

文章编号: 0258-7025(2005)05-0673-03

# 边缘检测技术在分布式光纤传感中的应用

万生鹏<sup>1,2</sup>, 何赛灵<sup>2</sup>, 胡建东<sup>2</sup>, 高益庆<sup>1</sup>

<sup>1</sup>南昌航空工业学院, 江西 南昌 330034

<sup>2</sup>浙江大学光学仪器国家重点实验室, 光及电磁波研究中心, 浙江 杭州 310027

**摘要** 提出了采用双边缘技术测量光纤传感中的布里渊频移。利用边上信号对频率变化敏感的特点, 提出了边缘检测技术, 并通过设置最佳的工作点, 使系统工作在最敏感的点上。理论分析表明, 为实现 0.5 MHz 的布里渊频移测量精度, 通过测量最大信号的常规检测所需的信噪比为 65.1127 dB, 单边缘检测所需的信噪比为 37 dB, 双边缘检测所需的信噪比为 31 dB。所以, 在相同信噪比下, 与常规检测技术相比, 边缘检测技术可以大大提高布里渊频移测量精度。

**关键词** 光纤光学; 分布式光纤传感; 布里渊频移; 双边缘技术; 相干检测

**中图分类号** TP212.14 **文献标识码** A

## Application of Edge Detection Technique to Distributed Fiber Sensor

WAN Sheng-peng<sup>1,2</sup>, HE Sai-ling<sup>2</sup>, HU Jian-dong<sup>2</sup>, GAO Yi-qing<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Nanchang Institute of Aeronautical Technology, Nanchang, Jiangxi 330034, China

<sup>2</sup> Center of Optical & Electromagnetic Res., State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China

**Abstract** Measurement of Brillouin frequency shift distribution in fiber sensor based on double-edge technique is proposed. Utilizing the characteristic that the edge signal is sensitive to the change of frequency, edge detection technique is proposed, and the system is operated on the best sensitive point by setting the optimum point. From the theoretical analysis, in order to achieve Brillouin frequency shift accuracy of 0.5 MHz, the signal to noise ratio (SNR) required are 65.1127 dB, 37 dB and 31 dB for conventional detection by measuring the maximum signal, single-edge technique, and double-edge technique, respectively. So, for the same SNR, edge techniques can improve the measurement accuracy of Brillouin frequency shift greatly comparing with the conventional detection techniques.

**Key words** fiber optics; distributed fiber sensor; Brillouin frequency shift; double-edge technique; coherent detection

## 1 引 言

光纤传感技术引起了人们的广泛重视<sup>[1~8]</sup>。而基于布里渊散射的光纤传感技术因其可以实现分布式测量, 不需要高功率的光源抽运和布里渊散射光均可工作在光纤的低损耗窗口等特点而引起了人们的极大重视<sup>[1~8]</sup>, 成为光纤传感技术的重要研究方向之一。

在布里渊传感中, 通过测量布里渊频移和布里渊散射信号功率来实现温度和应力的测量。在现有的布里渊频移测量中, 主要有直接检测和相干检测

两种<sup>[5~8]</sup>。都是通过测量最强信号来得到布里渊频移。但是, 信号最大处对布里渊频移的变化并不敏感, 因此影响了测量精度。

本文将激光雷达中较成熟的边缘检测技术应用到布里渊光纤传感中<sup>[9~11]</sup>, 从而大大提高了布里渊频移的测量精度。

## 2 方案设计及性能分析

双边缘检测系统方案如图 1 所示。布里渊散射信号与本振光外差后经平衡接收机转换成电流信

收稿日期: 2004-06-18; 收到修改稿日期: 2004-09-16

基金项目: 江西省测试技术与控制工程研究中心基金(ZX200304002)资助项目。

作者简介: 万生鹏(1971—), 男, 南昌航空工业学院副教授, 浙江大学博士后, 主要从事光码分多址、分布式光纤传感及光子存储方面的研究。E-mail: sp\_wan@163.com

号,通过检测低通滤波器后的电流信号变化来检测布里渊频移变化量。对于基于布里渊散射的分布式光纤传感系统,在通常的测量范围的,温度和应力只影响布里渊频移和布里渊信号功率,布里渊谱宽一般可认为不受影响。在图1中,低通滤波器的带宽取决于要实现的布里渊频移测量精度。为了实现边缘检测必须合理设置频率 $\nu_1$ 及 $\nu_2$ 的值。

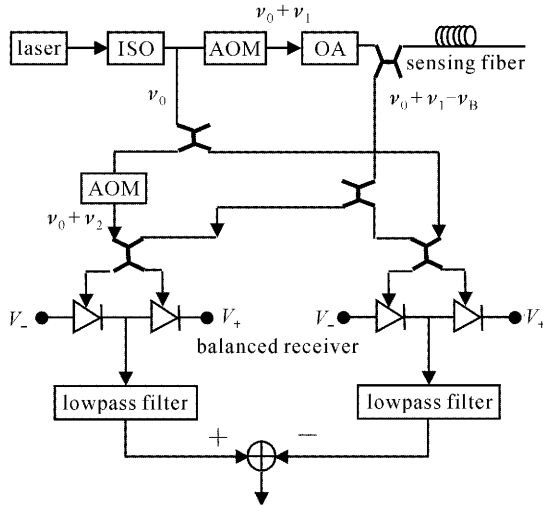


图1 基于双边缘检测的相干布里渊传感系统结构图  
Fig.1 Configuration of coherent Brillouin sensor system based on double-edge technique

在光源谱宽远小于布里渊增益谱宽的情况下,布里渊散射信号的光谱一般可认为是洛伦兹分布<sup>[12]</sup>

$$I_s(\nu) = \frac{I_0}{1 + [(\nu - \nu_0 - \nu_1 + \nu_B)/(\Delta\nu_B/2)]^2}, \quad (1)$$

其中 $\nu$ 为频率, $\Delta\nu_B$ 为布里渊增益的半值谱宽, $\nu_B$ 为布里渊频移, $I_0$ 为峰值强度, $\nu_0$ 为光源的中心频率。为了实现双边缘检测,必须使从光源出来的另外两束本振光的波长正好位于布里渊散射光谱的两侧。为了求得最佳的工作点,先假设与布里渊信号产生外差的本振光的频率为 $\nu'$ ,外差信号频率不再属于光频,用 $f = \nu - \nu'$ 表示。设本振光强度为 $I_L$ ,光电探测器的响应率为 $R$ ,本振光谱宽远小于布里渊信号谱宽,因此外差后的信号为

$$I_C(f) = R(I_0 I_L)^{1/2} \times \left\{ \frac{1}{1 + [(f - f_{IF})/(\Delta f/2)]^2} \right\}^{1/2} \cos 2\pi f t, \quad (2)$$

其中 $f_{IF} = \nu_0 + \nu_1 - \nu_B - \nu'$ , $\Delta f = \Delta\nu_0$ 。只有 $f = 0$ 的信号可以通过后面的低通滤波器。在调节 $\nu_1$ 来实现最佳工作点时, $f = 0$ 的信号强度 $I(f)$ 是变化的,可表示为

$$I(f) = R(I_0 I_L)^{1/2} \left\{ \frac{1}{1 + [(f - f_{IF})/(\Delta f/2)]^2} \right\}^{1/2}, \quad (3)$$

从图2(b)可以看出,存在两个频率可使 $dI/df|_{f=0}$ 的绝对值最大,而对应图2(a)的极值点,也即频谱中心处, $dI/df = 0$ ,也即该位置上信号对频移的变化最不敏感。首先令 $\nu' = \nu_0$ ,这样可以通过声光调制器(AOM)来调节 $\nu_1$ ,从而使 $dI/df|_{f=0}$ 的绝对值最大,在确定一个极值点后,再通过另一个声光调制器来调节 $\nu_2$ ,确定另一个极值点,这两个极值点就是最佳工作点,在这两个工作点上,系统具有最好的灵敏度性能。

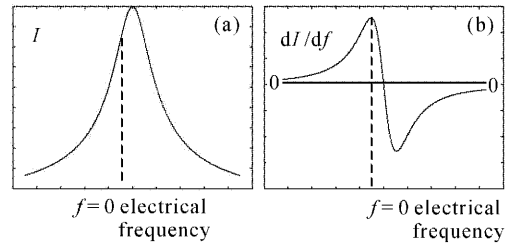


图2 (a)  $I$ 随 $f$ 的变化曲线, (b)  $I$ 的微分随 $f$ 的变化曲线

Fig.2 (a)  $I$  versus  $f$ , (b) derivation of  $I$  versus  $f$

下面给出具体的设计例子。假设 $\Delta f = 30$  MHz, $\nu_B = 11.25$  GHz,通过计算式(3)的微分,在得到 $f_{IF} = 10.6$  MHz时出现一个极大值,因此可得到 $\nu_1 = 11.2606$  GHz。同样可计算得,当 $\nu_2 = 21.2$  MHz时,出现另外一个极值点。这样,就设定系统的参量,在此参量下,系统具有最佳的灵敏度。

布里渊频移的测量精度取决于以下两个因素:系统所能实现的信号测量精度和检测到的信号随频率的变化量。

因为测量精度其实就是测量误差,而测量误差即为方差的均方根,所以信号测量精度 $\delta I$ 与信噪比(SNR)的关系为:

$$\delta I = I / \sqrt{\text{SNR}}, \quad (4)$$

$\delta I$ 与频率测量精度 $\delta f$ 的关系为

$$\delta I = I(f) \delta f, \quad (5)$$

其具体数值可以根据(3)式计算得到。很明显, $I(f)$ 与 $f$ 有关,为了得到最大的灵敏度,必须使系统工作在由式(3)所决定的最大导数处,也即是图2(b)中的两个极值点,因为信号谱的对称性,在两个极值点上工作具有相同的性能。

采用具体设计例子中给出的参数。由(4)式和

(5)式,取 $dI/df|_f=0$ 时的工作点,可得到常规检测下信噪比和布里渊频移测量精度的关系曲线。为便于对比,同时给出常规检测(也即在信号最大处检测)下布里渊频移测量精度和信噪比的关系。从图3可以看出,采用边缘检测技术后,为实现相同精度的布里渊频移所需的信噪比大大降低。双边缘检测系统所需信噪比比单边缘检测系统低6 dB左右。

从图3可以看出,要实现0.5 MHz的布里渊频移测量精度,常规检测所需信噪比为65.1127 dB,与文献[7]中给出的信噪比基本一致(在布里渊谱宽相同的情况下,由文献[8]可算得所需的信噪比为65.1 dB)。采用单边缘检测技术后,所需信噪比为37 dB,采用双边缘检测技术后,所需信噪比为31 dB。

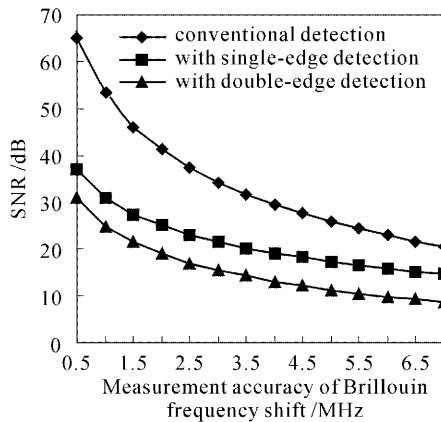


图3 布里渊频移测量精度和信噪比的关系

Fig. 3 Relation between measurement accuracy of Brillouin frequency shift and SNR

### 3 结 论

将边缘检测技术应用于光纤传感中的布里渊频移测量。通过对常规检测和边缘检测的分析可知,在相同的布里渊频移测量精度下,边缘检测技术可以大大降低所需的信噪比,从而提高布里渊频移测量精度和降低系统测量时间(为了满足所需的信噪

比,往往要多次测量)。

### 参 考 文 献

- Zhao Yong, Rong Min, Liao Yanbiao. Reflex optical fiber sensor and compensation technique for temperature measurement under offshore oil well [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(1): 75~78  
赵勇,荣民,廖延彪. 用于海洋井下温度检测的反射式光纤传感器及补偿技术 [J]. *中国激光*, 2003, **30**(1): 75~78
- Jiang Desheng, Zhao Shiwei, Han Yun *et al.*. Optical fiber oxygen sensor based on fluorescence quenching [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(3): 381~384  
姜德生,赵士威,韩蕴等. 一种基于荧光猝灭原理的光纤氧气传感器 [J]. *光学学报*, 2003, **23**(3): 381~384
- T. Horiguchi, M. Tateda. BOTDA nondestructive measurement of single-mode optical fiber attenuation characteristics using Brillouin interaction: theory [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1989, **7**(8): 1170~1176
- T. Horiguchi, K. Shimizu, T. Kurashima *et al.*. Development of a distributed sensing technique using Brillouin scattering [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1995, **13**(7): 1296~1302
- T. R. Parker, M. Farhadiroushan, V. A. Handerek *et al.*. A fully distributed simultaneous strain and temperature sensor using spontaneous Brillouin backscatter [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1997, **9**(7): 979~981
- G. P. Lees, P. C. Wait, M. J. Cole *et al.*. Advances in optical fiber distributed temperature sensing using the Landau-Placzek ratio [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, **10**(1): 126~128
- K. Shimizu, T. Horiguchi, Y. Koyamada *et al.*. Coherent self-heterodyne Brillouin OTDR for measurement of Brillouin frequency shift distribution in optical fibers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1994, **12**(5): 730~736
- S. M. Maughan, H. H. Kee, T. P. Newson. A calibrated 27-km distributed fiber temperature sensor based on microwave heterodyne detection of spontaneous Brillouin backscattered power [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(5): 511~513
- C. L. Korb, B. M. Gentry, C. Y. Weng. Edge technique: theory and application to the lidar measurement of atmospheric wind [J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(21): 4202~4213
- B. M. Gentry, C. L. Korb. Edge technique for high accuracy Doppler velocimetry [J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(24): 5770~5777
- Liu Dahe, J. W. Katz. Edge technique for the measurements of Brillouin scattering in water [J]. *Chinese J. Lasers*, 1999, **A26**(4): 307~311  
刘大禾, J. W. Katz. 水中布里渊散射的边缘探测方法 [J]. *中国激光*, 1999, **A26**(4): 307~311
- R. W. Boyd, K. Rzazewski, P. Narum. Noise initiation of stimulated Brillouin scattering [J]. *Phys. Rev. A*, 1990, **42**(9): 5514~5521