

文章编号: 1002-2082(2005)04-0046-04

编码式光纤光栅传感阵列解调方案的论证

范典, 姜德生, 梅加纯

(武汉理工大学 光纤传感技术研究中心, 湖北 武汉 430070)

摘要: 介绍了编码式光栅传感阵列的结构及其传感信号的特点。采用梳状结构对编码式光纤光栅传感阵列进行解调, 利用被测光谱通过阵列波导光栅不同通道时输出的不同光强的比值确定被测光的波长。该文分别从理想状态和存在背景反射的状态论证了本文提出的方案的可行性, 分析了噪声引起的误差。该系统不但适合于解调大容量的波长信息, 而且在解调时不存在任何机械移动部分便可以快速、同时测量多个波长。

关键词: 光纤布拉格光栅; 阵列波导光栅; 波长解调; 梳状结构

中图分类号: TN253; TN763

文献标识码: A

Interrogation Project for Encoding Fiber Bragg Grating Sensor Array

FAN Dian, JIANG De-sheng, MEI Jia-chun

(Fiber optic sensing technology of research centre, WHUT, WuHan 430070, China)

Abstract: The construction of the encoding fiber Bragg grating sensor array and the characteristic of its sensing signal are introduced. A new type of interrogator for encoding fiber Bragg grating sensor array, which has a comb structure and employs the logarithm of the output ratio between the adjacent two channels of arrayed waveguide grating to determine the measured wavelength, is proposed. The paper demonstrates the feasibility of this interrogation project in theory in the cases of background reflectance and the ideal case respectively and analyzes the error caused by the noise. This system is suitable for interrogating a large number of wavelength information, and can carry out a fast and simultaneous interrogation of multiple wavelengths without any mechanically moving parts.

Keywords: fiber Bragg grating (FBG); arrayed waveguide grating (AWG); wavelength demodulation; comb structure

引言

光纤布拉格光栅是一种能反射特定波长光的光学器件。当光栅发生形变即栅距改变时, 反射的中心波长也随之发生改变, 通过测量波长变化量可获得诸如应力、温度、振动、加速度等外部参数^[1]。但是, 一般的宽带激光光源所能提供的带宽为30~40 nm, 考虑到光栅应变所带来的中心波长的变化, 分布在同一窗口的光栅应保持2 nm的波长间隔, 所以单光栅作为分布式传感器件时的探测点个数受到限制。一般来说, 在同一个窗口只能分布15个中心波长不同的光栅, 因此编码式光纤光栅技术应运而生。编码式光纤光栅阵列是利用在光纤的同

一位置写入两个或两个以上中心波长不同的光栅技术(一般中心波长分布在1310 nm和1550 nm窗口)。我们对不同波长的光栅进行编码排列形成编码式光纤光栅传感阵列。较之单光栅所能提供的探测点个数, 它的测量容量大大加强, 探测点个数显著增加。

由于光纤布拉格光栅的传感机理是将传感的信息加载到波长的变化量上的, 所以波长变化量的探测成为光纤光栅传感器应用于实际工程中的关键技术。现有的波长解调技术按照解调原理大体可以分为3类: 窄带激光光源扫描法^[2]、宽带光源窄带滤波扫描法和将波长转化为其它参量的解调方

收稿日期: 2004-03-25; 修回日期: 2004-06-04

作者简介: 范典(1979-), 汉族, 女, 湖北武汉人, 武汉理工大学硕士研究生, 主要从事光纤传感技术方面的研究。

法^[4~7]。本文提出的梳状结构解调方案属于将波长转化为强度解调的方法,即通过测量光栅反射谱通过相邻两个通道透射的光强比值,找出该比值的对数和波长的线性关系,间接获得波长值。该方案避免了扫描法中机械移动部分,可以进行快速解调,并且可以同时测量多个波长。

1 方案

在寻找解调方法之前,首先分析被解调对象——编码式光纤布拉格光栅(FBG)传感阵列的特点。其特点有:

(1) 传感的信息是载在波长的变化量上(一般的光电探测器对波长不敏感,所以只有寻求特殊的解调方法)。

(2) 传感的信息量大。假设系统同时使用1310 nm系列和1550 nm系列的光栅探头,每个系列占用带宽30 nm,相邻波长的光栅间隔为2 nm,则在每个窗口可分布15个光栅。使用二维编码技术,系统可布探测点数为 $15 \times 15 = 225$ 个,如图1所示。其中光栅数目有450个。可见需要检测的波长数是十分庞大的。

$$\begin{array}{cccc} \lambda_1 l_1 & \lambda_1 l_2 & \cdots & \lambda_1 l_{15} \\ \lambda_2 l_1 & \lambda_2 l_2 & \cdots & \lambda_2 l_{15} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \lambda_{15} l_1 & \lambda_{15} l_2 & \cdots & \lambda_{15} l_{15} \end{array}$$

图1 编码式光纤光栅传感阵列波长分布示意图

Fig. 1 Scheme of wavelength distributin of encoding FBG sensor array

(3) 波长信号分布密集。相邻波长的光栅在常温自由状态下的波长间隔为2 nm,考虑到应变带来的变化,可能产生的相邻波长间隔为1~3 nm。如果使用精度不高的解调方法或设备容易产生误判情况。

对于编码式光纤布拉格光栅传感阵列的解调方法我们采用类似于编码键盘的扫描解调法——分别对行和列进行扫描,找到第*i*行,第*j*列的键,对应查到键值。同样,我们的解调方案是分别对编码式光纤布拉格光栅传感阵列的两个窗口进行检测,找到发生变化的1550 nm窗口的波长 λ_i 和1310 nm窗口的波长 λ_j ,即可确定中心波长在 $\lambda_i \lambda_j$ 的探测点的参量变化量。变化量 $\Delta\lambda_i$ 和 $\Delta\lambda_j$ 的大小决定参量的变化量。

整个传感系统如图2所示。由于FBG的中心波长分布在两个窗口,所以要启用两套解调装置。每

套解调装置由一个宽带激光光源、一个光耦合器、一个形成梳状结构的阵列波导光栅(AWG)、多头的带预放大器的光电二极管和并行数据处理微机组成。从光纤光栅反射的光接入AWG,不同波长的窄带光被分离导入不同的通道。由于两套解调装置是独立工作的,因此我们只讨论工作在1550 nm窗

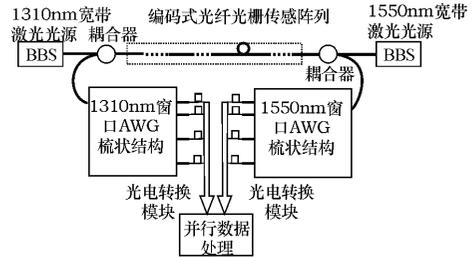


图2 编码式FBG传感阵列波长解调系统示意图

Fig. 2 Scheme of wavelength interrogation system of encoding FBG sensor array

口的解调装置。定义每个FBG的中心波长为 λ_{bi} ($1 \leq i \leq N$),它们随被测参量(温度或应力)变化,变化范围在AWG两个邻近通道的中心波长之间。为了避免解调中的波长色度串扰,FBG波长的分离度要比AWG通道的带宽大。

本文所提出的解调方案是将阵列波导光栅引入解调系统。阵列波导光栅也称做相位阵列(Phased Array),是WDM通信系统中的关键器件,它除了可作为波分复用/解复用器外,还是光互连器件的关键组成部分。随着近几年光通信的发展,关于AWG的研究非常活跃,在技术和制作工艺方面都取得了很大的进展。本文所用的阵列波导拥有多个重叠的光通道,形成如图3所示的梳状结构。

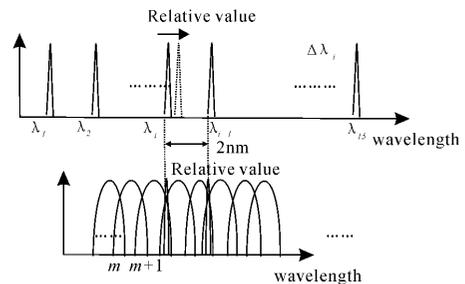


图3 AWG传输光波谱和FBG反射光波谱解调示意图
Fig. 3 Scheme of interrogation of AWG transmitted lightwave spectrum and FBG reflected lightwave spectrum

当载有传感信息的FBG反射光波长 λ_i 通过两

个相邻的光通道时,由于信道的特征不同,输出的光特征也不同,理论上输出光谱等于输入光谱和所通过信道特征的卷积。用光电二极管检测输出光强时,定义第 m 通道的检测电流为 $I_m(\lambda_i)$,相邻通道检测到的电流为 $I_{m+1}(\lambda_i)$,则可得到一个比值的对数函数 $\rho(\lambda_i) = \log \frac{I_{m+1}(\lambda_i)}{I_m(\lambda_i)}$ 。根据试验可以确定测量值 $\rho(\lambda_i)$ 和 λ_i 的线性关系,通过后期的数据处理可以得到波长值。下面将从理论上证明 $\rho(\lambda_i)$ 和 λ_i 的线性关系及其影响这种关系的各种因素。

2 原理

2.1 光纤布拉格光栅(FBG)反射谱函数

FBG 的反射谱可以很好地近似为高斯型。最近有报道称:一个 FBG 反射谱包含一个常量噪声基,即偏移成分 b_{oi} 。它是由许多原因引起的,如相位掩模缺陷、封装过程中微小尘埃的沉积或者 FBG 和传输光纤连接处的菲涅尔反射。因此,一个 FBG 的反射谱函数为

$$B_i(\lambda) = b_i \exp\left[-4(\ln 2) \frac{(\lambda - \lambda_{bi})^2}{\Delta \lambda_{bi}^2}\right] + b_{oi} \quad (1)$$

式中 b_i 和 $\Delta \lambda_{bi}$ 分别是第 i 个 FBG 高斯型的反射峰值和波长达到峰值一半时的谱宽(FWHM)。

2.2 阵列波导光栅(AWG)传输谱函数

本文使用的 AWG 由固定的阵列波导组成,相邻通道之间有恒定的通道差值,因此形成光栅梯队,起到基于多光束干涉的波长解复用功能。AWG 每个通道的接受函数或传输光谱也可以很好地近似为高斯型。但是,严格地说,每个通道的传输谱也包含一些噪声基,即传输截止带 a_{om} ,它可能由波导核的折射率波动引起,理论上 a_{om} 的期望值是 -60 dB 或更低。因此,AWG 传输谱函数为

$$A_m(\lambda) = a_m \exp\left[-4(\ln 2) \frac{(\lambda - \lambda_{am})^2}{\Delta \lambda_{am}^2}\right] + a_{om} \quad (2)$$

其中 a_{om} 和 $\Delta \lambda_{am}$ 分别为 AWG 中第 m 个通道高斯成分的传输峰值和波长达到峰值一半时的谱宽 FWHM。

2.3 波长解调原理

我们将待解调的 N 个 FBGs 的中心波长 Δ_{bi} 定义为 $x_i (1 \leq i \leq N)$ 。一个 AWG 中不同连续通道的自由谱宽(Free Spectral Rang, FSR) $\Delta \lambda_f$ 应该是相同的。因此,AWG 以 FSR 为周期更新自己的波长域。为了检测到波长值,FSR 必须比输入光源的谱宽 $\Delta \lambda$ 宽一些。第 m 通道的输出信号由下式给出:

$$I_m(\lambda_{bi}) = d_m \int_0^\infty S(\lambda) \left[\sum_{k=1}^N F_k^2 B_k(\lambda) \right] A_m(\lambda) d\lambda + I_{Fm} \quad (3)$$

式中, $S(\lambda)$ [watt/nm] 是光源的发射谱; d_m 是光电二极管的响应率; F_k 是光从输入光纤到达第 m 个 FBG 的透射率(与波长无关); I_{Fm} 是瑞利散射引起的信号偏移(与 FBG 无关),如果忽略波长的影响,可用下式表达:

$$I_{Fm} = d_m \int_0^\infty S(\lambda) R A_m(\lambda) d\lambda \quad (4)$$

我们定义 AWG 相邻两通道的输出比的对数为解调函数,即

$$\rho(\lambda_{oi}) = \log \frac{I_{m+1}(x_i)}{I_m(x_i)}$$

2.3.1 没有背景反射的情况

在理想情况下,我们认为 $b_{o1} = a_{o1} = R = 0 (1 \leq i \leq N)$, 并且 $\Delta \lambda_f$ 是无限大的。因此,和 AWG 通道的带宽相比,光源谱密度的变化较缓慢,即 $S(\lambda) = S(\lambda_{am})$ 。于是,(3)式可变为

$$I_m \approx F_i^2 d_m S(\lambda_{am}) a_m b_i \Delta \lambda_{am} \Delta \lambda_{bi} \times \sqrt{\frac{\pi}{(\Delta \lambda_{am}^2 + \Delta \lambda_{bi}^2) 4 \ln 2}} \times \exp\left[-4 \ln 2 \frac{(\lambda_{am} - x_i)^2}{\Delta \lambda_{am}^2 + \Delta \lambda_{bi}^2}\right] \equiv Z_m \quad (6)$$

同理我们可得

$$I_{m+1} \approx F_i^2 d_{m+1} S(\lambda_{a,m+1}) a_{m+1} b_i \Delta \lambda_{a,m+1} \Delta \lambda_{bi} \times \sqrt{\frac{\pi}{(\Delta \lambda_{a,m+1}^2 + \Delta \lambda_{bi}^2) 4 \ln 2}} \times \exp\left[-4 \ln 2 \frac{(\lambda_{a,m+1} - x_i)^2}{\Delta \lambda_{a,m+1}^2 + \Delta \lambda_{bi}^2}\right] \equiv Z_{m+1} \quad (7)$$

假定 $|\Delta \lambda_{a,m+1} - \Delta \lambda_{am}| \ll \Delta \lambda_{bi}$, 将(6)和(7)式带入(5)式得

$$\rho(x_i) \approx \frac{4(\log 2)(\Delta \lambda_{a,m+1} - \Delta \lambda_{am}) [2x_i - (\lambda_{a,m+1} + \lambda_{am})]}{\left[\frac{(\Delta \lambda_{a,m+1} + \Delta \lambda_{am})^2}{2}\right]^2 + \Delta \lambda_{bi}^2} + \log \frac{d_{m+1} a_{m+1} S(\lambda_{a,m+1}) \Delta \lambda_{a,m+1}}{d_m a_m S(\lambda_{am}) \Delta \lambda_{am}} + \frac{1}{2} \log \frac{\Delta \lambda_{am}^2 + \Delta \lambda_{bi}^2}{\Delta \lambda_{a,m+1}^2 + \Delta \lambda_{bi}^2} \quad (8)$$

显然,当 $x_i = (\lambda_{a,m+1} + \lambda_{am})/2$ 时,即 AWG 相邻两通道的波导特性曲线相交时, $\rho(x_i)$ 值为零。FBG 的中心波长 x_i 和 $\rho(x_i)$ 呈线性关系时, x_i 值可通过测量 $\rho(x_i)$ 的值得到。这就是本文波长检测的原理。波长测量的灵敏度(即波长 λ 和 ρ 的斜率关系)是由 FBG 和 AWG 的带宽决定的,与 $D =$

$[(\Delta\lambda_{a,m+1} + \Delta\lambda_{am})/2]^2 + \Delta\lambda_{bi}^2$ 成反比, FBG 和 AWG 的带宽越大则 D 也越大。另外, 波长测量的动态范围和 D 成正比。我们需要权衡动态范围和灵敏度的关系。

2.3.2 存在有限背景反射的情况

在真实情况中, $b_{0i} \neq 0$, $a_{0m} \neq 0$, 并且由于光纤很长使瑞利散射不能被忽略, 即 $R \neq 0$ 。在这种情况下, (6) 和 (7) 式要引入一个对波长不敏感的附加量, 由 (1)~(4) 式可得

$$I_m(x_i) = Z_m + J_m \quad (9)$$

$$I_{m+1}(x_i) = Z_{m+1} + J_{m+1} \quad (10)$$

其中 J_m (或 J_{m+1}) 是附加量, 由下式表示:

$$J_m = d_m S(\lambda_{am}) \sqrt{\frac{\pi}{4 \ln 2}} \times [(a_m \Delta\lambda_{am} + a_{0m} \Delta\lambda_s) B + \sum_{i=1}^N a_{0,m} F_i^2 b_i \Delta\lambda_{bi}] \quad (11)$$

$$B = R + \sum_{i=1}^N F_i^2 b_{0i} \quad (12)$$

B 是函数 b_{0i} , F_i , N 和 R 的函数。

假定每一个 $\Delta\lambda_{bi}$ 都足够小, 即

$$(a_m \Delta\lambda_{am} + a_{0m} \Delta\lambda_s) B \gg \sum_{i=1}^N a_{0,m} F_i^2 b_i \Delta\lambda_{bi} \quad (13)$$

并且

$$\frac{a_m}{a_{0m}} \gg \frac{\Delta\lambda_s}{\Delta\lambda_{am}} \quad (14)$$

那么, J_m 可简化为

$$J_m = d_m S(\lambda_{am}) \sqrt{\frac{\pi}{4 \ln 2}} \times a_m \Delta\lambda_{am} B \quad (15)$$

由 (9) 和 (10) 式可知, (5) 式中定义的 ρ 值受 J_m (或 J_{m+1}) 包括 Z_m (或 Z_{m+1}) 影响。不同于无背景反射的情况, 它不再和 x_i 存在线性关系。由 (11) 式可知, J_m (或 J_{m+1}) 依赖于 B (光纤反射), 它和光纤长度、温度、使用的 FBG 个数 N 及偏差反射 b_{0k} 有关。由于这种解调器要投入实际使用, 我们要求 ρ 值和一些不稳定的或可变的参数无关。显然, 由 (6), (7), (9) 及 (10) 式可知, 从 $I_m(x_i)$ (或 $I_{m+1}(x_i)$) 中减去附加量 J_m (或 J_{m+1}), 不但可以使 ρ 值与可变参数无关, 而且可以使解调函数线性化。于是, 得到一个新的解调函数:

$$\rho^*(x_i) = \log \frac{I_{m+1}(x_i) - J_{m+1}}{I_m(x_i) - J_m} \quad (16)$$

为在试验中得到这个效果, 可使用 AWG 的一个通道作为参考通道 M , 它的中心波长远离任何 FBG 的中心波长 (如 $|M - m| \gg 1$), 那么参考通道的输出 I_M 代表背景反射成分 J_m , 即

$$I_M = J_M = d_M S(\lambda_{aM}) \sqrt{\frac{\pi}{4 \ln 2}} \times a_M \Delta\lambda_{aM} B \quad (17)$$

由 (17) 式可知, 测量得到的 I_M 决定了 B , 于是 (15) 式中的 J_m (或 J_{m+1}) 就可以被确定。

2.4 噪声评估

最终的波长测量精度是由检测电路的高频热噪声确定的。 ρ 值的时间均值变化相关估计为

$$\begin{aligned} \langle \Delta\rho^2(x_i) \rangle &\approx \frac{\langle \Delta I_m^2(x_i) \rangle}{I_m(x_i)^2} + \frac{\langle \Delta I_{m+1}^2(x_i) \rangle}{I_{m+1}(x_i)^2} \\ &\approx 2q_e \left[\frac{1}{I_m(x_i)} + \frac{1}{I_{m+1}(x_i)} \right] B_\omega \\ &\quad + \frac{4k_B T F_i B_\omega}{R_L} \left[\frac{1}{I_m(x_i)^2} + \frac{1}{I_{m+1}(x_i)^2} \right] \end{aligned} \quad (18)$$

式中, $\langle \rangle$ 符号代表取时间平均; q_e 是电子电荷值; k_B 是波耳兹曼常数; B_ω 是检测电路的带宽 (由一个光电二极管和一个电放大器组成); T 是光电二极管的绝对温度; F_i 是放大器的噪声特征; R_L 是光电二极管的负载电阻。假定 AWG 的 m 通道和 $m+1$ 通道的 T , F_i 和 R_L 是共有的, 波长的误差为

$$\sigma^2(x_i) = \frac{1}{\left[\frac{d\rho(x_i)}{dx_i} \right]^2} \langle \Delta\rho^2(x_i) \rangle \quad (19)$$

3 结论

本文提出的波长解调方案是一种由阵列波导光栅组成的梳状结构, 它适用于编码式光纤光栅传感阵列等多波长的同时检测, 在解调过程中不存在机械移动部分, 具有较快的速度和较好的稳定性。根据本文的理论论证, 假设在理想情况下没有背景反射时, FBG 的中心波长 x_i 和 $\rho(x_i)$ 呈线性关系。但是, 在实际情况中这种背景反射不能忽略, 它会影响到 x_i 和 $\rho(x_i)$ 的线性关系, 引起波长测量误差。因此, 需要在 AWG 中设置一个参考通道, 它的输出可以补偿背景反射。

由于未找到合适的试验用阵列波导光栅, 本方案的试验部分暂时无法实现。当然, 试验中的梳状结构也可用 F-P 腔等其它具有高斯特性传输谱的波导结构组成, 但要进行大容量的波长解调还需要 AWG。

参考文献:

- [1] A D Kersey, M A Davis, H J Patrick, M LeBlanc, K P Koo, C G Askins, M A Putnam, (下转第 55 页)