

基于光放大的光纤 Fizeau 应变传感器频分复用系统^{*}

江 建[†] 饶云江 周昌学 朱 涛

(重庆大学光电工程学院 重庆 400044)

(2003 年 8 月 15 日收到 2003 年 11 月 18 日收到修改稿)

提出了一种可频分复用基于光放大的光纤 Fizeau 应变传感器的方法,从原理上解决了现有光纤 Fabry-Perot 传感器固有的两大弱点:信号弱和复用难.利用掺铒光纤的放大作用,既形成宽带光源,又放大了微弱的信号.描述了该应变传感器系统的结构、原理及实验结果.实验表明该复用传感器应变测量精度可达 $\pm 10\mu\epsilon$,可满足实际应用的要求.

关键词:光纤传感器,光纤应变传感器,掺铒光纤,复用

PACC:4281P,4281W

1. 引 言

随着现代测量技术的发展,光纤传感器越来越受到人们的重视.与传统的电类传感器相比,光纤传感器具有不受电磁干扰、适用范围广、分辨率高、易复用、体积小、重量轻等显著优点.因此,近 20 年来人们研制出了各种各样的光纤传感器^[1,2].光纤干涉传感器作为光纤传感器中极为重要和常用的一类,相对于其他光纤传感器,其主要优点在于分辨率高、动态范围大、精度高以及实现方式灵活^[3].因此近几年来是一个非常活跃的研究领域^[4].可应用于复合材料、大型建筑结构(如桥梁等)、宇航飞行器、飞机等的结构健康监测,以实现所谓的智能结构^[5].目前工程中应用较广的是光纤 Fabry-Perot (F-P) 传感器^[6,7],但 F-P 传感器有其固有的两大弱点,一是信号较弱,二是很难进行复用.

为克服光纤 F-P 传感器的固有弱点,我们提出了一种将基于光放大的光纤 Fizeau 应变传感器进行频分复用的新方法.该传感系统充分利用了掺铒光纤的增益特性,既用铒纤的放大自发辐射(ASE)形成宽带光源,又利用其来放大 Fizeau 传感器的干涉信号,由此可获得较强的信号和较高的信噪比.利用该传感系统信号强的特点,我们将多组不同腔长的 Fizeau 传感器进行频分复用,通过快速傅里叶变换

(FFT),可在变换域中将各组信号分离,并利用离散腔长变换(DGT)直接在变换域中求出各个传感器的腔长,从而求出对应的应变值,这样可实现多达 10 个以上光纤 Fizeau 传感器的频分复用.若与光开关结合起来就可用一套装置完成对一个较大型结构的健康监测,这无疑将大大降低传感器系统的成本,因此有着很高的性价比和实用价值.通过应用上述方法从原理上解决了光纤 F-P 传感器信号弱及难复用的问题.

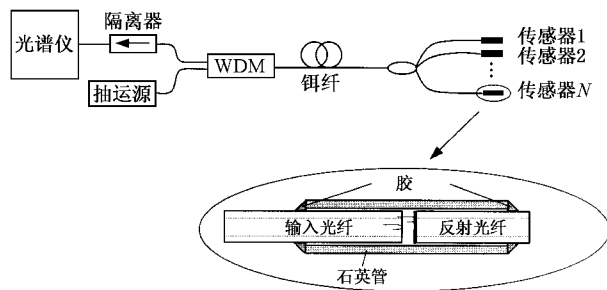


图 1 基于光放大的光纤 Fizeau 传感器复用系统

2. 传感器结构与光放大原理

基于光放大的光纤 Fizeau 应变传感系统的原理图见图 1.由于无信号光输入,掺铒光纤中铒离子的 ASE 形成了 ASE 宽带光源,ASE 光进入光纤 Fizeau 传感器后,产生多光束干涉,反射信号通过铒纤放大

^{*} 国家杰出青年基金(批准号 60025515)资助的课题.

[†] E-mail: jjiang@china.com

后被光谱仪接收. 系统中掺铒光纤对反射的干涉信号有放大作用, 因此接收端的信号较强. 系统中加入隔离器的目的是避免逆向光的干扰. 传感头由石英毛细管和光导入/反射单模光纤构成, 其中导入光纤为普通单模光纤, 反射光纤端面镀了一层金属银, 形成反射率高达 90% 的反射面, 由于该传感头两光纤端面反射率不等, 为与两端面反射率相等的普通 F-P 腔相区别, 应该将之归入为 Fizeau 腔^[8]. 石英管长为 40mm, 内外直径分别为 128/300 μm , 两光纤端面相距几百微米. 在石英管两端, 光纤和石英管用胶粘合在一起, 这样就构成了基于光放大的光纤 Fizeau 应变传感器, 其典型的干涉谱如图 2 所示.

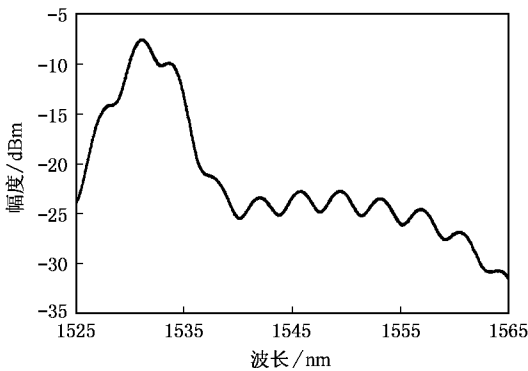


图 2 基于光放大的外腔式光纤 Fizeau 传感器的反射谱

由于所构成的 Fizeau 腔一端为未镀膜的普通光纤, 其反射率较低(约为 4%), 因此光束的干涉可以近似等效为双光束干涉, 其光谱近似为余弦分布. 又由于铒离子的 ASE 在任何方向上概率均等, 因此光谱仪接收到的是 ASE 光源与被放大的 Fizeau 干涉信号的混合光谱, 其归一化光强分布为

$$I/I_i = A(\lambda)I_i + G(\lambda)R \times [1 + V S(\lambda) \cos(2kd)], \quad (1)$$

式中 I_i 为传感头的入射光强, I 为光谱仪接收到的光强, $A(\lambda)$ 为后向传输的 ASE 光, $G(\lambda)$ 为传感器干涉信号通过掺铒光纤时产生的增益, V 为干涉条纹的对比度, $S(\lambda)$ 为 ASE 光源光谱分布. 因此在基于光放大的光纤 Fizeau 应变传感器系统中, 信号的增强由两个方面的因素引起, 其一是干涉信号在通过掺铒光纤时本身被放大, 体现在(1)式中 $G(\lambda)$ 上; 其二是后向的 ASE 光谱叠加在干涉信号之上, 将干涉信号整体增强. 对于 1545—1555nm 范围内的信号, 由于在此范围内掺铒光纤的 ASE 光谱平坦度较好(不平坦度约为 1dB), 后向的 ASE 光谱可看作直

流量量, 被铒纤放大的干涉信号叠加在“直流”信号分量之上, 这样 ASE 光谱对系统信噪比的影响很小, 可以忽略不计. 因此, 系统对信号增益要求并不高, 便可将干涉信号强度增大到光源信号强度之上.

将光纤传感器进行复用时, 如果传感器数目较多, 信号会相当微弱, 因而难以探测, 这已成为限制光纤传感器复用数目的一个重要因素. 而在我们提出的基于光放大的光纤 Fizeau 传感器频分复用系统中, 微弱的信号经过光放大后又叠加了一个“直流”的光源分量, 使得接受到的信号很强, 因此可望从根本上解决这个问题.

3. 传感器频分复用与信号处理

本文用实验证明了基于光放大的光纤 Fizeau 应变传感器具有优良的复用性能. 图 1 所示装置中, 将光导入/反射单模光纤分别置于两个相同的调节精度为 10 μm 的三维微动台上, 并将石英管固定在它们中间. 控制 Fizeau 传感器的初始腔长几百微米, 然后固定反射端的微动台以使反射光纤端面在石英管内的位置不变, 再以 500 μm 的间距向外调节光导入光纤使腔长变大, 每调节一次便采集一次数据, 一共采集了 11 组数据后发现传感器的信号仍呈现出明显的正弦周期分布, 这得益于反射光纤端面的高反射率, 使得 Fizeau 传感器在腔长超过 5mm 后仍能反射一定强度的光信号, 产生明显的干涉条纹. 将 11 组数据送入计算机进行处理, 经叠加后信号混合在一起, 去除直流分量后结果如图 3 所示, 此时完全无法分辨出该混合信号波形中含有哪些频率成分, 无法运用传统的波峰算法求出 Fizeau 传感器的腔长, 因此需要对其进行一定的处理. 将信号进行高通滤波和 FFT 后, 得出如图 4 所示波形, 由于光谱仪采样点数为 1000, 因此经 FFT 后图 4 的横坐标为采样点数. 从图 4 可以看出, 信号在变换域中完全可以被分开, 11 个尖峰分别是 11 个信号进行变换的结果. 由此实现了多达 11 组 Fizeau 传感器的频分复用.

为了提高 Fizeau 传感器的应变测量精度, 采用 Virginia 大学研究者提出的 DGT 算法^[9]来进行传感器信号的频域解调. DGT 的幅度值可以写为

$$|f(g_k)| = \sqrt{\left| \sum_{n=0}^{N-1} I(n) \cos\left(\frac{4\pi g_k}{\lambda_n}\right) \right|^2 + \left| \sum_{n=0}^{N-1} I(n) \sin\left(\frac{4\pi g_k}{\lambda_n}\right) \right|^2}, \quad (2)$$

式中 g_k 为长度量, N 为光谱仪采样点数, λ_n 为采样的波长, $I(n)$ 为光强. 当 $g_k = l$ (腔长) 时 (2) 式的幅

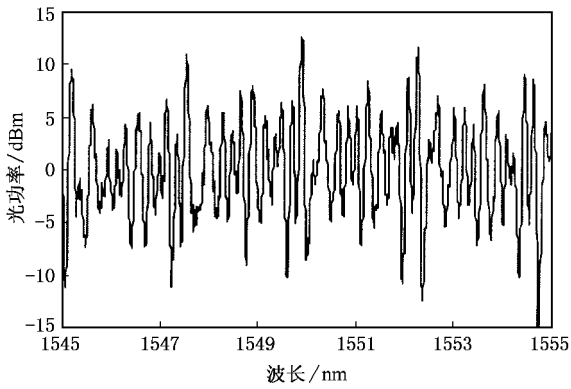


图3 11组 Fizeau 传感器的混合信号

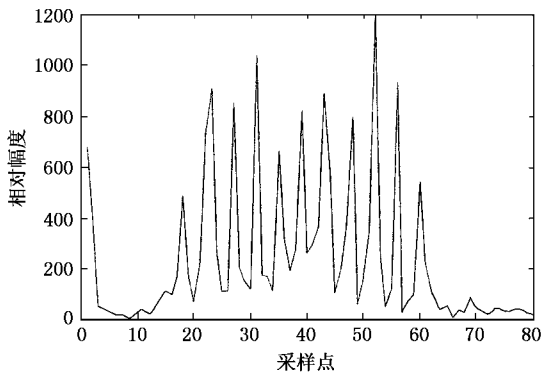


图4 11组信号的 FFT 谱

值将出现极大值.因此,只要根据 Fizeau 传感器的腔长变化范围,在此范围内搜索出(2)式的极大值,此最大值对应的 g_k 就是 Fizeau 传感器的腔长.对应于 11 组光纤 Fizeau 传感器的频分复用系统,将有 11 个极大值.

从上面的分析可以看出,DGT 变换的幅值实际上就是输出信号中对应于腔长成分 g_k 的系数.DGT 算法和 FFT 算法本质上一致,区别在于 DGT 算法将传感器输出信号分解为各种腔长干涉信号的组合,从而完成了信号从波长域到腔长域的直接变换,避免了 FFT 算法中由数字频率到腔长的转换过程.由于 DGT 算法避免了进一步数据处理过程中由于近似带来的误差,因此可以得到较高的应变测量精度.

利用 DGT 算法求出各组传感器产生应变前后的腔长之差后,将其除以传感器的敏感长度(即图 1 中石英管的长度),即得到待测的应变值.

由于在变换域中可以分辨出每个信号并求出其对应的腔长,而且利用光放大技术可以得到很强的干涉信号,因此利用该方法可以实现多达 10 个以上的基于光放大的光纤 Fizeau 应变传感器的频分复

用,从而大大降低了应变传感系统的成本.

4. 实验结果与讨论

实际制作了两个 Fizeau 传感器以验证前面所提出原理和方法的可行性.为不失一般性,应使两个传感器腔长相差尽可能小,因此控制两个石英管中光纤端面的距离,使传感头 1 的腔长与传感头 2 的腔长相差约几百微米.将两个传感器的混合信号送入计算机中进行上面所述的滤波和 FFT,再利用 DGT 算法求出其腔长,这样可以控制两个传感器的腔长相差为 $400\mu\text{m}$,其 FFT 波形如图 5 所示.这就说明了腔长相差 $400\mu\text{m}$ 时在变换域中仍可以分辨出不同传感器的信号,证明了上节所述的腔长相差为 $500\mu\text{m}$ 的 10 个以上传感器的复用方法完全可行,并有 $100\mu\text{m}$ 以上的富余度.考虑到在实际应用中,单个光纤 Fizeau 应变传感器的腔长变化一般不会超过 $100\mu\text{m}$,因此该富余度已经足够.

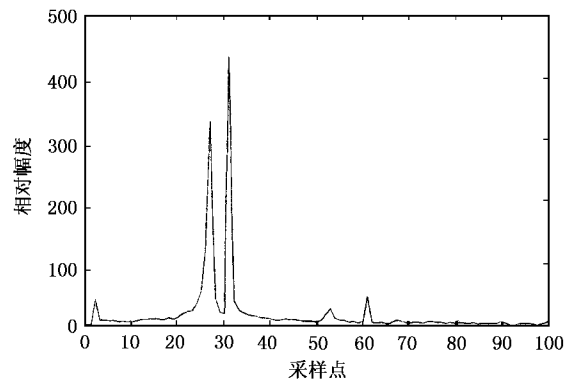


图5 两个传感器信号的 FFT 谱

将两个传感头的腔长差调节到 $500\mu\text{m}$ (可通过微调后再进行计算获得),将其封装,然后置于实验用悬臂梁上.悬臂梁上贴有电阻应变片,并接入应变计进行应变标定.当给悬臂梁加载时,悬臂梁将产生应变,分别用应变计和两个 Fizeau 传感器测出应变值,传感器 1 与应变计测得的应变值的对比结果如图 6 所示,传感器 2 与应变计测得的应变值的对比结果如图 7 所示.实验用的掺铒光纤是 Stocker Yale 公司生产的 EDF-980-T2 光纤,长度为 5m,抽运功率为 50mW.由图 6 与图 7 可见,该传感器的精度较高,实验证明其测量精度为 $\pm 10\mu\epsilon$.在工程应用中对于绝大多数大型建筑结构(如桥梁)的健康监测,该精度都已经足够.

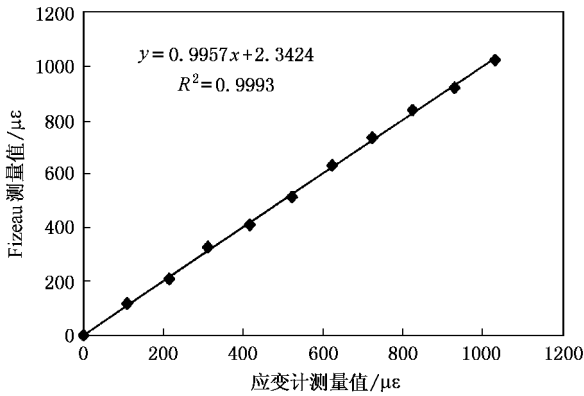


图 6 基于光放大的光纤 Fizeau 传感器 1 与应变计测出的应变对比

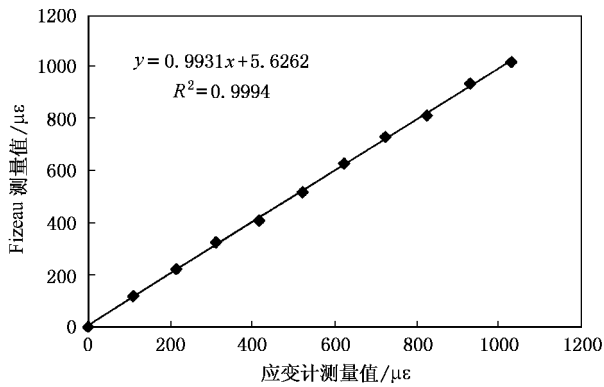


图 7 基于光放大的光纤 Fizeau 传感器 2 与应变计测出的应变对比

实际应用中可以将预先制作好的腔长间距为 $500\mu\text{m}$ 的一系列 Fizeau 传感器进行频分复用,由上面分析可知,至少可以复用 11 个 Fizeau 传感器,由于光放大的作用使得传感器信号较强,因此在复用时可保证每个传感器都能获得一定强度的信号便于探测,最后用滤波和 DGT 算法就可以实现对每个传感器的信号进行分析,因此整个传感器复用系统只需要一套装置就可以实现高精度的应变测量.

5. 结 论

本文报道了一种新型的基于光放大的光纤 Fizeau 应变传感器频分复用系统.该传感系统充分利用了掺铒光纤的放大作用,既形成宽带光源,又放大了微弱的信号,在此基础上提出了频分复用 10 个以上光纤 Fizeau 应变传感器的方法,从原理上克服了光纤 F-P 传感器固有的两个弱点,具有一定的学术意义和实用价值.综上所述,该传感系统复用能力强,信号处理方法简单,结果准确,且测量精度较高.实验表明该传感器复用系统应变测量精度可达 $\pm 10\mu\epsilon$,可满足实际应用的要求,可望在大型结构健康监测中发挥重要作用.

- [1] Udd E 2002 *Fiber Optic Sensors*(New York : Marcel Dekker) p1
- [2] Wang Y P , Rao Y J , Ran Z L and Zhu T 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 1432 [in Chinese] 王义平、饶云江、冉曾令、朱 涛 2003 物理学报 **52** 1432]
- [3] Jackson D A 1985 *J. Phys. E : Sci. Instrum.* **18** 981
- [4] Jackson D A 1998 *Optical Fiber Sensor Technology* vol 2 (London : Chapman & Hall) p167
- [5] Udd E 1995 *Fiber Optic Smart Structures*(New York : Wiley)
- [6] Taylor H F 2002 *Fiber Optic Sensors*(New York : Marcel Dekker) p41
- [7] Rao Y J , Yuan S F , Zeng X K , Lian D K , Zhu Y , Wang Y P , Huang S L , Liu T Y , Fernando G F , Zhang L and Bennion I 2002 *Opt. Lasers Eng.* **38** 557
- [8] Rao Y J , Jackson D A , Jones R and Shannon C 1994 *J. Lightwave Technol.* **12** 1685
- [9] Musa S M 1997 *PhD Thesis* Virginia Polytechnic Institute and State University

Frequency-multiplexed fiber-optic Fizeau strain sensor system based on optical amplification *

Jiang Jian Rao Yun-Jiang Zhou Chang-Xue Zhu Tao

(*Department of Optoelectronic Engineering , Chongqing University , Chongqing 400044 , China*)

(Received 15 August 2003 ; revised manuscript received 18 November 2003)

Abstract

A novel method for multiplexing fiber-optic Fizeau strain sensors based on optical amplification is proposed and demonstrated for the first time to our knowledge. This method overcomes the two intrinsic disadvantages of fiber-optic Fabry-Perot strain sensors , i. e. weak signal and difficult multiplexing. Also , the amplified spontaneous emission and optical amplification of the Erbium-doped fiber pumped by a 980nm laser diode are used simultaneously. The structure , principle and experimental results of the sensor system are described in this paper. A strain accuracy of $\sim \pm 10\mu\epsilon$ has been achieved , which can meet the practical requirement.

Keywords : optical fiber sensor , optical fiber strain sensor , erbium-doped fiber , multiplexing

PACC : 4281P , 4281W

* Project supported by the Funds for Outstanding Young Researchers from the National Natural Science Foundation of China(Grant No. 60025515).