

基于菲涅耳反射的准分布折射率传感器研究

袁剑英 赵春柳 齐亮 余向东 王剑锋 张在宣 金尚忠

中国计量学院光学与电子科技学院, 浙江 杭州 310018

摘要 介绍了一种基于时分复用光纤传感技术的准分布折射率传感器。通过测量光纤端面的菲涅耳反射信号的强度, 实现对待测溶液折射率的分布检测。在多个测量点之间采用不同长度的延迟光纤, 利用不同传感位置处的菲涅耳反射信号回到测量端的时间差来实现距离可分辨的多点测量。实验结果表明该传感器的测量距离达 16 km, 测得折射率范围为 1.3486~1.4525, 对应的灵敏度范围为 38.785~305.430 dB/RIU (RIU 为折射率单元)。

关键词 光学设计; 折射率; 分布式传感器; 菲涅耳反射; 远距离; 复用技术

中图分类号 TP212 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.092801

Fresnel Reflection-Based Optical Fiber Sensor for Quasi-Distributed Refractive Index Measurement

Yuan Jianying Zhao Chunliu Qi Liang Yu Xiangdong Wang Jianfeng

Zhang Zaixuan Jin Shangzhong

School of Optic and Electronic Technology, China Jiliang University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China

Abstract Fresnel reflection-based optical fiber sensor for quasi-distributed refractive index (RI) detection using the optical time domain reflection technique as an interrogation method is proposed. Ambient RIs at different positions along the long fiber link can be obtained by monitoring the Fresnel reflection signals. The experimental results show that the measurement range can reach 16 km, and the refractive index sensitivity is from 38.785 dB/RIU to 305.430 dB/RIU (RIU means refractive index unit) when the RI is from 1.3486 to 1.4525.

Key words optical design; refractive index; distributed sensor; Fresnel reflection; long distance; multiplex technique

OCIS codes 280.4788; 220.4830; 220.4840; 290.1350; 120.0280

1 引言

远距离的分布式传感在一些特定的传感领域中具有十分重要的意义^[1-2], 如化工领域、核辐射区域、海洋环境监测等。折射率作为一种重要的物理参数, 可以用来表征物质的物理及化学特性^[3-4]。近几年来提出了一些基于菲涅耳反射的折射率和温度光纤传感器^[5-7]。这种传感器以其成本低、结构简单和容易实现等优点被认可^[8]。该类型的传感器是利用光纤与外界环境的交界面两侧的折射率差, 通过获得反射信号的强度变化来实现对待测溶液的折射率传感。这种利用强度变化来进行解调的机理较难实现多点复用。目前已经报道的传感器中有利用波分复用技术实现了对菲涅耳反射型传感器的多点复用。2007年, Wu等^[9]提出了一种基于菲涅耳反射的光纤传感器, 该传感器利用薄膜滤光器实现了一种基于波分复用的分布式传感。2013年, 赵春柳等^[10]改进了该方案, 利用阵列波导光栅(AWG)实现了星型拓扑结构的折射率传感器, AWG的每一个通道都可以作为一个传感头, 能够实现具有16个点的分布式传感。

收稿日期: 2014-04-10; 收到修改稿日期: 2014-04-23; 网络出版日期: 2014-07-23

基金项目: 国家自然科学基金(61108058)、国家973计划(2010CB327804)、国家863计划(2011BAF06B02)、上海市科学技术委员会资助项目(10595812300)、浙江省新苗计划(2013R409051)

作者简介: 袁剑英(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事光纤传感技术方面的研究。E-mail: yjy1208090107@gmail.com

导师简介: 赵春柳(1973—), 女, 博士, 教授, 主要从事光纤传感技术方面的研究。E-mail: zhchunliu@hotmail.com

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

本文提出一种适用于长距离的折射率传感器,旨在设计一种能够实现准分布的传感器结构,并通过实验论证该方案的可行性。

2 基本结构及原理

准分布折射率传感器的结构如图1所示。该传感系统主要包括一台型号为FTB-150的光时域反射仪(OTDR),若干个3 dB光纤耦合器,一根长距离的传输单模光纤(康宁,SMF-28)。光纤耦合器的一个尾纤端面利用光纤切割刀切平,用来作为传感头,如图1所示。实验中,OTDR内置激光器产生激光脉冲打入光纤链路,当激光脉冲到达光纤耦合器后,由于耦合器的分光作用,一部分光从光纤链路中进入传感头。当光脉冲到达光纤与待测溶液的交界面时,会产生一个反射信号,即菲涅耳反射信号。菲涅耳反射信号的强度与外界折射率有关,之后反射信号会沿着原光纤链路返回,最终由OTDR的内置测量模块获得。为了使不同的传感头在距离上可以分辨,能够在OTDR测量曲线上同时获得多个分布点的折射率信息,在光纤耦合器之间加入不同长度的延迟光纤。

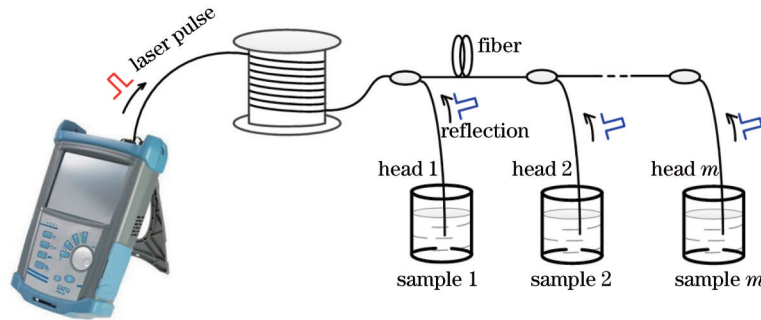


图1 折射率传感器实验装置图

Fig.1 Experimental setup of the refractive index sensor

光纤端面周围溶液的折射率发生改变时,菲涅耳反射信号的强度也会发生变化。如果不考虑光纤端面的平整度造成的影响,菲涅耳反射信号的强度可由菲涅耳反射公式获得^[10]:

$$I_r(\lambda) = I_{in}(\lambda) \left(\frac{n_{core} - n_s}{n_{core} + n_s} \right)^2, \quad (1)$$

式中 I_r 为菲涅耳反射信号的强度, I_{in} 为端面处的入射激光脉冲信号强度, n_{core} 和 n_s 分别为光纤纤芯和待测溶液的折射率。

在该结构中串联多个光纤耦合器可以获得更多的传感头数量,在OTDR测量曲线中获得反射峰的数量也越多。只需控制延迟光纤的长度不低于OTDR的最小距离分辨率,就能够一次性获得多个位置处的折射率信息。OTDR通过自身的计算机对测得的后向传输光信号进行处理,能够绘出一条光强随距离的关系曲线^[11-13]。

在远距离测量中,传输光纤中的光损耗是无法忽略的。所以,当光脉冲信号传输了不同距离后,不同传感头处的入射激光脉冲的信号强度不同。考虑到后期的信号处理,需要统一各个传感头的响应函数。因此将各个传感头在空气中的测量结果作为标准,利用在溶液中测得的结果与这个标准的相对量来构造与折射率的响应函数,可表示为

$$S = \frac{I_r(\lambda)}{I_{r,air}(\lambda)} = \left(\frac{n_{core} - n_s}{n_{core} + n_s} \frac{n_{core} + n_{air}}{n_{core} - n_{air}} \right)^2, \quad (2)$$

式中 S 为相对强度, $I_{r,air}$ 表示待测物为空气时的菲涅耳反射强度, n_{air} 为空气的折射率,通常在室温下被认为是1.0000。因为 n_{core} 和 n_{air} 为常数,所以只要测得相对量 S ,待测溶液的折射率 n_s 就能够通过(2)式计算得到。利用相对强度的方法,对于相同规格标准的光纤端面,其标定后得到的相对光强 S 只与光纤的纤芯折射率、空气折射率和待测物的折射率有关,所以在实际应用中只需对一个传感头进行标定。

3 实验结果

利用如图 1 所示结构,制作了一个具有两个传感头的折射率传感器来验证设计方案的可行性,并对其测量结果进行了详细的分析。在实验中,将不同浓度的甘油溶液作为待测溶液,其折射率与溶液浓度具有一定的线性关系。这些甘油溶液的折射率都事先用阿贝折射仪进行了标定。

测量中将切平的光纤端面完全浸入到待测溶液中,记录实验结果。每次测试后用乙醇将传感头清洗干净,等对应反射峰强度回到原来的位置后再进行下一种溶液的测量。OTDR 测量曲线如图 2 所示。图 2(a) 表示的是传感头 1 所在的溶液折射率发生改变,传感头 2 保持在空气中的情况。图 2(b) 表示的是传感头 2 所在的溶液折射率发生改变,而传感头 1 保持在空气中的情况。

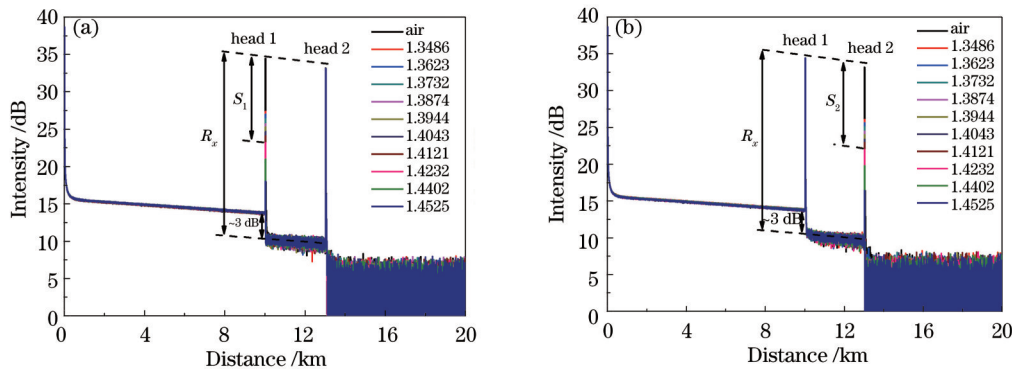


图 2 双传感头传感器的 OTDR 测量曲线。(a) 改变溶液 1 的折射率,溶液 2 保持不变;(b) 改变溶液 2 的折射率,溶液 1 保持不变
Fig.2 OTDR traces of the two-point sensor system when the refractive index of (a) solution 1 and (b) solution 2 changes

respectively

由图 2 可以看到 OTDR 曲线上有两个很明显的反射峰,分别位于 10.03 km 和 13.04 km 处。与预期情况相同,当传感头周围的溶液折射率发生改变时,反射峰的高度也发生了变化。同时,另一个反射峰的高度没有发生变化。实验中使用的是 3 dB 的 1×2 耦合器,所以在反射峰 1 的前后有大约 3 dB 的光损耗。图中标注的 R_x 表示第 x 个传感头对应反射峰的高度, S_x 表示第 x 个传感头的反射信号相对强度。

为了更好地观察反射信号的强度变化,给出了图 2 中反射峰位置处的局部放大图,如图 3 所示。图 3 中可以更明显地看到反射峰的高度随着外界折射率的变大而逐渐降低,且两个反射峰的变化趋势几乎是一致的。反射峰的宽度也可以在图 3 中观察到,大约为 20 m,说明此时 OTDR 的距离分辨率为 20 m,所以延迟光纤的长度要大于 20 m 才能够实现距离可分辨的分布式传感。

图 4 给出了相对强度 S_x 和外界折射率的关系曲线。图中看出两个传感头相对强度的变化非常接近,由此表明利用相对量的方法可以忽略距离对测量结果的影响,有效地统一了不同传感头的响应函数。利用(2)式对实验数据进行函数拟合,可以获得两个拟合公式,分别为 $y_{\text{head1}} = 10.0644 \times \log [(1.467-x)/(1.467+x)] + 6.9306$,

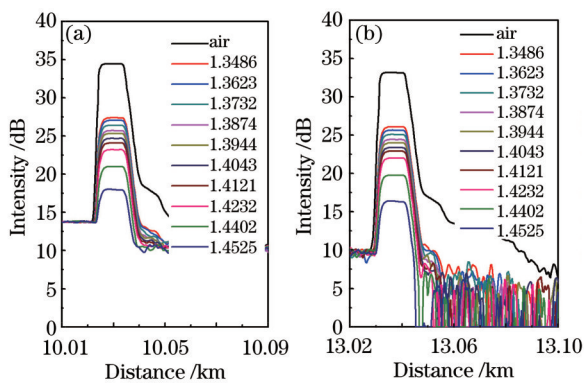


图 3 图 2 中反射峰附近的局部放大图

Fig.3 Partial enlarged views of Fig.2 near the reflection peaks

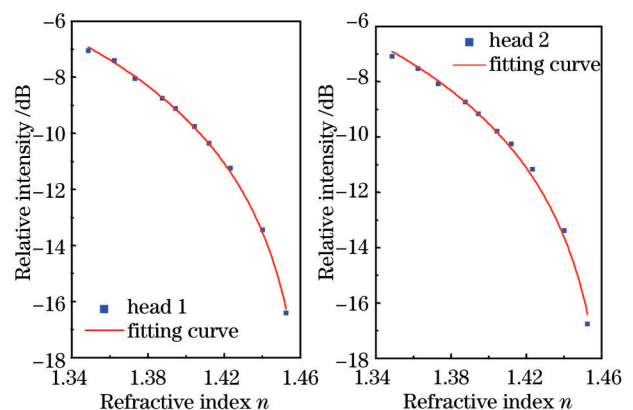


图 4 反射信号相对强度与折射率的关系曲线

Fig.4 Relationship between the relative intensity and the refractive index

$y_{\text{head2}}=10.2300 \times \log[(1.467-x)/(1.467+x)]+7.1353$, 拟合度为 0.9987 和 0.9951, 式中 y 和 x 分别为相对强度和折射率。再对拟合公式进行求导, 可以获得折射率的灵敏度范围为 38.785~305.430 dB/RIU。实验中使用的 OTDR 能够分辨 0.01 dB 的信号强度, 所以当折射率为 1.3486 时传感器的测量精度在理论上能够达到 2.58×10^{-4} 。在实际应用中, 利用光纤切割刀切割出来的光纤端面不可能保证光信号绝对垂直入射, 一般光纤切割刀的切割角度为 $0^\circ \sim 0.5^\circ$, 造成的测量误差为 $0 \sim 5.5 \times 10^{-3}$ 。为了获得更准确的测量结果需要保证切割角度尽量小, 可以通过显微镜观察后选择较平整切割面的作为传感头。

最后, 制作了一个具有 4 个传感头的折射率传感器来验证该设计方案的复用能力。在实验中, 4 个传感头同时浸入同一种折射率溶液中, 然后再改变溶液折射率并记录测量结果。实验结果如图 5 所示。

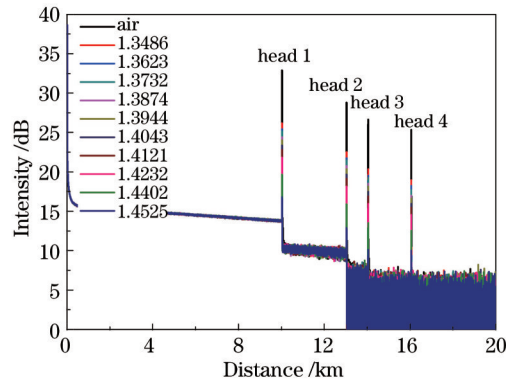


图5 具有4个传感探头的传感器的折射率测量结果

Fig.5 OTDR traces of the four-point sensor system

在图5中可以观察到, OTDR曲线上有4个明显的反射峰, 其高度都随着折射率的变大而降低, 且变化量基本是一致的。还可以看到位于远处的反射峰信号底部具有比较多的噪声, 利用相对强度的方法, 这些噪声对实验结果的影响也能够忽略。对这4个反射信号的强度变化进行函数拟合, 并将测量值代入与之对应的拟合函数, 获得了折射率测量值, 再与阿贝折射仪测得的真实值进行对比, 如表1所示。表1反映了该传感器测得的折射率能够保证小数点后3位的精度, 最大绝对误差为 6×10^{-4} 。

表1 折射率测量值与真实值的比较

Table 1 Comparison of the measured refractive indexes and the true values

True value	Measured value			
	Head 1	Head 2	Head 3	Head 4
1.3486	1.3484	1.3490	1.3489	1.3480
1.3623	1.3625	1.3628	1.3628	1.3621
1.3732	1.3729	1.3733	1.3738	1.3738
1.3874	1.3872	1.3871	1.3875	1.3880
1.3944	1.3941	1.3940	1.3939	1.3949
1.4043	1.4041	1.4038	1.4038	1.4047

对于该传感器, 其测量距离和传感头的复用能力是由传输光纤的损耗、OTDR的动态范围、空间分辨率、激光信号强度和光纤耦合器的插入损耗等决定的。在实际应用中, 需要选择分光比一致的耦合器, 以避免重复的传感头标定。假如采用小分光比的光纤耦合器, 可以使光纤链路中的光信号传输更远, 由此大大提高该传感器的复用能力^[14], 但是这样会导致传感光信号变弱, 使得测量范围变小, 精度变差。所以在实际应用中需要选择合适的分光比以达到最佳的测量效果。

4 结 论

介绍了一种基于菲涅耳反射的准分布折射率传感器。利用时分复用技术能够获得位于不同距离处的折射率信息。利用具有两个传感头的传感器对该设计方案进行了实验论证, 然后通过增加传感头数量来验证其复用能力及其测量稳定性。该传感系统具有成本低、制作简单等特点, 在一些管道监测、海洋环境监测和油井监测等领域中具有较好的应用前景。

参考文献

- 1 Michie W C, Graham N B, Santos F, *et al.*. Distributed sensor for water and pH measurement using fiber optics and swellable polymeric systems [J]. *Opt Lett*, 1995, 20(1): 103–105.
- 2 Wang Yannian, Zhao Yulong, Jiang Zhuangde, *et al.*. Study on the distributed optical fiber sensor for long-distance natural gas pipeline leakage detection [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2003, 37(9): 933–936.
王延年, 赵玉龙, 蒋庄德, 等. 油气管线泄漏监测分布式光纤传感器的研究[J]. *西安交通大学学报*, 2003, 37(9): 933–936.
- 3 Sun Hao, Hu Manli, Qiao Xueguang, *et al.*. Fiber refractive index sensor based on fiber core mismatch multimode interference [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(2): 0205001.
孙浩, 忽满利, 乔学光, 等. 基于纤芯失配多模干涉的光纤折射率传感器[J]. *中国激光*, 2012, 39(2): 0205001.
- 4 Li Yu, Li Qiang, Sun Licun, *et al.*. Measuring method for refractive index of micro-quantity liquid [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(2): 021202.
李宇, 李强, 孙丽存, 等. 测量微量液体折射率的新方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(2): 021202.
- 5 Yeh C H, Chow C W, Sung J Y, *et al.*. Measurement of organic chemical refractive indexes using an optical time-domain reflectometer [J]. *Sensors*, 2012, 12(1): 481–488.
- 6 Su H, Huang X G. Fresnel-reflection-based fiber sensor for on-line measurement of solute concentration in solutions [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2007, 126(2): 579–582.
- 7 Fujiwara E, Takeishi R T, Hase A, *et al.*. Real-time optical fibre sensor for hydro-alcoholic solutions [J]. *Measurement Science and Technology*, 2010, 21(9): 094035.
- 8 Huang X G, Wu Y T, Yang H, *et al.*. A quasi-distributed fiber-optic temperature sensor with a resolution of 0.07 °C based on Fresnel reflection [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(14): 2583–2586.
- 9 Wu Y T, Huang X G, Su H. A quasidistributed fiber optic sensor for solute concentration measurement based on Fresnel reflection [J]. *Appl Phys Lett*, 2007, 91(13): 131101.
- 10 Zhao C L, Li J, Zhang S, *et al.*. Simple Fresnel reflection-based optical fiber sensor for multipoint refractive index measurement using an AWG [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2013, 25(6): 606–608.
- 11 Liu Changhua, Xu Yajun. Distributed fiber stress sensor based on optical time-domain reflectometry [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2005, (6): 3–5.
刘长华, 徐亚军. 基于光时域反射法的分布式光纤应力传感器[J]. *仪表技术与传感器*, 2005, (6): 3–5.
- 12 Liu Jianxia. Research progress of distributed optical fiber sensing and monitoring technology based on ϕ -OTDR [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(8): 080021.
刘建霞. ϕ -OTDR 分布式光纤传感监测技术的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(8): 080021.
- 13 Lü Yuelan, Xing Yongwei. Investigation on Rayleigh scattering waveform in phase optical time domain reflectometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(8): 0819001.
吕月兰, 邢永伟. 相位光时域反射计瑞利散射波形特性研究[J]. *光学学报*, 2011, 31(8): 0819001.
- 14 Lee H H, Nam Y H, Lee D, *et al.*. Demonstration of a low-cost 1625-nm OTDR monitoring for 350-km WDM networks with semiconductor optical amplifiers [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2005, 17(4): 852–854.