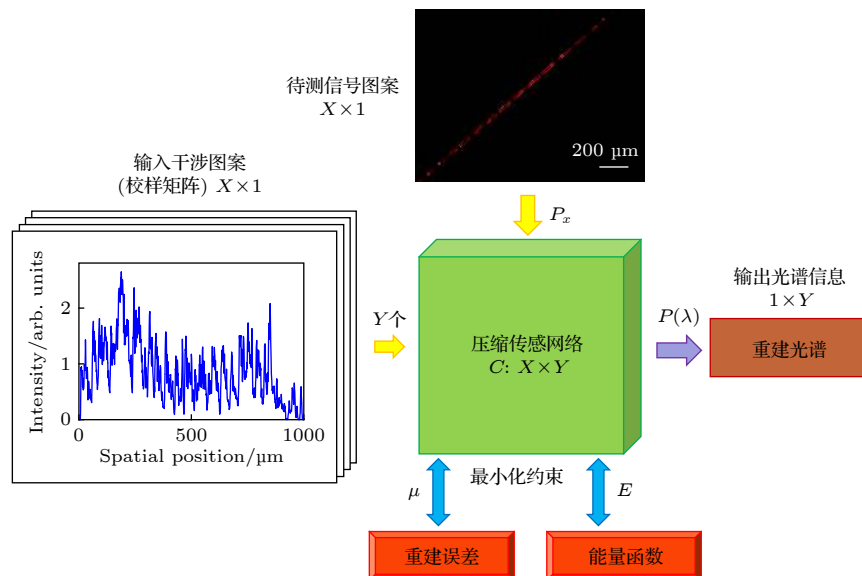


图 2 基于多模光纤光谱计的光谱探测原理
 Fig. 2. The detecting principle of the spectrometer based on a multimode fiber.

是两个波长产生的模式干涉图案可以被探测器阵列区分. 如图 3(a) 所示, 由可分辨的两个尖峰得到该光纤光谱计的光谱分辨率为 20 pm, 比商用光栅光谱仪 (Princeton Instrument SP2500, 相应波段光谱分辨率为 0.26 nm) 高一个数量级. 由于测量系统 (显微装置、成像设备等) 和环境扰动 (如温度、振动等) 在光谱计工作过程中会引入噪声. 在校样矩阵转置过程中, 微小的噪声会变为无穷大, 而有限的信号则依然是有限值, 这样有用的信号被淹没在噪声中, 极大恶化了压缩传感算法的探测结果. 如图 3(b) 所示, 在算法中选取不同的噪声阈值, 在矩阵转置运算前消除其影响, 得到了不同的重建误差: 曲线近似呈“U”形, 当阈值 $\sigma=0.015$ 时, 重建误差 μ 具有最小值, 为 0.02.

在光谱重建性能测试中, 选取了不同中心波长 (颜色) 和带宽的宽谱 LED 光源进行测试. 一般来说, 两种不同功率配比的可见光会形成肉眼或 RGB 相机无法区分的一种混合色, 即同色异谱效应. 为了实现毫秒量级的探测时间, 这里选用单色

器 (Acton SP2500) 和超连续谱光源 (NKT SuperK Extreme) 组合产生波长范围为 430—630 nm、频谱通道间隔为 2 nm 的校样矩阵. 由于单色器滤波带宽为 1 nm, 因此在获取校样矩阵时选取 2 nm 的间隔可以避免通道间相互串扰. 如图 4(a) 和图 4(b) 所示, 实验中分别选择不同强度和带宽的蓝/绿和黄/红两种组合的探测信号进行光谱探测, 红色实线和蓝色圆圈分别为商用光栅光谱仪 (Princeton Instruments, 分辨率为 0.12 nm) 和该光纤光谱计获得的探测结果, 两者符合效果理想, 重建误差近似 0.04. 需要说明的是, 为了提高探测速率 (减少重建时间) 和突出拟合效果, 我们选取了较大间隔的通道作为粗略校样矩阵进行光谱重建. 探测系统的信噪比定义为所有频谱通道功率偏差之和与总输入功率的比值: 对于平滑连续的宽谱信号, 不仅所有频谱通道强度值为正值, 通道间隙也有信号覆盖, 因此总强度干涉图案中存在部分非相关信号干扰, 重建结果信噪比较低; 而分立窄带信号仅有可数的频谱通道, 压缩传感算法很容易找

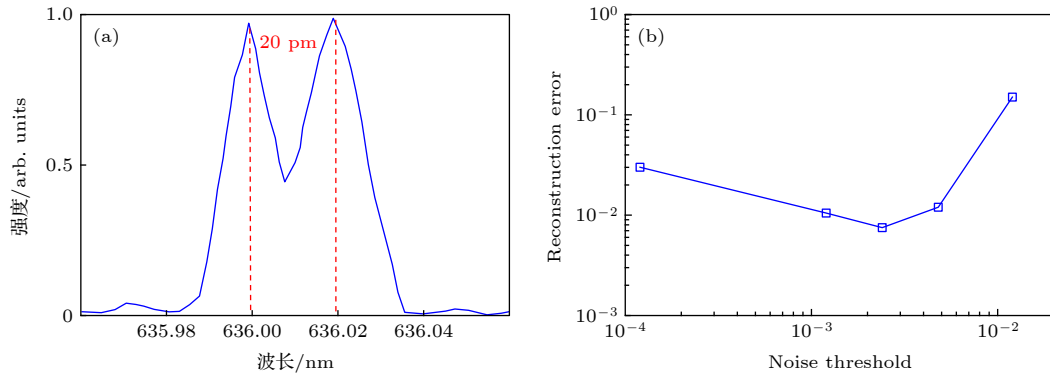


图 3 (a) 两条分立窄带信号的重建光谱, 证明该光谱计分辨率为 20 pm; (b) 重建误差与噪声阈值的函数关系

Fig. 3. (a) The reconstruction of two narrow lines, indicating the resolution is 20 pm; (b) The reconstruction error as a function of noise threshold.

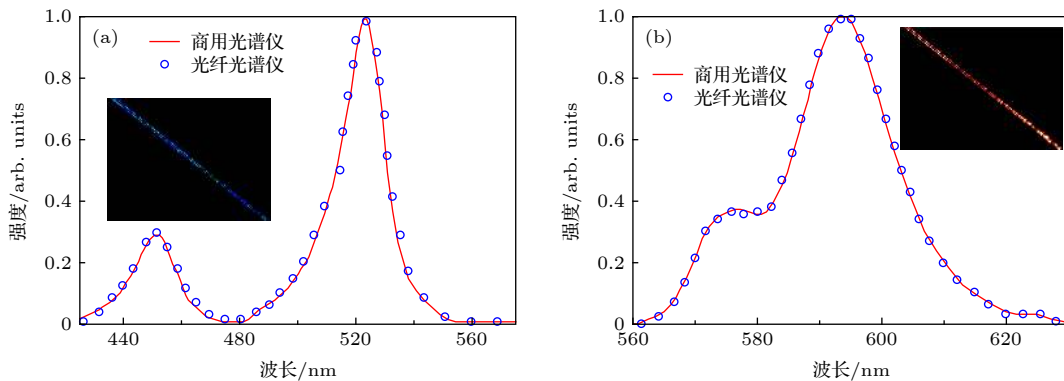


图 4 (a) 和 (b) 不同宽谱 LED 光源组合情况下, 该光纤光谱计的光谱重建结果

Fig. 4. (a) and (b) are spectral reconstructions of the fiber-based spectrometer under different LED-source combinations.

到最优解,重建光谱信噪比相对较高,为 0.02(约 17 dB). 光谱分辨率和探测时间这两个指标相互制约,在不同应用场景下可以灵活选择. 该测量结果不仅证明了该光纤光谱计具有良好的同色异谱效应,也证明了探测带宽至少覆盖以上波长范围.

4 讨论

基于多模光纤的光谱计具有优异的光谱探测性能,主要依赖于其垂直方向辐射的独特多模干涉图案. 从理论模型可知,其光谱分辨率直接由最高模式与基模的相位差 $\phi = \Delta\beta \cdot L$ 决定,其中 L 为器件尺寸. 如要对器件性能进一步优化(即增大 ϕ),可以增加光纤直径(支持更多传输模式,增大 $\Delta\beta$)和工作区域长度(增加 L)来提高分辨率,较大数值孔径的光纤也会进一步增加探测带宽. 由于多模光纤具有低成本、低损耗等优势,只要探测器阵列可成像,该器件均可应用于基于光纤的各种应用系统中(可探测低至 0.01 mW 的输入光强). 同时,微纳级封装尺寸确保其对外界的振动和温度具有很好的鲁棒性:忽略重力效应带来的显微镜散焦因素,我们先后测量了 15 min, 5 h 和 24 h 后校样矩阵的相关性数值,分别为 0.999, 0.997 和 0.992. 在本研究理论的指导下,可对其实际应用进一步拓展:在图 5(a)中,由于该多模光纤传输窗口覆盖 400—2400 nm 的波长范围,因此还能实现对近、中红外波段的探测功能;在图 5(b)中,可以设计实现

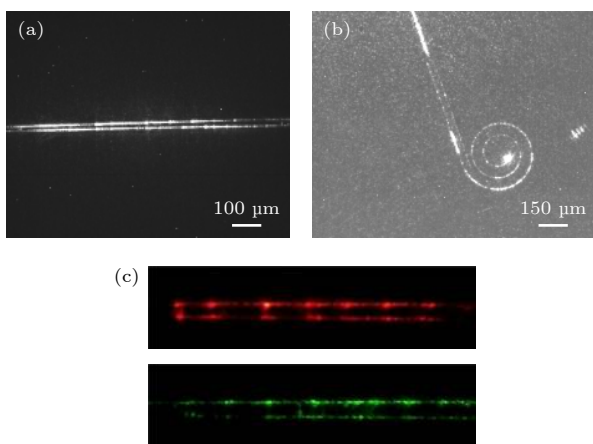


图 5 (a) 基于多模光纤的红外光谱计; (b) 基于平板型多模波导的光谱计; (c) 可与智能手机集成的便携式光谱计

Fig. 5. (a) The infrared spectrometer based on a multimode fiber; (b) The spectrometer based on a planar multimode waveguide; (c) A portable spectrometer integrated with a smart phone.

片上集成的平板型多模波导(如 SOI, III-V 族等),成熟的 CMOS 工艺确保该光谱计可以在组成材料决定的任何波段内工作;在图 5(c)中,模式干涉图案的探测器阵列可以由智能手机取代,强大的软硬件处理能力可实现实时性和便携性的高性能光谱计. 值得一提的是,由于探测带宽以外的频谱通道没有包含于校样矩阵且会给干涉图案带来额外噪声,因此需要事先已知待测信号的频谱范围或采用不同频段的滤镜进行逐段重建拼接.

5 结论

证实了将多模光纤拉制成锥形并收集具有波长依赖特性的模式干涉图案,可以在微纳尺度实现高性能、单次拍摄测量的便携式光谱计. 利用搭建的模式干涉成像系统,在 1 mm 的器件长度上实现了 20 pm 的光谱分辨率和至少 200 nm 的探测带宽,性能比商用光谱仪高一个数量级. 在采用压缩传感算法理想重建光谱 ($\mu = 0.02$) 的同时,该光谱计还具有同色异谱效应,为高性能、多功能和低成本“片上集成系统”提供了有效途径.

参考文献

- [1] Zhang T, Zhang W G, Cai Y J, Hu X H, Feng Y, Wang Y S, Yu J 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 234204 (in Chinese) [张彤, 张维光, 蔡亚君, 胡晓鸿, 冯野, 王屹山, 于佳 2019 物理学报 **68** 234204]
- [2] Sun J, Li T J, Wang M G, Jia N, Shi Y C, Wang C C, Feng S C 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 114210 (in Chinese) [孙剑, 李唐军, 王目光, 贾楠, 石彦超, 王春灿, 冯素春 2019 物理学报 **68** 114210]
- [3] Webb K E, Xu Y Q, Erkintalo M, Murdoch S G 2013 *Opt. Lett.* **38** 151
- [4] Xu F, Wu Z X, Lu Y Q 2017 *Prog. Quantum Electron.* **55** 35
- [5] Morosi J, Berti N, Akrouit A, Picozzi A, Guasoni M, Fatome J 2018 *Opt. Express* **26** 845
- [6] Bromage J, Paper T 2004 *J. Lightwave Technol.* **22** 79
- [7] Mao Y Q, Wang B X, Zhao C X, Wang G Q, Wang R C, Wang H H, Nie J M, Chen Q, Zhao Y, Zhang Q, Zhang J, Chen T Y, Pan J W 2017 *Opt. Express* **26** 6010
- [8] Semrau D, Killey R, Bayvel P 2017 *Opt. Express* **25** 13024
- [9] Santos J L, Leite A P, Jackson D A 1992 *Appl. Opt.* **31** 7361
- [10] Tu X H, Zhao Y C 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 244204 (in Chinese) [涂兴华, 赵宜超 2019 物理学报 **68** 244204]
- [11] Zhou D P, Peng W, Chen L, Bao X Y 2019 *Opt. Express* **27** 17069
- [12] Chai Q, Luo Y 2019 *Opt. Eng.* **58** 1
- [13] Liu Y, Ren G B, Jin W X, Wu Y, Yang Y G, Jian S S 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 014208 (in Chinese) [刘昱, 任国斌, 靳文星, 吴越, 杨宇光, 简水生 2018 物理学报 **67** 014208]
- [14] Chen L, Duan Y H, Zhou H D, Zhou X, Zhang C, Zhang X L

- 2017 *Opt. Express* **25** 9416
- [15] Redding B, Alam M, Seifert M, Cao H 2014 *Optica* **1** 175
- [16] Shaw M J, Henson R L, Houk S E, Westhoff J W, Jones M W, Richter-Addo G 2002 *J. Electroanal. Chem.* **534** 47
- [17] Hornig G J, Harrison T R, Bu L, Azmayesh-Fard S, Decorby R G 2019 *OSA Continuum* **2** 495
- [18] Hang Q, Ung B, Syed I, Guo N, Skorobogatiy M 2010 *Appl. Opt.* **49** 4791
- [19] Xu Z C, Wang Z L, Sullivan M, Brady D, Foulger S H, Adibi A 2003 *Opt. Express* **11** 2126
- [20] Yang T, Xu C, Ho H P, Zhu Y Y, Hong X H, Wang Q J, Chen Y C, Li X A, Zhou X H, Yi M D, Huang W 2015 *Opt. Lett.* **40** 3217

Spectrum detection based on compressive sensing inside multimode fibers^{*}

Meng Fan^{1)†} Zhang Yun-Zuo¹⁾ Feng Wei-Wei¹⁾

Wu Peng-Fei¹⁾ Zou Ge-Yin²⁾

1) (School of Information Science and Technology, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

2) (Training Department, Shijiazhuang Post and Telecommunication Technical College, Shijiazhuang 050021, China)

(Received 3 January 2020; revised manuscript received 7 April 2020)

Abstract

With the rapid development of integrated photonics, expensive and bulky commercial spectrometers force people to make more efforts to investigate high-performance, integrated and low-cost spectrometers. Spectrometers benefiting from the complementary metal-oxide semiconductor (CMOS) technology have greatly enriched the applications of spectrum detection while devices based on optical fibers still have potential development room. Owing to the strong dependence of multimode interference on wavelength generated in a multimode fiber, probe signals of arbitrary spectra could be detected by a detector array integrated on the top and reconstructed by using a compressive sensing (CS) algorithm. The CS algorithm has been widely used in signal processing, which saves more computing storage and time but maintains the same precision. With the interference pattern system, our spectrometer based on a fiber taper achieves a spectral resolution of 20 pm (one order of magnitude better than commercial spectrometers) and a detection bandwidth of more than 200 nm on a device length of 1 mm. After optimizing the energy function, the spectral reconstruction results show excellent detection capability and metamerism effect superior to RGB cameras or human eyes, providing a significant role for portable multi-functional on-chip systems in future.

Keywords: multimode fiber, spectrometer, compressive sensing

PACS: 42.81.-i, 42.79.-e, 42.30.-d

DOI: 10.7498/aps.69.20200014

^{*} Project supported by the Natural Science Foundation for the Youth of Hebei Province, China (Grant No. A2020210001), the Youth Scientific Innovation of Fundamental Research Funds of Shijiazhuang Tiedao University, China (Grant No. ZQK202008), and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61702347).

[†] Corresponding author. E-mail: mengfan3426@126.com