

基于变步长扫描策略的FBG高速解调

梁磊 张宇宁 杜尚明 童晓玲

High speed demodulation of FBG based on variable step scanning strategy

Liang Lei, Zhang Yuning, Du Shangming, Tong Xiaoling

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/IRLA20230671>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

声光调Q CO₂激光器波长调谐理论分析与实验研究

Theoretical analysis and experimental research on tunable acousto-optic Q-switched CO₂ laser

红外与激光工程. 2017, 46(7): 705002 <https://doi.org/10.3788/IRLA201746.0705002>

波长可切换可调谐耗散孤子锁模掺镱光纤激光器

Wavelength switchable and tunable dissipative soliton mode-locking Yb-doped fiber laser

红外与激光工程. 2020, 49(10): 20200026 <https://doi.org/10.3788/IRLA20200026>

真空热环境下不同涂覆层光纤传输损耗特性影响研究

Research on influence of characteristic of optical fiber transmission loss with different covers in vacuum thermal environment

红外与激光工程. 2019, 48(11): 1118002 <https://doi.org/10.3788/IRLA201948.1118002>

绿光泵浦的黄光波段可调谐窄线宽光学参量振荡器

Green pumped yellow wavelength tunable narrow linewidth optical parametric oscillator

红外与激光工程. 2020, 49(11): 20200275 <https://doi.org/10.3788/IRLA20200275>

基于差压原理的矿用光纤光栅风速传感器

Mine wind speed sensor using fiber Bragg grating based on differential pressure principle

红外与激光工程. 2018, 47(4): 422002 <https://doi.org/10.3788/IRLA201847.0422002>

基于F-P温控标准具的高稳定性FBG波长解调系统

Highly stable FBG wavelength demodulation system based on F-P etalon with temperature control module

红外与激光工程. 2017, 46(1): 122002 <https://doi.org/10.3788/IRLA201746.0122002>

基于变步长扫描策略的 FBG 高速解调

梁磊^{1,2}, 张宇宁^{1,2}, 杜尚明^{1,3}, 童晓玲^{1*}

1. 武汉理工大学 光纤传感技术国家工程实验室, 湖北 武汉 430070;
2. 武汉理工大学 信息工程学院, 湖北 武汉 430070;
3. 武汉理工大学 三亚科教创新园, 海南 三亚 572000)

摘要: 现有的 FBG 高速解调方法都各有优缺点, 其中扫描式光谱分析系统通用性好、成本较低, 在速度和精度上的表现较为均衡。针对扫描激光器型光纤布拉格光栅波长解调仪在实际应用中调谐次数多、扫描耗时久等问题, 设计了一种变步长扫描策略, 使用较少的波长调谐次数实现光谱局部峰值的检出。实验表明, 在通道内只有单个光栅的情况下, 使用变步长扫描策略需要扫描的点数降低了至少 90%, 扫描耗时减少了 90%, 解调速度提高至 10 倍。在上位机对传输的局部光谱数据进行高斯拟合解调, 并对变步长扫描策略进行信噪比仿真实验测试, 仿真证明变步长扫描策略适用于信噪比高于 9.23 dB 的情况且对后续解调的精度和平均误差几乎没有影响, 具有一定的应用价值。

关键词: 光纤光栅; 高速解调; 可调谐激光器; 波长调谐

中图分类号: TP212 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20230671

0 引言

与传统的电传感器相比, 光纤传感器以光为载体传递信息, 具有耐腐蚀、耐高温、抗电磁干扰等优点, 可实时测量温度、应变、加速度等多种物理量, 被广泛应用于航空航天、生物医疗、石油勘探等^[1-6]领域。

目前, 在温度、应力监测等静态测量领域, 光纤光栅解调仪器已经得到了普遍应用, 而在振动、冲击等高速动态信号测量领域, 高速光纤布拉格光栅 (FBG) 解调系统的研发仍然有很高的实用价值^[7]。李佳等^[8]采用线阵电荷耦合器件 (CCD) 光谱成像法高速采集光纤光栅在时域上的 256 个像素点对应的光强, 通过高斯拟合得到光纤布拉格光栅反射光谱, 实现最高 35 kHz 的光谱采样速率, 以降低分辨率水平为代价提高测量速度。乔学光等^[9]采用光纤超荧光光源的线性边带作为边沿滤波器, 以边沿滤波法实现了 200 kHz 的解调频率, 但解调性能会受光源稳定性影响。Ding^[10]提出了一种基于低损耗干扰阵列宽带

锯齿 (JAWS) 滤波器的快速解调系统, 采用双边缘滤波法解调, 解调速度达到 200 kHz, 但受限于滤波器的特性, 只能询问小波长范围内的 FBG, 通用性不强。

相比之下, 扫描激光器法具有光信号功率大、信噪比高、可测通道数目多、成本相对较低的优势^[11], 但其采用固定步长逐点扫描的方式, 一次扫描过程采集数千个信号点, 需要花费大量时间获取光谱数据, 限制了解调速度。郭峻^[12]通过改进数字超模分布式布拉格反射激光器 (DS-DBR) 的驱动电路, 使激光器扫描频率达到 1 MHz, 通过提高激光器的波长切换速度提高解调速度。Yang 等^[13]提出了一种基于布内曼频率估计的 FBG 快速波长解调算法, 只需获得 FBG 包络中 4 个采样点, 适用于低分辨率的 CCD 光谱仪或可调谐激光器解调系统, 通过减少获取的采样点数提高解调速度, 但是精度不高。

针对扫描激光器型光纤布拉格光栅波长解调仪在实际应用中调谐次数多、扫描耗时久的问题, 文中设计了一种变步长的激光器扫描策略, 使用较少的波长调谐次数实现光谱局部峰值的检出, 减少了扫描时

收稿日期: 2024-01-03; 修订日期: 2024-02-18

基金项目: 海南省重大科技计划项目 (ZDKJ202019); 三亚崖州湾科技城管理局科研项目 (SKJC-2020-01-016)

作者简介: 梁磊, 男, 教授, 博士, 主要从事光纤光栅传感方面的研究。

通讯作者: 童晓玲, 女, 副教授, 博士, 主要从事光纤传感方面的研究。

间和待传输的数据量,从而降低了数据传输压力和软件的时空复杂度,提高了解调速度,且不影响后续中心波长的计算。

1 变步长扫描策略原理

1.1 逐点扫描初始化

为了增加高效扫描策略的通用性,解调系统启动后需要先通过一次逐点扫描获取最高分辨率的光谱,再以根据光谱确定粗扫描时的扫描步长与阈值。

在一轮扫描过程中,采集点的数量直接取决于扫描范围和扫描步长。则需要采集的点数满足:

$$N_q = \frac{(\lambda_{\max} - \lambda_{\min})}{q} + 1 \quad (1)$$

式中: N_q 为需要采集的点数; q 为光谱最小调谐步长; λ_{\max} 为扫描的光谱波长最大值; λ_{\min} 为扫描的光谱波长最小值。

由于文中的高效扫描策略的关键之一是初始化时设定的阈值,FBG 反射谱中带有功率的加性噪声,影响后续阈值确定算法的准确性,因此在计算阈值前,需要先采用滑动平均滤波器对逐点扫描得到的模数转换器 (ADC) 数据进行平滑处理:

$$y(n) = [x(n-1) + x(n) + x(n+1)]/3 \quad (2)$$

滤波后的数据由最大类间方差法 (OTSU) 计算阈值。OTSU 是一种自适应的阈值确定算法,常用于实时图像分割领域,基本思想是根据图像的灰度特性,将图像分成目标和背景两个部分,目标和背景之间的类间方差越大,说明分割的效果越好^[14]。

将 OTSU 算法引入光谱波峰分割中,采样数据被阈值分割为目标波峰区域 A 和背景噪声区域 B ,区域 A 和区域 B 出现的概率分别为:

$$\omega_A = \frac{N_A}{N} = \frac{\sum_{i=t+1}^{L-1} n_i}{N} \quad (3)$$

$$\omega_B = \frac{N_B}{N} = \frac{\sum_{i=0}^t n_i}{N} \quad (4)$$

式中: ω_A 为区域 A 出现的概率; ω_B 为区域 B 出现的概率; N_A 为区域 A 内的采样点数; N_B 为区域 B 内的采样点数; $[0, L-1]$ 为 ADC 采样值范围; N 为波长扫描范

围内的可采样点数; t 为阈值; n_i 是采样值为 i 的采样点数。

区域内采样点均值分别为 μ_A 和 μ_B :

$$\mu_A = \frac{Y_A}{N_A} = \frac{\sum_{i=t+1}^{L-1} i \times n_i}{\sum_{i=t+1}^{L-1} n_i} \quad (5)$$

$$\mu_B = \frac{Y_B}{N_B} = \frac{\sum_{i=0}^t i \times n_i}{\sum_{i=0}^t n_i} \quad (6)$$

式中: Y_A 和 Y_B 分别为区域 A 和 B 内采样点的总采样值。

区域 A 与 B 之间的类间方差 τ^2 为:

$$\tau^2 = \omega_A \omega_B (\mu_A - \mu_B)^2 \quad (7)$$

由于总采样点数 N 是固定的,省略该项不影响最大类间方差的选取,此处可对其进行省略以便于计算,即简化的类间方差 δ^2 为:

$$\delta^2 = \sum_{i=t+1}^{L-1} n_i \times \sum_{i=0}^t n_i \times \left(\frac{\sum_{i=t+1}^{L-1} i \times n_i}{\sum_{i=t+1}^{L-1} n_i} - \frac{\sum_{i=0}^t i \times n_i}{\sum_{i=0}^t n_i} \right)^2 \quad (8)$$

当类间方差最大时,目标和背景的分割差错概率最小,因此选取此时的阈值 t 为最终的阈值。

阈值选取完成后,按顺序读取滤波后的 ADC 数据与解调仪设定的阈值作比较,以采样点 $y_i (i \in \mathbb{R} | 0 \leq i \leq N-1)$ 中大于阈值的采样点作为有效数据点,以连续的有效数据点作为一个波峰,在系统内部设计了寄存器,保存各波峰的开始索引 a 和结束索引 $b (a, b \in i)$,并计算位置之差 $\Delta i = b - a + 1$ 作为峰宽。若存在峰宽 $\Delta i < 5$ 的波峰,视为噪声造成的假峰舍弃。

为了在变步长扫描阶段能去除大于阈值的假峰,需要保证波峰范围内至少有 3 个粗扫描采样点大于阈值,因此当有多个波峰存在时,粗扫描步长为:

$$p = \Delta i_{\min} / 4 \quad (9)$$

式中: p 为粗扫描步长; Δi_{\min} 为波峰峰宽中的最小值。

则第一轮粗扫描的采样点数为:

$$N_1 = \left\lceil \frac{N-1}{p} \right\rceil + 1 \quad (10)$$

式中: N_1 为第一轮粗扫描的采样点数; p 为粗扫描步长; N 为逐点扫描模式的总采样点数。

1.2 变步长扫描部分

变步长扫描策略的实现主要由粗扫描、阈值比较、范围选取、局部逐点扫描 4 个阶段组成, 如图 1 所示。

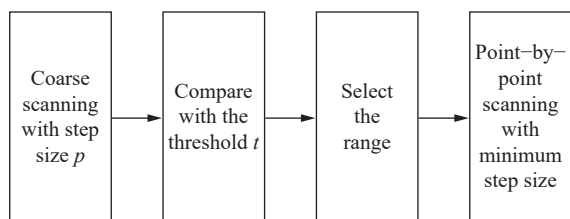


图 1 变步长扫描策略的流程图

Fig.1 Flow chart of the variable step scanning strategy

在粗扫描阶段, 现场可编程门阵列 (FPGA) 读取存储的“地址-码字”查找表, 采样地址以 p 为步长增加, 使激光器输出波长按照所设置的扫描间隔稳定输出, 直到下一个采样地址超出地址空间即为粗扫描结束。粗扫描得到采样数据 $y_j (j \in \mathbb{R} | 0 \leq j \leq N_1 - 1)$, 若 $y_j \geq t$, 将采样数据 y_j 与索引 j 分别存入寄存器中。

其中, 采样地址与粗扫描采样点的索引之间存在关系如下:

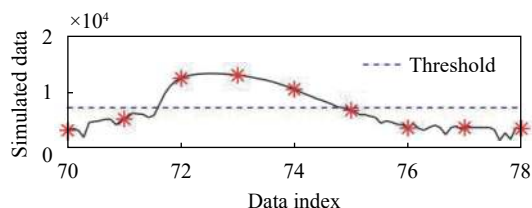
$$i = j \times p \quad (11)$$

式中: i 为采样地址; j 为粗扫描数据的索引。

由于粗扫描得到的采样点间隔大不适合进行滤波去噪, 因此需要通过进一步判断以舍弃因受噪声影响使采样值大于阈值的点。对于大于阈值的采样点, 若与其相邻的采样点均小于阈值, 则视为噪声点舍弃, 余下的连续点 $y_c, y_{c+1} \dots y_d (c, d \in j)$ 则视为波峰范围内的粗扫描采样点。

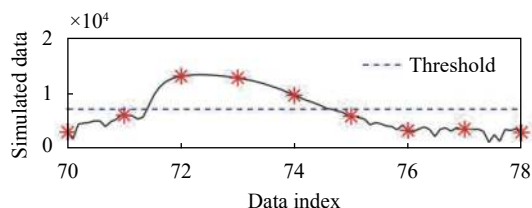
由于第一轮粗扫描阶段扫描的数据索引不变, 当光纤中心波长发生迁移时, 落在波峰范围内的粗扫描采样点会在 3 或 4 个中变化, 从而影响第二轮扫描的采样点数量。如图 2 所示, 图 2(a) 为逐点扫描得到的一组采样数据, 大于阈值的粗扫描采样点为 3 个; 当波峰向右迁移 0.09 nm 时, 大于阈值的粗扫描采样点仍为 3 个; 当波峰向左迁移 0.05 nm 时, 大于阈值的粗

扫描采样点变为 4 个。



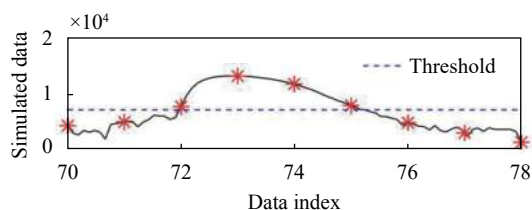
(a) 初始波峰与粗扫描采样点

(a) The initial peak with sampling points during coarse scanning



(b) 右移的波峰与粗扫描采样点

(b) The right-shifted peak with sampling points during coarse scanning



(c) 左移的波峰与粗扫描采样点

(c) The left-shifted peak with sampling points during coarse scanning

图 2 波峰迁移示意图

Fig.2 Schematic diagram of wave crest migration

针对第二轮扫描的点数可能不固定的问题, 统一以大于阈值的粗扫描采样点的最大可能值为标准, 即以 $e = c + 3$ 为修正后的波峰范围内的粗扫描采样点索引的最大值。

根据公式 (11), 对于修正后的波峰范围内的粗扫描采样点 $y_j (j \in \mathbb{R} | c \leq j \leq e)$, 其采样地址范围为 $[p \times c, p \times e]$ 。为了确保后续逐点扫描时能采到所有大于阈值的采样点, 实际选取二次扫描范围时以波峰范围内的粗扫描采样点范围分别向左和右扩展 1 个粗扫描采样点, 即第二轮的逐点扫描选定采样地址范围 $[p \times (c - 1), p \times (e + 1)]$ 。则第二轮逐点扫描的采样点数为:

$$N_2 = (e - c + 2) \times p + 1 = 5p + 1 \quad (12)$$

FPGA 依据二次扫描范围的起始地址 $d_1 = p \times (c - 1)$ 和结束地址 $d_2 = p \times (e + 1)$ 读取存储的

“地址-码字”查找表, 采样地址以 1 为步长增加。起始地址 d_1 、结束地址 d_2 与扫描得到的采样数据 $y_i (i \in \mathbb{R} | d_1 \leq i \leq d_2)$ 序列共同封装为数据包传输至上位机。

由公式 (10) 和 (12) 可知, 在一轮解调过程中进行了两轮扫描, 总采样点数为:

$$N_{\text{all}} = N_1 + N_2 = \left\lceil \frac{N-1}{p} \right\rceil + 5p + 2 \quad (13)$$

其中需要发送给上位机进行寻峰处理的只有 N_2 个采样数据。

由于激光器每扫描一个点需要的时间是固定的, 更少的采样点意味着更低的扫描时间, 由于解调所需时间包括扫描时间, 因此更少的点也意味着更高的解调速度。

2 实验装置与准备

2.1 基于扫描激光器的解调系统

文中提出并设计了一种基于调制光栅 Y 分支型 (MG-Y) 激光器的 FBG 波长解调系统, 如图 3 所示, 该系统由 ATLS7500 型分布式布拉格反射 (DBR) 激光器、FPGA、高精度模数转换器、高精度数模转换器 (DAC)、光电探测器、对数跨阻放大器 and 温控模块组成。

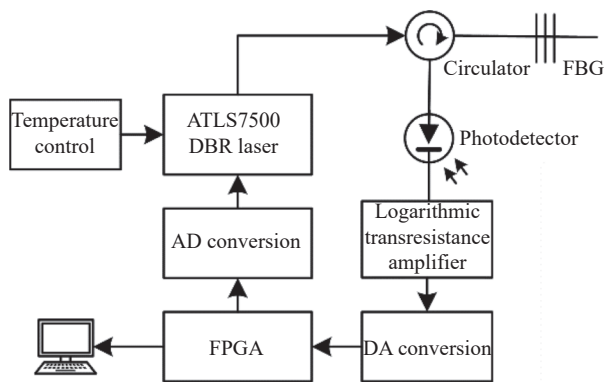


图 3 基于 DBR 激光器的光纤光栅解调系统

Fig.3 Fiber Bragg grating interrogation scheme based on DBR laser

温控模块使激光器工作在恒定温度, FPGA 中设计的数字系统根据需要扫描的波长控制 DAC 输出高精度电流, 从而使可调谐激光器发出波长稳定的激光, 入射光经 FBG 阵列反射后通过环形器、光电探测器和对数跨阻放大器转换为电压信号, 由 ADC 进行

模数转换后输入 FPGA 进行处理, 二次逐点扫描得到的光谱数据会由 FPGA 发送至上位机进行解调。

2.2 激光器输出波长标定

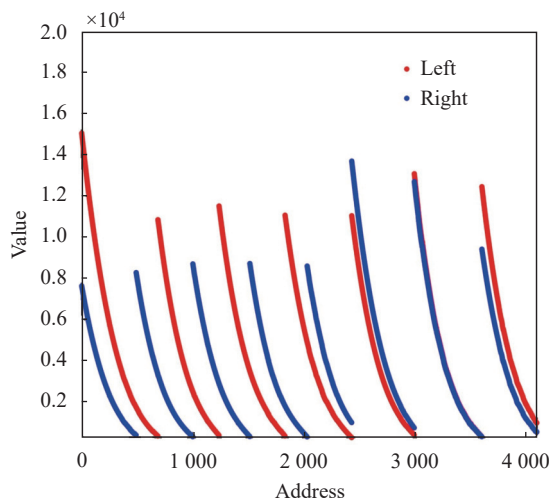
扫描策略实现的关键之一在于可调谐半导体扫描光源的精确控制^[15], 标定时需要精确测量给定控制电流下的激光器输出波长。MG-Y 激光器正常工作需要 5 路电流输入, 其中需要左、右光栅区和相位区这三个调谐区电流同时调谐以改变输出激光的波长。为了使输出激光的波长能稳定在扫描策略所需要的波长上, 以适用于光纤传感应用的 MG-Y 型激光器快速自动化测试技术^[16], 构建了覆盖 1 525.9~1 566.85 nm、光谱扫描步长 $R_q = 0.01\text{nm}$ 的“波长-电流”查找表。其中, 波长扫描范围内的可采样点数 $R_N = 4096$ 。

将“波长-电流”查找表转换为“地址-码字”查找表存入随机存取存储器 (ROM) 中, 如图 4 所示。FPGA 按地址读取 ROM 中的码字写进 DAC 对应的寄存器中, DAC 输出调谐电流控制激光器输出对应地址的波长。

激光器输出波长满足公式 (14), 如图 5 所示。

$$\lambda = q \cdot i + \lambda_0 \quad (14)$$

式中: λ 为激光器输出波长; $q = 0.01$ 为激光器最小调谐步长; $i (i \in [0, 4095])$ 为波长对应的采样地址; $\lambda_0 = 1 525.9$ 为采样地址 $i = 0$ 处对应的激光器输出波长。



(a) 左右反射器电流

(a) Left and right reflector current

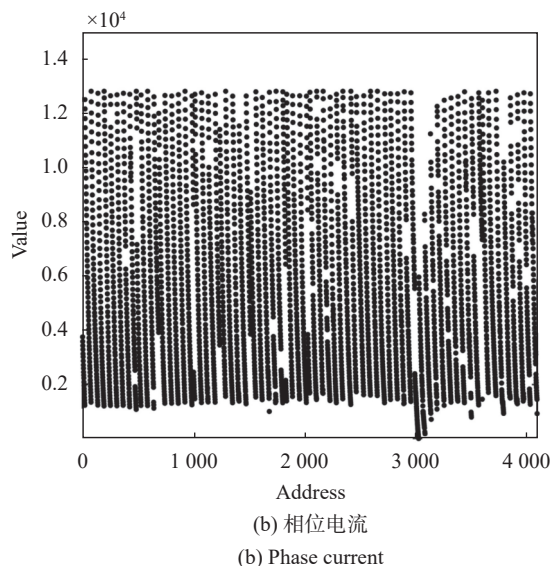


图 4 电流对应的 DAC 码字与 ROM 地址的查找表

Fig.4 Lookup table for DAC codeword corresponding to current and ROM address

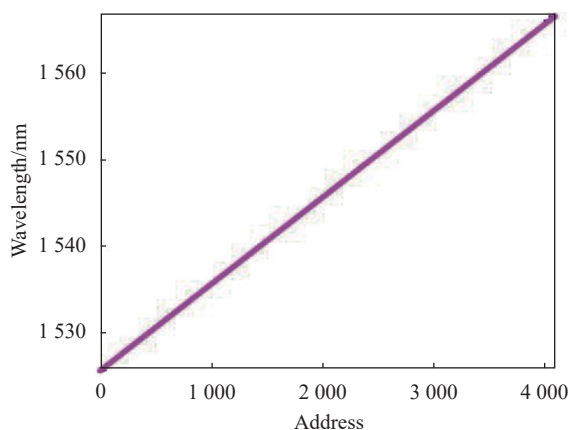


图 5 激光器输出波长与采样地址的关系

Fig.5 Relationship of the laser output wavelength and the sampling address

后续解调过程中可直接对采样地址进行计算得到光纤中心波长对应的采样地址值,再根据采样地址与激光器输出波长的关系求得中心波长。

3 实验验证

3.1 抗噪性能仿真分析

FPGA 以最小扫描步长进行全局扫描,对扫描得到的光谱数据平滑滤波后截取大于阈值的采样值进行高斯拟合寻峰,得到的高斯拟合函数的期望地址值近似为 1 521.07,代入公式 (14) 可得到中心波长为

1 541.111 nm。

为了测试文中的变步长扫描策略受信噪比 (SNR) 的影响,选取与拟合得到的高斯函数具有相同 3 dB 带宽和期望、幅值不同的高斯函数 Y_g 作为无噪声时的光谱信号,由于解调仪得到的光谱经过对数互阻放大器的作用,可以推出无噪声的原始光谱信号近似 $Y_s = \exp(Y_g)$ 。叠加噪声后再取对数得到解调仪逐点扫描采集的数据的仿真值。通过调整噪声功率,可在不同信噪比的情况下测试变步长扫描策略的适用性。

数字信号 $x(n)$ 的功率计算公式为:

$$P = \frac{\sum_{n=0}^{N_x-1} x(n)^2}{N_x} \quad (15)$$

式中: P 为序列 $x(n)$ 的功率; N_x 是序列 $x(n)$ 的长度。

信噪比计算公式为:

$$SNR = 10 \lg \frac{P_s}{P_n} \quad (16)$$

式中: SNR 是信噪比; P_s 是信号的功率; P_n 是噪声的功率。

当信噪比为 7.87 dB 时,如图 6 所示,初始化时通过 OTSU 得到的阈值没能合理地分割波峰与无用信号,此时不再适用文中的变步长扫描策略。

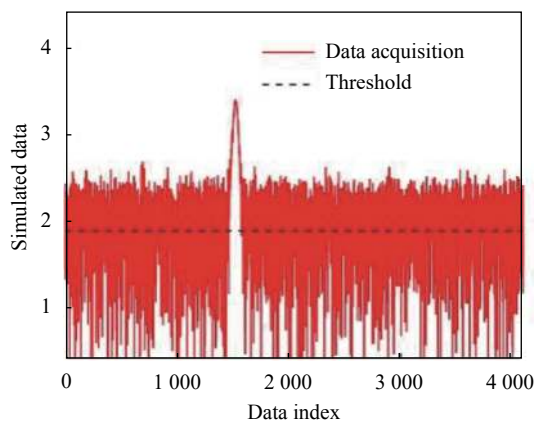


图 6 信噪比 7.87 dB 时的阈值分割图

Fig.6 Threshold segmentation diagram when SNR is 7.87 dB

当信噪比为 9.23 dB 时,如图 7 所示,初始化得到阈值 $R_t = 2.54$ 能合理分割波峰与无用信号,粗扫描步长 $R_p = 24$ 。

根据阈值 $R_t = 2.54$ 和粗扫描步长 $R_p = 24$ 使用变

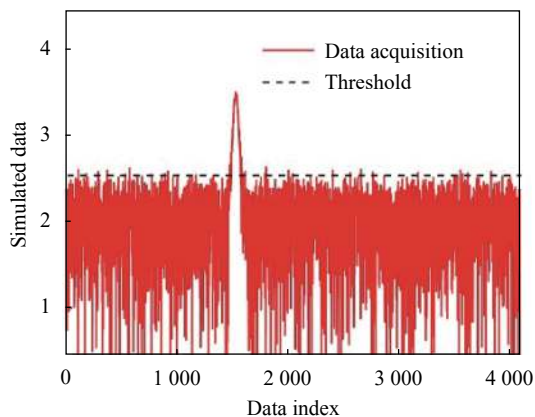
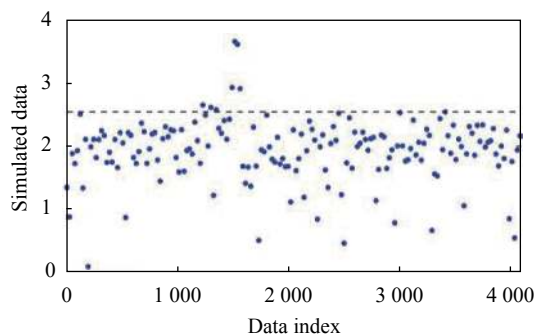


图 7 信噪比 9.23 dB 时的阈值分割图

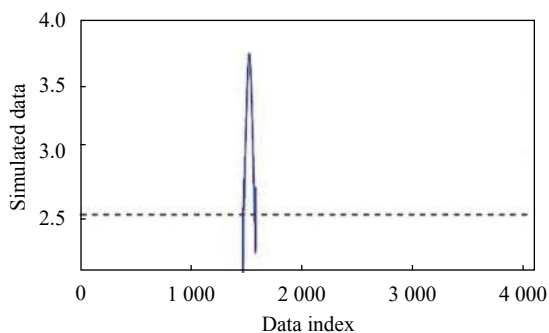
Fig.7 Threshold segmentation diagram when SNR is 9.23 dB

步长扫描策略,如图 8 所示。第二轮扫描中准确获取了光谱中波峰处的数据。图 8(a)中粗扫描采样点 171 个,图 8(b)中逐点扫描采样点 121 个,相对于固定步长逐点扫描方式所需的 4 096 个采样点减少了 92.9%。



(a) 第一轮: 粗扫描

(a) Round one: coarse scanning



(b) 第二轮: 逐点扫描

(b) Round two: point-by-point scanning

图 8 采样数据

Fig.8 Sampled data

3.2 解调性能的仿真分析

在信噪比 13.65~50.87 dB 范围内等间隔选取 5 种

信噪比情况,使用固定步长分别为 1、5、10 的扫描方式和变步长扫描策略各进行 100 组仿真测试,并对每组测试得到的采样数据平滑滤波后进行高斯拟合寻峰得到测量峰值,以原始信号 Y_g 的期望值作为理论峰值,得到理论峰值与测量峰值的误差值。计算各信噪比下使用固定步长扫描方式和变步长扫描策略的采样数据解调的平均寻峰误差,如图 9 所示。

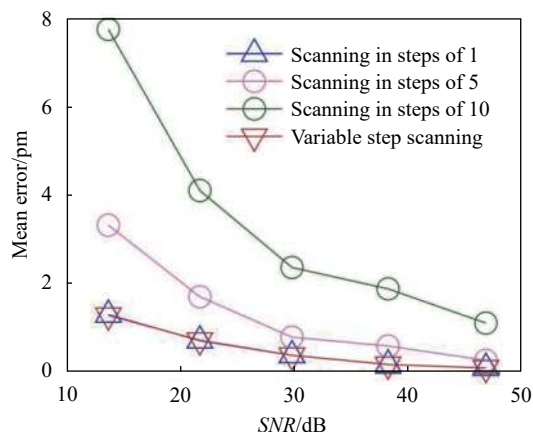


图 9 在不同信噪比下使用不同固定步长扫描方式与使用变步长扫描策略的平均寻峰误差

Fig.9 The average peak-seeking error of scanning with different fixed step sizes and the variable step scanning strategy at different SNR

由图 9 可知,随着信噪比的提升,四种解调方式的平均误差均有所下降。其中,在信噪比相同的情况下,固定步长为 1 的扫描方式和变步长扫描方式的平均寻峰误差基本相同,且扫描时固定步长越大,寻峰的平均误差越大。

选取 $SNR = 13.65$ dB 和 $SNR = 38.25$ dB 情况下得到的四种扫描方式的寻峰误差,绘制概率分布直方图和正态分布拟合图,如图 10~11 所示。

图 10~11 中 μ 和 σ 分别为正态分布拟合图的期望和标准差,根据 3σ 原则,可以认为区间 $(\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma)$ 为误差值实际可能的取值区间。在 50 MHz 的时钟频率下,选取扫描范围 1 525.9~1 566.85 nm,激光器的 1 个单位步长为 0.01 nm,每隔 3 个时钟周期切换一次输出波长,变步长扫描策略的两种扫描模式之间的逻辑判断额外耗费 5 个时钟周期,则根据图 10~11 可以推算出四种扫描方式在两组信噪比下采样数据的解调性能,如表 1 所示。

由表 1 可知,使用变步长扫描策略与固定步长为

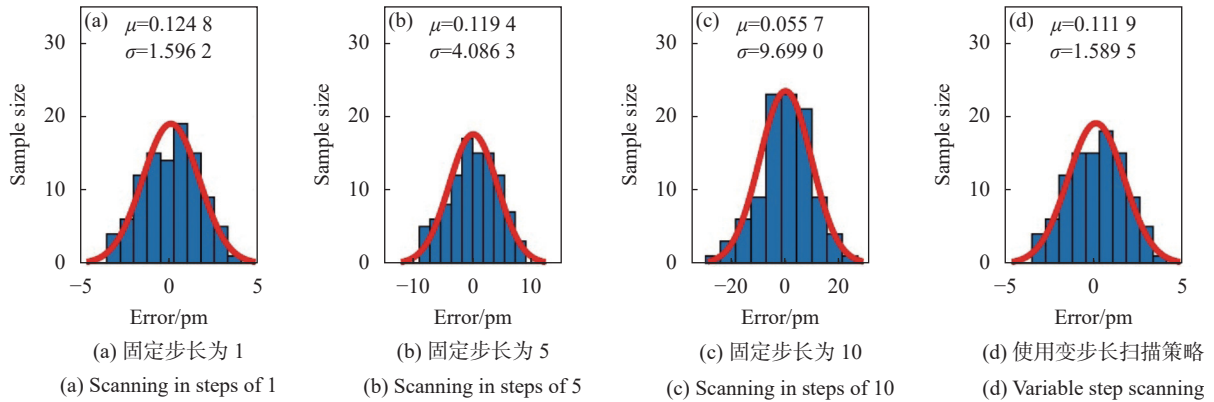


图 10 $SNR = 13.65$ dB时四种扫描方式的寻峰误差的概率分布直方图和正态分布拟合图

Fig.10 Histogram and normal distribution fitting plot of the probability distribution of peak-seeking error under the four scanning modes when $SNR = 13.65$ dB

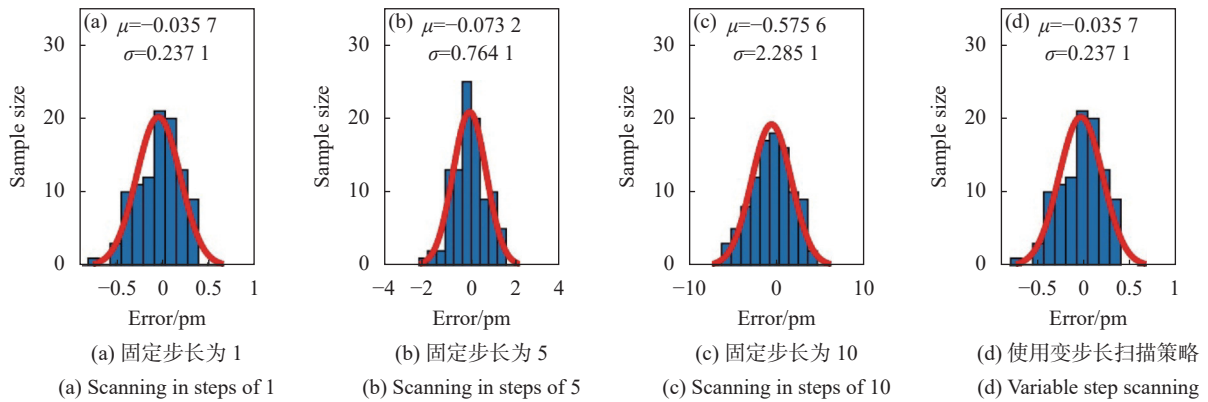


图 11 $SNR = 38.25$ dB时四种扫描方式的寻峰误差的概率分布直方图和正态分布拟合图

Fig.11 Histogram and normal distribution fitting plot of the probability distribution of peak-seeking error under the four scanning modes when $SNR = 38.25$ dB

表 1 不同信噪比下四种扫描方式的采样数据的解调性能

Tab.1 Demodulation performance of sampled data from four scanning methods with different SNR

SNR/dB	Scanning mode	Maximum peak seeking error/pm	Scanning points	Scanning time/ μs
13.65	Scanning in steps of 1	4.913 4	4 096	245.76
	Scanning in steps of 5	12.378 3	820	49.2
	Scanning in steps of 10	29.152 7	410	24.6
	Variable step scanning	4.880 4	289	17.44
38.25	Scanning in steps of 1	0.747	4 096	245.76
	Scanning in steps of 5	2.365 5	820	49.2
	Scanning in steps of 10	7.430 9	410	24.6
	Variable step scanning	0.747	258	15.58

1 的扫描方式获取的采样数据的解调精度相近,且随着信噪比增加趋于相同。其中,由于不同信噪比下选取的阈值和粗扫描步长不同,变步长扫描方式的采样点数不同,但在阈值和粗扫描步长已确定的情况下后

续扫描点数不会再发生改变,且扫描点数和扫描耗时均减少了至少 90%。采用固定步长为 10 的扫描方式与变步长扫描方式的扫描耗时相近,但采样数据解调误差太大,实际应用价值不高。

此外,使用变步长扫描策略在实际应用中仅第二轮扫描的点需要传输,极大地减少了传输与后续解调消耗的资源。在不受后端解调算法处理速度制约的情况下,采用变步长扫描策略可以使解调速度提高至 10 倍。

4 结 论

文中设计了一种变步长扫描策略,该策略通过 OTSU 算法获得阈值和粗扫描步长,在一次解调过程中通过两轮扫描,能以更少的采样点数获取光谱波峰处的数据。在通道内只有单个光栅的情况下,与固定步长的扫描方式相比,采用变步长扫描方式的采样点数减少了至少 90%,使扫描激光器型解调系统的解调速度提高至 10 倍。文中实验均基于单峰检测,单通道内多光纤光栅的情况下变步长扫描策略的采样点数与光栅数目会成倍数关系。仿真与解调实验的结果表明,在信噪比不低于 9.23 dB 的情况下,可以使用变步长扫描策略,且对后续解调的精度和准确性几乎没有影响,能够可靠地满足基于扫描激光器型解调系统的高速解调需求,具有很好的应用前景。

参考文献:

- [1] Liu Tiegeng, Wang Shuang, Jiang Junfeng, et al. Advances in optical fiber sensing technology for aviation and aerospace application [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, 35(8): 1681-1692. (in Chinese)
- [2] Wang Haoran, Dong Mingli, Sun Guangkai, et al. Remote sensing satellite structure in-orbit thermal strain Bragg fiber grating monitoring method [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(12): 20220202. (in Chinese)
- [3] Qiao Xueguang, Shao Zhihua, Bao Weijia, et al. Fiber bragg grating sensors for the oil industry [J]. *Sensors*, 2017, 17(3): 429.
- [4] Liu Weikang, Zhou Wensong, Li Hui. Bridge scour estimation using unconstrained distributed fiber optic sensors [J]. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 2022, 12(4): 775-784.
- [5] Hubbard P G, Ou Ruonan, Xu Tianchen, et al. Road deformation monitoring and event detection using asphalt-embedded distributed acoustic sensing (DAS) [J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2022, 29(11): e3067.
- [6] Guan Liwei, Lu Yu, He Zhijie, et al. Design and development of an intelligent security alarm system based on optical fiber sensing [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(8): 20220028. (in Chinese)
- [7] Liu Xianming, Ren Yilin, Zhou Feng, et al. Research progress of FBG sensing signal demodulation technology for high-speed dynamic measurement [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(10): 221313. (in Chinese)
- [8] Li Jia, Liu Feng, Li Hong, et al. Study on dynamic spectral characteristics of ultrasonic pulse into fiber Bragg grating [J]. *Laser & Infrared*, 2020, 50(12): 1492-1497. (in Chinese)
- [9] Qiao Xueguang, Ding Feng, Jia Zhen'an, et al. High precision optical fiber Bragg grating demodulation system based on the source filtering for seismic detection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(8): 2219. (in Chinese)
- [10] Ding Z C, Tan Z W, Su X X, et al. A fast interrogation system of FBG sensors based on low loss jammed-array wideband sawtooth filter [J]. *Optical Fiber Technology*, 2019, 48: 128-133.
- [11] Tang Caijie, Wang Xuefeng, Bian Heming, et al. Optical delay error compensation method for FBG high-speed interrogator based on tunable laser [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2023, 34(2): 174-179. (in Chinese)
- [12] Guo Jun. Research on fiber Bragg gratings sensing based on tunable laser[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016. (in Chinese)
- [13] Yang Y, Wu J Y, Wang M H, et al. Fast demodulation of fiber Bragg grating wavelength from low-resolution spectral measurements using Buneman Frequency Estimation [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(18): 5142-5148.
- [14] Yu Ximing, Peng Yu, Yao Bowen, et al. Multi-threshold hierarchical sea-land segmentation based on FPGA parallel computing [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2022, 43(9): 166-177. (in Chinese)
- [15] Liu Jia, Zhu Lianqing, He Wei, et al. Research on optical interrogation system based on MG-Y tunable diode laser [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2020, 41(3): 87-96. (in Chinese)
- [16] Liu Qiang, Jing Zhenguo, Li Ang, et al. Quasi-continuous tuning characteristics of modulated grating Y-branch lasers [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(12): 1206004. (in Chinese)

High speed demodulation of FBG based on variable step scanning strategy

Liang Lei^{1,2}, Zhang Yuning^{1,2}, Du Shangming^{1,3}, Tong Xiaoling^{1*}

(1. National Engineering Laboratory for Fiber Optic Sensing Technology, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

2. School of Information Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

3. Sanya Science and Education Innovation Park, Wuhan University of Technology, Sanya 572000, China)

Abstract:

Objective Optical fiber signal demodulation is the basis of optical fiber sensing applications, and the systems based on FBG sensing are sometimes limited by the demodulation speed when measuring the high-speed dynamically changing signal. Nowadays, the high speed demodulation method of fiber Bragg grating has become one of the main research directions of fiber demodulation. The existing FBG high-speed demodulation methods have their own advantages and disadvantages. Among them, the scanning spectral analysis system has good versatility, low cost, and more balanced performance in speed and accuracy. Therefore, improving the demodulation speed of the scanning laser fiber Bragg grating demodulation system has become the research goal of this paper.

Methods A variable step scanning strategy is designed to solve the problems such as many tuning times and long scanning time in the practical application of the laser based fiber Bragg grating wavelength demodulation instrument. The crest of the spectrum can be extracted by using the variable step scanning strategy with less wavelength tuning times. The variable step scanning strategy first uses OTSU algorithm to calculate the threshold and the coarse scanning step size in the initialization stage. In the demodulation stage, the global coarse scan is performed to extract the approximate range of the wave crest, and then the local point-by-point scan is performed in the sampling points exceeding the threshold. Only the spectral sampling data of point-by-point scanning in the local range needs to be uploaded to the supreme computer for peak searching, the amount of data required for peak searching is reduced.

Results and Discussions A FBG wavelength demodulation system based on modulated grating Y-branch (MG-Y) laser was built (Fig.3), and demodulation test was carried out after calibration of the laser. Gaussian fitting demodulation was carried out on the host computer software for the transmitted local spectral data, and the signal-to-noise ratio simulation experiment was conducted on the variable step scanning strategy. The simulation proved that the variable step scanning strategy was suitable for the situation where the signal-to-noise ratio was higher than 9.23 dB (Fig.7). The number of the sampling points and time of laser scanning in a single round demodulation process with different fixed scanning steps and variable scanning strategies are analyzed. Experiments show that the demodulation accuracy of sample data obtained with variable scanning strategies is similar to that obtained with the smallest fixed scanning steps when there is only a single grating in the channel. In contrast, the number of points to be scanned using the variable step scanning strategy is reduced by at least 90% and the scanning time is reduced by at least 90% (Tab.1), and the demodulation speed is increased by 10 times. Although the sampling number and time of laser scanning can be reduced by using a large fixed scanning step, the demodulation accuracy is greatly reduced and has no practical application value. In summary, using variable step size scanning strategy can not only reduce the scanning time, but also have little effect on the accuracy of

subsequent demodulation.

Conclusions Through theoretical and experimental research, a variable step scanning strategy based on scanning laser type fiber grating wavelength demodulation instrument is proposed, and its high speed performance and anti-interference performance are tested. Compared with the case of using the minimum fixed step forward scanning, this strategy reduces the tuning times of single round demodulation and the amount of data collected, improves the speed of wavelength demodulation, and has similar demodulation accuracy as the case of using the minimum fixed step forward scanning. When there is only a single grating in the channel and the processing speed of the back-end demodulation algorithm is not restricted, the demodulation speed can be increased to 10 times by using the variable step scanning strategy, which can reliably meet the demand of high-speed demodulation based on the scanning laser demodulation system, and has a good application prospect.

Key words: fiber grating; high-speed demodulation; tunable laser; wavelength tuning

Funding projects: Major Science and Technology Project of Hainan Province (ZDKJ202019); Scientific Research Program of Sanya Yazhou Bay Science and Technology City Administration (SKJC-2020-01-016)