

DOI: 10.13382/j.jemi.B2205433

基于双 AWG 的新型 FBG 连续解调方法研究^{*}

姬星辰^{1,2} 袁 配^{2,3} 吕 峥^{1,2} 庄 炜^{2,3} 祝连庆^{1,3}
(1. 北京信息科技大学光电测试技术及仪器教育部重点实验室 北京 100192; 2. 北京信息科技大学光纤传感与系统北京实验室 北京 100016; 3. 北京信息科技大学北京市光电测试技术重点实验室 北京 100192)

摘 要:为了实现基于阵列波导光栅(arrayed waveguide grating, AWG)的光纤布拉格光栅(fiber Bragg gratin, FBG)的连续解调,提出了一种使用两个 AWG 联合解调的方法。在一个 AWG 相邻两通道光谱中间插入另一个 AWG 对应通道的光谱,组成最小的光谱周期;每次测量均从三通道中选择光强度最强的两个通道,利用相对光强解调算法,根据其波长—功率关系对 FBG 中心波长进行精确测量。使用两个 100 GHz 的 AWG 搭建了实验平台,并对温度传感器的解调进行研究。实验表明,在 0.8 nm 的系统最小动态范围周期内,实现了对 FBG 的连续精确解调,系统的解调线性度达 0.999 1,波长精度达±4 pm。对数据和实验结果进行数学分析,可以将 C 波段范围分成多个波长周期,系统可以实现 C 波段 40 nm 全周期范围内对单个 FBG 的连续解调。该方法不但可以实现 C 波段范围内基于 AWG 对 FBG 的连续解调,使得运用 FBG 可以连续感测外界物理量变化,提高了系统的实用性。而且,该方法能够准确解调出波长信息,为实现对 FBG 的连续精确解调提供了借鉴信息,有利于进一步扩大 FBG 的应用领域。

关键词: 光纤布拉格光栅;连续解调;双阵列波导光栅;相对光强解调
中图分类号: TN247;TN256 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8040

Research on a novel method of continuous FBG interrogation based on double AWGs

Ji Xingchen^{1,2} Yuan Pei^{2,3} Lyu Zheng^{1,2} Zhuang Wei^{2,3} Zhu Lianqing^{1,3}
(1. Key Laboratory of the Ministry of Education for Optoelectronic Measurement Technology and Instrument, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China; 2. Beijing Laboratory of Optical Fiber Sensing and System, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100016, China; 3. Beijing Key Laboratory of Optoelectronic Measurement Technology, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China)

Abstract: To achieve continuous interrogation of fiber Bragg grating (FBG) based on arrayed waveguide grating (AWG), a method of joint interrogation using two AWGs is proposed. The insertion of the spectrum of the corresponding channel of another AWG in the middle of the spectra of two adjacent channels of one AWG, forming the minimum spectral period. Each measurement selected the two channels with the strongest light intensity from the three channels, and used the relative light intensity interrogation algorithm to accurately measure the FBG center wavelength based on its wavelength-power relationship. The experimental platform was built by using two 100 GHz AWGs, and the interrogation of the temperature sensors was investigated. The experimental results show that the continuous and accurate interrogation of FBG is achieved within the 0.8 nm minimum dynamic range period of the system, and the interrogation linearity of the system reaches 0.999 1 and the wavelength accuracy reaches ±4 pm. The C-band range can be divided into multiple wavelength cycles by mathematically analyzing the data and experimental results, and the system can achieve continuous interrogation of a single FBG in the C-band 40 nm full-cycle range. The method not only realizes continuous interrogation of FBG based on AWG in the C-band range, which makes it possible to continuously sense the external physical quantity changes using FBG and improves the

practicality of the system. Moreover, the method can accurately interrogate the wavelength information, which provides reference information for the realization of continuous and accurate interrogation of FBG and is conducive to the further expansion of the application field of FBG.

Keywords: fiber Bragg grating; continuous interrogation; dual arrayed waveguide gratings; relative light intensity demodulation

0 引言

光纤布拉格光栅 (fiber Bragg grating, FBG) 传感器由于具有重量轻、可靠性高、抗腐蚀、抗电磁干扰等优点^[1-3], 目前已被广泛应用于航空航天等领域的环境与健康监测等方面^[4-6]。FBG 传感器的基本工作原理是通过对其反射光谱中心波长的漂移量进行探测, 能够反映外界待测物理量的变化, 因此对 FBG 中心波长的解调是 FBG 应用及推广的一项关键技术^[7]。

国内外在 FBG 传感解调方面进行了大量的研究, 目前常用的 FBG 解调 (fiber Bragg grating interrogation, FBGI) 技术有边缘滤波法、光谱仪检测法、匹配光栅法、Mach-Zehnder 干涉仪法、可调谐 F-P 滤波检测法、CCD 成像分析法等^[8-13]。这些解调方法已相对成熟并且具有良好的解调性能。但是随着应用领域的扩展和科技水平的不断发展, 人们对于 FBG 解调技术提出了新的更高的要求, 即向着更小尺寸、更高速率、更高性能的方向发展^[14]。

基于 AWG 的 FBGI 系统是一种基于平面光波回路技术 (planar lightwave circuit, PLC) 的新型 FBG 解调方法。一方面, 光子集成技术可以将光源、探测器、AWG 等不同功能的器件集成在同一衬底上, 使得基于 AWG 的光子集成解调系统具有体积小、质量轻的优势。另一方面, AWG-FBGI 系统的解调速率只受到光电探测器 (photoelectric detector, PD) 响应时间以及模/数 (analog/digital, A/D) 采样率的影响, 理论上可以实现极高的解调速率。因此, AWG-FBGI 技术在未来将具有很大的研究与开发潜力^[15-16]。

AWG-FBG 波长解调原理要求 FBG 中心波长应处于 AWG 相邻两通道中心波长之间, 这限制了 FBG 的解调范围。又由于 AWG 光谱带宽的有限性, 当前 AWG-FBGI 系统动态范围窄, 无法实现对 FBG 在 C 波段的连续解调, 这限制了 FBG 在实际环境中的应用条件。

近年来, 关于 AWG-FBG 传感与解调技术, 国内外进行了大量的研究。2014 年, 比利时 Gent 大学的 Tria 等^[17]报道并开发了一种基于绝缘体上硅 (silicon on insulator, SOI) AWG 的小型化解调仪, 通过减小 AWG 的衍射级数实现其通道间大的光谱交叠, 并通过质子探测法解调 FBG 中心波长等, 其波长分辨率为 10 pm, 可以读出 8 个应变传感器波长, 解调范围跨度达 40 nm。2016

年, Eindhoven 大学的 Pustakhod 等^[18]提出了一种单边双输入结构的新型 AWG, 该方案通过在输入端引入多模干涉结构扩大了光谱交叠, 波长分辨率提高到 0.96 pm, 设计的系统工作范围是 10 nm。2017 年, 天津工业大学的 Li 等^[19]报道了一种基于 SOI 材料的集成 AWG-FBGI 设计, 实现了对于 4 个 FBG 温度传感器的解调, 但由于缺乏对 AWG 光谱的针对性设计, 对每个温度传感器的解调范围较窄; 2021 年, 李鸿强等^[20]利用信道间隔为 2.9 nm 的 1×8 通道的 AWG 搭建解调系统, 实现了多传感器同时测量, 没有提及解调的连续问题。2021 年, 北京信息科技大学制作了一种基于 SOI 的 8 通道 AWG, 为了满足高动态范围解调要求, 信道间隔设计为 3 nm, 基于该 AWG 的解调系统可以实现 1.2 nm 的解调范围^[21]。

基于上述对 AWG-FBG 波长解调系统国内外研究的分析, 当前系统仍然无法对 FBG 实现 C 波段大范围连续解调。在此问题上, 为了获得较大的 FBG 解调动态范围, 当前主要有如下措施: 一方面通过优化 AWG 结构, 对 AWG 光谱进行针对性设计以扩大带宽范围, 力求对单个 FBG 的波长变化获得较大的解调范围。另一方面, 有人建议测量 AWG 相邻两个以上的通道的功率^[22], 该技术要求 FBG 峰值与多个 AWG 通道重叠, 这需要在 AWG 通道间距和 FBG 峰值光谱宽度之间进行权衡。两种方法都需要针对 AWG 进行特定的设计, 相对复杂, 耗时较长, 成本相对较高, 且可解调的 FBG 范围相对固定。因此, 对于 AWG-FBGI 系统的解调连续性问题仍期待进一步的研究。

本文聚焦于 AWG-FBGI 系统的解调连续性问题, 在相对光强法解调原理的基础上创新性地提出了一种使用双 AWG 联立解调 FBG 的方案, 在 AWG 相邻两通道中间引入另一个 AWG 的通道, 实现 3 个通道光谱的交叠, 利用相邻两通道的光强值对 FBG 进行解调。搭建了基于双 AWG 的 FBG 连续解调系统, 可以对单个 FBG 实现在全 C 波段范围内的连续解调, 解调精度达到 ±4 pm。

1 基于 AWG 的解调系统及原理

1.1 阵列波导光栅

AWG 由输入/输出波导、平板波导及阵列波导组成, 作为一种基于平面光波回路技术的角色散型光无源器件, AWG 是一种光波导型波分复用/解复用器。一复用多波长光信号通过平板波导衍射成高斯分布的同相位光

波输入到等长度差 ΔL 的阵列波导中,不同波长产生不同相位差的阵列光波,这些具有不同相位差的阵列光波在输出平面波导内发生衍射和干涉,不同波长的光波聚焦在不同输出波导位置,完成解复用功能^[23]。AWG 的结构如图 1 所示。

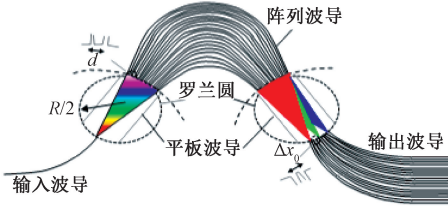


图 1 AWG 的结构图

Fig. 1 Composition diagram of AWG

1.2 AWG 波长解调原理

典型的 AWG 波长解调系统由宽带光源发出的宽带光经环形器、单模光纤入射到 FBG 传感器阵列中,FBG 反射光波长入射到 AWG 输入端,AWG 每一个输出通道后链接一个光电探测器 (photoelectric detector, PD),完成光电转换,经过放大滤波电路、数据处理单元等完成解调,并将解调结果输出至计算机^[24],解调系统框图如图 2 所示。

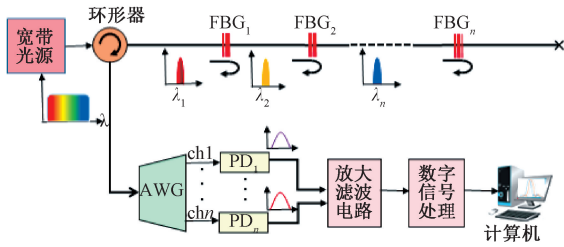


图 2 AWG 解调系统图

Fig. 2 Schematic diagram of AWG interrogation system

以单个 FBG 为例,AWG 波长解调原理如图 3 所示,设其对应的阵列波导光栅中两个相邻输出通道透射谱为 $Ch(i)$ 、 $Ch(i+1)$ ($0 \leq i \leq M$, M 为 AWG 的最大通道数), λ_{FBG} 是 FBG 反射谱的中心波长, λ_i 、 λ_{i+1} 分别是 FBG 对应的 AWG 相邻两通道的透射谱的中心波长,两个通道的输出光强 P_i 和 P_{i+1} 分别是 FBG 反射谱与 AWG 相邻通道 $Ch(i)$ 、 $Ch(i+1)$ 透射谱的重叠积分。

AWG 各通道的传输谱及 FBG 的反射谱均看作是高斯型的,表达式分别为:

$$T_{AWG}(i, \lambda) = T_0 \exp \left[-4 \ln 2 \frac{(\lambda - \lambda_i)^2}{\Delta \lambda_i^2} \right] \quad (1)$$

$$R_{FBG}(\lambda) = R_0 \exp \left[-4 \ln 2 \frac{(\lambda - \lambda_{FBG})^2}{\Delta \lambda_{FBG}^2} \right] \quad (2)$$

式中: T_0 、 R_0 分别为 AWG 通道传输谱和 FBG 反射谱的

归一化因子; λ 、 λ_i 和 λ_{FBG} 分别表示入射光波长、AWG 通道 i 的中心波长和 FBG 的中心波长; $\Delta \lambda_i$ 和 $\Delta \lambda_{FBG}$ 分别是 AWG 通道 i 和 FBG 反射谱的半峰值带宽 (FWHM)。

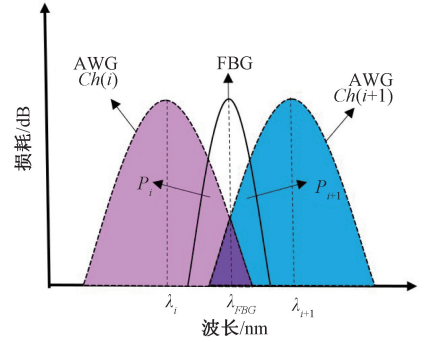


图 3 AWG 波长解调原理图

Fig. 3 Schematic diagram of AWG wavelength interrogation

AWG 各通道的输出光强为光源功率、FBG 反射谱、AWG 通道传输谱三者的乘积在整个光谱范围的积分,通道 i 和 $i+1$ 的输出光强可表示为:

$$P_i = (1 - L_i) \int_0^\infty I_s(\lambda) \cdot R_{FBG}(\lambda) \cdot T_{AWG}(i, \lambda) d\lambda \quad (3)$$

$$P_{i+1} = (1 - L_{i+1}) \int_0^\infty I_s(\lambda) \cdot R_{FBG}(\lambda) \cdot T_{AWG}(i+1, \lambda) d\lambda \quad (4)$$

式中: P_i 和 P_{i+1} 分别为 AWG 通道 i 和 $i+1$ 的输出光强; L_i 和 L_{i+1} 分别为 AWG 通道 i 和 $i+1$ 的衰减因子,在同一个 AWG 波长解调系统中,可认为各通道的衰减因子都相等,即 $L_i = L_{i+1} = L$; $I_s(\lambda)$ 为光源的发射谱,可认为是常量。由式 (1) 和 (2) 可知, P_i 和 P_{i+1} 主要由 λ_i 、 λ_{FBG} 决定。

当 FBG 受到外界待测量变化影响时,波长会向右或者向左漂移,导致 P_i 和 P_{i+1} 发生变化,探测到两个通道的光强值,根据相对光强解调法,两通道光强比对数与 FBG 中心波长存在线性关系:

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

式中: $\Delta \lambda = \Delta \lambda_{i+1} = \Delta \lambda_i$ 为 AWG 相邻通道间隔,看作是常量。

单个 AWG 解调效果如图 4 所示。解调算法要求,相邻两通道 $Ch(i)$ 、 $Ch(i+1)$ 只能测量一个 FBG 的波长变化,这就导致了解调方法的局限性:测量的 FBG 中心波长的漂移量只能限制在两通道间隔范围内。由于 AWG 光谱特性的限制,在靠近通道中心波长的区域,能探测到的相邻通道功率过小,甚至无法被探测到,导致解调失败。因此当利用多对相邻 AWG 通道分别对范围内 FBG

解调时,在靠近各 AWG 通道中心波长附近区域会存在多个盲区,无法实现 FBG 在 AWG 全光谱范围内的连续解调。

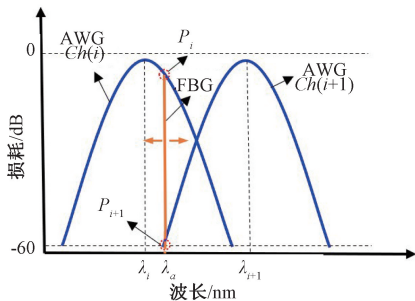


图 4 单 AWG 解调效果说明

Fig. 4 Illustration of single AWG interrogation effect

2 基于双 AWG 解调原理及系统

2.1 基于双 AWG 解调实验原理

双 AWG 解调系统的设计基于相对光强解调原理,使用两个 AWG,在 AWG 相邻双通道之间联立另一个 AWG 的通道,作为新的相邻通道,其可探测的光功率值显著提高。利用拼接后的光路进行解调,其解调效果如图 5 所示。

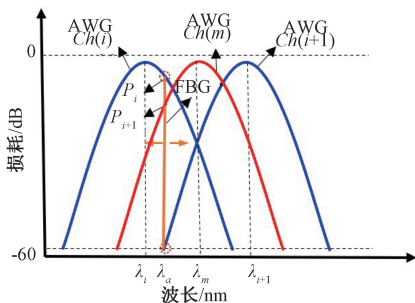


图 5 双 AWG 解调效果说明图

Fig. 5 Illustration of dual AWGs interrogation effect

图 5 中, $Ch(i)$ 、 $Ch(i+1)$ 分别是 AWG_1 的相邻两通道光谱,中心波长分别是 λ_i 和 λ_{i+1} , $Ch(m)$ 是在 AWG_1 两通道中间引入的 AWG_2 的通道光谱,通道中心波长是 λ_m 。波长值 λ_a 处于中心波长 λ_i 附近, P_i 和 P_{i+1} 分别是峰值波长为 λ_a 的 FBG 与相邻两通道的重叠积分。

从图 5 中可以看出 FBG 光谱与通道 $Ch(i+1)$ 的重叠积分较小,于是采用与新通道 $Ch(m)$ 的重叠积分作为新的 P_{i+1} ,则可以利用通道 $Ch(m)$ 和 $Ch(i)$ 进行解调填补 $\lambda_i \sim \lambda_a$ 范围内的解调空白;同理,利用 $Ch(m)$ 和 $Ch(i+1)$ 进行解调填补 λ_{i+1} 左附近区域的解调空白,从而实现在 AWG_1 相邻两通道间隔 λ_i 至 λ_{i+1} 范围内的连续解调。

解调算法的核心是在 3 个通道中选择光强值最大的两个通道进行解调。在相邻两通道中心波长 λ_i 至 λ_{i+1} 范围内,以通道 $Ch(m)$ 的中心波长 λ_m 为 midpoint,在 λ_i 至 λ_m 范围内,由光强最大的两通道 $Ch(i)$ 与 $Ch(m)$ 进行解调,在 $\lambda_m \sim \lambda_{i+1}$ 范围内,由光强最大的两通道 $Ch(m)$ 与 $Ch(i+1)$ 进行解调。

2.2 基于双 AWG 解调实验系统

基于以上对双阵列波导光栅解调方法的分析,搭建了基于双 AWG 解调的系统平台,其原理如图 6 所示。

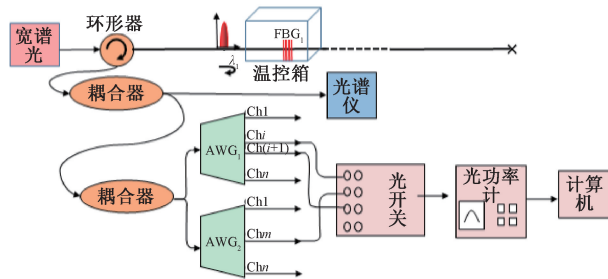


图 6 双 AWG 解调系统图

Fig. 6 Schematic diagram of dual AWGs interrogation system

宽带光发出的光经环形器到达 FBG,放置在温控箱的 FBG 中心波长随着温度的升降而变化,反射回来的窄带高斯型光经过环形器、第 1 个 3 dB 耦合器分别进入光谱仪和第二耦合器。进入光谱仪的光实时测量得到当前 FBG 的波长。从第二耦合器输出的光分别进入 AWG_1 、 AWG_2 ,从 AWG_1 的任意相邻两通道 $Ch(i)$ 、 $Ch(i+1)$ 和 AWG_2 的通道 $Ch(m)$ 输出的光信号连接光开关,选择光强最大的相邻两通道接入光功率计,检测到光强值实时存储在计算机中。

3 系统解调实验及结果分析

实验中 AWG_1 与 AWG_2 均为 40 通道,两 AWG 除信道中心波长范围有差异,其他参数无较大差异。两 AWG 对应信道中心波长相差 0.4 nm,通道中心波长范围分别是 1 529.753 ~ 1 560.806 nm、1 530.153 ~ 1 561.206 nm,波长精度为 ± 50 pm,信道间隔设计为 0.8 nm,实验中被测三通道光谱图如图 7 所示。

不失一般性地,选取 AWG_1 中任意相邻两通道 $Ch30$ 、 $Ch31$ 进行测试,(信道的中心波长分别是 1 553.260、1 554.060 nm,信道的 3 dB 带宽分别是 0.51、0.52 nm), AWG_2 选用 $Ch30$ 通道作为输出通道(信道的中心波长是 1 553.660 nm,信道的 3 dB 带宽是 0.53 nm)。光功率计波长范围为 800 ~ 1 650 nm,最大量程范围是 10 mW,光功率的精度为 ± 50 pm。为了保障实验数据的稳定性,减少不必要的粗大误差,控制实验室的

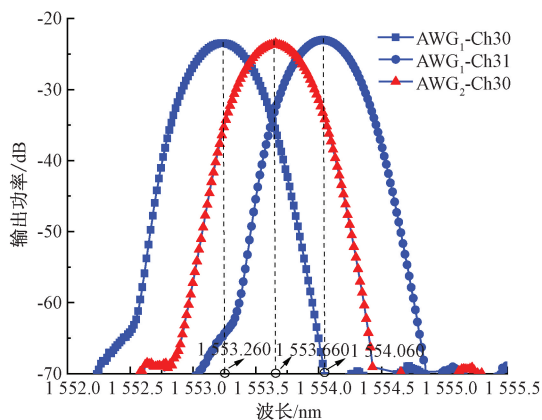


图7 双 AWG 拼接的 3 通道光谱图

Fig. 7 Spliced 3-channel spectra of double AWGs

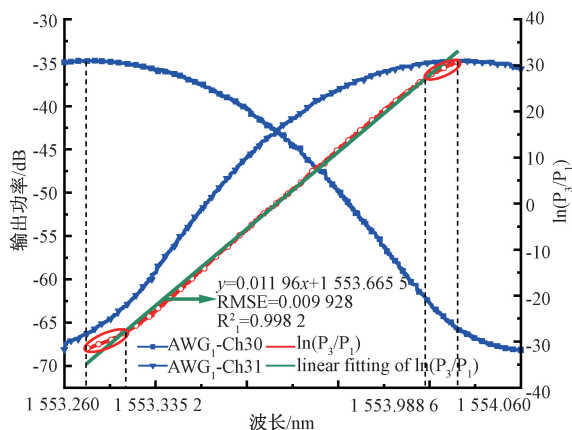


图8 单 AWG 解调结果

Fig. 8 Interrogation results of single AWG

温度在 23 ℃ 附近,避免温度变化过大对实验数据造成的影响。

实验中 FBG 的中心波长在 0 ℃ 是 1552.643 nm,反射率是 70%,3 dB 带宽是 0.34 nm,FBG 中心波长随温度变化的灵敏度系数是 11.02 pm/℃。温控箱的温度精度是 0.1 ℃,温度设置循环地从 0 ℃ ~ 200 ℃ 升温 and 降温。分别采集两个 AWG 的 3 个通道的光功率值,拟合得到相应的解调函数。为了满足实验对于重复性和对照性的要求,在当前温度范围条件下采集 3 组数据。

3.1 单个 AWG 解调性能测试

图 8 为单个 AWG₁ 相邻两通道 Ch30、Ch31 解调效果图,图中解调曲线 $\ln(P_3/P_1)$ 看出可解调的 FBG 范围是 1553.335 2~1553.988 6 nm,共计 0.653 4 nm (<0.8 nm 信道间隔),左右两端在靠近两通道中心波长处分别有 0.075 2、0.071 4 nm 的区域无法精确解调,这验证了传统的 AWG 相邻双通道解调范围小于两相邻通道的信道间隔的问题。记 AWG₁ 相邻两通道 Ch30、Ch31 的光强值分别为 P_1 、 P_3 ,依据解调公式(5)对波长-功率关系进行线性拟合,如图 9 所示,得到对应的解调函数,函数的线性度是 $R_1^2 = 0.998 2$,具体的解调公式为:

$$y = 0.01196x + 1553.6655 \quad x = \ln \frac{P_3}{P_1} \quad (6)$$

3.2 双 AWG 解调性能测试

采用双 AWG 解调方法,在原始的 AWG₁-Ch30、AWG₁-Ch31 两通道之间联立 AWG₂-Ch30 通道,解调结果如图 10 所示。根据双 AWG 解调原理,将整个待解调范围分为两段,从短波长到长波长,依次分别使用 AWG₁-Ch30 与 AWG₂-Ch30 进行解调、AWG₂-Ch30 与 AWG₁-Ch31 进行解调,两段的连续解调范围分别是 1553.260~1553.660 nm、1553.660~1554.060 nm,将两段解调范围拼接,从而可以实现相邻信道间隔 0.8 nm 范围内的连

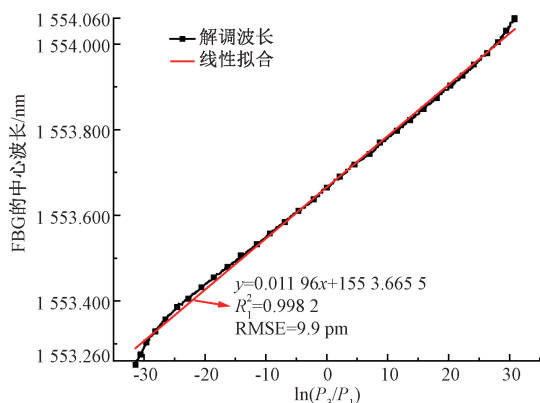


图9 单 AWG 解调关系曲线

Fig. 9 Curve of single AWG interrogation results

续解调。解调关系曲线图如图 11(a)、(b)所示,曲线的线性度 R^2 分别是 0.998 8、0.999 1,线性度都要比 R_1^2 好,解调函数式为:

$$y = \begin{cases} 0.02446x + 1553.4818 & x_1 = \ln \frac{P_2}{P_1} \\ 0.02626x + 1553.8527 & x_2 = \ln \frac{P_3}{P_2} \end{cases} \quad (7)$$

3.3 单双 AWG 解调性能测试对比

1) 系统的解调连续性

由图 8 分析可知,传统单 AWG 相邻双通道解调存在不连续问题,可解调的范围小于信道间隔范围,因此无法对单个 FBG 实现在全 C 波段的连续解调。

由图 10 分析,使用双 AWG 解调法,使用 3 个通道对 0.8 nm 的信道间隔分成两端分别解调,这种解调方法提高了相邻信道可探测光强值,运用相对光强解调算法通过分段解调计算,可以实现对单个 FBG 在相邻信道间隔的连续解调。

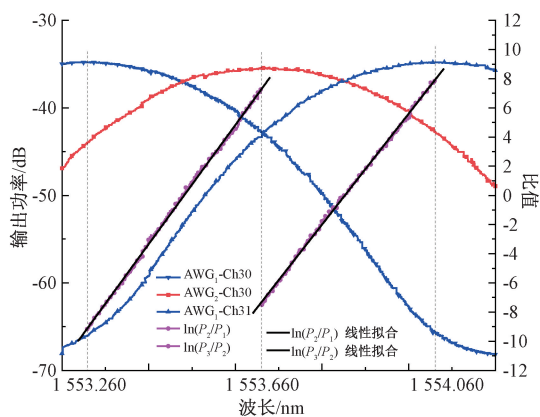


图 10 双 AWG 解调结果

Fig. 10 Interrogation results of dual AWGs

当前 AWG_1 的相邻两通道和插入的 AWG_2 的 1 个通道拼接组成的三通道解调系统是双 AWG 解调系统的最小解调周期, AWG_1 每依次增加一个通道, 需要相应地增加一个 AWG_2 的通道, 解调范围将依次扩大 0.8 nm, 依此周期性循环, 从而可以保障整个双 AWG 解调系统实现在全 C 波段任意范围内对 FBG 的连续解调。

2) 系统的解调精度

对于单 AWG 解调方法, 将对应通道的功率值代入解调公式 (6), 得到 1553.260~1554.060 nm 全段的波长解调结果如图 12 所示, 系统的解调精度为 ± 9.9 pm。

对于双 AWG 解调方法, 将对应通道的功率值代入解调公式 (7), 得到 1553.260~1553.660 nm、1553.660~1554.060 nm 及 1553.260~1554.060 nm 全段的波长解调结果如图 13 所示。

以图 13(a) 1553.260~1553.660 nm 段波长解调为研究, 实验中探测到光强值最大的两通道 AWG_1 -Ch30 与 AWG_2 -Ch30 对应的光功率 P_1 、 P_2 , 并代入解调函数 (7), 计算出对应的解调波长值, 与可调谐激光器的实际波长值进行对比, 用均方根误差 (root mean squared error, RMSE) 来代表波长解调的精度, 综合各段解调性能, 系统的实验解调精度可以达到 ± 4 pm, 优于单 AWG 解调法。系统的波长分辨率达 10 pm。

实验所得解调精度的测量受实验误差影响较大, 主要包括外界环境如温度、震动等因素以及温控箱的稳定性所造成的误差; 对于功率计、光开关不断变化的示数, 选择读数的时候造成的测量误差等。因此, 实验中应尽量减少外界环境的温度、震动等的影响。

4 结 论

针对 AWG-FBG 解调的不连续问题, 本文详细介绍了 AWG 的解调原理, 提出了基于双 AWG 的 FBG 连续解

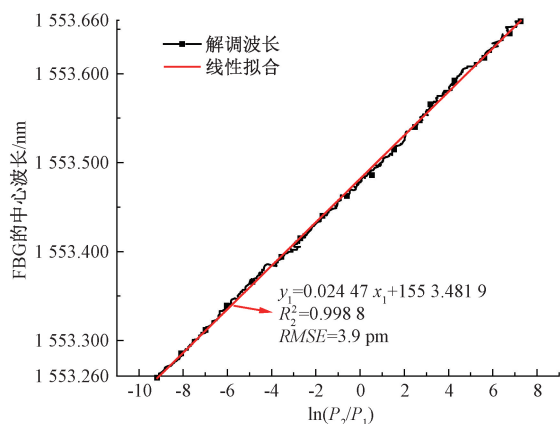
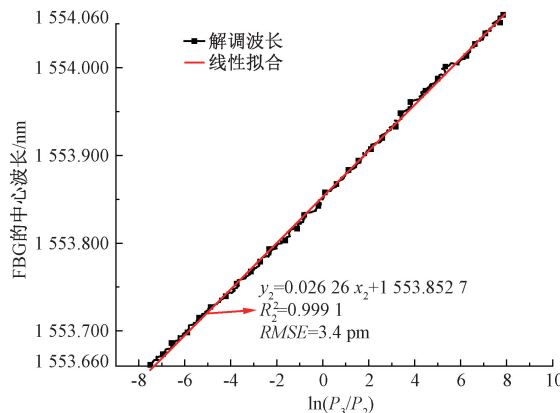
(a) $\lambda_{FBG} - \ln(P_2/P_1)$ (b) $\lambda_{FBG} - \ln(P_3/P_2)$

图 11 双 AWG 解调关系曲线

Fig. 11 Curve of dual AWGs interrogation results

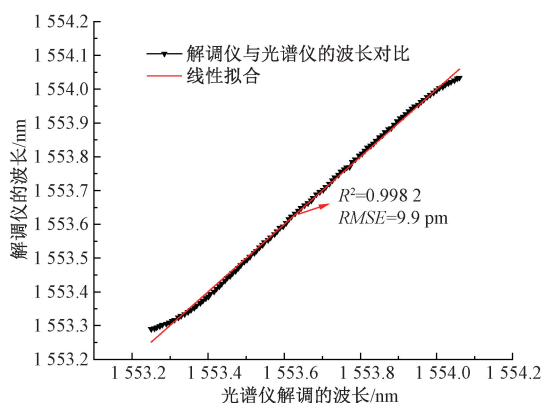


图 12 单 AWG 波长解调误差对比

Fig. 12 Comparison of single AWG wavelength interrogation errors

调的总体方案并设计了相应的解调系统, 从理论和实验上验证了其可行性。实验结果表明, 系统可以实现 FBG 在 AWG 相邻信道间的连续解调, 并证明系统可以实现在全 C 波段 40 nm 范围内对于单个 FBG 的连续解调, 系

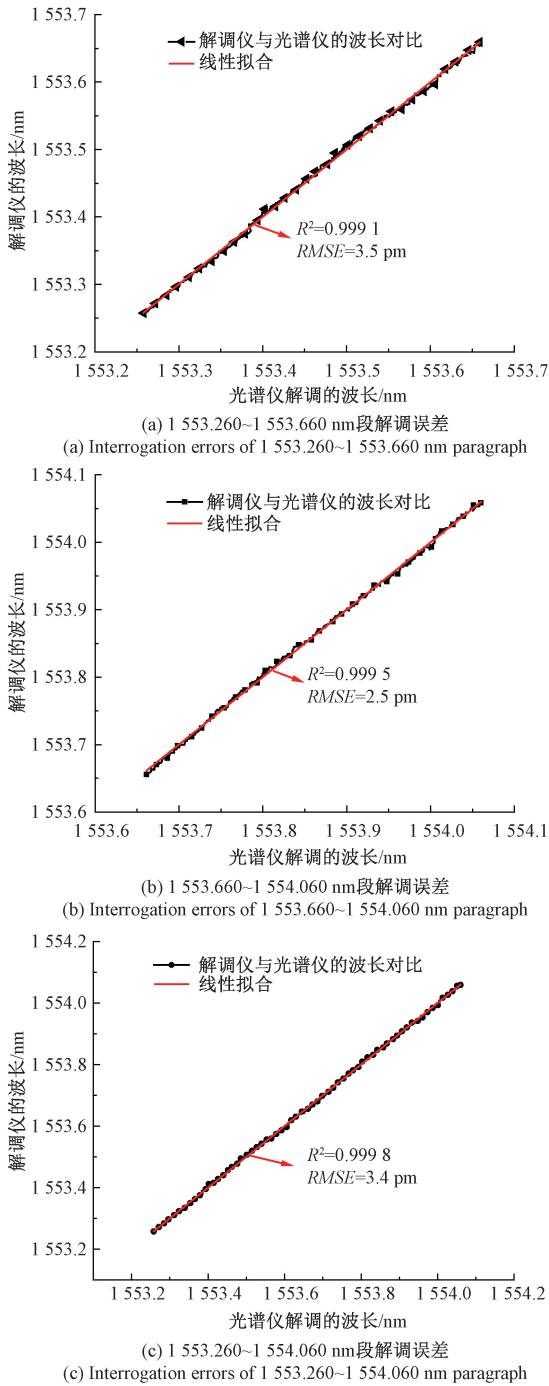


图 13 双 AWG 波长解调误差对比

Fig. 13 Comparison of dual AWGs wavelength interrogation errors

统解调精度可达 ± 4 pm,满足当前对 FBG 解调仪准确度的使用要求。该系统结构紧凑、体积小、质量轻,解调速度快,易于实现,并且可以实现连续解调的范围灵活易变,为基于 AWG 的 FBG 连续解调提供了一种低成本、高性能、易实现的思路。

参考文献

- [1] LI T L, GUO J X, TAN Y G, et al. Recent advances and tendency in fiber Bragg grating-based vibration sensor: A review [J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(20): 12074-12087.
- [2] WU Q, OKABE Y, YU F. Ultrasonic structural health monitoring using fiber Bragg grating [J]. Sensors, 2018, 18(10): 3395-2420.
- [3] 王鹏,张苗苗.碳纤维复合材料受热应变测试方法研究 [J]. 国外电子测量技术, 2018, 37(8): 6-10.
WANG P, ZHANG M M. Research on thermal strain comparison test of carbon fiber composite materials [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2018, 37(8): 6-10.
- [4] LEAL-JUNIOR A G, MARQUES C, FRIZERA A, et al. Multi-interface level in oil tanks and applications of optical fiber sensors [J]. Optical Fiber Technology, 2018, 40: 82-92.
- [5] MARINY E, CELIK A, FARALLI S, et al. Integrated dynamic wavelength division multiplexed FBG sensor interrogator on a silicon photonic chip [J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(18): 4770-4775.
- [6] 韩国庆,刘显明,雷小华,等.光纤传感技术在航空发动机温度测试中的应用 [J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(1): 145-164.
HAN G Q, LIU X M, LEI X H et al. Application of optical fiber sensing in aero-engine temperature test [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(1): 145-164.
- [7] DARWICH D, YOUSSEF A, ZARAKET H. Low-cost multiple FBG interrogation technique for static applications [J]. Optics Letters, 2020, 45 (5): 1116-1119.
- [8] 赵欣丹,张小栋,侯成刚,等.光纤光栅传感信号解调技术研究 [J]. 电子测量技术, 2017, 40(10): 1-7.
ZHAO X D, ZHANG X D, HOU CH G, et al. Research on fiber Bragg grating demodulation technology [J]. Electronic Measurement Technology, 2017, 40 (10): 1-7.
- [9] 毕继耀,张大伟,杨海马,等.线阵 CCD 光谱分辨率检测系统设计 [J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(7): 1086-1092.
BI J Y, ZHANG D W, YANG H M, et al. Design of linear CCD spectral resolution detection system [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(7): 1086-1092.
- [10] CHAO C, CHAU Y, CHIANG H P. Multiple Fano resonance modes in an ultra-compact plasmonic

- waveguide-cavity system for sensing applications [J]. Results in Physics, 2021, 27(9): 104527.
- [11] ZHANG X, NIU H, HOU C, et al. An edge-filter FBG interrogation approach based on tunable Fabry-Perot filter for strain measurement of planetary gearbox[J]. Optical Fiber Technology, 2020, 60: 102379.
- [12] SONG Y M, XIA L, WU Y. The interrogation of quasi-distributed optical FBG sensing system through adopting a wavelength-tunable fiber chaotic laser [J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(10): 2435-2442.
- [13] DLAZ C A R, LEITAO C, MARQUES C A, et al. Low-cost interrogation technique for dynamic measurements with FBG-based devices [J]. Sensors, 2017, 17(10): 2414.
- [14] LI H Q, GAO W T, LI EN B, et al. Investigation of ultrasmall $1 \times N$ AWG for SOI-based AWG demodulation integration microsystem [J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 7(6): 1-7.
- [15] MARIN Y E, NANNIPIER T, OTON C J, et al. Integrated FBG sensors interrogation using active phase demodulation on a silicon photonic platform[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 35(16): 3374-3379.
- [16] TRITA A, VOET E, VERMEIREN J, et al. Simultaneous interrogation of multiple fiber Bragg grating sensors using an arrayed waveguide grating filter fabricated in SOI platform[J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 7(6): 1-11.
- [17] TRITA A, THOURHOUT D V, VERMEIREN J. Design, integration, and testing of a compact FBG interrogator, based on an AWG spectrometer [J]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2014, 9133(7): 1187-1190.
- [18] PUSTAKHOD D, WILLIAMS K, LEIJTENS X. Dual-input scheme for high resolution integrated AWG-based fiber Bragg grating interrogator[C]. 2016 18th European Conference on Integrated Optics (ECIO 2016), Warsaw, 2016: 1-4.
- [19] LI H Q, MA X D, CUI B B, et al. Chip-scale demonstration of hybrid III-V/silicon photonic integration for an FBG interrogator [J]. Optica, 2017, 4(7): 692-700.
- [20] 李鸿强,王润洁,张美玲,等. 基于阵列波导光栅的边缘滤波温度解调系统[J]. 应用光学, 2021, 42(5): 898-905.
- LI H Q, WANG R J, ZHANG M L, et al. Edge filter temperature demodulation system based on arrayed waveguide grating [J]. Journal of Applied Optics, 2021, 42(5): 898-905.
- [21] WENG S M, YUAN P, ZHUANG W, et al. SOI-based multi-channel AWG with fiber Bragg grating sensing interrogation system[J]. Photonics, 2021, 8(6): 214.
- [22] MARRAZZO V R, FIENGA F, RICCIO M, et al. Multichannel approach for arrayed waveguide grating-based FBG interrogation systems [J]. Sensors, 2021, 21(18): 6214.
- [23] 原荣. 阵列波导光栅 (AWG) 器件及其应用[J]. 光通信技术, 2010, 34(1): 1-5.
- YUAN R. Arrayed waveguide grating component and its applications [J]. Optical Communication Technology, 2010, 34(1): 1-5.
- [24] MOON H M, KWAK S C, IM K, et al. Wavelength Interrogation system for quasi-distributed fiber Bragg grating temperature sensors based on a 50-GHz array waveguide grating [J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(7): 2598-2604.

作者简介



姬星辰, 2018 年于淮北师范大学获得学士学位, 现为北京信息科技大学硕士研究生, 主要研究方向为基于阵列波导光栅的 FBG 传感与解调技术研究。

E-mail: jxc2859227595@163.com

Ji Xingchen received her B. Sc. degree from Huabei Normal University in 2018. Now she is a M. Sc candidate in Beijing Information and Science Technology University. Her main research interests include FBG sensing and interrogation based on arrayed waveguide grating.



祝连庆 (通信作者), 1989 年于合肥工业大学获得硕士学位, 2013 年于哈尔滨工业大学获得博士学位, 现为北京信息科技大学教授, 博士生导师, 主要研究方向为生物医学检测技术与仪器、光电精密测试技术和光纤传感与激光器等。

E-mail: zhulianqing@sina.com

Zhu Lianqing (Corresponding author) received his M. Sc. degree from Hefei University of Technology in 1989, Ph. D. degree from Harbin Institute of Technology in 2013, respectively. Now he is a professor and Ph. D. supervisor in Beijing Information and Science Technology University. His main research interests include fiber sensing technology and optical measurement.