

引用格式: YU Haihu, MA Yue, GAO Wenjing, et al. Fabrication and Temperature Sensing Characteristics of Dense Apodized Fiber Bragg Grating Array[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(7):0706001

余海湖, 马悦, 高文静, 等. 密集切趾光纤光栅阵列制备及其准分布温度传感的实验研究[J]. 光子学报, 2021, 50(7):0706001

密集切趾光纤光栅阵列制备及其准分布温度传感的实验研究

余海湖, 马悦, 高文静, 毕浩, 郭会勇, 郑羽

(武汉理工大学 光纤传感技术国家工程实验室, 武汉 430070)

摘要: 针对小范围热源温度探测的需求, 在线制备了密集切趾的光纤光栅阵列, 采用光波长时域反射解调技术和光时域分段解调技术对切趾光栅阵列传感网络信号进行解调, 实现了对小范围热源温度变化的精确测量。模拟了高斯切趾光栅的旁瓣抑制效果, 结果显示高斯系数 $G=4$ 时, 可获得较好的谱型和较高的旁瓣抑制比。采用在线光栅阵列制备系统制备了旁瓣抑制比为 20.74 dB 的密集切趾光栅阵列, 温度实验结果显示, 传感网络的时域分段精度可达 1 m, 空间分辨率可达 10 cm, 温度灵敏度为 10.15 pm/°C。该系统可应用于电缆廊道、地铁等环境下的小范围热源温度探测。

关键词: 光纤传感器; 光纤光栅阵列; 切趾光栅; 密集光栅阵列; 温度传感

中图分类号: TP212

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20215007.0706001

Fabrication and Temperature Sensing Characteristics of Dense Apodized Fiber Bragg Grating Array

YU Haihu, MA Yue, GAO Wenjing, BI Hao, GUO Huiyong, ZHENG Yu

(National Engineering Laboratory for Fiber Optic Sensor Technology, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: Dense apodized fiber Bragg grating arrays were on-line fabricated on a fiber drawing tower and used for temperature detection of small-scale heat sources. The signals of the grating array sensing network were demodulated through optical wavelength time domain reflection demodulation technology and optical time domain segmented demodulation technology. The sidelobe suppression effect of Gaussian apodized grating was studied and simulated. The results indicate that the gratings with good spectral type and high sidelobe compression ratio can be prepared when the Gauss coefficient $G = 4$. A dense apodized grating array with the sidelobe compression ratio of 20.74 dB was fabricated with our grating array fabrication system. The temperature experiment results show that, for this apodized grating array sensing network, the time-domain segmentation can reach 1 m, the spatial resolution can reach 10 cm and the temperature sensitivity is 10.15 pm/°C. It is expected that the system can be applied to small-scale heat source temperature detection in cable corridors, subways and so on.

Key words: Fiber sensors; Fiber grating array; Apodized Bragg grating; Dense grating array; Temperature sensing

OCIS Codes: 060.2310; 060.2370; 060.3735; 120.4825

基金项目: 国家自然科学基金(Nos.61290311, 52072277)

第一作者: 余海湖(1963—), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为特种光纤及传感器。Email: hhyu@whut.edu.cn

通讯作者: 郑羽(1989—), 男, 助理研究员, 博士, 主要研究方向为微结构光纤及传感技术。Email: zhengyu0816@whut.edu.cn

收稿日期: 2021-03-10; 录用日期: 2021-04-15

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

光纤传感器具有灵敏度高、尺寸小、可分布式测量等优点,在大型工程结构实时监测方面有广泛应用^[1-3]。在某些应用领域,如电缆廊道、轨道交通、石油管道等,其潜在的热源具有隐蔽高、范围小、易扩散等特点,需要对着类热源进行快速、高精度监测,以达到及时预警和消除安全隐患的目的^[4-6]。目前,应用于温度监测的光纤传感技术主要有基于拉曼散射的分布式光纤传感技术(Raman Optical Time Domain Reflectometer, ROTDR)^[7]、基于布里渊散射的分布式光纤传感技术(Brillouin Optical Time Domain Reflectometer, BOTDR)^[8-10]和光纤光栅准分布式传感技术^[11-13]。由于分布式光纤传感技术需要对一定范围内光纤传感信号进行累积,传感距离和空间分辨率存在着相互制约的关系。同时,分布式光纤传感技术中所需检测的散射光信号相比入射光信号强度明显降低,检测到较强的累加信号需要一定的时间,不利于对小尺寸热源的快速定位和高精度测量。基于全同弱布喇格光栅阵列的准分布式传感技术,采用的传感单元是相互独立的布喇格光栅。虽然光纤光栅对温度变化的响应灵敏且快速,但光栅之间是有间隔的,这些光栅间隔处的空白光纤对外界物理参量变化没有响应。缩小光栅间隔可以提高光栅传感系统空间分辨率,但在信号解调方面存在一些问题,包括多个光栅间的信号串扰问题、光栅旁瓣引起的中心波长识别问题等,限制了光栅阵列写入密度的进一步提高,使传统光栅阵列难以实现对小尺寸热源的精确测量^[13]。本文制备了一种密集切趾光栅阵列,在提高光栅写入密度的同时改善了光栅的旁瓣抑制比,降低了光栅间的信号串扰,通过光时域分段解调技术实现了准分布式传感系统对小尺寸热源的精确测量。

1 光栅阵列光时域分段解调技术

将光栅阵列用于传感时,需将阵列中包含外界传感参量的光信号进行解调,主要包括光栅的中心波长以及每一个光栅的位置信号。常见的光栅阵列传感解调技术主要包括波分复用(Wavelength Division Multiplexing, WDM)和时分复用(Time Division Multiplexing, TDM)^[14-15]。前者是通过区分不同反射波长的信号来确定对应光栅的空间位置,后者是基于信号的时间先后顺序来区分对应光栅的传感信号,实现光栅的空间定位。随着在线刻写光栅阵列技术的不断成熟,一根光纤上往往可以容纳数万个波长一致、反射率相似的均匀布喇格光栅,形成大容量的传感网络。对于这种光栅阵列,需要结合波分复用和时分复用技术,以实现对各个位置光栅信号的识别和每一个光栅中心波长的测量,称为光波长时域反射解调技术(Optical Wavelength-Time Domain Reflection, OWTDR)。

对于传统的布喇格光栅阵列,其光波长时域反射解调原理如图1(a)所示。光栅解调仪输出一种固定脉冲频率但波长周期性连续调谐变化的脉冲信号进入光栅阵列,信号入射到光栅位置时发生部分反射,其余部分继续向下游光栅传输。在此过程中,光栅反射信号的时域信息确定光栅位置、波长信息反映环境参量

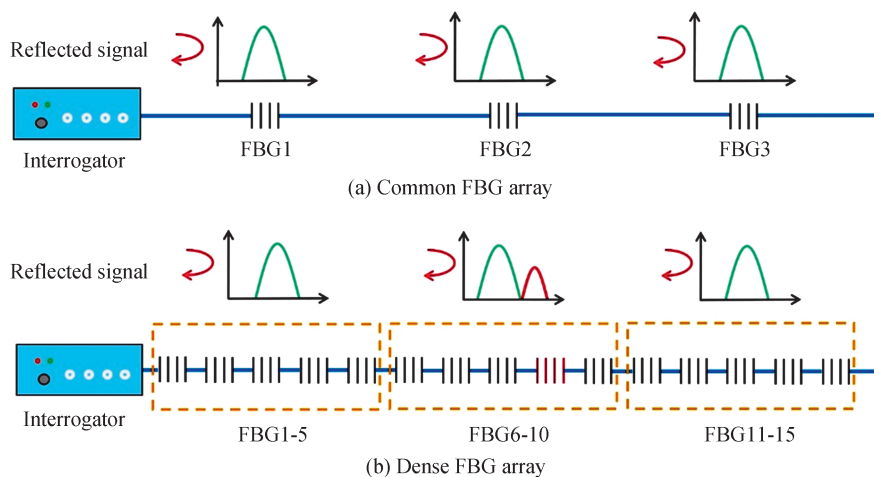


图1 光波长时域反射分段解调技术原理图

Fig. 1 The principle diagram of the OWTDR technology

的变化,从而实现准分布式传感,可应用于桥梁、油井等安全监测中^[16-17]。但该传感系统在更高空间分辨要求的应用场景时仍存在一些不足之处,由于刻写的光栅通常长度为8~10 mm,相邻光栅间隔通常为1 m,光栅与光栅之间存在着较大的间隙,无法对小热源等变量进行实时测量。因此在光波长时域反射解调技术的基础上,提出了一种分段解调技术用以密集光栅阵列的测量。该技术可以对光栅阵列分区段识别,采集多个相邻光栅的叠加反射信号,如图1(b)所示。对于密集光栅阵列,由于采样频率和脉冲间隔的限制,解调仪难以将10 cm间隔的光栅进行逐一区分,但可以把数个相邻连续的光栅作为一个传感单元进行测量。当该传感单元中有一个光栅受外界环境变化发生波长漂移时,新增的反射峰的中心波长会被识别,从而实现空间分区段分辨和精确的波长测量。该方法可以在不提高光栅解调仪的采样频率和脉冲间隔的情况下,提高光栅阵列对小范围参量变化的监测能力,将原本的点式准分布测量提升至接近于分布式传感的区域测量。

2 切趾光栅谱形分析

采用光时域分段解调技术对密集光栅阵列进行解调时,解调仪不再对每一个光栅的谱形进行测量,而是对一段光纤范围内的多个光栅的整体谱形进行分析。此时该段范围内的所有光栅被视为同一个传感单元,当其中有一个光栅受影响发生漂移时,其反射峰会从主峰中分离并被系统准确识别。但均匀布喇格光栅反射谱中旁瓣的存在会对漂移出来的主峰造成一定干扰,随着旁瓣的累加其干扰效果会逐渐增强。假定单个布喇格光栅的反射率为0.01%,每10个光栅为1个传感单元,其中有1个光栅受温度影响向长波长方向发生漂移,计算这10个光栅整体谱形的变化。

图2(a)为一个由均匀布喇格光栅构成的传感单元受温度影响下的谱形变化示意图。由于均匀布喇格光栅具有较为明显的旁瓣,随着这10个光栅旁瓣的累加,旁瓣引起的信号强度与其中一个光栅漂移出来的主峰强度逐渐接近,两者差值仅为4.8 dB,导致解调仪阈值的设置存在一定的困难。阈值设置过低会导致系统无法判断这个反射信号是来自光栅旁瓣还是漂移光栅,阈值设置过高则可能使系统无法精确测量出发生漂移的光栅,这些都会使系统出现误报、漏报的情况。随着光栅写入密度的进一步提高,布喇格光栅旁瓣所带来的影响也会更加明显,因此传统光栅阵列难以使用光时域分段解调技术。对布喇格光栅进行切趾处理,可以消除或削弱光栅旁瓣带来的影响,减轻光栅间的串扰问题。图2(b)为10个反射率为0.01%、旁瓣抑制比为20 dB的切趾布喇格光栅在相同温度影响下的谱形变化示意图。可以看出当采用了具有高旁瓣抑制比的切趾光栅时,其旁瓣累加对漂移主峰的干扰程度迅速降低,强度差值增大至11 dB,更容易被系统区分和识别。因此,需要制备出一种高旁瓣抑制比的光栅阵列来满足光时域分段解调的要求。

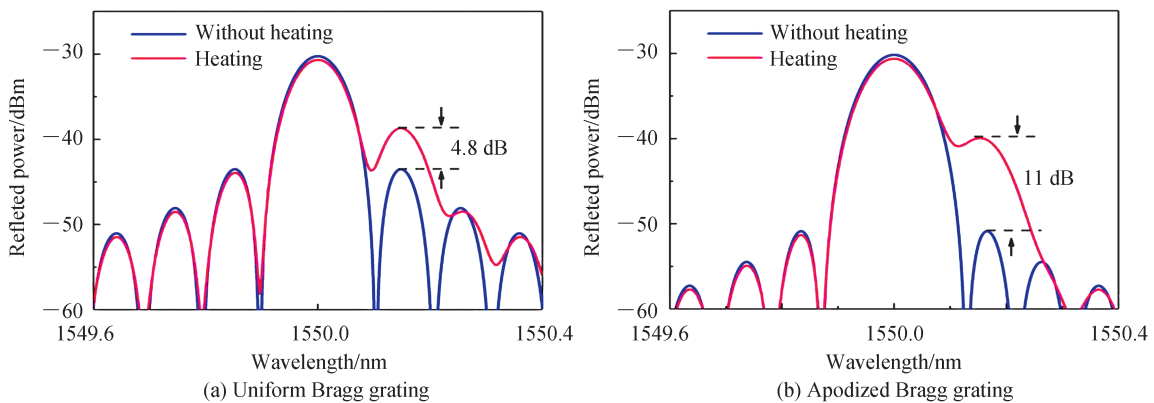


图2 密集光栅阵列的谱形变化示意图

Fig. 2 The variation of the reflected spectra in the dense grating array

一般来说,在线刻写光栅阵列通常采用相位掩模法,将光敏光纤置紫外光照射下,通过相位掩模板使紫外光束沿光纤轴向发生强度变化来刻写光栅。对于单模光纤,其纤芯处写入光栅的有效折射率 n_{eff} 表示为^[18]

$$\delta n_{\text{eff}}(z) = n_1 \sigma(z) \left[1 + \cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda} z + \phi(z)\right) \right] \quad (1)$$

式中, n_1 为单模纤芯的有效折射率, Λ 为光栅周期, z 为沿光纤轴线方向, $\sigma(z)$ 为折射率调制的缓变包络线, 在均匀布喇格光栅中通常为固定值 σ 。对于切趾光纤光栅而言, 其折射率调制幅度不再为固定值, 而是与光纤轴向呈函数关系, 表示为

$$\sigma(z) = \sigma f(z) \quad (2)$$

式中, $f(z)$ 是切趾函数, 通常可以用高斯函数表示为

$$f(z) = e^{-G\left(\frac{z}{L}\right)^2} \quad (3)$$

式中, L 为光斑长度, G 为高斯系数。图 3 分别显示了均匀布喇格光栅和切趾布喇格光栅的有效折射率沿光纤轴向的变化曲线。可以看出, 切趾光栅区域的有效折射率由中心向两侧逐渐减小, 呈现钟型曲线。

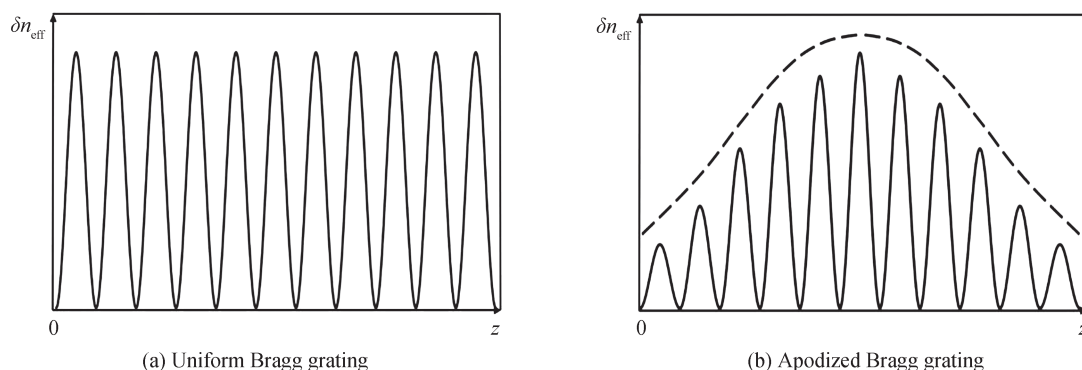


图 3 布喇格光栅折射率变化示意图
Fig. 3 The variation of the induced index change of the Bragg grating along the fiber axis

基于上述系统, 通过在相位掩模板靠近激光光源一侧加装振幅板, 可以使聚焦到纤芯的光斑沿光纤轴向空间调制, 得到不同谱形的切趾光栅。假定光束聚焦到光纤上的长度为 8 mm, 对不同高斯系数影响下的光强分布进行了计算, 结果如图 4(a) 所示。未使用高斯振幅板时 ($G=0$), 聚焦到光纤上的光强沿轴向呈均匀分布, 此时得到的光栅为均匀布喇格光栅。当高斯系数 $G=1$ 时, 光强从中心向两侧逐渐减小, 并随着 G 值的不断增大, 光强衰减速度也在增加。相应地, 对经过不同高斯函数空间调制后的布喇格光栅谱形进行了模拟计算, 使用的软件为 Optigrating。计算过程中假定未经高斯函数修饰的光栅中心波长为 1550 nm, 反射率为 0.01%, 调制过程中只改变光强的相对分布, 对光栅周期和最大调制深度不造成影响, 计算结果如图 4(b) 所示。可以清楚看出, 随着高斯系数的增大, 其对应的光栅旁瓣出现了明显降低, 旁瓣抑制比从原本的 13 dB 增大至 27 dB, 显示了良好的切趾效果。但当高斯系数过大时会削弱光栅谱形的质量, 包括自身峰值的降低和反射谱带宽的增大。前者会降低系统检测光栅的可靠性, 后者会降低系统测量中心波长的准确性。当 $G=8$ 时, 光栅的反射率从原本的 -40 dB 降低至 -44.5 dB, 而半高宽 (3dB 带宽) 从原本的 0.091 nm

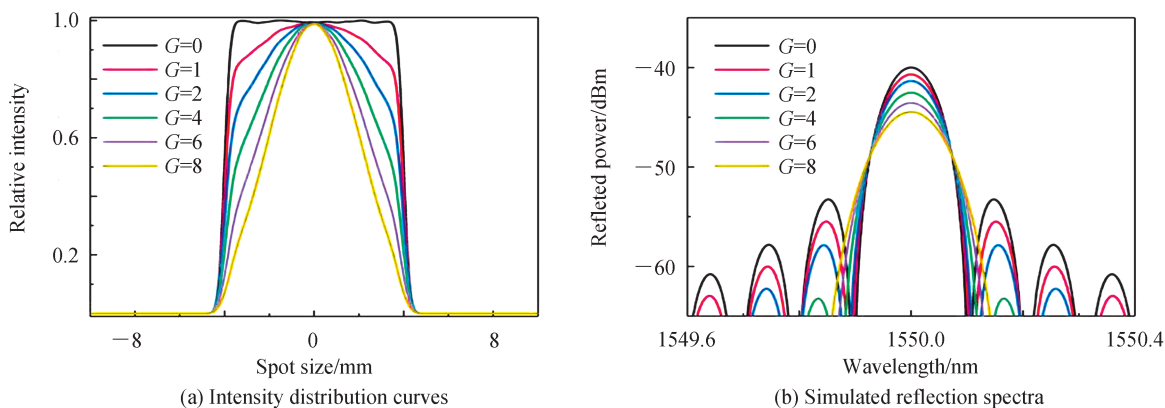


图 4 不同高斯系数下的折射率强度分布曲线和对应的光栅谱形
Fig. 4 The intensity distribution curves and simulated reflection spectra with different G

增大至 0.122 nm。这主要是因为光栅两侧的折射率调制深度相对于中心区域明显降低,减小了光栅区域的有效长度,造成了其反射率降低和谱形展宽。而过度的谱形展宽会增大单个受影响光栅的反射峰从整体光栅谱形中移出的波长距离,一定程度上降低了系统的响应下限。因此,根据计算结果,选择 $G=4$ 作为刻写光栅时采用的高斯切趾系数,该值对应的光栅反射率为 -42.5 dB,3dB 带宽为 0.105 nm,旁瓣抑制比为 20.74 dB。

3 切趾光栅阵列制备及其温度传感实验

采用拉丝塔在线制备弱光栅系统^[19],制备了密集分布的切趾光栅阵列。根据之前的模拟计算结果,在刻写光栅过程中采用 $G=4$ 的高斯函数作为切趾函数,对均匀布喇格光栅进行切趾。实验中使用单脉冲紫外激光刻写光栅,激光波长为 248 nm,脉冲能量为 5.0 mJ,最大脉冲频率为 500 Hz。激光光束经透镜组扩束、整形后聚焦到光纤纤芯处,形成线型光斑,长度为 10 mm。刻写所用相位掩模板周期为 1 071.93 nm,刻写得到光栅中心波长约在 1 551 nm 处。在对布喇格光栅切趾过程中,适当提高脉冲能量和聚焦光斑长度,以减轻切趾带来的谱形质量的降低。

在拉丝温度和速度稳定的条件下,制备了一种密集分布的切趾光栅阵列,其阵列总长度为 1 km,相邻的两个光栅间隔为 10 cm,阵列总共包含 10 000 个全同切趾布喇格光栅。使用光栅解调仪(LGI-100B, Sentek Instrument, USA)对其中一个切趾光栅的反射谱进行测量,如图 5(a)所示。可以看出单个光栅的反射率约为 -40 dB,3 dB 带宽为 0.088 nm,与普通的布喇格光栅类似,同时其旁瓣抑制比大于 20 dB,明显高于普通布喇格光栅要求的 10~15 dB。因此,该方法可以在保证光栅质量的基础上有效提高谱形的旁瓣抑制比,具有较好的可靠性。使用光时域反射仪(AQ7260, Yokogawa, Japan)对该光栅阵列的反射信号进行测量,如图 5(b)所示。可以看出由于光栅在线制备系统不需要对光纤进行焊接和二次涂覆,所制备的光栅阵列传输损耗较低,光栅阵列长度约 1 km,其 1 550 nm 窗口的传输损耗约为 0.4 dB/km。

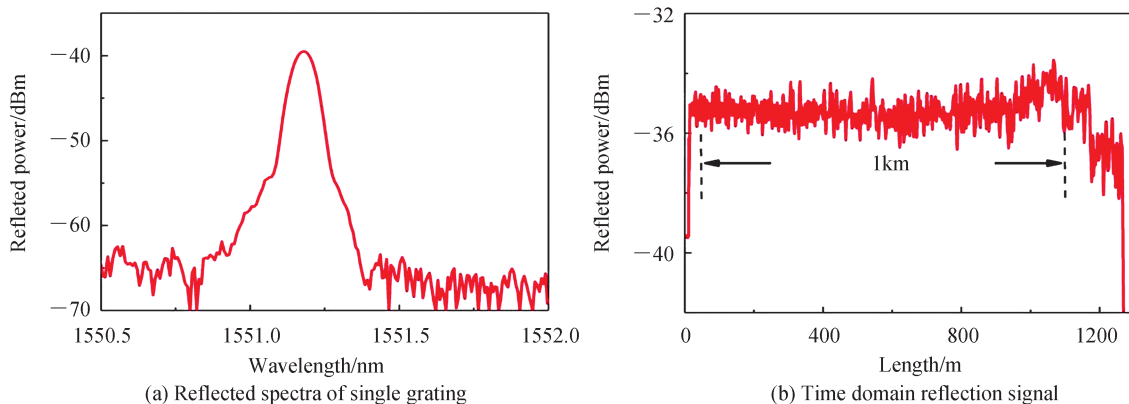


图5 切趾光栅阵列单个光栅谱形和时域反射谱

Fig. 5 The reflected spectra of single grating and time domain reflection signal of the whole array

对切趾光栅阵列进行小热源温度传感实验,其实验装置图如图 6 所示。温度实验中使用恒温水浴锅实现精确的温度控制,用以模拟小热源(长度为 ~ 10 cm)的温度变化,测量阵列对小热源的定位能力和测量效果。设定恒温水浴锅的升温幅度和降温幅度为 10 $^{\circ}\text{C}$,每次达到设定温度后保温 10 min。对 1 km 长度的密集切趾光栅阵列进行多点温度传感实验,随机选取三个位置进行小热源测试,将对应位置处的光纤约 10 cm 长的部分浸入恒温水浴锅中,其测量结果如图 7(a)所示。可以清楚的看出,当小热源的温度由室温升至 30 $^{\circ}\text{C}$ 时,在 98 m、323 m 和 600 m 处出现了明显的波长变化,表明这些小热源的位置可以被系统快速识别。尽管仅有 10 cm 长度的光纤段受到了温度变化的影响,但由于阵列中光栅密度较高,保证了受影响区域至少有一个光栅,使得解调仪可以对传感区域的温度变化进行测量,其定位精度可达 1 m,证明了阵列能够对小热源进行检测和预警。图 7(b)为解调仪测量的 323 m 处的光栅反射谱形与实际温度变化的关系。该区域中一个光栅受到温度影响,使整个区域谱形发生改变,受影响的光栅谱形随温度升高逐渐向右漂出整体谱形,被系统识别并测量。图 7(c)为该位置的光栅中心波长与实际温度的变化关系。可以看出该位置的加热

拟合曲线和冷却拟合曲线吻合良好,其平均温度灵敏度为 $10.15 \text{ pm}/^\circ\text{C}$,具有良好的线性关系。图 7(d) 为 60°C 下受影响的三个位置处的光栅谱形,可以看出其不同位置的光栅具有良好的谱形一致性。正是依靠高质量的全同光栅,漂移出来的光栅反射峰可以快速从主峰中分离出来并被系统识别。与采用 1 m 间隔的弱光栅阵列传感系统相比,该系统在使用相同参数的解调系统硬件条件下,仅调整了解调方案,实现了小范围热源温度变化的有效测量,避免了传统光栅阵列中由于小热源位于两个光栅之间的空白光纤上而出现了无法识别、测量的情况。

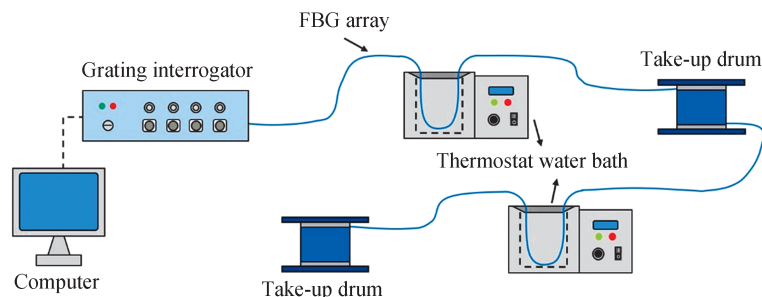


图 6 切趾光栅阵列温度传感示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the AFBGs array in the temperature experiment

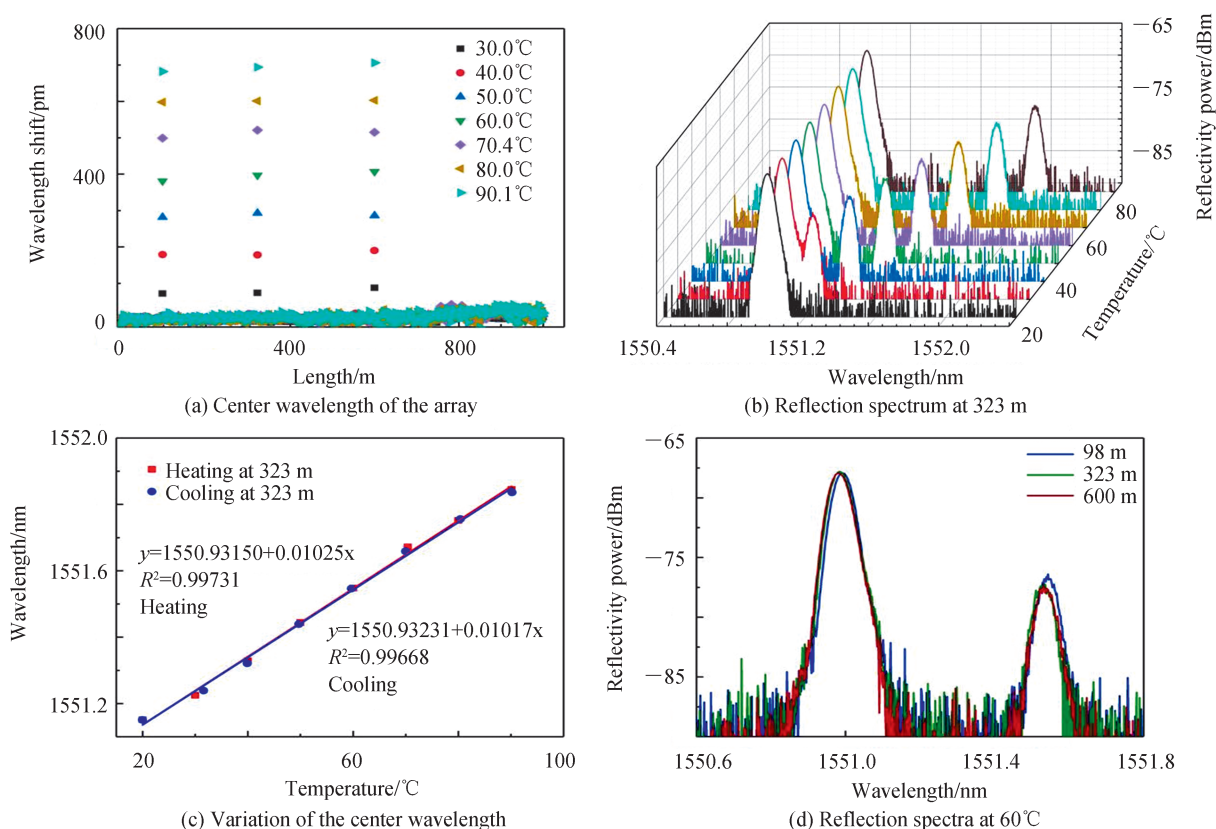


图 7 光栅阵列中心波长随温度变化关系

Fig. 7 Variation of the center wavelength in the array when AFBGs were heated

4 结论

本文立足于拉丝塔在线制备光栅阵列系统,研究并制备了具有较高谱形质量的密集切趾光栅阵列,并采用光波长时域反射解调技术和光时域分段解调技术,实现了光栅传感网络对小范围温度变化的精确测量。对切趾光栅的模拟计算表明,采用高斯系数 $G=4$ 的切趾函数可以在确保谱形质量的情况下获得良好的旁瓣抑制比。在此基础上,成功制备了一种长度为 1 km ,光栅间隔为 10 cm ,传输损耗为 $0.4 \text{ dB}/\text{km}$ 的密

集切趾光栅阵列。该阵列的光栅谱形在保证较高反射率和较窄半带宽的基础上,其旁瓣抑制比改善至 20 dB,可以有效提高系统的测量精度。温度传感实验表明该阵列传感网络的时域分段精度可达 1 m,空间分辨率可达 10 cm,温度灵敏度为 10.15 pm/°C。预期此类密集切趾光纤光栅阵列可以拓展光纤光栅阵列的应用场景,实现对小范围的温度、应力等环境变量的监测。

参考文献

- [1] LEE B. Review of the present status of optical fiber sensors[J]. *Optical Fiber Technology*, 2003, 9(2):57-79.
- [2] LI Guopin, ZHOU Shengdang, MA Lin, et al. Research on dual wavelength coaxial optical fiber sensor for detecting steel ball surface defects - ScienceDirect[J]. *Measurement*, 2019, 133:310-319.
- [3] ZHANG Jianxi, SHEN Xueyun, QIAN Miao, et al. An optical fiber sensor based on polyimide coated fiber Bragg grating for measurement of relative humidity[J]. *Optical Fiber Technology*, 2021, 61:102406.
- [4] SUN Hao, HU Manli, RONG Qiangzhou, et al. High sensitivity optical fiber temperature sensor based on the temperature cross-sensitivity feature of RI-sensitive device[J]. *Optics Communications*, 2014, 323:28-31.
- [5] LIAO Yingying, LIU Yi, LI, Yan, et al. Large-range, highly-sensitive, and fast-responsive optical fiber temperature sensor based on the sealed ethanol in liquid state up to its supercritical temperature[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, 11(6):1-12.
- [6] NAN To, LIU Bo, WU Yongfeng, et al. Optical fiber temperature sensor with insensitive refractive index and strain based on phase demodulation[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2020, 62(12):3733-3738.
- [7] GONG Yandong, MICHAEL O, HAO Jianzhong, et al. Extension of sensing distance in a ROTDR with an optimized fiber[J]. *Optics Communications*, 2007, 280(1):91-94.
- [8] FENG Xin, ZHOU Jin, SUN Changsen, et al. Theoretical and experimental investigations into crack detection with BOTDR distributed fiber optic sensors[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2013, 139(12):1797-1807.
- [9] ZHANG Jingwen, LÜ Anqiang, LI Baogang, et al. Advances in the development of BOTDA-based distributed fiber sensing technology[J]. *Study on Optical Communications*, 2010, (4):25-28.
张竞文, 吕安强, 李宝罡, 等. 基于 BOTDA 的分布式光纤传感技术研究进展[J]. *光通信研究*, 2010, (4):25-28.
- [10] THOMAS K, ANDY S, KATERINA K. 63 km BOFDA for Temperature and Strain Monitoring[J]. *Sensors*, 2018, 18(5):1600-1609.
- [11] MIHAILOV, STEPHEN J. Fiber Bragg grating sensors for harsh environments[J]. *Sensors*, 2012, 12(2):1898-1918.
- [12] KINET D, PATRICE M, GOOSSEN K, et al. Fiber Bragg grating sensors toward structural health monitoring in composite materials: challenges and solutions[J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2014, 14(4):7394-7419.
- [13] CHEN Weimin, ZHANG Yalin, ZHANG Peng, et al. Affects of sidelobes of FBG on multiplexing demodulation and suppression methods for sidelobes[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(11): 2672-2677.
陈伟民, 张娅玲, 章鹏, 等. FBG 旁瓣对复用解调的影响及旁瓣抑制方法[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(11): 2672-2677.
- [14] DAT P, KANNO A, INAGAKI K, et al. High-speed and uninterrupted communication for high-speed trains by ultrafast WDM fiber - wireless backhaul system[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(1):205-217.
- [15] MANDAL G, PATRA A. High capacity hybrid WDM/TDM-PON employing fiber-to-the-home for triple-play services with 128 ONUs[J]. *Journal of Optics*, 2017, 46(3):347-351.
- [16] YU Haihu, ZHENG Yu, GUO Huiyong, et al. Research progress in online preparation techniques of fiber Bragg gratings on optical fiber drawing tower[J]. *Journal of Functional Materials*, 2014, (12):12001-12005.
余海湖, 郑羽, 郭会勇, 等. 光纤光栅在线制备技术研究进展[J]. *功能材料*, 2014, (12):12001-12005.
- [17] LI Chengli, TANG Jianguan, CHENG Chen, et al. FBG arrays for quasi-distributed sensing: a review[J]. *Photonic Sensors*, 2021, 11(1):91-108.
- [18] ZHENG Yu, YU Haihu, GUO Huiyong, et al. Analysis of the spectrum distortions of weak fiber Bragg gratings fabricated in-line on a draw tower by the phase mask technique[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(12): 2670-2673.
- [19] GUO Huiyong, LIU Fang, YUAN Yinquan, et al. Ultra-weak FBG and its refractive index distribution in the drawing optical fiber[J]. *Optics Express*, 2015, 23(4):4829-4838.