

文章编号: 0253-2239(2005)04-501-5

应变梯度对布里渊光时域反射计测量精度的影响*

刘迪仁^{1,2} 宋牟平¹ 章献民¹ 陈抗生¹

(¹ 浙江大学信息与电子工程学系, 杭州 310027)
(² 长江大学地球物理系, 荆州 434102)

摘要: 基于脉冲抽运的布里渊光时域反射计技术具有米数量级的空间分辨力。为了分析在其空间分辨力范围内的应变梯度增加对布里渊谱测量的影响,建立了后向布里渊散射谱与应变梯度的函数关系。数值分析结果表明应变梯度增大,不仅使布里渊频移随之线性增大,也会使后向布里渊散射谱峰值非线性降低,谱峰变得平坦。空间分辨力 10 m 的 100 $\mu\text{e}/\text{m}$ 应变梯度相对于零应变梯度,引起的布里渊频移测量误差增加 2.04 倍。传感光纤固定于悬臂梁上以模拟不同应变梯度,采用对频宽小于 1 MHz 的激光脉冲调制和基于相干平衡检测的布里渊光时域反射计系统,实验测得了沿传感光纤的后向布里渊散射谱数据和应变分布。布里渊谱数据经最小二乘法拟合后,得到的不同应变梯度的谱曲线变化与理论分析相吻合。

关键词: 光学测量; 分布式光纤传感技术; 布里渊散射; 光时域反射计; 应变
中图分类号: TN247 文献标识码: A

Influence of Stress Gradient on Measurement Accuracy of Brillouin Optical-Time-Domain-Reflectometry

Liu Diren^{1,2} Song Muping¹ Zhang Xianmin¹ Chen Kangsheng¹

(¹ Department of Information and Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027)
(² Department of Geophysics, Yangtze University, Jingzhou 434102)

Abstract: The spatial resolution of BOTDR (the Brillouin optical time domain reflectometer) based on pulse pump in fiber could reach meter order. The analytic relationship between Brillouin backscattering spectrum and stress gradient is set up to investigate the influence of the stress gradient within the resolution on the measurement accuracy of Brillouin frequency shift. The numerical results show that the increasing stress gradient results in the linear increasing of the Brillouin frequency shift, the nonlinear decreasing of the peak and the flattening of Brillouin spectrum. With the spatial resolution of 10 m and the stress gradient of 100 $\mu\text{e}/\text{m}$, the measurement error of Brillouin frequency shift is 2.04 times larger than that without the stress gradient. Based on pulse modulation of lightwave with linewidth less than 1 MHz and BOTDR with balanced coherent detection, the Brillouin spectra and stress along the test fiber are experimentally measured at different stress gradients with the sensing fiber fixed on a cantilever beam. The Brillouin spectra of the different stress gradients are obtained from the experimental data by the least squares fitting. Experimental results are in agreement with the theoretical prediction.

Key words: optical measurement; distributed optic fiber sensor; Brillouin scattering; optical-time-domain reflectometer; strain

1 引 言

布里渊光时域反射计(BOTDR)光纤传感技术^[1,2]利用脉冲光在光纤中的自发布里渊散射效应和光时域反射(OTDR)技术,相对光纤光栅传感器^[3~6],可实现温度和应变的长距离全分布式测量,

适合于大型结构体健康状况的检测和监测^[2]。布里渊光时域反射计除具有一般光纤传感器的抗电磁和辐射干扰性好、化学稳定性好等优点外,还具有频率测量较强度测量的稳定性好等特点。另外因截面积小光纤可几乎无损地粘结或埋植于被测物体内,

* 浙江省自然科学基金(M603127)资助课题。

作者简介: 刘迪仁(1965~),男,副教授,博士生,主要从事光纤传感技术、微波光子学等方面的理论和应用研究。

E-mail: drliu@zju.edu.cn

收稿日期: 2004-04-29; 收到修改稿日期: 2004-10-14

因此该分布式传感技术在大型结构体智能传感系统中具有广阔的应用前景。

基于脉冲抽运光的布里渊光时域反射计空间分辨力主要受光脉冲宽度等因素的限制^[7],如光脉冲宽度为 50 ns 或 100 ns,理论上空间分辨力分别为 5 m 和 10 m。脉冲越窄,分辨力越高。但光脉冲越窄布里渊谱展宽越严重^[7,8],不利于准确确定布里渊频移,会增大测量误差。故该技术的空间分辨力一般在 1 m 以上。在大量的分布式应变传感实际应用问题中,现有布里渊光时域反射计分辨力范围内的应变一般不是一个常量,如大型建筑中悬臂梁结构的纵向应变为线性梯度分布。研究发现不仅输入光脉冲宽度和形状会引起布里渊散射谱的变化^[8~10],而且在分辨力范围内应变梯度的变化也会引起布里渊散射谱的变化^[11,12],并引起布里渊频移的测量误差。本文将从理论上分析布里渊光时域反射计分辨力范围内的应变梯度增加对布里渊散射谱和应变测量的影响,还将给出作者以悬臂梁模拟不同应变梯度的实验研究结果,并讨论理论分析与实验结果的一致性以及克服应变梯度影响的方法。

2 理论分析

若 z 处的入射脉冲光功率为 $P(z)$,则距入射端 z 处的 dz 小段光纤上产生的后向布里渊散射光功率为^[9]

$$dP(z, \nu) = P(z)g(\nu, \nu_B) \exp(-2\alpha_z z) \frac{c}{2n} dz, \quad (1)$$

其中 α_z 是光纤衰减系数, $g(\nu, \nu_B)$ 为布里渊增益谱^[1]

$$g(\nu, \nu_B) = \frac{g_0}{[2(\nu - \nu_B)/\omega]^2 + 1}, \quad (2)$$

ω 为布里渊增益谱的线宽, g_0 为布里渊增益谱峰值, ν_B 为布里渊频移,随光纤的温度和应变而变化。若不考虑温度的变化,布里渊频移与应变的关系为^[2]

$$\nu_B(\epsilon) = \nu_{B0} + C_\epsilon * \epsilon, \quad (3)$$

其中 ν_{B0} 为光纤无应变的布里渊频移, C_ϵ 是布里渊频移随应变的变化系数。依据光时域反射计技术测量并记录沿光纤每一点 z 处的后向散射光的布里渊频移,布里渊光时域反射计可实现沿光纤的全分布式应变测量。 $z = \frac{c}{2n}(t - t_0)$, t_0 和 t 分别为脉冲光入射时刻和后向布里渊散射光接收的时刻。

布里渊光时域反射计的空间分辨力 $\Delta z = \frac{c}{2n}\tau$, τ 为入射光脉冲宽度。在 Δz 范围内被测物体的应变一般不是一个常量,而是在一定范围内变化。在很多实际问题中,布里渊光时域反射计米数量级的空间分辨力范围内被测量物体的应变常常呈现单调上升或单调下降的梯度变化,如悬臂梁在弹性限度内沿 z 方向的应变为^[12]

$$\epsilon = \frac{yW}{EI}z = k_g * z, \quad k_g = \frac{yW}{EI}, \quad (4)$$

其中 W 是梁自由端受的垂直向下集中力, E 是梁材料的杨氏模量, y 是偏离梁中线轴的垂直距离, I 是相对中线轴的几何惯性矩, k_g 是应变梯度系数。

通过粘接,如果光纤很好地固定在悬臂梁上表面,可以认为光纤与梁上表面的应变几乎一致。以 z_i 为中点 Δz 长的光纤段应变在 $[k_g(z_i - 0.5\Delta z), k_g(z_i + 0.5\Delta z)]$ 范围内变化,相应的布里渊频移范围由(3)式给出。

脉冲光在 z_i 处的后向布里渊散射光功率谱为^[12]

$$G(\nu, z_i) = \int_{z_i - \Delta z}^{z_i + \Delta z} g(\nu, \nu_B[\epsilon(z)]) dz, \quad (5)$$

将(2)式~(4)式代入(5)式,并设

$$x = 2(\nu - \nu_{B0})/\omega, \quad A = 2C_\epsilon/\omega,$$

得到

$$G(x, z_i, \Delta z, k_g) = \frac{g_0 \{ \arctan[x - Ak_g(z_i - 0.5\Delta z)] - \arctan[x - Ak_g(z_i + 0.5\Delta z)] \}}{Ak_g}. \quad (6)$$

图 1 为由(6)式得到的不同应变梯度的后向布里渊散射光谱。图 1 中, $k_g = 0$ 时,布里渊频谱为典型的洛伦兹曲线,归一化峰值为 1;若 $C_\epsilon = 0.05 \text{ MHz}/\mu\epsilon$, $\omega = 35 \text{ MHz}$, $\Delta z = 10 \text{ m}$,当 k_g 分别取 $100.0 \mu\epsilon/\text{m}$, $200.0 \mu\epsilon/\text{m}$, $400.0 \mu\epsilon/\text{m}$ 时,归一化峰值分别为 0.67, 0.43, 0.24;峰值点 x_{\max} 分别为 2.86, 5.71, 11.43;半峰全宽(FWHM)分别为 3.49,

6.05, 11.602。即三种应变梯度相对无应变梯度频谱分别展宽为 1.75、3.02 和 5.80 倍,谱峰值分别下降为 67%、43% 和 24%。显然,应变梯度的增加,不仅使布里渊频移随之线性增加,而且使布里渊频谱非线性展宽和峰值非线性下降,谱峰变得平坦。

布里渊频谱展宽、峰值下降和谱峰平坦会造成布里渊谱峰值判断的困难,从而引起布里渊频移的

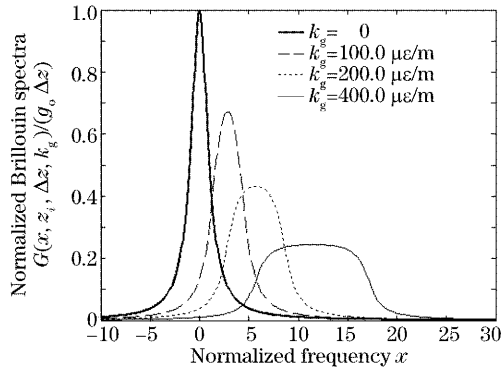


图1 应变梯度引起的布里渊谱变化

Fig.1 Brillouin power spectra depending on stress gradient

G_N 测量误差。记 G_N 为包括光电转换等各种因素噪声引起的总布里渊峰值功率测量误差。则在有和无应变梯度两种情况下布里渊频移测量误差分别为

$$e_x(k_g) = \left[-\frac{2G_N}{d^2 G(x_{\max}, z_i, \Delta z, k_g)/dx^2} \right]^{1/2},$$

$$x_{\max} = Ak_g z_i, \quad (7)$$

$$e_x(0) = \left[-\frac{2G_N}{d^2 G(x_{\max}, z_i, \Delta z, 0)/dx^2} \right]^{1/2},$$

$$x_{\max} = 0. \quad (8)$$

因存在应变梯度引起的布里渊频移测量相对误差率增加为

$$\delta_x(k_g) = \frac{e_x(k_g)}{e_x(0)} = (0.5Ak_g \Delta z)^2 = (0.5A\Delta \epsilon)^2,$$

$$\Delta \epsilon = k_g \Delta z, \quad (9)$$

$\Delta \epsilon$ 表示分辨力 Δz 范围内应变的变化范围。(9) 式表明应变梯度引起的相对误差随分辨力范围内的应变差异的二次方增大。若 $C_e = 0.05 \text{ MHz}/\mu\epsilon$, $\omega = 35 \text{ MHz}$, $\Delta z = 10 \text{ m}$, 则应变梯度 $k_g = 100.0 \mu\epsilon/\text{m}$ 时引起的布里渊频移测量误差率增加为无梯度应变的 2.04 倍。

3 实 验

在如图 2 所示的布里渊光时域反射计结构的分布式光纤传感(DOFS)实验系统中,采用频宽小于 1 MHz 的分布反馈式半导体激光器(DFB-LD) JDSU CQF938 作为光源,其发出中心频率为 ν_0 的连续光经耦合器 C_1 分出信号抽运光和本地参考光。信号光先由电光调制器(EOM)脉冲调制形成脉宽 100 ns、重复频率为 2 kHz 的光脉冲,经掺铒光纤放大器(EDFA)放大,再通过光纤光栅和环形器进行滤波,滤去掺铒光纤放大器产生的放大自发发射噪声,最后由环形器输入到 25 km 的普通单模(SM)光

纤。若布里渊频移为 ν_B ,则在传感光纤的光入射端,由 C_2 耦合出的后向布里渊散射光中心频率为 $\nu_0 - \nu_B$ 。为检测到该微弱的后向布里渊散射光,将它与本地参考光作平衡相干检测。采用矢量网络分析仪中的可调微波源调制参考光,使其中心频率为 $\nu_0 - \nu_s$, $\nu_s \approx \nu_B$ 。通过光相干技术改变 ν_s 可变频接收整个布里渊频谱。光相干检测后,再把光电信号与本地射频信号(90 MHz)相乘,进行混频,通过滤波器得到低频的幅度基带信号。再对基带信号进行高速(80 MHz)模-数转换,采用数字采样累加平均器(BOXCAR)进行叠加处理来提高信噪比,最后把信号送到计算机进行存储、显示。

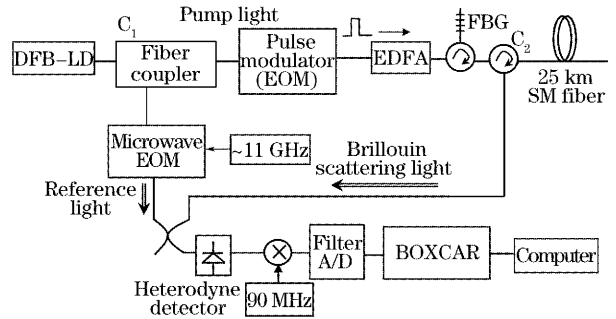


图2 布里渊光时域反射计结构的分布式光纤传感实验系统

Fig.2 Schematic diagram of DOFS using BOTDR architecture

实验中将 25 km 传感光纤中的 25 m 段用环氧树脂强力胶粘胶在悬臂梁上,模拟梁为长 2.5 m,宽 5 cm,厚 2 cm 不锈钢条。梁的一端固定在基座上,梁的自由端有一集中垂直向下的力 W 作用,使得梁偏离中线轴的距离为 y ,因此梁的上表面会有拉伸应变,下表面有压缩应变。测量前先将钢条完全水平放置下,将 25 m 的光纤(10 m × 2.5 m)沿梁纵向 z 平直地粘牢在钢条的上表面的中央附近,认为光纤上受到的纵向应变与梁外表面的拉伸应变一致。

由(4)式有 $yW = k_g EI$,对给定的试验模拟梁, EI 为常量,因为不知道该试验梁准确的杨氏模量等参量,实验中通过调整 W 和 y 改变应变梯度 k_g ,设 $k_{gg} = yW = k_g EI$, k_{gg} 随 k_g 线性变化。采用布里渊光时域反射计试验测量了 $k_{gg} = 0, 59.2 \text{ kg} \cdot \text{cm}$, $84.6 \text{ kg} \cdot \text{cm}$, $100.5 \text{ kg} \cdot \text{cm}$ 对应的四种不同应变梯度(记为 $k_{g1}, k_{g2}, k_{g3}, k_{g4}$) 光纤的应变分布。

4 结果和讨论

通过扫描微波调制频率得到的 10.650 ~

10.750 GHz频移区间的布里渊散射信号,再结合光时域反射技术得到如图3所示传感光纤各处的布里渊散射光谱。图中右上方的小图是光纤上一点的布里渊散射光频谱,其中折线由实测数据绘出,另外一条较光滑的曲线由实测数据拟合得到,可看出清晰的洛伦兹曲线形状的布里渊散射频谱,由此得到传感光纤上各点的布里渊频谱移动,依据布里渊频移与光纤所受应变的关系得到传感的应变信息。图4为应变梯度下布里渊光时域反射计测量的25 km全部传感光纤上的应变分布,图中的小附图显示了其中200 m光纤段的应变分布,梯度应变光纤段靠近输入端。在进入梯度应变试验光纤段前有一段约440 m长的接入光纤。

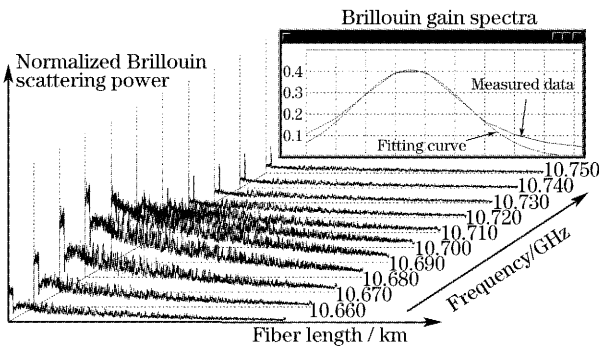


图3 传感光纤各处的布里渊散射光谱

Fig. 3 The panorama of the Brillouin scattering signal

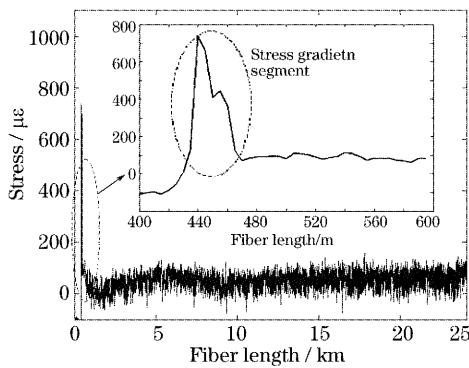


图4 布里渊光时域反射计测量的25 km光纤上应变分布

Fig. 4 Stress distribution along the 25 km fiber measured by BOTDR

图5显示了四种不同应变梯度 $k_{g1}, k_{g2}, k_{g3}, k_{g4}$ 下测量的共200 m光纤段上的应变分布。在图5中的梯度应变段,随着应变梯度的增加,梁上表面的应变增加,如四条应变分布曲线在应变最大的 $z = 445$ m处应变分别为 $39.2 \mu\epsilon$ 、 $313.594 \mu\epsilon$ 、 $556.869 \mu\epsilon$ 和 $686.910 \mu\epsilon$ 。图6显示了四种应变梯度下测到光纤上同一点($z = 445$ m)处的布里渊谱数据以及由这四个谱数据采用最小二乘法分别作出

的四条布里渊功率谱函数的拟合曲线。这四条布里渊功率谱线的归一化谱峰值、中心频率和半峰全宽三个特征参量见表1。三种应变梯度 k_{g2}, k_{g3}, k_{g4} 相对无应变梯度的 k_{g1} 布里渊频谱分别展宽了1.66、2.20和2.40倍,谱峰值分别下降为57.4%、43.9%和39.6%。图6与图1对比表明,实验和理论计算都反映了应变梯度对布里渊后向散射谱影响一致的变化趋势:随着应变梯度的增加,布里渊频移增加,谱线展宽,谱峰值减小,谱峰平坦。

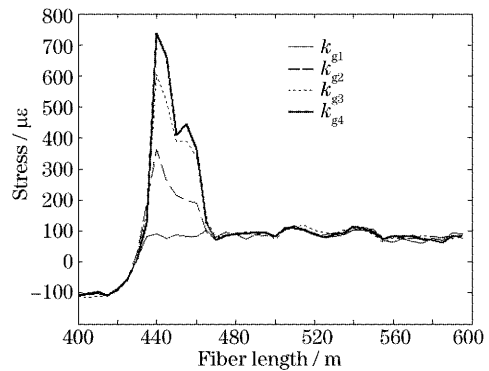


图5 不同应变梯度的DOFS应变分布测量

Fig. 5 Stress distribution measured by DOFS at different stress gradient

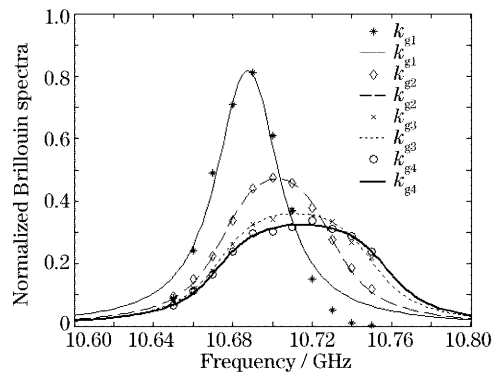


图6 布里渊后向散射谱随应变梯度变化的实验数据及拟合曲线

Fig. 6 Experimental data and their fitting curves of Brillouin backscattering spectra at different stress gradients

表1 不同应变梯度的布里渊后向散射谱特征参量

Table 1 Characteristic parameter of Brillouin back-scattering spectrum for the different stress gradients

$k_{gg} = EI \cdot k_g /$ ($\text{kg} \cdot \text{cm}$)	Normalized peak	Brillouin frequency shift /GHz	FWHM /MHz
0	0.8190	10.687	38.0
59.2	0.4705	10.702	63.1
84.6	0.3597	10.711	83.7
100.4	0.3250	10.715	91.3

为减小因应变梯度造成的布里渊频移测量误差,可适当增加布里渊谱测量中采样点数和扫描区间。如果频率扫描区间不够大,应变梯度引起的布里渊频移增加和布里渊散射谱展宽会造成一些反映实际谱特征的数据点丢失,从而拟合的曲线不能反映真实布里渊散射谱,使布里渊频移测量误差增加。增加频率采样点数也可使拟合曲线更好地反映真实布里渊散射谱。当采样点数较少而谱线展宽时,拟合曲线与真实布里渊谱间的误差就会增大。不过增加采样点数和扫描区间的代价是测量时间加长。另外采用高效合适的谱线拟合方法也很重要,采用加权最小二乘法曲线拟合效果较好但耗时较大。另一方面可通过提高布里渊光时域反射计的空间分辨力,减小 Δz ,来减小因应变梯度对布里渊频移测量的误差,但这也增加因脉冲宽度减小引起的布里渊展宽和频移测量的误差增大。因此可通过优化设计,使系统的分辨力和测量误差达到最佳。

5 结 论

布里渊光时域反射计分布式光纤传感技术基于脉冲光在光纤中自发布里渊散射,其空间分辨力在米数量级。在很多实际梁建筑结构的应用中该技术空间率分布范围内存在着应变梯度。通过作者的理论分析和模拟悬臂梁的实验研究,得到的结果一致表明,随着应变梯度的增加,不仅会使得布里渊频移随之线性增加,而且使布里渊增益谱峰值非线性降低和谱宽非线性展宽,布里渊频移检测的误差随之二次方增加。为减小由此带来的不利影响,可考虑增加微波调制的变频区间和扫描频率点数,以及采用合适的曲线拟合方法等措施。

致谢 在完成本项研究中,得到了曹永良、詹丽媛和范胜利等同志大量的帮助,作者借此对他们表示诚挚的谢意!

参 考 文 献

- Govind P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics* [M]. 3rd ed. New York: Academic press, 2001. 355~388
- Hiroshigo Ohno, Hiroshi Naruse, Mitsuru Kihera *et al.*. Industrial applications of the BOTDR optical fiber strain sensor [J]. *Opt. Fiber Technol.*, 2001, 7(1): 45~64
- Wang Muguang, Wei Huai, Tong Zhi *et al.*. Simultaneous measurement of strain and temperature using a single dual-period fiber grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, 22(7): 867~869 (in Chinese)
王目光,魏 淮,童 治等. 利用双周期光纤光栅实现应变和温度同时测量[J]. *光学学报*, 2002, 22(7): 867~869
- Yu Youlong, Tam Hwayaw, Wang Qi. Fiber Laser based wavelength division multiplexed fiber Bragg grating sensor system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, 22(5): 592~595 (in Chinese)
余有龙,谭华耀,王 骐. 基于光纤激光器的波分复用光纤光栅传感系统[J]. *光学学报*, 2002, 22(5): 592~595
- Youlong Yu, Hwayaw Tam. A technique for enhancing the thermal stability of hydrogen-loaded fiber Bragg grating [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, 1(5): 256~258
- Zhang Weigang, Liu Yange, Wang yue *et al.*. Study of sensing and measurement for vertically mechanical quantities using single fiber grating [J]. *Chin. J. Lasers*, 2003, 30(1): 1~4 (in Chinese)
张伟刚,刘艳格,王 跃等. 利用单光纤光栅实现力学量垂直感测的研究[J]. *中国激光*, 2003, 30(1): 1~4
- Tsuneo Horiguchi, Kaoru Shimizu, Toshio Kurashima *et al.*. Development of a distributed sensing technique using Brillouin scattering [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1995, 13(7): 1296~1302
- Hiroshi Naruse, Mitsuhiro Tateda. Trade-off between the spatial and frequency resolutions in measuring the power spectrum of the Brillouin backscattered light in an optical fiber [J]. *Appl. Opt.*, 1999, 38(31): 6516~6521
- Hiroshi Naruse, Mitsuhiro Tateda. Optimum temporal pulse shape of launched light for optical time domain reflectometry type sensors using Brillouin backscattering [J]. *J. Opt. Rev.*, 2001, 8(2): 126~132
- Kaoru Shimizu, Tsuneo Horiguchi, Yahei 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
- Tsuneo Horiguchi, Toshio Kurashima, Mitsuhiro Tateda *et al.*. Brillouin characterization of fiber strain in bent slot-type optical-fiber cables [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1992, 10(9): 1196~1201
- Hiroshi Naruse, Mitsuhiro Tateda, Hiroshige Ohno *et al.*. Linear strain distribution dependence of the Brillouin gain spectrum [C]. *Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest, OFS 2002*, 15th, 2002, 1: 309~312