

doi: 10.3788/gzxb20144306.0606004

# 基于互谱相关的光纤光栅波长位移计测方法

李智忠, 许忠良, 李海涛, 程玉胜, 史秋亮

(海军潜艇学院 水声中心, 山东 青岛 266042)

**摘 要:**针对传统波长位移检测准确度受波长扫描步长限制而无法提升的问题,本文提出一种基于互谱相关原理的粗位移计测与精细位移相结合的计测方法.粗位移计测技术采用相关检测原理,可实现宽动态测量范围;精细位移计测技术采用互谱检测原理,可实现高准确度测量;两者的结合实现了动态范围和检测准确度的同步提升.该方法实现了对光纤光栅的波长位移量的直接计测,而无需对光纤光栅中心波长绝对数值进行标定,减小了系统误差影响;同时采用平滑滤波法进行数据处理,消除了检测系统中的随机干扰.系统仿真结果表明,该方法解决了波长扫描步长对检测准确度的限制问题,波长位移计测准确度提升了三个数量级.采用新方法进行了 0~60 g 范围内光纤光栅纵向荷载测量实验,测得纵向荷载灵敏度为 13.2 pm/g,表明该方法对实测数据具有较好的适用性.

**关键词:**光纤光学;光纤光栅;互谱检测;波长位移;相关检测;检测准确度;精细测量

中图分类号:TN253

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2014)06-0606004-6

## Fiber Bragg Grating Wavelength Shift Measurement Method Based on Cross-spectrum Detection and Cross-correlation Technology

LI Zhi-zhong, XU Zhong-liang, LI Hai-tao, CHENG Yu-sheng, SHI Qiu-liang  
(Underwater Acoustic Center, Navy Submarine Academy, Qingdao, Shandong 266042, China)

**Abstract:** In order to improve the accuracy of wavelength shift measurement which is limited by the scanning wavelength step in the traditional measurement, a method which combines a coarse measurement and a fine one was present based on the cross-spectrum detection and cross-correlation technology. The coarse wavelength shift measurement which is based on the principle of cross-correlation detection has achieved a wide range of measurement, and the fine wavelength shift measurement which is based on the principle of cross-spectrum detection has achieved a high-precision measurement. Both the range and the precision are improved with the combination of the coarse and the fine measurement. The smoothing tecnlogy is applied for data processing, which has eliminated the influence of random noise in the detection system. The fiber grating wavelength shift is measured directly to reduce the system error which has avoided the measurement of the absolute values of FBG center wavelength. Simulation results show that the method breaks the limit of the scanning wavelength step, and the measurement accuracy is improved about three orders. FBG longitudinal load measuring experiment with the load range of 0~60 g was carried out and the new method was applied to process the experiment data, the results show that the FBG longitudinal load sensitivity is 13.2 pm/g, the new method has a better applicability.

**Key words:** Fiber optics; Fiber grating; Cross-spectrum detection; Wavelength shift; Cross-correlation detection; Detection accuracy; Fine measurement

**OCIS Codes:** 060.2310; 060.2370; 060.3735; 060.2300

基金项目:国家自然科学基金(No. 60901054)资助

第一作者:李智忠(1979-),男,讲师,博士,主要研究方向为光纤光栅传感和水声信号处理技术. Email:jirmy@163.com

收稿日期:2014-02-10;录用日期:2014-04-01

<http://www.photon.ac.cn>

## 0 引言

光纤光栅传感器通过计测光纤光栅的波长位移实现对传感物理量测量,在应变计测、压力传感多领域具有广泛的应用前景<sup>[1-2]</sup>.在实际应用中,为提升传感物理量的测量准确度,不仅需要提高光纤光栅传感器灵敏度<sup>[3-4]</sup>,而且对光纤光栅中心波长位移的计测准确度也提出了很高要求<sup>[5-6]</sup>,光纤光栅中心波长位移的检测技术是光纤光栅传感器应用的关键技术<sup>[7]</sup>.

目前光纤光栅中心波长位移的计测方法<sup>[8-9]</sup>主要有光谱仪法、PZT 扫描跟踪法、可调谐滤波法等,每种方法的检测准确度均受波长扫描步长的限制.为提高检测准确度,通常做法是精确测量光纤光栅中心波长的数值,文献<sup>[10-11]</sup>开展了功率加权法、高斯拟合法、三次样条拟合、半峰检测法等算法的仿真和实验研究.然而,这些传统方法是通过计算两次光纤光栅中心波长的差值来计测波长位移,属于波长位移的间接测量.同时由于中心波长绝对数值的标定本来就比较困难,再加上光路噪音和电路噪音等干扰的影响,限制了这些方法中计测准确度的进一步提升<sup>[12]</sup>.

本文在对光纤光栅传感特点充分研究的基础上,借鉴信号处理领域的时延估计方法,采用相关检测与互谱检测技术提出了一种粗位移计测与精细位移计测相结合的方法,实现了一种光纤光栅波长位移的直接计测,无需对光纤光栅中心波长绝对数值进行标定,突破了波长扫描步长的限制,提高了计测准确度.

## 1 基本原理

### 1.1 相关检测原理

根据光纤光栅工作机理,光纤光栅反射谱可以用高斯函数来描述,即

$$P_1(\lambda) = P_0 \exp \left[ -4 \cdot \ln 2 \cdot \frac{(\lambda - \lambda_0)^2}{\Delta\lambda_0^2} \right] \quad (1)$$

式中,  $P_0$ 、 $\lambda_0$  和  $\Delta\lambda_0$  分别为光纤光栅反射谱的峰值反射率、中心波长和半高带宽.

光纤光栅在传感过程中受外部参量的影响,光纤光栅的反射谱产生的  $\delta\lambda$  的漂移,此时的反射谱可以表示为

$$P_2(\lambda) = P_1(\lambda - \delta\lambda) = P_0 \exp \left[ -4 \cdot \ln 2 \cdot \frac{(\lambda - \lambda_0 - \delta\lambda)^2}{\Delta\lambda_0^2} \right] \quad (2)$$

可见光纤光栅在传感过程中谱形状基本保持不变,仅是谱中心波长发生位移,因此光纤光栅的波长位移体现在其谱功率数据数组存在延迟量,即光纤光栅中心波长的位移量与其反射谱的延迟量成比例关系,因此基于光纤光栅谱数据的上述特点,通过计测不同谱功率数组的延迟量就可实现对光纤光栅波长位移的

直接计测,从而避免了光纤光栅中心波长绝对数值的标定环节.

根据分析,谱功率数组  $P_1$  和  $P_2$  的互相关函数为

$$r_{12}(x) = \int_0^{\infty} P_1(\lambda - x) P_2(\lambda - \delta\lambda) d\lambda = r_{11}(x - \delta\lambda) \quad (3)$$

式(3)中,  $r_{11}$  为  $P_1$  的自相关函数,可以看出,二者的互相关函数与  $r_{11}$  自相关函数存在着延迟  $\delta\lambda$ . 而自相关函数在零点处取得最大值,所以当  $x = \delta\lambda$  时互相关函数  $r_{12}$  取最大值. 因此只要计算  $P_1$  和  $P_2$  的互相关函数,就可得到波长位移  $\delta\lambda$ .

分析表明,通过对两次光纤光栅谱数据进行相关可实现波长偏移量的直接计测,而无须分别求解两次中心波长的绝对数值,但其计测准确度仍然受到波长扫描步长的限制而相对较低.

### 1.2 互谱检测原理

鉴于互谱法在信号处理领域具有较高的时延估计准确度,将互谱法应用于光纤光栅谱功率数组延迟的精细检测,形成了基于互谱法检测原理的高准确度波长位移计测方法,进一步提高了计测准确度.

根据信号处理原理,对两反射谱数据  $P_1$  和  $P_2$  (设数组长度为  $N$ , 扫描步长  $\lambda_T$ ) 分别进行长度为  $N$  点的离散傅里叶变换,其结果记为

$$Q_1(k) = \text{DFT}[P_1(\lambda)] \quad (4)$$

$$Q_2(k) = \text{DFT}[P_2(\lambda)] = \text{DFT}[P_1(\lambda - \delta\lambda)] \quad (5)$$

式中, DFT 为离散傅里叶变换函数,  $k$  为索引下标. 由于根据傅里叶变换的性质可知:  $Q_2(k) = Q_1(k) \cdot \exp(-j\omega_k \cdot \delta\lambda)$ , 其中  $\omega_k$  为变换波长的空间频率参量  $\omega_k = 2\pi \cdot k / (N \cdot \lambda_T)$ ,  $k$  为数组序数. 则  $P_1$  和  $P_2$  互谱函数可表示为

$$X_{12}(k) = Q_1(k) Q_2(k)^H = |Q_1(k)|^2 \exp(j\omega_k \cdot \delta\lambda) \quad (6)$$

可见,通过计测  $P_1$  和  $P_2$  的互谱函数的相位即可实现对波长位移的计测.

$$\delta\lambda(k) = \frac{1}{\omega_k} \arctan \left\{ \frac{\text{Im}[X_{12}(k)]}{\text{Re}[X_{12}(k)]} \right\} \quad (7)$$

由于每个  $k$  数值都存在一个  $\delta\lambda(k)$ , 因此可采用平均方式进行计算最终结果,即

$$\overline{\delta\lambda} = \frac{1}{L} \sum_{k=1}^L \delta\lambda(k) \quad (8)$$

式中  $L$  为设定的索引下标最大值,其数值小于  $N$ .

可见,互谱检测法可实现波长偏移量的直接计测,由于其采用相位计测技术使得计测准确度较高.

综上所述,相关检测法和互谱检测法均可实现波长偏移量的直接计测,但各有优缺点. 对于相关检测方法而言,受到波长扫描步长的限制,其计测准确度相对较低;对于互谱检测方法而言,计测准确度相对较高,但受到相位解调周期性的限制,使其最大计测范围受到限制.

## 2 算法流程

本文提出的相关检测和互谱检测相结合的光纤光栅波长位移计测算法核心思想是采用相关检测法进行粗位移计测,而采用互谱检测法进行精细位移计测.图1为该算法的流程框图,主要步骤为:

步骤1:首先采用常规光纤光栅波长扫描技术设置起始扫描波长 $\lambda_1$ 、固定扫描步长 $\lambda_T$ 和扫描点数 $N$ ,对光纤光栅反射谱进行扫描,即获得光纤光栅对不同输入波长的光功率反射值数组.将光纤光栅中心波长未发生位移时的反射谱功率数组记为 $P_1(i)$ ,将光纤光栅中心波长发生一定位移后的反射谱功率数组记为 $P_2(i)$ .所述 $i$ 为索引下标,其数值为从1到 $N$ 的整数.

步骤2:再对所述两光纤光栅反射谱功率数组 $P_1(i)$ 和 $P_2(i)$ 采用相关检测法计算粗位移计测函数,计算公式为

$$R_1(m) = \sum_{i=M+1}^{N-M} P_1(i)P_2(i+m) \quad (9)$$

式中 $M$ 为最大粗延迟点数,需提前设定,一般取为不大于 $N/4$ 的最大整数; $m$ 为索引下标,其数值为从 $-M$ 到 $M$ 的整数.然后寻找粗位移计测函数 $R_1(m)$ 的最大值,该最大值所对应的索引下标 $m$ 的数值即为粗波长位移量所对应的粗延迟量 $T_1$ .

步骤3:对光纤光栅反射谱功率数组 $P_2$ 进行 $T_1$ 点的延迟,得到粗延迟后的数组 $P_3$ ,即

$$P_3(i) = P_2(i + T_1) \quad (10)$$

式中 $i$ 为索引下标,其数值为从1到 $N$ 的整数.

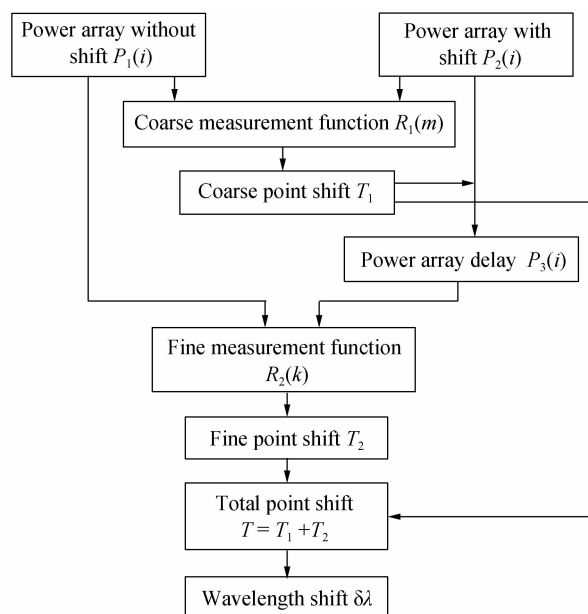


图1 算法流程框图

Fig.1 The flow chart of the algorithm

步骤4:采用互谱检测法计算反射谱功率数组 $P_1$ 和 $P_3$ 的精细位移计测函数,其计算公式为

$$Q_1(k) = \text{DFT}[P_1(i)] \quad (11)$$

$$Q_3(k) = \text{DFT}[P_3(i)] \quad (12)$$

$$S(k) = Q_1(k) \cdot Q_3(k)^H \quad (13)$$

$$R_2(k) = \frac{N}{2\pi \cdot k} \arctan \left\{ \frac{\text{Im}[S(k)]}{\text{Re}[S(k)]} \right\} \quad (14)$$

式中 $k$ 为索引下标,其数值为从1到 $N$ 的整数.

步骤5:对所述精细位移计测函数 $R_2$ 的索引下标进行过滤选择,统计平均后获得精细波长位移量所对应的精细延迟点数 $T_2$ ,计算公式为 $T_2 = \frac{1}{L} \sum_{k=1}^L R_2(k)$ ,式中 $L$ 为滤波平滑截止索引下标,为系统滤除噪音干扰使用,其目的在于数据平滑滤波,应根据反射谱功率数组的噪音情况取值.

步骤6:将粗延迟量 $T_1$ 和精细延迟量 $T_2$ 相加形成总延迟量 $T$ ,即 $T = T_1 + T_2$ ;再将总延迟量 $T$ 与波长扫描步长 $\lambda_T$ 相乘得到波长位移 $\delta\lambda$ ,即 $\delta\lambda = T \times \lambda_T$ ,从而完成对光纤光栅波长位移的计测.

## 3 实验结果

### 3.1 算法仿真验证

为了验证算法的计测能力,尤其是在实验测量无法给出波长位移真值的限制条件下,本文采用编程仿真的方法进行算法仿真验证,主要目的是设定波长位移真值并进行计测能力评估.

第一步,设置起始扫描波长为1528.5 nm,固定扫描步长为5 pm,扫描点数为600点,扫描获得光纤光栅未发生位移时的反射谱功率数组 $P_1$ ,光纤光栅发生位移后的反射谱功率数组 $P_2$ ,其曲线如图2所示( $P_1$ 数组的中心波长为1530.000 000 nm, $P_2$ 数组的中心波长为1530.250 555 nm).

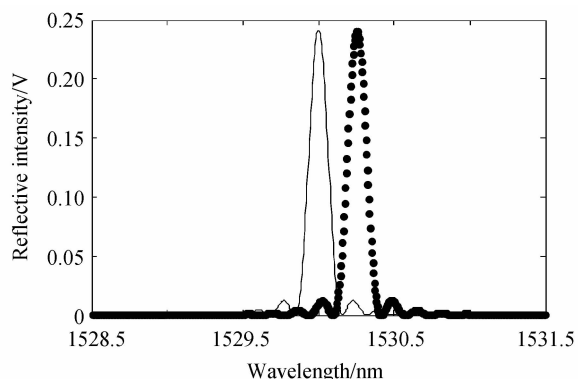


图2 光纤光栅反射谱曲线

Fig.2 The FBG reflection spectrum curve

第二步,设置最大延迟量整数取为150,采用式(9)计算的粗位移计测函数 $R_1(m)$ 的曲线如图3所示,其中 $R_1(m)$ 的最大值所对应的索引下标 $m$ 数值为50,因此粗延迟点数 $T_1 = 50$ .

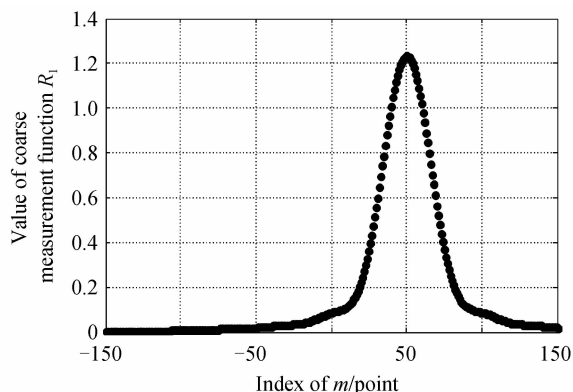


图3 粗位移计测函数曲线

Fig. 3 The coarse shift measuring function curve

第三步,对数组  $P_2$  采用公式  $P_3(i) = P_2(i+50)$  进行延迟,然后计算反射谱功率数组  $P_1$  和  $P_3$  的精细位移计测函数  $R_2(k)$ ,图4为  $P_1$  数组傅里叶变换后的功率强度曲线,图5为精细位移计测函数  $R_2(k)$  曲线.设置截止索引下标  $L=10$ ,采用  $T_2 = \frac{1}{10} \sum_{k=1}^{10} R_2(k)$  计算精细延迟量  $T_2$ ,计算结果为  $T_2=0.1115$ .

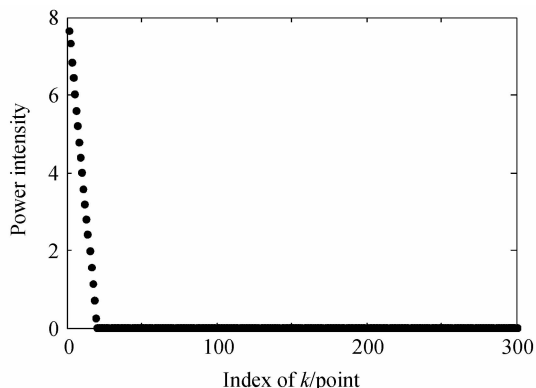


图4  $P_1$  功率强度曲线

Fig. 4 The curve of the  $P_1$  power intensity

第四步,将粗延迟量  $T_1$  和精细延迟量  $T_2$  相加形成总延迟量  $T$ ,  $T=50.1115$ ;则计算中心波长位移量  $\delta\lambda=50.1115 \times 5 \text{ pm} = 250.5575 \text{ pm}$ . 该结果与真值  $250.555 \text{ pm}$  存在  $0.0025 \text{ pm}$  的偏差,所对应的延迟量

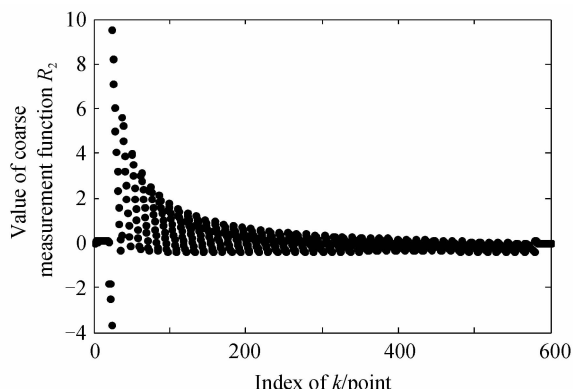


图5 精细位移计测函数曲线

Fig. 5 The fine shift measuring function curve

为  $0.0005$ ,即为波长扫描步长的  $0.0005$  倍.

可见,粗位移计测能实现整数点的延迟测量,精细位移计测则可实现更精细测量.采用蒙特卡罗算法的多次仿真结果统计表明,本方法的精细延迟计测可达到  $0.001$  点的计测准确度,即将计测准确度提升了三个数量级,优于多种寻峰算法<sup>[13-14]</sup>的准确度.

### 3.2 实验测量应用

为进一步验证该算法的有效性,采用该算法对光纤光栅传感器在不同纵向荷载下的反射谱数据进行应用处理.

实验中采用可调谐窄带光源波长扫描技术进行光纤光栅反射谱线扫描,实验采用的是 NetTest 公司生产的型号为 TUNICS-plus10 的可调谐窄带激光器,最小可设波长分辨率为  $2 \text{ pm}$ . 系统采用 TTI 公司的 TIA-525 型光电转换模块检测光信号并转换为电压信号,而后用 NI 公司的 NI6014 采集卡进行信号采集,再将数据读入计算机利用 Labview 进行数据处理,实验装置如图 6. 实验波长扫描范围为  $1544.5 \sim 1546.5 \text{ nm}$ ,扫描步长为  $10 \text{ pm}$ ,扫描点数为  $200$  点.

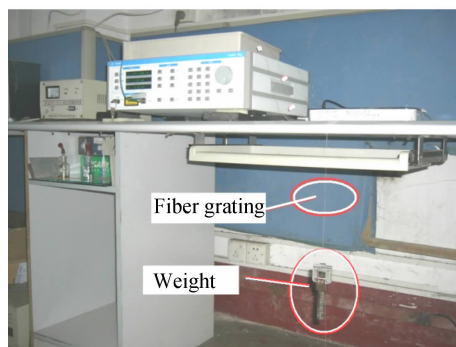


图6 纵向荷载实验装置

Fig. 6 The longitudinal load experimental setup

首先将裸光纤光栅的尾纤用光纤夹具进行固定,然后每次在光纤夹具上增加  $5 \text{ g}$  重物,对每个荷载点测量  $5$  次,图7为不同荷载时的光纤光栅的反射谱线.通过图7可以看出,随着纵向荷载的增加,光纤光栅的

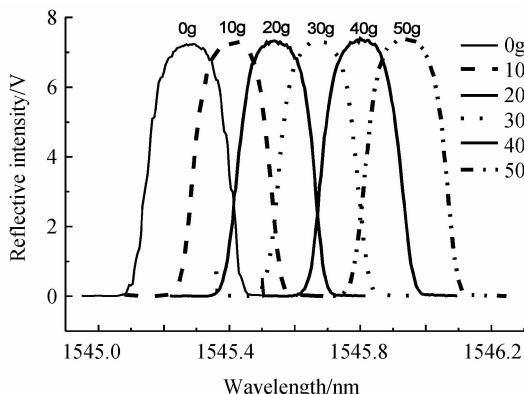


图7 反射谱线随纵向荷载的移动

Fig. 7 The fiber spectrum shift with load changes

反射谱线整体向长波方向发生平移,谱线的反射率和谱宽均未发生变化(备注:图7中所列的荷载数值没有包含光纤夹具的重量,这会改变光栅中心波长的数值,但对相对波长位移的测量结果没有影响)。

图8为采用本算法处理得到的整个过程中所测得的波长位移变化曲线,横坐标为测量次数,其中位移前的数组选取了中心波长为1545.200 nm的反射谱数组(对应于光纤光栅自由伸缩、无光纤夹具时的反射谱)。对5次测量结果取平均,计算得光纤光栅的纵向荷载灵敏度为13.2 pm/g。

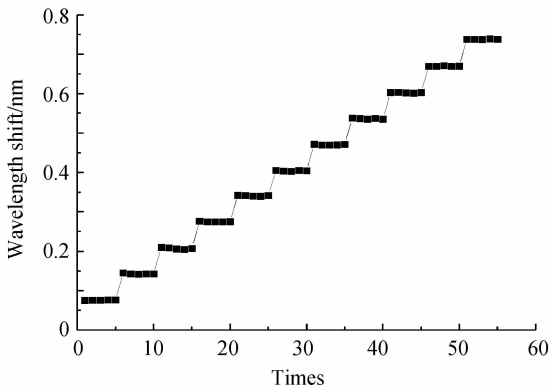


图8 波长位移随荷载变化的测量结果

Fig. 8 The measured results with load changing

通过上述实验结果看出,该算法对于实验数据处理具有较好的适用性。

### 3.3 性能特点分析

1) 本文所设计的粗位移计测通过相关处理技术完成了整数点级别的延迟量测量,精细位移计测通过互谱相位处理技术完成了更细级别的延迟量测量。两者的结合解决了相关检测准确度低和互谱检测应用范围小的问题,既扩展了测量范围,又提高了计测准确度。同时与常用的插值算法相比,该算法运算量少、准确度高。

2) 算法中的光纤光栅传感器反射谱功率数组  $P_1$  和  $P_2$  所对应的起始扫描波长  $\lambda_1$ 、固定扫描步长  $\lambda_T$  和扫描点数  $N$  一致,否则导致计测结果有误。同时为保证计测准确度,波长扫描点数  $N$  应大于100。另外,波长扫描范围要足够宽,不仅要包含光纤光栅发生位移前后的反射峰,且要在反射峰两侧各包含至少1倍反射峰宽度的扫描范围。

3) 算法通过截止索引下标  $L$  的应用实现了数据平滑,消除了系统噪音的影响,减小了系统运算量。如图5所示, $L$  应根据所述反射谱功率数组的能量分布情况(如图4)取值。若  $L$  取值过大,不但不会起到数据滤波平滑作用,还会引入新的误差。

4) 光纤光栅传感器在工作过程中,中心波长会发生调谐变化的同时,反射谱的强度和形状可能发射变化。反射谱强度变化对本算法基本无影响,谱线形状变

化严重影响本算法,因此在应用中要确保谱线形状不变,这是本算法的重要前提。在光纤光栅传感实际应用中,绝大多数情况下谱线形状是不变的。

5) 算法中虽然要求光纤光栅在传感前后的谱线形状保持不变,但对谱线形状是否对称不做要求,可用于啁啾光纤光栅等不对称谱<sup>[15]</sup>的计测,这是很多常用方法所不具备的。

## 4 结论

本文结合光纤光栅反射谱数据特点进行技术适用性分析,采用软件信号处理的方法实现了波长位移的直接计测。本方法在常规波长扫描技术的基础上,实现了更高准确度的波长位移计测。受到波长扫描步长的限制,常规波长扫描技术的波长位移计测准确度一般为波长扫描步长量级,即整数点的延迟量;而本方法可实现更加精细的延迟测量,突破了波长扫描步长的限制,本方法的计测准确度提升了三个数量级。另外,对于波长扫描技术而言,利用本方法可采用较大的波长扫描步长可实现高准确度的位移计测,可加快系统扫描的速度,同时也意味着采用性能相对差的硬件设备可实现较好效果,即采用软件信号处理的方法弥补了硬件设备性能的不足。

本方法可应用于长周期光纤光栅等中心波长位移的计测,与此同时,本方法在多个光纤光栅传感器分布式测量中的应用还有待深入研究。

### 参考文献

- [1] JIANG De-sheng, HE Wei. Review of applications for fiber grating sensors[J]. *Journal of Optoelectronics Lasers*, 2002, **13**(4): 420-429.  
姜德生, 何伟. 光纤光栅传感器的应用概况[J]. *光电子激光*, 2002, **13**(4): 420-429.
- [2] YUAN Zi-lin, GONG Yuan, MA Yao-yuan, et al. Structure optimization of fiber Bragg grating strain sensors[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(11): 1261-1266.  
袁子林, 龚元, 马耀远, 等. 光纤布喇格光栅应变传感器结构优化研究[J]. *光子学报*, 2012, **41**(11): 1261-1266.
- [3] FENG De-quan, QIAO Xue-guang, WANG Hong-liang, et al. Experimental study of large range enhanced pressure sensitivity concerning fiber Bragg grating pressure sensor [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(7): 1273-1276.  
冯德全, 乔学光, 王宏亮, 等. 大范围光纤 Bragg 光栅压力传感器增敏实验研究[J]. *光子学报*, 2007, **36**(7): 1273-1276.
- [4] ZHAN Ya-ge, CAI Hai-wen, GENG Jian-xin, et al. Study on aluminum groove encapsulating technique and sensing characteristics of FBG sensor [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(8): 952-955.  
詹亚歌, 蔡海文, 耿建新, 等. 铝槽封装光纤光栅传感器的增敏特性研究[J]. *光子学报*, 2004, **33**(8): 952-955.
- [5] NIU S L, LIAO Y, YAO Q, et al. Resolution and sensitivity enhancements in strong grating based fiber Fabry-Perot inter?ferometric sensor system utilizing multiple reflection beams [J]. *Optics Communications*, 2012, **285**(12): 2826-2831.
- [6] XIAO Tao, LI Xiao-bing, GUO Jiang-tao, et al. High precision temperature calculation method of fiber-optic

- distributed temperature sensing system based on iteration technique[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(7): 831-835.  
夏涛, 李小兵, 郭江涛, 等. 光纤分布式测温系统中基于迭代法的高准确度温度解调算法[J]. 光子学报, 2012, **41**(7): 831-835.
- [7] LISSAK B, AIRE A, TUR M. Highly sensitive dynamic strain measurement by locking lasers to fiber Bragg gratings [J]. *Optics Letters*, 1998, **23**(24): 130-132.
- [8] LI Xin-hai, LI Bing. Research on sensing demodulation technology of distribution fiber gratingbased on DSP [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2013, **28**(1): 32-37.  
李新海, 李冰. 基于 DSP 的分布式光纤光栅传感解调技术的研究[J]. 光电技术应用, 2013, **28**(1): 32-37.
- [9] ZHU Hai, LI Zhi-zhong, CAI Peng, *et al.* Theoretical and experimental research on temperature characteristics of PANDA fiber gratings[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(5): 709-715.  
朱海, 李智忠, 蔡鹏, 等. 熊猫光纤光栅温度传感特性的理论和实验研究[J]. 光子学报, 2008, **37**(5): 709-715.
- [10] FU Jian-wei, XIAO Li-zhi, ZHANG Yuan-zhong, *et al.* Methods forimproving fiber Bragg grating wavelength measurement precision [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, **33**(2): 123-126.  
付建伟, 肖立志, 张元中, 等. 提高光纤 Bragg 光栅波长测量准确度的方法[J]. 光电工程, 2006, **33**(2): 123-126.
- [11] ZHU Mei, ZHANG Miao, HU Li-zhang, *et al.* Peak- search algorithm for center wavelength detection in fiber Bragg gratings [J]. *Study on Optical Communications*, 2011, **5**: 60-63.  
朱梅, 张淼, 胡立章, 等. 光纤布拉格光栅中心波长检测中的寻峰算法[J]. 光通信研究, 2011, **5**: 60-63.
- [12] YU You-long, WANG Xue-wei, WANG Hao. Analysis of peak-detection algorithms in fiber Bragg grating by different sampling methods [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(11): 1274-1278.  
余有龙, 王雪微, 王浩. 不同采样方式下光纤布喇格光栅反射谱寻峰算法的分析[J]. 光子学报, 2012, **41**(11): 1274-1278.
- [13] ZHU Hao-han, QIN Hai-kun, ZHANG Min, *et al.* Peak-detection algorithm in the demodulation for the fiber Bragg grating sensor system[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, **35**(6): 893-897.  
朱浩瀚, 秦海琨, 张敏, 等. 光纤布拉格光栅传感解调中的寻峰算法[J]. 中国激光, 2008, **35**(6): 893-897.
- [14] ZHANG Tian-di, HE Feng-tao, ZHOU Qiang, *et al.* Research of peak-detection algorithm in a fiber grating demodulation system[J]. *Laser Technology*, 2013, **37**(1): 36-39.  
张天地, 贺锋涛, 周强, 等. 光纤光栅解调系统的寻峰算法研究[J]. 激光技术, 2013, **37**(1): 36-39.
- [15] LI Zhi-zhong, LUO Hong, YANG Hua-yong, *et al.* Side-hole fiber grating sensing characteristics[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, **33**(8): 1081-1086.  
李智忠, 罗洪, 杨华勇, 等. 边孔光纤光栅的传感特性[J]. 中国激光, 2006, **33**(8): 1081-1086.