

〈系统与amp;设计〉

啁啾型 FBG 温度测试系统的设计与实现

孙 琪¹, 徐子奇¹, 刘智超^{1,2}, 王美娇¹

(1. 长春理工大学光电信息学院, 吉林 长春 130022; 2. 长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要: 为了实现长距离、大范围的温度在线监测, 设计了基于啁啾调制技术的光纤布拉格光栅温度监测系统。采用线性啁啾结构获得更大回波带宽, 从而在单根光纤上集成更多的 FBG 探测器。计算了光栅尺寸、啁啾系数与光栅周期的函数关系, 设计了调制方式及范围。实验由宽带光源、光纤及耦合器、FBG 探测器及 F-P 解调仪组成, 调制范围为 1530.0~1550.0 nm。对 15℃~55℃ 内温度进行测试, 测温结果与 WR-220 型温度探测器作对比, 结果显示, 均匀型 FBG 与啁啾型 FBG 的温度检测结果基本一致, 精度均满足设计要求。但采用啁啾型 FBG 的系统回波带宽大, 可调制能力强, 单根光纤上可载入 FBG 探测器数量是均匀型 FBG 系统的 3 倍以上。该结构在不增加硬件的基础上提高了系统的测温能力, 具有很好的实用性。

关键词: 光纤布拉格光栅; 啁啾调制; 波分复用; 温度测试

中图分类号: TN713 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2016)11-0920-04

Design and Implementation of Chirped FBG Temperature Test System

SUN Qi¹, XU Ziqi¹, LIU Zhichao^{1,2}, WANG Meijiao¹

(1. College of Optical and Electronical Information Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;
2. School of Optoelectronic Information, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: In order to achieve long-distance, large-scale, real time temperature monitoring, temperature detection system was designed based on chirped fiber Bragg grating for more FBG sensor integrated on a single optical fiber. The functional relationship of Raster size, chirp factor and grating period was calculated. Modulation mode and modulation range was designed. In the experiment, the system was composed of a broadband light source, fiber optic, coupler, FBG detector and F-P demodulator, and so on. Its modulation range was 1530.0-1550.0 nm. The temperature was tested by system within 15℃-55℃. Temperature results were compared with WR-220 type temperature detector. The results show that the temperature test results were basically the same by the uniformity FBG and chirped FBG, and its accuracy can meet the design requirements. However, the echo bandwidth was wider, and modulation capability was stronger by the system using chirped FBG. In a single fiber, the amount of loaded FBG detectors can be more than three times to which of uniform type FBG system. The design of system can significantly improve the ability of temperature detection without additional hardware, which has a good practicability.

Key words: fiber Bragg grating, chirp modulation, wavelength division multiplexed (WDM), temperature test

0 引言

对温度的实时检测在生产、生活等各个方面均有

应用, 可以大范围、快速地实现对多个位置温度的在线监测具有重要的实际意义^[1]。目前, 大范围的温度监测网络被各国研究机构广泛关注。

收稿日期: 2016-06-13; 修订日期: 2016-08-17.

作者简介: 孙琪 (1983-), 女, 吉林长春人, 讲师, 硕士, 主要研究方向: 光电检测、光纤通信等。E-mail: sunqinuc@sina.com。

通讯作者: 徐子奇 (1984-), 女, 吉林长春人, 讲师, 主要研究方向: 光学设计等。E-mail: ldmnuc@sina.com。

基金项目: 国家自然科学基金 (60637010); 吉林省教育厅“十二五”科学技术研究规划项目: 基于光纤布拉格光栅网络的粮仓温度监测系统 (吉教科[2014]B060)。

根据温度测试的设备的工作机理可大致分为以下几类^[2-6]: 煤油温度计、应变式温度计、热电阻型温度计、热电偶型温度计、数字温度计和光纤光栅测温系统等。煤油温度计工作原理简单, 成本低, 但是需要人工读数, 不适合大范围快速数据采集; 应变式温度计结构简单、有较高的鲁棒性, 但测试周期长、外界应力会产生温度误差; 热电阻型温度计精度高, 但其热惯性大, 易受振动干扰; 热电偶型温度计便宜、有一定的抗干扰能力, 但精度低、测温范围小; 数字温度计灵敏度高, 但传输距离受数字信号线制约明显, 在大范围检测领域应用困难; 光纤光栅测温系统精度高、抗干扰能力强, 是目前测温探测技术的主要研究方向, 测试大范围、长距离具有很好的优势, 但其单根光纤载入光纤布拉格光栅 (fiber Bragg grating, FBG) 测试端的个数一直是制约其广泛应用的软肋, 故设计可以提高光纤布拉格光栅测温系统带宽及带负载能力具有重要意义^[7-8]。

针对传统的均匀型光纤布拉格光栅的探测端完成改良, 提高其回波光谱带宽, 设计了啁啾调制光栅结构^[9], 从而增加了系统带 FBG 个数的能力; 同时, 采用波分复用技术^[10] (Wavelength Division Multiplexing, WDM) 实现了对回波信号波长偏移量调制并识别的相应功能, 保证了测温精度。

1 系统设计

相比传统的 FBG 而言, 采用啁啾调制的测温系统需要引入波分复用调制器, 系统结构如图 1 所示。由光纤耦合器完成光路分束, 一束进入测试区域, 另一束引入到解调仪中。FBG 在测试区域中采集温度数据, 由于温度变化导致光栅的形变, 从而使光栅周期发生规律性变化, 故温度与回波光波长存在一定的函数关系, 由此实现对温度的测试及标定。在传统 FBG 系统中, 光栅采用均匀结构, 所以其回波的中心波长是一定的, 整个系统中可以携带的 FBG 个数是有限的, 很难实现大范围、多点位的测试, 采用啁啾技术实现波分复用可以大大提高原有系统的带 FBG 能力。

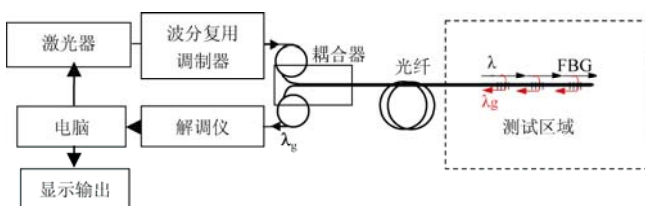


图 1 啁啾型光纤光栅测温系统

Fig.1 Temperature measurement system by WDM-FBG

2 啁啾调制技术

在均匀 FBG 中, 光栅 Bragg 波长^[11] λ_B 为:

$$\lambda_B = 2n\Lambda \quad (1)$$

式中: n 表示光纤折射率; Λ 表示光栅周期。

光纤光栅回波波长 λ_B 与被测温度 T 符合以下关系:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (\alpha + \xi)\Delta T + (1 - P)\Delta\varepsilon \quad (2)$$

式中: α 表示光纤热膨胀系数; ξ 表示光纤热光系数; P 表示光纤弹光系数, ε 表示形变量。简化后有:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (\alpha + \xi)\Delta T \quad (3)$$

由(3)式可知, 波长变化量与温度变化量呈线性关系。

啁啾调制光纤的结构如图 2 所示, 不同波长的光信号会根据不同的光栅周期而反射回来, 当可以采用啁啾调制时, 就能实现在一根光纤上载入更多的 FBG 探测器, 一套系统就能完成多点位的温度监测, 由此大幅提高回波信号的带宽。采用有效的滤波手段抑制由于带宽增大过程中而产生的波长偏移的问题, 就等保证一定的检测精度。

相比传统的光纤探测器, 因为 FBG 的波导模的折射率发生了一定的变化, 故其对应的折射率为:

$$\Delta n(x) = \bar{\delta}n(x) \left\{ 1 + v \cos \left(\frac{2\pi}{\Lambda(x)} x + \phi(x) \right) \right\} \quad (4)$$

式中: $\delta n(x)$ 是系统折射率对应的调制性能; v 是干涉条纹的可见度; $\Lambda(x)$ 是光栅周期; $\phi(x)$ 是啁啾调制函数, 均匀光纤光栅的 $\phi(x)$ 为 0。

当用啁啾光栅时, 光栅周期产生的变化为:

$$\Lambda_i(x) = \Lambda_0(x) \cdot \left[1 - \frac{F}{D} x \right] \quad (5)$$

式中: D 是光栅的尺寸; F 是啁啾系数; x 是位置。将该式代入式(1)后, 则系统的折射率产生了变化, 即由啁啾调制完成折射率的周期变化, 故使回波信号的波长产生线性变换。由于不同光栅周期产生的回波信号的波长是不尽相同的, 所以系统的带宽得到了扩展。

3 波分复用

采用啁啾调制技术可以使系统的带宽增大, 即提高了系统载入 FBG 探测器的数量。但是, 因为采用大带宽的调制结构, 使波长偏移的计算受到了限制, 所以, 回波光各个波长产生的偏移量会对温度检测产生一定的影响。采用波分复用技术^[11], 对信号光进行调制, 产生线性变化效果, 再由解调仪完成对应点位波长值的计算。针对某一被测波长而言, 光信号仅

受温度变化而使波长产生相应的偏移,即在被测区域内相应的测试点的波长偏移量由温度变化所决定。而在大带宽的信号解调中引入波分复用技术可以有效抑制温度改变造成的测温精度下降的问题。

设啁啾带宽有 B , 波分复用的调制函数有 $P(t)$, 对应的波长是 $[\lambda_1, \lambda_N]$, 当温度为 t_i 时, 偏移量有 $\Delta\lambda_i$ 。第 n 个波长对应的回波信号^[12]可表示为:

$$R_n|_{\text{FBG}} = \lambda_n \pm \frac{1}{2} \Delta\lambda_n \quad (6)$$

给定合适的边界条件, 即:

$$\begin{cases} (\lambda_1 \pm \frac{1}{2} \lambda_1) \leq \dots \leq (\lambda_n \pm \frac{1}{2} \lambda_n) \leq \dots \leq (\lambda_N \pm \frac{1}{2} \lambda_N) \\ (\lambda - \frac{1}{2} B) \leq (\lambda_N - \frac{1}{2} \lambda_N) \leq (\lambda + \frac{1}{2} B) \end{cases} \quad (7)$$

当系统参数符合(4)式时, 回波的几个波长就不会产生混迭现象了, 故每个探测点位的波长可以被求解。由于系统采用线性调制结构, 故回波光的波长偏移量仅受对应位置的温度的影响, 所以可通过波长偏移量计算温度值。

4 多点位温度实时监测实验

4.1 测试环境

采用 WR-220 型温度探测器对 $0^\circ\text{C} \sim 1000^\circ\text{C}$ 的温度变化进行监测, FBG 探测器分布于被测区域。FBG 采用线性啁啾调制, 啁啾系数为 0.980 nm/cm , 调制度为 1.43×10^{-4} 。光栅尺寸长 120.0 mm , 其对应的中心波长为 1538.5 nm 。系统的调制带宽范围是 $1530.0 \text{ nm} \sim 1550.0 \text{ nm}$, 再由 F-P 光纤解调仪完成解调。

4.2 测试光谱

光源采用光强稳定的宽带光源, 当光进入啁啾型光纤光栅时, 因为光纤光栅的栅距各不相同, 所以不

同波长的光以不同的形式入射到解调仪, 最后通过放大、滤波获得目标光的光谱分布, 从而实现对被测区域的温度检测。由啁啾 FBG 得到的光谱分布见图 3。该回波带宽 20.0 nm , 与均匀光纤光栅相比, 带宽得到了大幅提高, 实现了在整个区域内完成不同中心波长的调制设计。

4.3 温度实验数据与分析

在被测区域中放置加热棒, 温度会随着加热时间增加而升高, 采用精度优于 0.2°C 的温度探测器进行监测, 温度从 15°C 到 55°C , 记录每 1°C 变化均匀 FBG 和啁啾 FBG 的波长变化情况以及其反演的温度数据, 实验数据见表 1。

从表 1 中可以看出, 温度在 15°C 到 55°C 范围内变化时, 采用 WR-220 型温度探测器可以对被测区域内温度进行实时监测。但采用该仪器的缺点在于仅能对某个固定点位进行测试, 并且测试距离受数据传输线距离的约束, 故影响其在大范围温度检测的应用。采用 FBG 完成温度检测的精度略高于热释电探测器, 均匀型 FBG 和啁啾型 FBG 的温度测试误差基本在一个数量级。原因是两种 FBG 的温度检测原理一致, 都是利用温度与回波波长的函数关系进行反演计算的。测试结果显示, 1°C 的温度变化约引起 0.04 nm 的回波波长漂移。由数据分布可知, 啁啾型 FBG 的测试数据中波长偏移量更稳定, 具有更好的温度测试精度, 使温度温度的鲁棒性更高。采用啁啾型 FBG 具有明显的带宽优势, 可以在同一根光纤上载入更多的 FBG 测试端, 这样在大范围的温度监测中具有巨大的优势。相比传统的均匀型 FBG, 一根光纤中 FBG 数一般不超过 10 个, 而采用啁啾型 FBG, 一根光纤中可以载入 $35 \sim 45$ 个相同的 FBG, 扩容能力大幅提高, 由此证实了该系统设计具有很好的应用价值与前景。

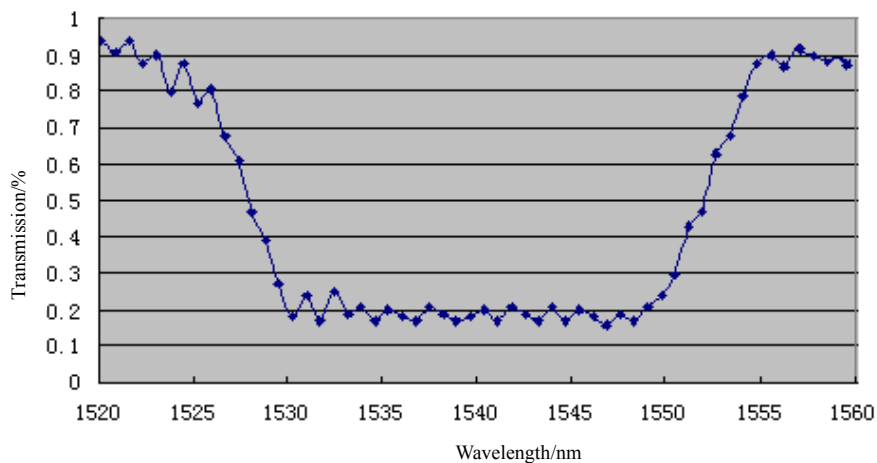


图3 啁啾型 FBG 的光谱回波数据

Fig.3 Spectrum data of chirped FBG

表1 啾啾型FBG与均匀型FBG温度实验数据 Table 1 Experimental temperature data of chirped FBG and uniform FBG

被测温度/°C	WR-220		均匀型FBG		啾啾型FBG	
	温度/°C	波长/nm	温度/°C	波长/nm	温度/°C	波长/nm
15.0	14.9	1535.725	14.8	1536.821	14.9	1536.821
16.0	15.8	1535.767	15.9	1536.868	16.0	1536.868
17.0	17.1	1535.801	17.1	1536.903	17.1	1536.903
18.0	17.9	1535.848	18.0	1536.949	17.9	1536.949
19.0	19.0	1535.892	19.2	1536.992	19.1	1536.992
20.0	20.1	1535.937	20.2	1537.038	19.9	1537.038
25.0	24.9	1536.148	24.9	1537.246	24.9	1537.246
30.0	29.8	1536.355	29.7	1537.455	30.1	1537.455
35.0	34.9	1536.538	35.3	1537.667	34.8	1537.667
40.0	40.1	1536.744	39.7	1537.839	39.9	1537.839
45.0	45.2	1536.990	45.2	1538.041	45.2	1538.041
50.0	50.0	1537.163	50.4	1538.226	51.2	1538.226
55.0	54.9	1537.329	55.3	1538.414	54.9	1538.414

4 结论

结合啾啾调制和波分复用技术,设计了基于啾啾FBG的实时温度测试系统,该系统相比原有光纤光栅测温系统而言,在不添加硬件的基础上,可以载入更多的FBG探测器,从而使系统测温能力大幅提升,符合长距离、大范围实时温度监测的设计要求。通过实验可知,系统的测温精度优于0.5°C,具有较好的稳定性及抗干扰能力,单根光纤上的FBG载入数是传统均匀型FBG测温系统的3倍以上,具有很好的实用价值。

参考文献:

[1] 陈曦;姚建铨;陈慧;光纤光栅温度应变同时测量传感技术研究进展[J]. 传感器与微系统, 2013, 9(1): 8-11.
CHEN Xi, YAO Jianquan, CHEN Hui. Research development of simultaneous temperature and strain measurements using fiber gratings[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2013, 9(1): 8-11.

[2] 甘维兵, 王立新, 张翠. 分布式光纤光栅测温技术在线监测电缆温度[J]. 激光与红外, 2011, 41(5): 577-581.
GAN Weibing, WANG Lixin, ZHANG Cui. Distributed optical fiber grating technology applied in cable temperature measurement[J]. *LASER & INFRARED*, 2011, 41(5): 577-581.

[3] Chao-Hsiung Hung, Hsueh-Ming Hang. A reduced-complexity image coding scheme using decision-directed wavelet-based contourlet transform[J]. *J. Vis. Commun. Image R.*, 2012, 23(1): 1128-1143.

[4] 张嘉庆, 贾振安, 刘颖刚. 一种基于BOTDA与FBG传感的共线温度测试技术[J]. 光学技术, 2013, 3(1): 57-60.
ZHANG Jiaqing, JIA Zhen'an, LIU Yinggang. Technology of collinear temperature testing based on BOTDA and FBG sensing[J]. *Optical Technique*, 2013, 3(1): 57-60.

[5] 刘智超, 杨进华. FBG测温系统的光谱校正算法的研究[J]. 光谱学与

光谱分析, 2014, 34(7): 1420-1423.
LIU Zhichao, YANG Jinhua. Research on spectrum correction algorithm of temperature measurement system based on FBG[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, 34(7): 1420-1423.

[6] 张汝山, 吴硕, 涂勤昌. 高空间分辨率分布式光纤测温系统的设计及应用[J]. 光学仪器, 2015, 37(1): 79-82.
ZHANG Rushan, WU Shuo, TU Qinchang. Design and application of high spatial resolution distributed temperature sensing system[J]. *Optical Instruments*, 2015, 37(1): 79-82.

[7] 张燕君, 姜俊波. 新型分布式布喇格光纤光栅传感系统的研究[J]. 光电工程, 2010, 37(1): 88-94.
ZHANG Yanjun, LOU Junbo, KANG Ruixue. Novel distributed sensor system based on fiber Bragg grating sensing technology[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, 37(1): 88-94.

[8] John G Murphy, Stephen O Driscoll, Niall J Smith. Multi-path DOAS for tomographic measurements[C]//*SPIE*, 2003, 4876: 875-885.

[9] 王玉田, 孙卫新, 柴云霞. 布喇格光栅在温度测量中的应用[J]. 传感技术学报, 2000, 13(4): 314-317.
WANG Yutian, SUN Weixin, CAI Yunxia. Temperature detection with fiber Bragg grating[J]. *Journal of Transduction Technology*, 2000, 13(4): 314-317.

[10] ZHANG L J, YANG J H, SU W. Research on blind Deconvolution algorithm of multiframe-turbulence degraded images[J]. *Journal of Information and Computational Science*, 2013, 10(12): 3625-3633.

[11] 李天星, 李川, 孟磊. 光纤Bragg光栅传感器传感原理及常见结构[J]. 红外技术, 2010, 32(7): 392-395.
LI Tianxing, LI Chuan, MENG Lei. The Sensing principle and structure of fiber Bragg grating sensor[J]. *Infrared Technology*, 2010, 32(7): 392-395.

[12] 杨淑连, 申晋, 李田泽, 等. 强度调制的啾啾光纤光栅加速度传感器[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27(6): 061014-1-4.
YANG Shulian, SHEN Jin, LI Tianze. Intensity-modulated acceleration sensor based on chirped-fiber grating[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27(6): 061014-1-4.

- clarity-evaluation function of image based on sobel[J]. *Computer & Digital Engineering*, 2008, **226**(8): 129-131.
- [13] 杜奇, 向健勇, 袁胜春. 基于边缘强度的红外图像阈值分割方法研究[J]. *红外与激光工程*, 2004, **33**(3): 288-291.
- DU Qi, XIANG Jianyong, YUAN Shengchun. Study on thresholding segmentation for infrared image based on edge detection[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, **33**(3): 288-291.
- [14] 张宏飞, 亚涛, 刘志广. 基于梯度阈值计数的清晰度评价算法[J]. *科学技术与工程*, 2013, **34**(13): 10365-10367.
- ZHANG Hongfei, ZHANG Yatao, LIU Zhiguang. Focus-evaluation algorithm based on gradient threshold count[J]. *Science Technology and Engineering*, 2013, **34**(13): 10365-10367.
- [15] 王倩, 宋恩民, 许向阳, 等. 基于加权邻域相关性的显微镜自动聚焦函数[J]. *光学精密工程*, 2008, **16**(1): 166-171.
- WANG Qian, SONG Enmin, XU Xiangyang, et al. Auto-focusing function for microscope image based on weighted neighborhood correlation[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **16**(1): 166-171.
- [16] 赵春江, 施文康, 邓勇. 新的梯度边缘检测方法[J]. *光电工程*, 2005, **32**(4): 86-88.
- ZHAO Chunjiang, SHI Wen-ang, DENG Yong. Novel edge detection method based on gradient[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2005, **32**(4): 86-88.
- [17] 倪军, 袁家虎, 吴钦章. 基于边缘特征的光学图像清晰度判定[J]. *中国激光*, 2009, **36**(1): 172-176.
- NI Jun, YUAN Jiahu, WU Qinzhong. Identification for optical image definition based on edge feature[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, **36**(1): 172-176.
- [18] 任四刚, 李见为, 谢利利. 基于灰度差分法的自动调焦技术[J]. *光电工程*, 2003, **30**(2): 53-55.
- REN Sigang, LI Jianwei, XIE Lili. Automatic focusing technique based on gray scale difference method[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2003, **30**(2): 53-55.

(上接第 923 页)

- [9] 王玉田, 孙卫新, 柴云霞. 布喇格光栅在温度测量中的应用[J]. *传感技术学报*, 2000, **13**(4): 314-317.
- WANG Yutian, SUN Weixin, CAI Yunxia. Temperature detection with fiber Bragg grating[J]. *Journal of Transduction Technology*, 2000, **13**(4): 314-317.
- [10] ZHANG L J, YANG J H, SU W. Research on blind Deconvolution algorithm of multiframe-turbulence degraded images[J]. *Journal of Information and Computational Science*, 2013, **10**(12): 3625-3633.
- [11] 李天星, 李川, 孟磊. 光纤 Bragg 光栅传感器传感原理及常见结构[J]. *红外技术*, 2010, **32**(7): 392-395.
- LI Tianxing, LI Chuan, MENG Lei. The Sensing principle and structure of fiber Bragg grating sensor[J]. *Infrared Technology*, 2010, **32**(7): 392-395.
- [12] 杨淑连, 申晋, 李田泽, 等. 强度调制的啁啾光纤光栅加速度传感器[J]. *强激光与粒子束*, 2015, **27**(6): 061014-1-4.
- YANG Shulian, SHEN Jin, LI Tianze. Intensity-modulated acceleration sensor based on chirped-fiber grating[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, **27**(6): 061014-1-4.