

基于波长编码和阵列波导光栅解调的光纤位置传感器

桂 聪, 宋五洲*, 湛 位, 刘浩成, 夏卫生

(华中科技大学 材料科学与工程学院, 武汉 430074)

摘要: 波长编码光纤位置传感器具有对光强变化不敏感、稳定性高等优点, 为了进一步简化结构和降低成本, 提出了一种新型波长编码光纤位置传感器。使用 10 阶二进制伪随机 m 序列作为传感器的编码基准, 以 $100\ \mu\text{m}$ 的栅距制作编码标尺并搭建传感系统, 由工作通道的输出电压解调绝对位置信息; 同时, 阵列波导光栅(AWG)作为解复用器与多个光电二极管组成多波长检测系统, 简化了传感系统并提高了响应速度。采用单向定位精度为 $6\ \mu\text{m}$ 的步进电机作为位移量标准, 验证了设计分辨率为 $100\ \mu\text{m}$ 的传感器方案可行性。

关键词: 光纤传感器; 波长编码; m 序列; 阵列波导光栅; 强度解调

中图分类号: O439; TP212.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2021)10-0040-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2021.10.009

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Optical fiber position sensor based on wavelength encoding and arrayed waveguide grating demodulation

GUI Cong, SONG Wuzhou*, ZHAN Wei, LIU Haocheng, XIA Weisheng

(School of Materials Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The wavelength-encoded optical fiber position sensor has the advantages of being insensitive to light intensity changes and high stability. In order to further simplify the structure and reduce the cost, a new type of wavelength-encoded optical fiber position sensor is proposed. Using 10-order binary pseudo-random m -sequence as the coding standard of the sensor, the coding scale is made with a grating pitch of $100\ \mu\text{m}$ and the sensing system is built, and the absolute position information is demodulated by the output voltage of the working channel. At the same time, the arrayed waveguide grating(AWG) is used as the demultiplexer and multiple photodiodes form a multi-wavelength detection system, which simplifies the sensing system and improves the response speed. Using a stepping motor with a unidirectional positioning accuracy of $6\ \mu\text{m}$ as the displacement standard, the feasibility of designing a sensor with a resolution of $100\ \mu\text{m}$ is verified.

Key words: fiber optic sensor; wavelength encoding; m -sequence; arrayed waveguide grating; intensity demodulation

0 引言

随着现代科技的发展, 在各种工业和技术应用中, 对于物体的定位要求越来越高, 各种位置传感方法也逐渐成熟。基于光纤的光学位置传感器因其抗电磁干扰能力强、可实现远程测量等优点在航空、海洋

等场景中应用越来越广泛^[1-6]。其中, 基于波长编码的光纤位置传感器因为其其对光强变化不敏感、稳定性高和可实现绝对定位等特点, 在未来具有十分广泛的应用前景。

过去常见的一种波长编码位置传感器是基于变线距衍射光栅设计的^[7-8]。编码标尺包含多种不同线密度的衍射光栅单元, 标尺不同位置的光栅线密度不同, 对应的闪耀波长也不同, 根据标尺反射回的各波长强度解调位置信息, 这对于编码标尺的制作精度要求较高, 成本也相应增加^[9-10]。基于此, 本文提出一种基于波长编码和阵列波导光栅(AWG)解调的光纤位置传感器, 结构简单、体积小且有效降低成本。

收稿日期: 2020-12-24。

基金项目: 华中科技大学人才引进基金(No.3004110112)资助。

作者简介: 桂聪(1997—), 男, 安徽黄山人, 硕士研究生, 现就读于华中科技大学材料科学与工程学院电子封装专业, 主要从事光学测量、机器视觉方面的研究, 硕士期间参与并完成了多项省部级项目。

* 通信作者: 宋五洲(1983—), 男, 博士, 教授, 研究方向为光流控与芯片实验室、纳米光学器件以及开发前沿电子封装技术等。



1 传感器结构和原理

1.1 传感器结构设计

位置传感器结构示意图如图 1 所示,本文采用了最大功率为 20 mW、波长范围为 1528~1563 nm 的 C 波段宽谱光源;使用单模光纤(芯径为 9 μm,包层直径为 125 μm)作为光信号传输载体;AWG 作为波分复用技术中的核心器件,根据不同波长的光在平板波导内相位差的不同实现多波长的复用和解复用(本文传感器采用光迅科技公司带宽为 100 GHz、40 通道的 AWG 作为解复用器件)。

光纤光源中不同波长的光经准直后入射到透射光栅,根据式(1),以不同的衍射角色散。

$$d(\sin\theta+\sin\theta_i)=k\lambda \quad (1)$$

其中,光栅常数 $d=966.2$ Lines/mm,光栅入射角 θ 等于光栅的最佳入射角($\theta=48.3^\circ$),光栅衍射级数 k 为 1, θ_i 为衍射角, λ 为入射波长。

光源通过柱面镜聚焦和反射镜改变方向,最终按

波长大小入射到 m 序列编码标尺的不同栅格。本文采用 10 次 m 序列作为编码标尺的制作基准,根据定位原理,10 个栅格确定一个绝对位置,每个栅格由于具有“1”或“0”这 2 种不同的反射率,因此各波长的光经不同栅格反射后在 AWG 的对应通道具有不同的输出光强。AWG 第 11~20 通道的透射谱如图 2(a)所示,可以看出,第 11~20 通道的透射谱分布均匀,带宽相近,各通道的入射光斑大小和初始强度也相同,因此该通道范围内的波长被定为系统的工作带宽,以实现一个栅格反射和 AWG 一个通道输出之间的对应关系。

本文仿真工作带宽内的光源并优化光路中的各参数,使得 AWG 各工作通道的波长经过光学透镜组后在编码标尺上的光斑宽度等于一个栅距。光斑经过不同栅格的反射调制,由于光路的可逆性耦合回光纤环形器,反射光经 AWG 解复用和光电二极管阵列转换后,输出 10 个工作通道的电压值。

AWG 相邻通道透射谱和系统反射谱如图 2(b)所

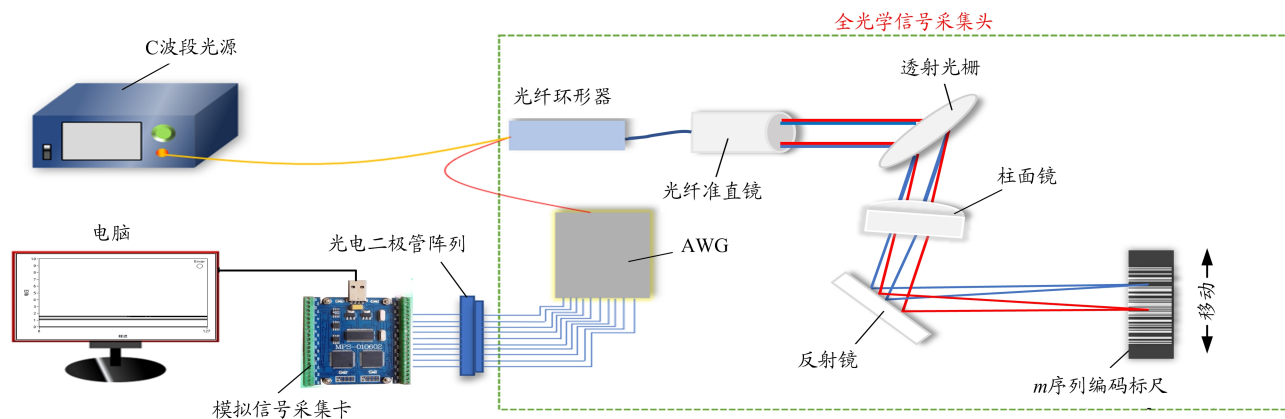


图 1 位置传感器结构示意图

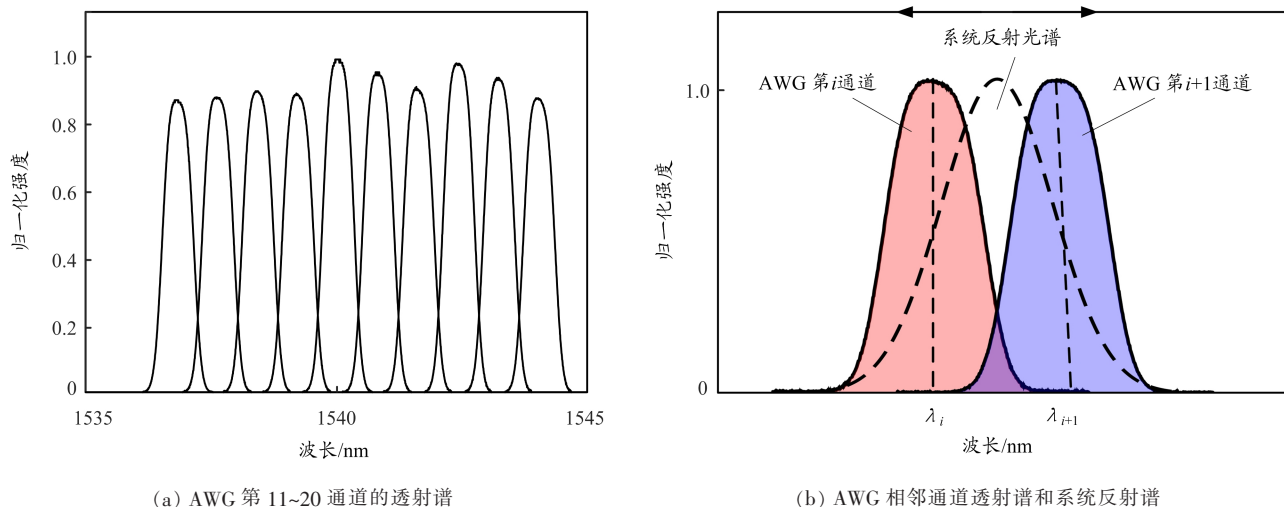


图 2 AWG 通道的透射谱和系统反射谱

示,每个通道输出光强的大小是该通道透射谱和系统反射谱在波长上的积分^[1]。测量过程中,光学读数头固定安装,各参数保持不变。编码标尺可安装在工作台上,工作台的移动导致光斑入射位置的变化,标尺不同位置的栅格由 m 序列的编码规则决定。反射光经解复用和光/电转换后,各通道的输出电压也随之改变,根据后续的解调算法得到标尺移动的绝对位置信息。

1.2 m 序列绝对定位原理

本文提出的光纤位置传感器采用伪随机 m 序列作为波长编码的基准。 m 序列是一种最长线性移位寄存器序列,对于 n 阶二进制的 m 序列,其周期 $N=2^n-1$ 。在该周期中,共有 2^n-n 个长度为 n 的二进制子序列,均唯一出现一次,且相邻子序列只有一位数字不同,这确保编码标尺在移动过程中有效带宽内的入射光斑在任意位置均有唯一的 n 位二进制编码对应,所以可以根据解调出的数字编码子序列在 m 序列中的位置确定绝对位置信息。由于相同个数子序列下 m 序列的编码长度最短,这也有效消除了编码的冗余性。

m 序列 $M=\{a_i, i=0, 1, 2, \dots\}$ 是线性齐次差分方程的解,差分方程为:

$$p_0 a_i + p_1 a_{i-1} + p_2 a_{i-2} + \dots + p_n a_{i-n} = 0 \quad (2)$$

其中, $\{p_0, p_1, p_2, \dots, p_n\}$ 是 n 次本原多项式的系数, m 序列可以根据式(3)计算得出。

$$a_i = p_1 a_{i-1} + p_2 a_{i-2} + p_3 a_{i-3} + \dots + p_n a_{i-n} \quad (3)$$

本文设计采用 2 进制 10 阶的 m 序列。10 阶 m 序列的常用本原多项式为 $x^{10}+x^3+1$, 给出初始序列 $\{a_1, a_2, a_3, \dots, a_n\}$ 为 1000000001。图 3 是给定初始序列和本原多项式后的 m 序列仿真结果。



图 3 10 阶 m 序列仿真图

2 实验与结果分析

2.1 编码光栅尺的制作

铝合金片表面的黑色涂层会吸收大部分的入射光,而使用激光打标机在其上划线后会裸露出金属原本的颜色,反射率较高。处理前后可分别对应二进制 m 序列中的“0”和“1”,由于反射率差异较大且成本低廉,所以被选做编码标尺的材料。

本文根据 m 序列的仿真结果,绘图并使用激光打标机制作编码标尺,考虑激光直写的理论最小线宽,

为了保证标尺加工精度,按照栅格宽度为 $100 \mu\text{m}$ 设计编码标尺和传感器光路。由 m 序列绝对定位原理可知,栅距为 d 、阶数为 n 的 m 序列最大可生成长度为 $(2^n-1) \times d$ 的编码标尺,标尺的长度与 m 序列的阶数和栅距有关,同时栅距也决定了传感器的分辨率。本文的传感器选用初始序列为 1000000001 的 10 阶 m 序列,设计分辨率等于 AWG 第 11~20 各通道的入射光斑大小 $100 \mu\text{m}$,最大测量距离为 10 cm 左右。

2.2 实验结果与分析

本文搭建的位置测量平台实物图如图 4 所示,选用单向定位精度为 $6 \mu\text{m}$ 以内的日本骏河精机的步进电机(型号:PG615-L05AG)作为位移量基准。实验过程中,电机带动编码标尺移动。由于光学读数头的位置固定,随着编码标尺的移动,光斑入射在标尺上的位置发生变化。分别使用横河光谱分析仪(型号:AQ6370B)和本文的多波长检测系统检测光纤环形器的输出信号。

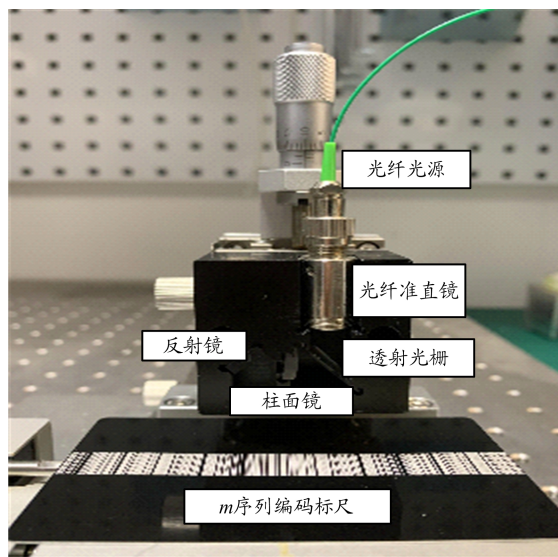
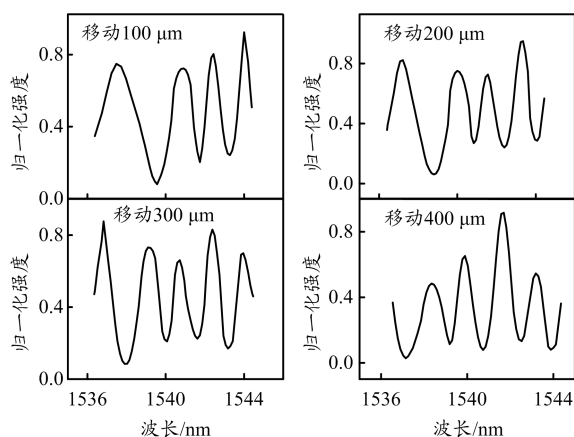


图 4 光纤位置传感器实物图

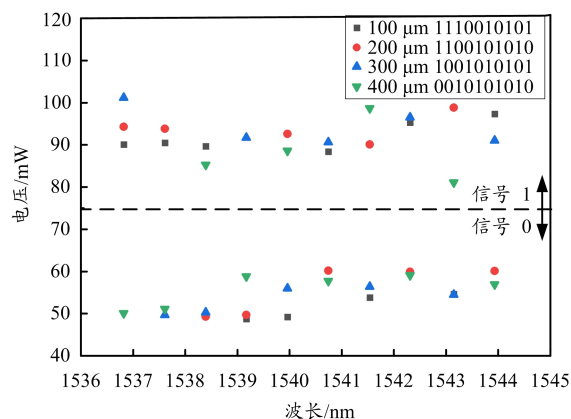
为了直观地分析该传感器的输出信号,本文使用光谱仪测量光纤环形器返回的光谱曲线。控制电机移动 $100 \mu\text{m}$ 、 $200 \mu\text{m}$ 、 $300 \mu\text{m}$ 和 $400 \mu\text{m}$ 时,系统有效带宽内的反射光谱信息如图 5(a)所示。光谱中的波峰则表明该通道波长入射到“1”栅格,波谷则对应“0”栅格。

光谱仪的体积较大、成本较高以及信号响应速度慢,不利于该传感器的小型化设计和系统的封装。所以,本文传感器中使用 AWG 和多个光电二极管组成多波长检测系统,并由模拟信号采集卡(MPS-010602)采集各通道的输出电压。不同位置下 AWG 各通道的

输出电压及解调的二进制编码子序列如图 5(b)所示,“1”、“0”栅格反射率的不同导致各通道输出电压具有明显的差异,选择二者输出电压的中值 75 mV 作为临界值,完成各通道电信号向数字编码子序列的转换。每移动一个栅距的距离,输出的子序列就会发生一次变化,根据子序列在 m 序列中的位置即可解调出传感器的绝对位置信息。该信号处理模块结构简单,编码信号只与各通道电压的相对大小有关,对强度不敏感,因此可以抵消各通道间的串扰和系统的固有误差,具有较好的测量稳定性。



(a) 系统反射光谱



(b) 多波长检测系统的输出电压及解调的二进制编码子序列

图 5 不同位移量下的系统输出信号

3 结束语

本文提出了一种基于 AWG 解调的波长编码光纤位置传感器,详细描述了传感器的定位原理,采用最长线性移位寄存器序列 m 序列作为编码规则实现绝对定位。该传感器的设计分辨率为编码标尺一个栅格的间距,这一指标会随着栅格精度的提高而得以提

升,结合对光路的优化,分辨率可提高至微米级。本文使用激光打标机制作编码标尺有效降低了成本,受到加工精度的限制,按照 100 μm 的栅距设计光路并搭建了完整的传感系统。采用 AWG 和多个光电二极管组成的多波长检测系统替代光谱仪对光信号进行解析,提高了响应速度,减小了系统体积,多组实验测试不同位移量下系统的输出信号,实验结果与理论值吻合,验证了分辨率为 100 μm 的传感器可行性。后续的研究将采用 AWG 芯片替代本文中的读数头光路进一步简化系统结构,并将红外宽谱 LED 作为光源以进一步节约成本。本文提出的光纤位置传感器在工程应用中具有巨大的潜力,并为稳定性好、抗电磁干扰和可远程测量的位置传感器研究提供了新思路。

参考文献:

- [1] YANG Y, TIAN D Z, CHEN K, et al. A fiber-optic displacement sensor using the spectral demodulation method [J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(17): 3666–3671.
- [2] JOHNSTON J S, BEALES M S, WELLS K. Light-in light-out fiber optic digital position encoder based on scales with pseudo-random codes[J]. Optical Engineering, 1992, 31(8): 1643–1646.
- [3] CHEN K, GUO M, YANG Y, et al. A fiber-optic displacement sensor based on high precision differential phase measurement [J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(18): 4046–4050.
- [4] GIRAO P M B S, POSTOLACHE O A, FARIA J A B, et al. An overview and a contribution to the optical measurement of linear displacement[J]. IEEE Sensors Journal, 2001, 1(4): 322–331.
- [5] BERKOVIC G, SHAFIR E. Optical methods for distance and displacement measurements [J]. Advances in Optics and Photonics, 2012, 4(4): 441–471.
- [6] ROSTAMI A, NOSHAD M, HEDAYATI H, et al. A novel and high-precision optical displacement sensor[J]. International Journal of Computer Science and Network Security, 2007(7): 311–316.
- [7] SPILLMAN W B, PATRIQUIN D R, CROWNE D H. Fiber optic linear displacement sensor based on a variable period diffraction grating [J]. Applied optics, 1989, 28(17): 3550–3553.
- [8] LOU J. Study on position sensor of holographic variable line-space plane gratings[J]. Acta Photonica Sinica, 2007, 36(4): 655–658.
- [9] WANG Y, CHEN H, LIU Z, et al. Optical position sensor based on a digital wavelength-encoding grating ruler[J]. Optical Engineering, 2016, 55(10): 107103–107109.
- [10] 王宇,陈火耀,刘正坤,等.用于光学位移传感器的新型数字编码光栅尺的制作(英文)[J].光子学报,2015,44(4):172–176.
- [11] 黄景堂,黄旭光,赵华伟.阵列波导光栅解调的准分布式光纤光栅传感器[J].光学学报,2008(11):2067–2071.