

# 超结构光纤光栅在自发布里渊散射测量中的应用

张永智, 王 荣, 徐智勇, 周 华

(解放军理工大学 通信工程学院, 江苏 南京 210007)

**摘 要:** 从理论上分析了超结构光纤光栅的滤波原理, 将所研制的超结构光纤光栅滤波器应用于自发布里渊散射测量中, 初步实现了自发布里渊散射信号与瑞利散射信号的有效分离及自发布里渊散射谱的测量, 并给出了实验系统及实验结果, 表明了该方案的可行性。

**关键词:** 超结构光纤光栅; 布里渊散射; 直接检测; 可重构-等效啁啾(REC)技术

中图分类号: TP212.14

文献标识码: A

文章编号: 1673-9833(2008)03-0039-03

## Application of Superstructure Fiber Bragg Gratings in Spontaneous Brillouin Scattering Measurement

Zhang Yongzhi, Wang Rong, Xu Zhiyong, Zhou Hua

(School of Communication Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China)

**Abstract:** In view of filter principle of superstructure fiber bragg grating' theoretically analyzing, the superstructure fiber bragg grating filter has been used in the spectrum measurement of Brillouin scattering. The separation of spontaneous Brillouin scattering with Rayleigh scattering and the measurement of spontaneous Brillouin scattering in dispersion shifted fiber have been achieved. The experimental system and result are presented. The primary result confirms this configuration is feasible.

**Key words:** superstructure fiber bragg grating; Brillouin scattering; direct optical detection; the reconstruction-equivalent-chirp (REC) technique

## 0 引言

基于自发布里渊散射的分布式光纤传感系统中, 瑞利散射与布里渊散射信号的分离是一个关键问题, 现有的方案中主要采用干涉仪来实现它。国外公司具有光集成工艺的设计与制作优势, 因此 M-Z 干涉仪方案得到广泛采用。国内采用的普通光纤型 M-Z 干涉仪, 由于极化控制和调谐性等问题, 还无法满足 BOTDR 所需的消光比和稳定性<sup>[1]</sup>, 因此只能在一些实验室环境下使用。而 F-P 干涉仪由于其插入损耗大也不适合做长距离的测量<sup>[2]</sup>。因此, 如何分离波长间隔仅有 0.08 nm 的布里渊与瑞利散射光成了 BOTDR 的关键技术之一。

近年来, 光纤光栅以其独特的优点, 在现代光纤通信系统和光纤传感领域中占有重要的地位, 又因其

设计的灵活性, 使得光纤光栅在滤波器方面的应用尤为突出。从本质上来说, 光纤光栅就是一个高频的滤波器件, 其反射峰有很好的滤波特性。文中采用超结构光纤光栅滤波器作为瑞利和布里渊信号分离的主要部件, 达到了很好的分离效果。

## 1 超结构光纤光栅滤波器的设计

### 1.1 理论分析

耦合模理论是处理各种微扰下的光波导行为的通用方法, 光纤布拉格光栅 (FBG) 中正反向的光在折射率调制的作用下发生耦合。引入缓变包络近似和旋转波近似得到 FBG 的折射率调制函数, 可以简单地表示成带直流分量的被调制的正弦波:

收稿日期: 2008-03-26

基金项目: 江苏省自然科学基金资助项目 (BK2007501)

作者简介: 张永智 (1971-), 男, 山东莱州人, 解放军理工大学博士生, 主要从事电磁场与微波技术, 光通信方面的研究。

$$\Delta n(z) = \left[ \frac{1}{2} A_C(z) \exp\left(j \frac{2\pi z}{\Lambda}\right) + c.c. \right] + D_C(z)$$

上式中： $A_C(z)$ 为对载波的调制，称为折射率调制函数；

$\exp\left(j \frac{2\pi z}{\Lambda}\right)$ 为正弦载波； $D_C(z)$ 为描述折射率的缓慢变化（周期远大于 $\Lambda$ ）。

利用传输矩阵模型将FBG分离成很多小段，对调制系数相等的均匀光纤光栅进行分析，整段FBG即为各个小段FBG的传输矩阵之积，这样便得到了整段FBG的反射特性。反向散射模型将各小段的FBG分解成传输区域和散射区域，然后对它们分别进行分析（对于传输区域，等效为只有传输过程得到一个传输矩阵；对于散射区域，通过分析其调制系数对正反向光的影响得到散射矩阵。），再通过矩阵级联得到整段FBG的反射特性。

根据数字信号处理方面的知识可知，理想的双峰滤波器幅频特性如图1所示，其中有3个主要的技术指标：峰间波长间隔、旁瓣抑制比和峰间抑制比。峰间波长间隔是指两个反射峰间的波长间距，决定了其双峰滤波特性；旁瓣抑制比决定了对边峰的抑制能力；峰间抑制比决定了峰与峰间的抑制能力。

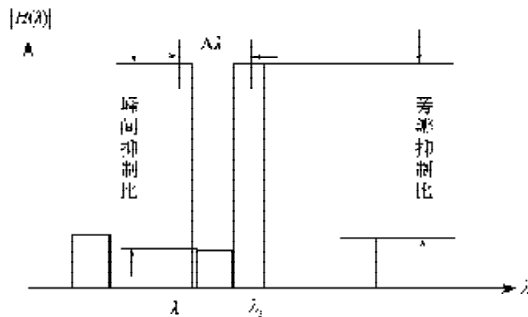


图1 理想的双峰滤波器幅频特性

Fig. 1 The amplitude-frequency characteristics on the ideal filters with two peaks

### 1.2 制作过程

光纤光栅的写入技术有单束光纵向写入、双光束全息相干写入和相位掩模技术。本实验室具有相位掩模技术，可以实现对各种光纤光栅的制作。对于已知的折射率调制分布，利用图2所示的图可实现其制作。

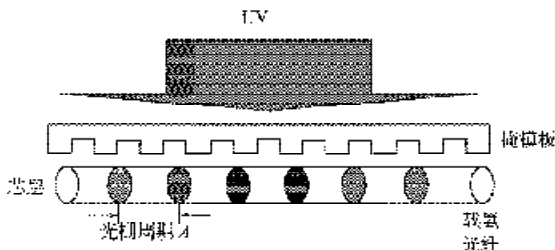


图2 光纤光栅的制作

Fig. 2 Manufacture of optical fiber

采用可重构-等效啁啾（REC）技术<sup>[3]</sup>，并根据布里渊信号的特点，确定光纤光栅滤波器的指标：滤波器的中心波长 $\lambda = 1543.8 \text{ nm}$ ，双峰间距 $d = 0.176 \text{ nm}$ 。图3为制作出的光纤光栅滤波器<sup>[4]</sup>，该曲线中的反射谱线是利用宽谱光源来测得的。

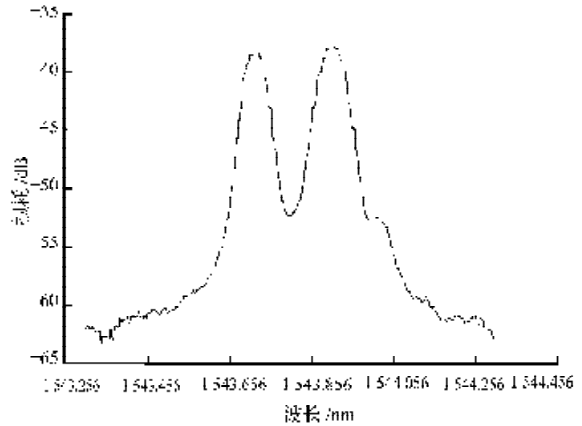


图3 光纤光栅滤波器谱线

Fig. 3 The spectral line of optical fiber grating

从图3中可以看出，光纤光栅滤波器的峰值间隔约为0.17 nm，带外抑制达到15 dB，可以满足滤波要求。与传统的干涉仪相比较，光纤光栅滤波器具有如下优点：

- 1) 滤波器带外抑制高：通过切趾技术单级滤波器的消光比可达到25 dB；
- 2) 插入损耗小：光纤光栅的反射率达到90%；
- 3) 滤波频谱锐利：超结构光纤光栅滤波器的3 dB带宽可小于50 pm；
- 4) 设计灵活：可以灵活设计滤波波长和频谱结构，实现双峰/多峰滤波；
- 5) 偏振不敏感，可靠性高：光纤光栅对正交极化模式没有选择性，为偏振不敏感器件；
- 6) 体积小、易于封装；
- 7) 调谐简单：光纤光栅可采用无源调谐。

## 2 实验系统及实验结果

实验中，采用了中心波长为1543.8 nm的窄线宽光纤激光器，由于窄线宽光源会导致相干瑞利噪声，因此，为了获得瑞利散射基准和布里渊散射信号不能用相同的源<sup>[5]</sup>。基于双光源、光栅滤波的BOTDR方案如图4所示。

用于产生布里渊散射的窄线宽激光器，经外调制器AOM消除啁啾后，注入环形器的端口1，经端口2输出后被光栅 $G_1$ 全反射而从端口3输出。用于产生瑞利散射信号的宽带ASE光源，经光栅 $G_1$ 透射后从端口3输出。环型器端口3的输出光，经极化控制后产生探测光脉冲，注入被测光纤，其背向散射信号从环形器

的端口 4 输出。由于此时的背向散射信号中，既有温度、应力不敏感的瑞利散射信号，又有对温度应力变化敏感的布里渊散射信号，因此，本方案中利用光栅滤波器把两类散射信号区分开。环形器的端口 4 输出的混合信号，送入高灵敏度的光电转换模块和信号处理模块。

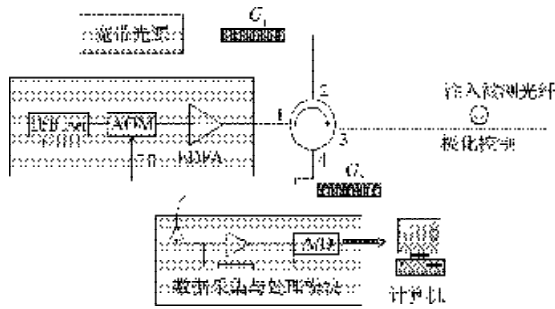


图 4 自发布里渊散射测量系统框图

Fig. 4 The system block diagram on measuring spontaneous Brillouin backscatter signal

在此方案下，如果精心设计  $G_1$  和  $G_2$  光栅的滤波特性（如图 5 所示），则可使  $G_1$ 、 $G_2$  同时保证布里渊散射和瑞利散射的测试。当光源采用窄线宽测量布里渊信号时， $G_1$  反射窄线宽信号， $G_2$  滤除瑞利信号，后端光电转换和信号处理得到的是布里渊信号的强度；当光源采用宽谱光源测量瑞利信号时， $G_1$  透射了大部分 ASE 光源的频谱， $G_2$  虽然滤除了窄线宽范围部分瑞利散射信号，但其它光谱范围的大部分瑞利信号仍然可以经  $G_2$  透射后送入同一后端模块，从而使该方案更接近实用。

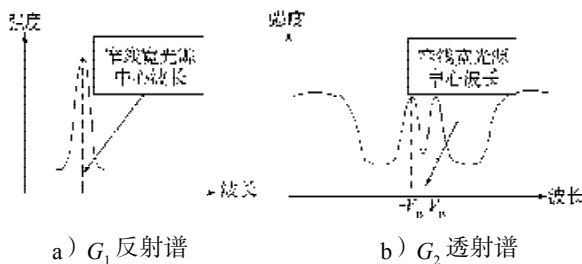


图 5 光栅  $G_1$ 、 $G_2$  的幅度谱

Fig. 5 The amplitude spectrum of the gratings  $G_1$  and  $G_2$

采用上面的系统，我们对长约 19 km 的光纤进行了测试，在 7 km 和 11 km 处分别对光纤采取加应力及加温的作用，作用长度分别为 30 m、60 m。在对两段光纤分别施加  $1\ 200\ \mu\epsilon$  和  $30\ ^\circ\text{C}$  时测得的曲线如图 6 所示。

通过观察图 6 中的曲线可以看出，温度变化在 11 km 处反映出来的是一个幅度变化明显增大的台阶，而 7 km 处由于应力的增大，幅度下降也很明显，这与布里渊信号强度对温度和应力的变化关系相一致。

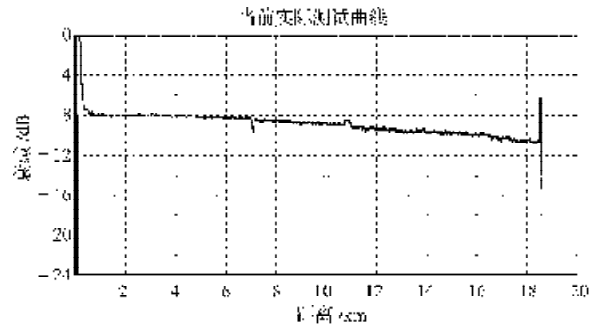


图 6 自发布里渊散射时域反射波形

Fig. 6 The time-domain reflection waveform of spontaneous Brillouin scattering

### 3 结语

本文从提高布里渊信号提取的稳定性及可实现性入手，制作了超结构光纤光栅滤波器，并利用搭建的系统对约 19 km 普通单模光纤中的自发布里渊散射光谱进行了测量，获得了对瑞利散射较好抑制的实验结果，滤波器工作稳定，初步实现了单端同时检测传感光纤温度与应力的变化。由于光栅滤波器本身受环境温度及应力的影响，因此其谱线会发生轻微的变化，这在一定程度上对信号的检测产生了影响，因此对光栅滤波器的温度及应力控制，以及对检测信号的影响程度将是我们下一步的研究课题。

#### 参考文献：

- [1] 李卓明, 李永倩, 何玉钧, 等. 自发布里渊光纤温度和应变同时测量的方法研究[J]. 光通信技术, 2007(2): 47-48.
- [2] PARKER T R, FARHADIROUSHAN M, HANDEREK V A, et al. A fully distributed simultaneous strain and temperature sensor using spontaneous Brillouin backscatter [J]. IEEE Photon. Tech. Lett., 1997, 9(7): 979-981.
- [3] 孙 杰. 40 Gb/s 系统中可调谐色散补偿器的研究[J]. 清华大学综合论文训练, 2005(6), 19-21.
- [4] Wait P C, Hartog A H. Spontaneous Brillouin-Based Distributed Temperature Sensor Utilizing a Fiber Bragg Grating Notch Filter for the Separation of the Brillouin Signal [J]. IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, 2001, 13(5): 508-510.
- [5] Parker T R, Farhadiroushan M, Feced R, et al. Simultaneous Distributed Measurement of Strain and Temperature from Noise-Initiated Brillouin Scattering in Optical Fibers[J]. IEEE JOURNAL OF QUANTUM ELECTRONICS, 1998, 34(4): 645-659.

(责任编辑：廖友媛)