

文章编号: 0253-2239(2007)02-0197-5

布里渊散射光纤传感器的交叉敏感问题

董玉明¹ 张旭苹^{1,2} 路元刚^{1,2} 刘跃辉¹ 王 顺^{1,2}

(¹ 南京大学光通信工程研究中心, 南京 210093)
(² 南京大学工程管理学院, 南京 210093)

摘要: 基于布里渊散射的全分布式光纤传感器的布里渊频移同时受应变和温度的影响,无法由单一的布里渊频移解析应变或温度的信息,这种交叉敏感问题制约了传感器的实用化。介绍了目前解决交叉敏感问题的主要方法及工作原理。研究了大有效面积非零色散位移光纤(LEAF)的布里渊散射谱与应变和温度的关系,实验发现布里渊谱具有三个布里渊峰,三个峰的布里渊频移与应变和温度成线性关系,第一个峰和第三个峰的布里渊峰峰值功率的差值与温度无关,但与应变成线性关系。最后基于实验结果提出了一种解决交叉敏感问题的方案,获得了大约 130 $\mu\epsilon$ 的应变测量精度和 8 $^{\circ}\text{C}$ 的温度测量精度。

关键词: 光纤传感; 交叉敏感; 全分布式; 布里渊散射; 应变; 温度

中图分类号: TN247 文献标识码: A

Cross Sensitivity of Brillouin Scattering Distributed Fiber Sensor

Dong Yuming¹ Zhang Xuping^{1,2} Lu Yuangang^{1,2} Liu Yuehui¹ Wang Shun^{1,2}

(¹ Institute of Optical Communication Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093)
(² School of Engineering and Management, Nanjing University, Nanjing 210093)

Abstract: Brillouin frequency shift in a Brillouin scattering-based fully distributed fiber sensor is the combined effects of strain and temperature. A single Brillouin frequency shift can't achieve the information of strain and temperature, respectively, and the cross sensitivity limits the practice of the sensor. The present methods and working principles for solving the cross sensitivity are introduced. The relationship between Brillouin-scattering spectrum and strain or temperature of large effective area non-zero dispersion-shifted fiber (LEAF) is investigated. It is found that there are three Brillouin scattering peaks in the spectrum, which are linear with strain and temperature. The difference of Brillouin intensity between the first peak and the third peak is independent of temperature but is linear with strain. A resolution to solve the cross-sensitivity problem based on experimental results is given, and about 130 $\mu\epsilon$ strain and 8 $^{\circ}\text{C}$ temperature measurement resolution is achieved.

Key words: optical fiber sensing; cross sensitivity; full distribution; Brillouin scattering; strain; temperature

1 引 言

利用全分布式光纤传感技术,可获取传感光纤上待测物理量随时间和空间变化的连续分布,因而可通过合理的光纤布设实现被测对象的一维、二维及三维的监测。因此,全分布式光纤传感技术具有巨大的应用前景,已成为国内外研究和应用的热点^[1~3]。

基于布里渊散射的全分布式光纤传感技术,利用布里渊频移随应变和温度成线性变化的关系,结合光时域反射技术、光时域分析技术或光频域分析技术可

实现对应变或温度的全分布式测量。由于光纤中布里渊频移同时受应变和温度的影响,仅由单一的布里渊频移无法分辨出该频移是由应变还是由温度所引起,这种交叉敏感问题制约了基于布里渊散射的全分布式光纤传感器的实用化。本文在总结目前应变和温度交叉敏感问题解决方案的基础上,实验研究了大有效面积非零色散位移光纤(LEAF)的布里渊散射谱与应变和温度的关系,提出了一种解决布里渊散射光纤传感器交叉敏感问题的新方案。

作者简介: 董玉明(1978-)男,河南信阳人,博士研究生,主要从事基于布里渊散射全分布式光纤传感技术及其在光缆监测中的应用。E-mail: solodum168@163.com

导师简介: 张旭苹(1962-)男,江苏金坛人,教授,博士生导师,主要从事光通信网络的监控与故障定位、光通信系统关键器件与组件、光纤传感技术及其应用。E-mail: xpzhang@nju.edu.cn

收稿日期: 2006-02-14; 收到修改稿日期: 2006-09-12

2 目前解决交叉敏感问题的主要方法

解决基于布里渊散射的全分布式光纤传感器交叉敏感问题的最初方案,是在测量光纤旁布置参考光纤,让参考光纤处于不受应变的松弛状态,通过测量参考光纤获得待测量场的温度信息,然后从测量光纤的测量信息中扣除温度信息以获得待测量场的应变信息,从而实现温度和应变的同时测量。这种方案由于需要同时并行布置两套光纤,在很多情况下难以实用。目前研究的方向主要是利用工作光纤自身来解决交叉敏感问题,可归纳为以下四种:1)基于布里渊散射谱的双参量矩阵法^[4,5]。其基本思想是选择布里渊频移以外的另外一个参量 X ,通过利用频移与应变和温度的线性关系以及参量 X 对温度或者应变的不敏感性,或者参量 X 与应变和温度的线性关系,实现应变和温度的同时测量。2)基于特种光纤的双频移矩阵法^[6,7],这种方法中使用的特种光纤具有多个布里渊散射峰,可利用某两个布里渊散射峰具有不同的频移-应变系数和频移-温度系数的特性,构建一个频移-应变系数和频移-温度系数的系数矩阵,从而实现应变和温度的同时测量。3)基于 Landau-Placzek 比率法^[8],其原理是利用瑞利散射光功率解调布里渊散射光功率,消除由熔接损耗、微弯等情况对布里渊散射光功率造成的影响。这种方法本质上是基于布里渊散射谱的频移和峰值功率双参量矩阵法的一种改进。4)联合其它物理效应法^[9,10],如联合拉曼散射和自发布里渊散射效应。

上述四种解决基于布里渊散射分布式传感技术的交叉敏感问题的方案中,基于普通单模光纤的布里渊散射谱的双参量矩阵法是当前用于解决交叉敏感问题的主要方案,但是由于传感光纤中引起布里渊峰值功率变化的因素很多,测量结果易受外界干扰。基于特种光纤的双频移矩阵法由于需要特种光纤作为传感器件,传感系统的费用会显著增加,而且这种方案也难以应用到已铺设的光纤中去。联合其他的物理效应法,除了需要测量布里渊散射谱,还要测量瑞利散射或拉曼散射,系统结构比较复杂,实用化困难。

3 基于大有效面积非零色散位移光纤的布里渊散射谱的交叉敏感问题的解决方案

大有效面积非零色散位移光纤(LEAF)是康宁公司开发的一种非零色散位移光纤,其大有效面积的优点使之能承受更高的光功率,能提供更大的容

量和更长的距离,是当前密集波分复用(DWDM)系统的通用光纤。本文以直径 $900\ \mu\text{m}$ 的聚氟乙烯(PVC)被覆紧套大有效面积非零色散位移光纤为研究对象,利用日本安藤公司的光纤应变分析仪(Ando8603),研究大有效面积非零色散位移光纤的布里渊散射谱与应变和温度的关系,提出了一种基于大有效面积非零色散位移光纤的布里渊散射光纤传感器解决交叉敏感问题的方案。

3.1 大有效面积非零色散位移光纤的布里渊散射谱与温度的关系

图1为不同温度时所测得的大有效面积非零色散位移光纤的布里渊散射谱,可以清楚地看到大有效面积非零色散位移光纤有三个布里渊散射峰。这是因为大有效面积非零色散位移光纤的纤芯折射率分布是由一个三角芯和附加的折射率增高环所构成^[11],如图2所示,这种折射率的分布可被分为四个区域,从内到外依次为I、II、III、IV,内部的三个区域所产生的三个声波模式决定了其布里渊散射谱有三个布里渊散射峰,各峰的具体位置由光纤的折射率分布和几何结构等因素决定。

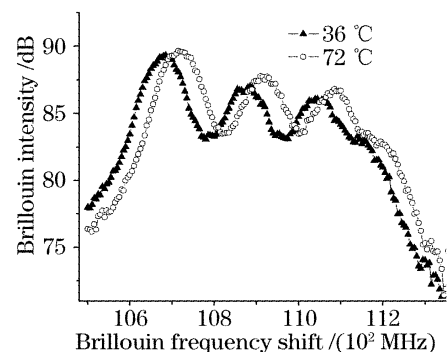


图1 在 $36\ ^\circ\text{C}$ 和 $72\ ^\circ\text{C}$ 时,大有效面积非零色散位移光纤的布里渊散射谱

Fig. 1 Brillouin scattering spectra of large effective area non-zero dispersion-shifted fiber at $36\ ^\circ\text{C}$ and $72\ ^\circ\text{C}$

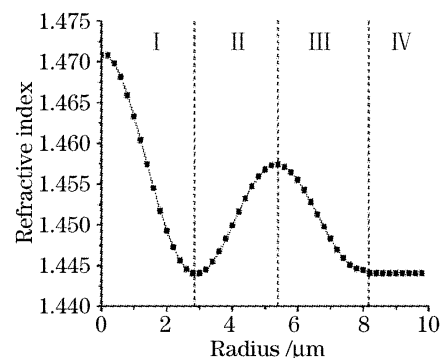


图2 大有效面积非零色散位移光纤的折射率分布图
Fig. 2 Diagram of refractive index on large effective area non-zero dispersion-shifted fiber

由图 1 也可以观察到三个峰的布里渊频移和峰值功率都随温度的增加而增加。在 30 °C 到 90 °C 的温度范围内,每隔 3 °C 进行一次布里渊散射谱的测量,实验结果表明峰 1 与峰 3 的峰值功率差值基本与温度无关,峰 1 与峰 3 的功率差值与温度的关系如表 1 所示。图 3 给出了三个峰的布里渊频移与温度的关系,其线性拟合结果如表 2 所示,RMS 为均方根。

表 1 峰 1 与峰 3 的功率差值与温度的关系

Table 1 Relationship between the difference of Brillouin scattering intensity of peak 1 and 3 and temperature

Temperature / °C	Difference of Brillouin scattering intensity of peak 1 and 3 /dB
33	2.967
36	3.115
39	3.097
...	...
84	3.124
87	2.908
90	2.914
Mean	3.007
E_{RMS}	0.076

表 2 布里渊频移与温度关系的拟合结果

Table 2 Fitting results of relationship between Brillouin frequency shift and temperature

Peak number	Frequency shift-temperature		Correlation coefficient
	coefficient / (MHz/°C)	E_{RMS} /MHz	
1	1.01 ± 0.015	1.309	0.997
2	1.05 ± 0.013	1.104	0.999
3	0.98 ± 0.011	1.07	0.996

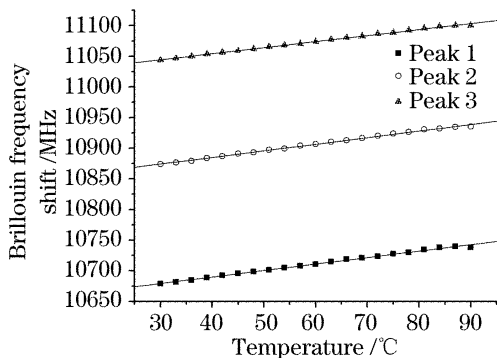


图 3 峰 1、峰 2 和峰 3 的布里渊频移与温度的关系

Fig. 3 Brillouin frequency shift of peak1, 2 and 3 versus temperature

3.2 大有效面积非零色散位移光纤的布里渊散射谱与应变的关系

在 24 °C 的室温中,大有效面积非零色散位移光纤受拉应力分别为 2 N、3 N 和 4 N 时的布里渊散

射谱如图 4 所示,可以清楚地看到三个峰的布里渊频移都随拉应力的增大而增大,但是各峰的功率随拉应力的变化情况有显著不同。峰 1 的布里渊峰值功率随拉应力的增大而增大,峰 2 的布里渊峰值功率随拉应力的增加几乎不变,峰 3 的布里渊峰值功率随拉应力的增大反而减少。

在 2 N 到 5 N 的拉应力范围内,每隔 0.5 N 进行一次布里渊散射谱的测量,实验结果表明峰 1 与峰 3 的布里渊峰值功率差值基本上随拉应力线性增加,如图 5 所示,其线性拟合结果如表 3 所示。图 6 给出了三个峰的布里渊频移与拉应力的关系,其线性拟合结果如表 4 所示。

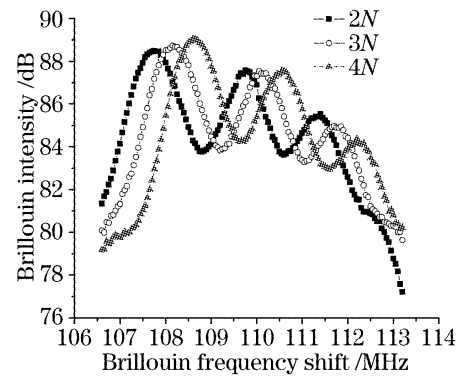


图 4 不同拉应力下大有效面积非零色散位移光纤的布里渊散射谱

Fig. 4 Brillouin scattering spectra of LEAF under different stress

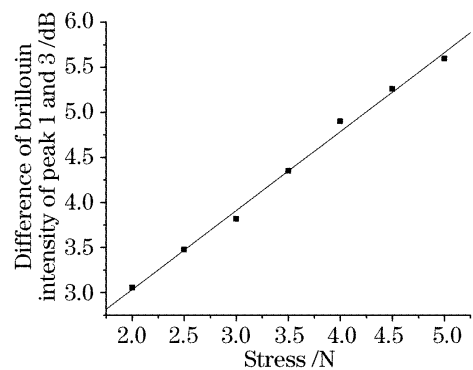


图 5 峰 1 与峰 3 的功率差值与拉应力的关系

Fig. 5 Difference of Brillouin scattering intensity of peak 1 and 3 versus stress

表 3 峰 1 与峰 3 的功率差值与拉应力关系的拟合结果

Table 3 Fitting results of the relationship between the difference of Brillouin scattering intensity of peak 1 and 3 and stress

Parameter	Difference of brillouin intensity of peak 1 and 3-strain		Correlation coefficient
	E_{RMS} /dB	coefficient / (dB/N)	
Value	0.074	0.876 ± 0.028	0.997

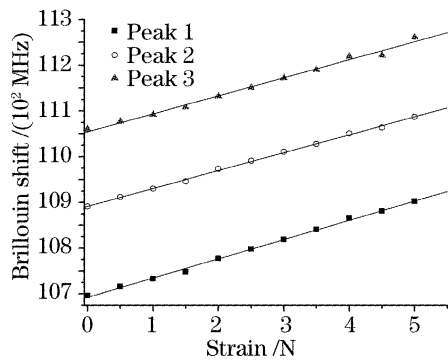


图 6 峰 1、峰 2 和峰 3 的布里渊频移与拉应力的关系

Fig. 6 Brillouin frequency shift of peak 1, 2 and 3 versus stress

表 4 布里渊频移与拉应力关系的拟合结果

Table 4 Fitting results of relationship between Brillouin frequency shift and stress

Peak number	Frequency		Correlation coefficient
	shift-temperature coefficient / (MHz/N)	E_{RMS} / MHz	
1	42 ± 0.6	3.325	0.998
2	39 ± 0.4	2.553	0.999
3	39 ± 1.1	5.951	0.996

3.3 大有效面积非零色散位移光纤的布里渊散射谱的交叉敏感问题的解决方案

如 3.2 节所述,布里渊峰值功率的变化可能是待测量的变化引起,也可能是非待测量(如光纤线路本身的变化等因素)的变化所引起,因此为了提高系统测量的准确度,所采用的方案应该消除非待测量引起的布里渊峰值功率的变化。由上述实验结果可知,大有效面积非零色散位移光纤的布里渊散射峰 1 与峰 3 的功率差值与温度无关,而随拉应力线性增加,其关系可表示为

$$\Delta P_{b(1-3)} = \frac{dP_{b(1-3)}}{dF} \times \Delta F, \quad (1)$$

其中 $dP_{b(1-3)}/dF$ 是峰 1 与峰 3 的功率差值-拉应力系数,由光纤本身特性决定,需在系统定标时进行标定, $\Delta P_{b(1-3)}$ 是峰 1 与峰 3 的功率差值。

三个峰的布里渊频移都随拉应力和温度的增加而线性增加,其中峰 2 的布里渊频移和温度及拉应力的关系具有最好的线性度,其关系可表示为

$$\Delta \nu_{b2} = \nu_b(\epsilon) - \nu_b(0) = \frac{\partial \nu_{b2}}{\partial T} \times \Delta T + \frac{\partial \nu_{b2}}{\partial F} \times \Delta F, \quad (2)$$

其中 $\partial \nu_{b2}/\partial T$ 是峰 2 的布里渊频移-温度系数, $\partial \nu_{b2}/\partial F$ 是峰 2 的布里渊频移-拉应力系数,由光纤本身特性决定,其值也需在系统定标时进行标定, $\Delta \nu_{b2}$ 是峰 2 的布里渊频移。

利用测量获得的峰 2 的布里渊频移以及峰 1 与

峰 3 的功率差值,由(1)式和(2)式可实现应变和温度的同时测量。由于采用了峰 1 与峰 3 的布里渊峰值功率的差值,它在原理上完全消除了由于光纤线路变化等非待测量引起的布里渊峰值功率的变化所导致的测量误差。

应变和温度的测量精度可表示为(3)式所示:

$$\begin{aligned} \delta F &= \frac{\delta P_{b(1-3)}}{dP_{b(1-3)}/dF}, \\ \delta T &= \frac{(\partial \nu_{b2}/\partial F) \times \delta F + \delta \nu_{b2}}{\partial \nu_{b2}/\partial T}, \end{aligned} \quad (3)$$

其中 δF 是拉应力的测量精度, $\delta P_{b(1-3)}$ 是峰 1 与峰 3 的功率差值随温度的关系的均方根和峰 1 与峰 3 的功率差值随拉应力线性变化的均方根之和, $\delta \nu_{b2}$ 是峰 2 的布里渊频移随温度线性变化的均方根。取频移-应变系数为 $510 \text{ MHz}/\%^{[8]}$,再利用上面的试验数据可以得到,在应变从 $1600 \mu\epsilon$ 到 $4000 \mu\epsilon$ 的范围内,可获得大约 $130 \mu\epsilon$ 的应变测量精度和 8°C 的温度测量精度。

4 结 论

交叉敏感问题制约了基于布里渊散射的全分布式光纤应变或温度传感器的实用化,设计更加有效的应变和温度分离方案并提高其实用化程度,已成为近年来的研究热点。本文研究了大有效面积非零色散位移光纤的布里渊散射谱与应变和温度的关系,利用布里渊散射谱中峰 1 和峰 3 的功率差值与应变的关系,结合布里渊频移与温度和应变的线性关系,实现了应变和温度的同时测量,获得了大约 $130 \mu\epsilon$ 的应变测量精度和 8°C 的温度测量精度。

参 考 文 献

- 1 Chen Weimin, Huang Minshuang, Zou Jian *et al.*. Fiber optic strain sensing technology with Brillouin back-scattering[J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(6): 728~732 (in Chinese)
陈伟民, 黄民双, 邹建等. 一种利用布里渊散射的光纤应变传感新方法[J]. *光学学报*, 1999, **19**(6): 728~732
- 2 Song Mupin. The technique of Brillouin scattering-distributed optical fiber sensing based on microwave electrooptical modulation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **24**(8): 1111~1114 (in Chinese)
宋牟平. 微波电光调制的布里渊散射分布式光纤传感技术[J]. *光学学报*, 2005, **24**(8): 1111~1114
- 3 Muping Song, Bin Zhao, Xianmin Zhang. Optical coherent detection Brillouin distributed optical fiber sensor based on orthogonal polarization diversity reception[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(5): 271~274
- 4 Xiaoyi Bao, Jeff Smith, Anthony Brown. Temperature and strain measurements using the power, line-width, shape and frequency shift of the Brillouin loss spectrum[C]. *Proc. SPIE*, 2002, **4920**: 311~322
- 5 Qinrong Yu, Xiaoyi Bao, Liang Chen. Simultaneous strain and temperature measurement in PM fibers using Brillouin frequency, power and bandwidth[C]. *Proc. SPIE*, 2004, **5391**: 301~307

- 6 Lufan Zou, Xiaoyi Bao, Liang Chen. Simultaneous distributed Brillouin strain and temperature sensor with photonic crystal fiber [C]. *Proc. SPIE*, 2004, **5384**: 13~17
- 7 M. Alahbabi, Y. T. Cho, T. P. Newson. Comparison of the methods for discriminating temperature and strain in spontaneous Brillouin-based distributed sensors[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(1): 26~28
- 8 P. C. Wait, T. P. Newson. Landau Placzek ratio applied to distributed fibre sensing[J]. *Opt. Commun.*, 1996, **122**(1): 141~146
- 9 Yoshiyuki Sakairi, Haruyoshi Uchiyama, Zhi Xien Li *et al.*. A system for measuring temperature and strain separately by BOTDR and OTDR[C]. *Proc. SPIE*, 2002, **4920**: 274~284
- 10 M. N. Alahbabi, Y. T. Cho, T. P. Newson. Simultaneous distributed measurements of temperature and strain using spontaneous raman and Brillouin scattering[C]. *Proc. SPIE*, 2004, **5502**: 488~491
- 11 Liu Yanming, Gao Yuxuan, Li Maoxun *et al.*. The application of nonzero dispersion shifted large effective area fiber in DWDM telecommunication systems[J]. *Study on Opt. Commun.*, 2000, **100**: 52~57(in Chinese)
刘燕明, 高育选, 李懋循 等. 非零色散位移大有效面积光纤在 DWDM 系统中的应用[J]. *光通信研究*, 2000, **100**: 52~57

欢迎成为《中国光学期刊网》企业会员

中国光学期刊网(<http://www.opticsjournal.net>)是由中科院上海光学精密机械研究所主办、国内光学期刊界共同参与建设的光学期刊网络信息发布平台。自 2004 年 5 月开通以来,得到了广大科研工作者、企事业单位人士的好评。

为进一步提高服务水平,中国光学期刊网从 2006 年起在信息服务上实行会员制度,凡光电子、激光、光通信等相关的企业均可申请成为中国光学期刊网的企业会员,中国光学期刊网将为企业会员提供优质超值的专业服务。

一、会员企业享受的服务包括:

- 1) 企业名称在中国光学期刊网首页的会员企业栏目中出现,并链接到企业自己的网址。
- 2) 会员企业可获赠光学类期刊一份,全年 12 册,在《中国激光》《光学学报》《激光与光电子学进展》《Chinese Optics Letters》中任选一种。
- 3) 可免费在本站“特别推荐”栏目发布文字信息(含广告)10 条,每篇不过 2000 字。
- 4) 如在中国光学期刊网发布广告,可享受广告报价的 80% 优惠。
- 5) 优先或免费参加光学期刊网组织的各类学术和业务活动。
- 6) 可免费阅读本网站期刊全文 300 篇次。

二、会员义务:

- 1) 注册时向中国光学期刊网递交企业真实信息。
- 2) 每年交纳会员费 2800 元,会员资格从交费之日起计算,一年有效。
- 3) 不得将中国光学期刊网提供给会员的信息转给第三方使用。
- 4) 尊重并保护本网及论文作者的知识产权。
- 5) 在本网发布信息必须遵守中华人民共和国相关法律法规。

三、成为企业会员的步骤:

- 1) 注册成为中国光学期刊网的一般用户,也可以直接填写广告投放申请表单,说明您的意向。
- 2) 来信 mail@opticsjournal.net 告知您已经注册成功。并请告知选择何种期刊及收刊地址、联系人。
- 3) 银行汇款 2800 元至下列帐户:
开户行:工商银行上海嘉定支行营业部 户名:中国科学院上海光学精密机械研究所
帐号:1001700809026400195
- 4) 联系人:郑继承;电话:021-69918253;Email:expert@mail.siom.ac.cn