

一种超弱光纤光栅阵列的定位方法

罗志会² 蔡德所^{1,2} 文泓桥³ 郭会勇³

¹广西壮族自治区水利电力勘测设计研究院, 广西南宁 530023

²三峡大学理学院, 湖北宜昌 443002

³武汉理工大学光纤传感技术国家工程实验室, 湖北武汉 430070

摘要 光栅定位是大规模超弱光纤光栅阵列制备及铺设质量检测的关键技术之一。针对传统光时域反射仪定位超弱光栅时存在的问题,提出了一种超弱光栅阵列的相位-强度二维定位方法。该方法采用光栅时域反射技术查询阵列中的单体光栅,通过调节选择脉冲和入射脉冲之间的相位差,捕捉反射信号的光强峰值,实现对目标光栅的准确定位。构建了超弱光栅阵列的定位系统,对1009个平均反射率-34 dB、间隔2.5 m的超弱光栅阵列进行了定位实验,定位误差小于10 cm。

关键词 传感器;超弱光纤光栅;时分复用;光时域反射;半导体光放大器

中图分类号 TN253 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201535.1206006

A Location Method for Ultra-Weak Fiber Bragg Grating Array

Luo Zhihui² Cai Desuo^{1,2} Wen Hongqiao³ Guo Huiyong³

¹Guangxi Water & Power Design Institute, Nanning, Guangxi 530023, China

²College of Science, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China

³National Engineering Laboratory for Fiber Optical Sensing Technology, Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430070, China

Abstract The location of fiber Bragg grating (FBG) is one of the key technologies for the fabrication and the laying quality of the large ultra-weak FBG array. Aiming at solving the problems existing in the traditional optical time domain reflector for locating ultra-weak FBGs, a two-dimension location method based on phase and intensity is proposed. The method interrogates the single FBG with optical time domain techniques, and locates the target FBG by adjusting the phase difference between the input pulses and the selection pulses and detecting the peak power of reflective signal. The system for the FBG array is constructed to locate the 1009-FBG array with the average reflectivity of -34 dB and the spatial space of 2.5 m, and the 0.1 m position error is obtained.

Key words sensors; ultra-weak fiber Bragg grating; time division multiplexing; optical time domain reflect; semiconductor optical amplifier

OCIS codes 060.2370; 060.3735; 120.4825

1 前言

超弱光栅^[1](反射率低于-30 dB)具有极强的复用能力,通过时分复用后构建大规模光纤光栅(FBG)传感网络,能很好地满足火灾安全、周界围栏等重大工程的需要,是下一代光纤光栅传感网络发展的方向^[2-5]。2013年,武汉理工大学光纤传感国家工程实验室成功开发出超弱光纤光栅阵列的在线刻写装置,在普通光纤拉制过程中自动刻写超弱光栅阵列。这种阵列机械性能好,传输损耗小,单位成本低,方便长距离铺设,是大规模光栅传感网络的重要载体^[6-8]。但受光纤拉制工艺的影响,在线刻写光栅之间的间距可能出现波动,导

收稿日期: 2015-05-28; 收到修改稿日期: 2015-07-08

基金项目: 湖北省自然科学基金(2015CFB436)、广西壮族自治区水利电力勘测设计研究院委托项目(SDHZ2014055)

作者简介: 罗志会(1975—),男,博士,副教授,主要从事先进光纤光栅传感技术及应用、磁电传感系统开发等方面的研究。E-mail: zhihui_luo@126.com

致光栅在空间位置上的偏差,给超弱光栅查找和定位带来困难。此外,在传感网络建设过程中,需要针对敏感区进行光栅布设时,预先确定光栅在光纤中的位置也非常重要。

传统高反射率光栅多采用光时域反射仪(OTDR)进行定位,这种光栅能有效反射 OTDR 的光信号,各光栅的位置可作为“事件”反映在衰减曲线上。但当光栅的反射率较低时,由于法布里-珀罗激光光源(LD-FP)的梳状分布,当光栅的波长与 LD-FP 的波长失配时,光栅反射信号的功率会低于背向散射光信号的功率,有效信号被淹没,从而导致超弱光栅的定位存在困难。此外,由于 OTDR 的定位精度受脉冲宽度和盲区的影响,其定位误差一般在 $\pm 2\text{ m}$,饱和盲区和事件盲区均大于 2 m ,因此,对于定位精度高、光栅间距小的阵列,OTDR 检测也存在较大困难。针对超弱光栅的定位问题,本文提出了一种超弱光栅阵列的相位-强度二维定位方法。该方法采用相敏检测技术查询单体光栅,通过微调选择光脉冲和反射光脉冲的相位,实现目标光栅的准确定位。这种二维定位方法实现简单,有望解决超弱光栅制备及工程铺设质量检测的问题,具有良好的应用前景。

2 工作原理

超弱光栅阵列的定位原理如图 1 所示。双通道脉冲发生器产生两路时延可调节的脉冲,第一路电脉冲(ch1)控制高速光开关 1 产生输入光脉冲,输入光脉冲通过环形器进入光栅阵列,经过光栅反射后,通过环形器进入高速光开关 2。高速光开关 2 受第二路电脉冲信号(ch2)的控制,高电平时打开,允许反射光信号通过;低电平时关断,吸收返回的光信号。各光栅的位置和返回光脉冲的时间相对应,通过合理配置 ch1 和 ch2 的时延,可以实现对目标光栅反射信号的分离。假定光开关脉冲的宽度均为 t_w ,这两路信号之间的时延差 t_{di} 满足:

$$t_{di} - t_w \leq \frac{2n_e L_i}{c} \leq t_{di} + t_w, \quad (1)$$

式中 n_e 为光纤的有效折射率, L_i 为第 i 个光栅到第一个光开关的距离, c 为真空中的光速。假定光源和光电开关的脉冲宽度都无限窄时,(1)式简化为:

$$t_{di} = \frac{2n_e L_i}{c}. \quad (2)$$

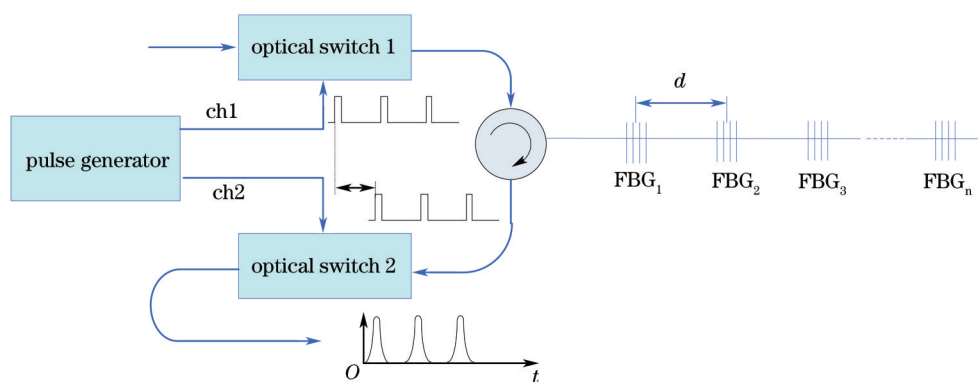


图 1 超弱光栅阵列的定位原理

Fig.1 Principle of location method in ultra-weak grating array

与普通 OTDR 不同的是,通过高速光开关 2 的信号光功率与两路光脉冲的相位差有关。当第 i 个光栅反射的脉冲返回时,光开关在 $t_{di} - t_w$ 时刻打开,检测系统开始探测到光栅的反射信号,随着时延的增加,信号强度逐渐增大。当时延正好等于 t_{di} 时,信号的强度最大。当延时继续增加时,信号强度开始逐渐减弱。当时延增大到两路脉冲没有重合区间时,信号最终消失。图 2 展示了在时延分别为 $t_{di} - 0.75t_w$ 、 t_{di} 、 $t_{di} + 0.75t_w$ 的三

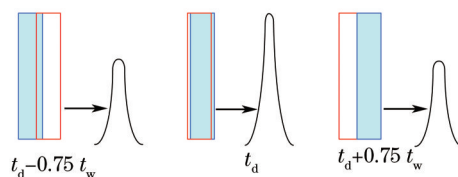


图 2 相位差与反射信号强度的关系

Fig.2 Relationship between phase difference and signal intensity

个时刻,检测到对应光脉冲的强度。在调节相位时,通常以 ch1 作为参考,精确调节 ch2 的时延,可以获得单
体光栅反射信号的连续变化。

假定脉冲的归一化面积为 1,可以用相位差 t 的函数 $S(t)$ 来描述光功率随时延的变化,光栅反射信号的功率为:

$$S(t) \propto \begin{cases} 0, & t < t_{di} - t_w \\ 1 + \frac{t - t_{di}}{t_w}, & t_{di} - t_w \leq t < t_{di} \\ 1 - \frac{t - t_{di}}{t_w}, & t_{di} \leq t < t_{di} + t_w \\ 0, & t_{di} + t_w \leq t \end{cases}, \quad (3)$$

两路脉冲相位差为 0 时,光脉冲强度为 1。任何相位差的超前或滞后,都会引起脉冲功率下降。通过探测光
信号的峰值,可以锁定相位差的零点,从而实现了对光栅位置的精确定位。因此,利用信号相位、强度的相关
性构建的一种二维空间定位方法,定位精度将与可探测脉冲相位差密切相关,比传统的 OTDR 定位方法具有
更高的定位精度。

3 实验系统

为了验证上述分析,构建了 1550 nm 波段超弱光栅阵列定位系统,如图 3 所示^[9-11]。来自自发辐射宽带光源
(欧迪电子, ASE-40),经过 3 nm 带通滤波后进入第一个半导体光放大器(SOA1, INPHENIX IPSAD1502)调制并
放大成 16 ns 的光脉冲,再通过掺铒光纤放大器(EDFA)提升脉冲峰值功率,然后经环形器后进入光栅阵列($G_1, \dots,$
 G_n),其中 n 代表阵列中混合复用光栅阵列的个数。单个光栅的反射脉冲通过第二个半导体光放大器(SOA2,
INPHENIX IPSAD1502)进行选择。通过 SOA2 的光脉冲信号进入 CCD 解调模块(IBSEN I-MON 80D),积分获取
反射信号的强度。SOA2 和 SOA1 由同源的两路电脉冲信号驱动,两路信号之间的时延差可以调节。SOA 具有
大于 40dB 的消光比,能有效保证光信号的信噪比^[12]。系统初始化时,信号源以纳秒级(对应空间分辨率为 0.1
m)的时延增量依次输出脉冲串,CCD 解调模块根据反射光信号的强度阈值判定是否为光栅的反射光,并记录
反射峰值时各光栅对应的时延值。当系统正常工作时,信号源只需读取这些时延值并逐一调整脉冲输出,即
可快速确定光栅的位置。或者,根据预知的光栅间隔设定延迟值,以前面的光栅为基准,一次时延变换即可捕
捉到目标光栅的信号,再通过精确的时延调节获取反射峰值,实现对光栅的准确定位。

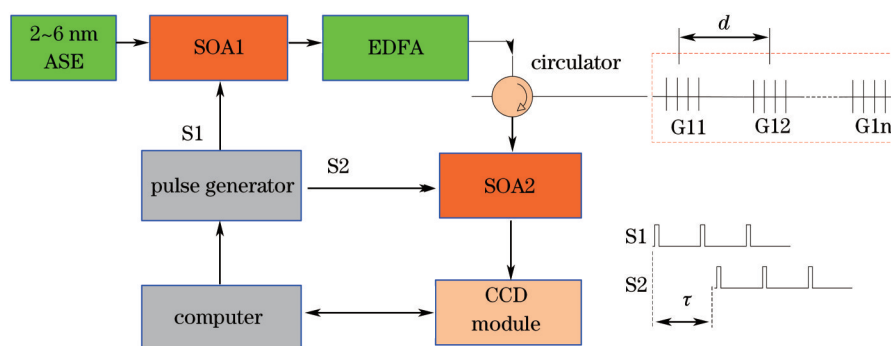


图3 超弱光纤光栅定位系统

Fig.3 Location system of ultra-weak grating array

为了验证系统的定位性能,取在线刻写 1550.50 nm 的时分超弱光栅阵列,波长变化范围在 1550.4~
1550.65 nm,光纤总长约为 3150 m,其中阵列总长约为 2781 m,包含 1009 个平均反射率为 -34 dB 的超弱光
栅,光栅间隔约为 2.5 m。利用超弱光栅定位系统对全光纤进行逐一查询并定位,相位调节步进为 1 ns,获得
如图 4 所示的定位效果图。1#光栅的起始时延为 2517 ns,对应 SOA1 到 1#光栅之间的距离。取光纤拉丝速
度稳定的 1000 m 处光栅阵列定位图进行放大,可以观察到编号 300#、301#、302#、303#光栅的位置分别
为 1002.1、1004.5、1007.0、1009.5 m。当光纤拉丝速度稳定时,单脉冲刻写光栅的间隔为 2.5 m,光栅刻写的
位置误差在毫米量级。实测光栅的间隔为 2.4、2.5、2.5 m,误差在 0.1 m。由此可见,光栅定位的相对误差
主要取决于系统的峰值查找精度,且与相位调节步进所对应的空间长度吻合。

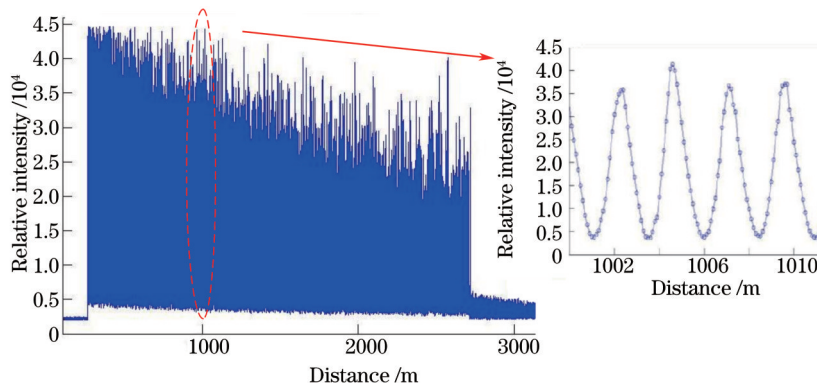


图4 1009个光栅阵列的定位效果

Fig.4 Location result of 1009-FBG array

4 分析与讨论

定位系统的误差取决于CCD解调装置的峰值判定精度,与CCD功率探测误差、相位差调节精度、脉冲形状等密切相关。

4.1 CCD解调模块的功率探测误差

CCD解调模块本身的功率探测误差将直接影响系统的定位精度。在理想矩形输入脉冲和选择脉冲的控制下,假定输入脉冲和选择脉冲的相位差为零,CCD解调模块的功率分辨率足够高,任何相位的微小(如100 ps)偏离,都可能引起信号功率偏离峰值,从而被CCD模块有效探测。而100 ps相位差失配,对应空间上位置的分辨精度为0.01 m,因此,理想系统的定位精度有望达到亚厘米量级。通常,CCD解调模块的功率分辨率在0.1 dB,对于20 ns以下的光脉冲,探测系统能较好识别相位的失配,功率探测误差对峰值判决的影响可以忽略。

4.2 相位差调节精度

入射脉冲和选择脉冲的相位调节是通过控制电路来实现的,控制电路可调节的最小相位与具体的实现方法有关。传统数字信号的相位调节多采用移相技术来实现,这种技术需要对原始信号进行高倍频(如3600倍),从而获得高的相移精度(0.1°)。对于频率为10 kHz的脉冲(周期为100 μ s),选择3600倍的倍频系数,系统可调节的最小时延约为27 ns,系统的空间分辨率低于2.7 m,因此该方法限制了系统的定位精度。目前采用Xilinx最新的FPGA技术,结合10Gb高速串并转换技术,采用预置时延算法,可实现亚纳秒量级的时延(对应相位精度为 0.05°)调节,使系统空间定位精度达到0.1m。

4.3 脉冲形状及宽度

由于SOA在不同输入情况下,其调制特性存在差异。对于SOA1,其输入连续光信号在0 dBm左右,经过SOA1调制后的脉冲输出接近于理想矩形。但脉冲信号经过超弱光栅反射后,返回信号的功率会低于-40 dBm,对于这种低功率输入信号,SOA2在开关选择时会出现明显的弛豫现象,脉冲输出形状发生畸变。这种畸变后的不规则脉冲会导致在输入脉冲和选择脉冲的相位差调节时峰值功率出现波动,从而影响定位精度。INPHENIX公司的SOA对小信号输入的响应时间小于3 ns,当脉冲宽度大于16 ns时,系统弛豫振荡的影响可以忽略。要进一步提升系统的调制速度,需要针对SOA的容抗特性对调制电路的参数进行优化,以获取最小的上升时间。此外,脉冲宽度对定位精度的影响也非常明显。通常脉冲宽度越窄,绝对相位差量的识别精度越高。例如,当脉冲宽度为40 ns时,相位差移动最小时延1 ns后,脉冲功率将下降到原来的97.5%,而当脉冲宽度为20 ns时,移动最小时延1 ns后,脉冲功率将下降到原来的95%。

5 结 论

提出了一种超弱光栅阵列的相位-强度定位方法,设计了1550nm波段超弱光栅阵列的定位系统并开展了相关实验测试和分析。实验结果表明,该方法工作盲区小,定位机理简单,空间定位精度优于0.1m,为大

规模超弱光栅阵列制备和工程铺设质量监测提供了一种优秀的解决方案。

参 考 文 献

- 1 Wang Y M, Gong J M, 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.
- 2 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*, 2014,45(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, 45(12): 12001-12005.
- 3 Liu Jiansheng, Zhang Jing, Li Xin, *et al.*. Study on multiplexing ability of identical fiber Bragg grating in a single fiber[J]. *Chinese Journal Aeronautics*, 2011, 24(5): 607-612.
- 4 Zhang Caixia, Zhang Zhenwei, Zheng Wanfu, *et al.*. Study of a quasi-distributed optical fiber sensing system based on ultra-weak fiber Bragg gratings[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(4): 0405004.
张彩霞, 张震伟, 郑万福, 等. 超弱反射光栅准分布式光纤传感系统研究[J]. *中国激光*, 2014, 41(4): 0405004.
- 5 Zhang Yanjun, Xie Xiaopeng, Bi Weihong. High-speed high-multiplexing distributed temperature sensor network based on weak-reflection fiber gratings[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(4): 0405006.
张燕君, 谢晓鹏, 毕卫红. 基于弱光栅的高速高复用分布式温度传感网络[J]. *中国激光*, 2013, 40(4): 0405006.
- 6 Wang Y M, Gong J M, 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 Huiyong Guo, Jianguan Tang, Xiaofu Li, *et al.*. On-line writing identical and weak fiber Bragg grating arrays[J]. *Chin Opt Lett*, 2013, 11(3): 030602.
- 8 Wang Yongjun, Liu Yongchao, Zhang Jingtao, *et al.*. Interrogation technology for high-speed and high-resolution fiber Bragg grating sensing system[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(2): 0205003.
王拥军, 刘永超, 张靖涛, 等. 高速高分辨率光纤布拉格光栅传感系统的解调技术[J]. *中国激光*, 2013, 40(2): 0205003.
- 9 Luo Z H, Wen H Q, Guo H Y, *et al.*. A time- and wavelength-division multiplexing sensor network with ultra-weak fiber Bragg gratings [J]. *Optics Express*, 2013, 21(19): 22799-22807.
- 10 W H Chung, H Y Tam, P K A Wai, *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.
- 11 Y Dai, Y Liu, J Leng, *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.
- 12 A V Xabier, M L Sonia, C Pedro, *et al.*. 100 km BOTDA temperature sensor with sub-meter resolution[C]. *SPIE*, 2012, 8421: 842117.

栏目编辑: 刘丰瑞