

# 基于匹配滤波解调的多芯 Bragg 光栅曲率传感器

郑狄<sup>1,2</sup>, 潘炜<sup>1</sup>, Sales Salvador<sup>2</sup>

<sup>1</sup>西南交通大学信息科学与技术学院, 四川 成都 611756;

<sup>2</sup>ITEAM Research Institute, Universitat Politècnica de València, Valencia 46022, Spain

**摘要** 设计了一种多芯光纤 Bragg 光栅曲率传感器, 并采用匹配滤波技术实现曲率解调。多芯光纤 Bragg 光栅曲率传感器是通过在多芯光纤的两个中心对称纤芯中写入 Bragg 光栅实现的。两个光纤 Bragg 光栅具有相似的反射谱和中心波长, 当多芯光纤发生弯曲时, 两个光纤 Bragg 光栅的反射谱叠加区域将发生改变。将两个光纤 Bragg 光栅构造匹配滤波模式, 则两个光纤 Bragg 光栅反射谱的叠加区域面积决定了输出信号的光强, 而叠加区域的面积与光纤曲率有关。因此, 通过测量匹配滤波信号的功率可以实现曲率解调。结果表明, 匹配滤波技术能有效解调多芯光纤 Bragg 光栅曲率传感器, 最大曲率解调灵敏度为  $0.78 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-1}$ 。此外, 测量了多芯光纤 Bragg 光栅曲率传感器在不同轴向应变和环境温度下的解调性能, 结果表明, 该曲率解调系统具有很强的抵抗外界环境波动的能力。

**关键词** 传感器; 曲率传感; 匹配滤波解调; 多芯光纤布拉格光栅

中图分类号 TN253

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0328014

## Multicore Fiber Bragg Grating-Based Curvature Sensor Interrogated by Matched-Filter Technique

Zheng Di<sup>1,2</sup>, Pan Wei<sup>1</sup>, Sales Salvador<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Information Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 611756, China;

<sup>2</sup>ITEAM Research Institute, Universitat Politècnica de València, Valencia 46022, Spain

**Abstract** A multicore fiber Bragg grating (FBG)-based curvature sensor interrogated by a matched-filter technique is proposed and experimentally demonstrated. The multicore FBG-based fiber curvature sensor consists of two FBGs inscribed at two arbitrary outer cores arranged symmetrically to the center core. These two FBGs have almost same reflection spectrum and center wavelength. When the multi-core fiber is bent, the overlapping area of the reflection spectra of the two FBGs changes, which affects the matched-filter output power and is related to fiber curvature. Thus we can interrogate the curvature by monitoring output power. The proposed sensor with the sensitivity of  $0.78 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-1}$  is achieved. In addition, the performances of the multicore FBG-based curvature sensor based on matched-filter interrogation under different externally applied axial strains and temperatures are also evaluated. The results show that the proposed sensor has strong ability to resist ambient fluctuations.

**Key words** sensors; curvature sensing; matched-filter interrogation; multicore fiber Bragg grating

**OCIS codes** 280.4788; 060.2310; 060.3735; 060.2370

## 1 引 言

多芯光纤(MCF)是一种在共同的包层区中存在多个独立纤芯的新型光纤。近年来, MCF作为一种能极大地提高通信容量, 突破当前普通单模光纤传输容量极限的新型光纤, 在大容量光纤通信网络

和光载无线通信系统中得到了广泛应用<sup>[1-3]</sup>。此外, MCF具有的结构紧凑、机械性能稳定且纤芯结构多样化等特点, 在光纤传感领域也引起了科研人员的广泛关注。基于 MCF 的传感器, 如曲率传感器<sup>[4-5]</sup>、形状传感器<sup>[6-7]</sup>、流速传感器<sup>[8]</sup>、加速度传感器<sup>[9]</sup>和应力传感器<sup>[10-11]</sup>, 已广泛地应用于空间飞行

收稿日期: 2017-10-17; 收到修改稿日期: 2017-11-29

基金项目: 国家自然科学基金(61405166, 61775185)

作者简介: 郑狄(1982—), 男, 博士, 讲师, 主要从事光纤传感、微波光子学方面的研究。

E-mail: dzheng@home.swjtu.edu.cn

器、结构健康监测等方面。

多芯光纤的纤芯通常对称分布<sup>[1]</sup>,这一结构特点特别适用于构造曲率传感器。基于 MCF 的曲率传感器大致可分为两大类,即光纤光栅型和干涉仪型。2000 年,Gander 等<sup>[12]</sup>首次提出基于多芯光纤的曲率传感器,在四芯光纤中选取两个中心对称的纤芯分别写入光纤 Bragg 光栅(FBG),通过监测两个 FBG 的波长改变量实现曲率传感。随后,该课题组通过在四芯光纤中选取 3 个纤芯写入 FBG,实现了二维曲率传感<sup>[13]</sup>。Saffari 等<sup>[14]</sup>在包含 120 个单模纤芯的多芯光纤中写入长周期光栅,实现了超高灵敏度的矢量曲率传感,灵敏度达  $1.23 \text{ nm/m}^{-1}$ 。为实现低成本的多芯 FBG 曲率传感,Zhang 等<sup>[15]</sup>在异质型多芯光纤写入两个中心反射波长明显不同的 FBG,并通过在单模单芯光纤和多芯光纤之间熔接多模光纤的方式来代替扇入/扇出耦合器(fan in/out),简化了对 FBG 反射波长的提取方法。2017 年 Yang 等<sup>[16]</sup>提出在双芯少模光纤的某一纤芯中写入单个 FBG,利用不同模式间的耦合产生 3 个反射峰,通过测量 3 个反射峰的波长变化实现弯曲曲率和弯曲方向的同时解调。另一方面,干涉仪结构也是实现多芯光纤曲率传感器的有效手段。通常将单模单芯光纤、多模光纤和 MCF 等多种光纤组合级联,利用基模、不同纤芯模或高阶模产生干涉谱,通过监测干涉谱的变化实现曲率传感<sup>[17-19]</sup>。

以上提到的基于 MCF 的曲率传感器方案中,基于 FBG 的 MCF 曲率传感器具有相对简单的器件结构,其最常用的解调方式有波长测量和功率测量两种。基于波长测量的解调方式利用波长检测仪器(如光谱分析仪)测量 FBG 的中心波长变化量来实现曲率解调,这种方法的缺点是解调速率较慢,且解调精度受波长检测仪器的性能限制<sup>[14-16]</sup>。功率测量的解调方式需要利用光滤波器将 FBG 的波长变化转换为功率变化,进而通过测量信号功率计算出对应的曲率值。但是这种方法受外界环境波动的影响很大,光滤波器响应曲线的漂移将导致解调错误<sup>[20-21]</sup>。

针对基于 FBG 的 MCF 曲率传感器,为解决现有解调方案中存在的问题,本文将匹配滤波技术用于解调多芯光纤 Bragg 光栅曲率传感器。其基本原理是在多芯光纤的两个对称纤芯中写入两个 FBG,并将这两个 FBG 构造成匹配滤波结构。输入宽带非相干信号依次经过两个 FBG 反射后的功率与两个 FBG 的反射谱重叠面积有关,且重叠面积随光纤

曲率的变化而变化,因此,测量输出信号功率可实现对光纤曲率的解调。该曲率解调方式具有系统结构简单、解调速率快和对外界环境波动不敏感等优点。

## 2 基本原理

基于匹配滤波的多芯光纤 Bragg 光栅曲率传感器解调系统如图 1 所示。用于构成匹配滤波的两个 FBG 具有相似的反射谱谱型和中心波长,分别位于两个相对于多芯光纤中心对称的纤芯中,且沿多芯光纤长度方向上的位置相同。宽带非相干光源的输出信号首先经过光环行器 1 后由扇入/扇出耦合器进入刻有 FBG1 的纤芯中;输入信号被 FBG1 反射,其反射信号依次通过扇入/扇出耦合器、光环行器 1 和光环行器 2,然后进入刻有 FBG2 的纤芯中;FBG2 对 FBG1 的反射信号再次反射,经过两次反射后的输入信号最后通过光环行器 2 输出,并由光电探测器(PD)检测其功率。当多芯光纤无弯曲时,两个 FBG 反射谱的叠加面积较大,因而输出的反射信号功率也较大。假设包含两个 FBG 的纤芯平面与弯曲方向一致,当多芯光纤弯曲时,两个 FBG 的反射谱中心波长分别向相反方向移动,则两个 FBG 反射谱的叠加区域减小,进而反射信号的功率也随之减小。因此,通过检测输出信号的功率,可解调出对应的曲率值。

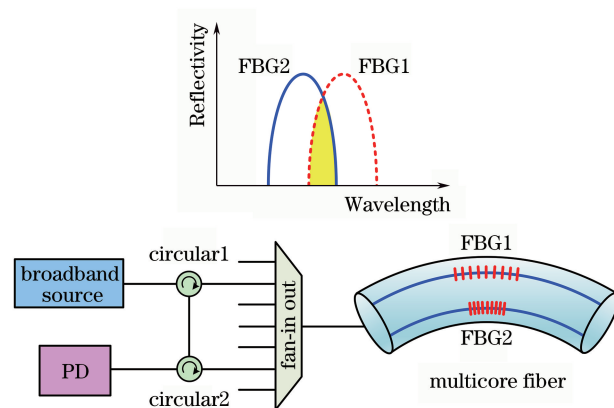


图 1 基于匹配光栅的多芯光纤 Bragg 光栅曲率传感器解调系统

Fig. 1 Schematic of the multicore FBG-based curvature sensor based on matched-filter interrogation

理论分析如下,通常 FBG 的反射谱形状可以表示为高斯型<sup>[22]</sup>:

$$F(\lambda) = R_i \exp\left[-\frac{(\lambda - \lambda_i)^2}{2\sigma_i^2}\right], \quad i = 1, 2, \quad (1)$$

式中  $R_i$ 、 $\lambda_i$  和  $\sigma_i$  分别为第  $i$  个 FBG 的峰值反射率、中心波长和反射谱  $1/e$  强度处的半宽度。为便于分

析,通常用光谱的半峰全宽  $\sigma_{\text{FWHM}}$  代替  $\sigma$ ,两者的关系为<sup>[23]</sup>

$$\sigma_{\text{FWHM}} = 2\sqrt{2\ln 2}\sigma. \quad (2)$$

输入的宽带非相干光依次经过 FBG1 和 FBG2 反射后,输出功率表达式为

$$P(\Delta\lambda) = \int_{-\infty}^{\infty} SF_1(\lambda)F_2(\lambda)d\lambda = SR_1R_2 \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left[-\frac{(\lambda-\lambda_1 \pm \Delta\lambda)^2}{2\sigma_1^2}\right] \times \exp\left[-\frac{(\lambda-\lambda_2 \mp \Delta\lambda)^2}{2\sigma_2^2}\right] d\lambda, \quad (3)$$

式中, $S$  为非相干宽带光源的功率谱密度,在 FBG 的波长变化范围内通常可认为是常数;  $\Delta\lambda$  为多芯光纤弯曲时 FBG 的波长改变量。当 FBG1 和 FBG2 所在平面与弯曲方向一致时,两个 FBG 分别位于弯曲方向的内侧和外侧,因此两个 FBG 的波长改变量大小一致,但方向相反。假设无弯曲时,FBG1 和 FBG2 的中心波长和带宽都一致,则(3)式可化简为

$$P(\Delta\lambda) = SR_1R_2\sigma_1\sqrt{\pi}\exp\left(-\frac{\Delta\lambda^2}{\sigma_1^2}\right). \quad (4)$$

由(4)式可知,反射信号的功率随  $\Delta\lambda$  的增大而逐渐减小,呈高斯曲线变化,其功率的变化速率与 FBG 的反射谱带宽有关。当 FBG 的反射谱带宽已定,通过测量匹配滤波后的信号功率值,可得 FBG 的波长偏移量。此外,已知  $\Delta\lambda$  与曲率  $C$  满足<sup>[12]</sup>

$$\Delta\lambda = \lambda_B(1 - p_e)dC, \quad (5)$$

式中, $\lambda_B$  为 FBG 无弯曲为对应的反射谱中心波长,  $p_e$  为光纤的弹光系数,典型值为 0.22,  $d$  为两个纤芯距离。因此,(4)式求得的 FBG 波长漂移量代入(5)式中,可计算出对应的曲率值。

### 3 实验结果与分析

为验证提出的曲率解调方案,采用 Fibercore Ltd 公司生产的 7 芯光纤制造所需的曲率传感器。该多芯光纤的包层直径为 125  $\mu\text{m}$ ,除中心的 1 个纤芯外,另外 6 个纤芯围绕中心纤芯呈六边形排列。纤芯之间的距离为 35  $\mu\text{m}$ ,每个纤芯的模场直径为 6.4  $\mu\text{m}$ ,数值孔径为 0.2。为提高 MCF 写入 FBG 的效率,所用 MCF 在常温下高压载氢两周以提高光敏性。FBG 的写入光源为连续的 244 nm 倍频氩离子激光器,在 7 个纤芯中同时写入 FBG,选取任意两个相对于中心纤芯对称的 FBG 作为曲率解调所需的匹配光栅对。实验中所用的多芯光纤扇入/

扇出耦合器来自 Optoscribe 公司,最大插入损耗为 2.5 dB。

实验所用的曲率调谐装置如图 2 所示。该装置包含两个光纤旋转轴、钢带和两个可移动平台。光纤旋转轴可在  $0^\circ \sim 360^\circ$  范围连续可调,旋转精度为  $\pm 5^\circ$ 。MCF 放置于钢带的表面,多芯光纤中的 FBG 位于钢带的中心。调节光纤旋转轴,使作为匹配光栅的两个 FBG 平面与弯曲方向一致。当一个移动平台向另一个移动平台靠近时,钢带发生弯曲,在钢带中心处产生均匀的曲率。位于弯曲方向外侧的 FBG 受到拉应力,其反射谱中心波长向长波长方向漂移;位于弯曲方向内侧的 FBG 受到压应力,其反射谱中心波长向短波长方向漂移。

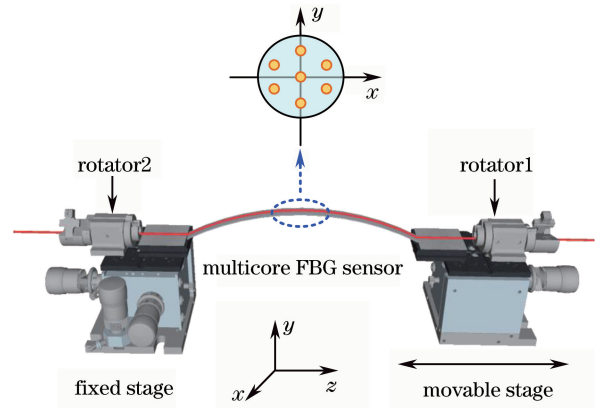


图 2 曲率传感测量装置

Fig. 2 Experimental setup for curvature sensing

当钢带的弯曲量不太大时,FBG 处的曲率值可近似为<sup>[15]</sup>

$$\sin\left(\frac{LC}{2}\right) = \frac{(L - \Delta L)C}{2}, \quad (6)$$

式中, $L$  为钢带的长度, $\Delta L$  为移动平台平移的距离。

用于匹配滤波解调的两个 FBG (FBG1 和 FBG2) 的反射谱如图 3 所示,所得反射谱为光纤无弯曲、无轴向应变时的测量结果。可以看出,FBG1 和 FBG2 具有相似的反射谱形状,反射谱的半峰全宽均为 0.2 nm。两个 FBG 的中心波长差为 0.2 nm,这种中心波长差异是由写入 FBG 时不同纤芯的曝光量不同造成的。由图 3 还可见在多芯光纤的中心纤芯处写入的 FBG3 反射谱。由于 FBG3 位于多芯光纤的中性轴上,因此不受弯曲引入的应变影响。实验中,利用 FBG3 监测光纤弯曲时多芯光纤受到的轴向应变,以确保 FBG1 和 FBG2 在用于曲率解调时只受到光纤弯曲所引入的应变的影响。

利用匹配滤波光栅解调多芯光纤 Bragg 曲率传感器时,由于 FBG1 和 FBG2 的初始中心波长略微

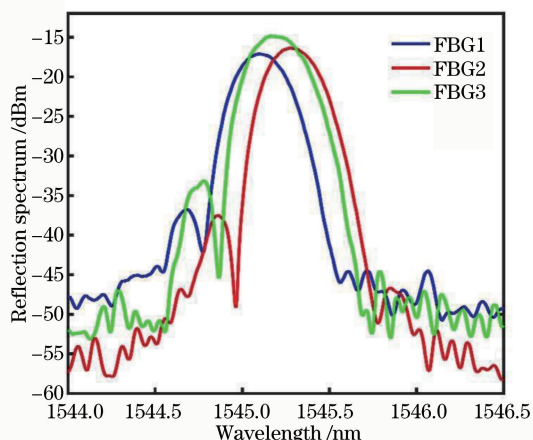


图 3 用于匹配滤波解调的 FBG 反射谱

Fig. 3 Reflection spectra of the matched-filter FBGs

不同,为获得最大的曲率解调范围,对多芯光纤进行了预弯曲,使 FBG1 和 FBG2 的反射谱中心波长趋于一致。实验中,FBG1 位于弯曲方向的外侧,FBG2 位于弯曲方向的内侧,匹配滤波光栅的输出功率与曲率变化量的关系如图 4 所示。需要说明的是,这里的曲率变化量是相对 FBG1 和 FBG2 的反射谱中心波长相同时所对应的光纤曲率  $C_0 = 2.067 \text{ m}^{-1}$  而言。如果 FBG1 和 FBG2 具有相同的初始中心波长,根据测得的输出功率可直接算出光纤对应的绝对曲率值。从图 4 可以看出,匹配滤波光栅的输出功率随曲率的增大逐渐减小,其响应曲线为高斯型,这与前面的理论分析一致。曲率解调灵敏度在曲率变化量为  $0.75 \text{ m}^{-1}$  附近时达到最大值,约为  $0.78 \text{ mW/m}^{-1}$ 。由于所用光电探测器 (FINISAR, 50 GHz dual-window Photodetector, XPDV2320R) 的最小功率分辨率为  $0.001 \text{ mW}$ ,因

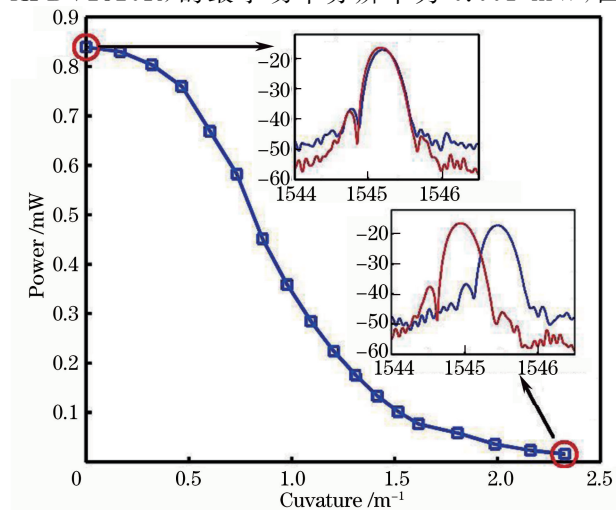


图 4 曲率变化量与匹配滤波输出功率的关系

Fig. 4 Matched-filter output power at different curvatures

此对应的曲率解调分辨率约为  $0.0013 \text{ m}^{-1}$ 。此外,本实验中的曲率测量范围为  $0 \sim 2.3 \text{ m}^{-1}$ ,通过增大 FBG 的带宽可以扩展曲率测量范围,但曲率解调的灵敏度将下降。

此外,还分析了轴向应变和环境温度波动对解调系统的影响,如图 5 和图 6 所示。在进行轴向应变测试时,初始时刻多芯光纤无弯曲地水平放置于两个移动平台之间,由两个光纤旋转轴的夹子固定,通过增大两个可移动平台的间距产生光纤轴向应变,如图 2 所示。设光纤无轴向应变时两个可移动平台的间距为  $a$ ,则由两个移动平台的间距增量  $\Delta a$  与  $a$  的比值可得到轴向应变量。测量结果表明,轴向应变在  $0 \sim 2700 \mu\epsilon$  的范围内,匹配滤波输出的功率变化量小于  $0.01 \text{ mW}$ ;在  $15 \sim 45 \text{ }^\circ\text{C}$  的变化范围内,匹配滤波输出的功率量变化小于  $0.04 \text{ mW}$ ,这意味着轴向应变和温度波动引入的曲率解调误差分别小于  $0.012 \text{ m}^{-1}$  和  $0.05 \text{ m}^{-1}$ ,证明该曲率解调系统具有很强的抵抗外界环境波动的能力。其根本原因是用于构造匹配滤波解调的两个 FBG 位于沿多芯光纤长度方向上同一位置处,且相互紧邻,因此两个 FBG 经历相同的环境温度和轴向应变,进而反射谱的中心波长变化也几乎一致。图 5 和图 6 中的插图分别对应不同轴向应变和温度下的两个 FBG 反射谱,实线为初始值,虚线为外界条件发生改变时的值。可以看出,两个 FBG 的反射谱具有相同的平移量,且形状保持不变。

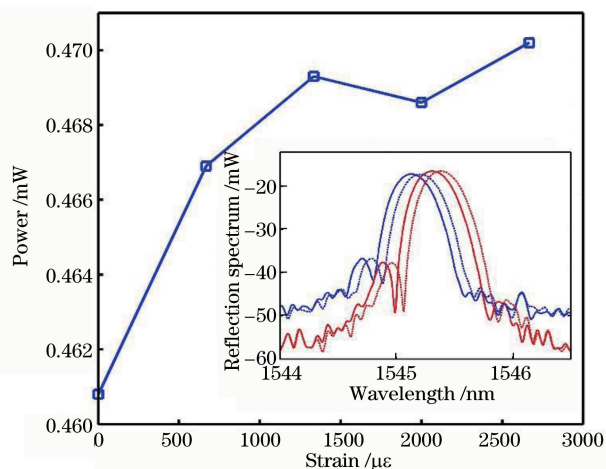


图 5 匹配滤波输出功率随轴向应变的变化

Fig. 5 Matched-filter output power at different applied axial strains

需要指出的是,实验使用的宽带光源为 NP Photonics 公司的 C&L band ASE Source,其输出功率稳定性较好,1 h 内的功率波动小于  $\pm 0.01 \text{ dB}$ 。

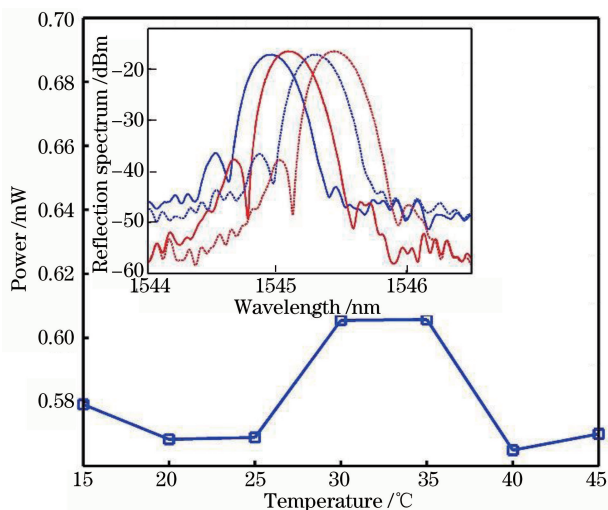


图 6 匹配滤波输出功率随温度的变化

Fig. 6 Matched-filter output power at different temperatures

通过多次测试发现,输出功率在 15~45 °C 的变化均未超过 0.04 mW,因此该曲率解调系统具有良好的稳定性。实验中多芯光纤中的 FBG 是同时写入的,由于不同纤芯的曝光量不同,因此每个 FBG 的反射谱形状和中心波长都略微不同。为提高多芯光纤中 FBG 的一致性,可采用在每个纤芯中分别写入 FBG 的方法<sup>[3]</sup>,从而实现测量的可重复性。

此外,当光源的稳定性较差时,现有方案存在测量误差。为解决该问题,可将宽带光源输出首先分为两路信号,一路信号为传感信号,另一路信号为参考信号,通过功率比值方法,即匹配滤波信号功率/参考信号功率,来消除光源功率波动引起的测量误差。

## 5 结 论

针对基于 FBG 的多芯光纤曲率传感器,提出了一种结构简单、操作方便的曲率解调方式。其基本原理是将两个位于多芯光纤中的 FBG 构造成匹配滤波模式,利用两个 FBG 反射谱叠加区域面积与光纤曲率有关的特性,通过测量经过匹配滤波后的信号功率来实现曲率解调。不同于以往采用分立式光栅对构造匹配滤波的方式,本文的两个 FBG 位于同一多芯光纤中,且沿光纤长度方向上的写入位置也完全相同,因此构造出的匹配光栅对具有异常稳定的器件结构。由于两个光栅经历相同的光纤轴向应变和环境温度,本文提出的曲率解调方式对外界环境波动不敏感。此外,该曲率解调方式是基于信号功率探测的,因此在高速曲率解调等方面具有潜在的应用前景。

## 参 考 文 献

- [1] Saitoh K, Matsuo S. Multicore fibers for large capacity transmission [J]. *Nanophotonics*, 2013, 2 (5/6): 441-454.
- [2] Gasulla I, Capmany J. Microwave photonics applications of multicore fibers [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2012, 4(3): 877-888.
- [3] Gasulla I, Barrera D, Hervás J, *et al.* Spatial division multiplexed microwave signal processing by selective grating inscription in homogeneous multicore fibers [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 41727.
- [4] Araujo F M, Ferreira L A, Santos J L. Simultaneous determination of curvature, plane of curvature, and temperature by use of a miniaturized sensing head based on fiber Bragg gratings [J]. *Applied Optics*, 2002, 41(13): 2401-2407.
- [5] Barrera D, Gasulla I, Sales S. Multipoint two-dimensional curvature optical fiber sensor based on a nontwisted homogeneous four-core fiber [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33 (12): 2445-2450.
- [6] Moore J P, Rogge M D. Shape sensing using multicore fiber optic cable and parametric curve solutions [J]. *Optics Express*, 2012, 20(3): 2976-2973.
- [7] Zhao Z Y, Soto M A, Tang M, *et al.* Distributed shape sensing using Brillouin scattering in multi-core fibers [J]. *Optics Express*, 2016, 24 (22): 25211-25223.
- [8] Yuan L B, Yang J, Liu Z H. A compact fiber-optic flow velocity sensor based on a twin-core fiber Michelson interferometer [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2008, 8(7): 1114-1117.
- [9] Fender A, MacPherson W N, Maier R R J, *et al.* Two-axis temperature-insensitive accelerometer based on multicore fiber Bragg gratings [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2008, 8(7): 1292-1298.
- [10] Lü J T, Wang C M, Zhu S H, *et al.* Dual-core photonics crystal fiber transverse-stress sensor based on surface plasmon resonance [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(8): 0828002.  
吕健滔, 王春明, 朱晟昇, 等. 基于表面等离子体共振的双芯光子晶体光纤横向应力传感器 [J]. *光学学报*, 2017, 37(8): 0828002.
- [11] Kang Z X, Sun J, Ma L, *et al.* Decoupling dual measurement sensor system of temperature and strain based on twin-core fiber cascaded with fiber Bragg grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35 (5): 0506004.  
康泽新, 孙将, 马林, 等. 基于双芯光纤级联布拉格光纤光栅的温度与应力解耦双测量传感系统 [J]. *光*

- 学学报, 2015, 35(5): 0506004.
- [12] Gander M J, MacPherson W N, McBride R, *et al.* Bend measurement using Bragg gratings in multicore fibre[J]. *Electronic Letters*, 2000, 36(2): 120-121.
- [13] Flockhart G M H, MacPherson W N, Barton J S, *et al.* Two-axis bend measurement with Bragg gratings in multicore[J]. *Optics Letters*, 2003, 28(6): 387-389.
- [14] Saffari P, Allsop T, Adebayo A, *et al.* Long period grating in multicore optical fiber: an ultra-sensitive vector bending sensor for low curvatures[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(12): 3508-3511.
- [15] Zhang H L, Wu Z F, Shum P P, *et al.* Fiber Bragg gratings in heterogeneous multicore fiber for directional bending sensing [J]. *Journal of Optics*, 2016, 18(8): 085705.
- [16] Yang K M, He J, Liao C R, *et al.* Femtosecond laser inscription of fiber Bragg grating in twin-core few-mode fiber for directional bend sensing[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(21): 4670-4676.
- [17] Delgado G S, Newhirk A V, Antonio-Lopez J E, *et al.* Compact fiber-optic curvature sensor based on super-mode interference in a seven-core fiber[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(7): 1468-1471.
- [18] Wang S, Zhang Y X, Zhang W G, *et al.* Two-dimensional bending vector sensor based on the multimode-3-core-multimode fiber structure[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(1): 822-825.
- [19] Zhao Y, Cai L, Li X G. Temperature-insensitive optical fiber curvature sensor based on SMF-MMF-TCSMF-MMF-SMF structure[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2017, 66(1): 141-147.
- [20] Cheng R, Xia L, Zhou J A, *et al.* Wavelength interrogation of fiber Bragg grating sensors based on crossed optical Gaussian filters[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(8): 1760-1763.
- [21] Fender A, Rigg E J, Maier R R J, *et al.* Dynamic two-axis curvature measurement using multicore fiber Bragg gratings interrogated by arrayed waveguide gratings[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(36): 9041-9048.
- [22] Sano Y, Yoshio T. Fast optical wavelength interrogator employing arrayed waveguide grating for distributed fiber Bragg grating sensor[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2003, 21(1): 132-139.
- [23] Agrawal G P. *Nonlinear fiber optics*[M]. Pittsburgh: Academic Press, 2001: 67-68.