

Research on the Temperature Compensation Method for the Arrayed Waveguide Grating Wavelength Demodulation System *

SUN Jinlu¹, MIAO Changyun¹, ZHANG Cheng^{1*}, LIU Chunying¹, MU Dianwei¹, ZENG Qingkai²

(1. School of Electronics and Information Engineering, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China;

2. School of Information Science and Technology, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: The arrayed waveguide grating (AWG) wavelength demodulation system has advantages of simple operation and fast response speed, Since the central wavelength of AWG shifts when the ambient temperature changes, the demodulation accuracy may be affected. In this paper, a new type of fiber Bragg grating demodulation system with temperature compensation is proposed on the bases of analysing the AWG-based wavelength demodulation principle. This method confirms the compensation coefficient in real time by adding compensation grating. In this way, temperature compensation for the AWG wavelength demodulation system is realized, and the effect to demodulation accuracy caused by temperature drift can be avoid. On condition that AWG ambient temperature ranges between 14 °C and 44 °C, the results indicate that the demodulation accuracy can be obviously improved compared to the situation with no compensation added. The demodulation error is only 2 pm. This demodulation method has fine application prospects in the field of high-precision demodulation.

Key words: fiber bragg grating; arrayed waveguide grating; temperature compensation; compensation grating

EEACC: 7230

doi:10.3969/j.issn.1004-1699.2013.11.014

阵列波导光栅波长解调系统的温度补偿方法的研究 *

孙金露¹, 苗长云¹, 张 诚^{1*}, 刘春影¹, 穆殿伟¹, 曾庆锴²

(1. 天津工业大学电子与信息工程学院, 天津 300387; 2. 中山大学信息科学与技术学院, 广州 510006)

摘 要: 阵列波导光栅波长解调系统具有结构简单、响应速度快等优点, 由于阵列波导光栅的中心波长会受环境温度影响而产生漂移, 影响解调精度。在分析了阵列波导光栅波长解调原理的基础上, 提出了一种阵列波导光栅波长解调系统的温度补偿方法。该方法利用补偿光栅确定温度补偿系数, 实现对阵列波导光栅波长解调系统的温度补偿, 消除了温度漂移对解调精度的影响。实验结果表明, 在环境温度变化范围为 14 °C ~ 44 °C 时, 该方法解调误差仅为 2 pm, 较未加入补偿有明显提高, 在高精度阵列波导光栅波长解调领域具有很高的应用前景。

关键词: 光纤光栅; 阵列波导光栅; 温度补偿; 补偿光栅

中图分类号: TN253; TN247

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2013)11-1543-05

光纤布拉格光栅 FBG (Fiber Bragg Grating) 传感器具有结构简单、低损耗、可靠性高、抗电磁干扰等优点^[1-2], 由于 FBG 具有对振动的测量灵敏度高、响应速度快等特点, 近年, 对 FBG 振动传感的研究引起了人们的关注^[3-5]。阵列波导光栅 AWG (Array Waveguide Grating) 波长解调系统, 具有低成本、结构紧凑、便于小型化和光路集成等优点^[6-7], 因此,

基于 AWG 的解调方法逐渐被人们采纳^[8], 在光纤传感领域具有广泛的应用前景^[9]。

AWG 各通道中心波长会受环境温度的影响产生漂移, 影响解调精度, 为实现高精度解调, 近些年 Jong-Moo Lee 等人通过改变 AWG 的聚合物衬底减小其温度敏感性^[10], 秦政坤等人通过控制波导芯层厚度减小 AWG 的光谱漂移^[11], 李德禄通过调节波导物

项目来源: 国家自然科学基金青年科学基金项目 (61307094); 高等学校博士学科点专项科研基金项目 (20101201120001); 天津市高等学校科技发展基金项目 (20100710)

收稿日期: 2013-06-20 修改日期: 2013-11-02

质的参数进行无热化研究^[12],这些方法均从制作工艺出发,力求获得温度不敏感的 AWG,对制作工艺和制作环境要求较高,Hongqiang Li 等人通过公式运算抵消温度引起的波长偏移,达到补偿的目的^[13],但要求 AWG 与 FBG 处于同一温度场,且仅限于温度测量,因此,上述几种方法均有一定的局限性。

本文在光学实验的基础上提出了 AWG 的温度补偿方法,通过加入补偿光栅实时地确定补偿系数,消除温度影响,该方法易于实现并且对 AWG 本身温度敏感性的大小无要求,加入补偿后的解调误差仅为 2pm。

1 AWG 波长解调原理

阵列波导光栅波长解调系统基本组成框图如图 1 所示,ASE 宽带光源发出的光通过隔离器和 1×2 耦合器进入被测光栅,被测光栅反射光经耦合器传输至 AWG 的相应通道,信号处理单元完成对 AWG 输出信号的采集与处理,并将解调结果输出至 PC 机。

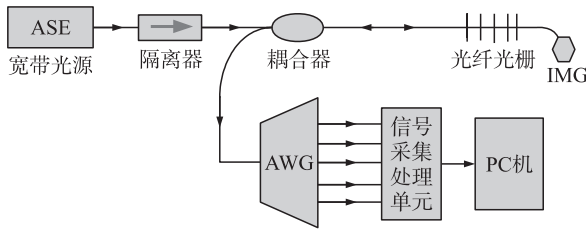


图 1 AWG 波长解调系统基本组成框图

AWG 波长解调算法^[14]要求传感光栅中心波长的变化在 AWG 相邻两个通道传输谱的中心波长之间,且任意两个通道只能用于测量一个传感光栅的波长变化。图 2 为 FBG 反射谱与 AWG 解调通道透射谱关系示意图,通过对相邻两个 AWG 输出通道的光强信息进行计算,得到对应光栅的中心波长。

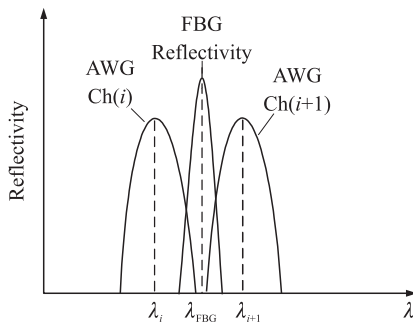


图 2 FBG 反射谱与 AWG 解调通道透射谱关系示意图

假设传感光栅的反射谱为高斯型,其谱函数可表示为:

$$R_{\text{FBG}}(\lambda) = R_0 \exp[-4(\ln 2) \times (\lambda - \lambda_B)^2 / \Delta\lambda_B^2] \quad (1)$$

其中, R_0 为反射率, λ_B 为中心波长, $\Delta\lambda_B$ 为半峰值

带宽。

设 AWG 通道 i 的传输谱表达式为:

$$T_{\text{AWG}}(i, \lambda) = T_i \exp[-4(\ln 2) \times (\lambda - \lambda_i)^2 / \Delta\lambda_i^2] \quad (2)$$

其中, T_i 为通道 i 的最大透射系数, λ_i 为通道 i 的中心波长, $\Delta\lambda_i$ 为通道 i 的半峰值带宽。

设通道间隔 $\Delta\lambda = \Delta\lambda_{i+1} - \Delta\lambda_i$ 且相等,则通道 i 输出光强为:

$$P_i = (1 - L_i) \int_0^{+\infty} S(\lambda) T_{\text{AWG}}(i, \lambda) R_{\text{FBG}}(\lambda) d\lambda = (1 - L_i) S_0 R_0 T_i \Delta\lambda_B \Delta\lambda_i \sqrt{\pi/4(\ln 2) (\Delta\lambda_B^2 + \Delta\lambda_i^2)} \times \exp[-4(\ln 2) \times (\lambda_B - \lambda_i)^2 / (\Delta\lambda_B^2 + \Delta\lambda_i^2)] \quad (3)$$

其中, $S(\lambda)$ 为光源输出功率谱,并假设在 AWG 带宽内输出功率为常数 S_0 , L_i 为光路衰减系数。

同理,通道 $i+1$ 的输出光强为:

$$P_{i+1} = (1 - L_{i+1}) \int_0^{+\infty} S(\lambda) T_{\text{AWG}}(i+1, \lambda) R_{\text{FBG}}(\lambda) d\lambda = (1 - L_{i+1}) S_0 R_0 T_{i+1} \Delta\lambda_B \Delta\lambda_{i+1} \sqrt{\pi/4(\ln 2) (\Delta\lambda_B^2 + \Delta\lambda_{i+1}^2)} \times \exp[-4(\ln 2) \times (\lambda_B - \lambda_{i+1})^2 / (\Delta\lambda_B^2 + \Delta\lambda_{i+1}^2)] \quad (4)$$

在 AWG 各通道传输系数、半峰值带宽相等的情况下,AWG 相邻通道的光强比对数与中心波长在两通道间变化的光栅布拉格波长关系为:

$$\rho = \ln\left(\frac{P_{i+1}}{P_i}\right) = \frac{8(\ln 2) \Delta\lambda}{\Delta\lambda_i^2 + \Delta\lambda_{\text{FBG}}^2} \lambda_{\text{FBG}} - \frac{4(\ln 2) (\lambda_{i+1}^2 - \lambda_i^2)}{\Delta\lambda_i^2 + \Delta\lambda_{\text{FBG}}^2} \quad (5)$$

上式为 AWG 波长解调算法的原理公式,其中 $\Delta\lambda_{\text{FBG}}$ 为光纤光栅反射谱的半峰值带宽。 ρ 与传感光栅反射波长呈线性关系,通过计算 ρ 可以逆推出传感光栅的反射波长。

2 AWG 波长解调系统的温度补偿方法

AWG 各通道输出谱的中心波长 λ_i 会受环境温度的影响产生漂移,式(6)为传输谱中心波长与温度变化关系的表达式:

$$\lambda_i(T) = \lambda_i(T_0) + \frac{dN_g}{dT} \times \frac{\Delta L}{m} \times \Delta T \quad (6)$$

式中, ΔL 为相邻阵列波导的长度差, N_g 为波导的有效系数, λ_i 为第 i 通道的传输谱中心波长, m 为 AWG 的衍射级次, ΔT 为阵列波导光栅的温度变化量, T_0 为阵列波导光栅的初始温度。

由式(5)和式(6)可知,温度漂移现象会明显增大解调误差,为了消除温度影响,本文采用加入补偿光栅的方法,获得补偿光栅输出光功率对数比与温度的关系,从而实时地确定温度补偿系数,提高解调精度。

通过实验获得补偿光栅输出光功率对数比 ρ_b 与温度 T 的关系式。经验证,本实验所选补偿光栅与温度进行二次拟合最为合理,因此拟合公式为:

$$T = a + b\rho_b + c\rho_b^2 \quad (7)$$

其中, a, b, c 为拟合系数。

通过实验获得被测光栅的中心波长和输出光功率, 并按照解调式(5)推导并拟合出两者的关系, 拟合式为:

$$\lambda_{\text{FBG}} = M\rho + N \quad (8)$$

其中 λ_{FBG} 为被测光栅中心波长, ρ 为 AWG 两解调通道输出光功率对数比, M, N 为拟合得到的已知参量, 由式(5)可知 $M = \frac{\Delta\lambda_i^2 + \Delta\lambda_{\text{FBG}}^2}{8(\ln 2)\Delta\lambda}$, $N = \frac{(\lambda_{i+1}^2 - \lambda_i^2)}{2\Delta\lambda}$, 由于 $\Delta\lambda, \Delta\lambda_i^2$ 和 $\Delta\lambda_{\text{FBG}}^2$ 均为定值, 因此 M 为常数, 当阵列波导光栅温度改变时, λ_{i+1}^2 和 λ_i^2 会发生变化, 因此 N 与 AWG 的温度相关。

改变 AWG 的温度, 重复上述实验, 得到不同温度下的拟合式和拟合系数 M, N , M 为不受温度影响的常数, 通过各组实验值取平均得到, 经推导 N 与 T 为线性关系, 因此拟合关系式如下

$$N = AT + B \quad (9)$$

其中 A, B 为拟合系数。

由式(7)和式(9)可知, 为实现温度补偿, 可通过补偿光栅的光功率对数比确定 AWG 所处环境的温度, 进而实时的确定补偿系数 N , 再通过式(8)得到被测光栅中心波长。

3 实验及结果分析

实验中选取的 SLED 光源(ZLS-1545-010-1-2-D)最大输出光功率为 11 mW; 光谱分析仪(AQ6370B)波长范围为 600 nm ~ 1 700 nm, 最高分辨率为 20 pm; 被测光栅中心波长为 1548 nm ~ 1 549 nm; 补偿光栅中心波长为(1 552±0.5) nm; 所选 AWG 通道为 CH37(1 547.745 nm), CH36(1 548.544 nm), CH31(1 552.558 nm), CH30(1 553.365 nm); 选取的光功率计, 型号分别为 AV6334, XFOPM-1600; 高低温试验箱型号为 GD4005, 控温范围: 0 ~ 150 °C。实验装置如图 3 所示。

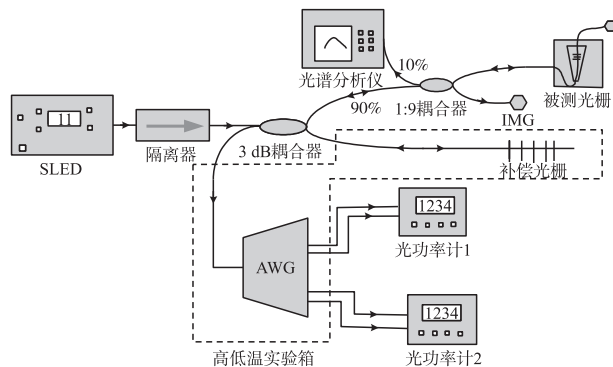


图 3 温度补偿实验组成框图

将补偿光栅贴于 AWG 表面并置于高低温试验箱内, 从而使两者处于同一温度场, 被测光栅贴于悬臂梁上, 并置于试验箱外, AWG 的 CH37、CH36 用于测量被测光栅中心波长, CH31、CH30 用于测量补偿光栅中心波长。SLED 光源输出的光经隔离器和耦合器进入被测光栅和补偿光栅, 两光纤光栅的反射光经耦合器进入 AWG, 再通过对应的 AWG 解调通道输出至光功率计。

3.1 补偿系数的确定

为得到补偿光栅输出光功率对数比与温度的关系, 改变高低温试验箱温度(14 °C ~ 44 °C), 记录 AWG 中 CH31、CH30 两通道的输出光功率, 处理实验数据, 结果如图 4 所示。

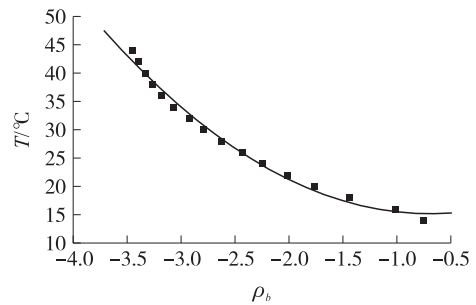


图 4 T 与 ρ_b 的关系

拟合式为:

$$T = 16.91137 + 4.93234\rho_b + 3.55358\rho_b^2 \quad (10)$$

10:90 耦合器的 10% 输出端口接光谱仪以便记录被测光栅中心波长, 90% 输出端口接 AWG 用于被测光栅的解调。固定 AWG 所处环境温度, 改变被测光栅所受应力, 得到不同应力下的输出光功率和中心波长值, 再按照式(8)拟合, 重复上述实验得到不同温度下的 M, N 值, 依据温度补偿理论处理实验数据, 得 $M = -0.066125$, 温度与 N 的关系如图 5 所示。

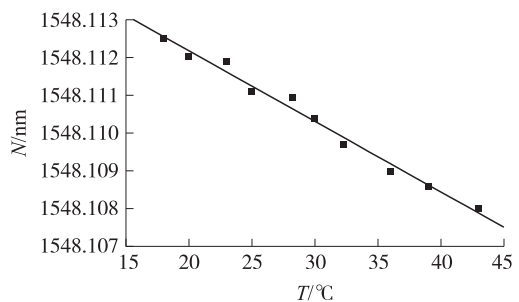


图 5 N 与 T 的关系

拟合结果如下式:

$$N = -0.000188144T + 1548.11587 \quad (11)$$

通过式(10)和式(11)可知, 该解调系统可通过补偿光栅的光功率对数比实时获得解调公式系数, 进而得到被测光栅中心波长。

3.2 补偿结果的验证

改变被测光栅所受应力,利用光功率计记录被测光栅和补偿光栅的光功率,利用光谱分析仪记录被测光栅的中心波长值,得到不同应力下被测光栅光功率 ρ_1 、 ρ_2 ,补偿光栅光功率 ρ_{b1} 、 ρ_{b2} ,以及被测光栅的中心波长 λ_{FBG} 。改变高低温试验箱温度(14 °C ~ 44 °C),重复上述实验,得到不同温度下的八组光功率与中心波长值。

由解调理论可知,不考虑温度影响时, M 、 N 均为常数,可通过式(8)拟合得到,任取三组数据拟合并将得到的结果取平均,得到无温度补偿时的解调系数 M 、 N ,从而得到被测光栅中心波长与光功率对数比的关系式如下:

$$\lambda_{\text{FBG}} = -0.06399667\rho + 1548.1092 \quad (12)$$

根据解调理论,利用其余五组数据验证解调结果的准确性,无温度补偿时,被测光栅中心波长 FBG1 由式(12)得出,加入温度补偿时,根据温度补偿理论,利用补偿光栅光功率得到补偿系数 N ,再根据式(8)得到被测光栅中心波长 FBG2,任取其中一组解调结果,如表1所示。

表1 解调结果与误差比较 单位: nm

FBG	FBG1	FBG2	误差 1	误差 2
1548.1233	1548.1197	1548.1249	0.0036	0.0016
1548.2449	1548.2413	1548.2419	0.0036	0.0030
1548.2909	1548.2764	1548.2877	0.0145	0.0032
1548.2934	1548.2790	1548.2926	0.0144	0.0008
1548.3074	1548.2934	1548.3028	0.0140	0.0046
1548.3125	1548.3011	1548.3093	0.0114	0.0032
1548.3346	1548.3186	1548.3321	0.0160	0.0025

表中 FBG 为由光谱分析仪读取的被测光栅中心波长的准确值,FBG1、误差 1 分别为未加入温度补偿时的解调结果和解调误差,FBG2、误差 2 分别为加入温度补偿后的解调结果和解调误差。经计算误差 1 的均值为 11 pm,误差 2 的均值为 2 pm,由此可知加入温度补偿可明显提高解调精度。

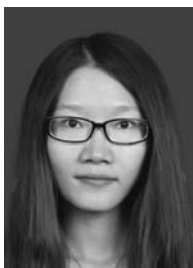
4 结束语

本文详细描述了阵列波导光栅波长解调原理,提出了阵列波导光栅波长解调系统的温度补偿方法,从理论和实践上验证了该方法的可行性。实验

表明,加入温度补偿能够消除温度对解调系统的影响,提高解调精度,解调误差仅为 2 pm。该系统结构简单、易于实现、解调精度高,适用于各种对精度要求较高的振动信号的解调,尤其是智能服装中心动信号的解调。

参考文献:

- [1] Su Hui, Huang Xuguang. A Novel Fiber Bragg Grating Interrogating Sensor System Based on AWG Demultiplexing [J]. Optics Communications, 2007, 275(1): 196-200.
- [2] 华静,刘月明,何正炎,等.基于 AWG 的耐高温长周期光纤光栅应变监测信号解调技术研究[J].传感技术学报,2012,25(6):799-802.
- [3] 宋剑飞,邵理阳,张阿平,等.一种新型 FBG 动态应变解调系统[J].光电子·激光,2007,18(8):924-926.
- [4] 王彦,梁大开,周兵.强度解调的光纤光栅智能结构动态监测技术[J].光电子·激光,2008,19(3):361-364.
- [5] 乔学光,葛鹏,贾振安,等.光纤光栅振动传感信号解调技术的研究[J].光电子·激光,2009,20(8):1004-1007.
- [6] 邹芳,王玉宝,冯元凯.基于 AWG 的波分/时分复用 FBG 传感网络研究[J].传感器与微系统,2010,29(9):55-60.
- [7] Sun F G, Xiao G Z, Zhang Z Y, et al. Modeling of Arrayed Waveguide Grating for Wavelength Application [J]. Optics Communications, 2007, 271(1): 105-108.
- [8] Sano Yasukazu, Yoshino Toshihiko. Fast Optical Wavelength Interrogator Employing Arrayed Waveguide Grating for Distributed Fiber Bragg Grating Sensors [J]. Journal of Lightwave Technology, 2003, 21(1): 132-139.
- [9] Fusiek Grzegorz, Niewczas Pawel, Willshire Andrew J, et al. Nonlinearity Compensation of the Fiber Bragg Grating Interrogation System Based on an Arrayed Waveguide Grating [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2008, 57(11): 2528-2531.
- [10] Jong-Moo Lee, Yong-Soon Baek, Kwang-Ryong Oh, et al. Temperature Dependence of Low Loss Polymeric AWG [J]. Optics Communications, 2007, 270(2): 189-194.
- [11] 秦政坤,马春生.一种减小聚合物阵列波导光栅光谱漂移的有效方法[J].光电子·激光,2008,19(12):1599-1601.
- [12] 李德禄.全聚合物型无热化阵列波导光栅参数的优化[J].电子器件,2012,35(6):627-630.
- [13] Li Hongqiang, Li Yang, Li Enbang, et al. Temperature-Insensitive Arrayed Waveguide Grating Demodulation Technique for Fiber Bragg Grating Sensors [J]. Optics and Laser Technology, 2013, 51: 77-81.
- [14] 于晓刚,苗长云,李鸿强,等.基于阵列波导光栅的智能服装人体测温解调系统研究[J].光谱学与光谱分析,2012,32(8): 2032-2036.



孙金露(1988-),女,天津,硕士研究生,主要从事光纤传感与信号处理方面的研究,lulu128828@163.com;



苗长云(1962-),男,天津,博士生导师,主要从事光通信及光传感技术方面的研究,miaochangyun@tjpu.edu.cn;



张 诚(1982-),男,天津,讲师,主要从事光纤传感与信号处理方面的研究,zhangchengly913@aliyun.com。