

引用本文: 向春生, 徐磊, 张海林, 等. 基于超声脉冲激励的光纤光栅复用技术[J]. 光通信技术, 2023, 47(3): 69–73.

基于超声脉冲激励的光纤光栅复用技术

向春生¹, 徐磊^{1*}, 张海林², 周峰³

(1. 北京信息科技大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100192; 2. 北京无线电测量研究所, 北京 100039;

3. 中国大恒集团有限公司 北京图像视觉技术分公司, 北京 100080)

摘要: 为了提高光纤光栅传感网络的信息传递密度与容量, 提出基于超声脉冲激励的光纤光栅复用技术, 并进行实验分析, 通过将超声脉冲激励分别导入单光栅与光栅串中, 使单光栅、光栅串发生啁啾。实验结果表明: 单光栅实验中, 超声脉冲使光栅降低其相对反射率; 光栅串实验中, 超声脉冲使其中一个光栅相对反射率下降时, 其余光栅相对反射率上升, 能有效分离 3 个光谱相近的光栅。

关键词: 光纤光栅; 超声脉冲激励; 复用技术

中图分类号: TN914 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2023)03-0069-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2023.03.012

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Fiber grating multiplexing technology based on ultrasonic pulse excitation

XIANG Chunsheng¹, XU Lei^{1*}, ZHANG Hailin², ZHOU Feng³

(1. School of Instrument Science and Optoelectronic Engineering, Beijing Information

Science & Technology University, Beijing 100192, China; 2. Beijing Institute of radio measurement, Beijing 100039, China;

3. Beijing Image Vision Technology Branch, China Daheng Group, Co., Ltd., Beijing 100080, China)

Abstract: In order to improve the information transmission density and capacity of fiber Bragg grating sensing networks, a fiber Bragg grating multiplexing technology based on ultrasonic pulse excitation is proposed and experimental analysis is conducted. By introducing ultrasonic pulse excitation into a single grating and a grating string respectively, chirping occurs in the single grating and grating string. The experimental results indicate that in the single grating experiment, ultrasonic pulses reduce the relative reflectivity of the grating. In the grating string experiment, when the ultrasonic pulse causes the relative reflectance of one grating to decrease, the relative reflectance of the other gratings increases, which can effectively separate three gratings with similar spectra.

Key words: fiber grating, ultrasonic pulse excitation, multiplexing technology

0 引言

由于光纤光栅传感器体积小、抗电磁干扰等优点被广泛应用于工程结构的健康监测以及石油、电力等行业^[1], 但传感系统中测量点过多且光谱带宽有

收稿日期: 2022-06-06。

基金项目: 国家自然科学基金项目(No.51775051、No.61903042)资助; 北京市自然科学基金项目(No.4194077)资助; 111 引智计划项目(No. D17021)资助; 载人航天预研项目(No.20184112043)资助。

作者简介: 向春生(1997—), 男, 硕士研究生, 现就读于北京信息科技大学仪器科学与光电工程学院智能感知工程专业, 参与光纤光栅解调仪项目与应变动静一体化采集仪项目, 荣获校级学业三等奖学金 2 次, 研究方向为光纤光栅传感与 CCD 解调技术。

*** 通信作者:** 徐磊(1999—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光电检测和光纤光栅解调。



限, 在实际应用中需要与光纤光栅复用技术结合使用。目前, 常见的光纤光栅复用技术包括波分复用(WDM)技术^[2]、时分复用(TDM)技术^[3]、码分复用(CDM)技术^[4]和光频域反射(OFDR)技术^[5]。为提高传感器网络的信息传递速度及容量等性能, 光纤光栅传感器往往会与其它技术结合使用^[6-7], 或者多种光纤光栅复用技术综合使用^[8-9]。

虽然上述光纤光栅复用技术各具特点, 但是均受到空间、带宽、施工复杂度和信号采集速率等因素的限制, 无法实现高密度、大容量的信息传递。为了提高传感器网络的信息传递密度与容量, 本文提出一种基于超声脉冲激励的光纤光栅复用技术。

1 光栅应变理论分析

光纤光栅通常通过激光曝光方法使光纤纤芯轴向折射率产生周期性激励,能够对特定波长的光进行反射。光纤光栅的光谱由折射率微扰决定^[10]。超声脉冲经过光纤光栅时产生纵向应变,使光纤光栅折射率微扰的周期发生变化,从而光谱随之也发生变化。光纤光栅的折射率微扰在超声脉冲导致的纵向应变影响下的表达式为

$$\Delta n(z) = \delta n \left[1 + \cos \left[\frac{2\pi}{(1+\varepsilon)\Lambda_0} z \right] \right] \quad (1)$$

其中, δn 表示光栅的折射率调制深度, ε 表示超声脉冲纵波引起的光栅应变, Λ_0 表示脉冲未经过时的光栅折射率微扰的周期, z 表示超声脉冲激励至光栅的距离。

通过上式和相关研究的仿真结果可知,超声脉冲在光纤中传播时,光栅中的应变并不是均匀的。当脉冲长度远大于光栅长度时,光栅内部的周期分布差异相对较小,光谱的相对反射率变化不大,呈现近似平移的现象;当脉冲长度小于光栅长度时,光栅内部的周期差异较大,因此光谱呈现更明显的啁啾现象,反射光谱的相对反射率会明显降低^[11]。

2 基于超声脉冲激励的光纤光栅复用技术

超声脉冲纵波在光纤中传播经过光栅时,会对光栅进行激励并引起光谱啁啾,光谱啁啾会降低自身波长的相对反射率同时升高相邻波长的相对反射率,以区分中心波长相同或相近的光栅,实现光纤光栅的串行复用。本文提出的基于超声脉冲激励的光纤光栅复用技术的思路如下:首先,将超声脉冲导入单个光纤光栅中,利用线阵电荷耦合器件(CCD)解调模块对超声激励下的反射光谱和波长进行采集和解调,研究分析超声脉冲激励下的光谱变化;然后,将超声脉冲导入3个中心波长相近但物理位置不同的光栅串,模拟与分析超声脉冲激励下的光纤光栅复用效果和光谱特性。

3 实验与结果

本文进行超声脉冲激励单光栅实验和光栅串激励实验,验证基于超声脉冲激励的光纤光栅复用技术的可行性。

3.1 超声脉冲激励单光栅实验

超声脉冲激励单光栅实验示意图如图1所示。首先,将超声脉冲发生器产生的脉宽为 $0.5 \mu\text{s}$ 、重复频率

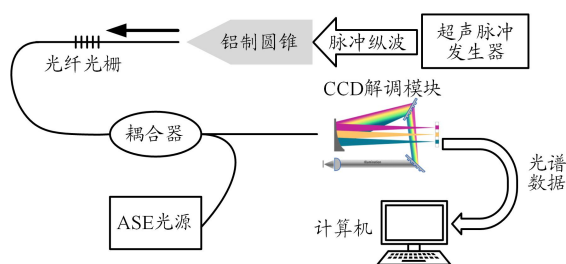


图1 超声脉冲激励单光栅实验示意图

为 35 Hz 的超声脉冲纵波通过铝制圆锥导入光纤中,脉冲沿着光纤传播并经过光栅;然后,将光纤另一端与耦合器相连,耦合器连接放大自发辐射(ASE)光源和线阵CCD解调模块,由线阵CCD解调模块将光谱转化为256个像素点的光谱数据,并以 30 kHz 的频率采集被激励光栅的反射光谱。

超声脉冲导入光纤光栅中的光谱变化情况如图2所示。可以看出,光栅的中心波长位于第60个像素点上,其最大相对反射率为0.695。

为了更清晰地观察光谱中心波长的变化,本文将中心位置的光谱放大至20个像素,在超声脉冲纵波的激励下经过光纤光栅时光谱的变化如图3所示。可以看出,光纤光栅的光谱在超声脉冲纵波的激励下产

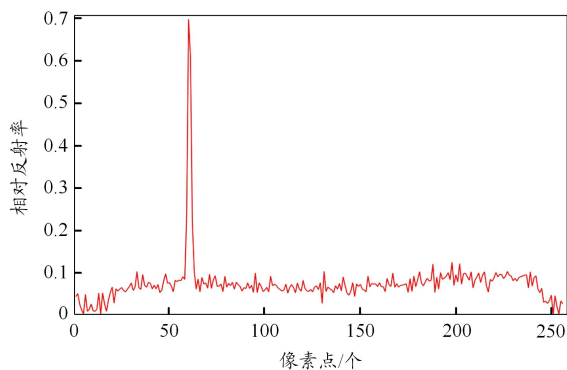


图2 单光栅光谱图

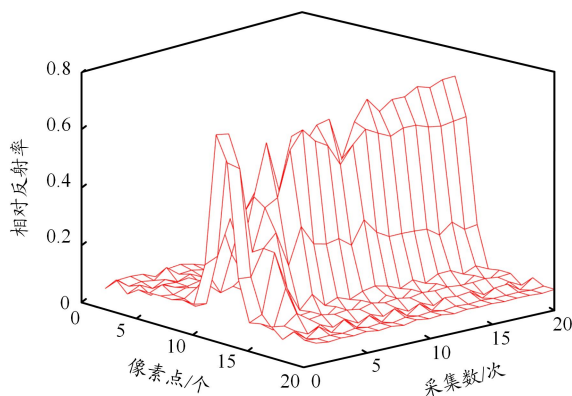


图3 单光栅光谱变化图

生了啁啾现象,其中心波长所在像素点的相对反射率明显减小,具体变化情况如图4所示。可以看出,初始条件下,相对反射率为0.695;第2次采集时,超声脉冲开始进入光纤光栅,其相对反射率发生微小变化,下降至0.687;第3次采集时,超声脉冲完全进入光纤光栅中,相对反射率急剧下降至0.262;直至第5次采集,超声脉冲离开光纤光栅,其相对反射率恢复到0.628。但由于拖尾效应,第6次采集时的相对反射率再次下降至0.453,在第11次采集时相对反射率又一次下降到0.513,直至第16次采集后才逐渐恢复原状。

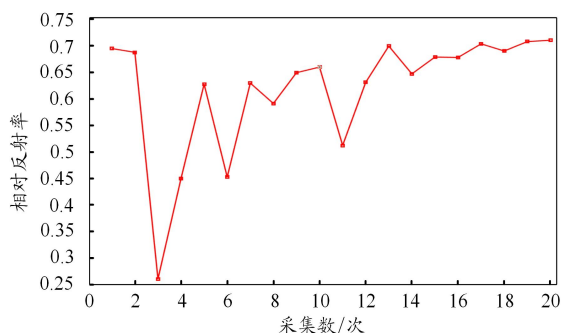


图4 单光栅中心波长点相对反射率变化

为使激励结果更具统计性,本文对超声脉冲多次激励光纤光栅的相对反射率进行统计,得到光谱的相对反射率变化如图5所示。将图5数据按照3sigam原则进行筛选可得:未激励光栅的相对反射率平均值为0.683,激励下的光栅相对反射率平均值为0.508,比未激励的状态下降低了25.6%;激励下的光栅相对反射率最大值为0.627,比未激励的状态下降低了8.2%;激励下的光栅相对反射率最小值为0.243,相对未激励的状态下降低了64.4%。因此,超声脉冲纵波能有效激励光纤光栅。

3.2 光栅串激励实验

将超声脉冲激励单光栅实验中的单光栅更换为3

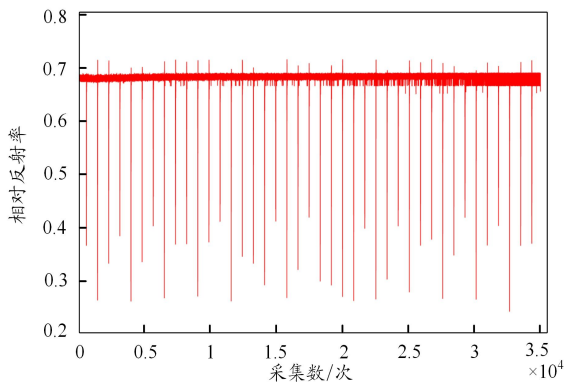


图5 超声脉冲多次激励下光谱相对反射率变化

个间距为15 cm的光栅(光栅串),其它实验参数不变,并模拟超声脉冲激励下的光纤光栅复用情况。光栅串的光谱图如图6所示,光栅串距离铝制圆锥由近及远的中心波长分别在第122个像素点(光栅A),相对反射率为0.568;中心波长在第123个像素点(光栅B),相对反射率为0.545;中心波长在第124个像素点(光栅C),相对反射率为0.609。

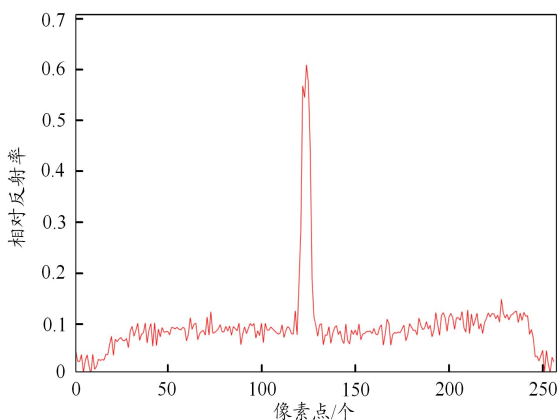


图6 光栅串光谱图

在超声脉冲纵波的激励作用下,将光栅串光谱放大至20个像素的变化情况如图7所示。可以看出,3个光谱依次发生啁啾,光栅串的光谱最大相对反射率对应的像素点一直在变化,变化过程如图8所示。初始条件下,光谱的中心波长在第124个像素点;在第3次采集时,超声脉冲到达光栅A,光栅A发生啁啾,第122个像素点的相对反射率降低,同时提高了其它像素点的相对反射率;在第5次采集时,超声脉冲到达光栅B,第123个像素点的相对反射率降低,同时拉低了第124个像素点的相对反射率,提高了第122个像素点的反射率,此时光谱的中心波长转移至第122个像素点;第7次采集时,超声脉冲的拖尾效应使得第

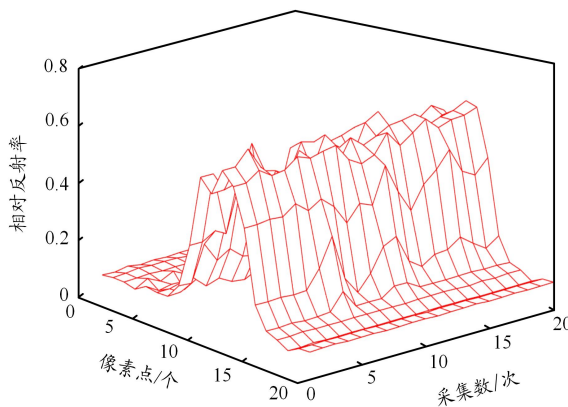


图7 光栅串光谱变化图

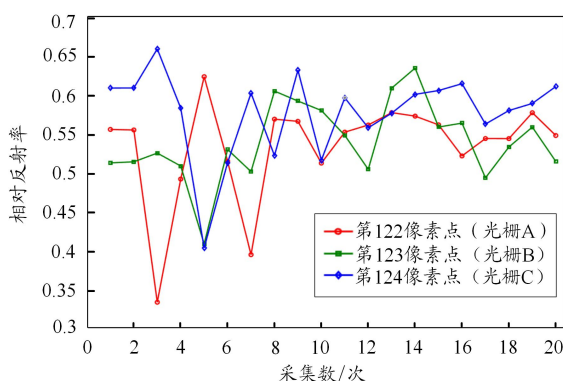


图8 光栅串中心波长的相对反射率变化情况

122 个像素点的相对反射率再次降低,第 124 个像素点的相对反射率升高,光栅的中心波长回到第 124 个像素点;在第 8 次采集时,第 122 个像素点相对反射率基本恢复,第 124 个像素点的相对反射率下降,同时第 123 个像素点的相对反射率升高,此时光谱的中心波长在第 123 个像素点。在第 8 次采集与第 15 次采集间,光谱的中心波长又在 3 个像素点之间转换了 6 次,之后中心波长始终在第 124 个像素点直至光栅恢复原状。

与激励单光栅相比,超声脉冲激励光栅串时,光栅的啁啾不仅会降低中心波长所在像素点的相对反射率,还会提高相邻像素点的相对反射率。所以,在光栅串的激励实验中,各光栅光谱的中心波长相对反射率还会出现升高的现象。

本文对超声脉冲激励下的各光栅中心波长所在像素点的相对反射率进行统计,均按照 3sigam 原则对数据进行筛选,分别得到光栅 A、光栅 B、光栅 C 中心波长所在像素点的相对反射率变化情况,如图 9~图 10 所示。图 9 中,像素点的平均相对反射率为 0.565,被激励后光栅的平均相对反射率为 0.462,变化了 18.2%;相对反射率最大值为 0.637,提高了 12.7%;相对反射率最小值为 0.266,降低了 52.9%。图 10 中,其平均相对反射率为 0.526,被激励后光栅的平均相对反射率为 0.576,变化了 9.5%;相对反射率最大值为 0.662,提高了 25.9%;相对反射率最小值为 0.403,降低了 23.4%。图 11 中,其平均相对反射率为 0.598,被激励后的平均相对反射率为 0.558,变化了 6.7%;相对反射率最大值为 0.690,提高了 15.4%;相对反射率最小值为 0.375,降低了 37.3%。

通过实验结果可知,由于超声脉冲激励下光栅串的光谱变化受光栅与超声脉冲源间距离的影响,且超声脉冲在传播过程中会衰减,光栅串的中心波长的相

对反射率平均值由 0.462 升高至 0.558。因此,与单光栅相比,超声脉冲激励下的光栅串的相对反射率不仅没有降低,还会升高,这与光栅初始的相对反射率有关。对比 3 个光栅的中心波长的相对反射率可知,光栅原本的相对反射率较低时,其升高的变化越明显,例如第 123 个像素点的初始相对反射率仅有 0.526,而在超声脉冲的激励下,其相对反射率达到 0.662,最高变化了 25.9%。

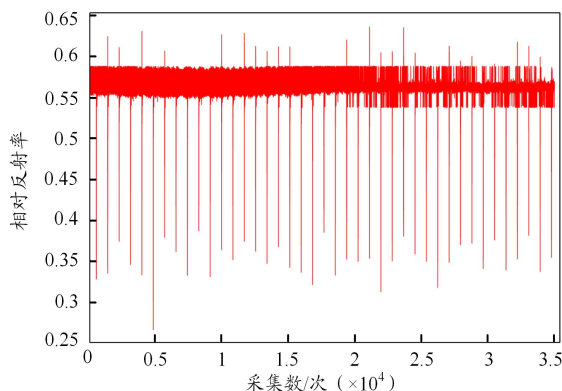


图9 光栅 A 中心波长所在像素点的相对反射率变化情况

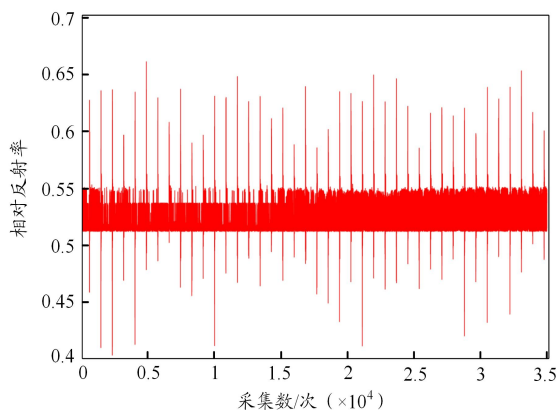


图10 光栅 B 中心波长的相对反射率变化情况

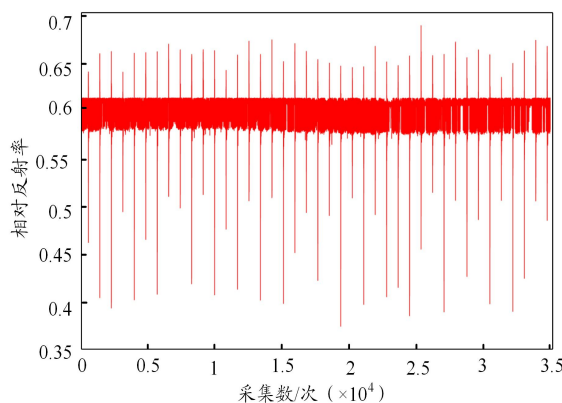


图11 光栅 C 中心波长的相对反射率变化情况

4 结束语

本文提出了基于超声脉冲激励的光纤光栅复用技术,将超声脉冲激励分别导入单光栅与光栅串中,使单光栅、光栅串发生啁啾以分辨出在频域相同或者相近的不同光栅,并分别进行了实验。实验结果表明:在单光栅超声脉冲激励实验中,超声脉冲可以使光纤光栅发生啁啾,中心波长所在像素点的相对反射率平均降低了 25.6%,最高降低了 64.4%。在光栅串的超声脉冲激励实验中,由于光栅啁啾中心波长所在像素点的相对反射率降低,且其相邻像素点的光强也会升高,所以在超声脉冲的激励作用下,3 个频域相近的光栅在其中一个光栅发生啁啾,中心波长相对反射率降低时,其它光栅的中心波长相对反射率会升高。本文实验结果为超声脉冲纵波激励的光纤光栅复用技术实现提供了参考,为其在工程上的实际应用打下了基础。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] OU Y, ZHOU C, QIAN L, et al. Large WDM FBG sensor network based on frequency-shifted interferometry[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2017, 29(6): 535-538.
- [3] XIA L, WU Y, RAHUBADDE U, et al. Tdm interrogation of identical

- weak fbgs network based on delayed laser pulses differential detection[J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10(3): 1-8.
- [4] TRIANA A, PASTOR D, VARÓN M. Code division multiplexing applied to FBG sensing networks: FBG sensors designed as discrete prolate spheroidal sequences (DPSS-FBG Sensors)[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(14): 2880-2886.
- [5] ZHANG H, FAN D, MA Y, et al. Interrogation of 5000 ultraweak fiber Bragg grating sensors using optical frequency domain reflectometry[J]. Optical Engineering, 2018, 57(10): 106110-106110.
- [6] CHILDS P. An FBG sensing system utilizing both WDM and a novel harmonic division scheme [J]. Journal of Lightwave Technology, 2005, 23(1): 348-354.
- [7] 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.
- [8] GOTTEN M, LOCHMANN S, AHRENS A, et al. 2000 serial FBG sensors interrogated with a hybrid CDM-WDM scheme [J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(8): 2493-2503
- [9] LI D, JIANG Q, SUI Q. Simulation of FBG sensing networks using CDM+ SDM[EB/OL]. (2022-06-06)[2022-06-06]. https://xueshu.baidu.com/usercenter/paper/show?paperid=26c7ffa27456bc9bf9b9056d98259f18&site=xueshu_se.
- [10] 曾祥楷, 饶云江. Bragg 光纤光栅傅里叶模式耦合理论 [J]. 物理学报, 2010, 59(12): 8597-8606.
- [11] 周峰, 叶伟娟, 刘锋, 等. 超声脉冲纵波调制光纤光栅的光谱特性研究[J]. 激光与红外, 2021, 51(9): 1200-1205.