

基于扫频光谱测量技术的快速高精度折射率传感系统

刘茂环^{1,2}, 樊昕昱^{2*}, 王彬², 徐炳鑫², 何祖源^{1,2}

(1. 长飞光纤光缆股份有限公司 光纤光缆制备技术国家重点实验室, 武汉 430074;

2. 上海交通大学 区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室, 上海 200240)

摘要: 为达到医学、化学等不同领域对高精度折射率测量的较高要求, 基于高精度扫频光谱测量技术, 结合倾斜光纤光栅进行折射率测量, 提出实现高精度折射率变化传感系统。对倾斜光纤光栅截止模进行了细微差别折射率下的光谱测量, 测得折射率响应灵敏度为 28.3 nm/RIU; 对系统在固定折射率下对测量截止模光峰中心波长的精度进行标定, 算出系统的测量精度为 1.15×10^{-6} RIU, 在静态测量情况下测量精度可以达到 6.5×10^{-7} RIU。

关键词: 光谱测量; 折射率传感; 光纤光栅; 高精度

中图分类号: TN818 文献标志码: A 文章编号: 1002-5561(2020)08-0010-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.08.003

开放科学(资源服务)标识码(OSID)



Fast and high precision refractive index sensing system based on sweep spectrum measurement technology

LIU Maohuan^{1,2}, FAN Xinyu^{2*}, WANG Bin², XU Bingxin², HE Zuyuan^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Optical Fibre and Cable Manufacture Technology,

Yangtze Optical Fibre and Cable Joint Stock Limited Company, Wuhan 430074, China;

2. State Key Laboratory of Advanced Optical Communication Systems and Networks, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: To meet the high demand for high precision refractive index measurement in different fields such as medicine and chemistry, based on high precision sweep spectrum measurement technology, combined with tilt fiber grating for refractive index measurement, a high precision refractive index change sensor system is proposed. The spectral measurement of the cut-off mode of tilted fiber grating is carried out under the condition of slightly different refractive index, and the sensitivity of the cut-off mode to the external refractive index response is 28.3 nm/RIU. The accuracy of measuring the peak center wavelength of a cut-off mode at a fixed refractive index is calibrated. The measurement accuracy of refractive index change of 1.15×10^{-6} RIU is obtained, and the measurement accuracy of 6.5×10^{-7} RIU can be further achieved in the case of static measurement.

Key words: spectral measurement; refractive index sensing; fiber grating; high precision

0 引言

折射率是各类材料非常重要的一项物理性质, 通过测量折射率可以分析气体或者液体中各种成分含

量。目前, 折射率测量在化学工艺、环境监控、食品生产和生物医学等各方面都有十分广泛的应用^[1-2]。近年来, 由于在生物医学与大气成分测量等领域对折射率测量精度有着非常高的要求, 高精度折射率测量越来越受到科研人员的密切关注。

基于光纤的折射率传感器件种类非常多, 如长周期光纤布喇格光栅^[3]、倾斜光纤光栅^[4-5]、马赫-曾德尔干涉仪^[6]、微环谐振腔^[7]与光子晶体光纤^[8-9]等。其中, 倾斜光纤光栅因其工艺简单、成本低和测量范围广等特点受到较多关注。倾斜光纤光栅具有进行高精度测量的潜力, 在折射率传感领域发挥着极其重要的作用。

在以往对倾斜光纤光栅的研究中, 大部分工作都

收稿日期: 2019-12-28。

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0405500)资助; 国家自然科学基金(61775132、61735015、61620106015)资助; 长飞光纤光缆股份有限公司开放课题(SKLD1805)资助。

作者简介: 刘茂环(1996—), 男, 硕士生, 现就读于上海交通大学电子信息与电气工程学院电子工程系, 专业为电子与通信工程, 主要从事光纤折射率传感、高精度相位谱测量技术、高精度光谱测量技术与光栅解调等方面的相关工作。

* 通信作者: 樊昕昱(E-mail: fan.xinyu@sjtu.edu.cn)。



集中在如何测量大范围折射率变化^[10-12], 而本文将研究如何测量高精度折射率变化。

1 倾斜光纤光栅基本原理

倾斜光纤光栅属于短周期光纤光栅的一种, 与传统布喇格光栅不同之处在于倾斜光纤光栅栅区与光纤轴向成一定角度, 导致其前向传输光有一部分会被反射并耦合至包层, 形成后向传输的包层模。

倾斜光纤光栅的包层模分为低阶包层模与高阶包层模。低阶包层模光场能量主要分布在纤芯与包层的界面, 所以对外界折射率不敏感^[4]。本文主要关注的是高阶包层模。在外界折射率大于某一高阶包层模的有效折射率时, 该高阶包层模的能量会耦合到外界介质中, 形成泄露模, 导致强度大幅衰减; 当外界折射率小于该高阶包层模的有效折射率时, 高阶包层模的能量保持在光纤包层内, 这种传输模式称为传导模; 而在 2 种模式的中间状态, 即外界折射率等于该高阶包层模的有效折射率时, 此传输模式则被称为截止模。

截止模能够对外界微小的折射率变化产生响应, 体现在中心波长的红移与强度的衰减上。截止模的中心波长随外界折射率 n_s 变化的方程可表示为:

$$\Delta\lambda_{\text{clad},i} = \frac{\Lambda}{\cos\theta} \times \frac{\partial(n_{\text{core,eff}} + n_{\text{clad,eff},i})}{\partial n_s} + \frac{n_{\text{core,eff}} + n_{\text{clad,eff},i}}{\cos\theta} \times \frac{\partial\Lambda}{\partial n_s} \Delta n_s \quad (1)$$

其中, $n_{\text{core,eff}}$ 为纤芯模的有效折射率, $n_{\text{clad,eff},i}$ 为第 i 阶包层模的有效折射率, Λ 为光栅周期, θ 为光栅平面相对光纤横截面的倾斜角。

由于在通信用的标准单模光纤中, 纤芯有效折射率与其中的光栅周期并不会受到外界折射率影响而改变, 因此可以将这 2 项因素的影响去掉, 从而将式(1)简化为:

$$\Delta\lambda_{\text{clad},i} = \frac{\Lambda}{\cos\theta} \times \frac{\partial n_{\text{clad,eff},i}}{\partial n_s} \times \Delta n_s \quad (2)$$

由式(2)可知, 通过监测截止模波长漂移即可实现对外界折射率变化的传感。其中, 系数 $\frac{\partial n_{\text{clad,eff},i}}{\partial n_s}$ 在折射率变化较小的情况下可认为是常数^[13], 即波长漂移与外界折射率的改变成线性关系^[14]。本文在此基础上通过改进实验系统实现更高精度的测量。

2 高精度扫频光谱技术

目前, 常用于进行高精度光谱测量的系统大部分是基于锁模激光器或者光梳作为频率标尺, 并使用双

光梳光谱仪^[15-16]、傅里叶变换光谱仪^[17]等方式进行解调。使用光梳可以实现比较大范围的光谱测量, 但其缺点也很明显: 难以实现高分辨率的光谱测量。即使使用伪随机二进制序列调制信号等方法来减小电光调制型光梳的间隔, 这些方法也均非常复杂。本文研究发现, 只需对传统扫频测量光谱技术进行简单改进, 即采用高阶边带调制和注入锁定技术, 测量精度便得以大幅提升。

扫频光源的扫频线性度是影响光谱测量精度的一项重要指标, 使用内调制方法的扫频线性度很差, 将会直接降低光谱测量精度; 使用外调制的扫频线性度则远好于内调制的扫频线性度。外调制的缺点是测量范围受限于射频信号的扫频范围, 通常只能达到数吉比特赫兹(GHz), 因此本文提出使用高阶边带调制技术来扩大扫频范围。但高阶外调制有一个不可忽略的问题, 即高阶边带扫频范围将会重合。在高阶边带扫频范围大于扫频初始频率时, 会产生不同边带扫频范围的重叠, 无法准确滤波, 从而导致光谱解调无法实现。

在实验系统中, 本文提出使用注入锁定技术来实现对某一阶边带的注入锁定放大, 并同时有效抑制其余边带, 相当于同时起到滤波器与放大器的作用。本文使用不含隔离器的分布式反馈激光器(DFB)作为从激光器, 实现对某一阶边带的注入锁定。由于注入锁定有波长(光频率)范围限制, 所以需要 DFB 进行电流同步控制, 使其与扫频光源同时进行光频率的改变, 从而实现动态的注入锁定, 扩大线性扫频范围。

实验装置如图 1 所示, 射频信号为线性扫频信号, 扫频范围为 2.7 GHz, 在通过功率放大器后作为光调制器的调制信号。光源为窄线宽稳频激光器, 光源发出的光信号经过马赫-曾德尔调制器调制后产生高阶扫频边带, 并且通过使用不含隔离器的 DFB 作为从激光器, 在 DFB 电流调制模块的帮助下, 实现对第 11

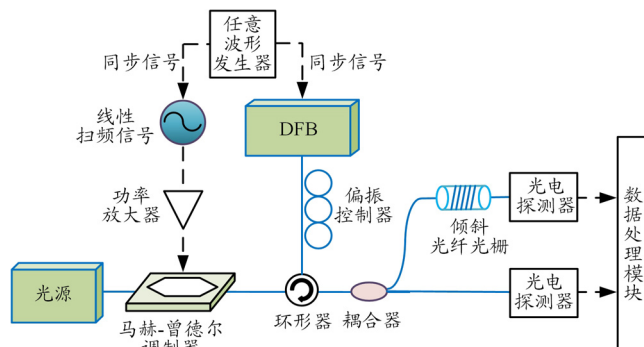


图 1 快速高精度折射率传感系统实验框图

阶边带的动态注入锁定。实验中射频信号与 DFB 电流控制模块实现完全同步。线性扫频信号形成后, 经过耦合器分为探测路和参考路, 分别被光电探测器接收后通过数据采集卡实现信号采集与处理。参考路信号在数据处理过程中进一步消除扫频的非线性误差。

在实验中, 使用非平衡干涉仪测量扫频光源的非线性误差。将扫频光源通过非平衡干涉仪后得到拍频信号, 接着对该信号进行希尔伯特变换运算并除以原信号后再进行反

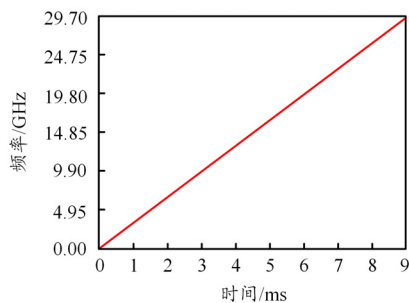


图2 扫频过程中扫频光源的频率随时间的变化情况

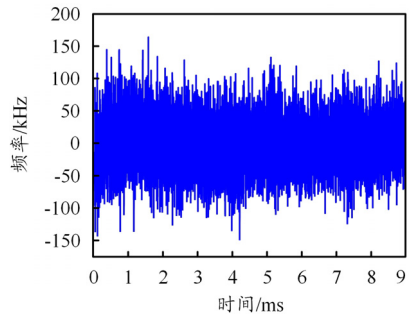


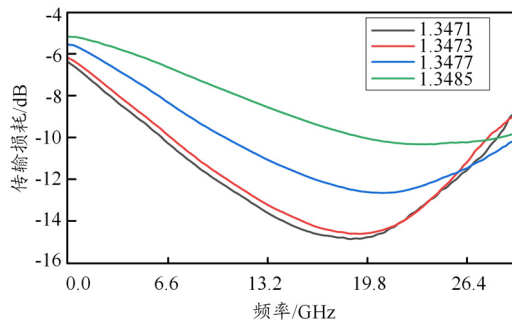
图3 扫频光源的非线性误差曲线

3 实验结果与分析

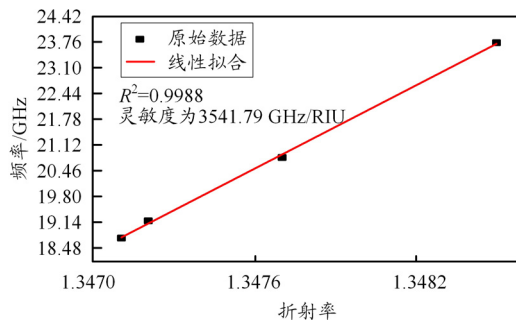
实验的测量主要目的是观察截止模的中心波长变化, 从而测得截止模中心波长对折射率变化的响应。实验中使用了4份不同浓度的蔗糖溶液来对截止模的中心波长进行测量。这4份溶液的折射率首先使用阿贝折射仪进行了标定, 分别为: 1.3471、1.3473、1.3477 和 1.3485。通过测量倾斜光纤光栅截止模附近的传输模式, 这4份不同浓度溶液的光谱测量结果如图4(a)所示。可以看出, 倾斜光纤光栅的截止模对外界微小的折射率变化反应非常灵敏。从图4(b)的拟合结果可看出, 在该折射率附近, 此截止模对外界折射率变化响应的灵敏度为 3541.79 GHz/RIU, 换算成波长变化来衡量, 则灵敏度约为 28.3 nm/RIU。

得到灵敏度后, 本文对系统测量误差进行了分析。在测量时使倾斜光纤光栅暴露在空气中, 并对温

度进行一定控制, 使其外界折射率稳定。每次测量都取透射光谱最低点光频率作为一次测量结果, 能够得到在外界折射率稳定情况下截止模透射光谱最低点光频率随时间变化的曲线如图5所示, 该曲线反映了整个系统的测量误差。本文将该曲线数据集的标准差

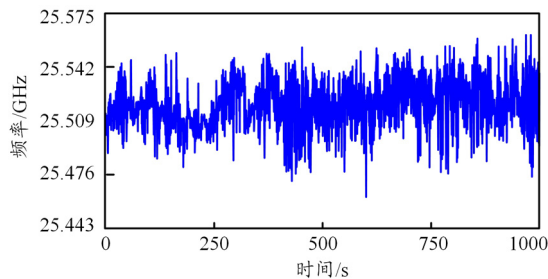


(a) 不同外界折射率时的倾斜光纤光栅截止模附近光谱

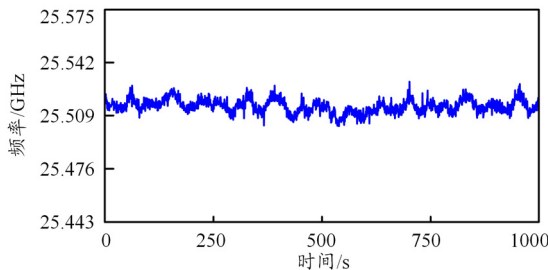


(b) 对光谱最低点的光频率进行线性拟合的结果

图4 折射率变化测量结果



(a) 最低点光谱光频率进行直接提取



(b) 对光谱最低点区域进行拟合补偿后的最低点光频率

图5 系统测量误差结果

作为系统未经优化时的测量误差,同时也作为系统的测量精度。该光频率随时间的变化情况如图 5 (a)所示,通过计算该组数据的标准差,可以得到非线性误差约为 14.8 MHz。

如果实验中的扫频光源不能实现理想中的线性扫频,将会导致较大的测量误差,特别是由于在截止模底部曲线较平缓的区域确定最低点比较困难。另一方面,参考路也无法完全消除由调制响应带来的光功率波动。基于以上考虑,本文在实验中使用曲线拟合数据处理算法对系统误差进行补偿。通过对每次测量得到的截止模光谱进行拟合后,将拟合曲线的最低点光谱频率作为单次测量的光频率,消除一部分由系统带来的误差。使用拟合算法进行补偿后,系统测量误差如图 5(b)所示,通过计算该组数据的标准差,非线性误差提升到约 4.1 MHz。在得到系统测量误差与折射率灵敏度后,可以算出整个系统可以测量的折射率精度为 1.15×10^{-6} RIU。

针对折射率变化较慢的静态测量,实验中可以使用滑动平均来提高系统测量精度,即将某一测量点以及其后多个点进行平均,将平均值作为该点的测量结果,这样做会降低系统的单次测量速度,但能相应提升测量精度。对系统测量精度进行平均的结果如图 6 所示,平均点数增加后测量精度得到提升(经计算,平均点数为 5 点平均时的系统精度为 3.5 MHz,平均点数为 100 点平均时的系统精度为 2.3 MHz)。在滑动平均点数超过 100 之后,平均点数的增加对系统精度进一步提升作用较小。实验中将平均点数 100 点时得到的系统精度作为静态测量时的系统精度,可以算出此时系统折射率测量精度为 6.5×10^{-6} RIU。

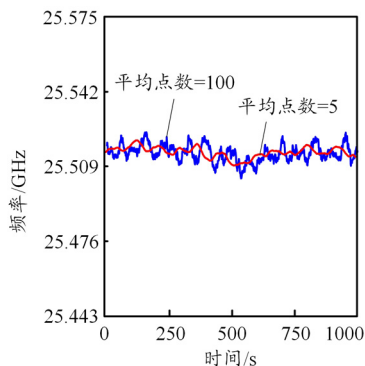


图 6 对系统测量精度进行平均的结果

4 结束语

本文采用高精度光谱测量技术与倾斜光纤光栅传感器相结合,获得 6.5×10^{-7} RIU 折射率变化的测量精度。该系统在实现较高精度折射率变化测量的同时测量速度较快,单次测量时间仅为 10 ms,在生物医学传感、大气监测等领域的实际测量中具有重要的应用潜力。

参考文献:

- [1] 何炜欣,谭春华,黄旭光. 光纤折射率传感用于壳聚糖脱乙酰度测定[J]. 高等学校化学学报, 2013, 34(2): 474-478.
- [2] GUO T, LIU F, LIANG X, et al. Highly sensitive detection of urinary protein variations using tilted fiber grating sensors with plasmonic nanocoatings[J]. Biosensors and Bioelectronics, 2016, 78: 221-228.
- [3] REGO G. A review of refractometric sensors based on long period fibre gratings[J]. The Scientific World Journal, 2013(12): 913418-1-913418-14.
- [4] 郭团,刘甫,邵理阳. 倾斜光纤光栅传感器[J]. 应用科学学报, 2018(1): 75-103.
- [5] ALBERT J, SHAO L Y, CAUCHETEUR C. Tilted fiber Bragg grating sensors[J]. Laser & Photonics Reviews, 2013, 7(1): 83-108.
- [6] YU H, XIONG L, CHEN Z, et al. Ultracompact and high sensitive refractive index sensor based on Mach-Zehnder interferometer[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2014, 56: 50-53.
- [7] SUMETSKY M, WINDELER R S, DULASHKO Y, et al. Optical liquid ring resonator sensor[J]. Optics Express, 2007, 15(22): 14376-14381.
- [8] WU D K C, LEE K J, PUREUR V, et al. Performance of refractive index sensors based on directional couplers in photonic crystal fibers [J]. Journal of lightwave technology, 2013, 31(22): 3500-3510.
- [9] GANDHI M S A, BABU P R, SENTHILNATHAN K, et al. High sensitivity photonic crystal fiber-based refractive index microbiosensor[J]. Optical Fiber Technology, 2018, 46: 88-94.
- [10] GUO T, LIU F, LIU Y, et al. In-situ detection of density alteration in non-physiological cells with polarimetric tilted fiber grating sensors [J]. Biosensors and Bioelectronics, 2014, 55: 452-458.
- [11] CAUCHETEUR C, SHEVCHENKO Y, SHAO L Y, et al. High resolution interrogation of tilted fiber grating SPR sensors from polarization properties measurement[J]. Optics express, 2011, 19(2): 1656-1664.
- [12] CHEN X, XU J, ZHANG X, et al. Wide range refractive index measurement using a multi-angle tilted fiber Bragg grating [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2017, 29(9): 719-722.
- [13] LIU F, GUO T, LIU J G, et al. High-sensitive and temperature-self-calibrated tilted fiber grating biological sensing probe[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(21): 2611-2615.
- [14] JIANG B, ZHOU K, WANG C, et al. Temperature-calibrated high-precision refractometer using a tilted fiber Bragg grating [J]. Optics express, 2017, 25(21): 25910-25918.
- [15] WANG S, FAN X, LIU Q, et al. Hybrid dual-comb interferometer using electro-optic comb and free-running femtosecond laser[C]// Conference on Lasers and Electro-Optics 2017 (CLEO2017), May 14-19, 2017, San Jose, California, United States. Washington: Optical Society of America, 2017: STh3L. 7-1-STh3L. 7-2.
- [16] WANG S, FAN X, XU B, et al. Dense electro-optic frequency comb generated by two-stage modulation for dual-comb spectroscopy [J]. Optics letters, 2017, 42(19): 3984-3987.
- [17] MANDON J, GUELACHVILI G, PICQUE N. Fourier transform spectroscopy with a laser frequency comb[J]. Nature Photonics, 2009, 3(2): 99-102.