

# 布里渊频移响应特性及其灵敏度调制方法研究

章晓燕<sup>1</sup>, 曾捷<sup>1</sup>, 周鹏<sup>1</sup>, 石庆华<sup>2</sup>, 梁大开<sup>1</sup>, 张倩昀<sup>1</sup>, 周雅斌<sup>1</sup>

(1. 南京航空航天大学 机械结构力学及控制国家重点实验室, 江苏 南京 210016, 2. 中国航空工业集团 北京航空制造工程研究所, 北京 100024)

**摘要:**为研究基于布里渊光时域反射测量原理的分布式传感光纤在工程应用中的温度和应变交叉敏感问题, 首先采用介质中声学声子非弹性光散射理论, 建立了布里渊频移与光纤所受应变和温度的理论关系模型, 并数值模拟了纤芯材料属性与内置调制膜层参数对光纤布里渊频移应变、温度灵敏度的影响, 得到当纤芯折射率增大、纤芯泊松比减小或内置调制膜层与裸纤间隙增大时, 布里渊频移应变和温度灵敏度均减小; 而当纤芯折射率、纤芯弹性模量减小或内置调制膜层热膨胀系数增大时, 布里渊频移应变和温度灵敏度均增大。在此基础上搭建了布里渊散射测量系统, 并选择了同时具备温度增敏与应变减敏特性的内置调制膜层型分布式光纤进行验证试验, 试验结果与仿真分析一致。

**关键词:**光学测量; 布里渊频移; 纤芯属性; 内置调制膜层; 灵敏度

**中图分类号:** TM201.4+3; TE973.6 **文献标识码:** A

## Study on Temperature/Strain Sensitivity of Optical Fiber Based on Brillouin Frequency Shift

ZHANG Xiaoyan<sup>1</sup>, ZENG Jie<sup>1</sup>, ZHOU Peng<sup>1</sup>, SHI Qinghua<sup>2</sup>, LIANG Dakai<sup>1</sup>,

ZHANG Qianyun<sup>1</sup>, ZHOU Yabin<sup>1</sup>

(1. State Key Lab. of Mechanics and Control of Mechanical Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China, 2. Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Aviation Industry Corporation, Beijing 100024, China)

**Abstract:** Theory of acoustic phonon inelastic light scattering medium was used to study the cross sensitivity of temperature and strain in engineering application of distributed optic fiber sensor based on BOTDR. The theoretical relation model for Brillouin frequency shift with temperature and stress fiber was established. Numerical simulation showed that when the core refractive index increased, the Poisson's ratio decreased or the built-in modulation layer increased, and the Brillouin frequency shift temperature and strain sensitivity decreased; when the core refractive index and the core Poisson's ratio both decreased or the thermal expansion coefficient of built-in modulation layer increased, the Brillouin frequency shift temperature and strain sensitivity increased. Based on this, experimental test system for Brillouin scattering measurement was constructed, and the built-in modulation layer distributed fiber was tested with temperature sensitization and strain desensitization. Experiment result showed good consistency with simulation analysis.

**Key words:** optical measurement; Brillouin frequency shift; core properties; built-in modulation layer; sensitivity

### 0 引言

海缆在跨海通信中占有重要地位, 其运行状况的好坏直接影响到整个通信系统的可靠性。一般埋设在深海域的海缆受外界应力影响相对较小, 却较易受海底温度变化和海缆因短路而导致缆内部温度急剧升高的双重影响。这种影响不仅造成信息传送

的中断, 更会造成巨大的经济损失<sup>[1-2]</sup>。然而, 布里渊散射频移响应特性对温度和应变交叉敏感, 使如何实现对海缆温度与应变双参数解耦监测, 并进一步改变布里渊频移的温度或应变响应灵敏度, 成为国内、外相关领域的研究热点<sup>[3]</sup>。因此, 本文根据布里渊散射频移响应特性受到实际中光传输波导特征

收稿日期: 2014-01-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51275239); 国家自然科学基金国际交流基金资助项目(51161120326); 江苏省科技支撑计划基金资助项目(BE2011181); 航空科学基金资助项目(20125652055); 江苏高校优势学科建设工程资助项目; 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20123218110003)

作者简介: 章晓燕(1989-), 女, 江西余江人, 硕士生, 主要从事光纤光栅健康监测的研究。E-mail: 260708578@qq.com。梁大开(1956-), 男, 江苏南京人, 教授, 博士生导师, 主要从事智能材料与结构的研究。E-mail: liangdk@nuaa.edu.cn。

如相关光学与力学等性能参数会对布里渊散射频移效应产生影响<sup>[4]</sup>。本文首先,基于纤芯材料与内置调制膜层对布里渊频移温度、应变灵敏度的影响进行数值模拟分析。然后,利用搭建的自发布里渊散射温度和应力测量试验系统对仿真分析结果进行验证,证明了所选的光纤同时具有温度增敏与应变减敏特性,和理论分析结果一致。

### 1 理论模型

布里渊散射是一种由介质中声学声子引起的非弹性光散射,其散射光相对于入射光的频移  $\nu_B$  由介质的声学特性和弹性力学特性决定,且与入射光频率  $\nu_0$  和散射角  $\theta$  有关<sup>[5]</sup>,且

$$\nu_B = \nu_0 - \nu_S = 2\nu_0 \frac{n\nu_s}{c} \sin(\theta/2) \quad (1)$$

式中:  $n$  为纤芯折射率;  $c$  为真空中光速。

在石英光纤中,由于向前散射光频率为 0,此时  $\theta = \pi$ ,得到光纤中的声速  $\nu_s$ <sup>[6]</sup> 为

$$\nu_s = \sqrt{\frac{E(T, \epsilon)[1 - \kappa(T, \epsilon)]}{[1 + \kappa(T, \epsilon)][1 - 2\kappa(T, \epsilon)]\rho(T, \epsilon)}} \quad (2)$$

式中:  $E, \kappa$  和  $\rho$  分别为纤芯的杨氏模量、泊松比和密度;  $\epsilon$  为应变;  $T$  为温度。

由式(1)、(2)可知,不同纤芯材料参数如折射率、泊松比和弹性模量等均会对布里渊频移响应特性产生影响。此外光纤内护套层的性能也会对其产生影响。内护套层的热膨胀系数及其与光纤之间的间隙能实现对光纤所受轴向应变与温度灵敏度的调制,故可将光纤的内护套层视为分布式传感光纤的内置调制膜层建立如图 1 所示的光纤模型。通过纤芯与内置调制膜层参数的选择或设计完成对传感系统温度与应变灵敏度的调制。

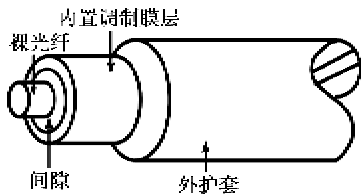


图 1 内置调制膜层型光纤模型

### 2 数值模拟

#### 2.1 纤芯参数对布里渊频移-应变灵敏度影响

假设室温 ( $T_0 = 20\text{ }^\circ\text{C}$ ) 恒定,在  $\epsilon = 0$  点作泰勒展开,只保留一次项得到布里渊频移与应变的关系<sup>[7-8]</sup> 为

$$\nu_B(\epsilon) \approx \nu_B(\epsilon_0) [1 + (\Delta n_e + \Delta E_e + \Delta \kappa_e + \Delta \rho_e) \Delta \epsilon] \quad (3)$$

$$\begin{cases} \Delta n_e = -\frac{n^2(0)}{2} [p_{12} - k(p_{11} + p_{12})] \epsilon \\ \Delta E_e = \frac{30 - (\Theta r_0)^2}{2(\Theta r_0 - 5)} \\ \Delta \kappa_e = \frac{\kappa^2(0) [2 - \kappa(0)]}{[1 - \kappa(0)][1 - 2\kappa(0)]} (\Delta E_e - 1) \\ \Delta \rho_e = \frac{1 - 2\kappa(0)}{2} \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $\Delta n_e, \Delta E_e, \Delta \kappa_e, \Delta \rho_e$  分别为纤芯的折射率、弹性模量、泊松比和密度的应变系数;  $\Delta \epsilon$  为应变变化量;  $n(0), \kappa(0)$  分别为光纤未受载荷时的纤芯折射率、纤芯泊松比;  $k$  为横向与纵向应变比;  $p_{11}, p_{12}$  为弹光系数;  $r_0$  为光纤受平衡轴向力时集团间的平均间距;  $\Theta$  为待定参数。根据式(3)、(4)得到不同纤芯折射率和纤芯泊松比参数对应的光纤布里渊频移随应变变化关系曲线,如图 2、3 所示。

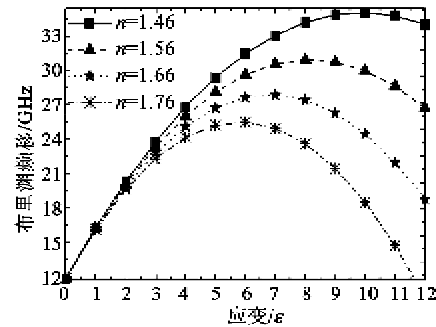


图 2 不同纤芯折射率对应布里渊频移随应变变化曲线

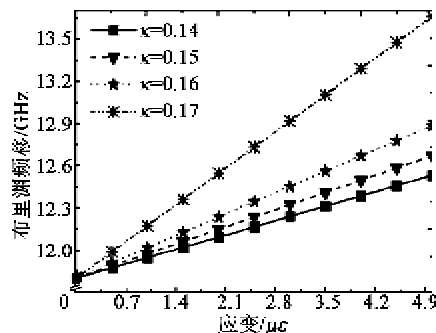


图 3 不同纤芯泊松比对应布里渊频移随应变变化曲线

由图 2 可看出,在相同应变下纤芯折射率越大,其对应的布里渊频移越小。由图 3 可看出,在相同应变下,纤芯泊松比越大则布里渊频移越大。由于光纤所受纵向应变将引起横向收缩,因此泊松比不能视为常数,而当光纤所受应变增加时,引起纤芯内部原子间的相互作用势增大,使泊松比随之增大,从

而导致布里渊频移增大。这表明通过改变纤芯折射率和纤芯泊松比,能实现对应变灵敏度的增减。

### 2.2 纤芯参数对布里渊频移-温度灵敏度影响

假设应变为 0 且保持不变,在  $\lambda_0 = 1\ 550\ \text{nm}$  时,  $n, E, \kappa$  和  $\rho$  随温度的变化可用泰勒级数展开,只保留一次项得到布里渊频移与温度的关系<sup>[9-10]</sup>为

$$\nu_B(T) \approx \nu_B(T_0) [1 + (\Delta n_T + \Delta E_T + \Delta \kappa_T + \Delta \rho_T) \Delta T] \quad (5)$$

$$\begin{cases} n_T = \frac{\Delta x}{n(T)Ln(0)} - \frac{\alpha_T}{n(0)} \\ E(T) = \{7.253 + 1.35 \times 10^{-3}(\Delta T + T_0)\} \times 10^{10} \\ \Delta E_T = \frac{1}{E(0)} \times \frac{\partial E(T)}{\partial T} \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $\Delta n_T, \Delta E_T, \Delta \kappa_T, \Delta \rho_T$  分别为纤芯的折射率、弹性模量、泊松比和密度的温度系数;  $\Delta T$  为温度变化量;  $\Delta x$  为光程变化量;  $L$  为光纤长度;  $\alpha_T$  为光纤热膨胀系数;  $n(0), E(0)$  分别为光纤在初始温度下纤芯的折射率、弹性模量。

根据式(5)、(6)得到不同纤芯折射率和纤芯泊松比参数对应的光纤布里渊频移随温度变化关系曲线,如图 4、5 所示。

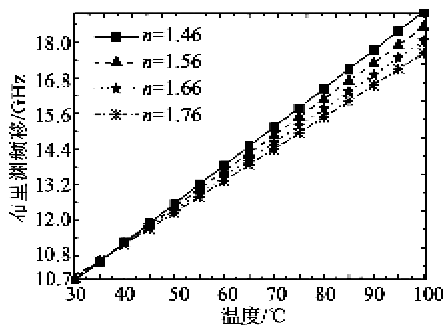


图 4 不同纤芯折射率对应布里渊频移随温度变化曲线

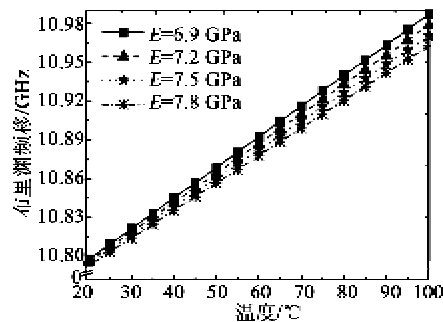


图 5 不同纤芯弹性模量对应布里渊频移随温度变化曲线

由图 4、5 可看出,布里渊频移随温度增加而增大。在相同温度下,纤芯的折射率和弹性模量越大,则布里渊频移越小。此现象是由于介质声学、自由

能和热光效应作用,使得当温度升高时,一方面介质中电子与光频率发生谐振,通过热光效应引起纤芯折射率增大。另一方面,光纤材料的自由能也会相应发生改变,引起纤芯弹性模量增大,而这两者变化均会导致布里渊频移减小。这表明通过改变纤芯折射率和弹性模量,能实现对温度灵敏度的增减。

### 2.3 内调制层对布里渊频移-应变灵敏度影响

假设光纤在内置调制膜层中以正弦曲线形状弯曲分布,则光纤的最大初始余长<sup>[11]</sup>为

$$\epsilon_{\max} = -c / (8 \times r_e) = -(d - d_d) / (8 \times r_e) \quad (7)$$

式中:  $c$  为裸光纤与内置调制膜层间隙;  $r_e$  为光纤允许的最小弯曲半径;  $d$  为光缆直径;  $d_d$  为光纤束等效直径。

图 6 为在裸光纤允许最小弯曲半径下,最大初始余长绝对值随裸光纤和内置调制膜层的间隙增加而呈线性增大。由此得到当裸光纤与内置调制膜层的间隙变化时,间隙内形成的裸光纤余长存在差异,因此光纤所受的应力就会改变,而这一应力产生的布里渊频移会随着光纤所受应力的增加而增大,所以通过改变裸光纤与内置调制膜层的间隙,能实现对应变灵敏度的增减。

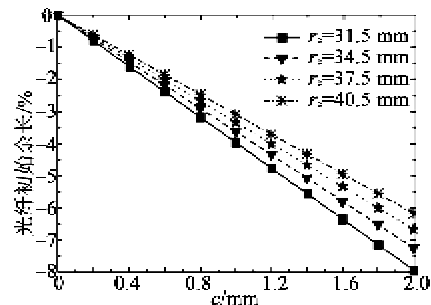


图 6 最大初始余长随间隙变化曲线

### 2.4 内调制层对布里渊频移-温度灵敏度影响

光纤封装结构内置调制膜层材料的热膨胀系数为  $\alpha_s$ ,裸光纤热膨胀系数  $\alpha$ ,当温度变化  $\Delta T$  时,光纤轴向应变  $\epsilon_s$  可表示<sup>[12]</sup>为

$$\epsilon_s = (\alpha_s - \alpha) \Delta T \quad (8)$$

图 7 为光纤轴向应变随温度增加而增大。在相同温度下,内置调制膜层热膨胀系数越大则光纤轴向应变也越大。这是由于相同温度下,不同内置调制膜层材料对裸光纤的轴向约束力不同,导致裸光纤所受应力存在差异,从而引起布里渊频移的变化量不同。因此通过改变内置调制膜层热膨胀系数,能实现对温度灵敏度的增减。

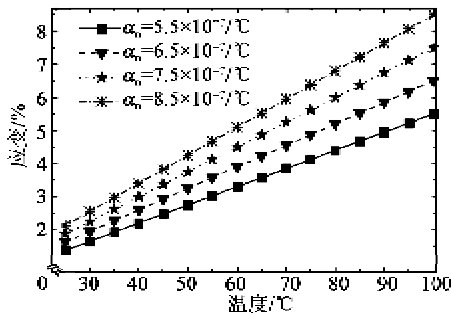


图 7 不同内置调制膜层热膨胀系数对应的应变随温度变化曲线

### 3 实验结果与讨论

#### 3.1 实验系统

本文为验证数值模拟的仿真结果,搭建了自发布里渊散射测量系统,如图 8 所示。由窄带泵浦激光经过耦合器被分成两路:一路是连续光经电光调制器 1 产生探测脉冲光后发生布里渊散射,然后将散射光传输到光纤中,在不同温度或应变下布里渊频移随之改变;另一路本地参考光经电光调制器 2 频移后与布里渊背向散射光进入耦合器发生相干,并由光电探测器将光信号转换成数字信号,通过计算机对信号进行处理,得到布里渊频移与温度或应变之间的关系。因此根据布里渊散射传感原理,选用 4 种不同内置调制膜层光纤进行应力和温度感应试验,这 4 种光纤分别为铠装光缆、非金属光缆、裸光纤和层绞式光缆。

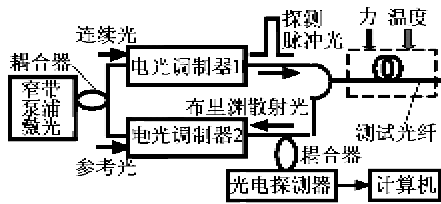


图 8 自发布里渊散射测量系统框图

#### 3.2 应力监测试验

基于非金属光缆、铠装光缆和裸光纤 3 种内置调制膜层的光纤布里渊频移-应力响应灵敏度曲线,分别如图 9~11 所示。由图 9 可看出,裸光纤的布里渊频移随载荷增加而增大,且频移曲线呈良好线性关系。由图 10、11 可看出,布里渊频移均随载荷增加而增大,但频移曲线并未呈线性关系。在小载荷作用下,两种光缆内的裸光纤都尚未受到与内置调制膜层所受相同大小的力。当载荷超过某一范围时,内置调制膜层随着外部载荷增大而紧绷,使内置调制膜层“带动”裸光纤拉伸,此时裸光纤才受到相

同大小的载荷。通过试验得到铠装光缆和非金属光缆对应应变灵敏度分别是裸光纤的 0.019 倍和 0.1 倍。这是由于铠装光缆的内置调制膜层与裸光纤间隙明显大于非金属光缆的内置调制膜层与裸光纤间隙,而内置调制膜层与裸光纤间隙越大,内置调制膜层对裸光纤的约束力越小,光纤对应的应变响应灵敏度也随之降低。此外,内置调制膜层材质属性也会对光纤应变传感性能产生影响,由于铠装内置调制膜层材质相比非金属光缆的材质承载能力大,能使铠装光缆内部裸光纤受载减少,进而降低其布里渊频移应变响应灵敏度。所以铠装光缆的应变减敏倍数比非金属光缆大,与理论仿真分析结果一样。这表明通过改变内置调制膜层形式能实现对光纤布里渊频移应变灵敏度的调制。

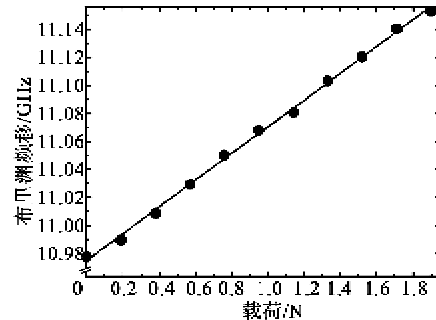


图 9 裸光纤的布里渊频移-载荷关系

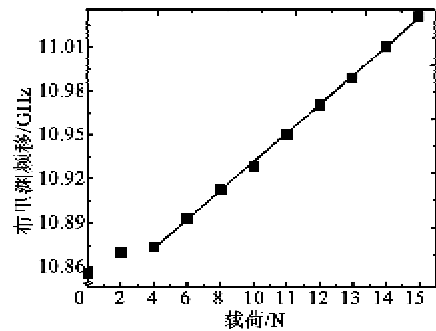


图 10 非金属光缆的布里渊频移-载荷关系

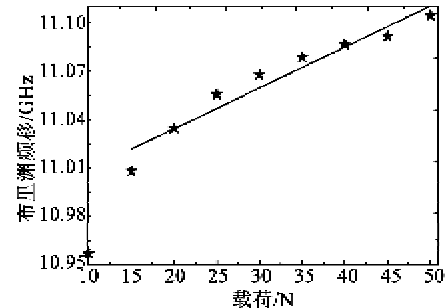


图 11 铠装光缆的布里渊频移-载荷关系

#### 3.3 温度监测试验

基于层绞式光缆、非金属光缆、裸光纤与铠装光

缆这4种内置调制膜层的光纤布里渊频移-温度响应灵敏度曲线,如图12所示。由图可看出,布里渊频移随温度升高而增大且呈线性关系。铠装光缆、层绞式光缆和非金属光缆对应温度灵敏度分别是裸光纤的1.12倍、1.11倍和1.01倍。这是由于内置调制膜层材料热膨胀系数远大于裸光纤。当温度升高时,内置调制膜层的膨胀变形大于裸光纤,两者在接触面上由于相对滑动会产生剪力,而内置调制膜层材料的热膨胀系数越大,其产生的相对剪力也越大,从而提高光纤布里渊频移温度响应灵敏度。所以铠装光缆的温度灵敏度与裸光纤相比其增敏倍数比其他光缆增敏倍数大,与理论仿真分析结果一样,这表明通过改变内置调制膜层材质能实现对光纤布里渊频移温度灵敏度的调制。

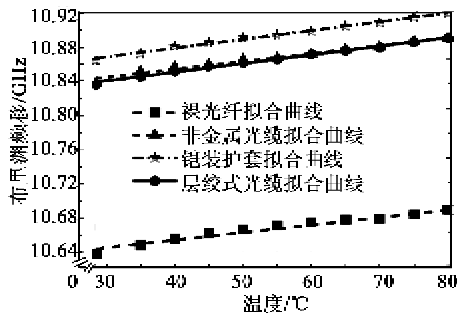


图12 不同光纤的布里渊频移-温度关系

图13为在光纤沿轴向特定加热区域,当处于相同温度条件时,基于不同内置调制膜层的光纤所对应的应变分布都较平坦,与实际光纤轴向温度分布情况相吻合。但此区域各光纤对应的应变值存在差异,这是由内置调制膜层材料的热膨胀系数不同导致的,且热膨胀系数越大,内置调制膜层对裸光纤产生附加拉应力也越大,对应的应变值也就越大。因此,得到铠装光缆这种封装形式对裸光纤起到了对温度增敏效果。

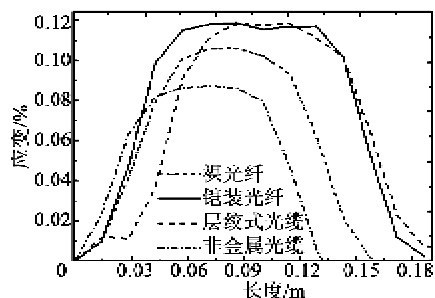


图13 80 °C下不同光纤应变-距离关系

#### 4 结束语

本文建立了布里渊散射频移与光纤所受应变和

温度的关系模型,利用仿真分析纤芯材料属性与内置调制膜层参数对光纤布里渊频移应变、温度灵敏度的影响,由分析得到通过选择或设计纤芯与内置调制膜层参数可改变布里渊频移应变和温度的灵敏度。此外,利用搭建的布里渊散射分布式测量系统对不同内置调制膜层型光纤进行应力和温度试验研究。研究结果表明,铠装光缆与裸光纤传感系统相比其应变灵敏度减小98.1%,而温度灵敏度提高12%,因此证明了铠装光缆是集温度增敏与应变减敏功能于一体的内置调制膜层型分布式传感光纤,也验证了本文的仿真分析。

#### 参考文献:

- [1] 周智,何建平,欧进萍. 输油管道冻胀融沉监测的光纤布里渊传感技术[J]. 压电与声光,2010,32(4):543-546.  
ZHOU Zhi, HE Jianping, OU Jinping. Brillouin fiber sensor technology for monitoring of oil pipeline's settlement and uplift induced by icing and thawing[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2010, 32(4):543-546.
- [2] YONG Ding, BIN Shi, DAN Zhang. Data processing in BOTDR distributed strain measurement based on pattern recognition[J]. Optik, 2010, 121(24):2234-2239.
- [3] 欧中华,刘永智,张利勋,等. 基于光栅 Sagnac 环的自发布里渊散射检测方法[J]. 压电与声光,2009,31(6):817-819.  
OU Zhonghua, LIU Yongzhi, ZHANG Lixun, et al. A method for spontaneous Brillouin scattering detection based on a fiber Bragg grating Sagnac loop[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2009, 31(6):817-819.
- [4] LI Cunlei, LU Yuangang, ZHANG Xuping, et al. SNR enhancement in Brillouin optical time domain reflectometer using multi-wavelength coherent detection[J]. Electron Lett, 2012, 1(30):48.
- [5] 钟镇,宋跃江,陈勳勳,等. 相干光时域反射仪中受激布里渊散射的抑制[J]. 光电子·激光,2010,21(10):1499-1502.  
ZHONG Zheng, SONG Yuejiang, CHEN Mengcheng, et al. The suppression of stimulated Brillouin scattering in coherent optical time domain reflectometer[J]. Journal of Optoelectronics & Laser, 2010, 21(10):1499-1502.
- [6] 肖尚辉,李立. 影响分布式布里渊阈值功率的多参数分析[J]. 压电与声光,2009,31(4):479-481.  
XIAO Shanghui, LI Li. Analysis of multi parameter effects on the distributed Brillouin threshold in single-mode fiber[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2009, 31(4):479-481.

(下转第738页)