

# 基于密集波分复用器的光纤光栅压力传感器解调方法

王辉 杨洋 刘兵

承德石油高等专科学校, 河北省仪器仪表工程技术研究中心, 河北 承德 067000

**摘要** 结合悬臂梁调谐技术与波登管压敏结构, 设计实现了光纤光栅压力传感器。提出了一种新型的利用波长解调算法与 50 GHz 密集波分复用器相结合的技术来确定窄带反射光谱在信道中的准确位置。结果表明, 在 0~6 MPa 的测量范围内, 压力测量的相对误差为 0.5%, 波长分辨力  $\delta\lambda$  近似为 0.1 pm, 传感器解调灵敏度达到  $3 \times 10^3$  nW/MPa。

**关键词** 传感器; 波长解调算法; 密集波分复用器; 光纤光栅传感器; 谱效应

**中图分类号** TN253; TTP212

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP53.042803

## Dense Wavelength Division Multiplexing-Based Demodulation of Fiber Bragg Grating Pressure Sensor

Wang Hui Yang Yang Liu Bing

Hebei Instrument and Meter Engineering Technology Research Center, Chengde Petroleum College,  
Chengde, Hebei 067000, China

**Abstract** By applying Bourdon tube and tunable filter technology, a fiber Bragg grating pressure sensor is designed. The 50 GHz dense wavelength division multiplexing-based and wavelength demodulation algorithm are adopted to locate the exact position of narrowband reflection spectrum in the channel. The results of wavelength demodulation system show that the fiducial error is only 0.5% under the range of 0~6 MPa, and the resolution of the wavelength which comes from the measured experimental can reach 0.1 pm. The demodulation sensitivity of the sensor resolution is  $3 \times 10^3$  nW/MPa.

**Key words** sensors; wavelength demodulation algorithm; dense wavelength division multiplexing; fiber Bragg grating sensor; spectrum effect

**OCIS codes** 060.3735; 060.2370; 060.2300

### 1 引言

近年来, 光纤光栅压力传感器在各类压力测量仪表的研究中成为一个热点, 一些研究成果已经在石油勘探等领域得到应用。例如, 将光栅压力传感器应用在石油测井技术、阵地安全监测、强度梁上的振动监测、钢梁损伤定位研究、古建筑结构健康检测中<sup>[1-5]</sup>。在光纤光栅压力传感器的研制与开发中, 一项核心技术就是选择与这种传感器相适应的波长解调方式。国内外专家先后提出了可调法布里-珀罗(F-P)滤波器法、基于光纤 Sagnac 环滤波器的高稳定光纤布拉格光栅传感解调法、非平衡马赫-曾德尔干涉仪解调法、基于频谱分区的高精度光纤光栅波长解调法、压电陶瓷(PZT)匹配光纤光栅滤波等多种方法<sup>[6-10]</sup>。这些解调方案有不同的优缺点, 但整体来讲系统成本高、技术复杂是共性的问题, 这在一定程度上制约了光纤光栅类仪表的发展。近年来, 结构简单、成本较低边缘解调法被广泛采用, 且根据解调手段的不同, 衍生出多种边缘解调方式。在边缘解调的各种方案中, 田珂珂等<sup>[11]</sup>、张剑等<sup>[12]</sup>先后提出利用波分复用器(WDM)作为解调器, 并进行了一些尝试。由于这种解调方式具有操作简单和价格低廉等优点, 因此一经提出就广受关注。但 WDM 解调从本质上是一种强度解调, 这种强度解调受外界环境及光源等测试系统影响较大, 测量精度较

收稿日期: 2015-08-25; 收到修改稿日期: 2015-09-25; 网络出版日期: 2016-03-17

基金项目: 科技部火炬计划(2014GH550108)、承德市科学技术研究与发展计划(20141204)

作者简介: 王辉(1979—), 女, 硕士, 讲师, 主要从事数学建模与光纤测试技术方面的研究。E-mail: wanghui225@163.com

低,很难实现产品的工业化生产。

本文提出了利用波长解调算法与密集波分复用器(DWDM)相结合的方式,很好地解决了这一问题,从而实现了结构相对简单,成本较低的新型波长解调技术。

## 2 传感器结构与原理

### 2.1 传感器结构与原理

光纤光栅(FBG)传感器是采用基于悬臂梁调谐技术与波登管相结合的压力传感器。这种光纤光栅波登管压力传感器结构示意图如图1所示。

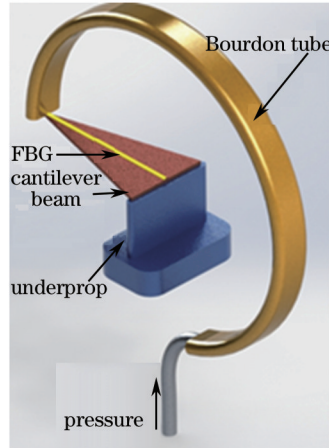


图1 光纤光栅波登管压力传感器结构示意图

Fig.1 Structure diagram of fiber Bragg grating Bourdon tube pressure sensor

由光纤光栅悬臂梁调谐技术原理可知<sup>[13]</sup>,光纤光栅中心波长的相对改变量为

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = kP, \quad (1)$$

式中 $k$ 为压力敏感系数,它是一个仅与悬臂梁结构及光纤光栅特性有关的常量。根据上述原理,可以通过测量光纤光栅中心反射波长的移动来测量气体或液体的压力变化。

### 2.2 波长分辨力

在波长解调系统中波长分辨力是评价解调系统的一个重要的技术指标。为了减少问题的复杂性,由文献[14]分析可知:实验中波长测量分辨力 $\delta\lambda$ 可以由光功率变化实验曲线中波形两侧线性区域拟合直线斜率的平均值 $\Delta P_m / f_{div}$ 和测量系统的最小探测光功率 $\delta P_m$ 以及波长调谐灵敏度 $\Delta\lambda / f_{div}$ 三方面因素共同决定,即波长分辨力可表示为

$$\delta\lambda = \frac{f_{div}}{\Delta P_m} \delta P_m \frac{\Delta\lambda}{f_{div}}, \quad (2)$$

式中 $f_{div}$ 为悬臂梁形变量调节器的刻度数, $\Delta P_m$ 为光功率改变量, $\Delta\lambda$ 为光纤传感器中光栅反射光谱的中心波长移动值。

根据文献[15]可知,采用的光纤光栅弹簧管压力传感器中悬臂梁形变量调节器的刻度数 $f_{div}$ 与压力 $P$ 成正比,因此可以用压力改变量 $\Delta P$ 代替刻度数 $f_{div}$ ,即(2)式变为

$$\delta\lambda = \left( \frac{\Delta P}{\Delta P_m} \right) \delta P_m \left( \frac{\Delta\lambda}{\Delta P} \right). \quad (3)$$

如果将单位压力下输出光功率的改变量 $\frac{\Delta P_m}{\Delta P}$ 作为衡量传感器的解调灵敏度大小物理量,(3)式表明波长分辨力由传感器强度分辨力、波长调谐灵敏度、测量系统的最小探测光功率 $\delta P_m$ 来决定。

## 3 解调技术方案实现

利用多通道DWDM实现解调的具体过程如下:从宽带光源(BBS)发出的光经耦合器进入传感光纤光栅(FBG),由FBG反射后形成窄带光谱光进入DWDM,伴随着压力改变,经过光纤光栅反射的窄带光谱中心波

长会产生移动,当窄带光谱的中心波长移动到 DWDM 某一个信道端口时,在这个信道端口上将得到最大的光功率输出。因此, DWDM 对光纤光栅反射的窄带光谱的中心波长具有波长选择性探测器的作用。由于这种方法中确定压力的大小是由 DWDM 中信道端口的位置(波长)所确定的,而不是由光强的大小所确定,因此这一过程所实现的是波长解调。然而,这里需要解决的技术难题是当反射的窄带光谱的中心波长移动至两个信道端口当中某一位置时,如何确定它的准确位置(波长值)。在实践中反射的窄带光谱本身都具有一定的宽度(0.3~0.4 nm)。当具有一定宽度的窄带反射光谱对应 DWDM 时,由于两个相邻信道的波长间隔很小(0.4 nm),因此当某一信道出现主最大强度时,其相邻信道端口会出现次最大、再次最大强度,而那些远离的信道端口也会有一定的强度输出。因此借助 8 个信道中出现的强度分布可以得到这些有效信号强度的包络。伴随着压力的改变, FBG 反射窄带光谱中心波长会产生移动,强度分布会随着发生改变,这一现象称为谱效应。利用这种谱效应,并通过波长解调算法与 DWDM 的结合技术可以实现波长精确测量的目的。

## 4 实验测试过程与数据分析

### 4.1 测试过程与测试结果

为了提出解调方式,需要通过实验获得伴随着压力的改变,引起光纤传感器中反射光谱中心波长的移动,从而引起 DWDM 各信道中输出功率的改变。为此采用如图 2 所示的测试系。

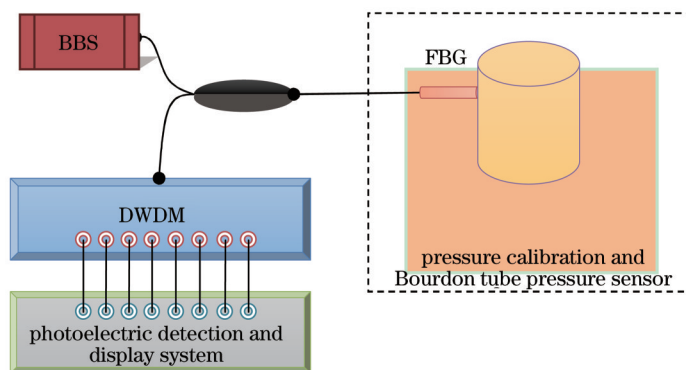


图 2 波长解调测试系统结构图

Fig.2 Test system structure diagram of the wavelength demodulation

FBG 安置在弹簧管压力传感器内,并构成光纤光栅弹簧管压力传感器,这个光纤光栅弹簧管压力传感器安装在一个微型压力校验台上(虚线部分),压力校验台上同时还安装着一个标准压力表(0.25 级),压力校验台上的标准压力表与所研制的光纤光栅弹簧管压力测试系统的内部连通。因此,可以得到加在光纤光栅压力传感器上的压力。波分复用器是信道数为 8 个、信道间隔为 50 GHz(0.4 nm)的 DWDM,其端口中心波长分别为 1552.6、1552.2、1551.8、1551.3、1550.96、1550.51、1550.11、1549.75 nm。光电探测与显示系统使用皮瓦级的高精度功率计,光源采用功率为 100 mW 的 ASE 宽带光源,压力从 0 到 6 MPa 时所对应的光纤光栅反射光谱中心波长从 1550.95 nm 移动到 1552.05 nm。当压力较验台上的标准压力表中的压力从 0 开始,每次增加 0.2 MPa,直至 6 MPa 时,利用光电探测与显示系统可同时在 DWDM 的 8 个端口上获得相应的功率输出值,实验测试数据见表 1。

### 4.2 数据分析

从表 1 中可以看出,伴随着压力的改变,光纤传感器中反射光谱的中心波长发生移动, DWDM 各通道输出功率也同时发生改变;同一个压力值, DWDM 中 8 个通道的输出功率有所不同,且伴随着压力从 6 MPa 改变至 0 时, DWDM 中出现输出功率最大值的通道数也发生改变,从最初的第 5 个移动到第 2 个;对应同一个通道不同压力值时,各个通道输出功率分布不同,因此 8 个通道可以得到 8 条压力-功率分布曲线。图 3 和图 4 给出了曲线拟合得到的端口 4 和端口 5 的分布图。这样每一个压力值都可以在 8 条压力-功率曲线中都找到相对应的功率。每一功率数组将对应一个确定压力值。从而通过某一压力下 8 个通道的输出功率值来确定出压力的大小,实现对压力的测量。而这一目标通过波长解调算法来加以实现。

表1 DWDM的8个端口功率测试数据

Table 1 Test data of powers about DWDM 8 ports

Standard pressure gauge /MPa	Wave division 1 /nW	Wave division 2 /nW	Wave division 3 /nW	Wave division 4 /nW	Wave division 5 /nW	Wave division 6 /nW	Wave division 7 /nW	Wave division 8 /nW
6.0	0.7010	0.6450	0.6400	1.94	4800	185.6	0.8249	0.6109
5.8	0.6080	0.5932	0.6473	2.48	5280	73.56	0.8467	0.6800
5.6	0.5723	0.5327	0.5993	6.33	5610	23.11	0.8524	0.7514
5.4	0.5142	0.4653	0.5273	27.10	5690	6.83	0.8243	0.7838
5.2	0.5339	0.4573	0.6153	115.2	5610	2.66	0.7583	0.7542
5.0	0.5093	0.4063	0.6947	332.3	5170	1.53	0.7013	0.7473
4.8	0.5164	0.3878	0.8263	749.5	4410	1.13	0.6513	0.6653
4.6	0.4603	0.4057	0.9178	1370	3600	0.8667	0.5429	0.6083
4.4	0.5063	0.4147	1.06	2170	2730	0.7183	0.4823	0.5603
4.2	0.5573	0.4413	1.33	3030	1970	0.6316	0.4603	0.5323
4.0	0.5753	0.5113	1.61	3960	1220	0.5640	0.5593	0.4799
3.8	0.3683	0.3550	1.90	4850	656.3	0.6543	0.7293	0.7043
3.6	0.3403	0.3449	3.56	5300	314.9	0.5537	0.6017	0.6422
3.4	0.3653	0.3957	12.27	5810	148.7	0.4993	0.6302	0.6035
3.2	0.3823	0.4963	42.84	5960	65.41	0.4496	0.6013	0.5793
3.0	0.3987	0.6037	125.3	5810	25.79	0.4047	0.5537	0.5267
2.8	0.4237	0.7757	306.4	5380	11.25	0.4127	0.5216	0.5193
2.6	0.4326	0.9276	650.4	4750	4.86	0.4132	0.5103	0.4937
2.4	0.4497	1.05	1160	4020	2.81	0.4086	0.5147	0.5238
2.2	0.4706	1.24	1860	3290	1.91	0.3836	0.5326	0.5215
2.0	0.4756	1.59	2710	2470	1.35	0.3932	0.4936	0.5293
1.8	0.5007	1.87	3530	1790	1.04	0.3986	0.4846	0.5376
1.6	0.5167	3.18	4410	1190	0.8609	0.4558	0.4526	0.5496
1.4	0.5386	7.79	4790	743.9	0.7556	0.4997	0.4843	0.5416
1.2	0.5617	24.88	5500	420.3	0.6647	0.5273	0.4818	0.5416
1.0	0.6286	68.66	6010	222.9	0.6503	0.5203	0.5002	0.4929
0.8	0.7427	178.3	6230	108.8	0.6599	0.5379	0.5169	0.4823
0.6	0.8936	419.6	5630	48.21	0.7113	0.5586	0.5498	0.4537
0.4	1.01	748.6	5220	25.01	0.7764	0.5676	0.5926	0.4298
0.2	1.19	1260	4900	12.48	0.8476	0.6357	0.6510	0.4328
0	1.55	1970	4160	6.50	0.8715	0.6690	0.7203	0.4435

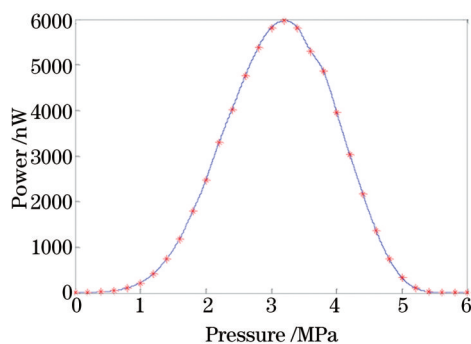


图3 端口4压力-功率曲线

Fig.3 Pressure-power curve of port 4

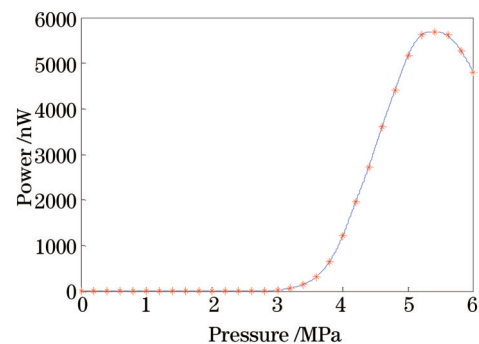


图4 端口5压力-功率曲线

Fig.4 Pressure-power curve of port 5

## 5 波长解调算法的引入

波长解调算法是由 Matlab 数学软件编写而成。算法的目的是通过利用已有的实验数据来预测给定功率数组所对应的压力值,整个算法过程的数学表述为设待预测的功率数组为  $\mathbf{r}=(r_1, r_2, \dots, r_8)$ , 给定的预测精度为  $\epsilon$ , 令  $\mathbf{F}=(f_1, f_2, \dots, f_n)$  为实验数据中压力数组, 其  $n$  个坐标分量  $f_1, f_2, \dots, f_n$  为实验数据中所用到的  $n$  个压力值。现以实验数据中每一次施加的压力所对应的 8 个输出通道的功率值组成的向量为行向量构成矩阵:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} & a_{16} & a_{17} & a_{18} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} & a_{26} & a_{27} & a_{28} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{i1} & a_{i2} & a_{i3} & a_{i4} & a_{i5} & a_{i6} & a_{i7} & a_{i8} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & a_{n4} & a_{n5} & a_{n6} & a_{n7} & a_{n8} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中  $A$  的行数为本次试验施加的压力个数, 行向量  $p_i = (a_{i1}, a_{i2}, a_{i3}, a_{i4}, a_{i5}, a_{i6}, a_{i7}, a_{i8})$ , ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) 则是由第  $i$  个压力值所对应的 8 个输出通道的功率值组成, 而列向量  $c_j = (a_{1j}, a_{2j}, \dots, a_{nj})^T$ , ( $j = 1, 2, \dots, 8$ ) 则是由第  $j$  个输出通道在不同压力值下的输出功率值构成。具体算法为:

- 1) 寻找待预测功率向量  $r$  中的最大值, 设其最大值所对应的下标为  $j$ 。
- 2) 寻找  $A$  的行向量组  $p_1, p_2, \dots, p_n$  中最大值的下标为  $j$  的向量组, 并将其记为  $\beta_1$ 。
- 3) 依据向量组  $\beta_1$  中的所有向量的第  $j+1$  个坐标分量与第  $j-1$  个坐标分量相互之间的大小关系将向量组  $\beta_1$  进行分类。其中, 第  $j+1$  个坐标分量大于第  $j-1$  个坐标分量的向量分为一类, 记为向量组  $\beta_{11}$ , 反之第  $j+1$  个坐标分量小于第  $j-1$  个坐标分量的向量分为一类, 记为向量组  $\beta_{12}$ 。
- 4) 判断待预测的功率数组  $r$  中  $r_{i+1}$  与  $r_{i-1}$  相互之间的大小关系, 若  $r_{i+1} > r_{i-1}$ , 记向量组  $\delta = \beta_{11}$ , 否则记  $\delta = \beta_{12}$ 。
- 5) 找出向量组  $\delta$  在压力数组  $F$  中所对应的压力段, 并求出压力段中的最小压力值  $f_i$  与最大压力值  $f_j$ , 并以  $f_i$  为初始值以  $f_j$  为终止值以预测精度  $t$  为步长做压力段  $Q$ , 设  $Q$  中所含压力个数为  $m$ 。

6) 分别以实验所用压力数组  $F$  为横坐标的, 以各输出通道所对应的功率数组  $c_j$  ( $j = 1, 2, \dots, 8$ ) 为纵坐标做分段三次样条插值, 可获得 8 个分段样条插值函数  $L_1(x), L_2(x), \dots, L_8(x)$ , 其中每个插值函数均为分段函数, 它们在每个压力区间  $[f_i, f_{i+1}]$ , ( $i = 1, 2, \dots, n-1$ ) 上的表达式均不相同, 但形式均为三次多项式, 故可令

$$L_i(x) = \begin{cases} h_{i1}x^3 + b_{i1}x^2 + c_{i1}x + d_{i1}, & x \in [f_1, f_2] \\ h_{i2}x^3 + b_{i2}x^2 + c_{i2}x + d_{i2}, & x \in [f_2, f_3] \\ \vdots \\ h_{i,n-1}x^3 + b_{i,n-1}x^2 + c_{i,n-1}x + d_{i,n-1}, & x \in [f_{n-1}, f_n] \end{cases}, \quad (i = 1, 2, \dots, 8). \quad (5)$$

7) 将压力段  $Q$  中的任意压力值分别代入到以上 8 个插值函数  $L_i(x)$ , ( $i = 1, 2, \dots, 8$ ) 中即可得到该压力值下对应的 8 个输出通道的功率值, 这些功率值可组成一个功率数组。这样,  $Q$  中的所有  $m$  个压力值分别代入后可获得  $m$  个功率数组, 记为  $G_i$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ ), 令

$$\begin{cases} G_i = (G_{i1}, G_{i2}, \dots, G_{i8}) \\ G = (G_1, G_2, \dots, G_m) \end{cases}. \quad (6)$$

8) 将  $G$  中的每一个功率数组  $G_i$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ ) 分别与待预测的功率向量  $r$  作比较, 求出  $G_i$  与  $r$  的范数  $\|G_i - r\| = \sqrt{\sum_{j=1}^8 (G_{ij} - r_j)^2}$ , 设范数最小值所对应的功率数组为  $G_s$ , 此时,  $G_s$  所对应的对压力段  $Q$  中的压力值即为所预测的压力值。

上述 1)~5) 过程中, 主要是划分压力段, 这是一个优化过程, 伴随着区间减少, 可以提高测量精度, 提升算法效率, 并保证范数唯一; 6)~8) 是核心的内容, 对实验所用压力数组  $F$  与各输出通道所对应的功率数组  $c_j$  ( $j = 1, 2, \dots, 8$ ) 做三次样条差值, 从而获得压力段内每个压力值所对应的各个端口的功率值; 8) 是最终获得测试压力值的过程。将上述数据代入利用波长解调算法所编写的程序中, 并对数据进行初始化, 同时确定实验所用的压力段为 0~6 MPa, 测试精度为 0.1 MPa, 在此基础上确定压力段, 将所测量的某一功率数据组代入测量程序, 通过计算机显示出所对应的压力值。

## 6 结果分析

为了验证测试结果的准确性, 在 0~6 MPa 中选取标准压力表指示分别为 1.906, 2.720, 4.920 MPa, 并通过功率计得到与之对应的三组数据, 见表 2。将所得到的测试数据输入预先编写好的测量程序, 通过计算机

显示出的测量结果与压力所显示的测试结果吻合程度很高。

表2 标准压力表显示值及对应的测量值

Table 2 Standard pressure meter display values and corresponding measured values

Serial number	Wave division 1 /nW	Wave division 2 /nW	Wave division 3 /nW	Wave division 4 /nW	Wave division 5 /nW	Wave division 6 /nW	Wave division 7 /nW	Wave division 8 /nW	Standard pressure /MPa	Measured value /MPa
1	0.4953	1.67	3125	2108	1.13	0.3966	0.4896	0.5122	1.906	1.90
2	0.4287	0.8062	470.6	5060	8.57	0.4128	0.5187	0.5117	2.720	2.70
3	0.5122	0.3987	0.7531	520.6	4857	1.32	0.6857	0.7026	4.920	4.90

三组测试结果的相对误差最大为0.5%。这一结果与文献[13]中误差1%相比,测量精度有较一定提升。

与使用WDM相比,使用DWDM作为解调工具DWDM的透射曲线更陡,因此传感器解调灵敏度会更高。文献[13]中WDM的强度分辨力为 $0.010 \mu\text{W}/\text{MPa}$ ,而DWDM中功率1的强度分辨力为 $3.0 \mu\text{W}/\text{MPa}$ 。从中可以看出,DWDM的强度分辨力要高于WDM两个数量级。此外,DWDM与解调算法结合实现的是波长解调。因此,本文提出的方法可以防止光源强度波动等带来的影响。

与可调F-P滤波器法和PZT匹配光纤光栅滤波法等解调的方法相比,使用DWDM实现解调不需要使用PZT实现电压驱动扫描,因此可以实现在传感器内部无任何电信号,这对于要求安全防爆等级高的石油、石化等领域具有重要意义。

与使用单通道DWDM作为解调工具相比,选取8通道DWDM作为解调工具可以使得传感器波长解调范围超过单通道DWDM(0.2 nm)的10倍以上,也就是可以达到3 nm以上。

经验证<sup>[6]</sup>,使用三次样条插值法实现曲线拟合常用的是质心法、三次样条插值法、最小二乘法、高斯多项式拟合法4种拟合方法中误差较小且平稳度较好的一种,相比之下最小二乘法与质心法效果较差。这从另一个侧面证明了上述方法的有效性。

由(3)式可以得到实验中波长测量分辨力 $\delta\lambda$ 。由图3、图4实验拟合曲线两侧线性区域直线斜率的平均值 $\Delta P/\Delta P_m = 1/3000 \text{ MPa/nW}$ 、功率计可分辨的最小稳定显示值功率 $\delta P_m$ 为1 nW、波长调谐灵敏度 $\Delta\lambda/\Delta P = 0.2 \text{ nm/MPa}$ ,因此实验测得波长分辨力 $\delta\lambda$ 近似为0.1 pm,而解调灵敏度可以达到 $3 \times 10^3 \text{ nW/MPa}$ 。

利用(3)式确定波长分辨力时, $\Delta P/\Delta P_m$ 的选取是利用通道4、5拟合曲线两侧线性区域直线斜率的平均值得到的,但利用波长解调算法进行解调过程中,每一个压力值都是通过多个信道的实验数据所获得的,这里面二者在确定波长分辨力方面应该存在一定差异,但由于篇幅的限制不再进行分析和探讨。

## 7 结 论

利用波长解调算法与50 GHz密集波分复用器相结合的技术来实现了光纤光栅压力传感器的解调,在0~6 MPa的测量范围内,压力测量的相对误差波小于0.5%,波长分辨力 $\delta\lambda$ 近似为0.1 pm,解调灵敏度达到 $3 \times 10^3 \text{ nW/MPa}$ ;波分复用器用于定标及确定反射的窄带光谱的中心波长位于哪两个信道之间,而波长解调算法是用于获得反射的窄带光谱的中心波长位于两个信道端口当中的准确位置,从而最终完成对压力的测量;使用多通道DWDM作为解调工具一方面会大幅提升系统的解调灵敏度,另一方面还可以使得传感器具有广泛的波长解调范围;由于DWDM本身对温度不敏感,因此温度给传感器带来的影响比较容易得到解决。

## 参 考 文 献

- 1 Yuan Wei, Jiang Mingshun, Yang Liu, *et al.*. Application of fiber Bragg grating sensor in well logging[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2008, 3(3): 234-240.  
袁 伟,姜明顺,杨 柳,等. 光纤光栅传感器在石油测井中应用[J]. 大气与环境光学学报, 2008, 3(3): 234-240.
- 2 Zhang Zhili, Fu Zhulin, Zhao Bing, *et al.*. FBG sensing technology application in detection of bastion safety[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(3): 492-496.  
张志利,付祝林,赵 兵,等. 光纤光栅传感技术在阵地安全监测中的应用[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(3): 492-496.
- 3 Gong Huaping, Yang Xiao, Tu Yumeng, *et al.*. Vibration detection characteristics of FBG sensor and resistance strain gauge [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(3): 810-813.

- 龚华平, 杨效, 屠于梦, 等. FBG传感器和电阻应变仪的振动监测特性[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(3): 810-813.
- 4 Tian Shizhu, Wen Ke, Wang Dapeng. Study on damage location of steel beam based on long-gage fiber grating sensor[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(4): 040603.
- 田石柱, 温科, 王大鹏. 基于长标距光纤光栅传感器的钢梁损伤定位研究[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(4): 040603.
- 5 Ren Xiaofang, Jia Dong, Zhao Hui, *et al.*. Research of structure health monitoring technology for ancient architecture based on FBG[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2015, 28(1): 34-38.
- 任小芳, 贾栋, 赵辉, 等. 基于光纤Bragg光栅的古建筑结构健康检测技术研究[J]. 传感技术学报, 2015, 28(1): 34-38.
- 6 Cai Nenghong, Yan Lianshan, Chen Juanzi, *et al.*. Peak-detection algorithm in tunable F-P filter based demodulation system for FBG sensors[J]. Instrument Technique and Sensor, 2013, (4): 100-102.
- 蔡能宏, 闫连山, 陈娟子, 等. 基于可调谐F-P滤波器的光纤光栅传感解调系统寻峰算法对比分析[J]. 仪表技术与传感器, 2013, (4): 100-102.
- 7 Wang Jufeng, Zhuang Linling, Liu Shiwei, *et al.*. Fiber Bragg grating sensor demodulation technology with high stability by using Sagnac loop filter[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(9): 0905004.
- 王巨锋, 庄琳玲, 刘士伟, 等. 基于光纤Sagnac环滤波器的高稳定光纤布拉格光栅传感解调技术[J]. 中国激光, 2014, 41(9): 0905004.
- 8 Zhang Hong. Research on interferometer demodulation method of fiber grating sensor systems[J]. Instrument Technique and Sensor, 2008, (11): 20-23.
- 张虹. 光纤光栅传感系统干涉法信号解调技术研究[J]. 仪表技术与传感器, 2008, (11): 20-23.
- 9 Yang Gang, Xu Guoliang, Tu Guojie, *et al.*. High precision fiber Bragg grating wavelength demodulation system based on spectrum segmentation[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(4): 0405001.
- 杨刚, 许国良, 涂郭结, 等. 基于频谱分区的高精度光纤光栅波长解调系统[J]. 中国激光, 2015, 42(4): 0405001.
- 10 Wu Yonghong, Shao Changjiang, Qu Wenjun, *et al.*. Nonlinear opto-mechanical transformation equation for FBG strain sensors[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(9): 1946-1950.
- 吴永红, 邵长江, 屈文俊, 等. 光纤光栅应变传感器光-力转换的非线性方程[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(9): 1946-1950.
- 11 Tian Keke, Xiao Hao, Cao Chungeng, *et al.*. Demodulation of fiber Bragg grating sensing system based on WDM fiber coupler[J]. Opto-Electronic Engineering, 2005, 32(2): 49-55.
- 田珂珂, 肖浩, 曹春耕, 等. 利用WDM光纤耦合器的光纤光栅传感解调技术[J]. 光电工程, 2005, 32(2): 49-55.
- 12 Zhang Jian, Zhao Hong, Xiong Yanling. Study on FBG sensing demodulation with CWDM[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(11): 1465-1467.
- 张剑, 赵洪, 熊燕玲. 应用CWDM实现FBG传感解调的研究[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(11): 1465-1467.
- 13 Yang Yang. Development of edge interrogation technology-based FBG bourdon tube pressure sensor[J]. Optical Technique, 2009, 35(1): 53-55.
- 杨洋. 基于边缘解调技术的光纤光栅波登管压力传感器的研制[J]. 光学技术, 2009, 35(1): 53-55.
- 14 Liu Yunqi, Liu Zhiguo, Guo Zhuanyun, *et al.*. Theoretical and experimental researches on tunable filtering detection technique of fiber grating sensor[J]. Acta Optica sinica, 2001, 21(1): 88-92.
- 刘云启, 刘志国, 郭转运, 等. 光纤光栅传感器的调谐滤波检测技术[J]. 光学学报, 2001, 21(1): 88-92.
- 15 Yang Yang, Wang Zonghe, Zhao Zhijun. Optical fiber grating pressure test system based on filter brim demodulation technology[J]. Instrument Technique and Sensor, 2008, (6): 82-84.
- 杨洋, 王宗和, 赵志骏. 基于滤波器边缘解调技术的光纤光栅压力测试系统[J]. 仪表技术与传感器, 2008, (6): 82-84.

栏目编辑: 刘丰瑞