

基于分组测量和边沿滤波的大容量 光纤光栅快速传感系统

曹品奇 许国良

南京大学光通信工程研究中心, 江苏 南京 210093

摘要 应用分组测量和边沿滤波实现了大容量光纤布拉格光栅(FBG)快速传感系统的设计。在传统的时分复用光纤光栅传感系统中对传感光栅按位置进行分组,然后按组分别进行测量,避免了单次测量中探测器动态范围的限制,对其进行重复利用,延长了系统的测量距离;同时利用边沿滤波法实现了快速的波长解调,能够在一次测量中解调出该分组所有光栅的波长信号,大幅加快了系统的测量速度,有利于实现更高的扫描频率。实验结果表明,本系统在温度传感测试中获得了 0.9913 的解调线性度,误差在 1.36 °C 以内。

关键词 光纤光学; 光纤光栅传感; 分组测量; 边沿滤波; 时分复用

中图分类号 TN253

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.1010003

Large Capacity and Fast FBG Sensing System Based on Marshalling Measurement and Edge Filter

Cao Pinqi Xu Guoliang

Institute of Optical Communication Engineering, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093, China

Abstract A fast fiber Bragg grating (FBG) sensing system with large capacity based on marshalling measurement and edge filter is designed. Sensing gratings in traditional time division multiplexing systems are grouped according to their positions on the fiber, and these grating groups are then successively measured. The limit of detector's dynamic range in single measurement is avoided, the reutilization of sensing gratings is realized, and the measuring distance is extended. Meantime, by using edge filtering method, fast wavelength demodulation is achieved, and the wavelength signals of all gratings in one grating group is measured once, which can reduce measurement time and improve the scanning frequency of the system effectively. The result shows that a demodulation linearity of 0.9913 is realized in the temperature sensing test of the system and the error is less than 1.36 °C.

Key words fiber optics; fiber grating sensing; marshalling measurement; edge filter; time division multiplexing

OCIS codes 060.2310; 060.2370; 060.4230; 230.7408

1 引 言

光纤布拉格光栅(FBG)传感器以其优异的抗电磁干扰、小尺寸、耐腐蚀、易嵌入、高灵敏度等特点而受到广泛关注与研究^[1-5]。但光纤光栅传感器是点式传感器,而很多应用场景需要对多点大范围进行测量,所以就需要对光纤光栅进行复用,以实现准分布式的测量。

目前应用较多的是波分复用(WDM)和时分复用(TDM)两种技术。WDM的复用数量受光源带宽及传感器测量范围的限制,其复用数量通常只能达到几十个^[6];TDM技术克服了光源光谱带宽的限制,但在其研究早期,光栅的高反射率限制了其复用容量。Weis等^[7]最早通过时分复用完成了对4个光纤光栅的传感

收稿日期: 2016-05-17; 收到修改稿日期: 2016-07-15

基金项目: 国家重大科学仪器专项(2012YQ170059)

作者简介: 曹品奇(1992—),男,硕士研究生,主要从事光纤光栅传感复用系统方面的研究。E-mail: 123747074@qq.com

导师简介: 许国良(1973—),男,博士,副教授,硕士生导师,主要从事光通信系统、器件及其关键技术,光网络健康检测和性能监控,通信网络规划和设计等方面的研究。E-mail: xugl@nju.edu.cn(通信联系人)

测量。随后研究者们发现使用弱反射率的光栅能大大提高复用能力。Chan 等^[8]进一步研究发现,低反射率的光纤光栅还可以有效减少信号串扰。Cooper 等^[9]则发现使用短的脉冲可以极大地提升灵敏度、降低串扰。Dai 等^[10-11]使用半导体光放大器(SOA)构建传感系统,与光纤环形镜和光栅一起形成激光谐振腔,获得了良好的信噪比。Luo 等^[12-14]使用两个控制信号间存在延时的 SOA 对特定光栅的反射光进行放大,并混合使用复用技术实现了 2000 个光栅的复用。Wang 等^[6,15-16]则使用可调激光器扫频来进行波长解调,其中 Wang 等^[6]在实验中验证了 1000 个超弱 FBG 用于温度传感,Zhang 等^[16]进一步分析了光栅反射率、相邻光栅间隔和延迟光纤的传输损耗对系统复用容量的影响,并用 9 个反射率为 6% 的全同光栅进行了实验验证,理论证明了该系统具有 1000 个 FBG 的复用能力。

上述方法中,使用 SOA 构建的传感系统需要依次将 SOA 与每个光栅形成谐振后再进行波长解调,其中测量所有光栅所需的时间与光栅数量成正比。使用的两个 SOA 的方法也需要对所有光栅进行逐个测量。可调激光器法的测量速度与扫频频率个数和光纤总长度有关,虽然相对基于 SOA 的传感法要快一些,但仍然比较缓慢。

因此,本文设计了一种结构十分简单、基于分组测量和边沿光滤波器的大容量快速光纤光栅温度传感系统。在这个系统中,基于时分复用技术,利用全同弱反射光纤光栅(反射率约为 1%)作为传感单元实现复用。为了实现快速测量,利用宽谱光纤光栅作为滤波器,将波长的变化转换成光强的变化。为了增加系统的传感距离,采用分组测量的方式。实验结果证明,系统可以在 19 km 传感距离处实现精度为 1.36 °C 的温度解调。

2 传感系统的原理与结构

2.1 基于边沿光滤波器的温度传感原理

基于边沿光滤波器的温度传感原理如图 1 所示,作为光滤波器光纤光栅具有高斯形状反射谱和 3 dB 带宽,而用于传感的光纤光栅为弱反射光纤光栅(反射率约为 1%),其 3 dB 谱宽为 0.2 nm。蓝色曲线表示光滤波器的传递函数曲线,用归一化的光谱反射率曲线 $H(\lambda)$ 表示;用 $R(\lambda - \lambda')$ 表示中心波长为 λ' 的弱反射光栅反射光功率谱密度,如图中橙色实线所示,橙色虚线则显示了系统线性滤波的大致范围。其中弱反射光栅反射光谱通过滤波器后的光强为

$$I(\lambda') = \int_{-\infty}^{\infty} R(\lambda - \lambda') H(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

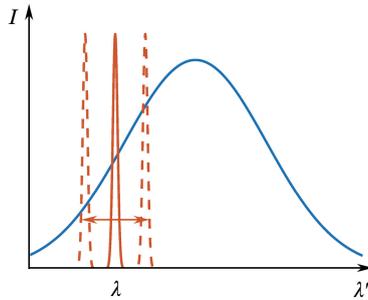


图 1 边沿滤波法原理图

Fig. 1 Diagram of edge filtering method

由于弱光纤光栅的反射谱宽一般仅为 0.2 nm 左右,相对于边沿滤波器的线性区域的谱宽很窄,可将 $I(\lambda')$ 近似为线性函数:

$$I(\lambda') = H(\lambda') \int_{-\infty}^{\infty} R(\lambda - \lambda') d\lambda \quad (2)$$

则可知信号光通过边沿滤波器后,滤波器输出光强大小与输入光波长变化之间的关系由光滤波器的特性决定。因此通过实时检测光纤光栅反射光光强的变化就可以得到弱反射光纤光栅反射光中心波长的漂移情况。值得指出的是,反射信号中瑞利散射光信号相对于弱光纤光栅反射光信号而言十分微弱,因此不会影响传感精度^[17]。

实际应用中,测量步骤为

- 1) 标定弱光纤光栅的中心波长变化量随外界温度、应力等传感量变化的线性关系,同时获得光滤波器的反射曲线;
- 2) 根据检测到的弱反射光栅的光强变化即可获知反射中心波长的漂移量;
- 3) 根据标定的线性关系解调出外界环境参量的准确变化量。

2.2 传感系统结构

基于光滤波器和分组测量的大容量快速光纤光栅温度传感系统如图 2 所示。在系统中,基于时分复用技术产生的脉冲光,输入到光栅串中,被各个光栅依次反射。由于各个传感器在光纤上的位置不同,光射入光纤经各个光栅反射到达探测器所需时间也不同。通过反射光到达探测器的时间点可以区分各个光栅的信号,从而在一次测量中测得多个光栅的信号,实现光栅的复用。

本系统中,放大自发辐射(ASE)宽带光源的光谱范围为整个 C 波段,总输出功率约为 20 dBm。由 ASE 宽带光源发出的光经过声光调制器(AOM)后调制产生 100 ns 的脉冲光,接着光脉冲进入到掺铒光纤放大器(EDFA),使得光脉冲能够达到特定的峰值功率。被放大后的光脉冲通过环形器进入到传感光纤串中,传感光纤光栅串中相邻两个 FBG 之间的距离为 100 m。为了能够实现长距离的传感,在测试末端光纤光栅串的信号时调节 EDFA,使得光脉冲具有较大的峰值功率,但这将导致前端光纤光栅反射脉冲超过探测器的饱和阈值,损坏探测器。为避免损坏探测器,本系统中设计了分组测量的方式。最后将探测器输出的信号通过数据采集卡(DAQ)以 1 GHz 的采样率采集后送至电脑进行数据处理。

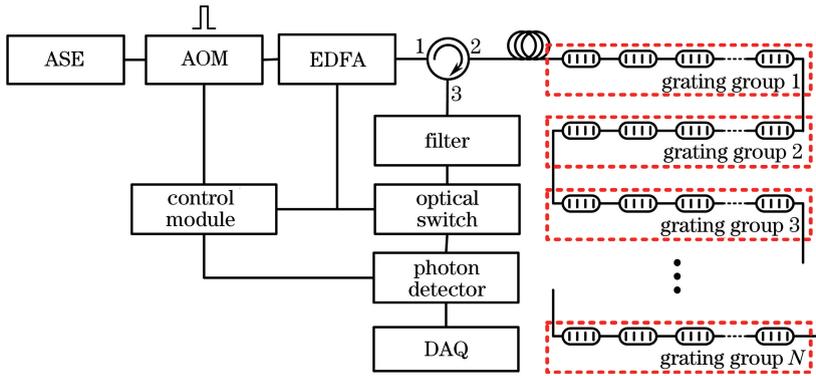


图 2 传感系统框图

Fig. 2 Block diagram of the sensing system

2.3 分组测量原理

为了实现长距离传感,将 N 串传感光纤光栅串分为 N 组,进行分组测量。在测量第 1 组时,将 EDFA 的放大倍数控制为一个较小的值,使输入光纤的光脉冲峰值功率较小,利用光开关控制通断仅使第 1 组传感光纤光栅的反射脉冲能够达到探测器;在测试第 2 组传感光纤时,利用控制信号增大脉冲的峰值功率,通过光开关控制通断,仅使第 2 组发射光脉冲能够被探测器探测到。以此类推,可以测得各组传感光纤光栅的反射信号。最后将每次测得的各组结果按时间拼接起来,就得到了整条光纤上的返回信号。其时序与信号的拼接如图 3 所示。

假设光栅串中的光栅具有相同的反射率 R 和透射率 T ,入射光初始光强为 I_0 ,忽略弱反射光栅中的多反射和光谱阴影的影响,则第 n 个光栅的反射光强为

$$I_n = I_0 \exp(-2\alpha L_n) T^{2(n-1)} R, \quad (3)$$

式中 α 为光纤传输损耗, L_n 为第 n 个光栅在光纤上的距离。

第 n 个光栅的反射光强 I_n 与第 1 个光栅的反射光强 I_1 的比值为

$$\frac{I_1}{I_n} = \frac{\exp(-2\alpha L_1) R}{\exp(-2\alpha L_n) T^{2(n-1)} R} = \exp[-2\alpha(L_1 - L_n)] T^{2(n-1)}. \quad (4)$$

要使其不超过探测器的动态范围 D (单位为 dB),即要满足条件

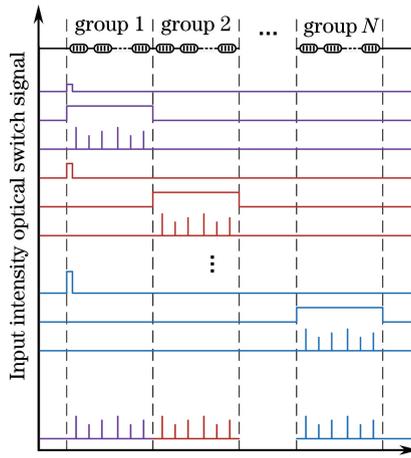


图 3 分组测量中控制信号时序与信号曲线拼接示意图

Fig. 3 Control signal timing and signal curve stitching schematic in marshalling measurement

$$\lg\left(\frac{I_1}{I_n}\right) < D, \quad (5)$$

将(4)式代入得

$$2\alpha(L_n - L_1) + 2(n - 1)\lg T < D. \quad (6)$$

记 $\Delta L = L_n - L_1$ 为该串光栅的总长度,也即其测量长度,则有

$$\Delta L < \frac{D + 2(n - 1)\lg T}{2\alpha}. \quad (7)$$

由于使用弱反射光栅,则 $\lg T$ 是一个趋向于零的负值,如果光栅数较少,则(7)式中 $2(n - 1)\lg T$ 可忽略。对于普通的光纤有 $\alpha = 0.2$ dB/km,则一个 10 dB 动态范围的探测器 1 次能够探测最长 25 km 的距离。对于光栅数量更多的情况,光栅反射造成的光强损耗会进一步缩短测量距离。使用分组测量的方法可以重复利用探测器的动态范围,使得测量距离不再受其制约。但分组测量也不能无限制延长测量距离,一方面是输入光强有限,另一方面是光开关不能完全阻挡住光,而是具有一定的消光比。当输入光足够强,经过光开关衰减的反射光仍有可能使探测器饱和。假设待测分组光栅为第 m 组,记该组第 1 个光栅返回光强为 I_{m1} ,整根光纤上的第 1 个光栅的返回光强为 I_1 。考虑光强最大、测量距离最远的情况下,两者都等于探测器饱和光强,即 $I_{m1} = I_1$ 。忽略光栅反射损耗可得

$$\begin{cases} I_{m1} = I_0 - 2\alpha L_{m1} + \lg R \\ I_1 = I_0 - 2\alpha L_1 + \lg R - R_{EX} \end{cases}, \quad (8)$$

式中 R_{EX} 为光开关消光比,则有

$$\Delta L = \frac{R_{EX}}{2\alpha}, \quad (9)$$

其中 ΔL 为待测分组第 1 个光栅的最远位置,也即使用光开关后能延长的测量距离。

3 实验结果及分析

3.1 传感光栅串与光滤波器

本实验中传感光纤光栅串采用的是反射率约为 1% 的弱反射光纤光栅,相邻两个光栅之间的距离为 100 m,每组光纤光栅串由 10 个弱反射光纤光栅组成,一共 3 组,如图 4 所示。

先对传感光纤光栅串中弱反射光纤光栅的中心波长以及反射率进行标定,使用窄线宽激光进行扫频,得到每一波长下各个光栅的反射率,最终结果如图 5(a)~(c)所示。采用一个带宽较宽的光栅作为光滤波器,其反射光谱如图 5(d)所示。

从图 5 中可以看出,光纤光栅串的反射中心在 1549.5423 ~ 1549.8531 nm 内波动,反射率为 0.2054% ~ 1.1436%,3 dB 谱宽为 0.0725 ~ 0.0816 nm。虽然是按照同样标准拉制的光纤,但是其中心波长

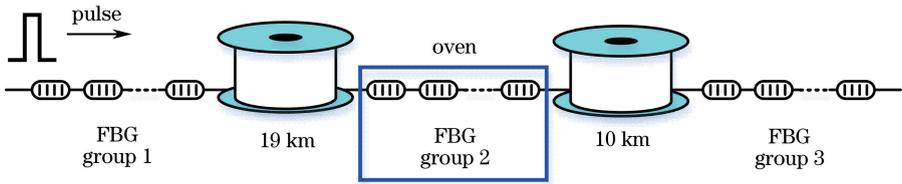


图 4 传感光纤光栅串的组成

Fig. 4 Composition of sensing fiber grating groups

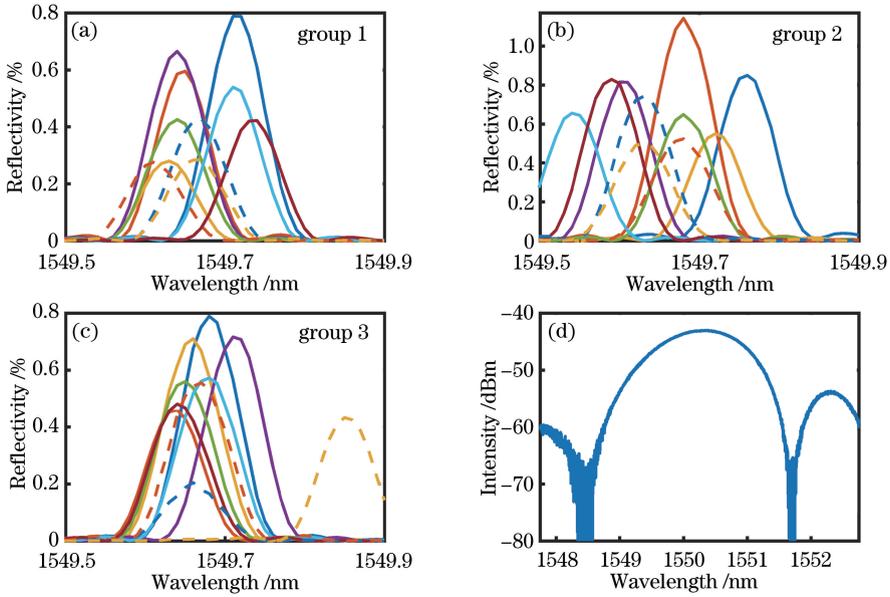


图 5 (a)~(c) 3 组光栅串的反射谱和(d)光滤波器的反射光谱

Fig. 5 (a)-(c) Reflection spectra of three grating groups and (d) reflection spectrum of the optical filter

和反射率存在一定的差异,这将导致他们的反射信号与温度之间的关系存在差异。但是采用事先标定的方式,即使存在这种差异也不影响整个系统的工作。因此,在实际应用中,对传感光纤串的事先标定是十分关键的。采用同样的光栅中心波长标定方法,将光栅放置于不同温度环境下,可以测得该温度下的光栅中心波长数据,对系统测量范围内各个温度进行逐一测试,即可得到各个光栅的温度传感特性。

时分复用系统中为了区分两个光栅,要求输入光脉冲宽度小于两个光栅返回光的时间间隔。在实验室条件下,光脉冲宽度的最小值主要受到 AOM 带宽的限制,所使用的 AOM 带宽为 40 MHz,上升沿约 50 ns,因此每组内的光栅间距至少大于 5 m。

根据光脉冲的宽度选择合适的光电探测器,实验中使用带宽为 350 MHz 的光电探测器,完全能够满足要求。实验所使用的光开关的上升下降时间最大值为 100 ns、开关速度最大值为 250 ns,则要求各组返回光的时间间隔大于 250 ns,即各组光栅的间距要大于 25 m。

3.2 长距离测试结果

实验中 3 组光栅串之间依次连入了长度为 19 km 和 10 km 的光纤,如图 4 所示。图 6 则分别显示了在 3 种不同输入光强下 3 组光栅的测量结果。图 6 中(a)~(c)分别为光源功率在 5 dBm、10 dBm、16 dBm 时测得的信号曲线,其中 3 种不同颜色的实线又分别表示对 3 个分组的测量结果,对应颜色的虚线是测量该分组时所使用的开关控制信号。

为了说明系统对信号信噪比的提升,对第 2、第 3 组光栅在低输入光强下的信号也进行了测量,分别如图 6(a)中橙色、黄色曲线和图 6(b)中黄色曲线所示。

通过计算可以得到图 6 中各组数据的信噪比,如表 1 所示。

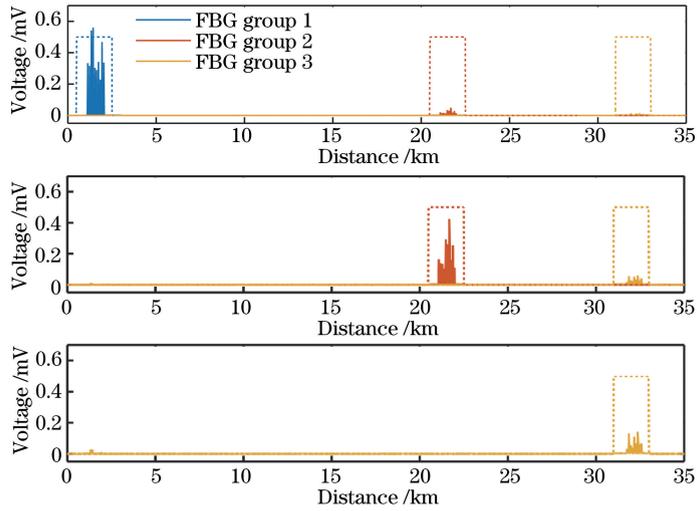


图 6 分组测量的测试结果。(a)低输入光强;(b)中输入光强;(c)高输入光强

Fig. 6 Test results of marshalling measurement. (a) Low input intensity; (b) middle input intensity; (c) high input intensity

表 1 光栅串反射信号的信噪比

Table 1 R_{SN} of signals reflected by grating groups

Input intensity	Grating group 1	Grating group 2	Grating group 3
Low	38.6695 dB	13.8635 dB	6.2093 dB
Middle		17.7914 dB	9.8274 dB
High			13.3634 dB

从表 1 可以看到,相较于低输入光强的情况,第 2 组光栅在中等光强下获得了 3.9279 dB 的信噪比提升,第 3 组光栅在高光强下获得了总共 7.1541 dB 的信噪比提升。根据 2.3 小节中对分组测量法延长测量距离的讨论,使用 25 dB 消光比的光开关能够延长 62.5 km 的无光栅测量距离。

3.3 温度测试结果

实验中将第 2 组光栅放置于恒温箱内用于测温,其余的则置于室温下。采取分组测量的方式,对第 2 组传感光纤光栅串进行测量。因恒温箱测温精度不高,所以另外采用一个分辨率为 0.06 °C 的热电偶温度计作为测温基准。整合多个温度下的测量结果如图 7(a)所示,其中每个温度下都能得到如图 7(b)所示的一条曲

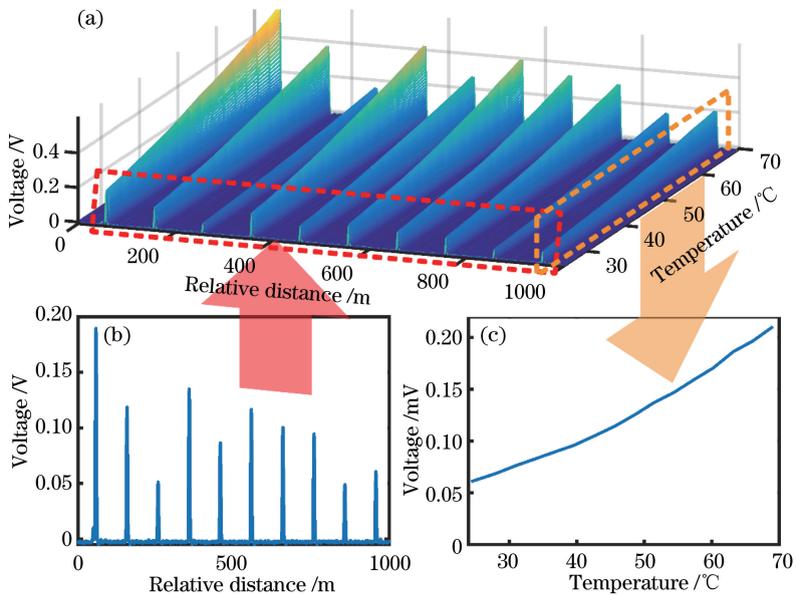


图 7 (a)温度测量数据三维图;(b)某一温度下的信号曲线;(c)提取出的某一光栅信号电压-温度关系

Fig. 7 (a) 3D image of temperature data; (b) signal curve under a certain temperature;

(c) extracted grating voltage-temperature diagram

线的的数据。从图 7(a)中可以看到多个凸起的峰对应着各个光栅,虽然它们的高度和斜率不同,但是具有随温度相同的变化方向且变化都比较平稳。将其中每个光栅的数据各自提取出来,可以得到该光栅的电压-温度信号关系曲线,图 7(c)显示了其中的一条。

对这些曲线进行线性拟合,其中 1 条的结果如图 8 所示。其中黑色圆点为原始数据,蓝色曲线为拟合后的结果。线性拟合所得的结果函数为

$$V(T) = 6.119T - 45.18, \quad (10)$$

其确定系数 R^2 等于 0.9913,均方根误差等于 8.332。根据(10)式即可得到该光栅的电压-温度变化率为 6.119 mV/°C,温度测试误差为 1.36 °C。一般光栅温度灵敏度约为 10 pm/°C,由图 5 (d)可得滤波器在光栅反射中心波长附近的变化率约为 14 dB/nm,那么光强随温度的变化率为 0.14 dB/°C。实验测试了温度在 24~70 °C 的范围内,理论上会产生约 6.44 dB 的光强变化。而在这段温度范围内的测试结果电压从 100 mV 上升至 400 mV,光电探测器的增益为 10^4 V/W,即光强变化范围是 0.01 ~ 0.04 mW,即 -20 dBm ~ -13.9 dBm,相差 6.1 dB,与预期结果大致相符。显然,只需要提前标定光纤的传感系数,便可以根据其探测信号的变化率得到光纤所处环境温度/应变的变化情况。

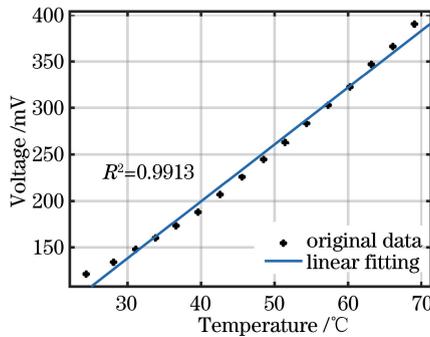


图 8 1 个光栅的电压-温度曲线的线性拟合结果

Fig. 8 Voltage-temperature linear fitting curve of one grating

4 结 论

针对已有光纤光传感系统中传感距离受光强损耗限制、探测器响应范围有限、只能单个测量的问题,提出了一种利用分组的原理进行每组整体测量的方法,采用边沿滤波实现快速波长解调。经过理论计算,在中间没有光栅反射损耗的情况下,使用 25 dB 消光比的光开关测量距离最多能够延长 62.5 km;实验结果表明,本系统将 30 km 处的光栅反射信号信噪比提升了约 7.1 dB,具有测量速度快、结构简单、成本低廉的优点,十分适用于长距离实时监测的场景中。但本系统易受光源波动的影响,如果将返回光分成两路,一路光进行边沿滤波、另一路光直接探测,根据两路光强的比值能够得到更加准确的波长解调结果。

参 考 文 献

- Grobnc D, Mihailov S J, Smelser C W, *et al.* Sapphire fiber Bragg grating sensor made using femtosecond laser radiation for ultrahigh temperature applications[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2004, 16(11): 2505-2507.
- Majumder M, Gangopadhyay T K, Chakraborty A K, *et al.* Fibre Bragg gratings in structural health monitoring: Present status and applications[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2008, 147(1): 150-164.
- Xu Guoquan, Xiong Daiyu. Applications of fiber Bragg grating sensing technology in engineering [J]. Chinese Optics, 2013, 6(3): 306-317.
徐国权, 熊代余. 光纤光栅传感技术在工程中的应用[J]. 中国光学, 2013, 6(3): 306-317.
- Guo T, Liu F, Liang X, *et al.* Highly sensitive detection of urinary protein variations using tilted fiber grating sensors with plasmonic nanocoatings[J]. Biosensors and Bioelectronics, 2016, 78: 221-228.
- Lin Junxiu, Wang Wenhua, Wang Xiaoxu. Study of application and evolution of fiber grating sensors technique [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2005, 44(6): 931-936.
林钧岫, 王文华, 王小旭. 光纤光栅传感技术应用研究及其进展[J]. 大连理工大学学报, 2005, 44(6): 931-936.

- 6 Wang Y, Gong J, Wang D Y, *et al.* A quasi-distributed sensing network with time-division-multiplexed fiber Bragg gratings[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2011, 23(2): 70-72.
- 7 Weis R S, Kersey A D, Berkoff T A. Four-element fiber grating sensor array with phase-sensitive detection[C]. 1994 North American Conference on Smart Structures and Materials, 1994: 150-157.
- 8 Chan C C, Jin W, Wang D N, *et al.* Intrinsic crosstalk analysis of a serial TDM FGB sensor array by using a tunable laser [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2003, 36(1): 2-4.
- 9 Cooper D J F, Coroy T, Smith P W E. Time-division multiplexing of large serial fiber-optic Bragg grating sensor arrays [J]. Applied Optics, 2001, 40(16): 2643-2654.
- 10 Dai Y, Liu Y, Leng J, *et al.* A novel time-division multiplexing fiber Bragg grating sensor interrogator for structural health monitoring[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2009, 47(10): 1028-1033.
- 11 Chung W H, Tam H Y, Wai P K A, *et al.* Time- and wavelength-division multiplexing of FBG sensors using a semiconductor optical amplifier in ring cavity configuration[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2005, 17(12): 2709-2711.
- 12 Luo Z, Wen H, Li X, *et al.* Online reflectivity measurement of an ultra-weak fiber Bragg grating array[J]. Measurement Science and Technology, 2013, 24(10): 105102.
- 13 Hu C, Wen H, Bai W. A novel interrogation system for large scale sensing network with identical ultra-weak fiber Bragg gratings[J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(7): 1406-1411.
- 14 Luo Z, Wen H, Guo H, *et al.* A time- and wavelength-division multiplexing sensor network with ultra-weak fiber Bragg gratings[J]. Optics Express, 2013, 21(19): 22799-22807.
- 15 Wang Y, Gong J, Dong B, *et al.* A large serial time-division multiplexed fiber Bragg grating sensor network[J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30(17): 2751-2756.
- 16 Zhang M, Sun Q, Wang Z, *et al.* A large capacity sensing network with identical weak fiber Bragg gratings multiplexing [J]. Optics Communications, 2012, 285(13): 3082-3087.
- 17 Xia L, Zhang Y, Zhu F, *et al.* The performance limit of Φ -OTDR sensing system enhanced with ultra-weak fiber Bragg grating array[C]. 2015 International Conference on Optical Instruments and Technology, 2015: 962003.