

文章编号: 0253-2239(2008)01-0043-07

# 提高布里渊光时域反射应变仪测量空间分辨力的等效脉冲光拟合法

王 峰 张旭苹 路元刚 董玉明

(南京大学光通信工程研究中心, 江苏 南京 210093)

**摘要** 由于探测光脉冲宽度受到限制, 布里渊光时域反射仪(BOTDR)在对光纤上的应变进行分布式测量时, 空间分辨力只能达到 1 m。针对布里渊光时域反射仪单次采样接收背向布里渊散射信号(BBS)需要一定的时间, 提出了基于等效脉冲光的多洛仑兹拟合法以提高其应变测量的空间分辨力。该方法将探测光脉冲在布里渊光时域反射仪完成单次采样所需的时间上进行积分, 将积分函数作为等效脉冲光的表达式, 再根据等效脉冲光的形状将布里渊光时域反射仪接收到的背向布里渊散射谱(BBS)细分, 并对它进行多洛仑兹迭代拟合, 准确求得每个细分布里渊散射谱的中心频率, 进而利用光纤中布里渊频移与应变的对应关系, 得到光纤中与细分布里渊散射谱对应的细分布里渊单元上的应变情况。实验结果表明, 利用这种方法, 可使布里渊光时域反射仪应变测量的空间分辨力提高至 0.05 m。

**关键词** 光纤光学; 布里渊光时域反射仪; 空间分辨力; 多洛仑兹拟合; 应变测量; 等效脉冲光

中图分类号 TN247 文献标识码 A

## Improvement of Spatial Resolution for Strain Measurement with Brillouin Optical Time-Domain Reflectometer by Fitting Method Based on Equivalent Optical Pulse

Wang Feng Zhang Xuping Lu Yuangang Dong Yuming

(Institute of Optical Communication Engineering, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093, China)

**Abstract** Brillouin optical time-domain reflectometer (BOTDR) can perform distributed strain measurement along an optical fiber. Its highest spatial resolution is limited to 1 m because of the restricted probe pulse width. Because the time to accomplish one single sampling by BOTDR cannot be neglected compared to probe optical pulse width, a novel multi-Lorentz fitting method based on equivalent optical pulse (EOP) is proposed to improve its spatial resolution. In this method, the equivalent optical pulse is obtained by integrating the probe optical pulse over the time to accomplish one single sampling by BOTDR and the backscattered Brillouin signal (BBS) received by BOTDR is decomposed into sub-BBSs according to the shape of equivalent optical pulse. Then the backscattered Brillouin signal is fitted by multi-Lorentz function to obtain central frequency of each sub-BBS. The strain in the length corresponding to each sub-backscattered Brillouin signal can be obtained by use of the dependence of Brillouin frequency shift on strain. It is experimentally demonstrated that the spatial resolution for strain measurement with BOTDR is improved to 0.05m by the proposed method.

**Key words** fiber optics; Brillouin optical time-domain reflectometer; spatial resolution; multi-Lorentz fit; strain measurement; equivalent optical pulse

### 1 引 言

分布式光纤传感器除具有抗干扰、化学性能稳定、寿命长等特点外, 还可以实现对整根光纤上温度、

应变等信息的测量, 受到了越来越多的重视<sup>[1~5]</sup>。其中基于自发布里渊散射效应和光时域反射原理的布里渊光时域反射(BOTDR)可实现从光纤单端探测传

收稿日期: 2007-04-24; 收到修改稿日期: 2007-06-18

基金项目: 国家自然科学基金(60644001)资助课题。

作者简介: 王 峰(1981—), 男, 山西大同人, 博士研究生, 主要从事基于布里渊散射的全分布式光纤传感技术及其在光缆监测中应用等方面的研究。E-mail: hellowangfeng@gmail.com

导师简介: 张旭苹(1962—), 女, 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等方面的研究。E-mail: xpzhang@nju.edu.cn

感光纤的轴向应变分布及断点,已在结构健康监测和海底光缆故障点定位等领域得到了应用<sup>[6~12]</sup>。

布里渊光时域反射仪的空间分辨力一般由探测光脉冲的宽度决定,脉宽越小,空间分辨力越高。但一般情况下布里渊光时域反射仪的探测光脉冲宽度只能短至 10 ns(对应的空间分辨力只能达到 1 m)<sup>[13]</sup>。然而在结构监测等许多实际应用中,需要探测被测对象上几十厘米、甚至几厘米长度范围内的应变分布状况,而只有 1 m 空间分辨力的布里渊光时域反射仪,难以精确测量到微小长度上的应变情况。H. Murayama等<sup>[14]</sup>通过分析布里渊增益谱的方法,使布里渊光时域反射的空间分辨力从 2 m 提高到 0.3 m。但是从其实验结果上看,由于没有考虑布里渊光时域反射仪接收背向布里渊散射光需要一定的时间,因而导致其分析结果存在较大误差,并未真正达到 0.3 m 的空间分辨力。另外文中没有给出应变测量误差,无法确定该方法的应变测量精度。本文通过分析布里渊光时域反射测量应变的原理,提出了等效脉冲光的概念,并根据细分等效脉冲光产生的背向布里渊散射谱(BBS)及利用等效脉冲光计算各个细分谱功率权重的方法,通过对布里渊光时域反射仪测得的布里渊散射谱进行多洛仑兹迭代拟合,使布里渊光时域反射仪的空间分辨力得到较大的提高。

## 2 原 理

当传感光纤所处环境温度不变时,光纤中布里渊散射谱的中心频率  $\nu_{B\epsilon}$  可表示为<sup>[15]</sup>

$$\nu_{B\epsilon} = \nu_{B0} + C_{\nu\epsilon} \delta\epsilon, \quad (1)$$

式中  $\nu_{B0}$  为光纤不受应变时布里渊散射谱的中心频率,  $\delta\epsilon$  为应变的大小,频率应变系数  $C_{\nu\epsilon}$  为  $(0.0483 \pm 0.0004)$  MHz/ $\mu\epsilon$ 。布里渊光时域反射仪通过接收它发射的探测光脉冲的布里渊散射谱并根据(1)式获得传感光纤中应变情况。它通过光时域反射的原理来判断应变的位置,而探测光脉冲的宽度则限制了空间分辨力  $\Delta z$  的大小<sup>[15]</sup>。空间分辨力表示为

$$\Delta z = c\tau / (2n), \quad (2)$$

式中  $c$  为真空中的光速,  $\tau$  为探测光脉冲的宽度,  $n$  为光纤的有效折射率。

### 2.1 等效脉冲光

如图 1 所示,脉宽为  $\tau$  的探测光头部在经过 A 点时会产生包含 A 点应变信息的背向布里渊散射谱  $S_1$ ,当探测光前进  $\tau/2$  的时间到达 B 点后,背向布里渊散射谱  $S_1$  刚好到达距 A 点  $c\tau/(2n)$  的 C 位置处,与探测光尾部此时在 C 点产生的包含 C 点应变信息的背向布里渊散射谱  $S_2$  叠加在一起。同样,在探测光前进  $\tau/2$  的这一过程中,它的其他部分也会依次在不同时间及 A 到 C 之间的不同位置处产生包含各自位置处应变信息的背向布里渊散射谱  $S_i$  并最终在 C 点与背向布里渊散射谱  $S_1$  和背向布里渊散射谱  $S_2$  叠加在一起。由此可知,在探测光发出后的任何时刻,布里渊光时域反射仪在任意无限小的时间段内接收到的布里渊散射谱所包含的应变信息,是光纤中从  $z=c\tau/(2n)$  位置处开始的  $c\tau/(2n)$  长度上的所有应变信息的叠加。

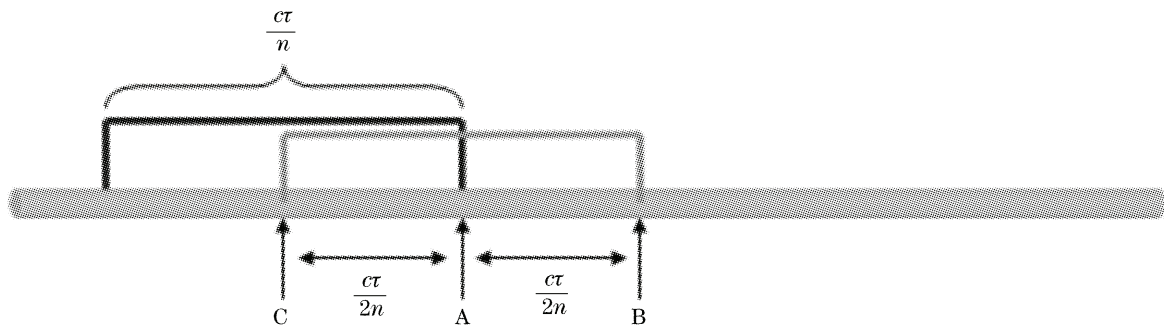


图 1 脉冲光在光纤中产生布里渊散射谱的示意图

Fig. 1 Schematic generation of backscattered Brillouin scattering signal from optical pulse in fiber

在实际情况下,由于布里渊光时域反射仪中光电转换后信号采集模块响应时间的限制,对背向布里渊散射谱的接收需要一定的时间。当探测光脉冲宽度很窄时,接收时间不可忽略。若布里渊光时域反射仪单次采样接收背向布里渊散射谱需要时长  $\tau'$ ,这表示在这一次采样中布里渊光时域反射仪接

收到的背向布里渊散射谱信号是时长  $\tau'$  的背向布里渊散射谱的叠加,可以将它们看作在采集模块响应时间为 0 的理想情况下,布里渊光时域反射仪在任意无限小的时间单元内采集到的一个等效脉冲光产生的背向布里渊散射谱。假设布里渊光时域反射仪发射的探测光形状为

$$y_0(t) = \begin{cases} p(t), & t_0 \leq t \leq t_0 + \tau \\ 0, & t < t_0 \text{ or } t > t_0 + \tau \end{cases}$$

$p(t) \geq 0$ , 则该探测光的等效脉冲光可表示为它在光纤中前进  $\tau'/2$  时间过程中的累积:

$$y(t) = \int_0^{\tau'} y_0(t-t') dt' = \begin{cases} q(t), & t_0 \leq t \leq t_0 + \tau + \tau' \\ 0, & t < t_0 \text{ or } t > t_0 + \tau + \tau' \end{cases} \quad q(t) \geq 0 \quad (3)$$

由此可见, 脉宽为  $\tau$  的探测光的等效脉冲光形状与探测光有所不同, 其脉冲宽度为  $\tau + \tau'$ , 对应的空间分辨力为:

$$\Delta z' = c(\tau + \tau') / (2n). \quad (4)$$

以理想矩形探测光脉冲为例, 其形状为

$$y_0(t) = \begin{cases} A, & t_0 \leq t \leq t_0 + \tau \\ 0, & t < t_0 \text{ or } t > t_0 + \tau \end{cases}$$

脉宽为  $\tau$ , 如图 2(a) 所示。图 2(b) 为探测光在光纤中前进  $\tau'/2$  时间并产生持续时间为  $\tau'$  的布里渊散射谱的示意图, 其中粗实线包围的矩形框为某时刻  $t_0$  光纤中的探测光, 虚线包围的矩形框为前进了  $\tau'/2$  时间后的探测光, 矩形阴影部分是该探测光脉冲在前进了  $\tau'/2$  的时间过程中产生的布里渊散射谱, 它的持续时间为  $\tau'$ , 峰值功率为  $\alpha A$  ( $\alpha$  为布里渊散射系数)。若信号采集模块单次采样接收布里渊散射谱需要  $\tau'$  的时长, 根据脉宽  $\tau$  与接收时间  $\tau'$  的不同关系, 矩形探测光对应的等效脉冲光分别为:

(a) 当  $\tau \geq \tau'$  时:

$$y(t) = \begin{cases} A(t-t_0), & t_0 \leq t < t_0 + \tau' \\ A\tau', & t_0 + \tau'/2 \leq t \leq t_0 + \tau \\ A\tau'/2 - A(t-t_0-\tau), & t_0 + \tau < t \leq t_0 + \tau + \tau' \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5a)$$

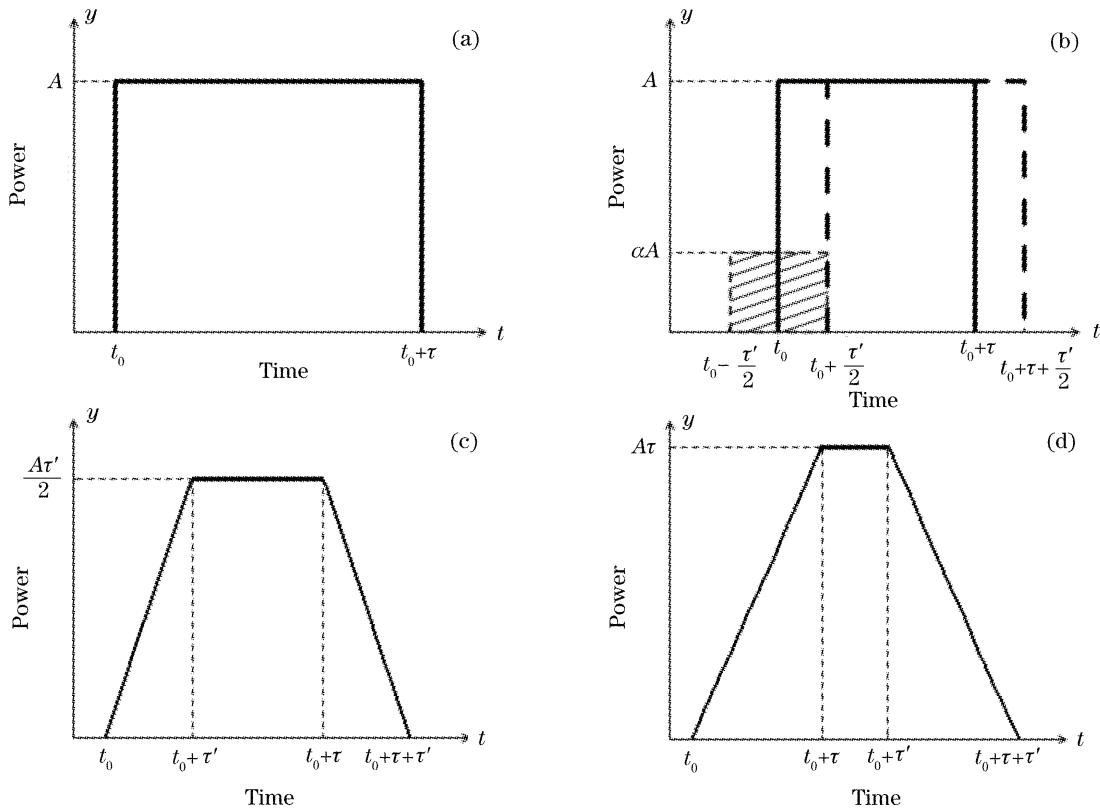


图 2 (a) 矩形脉冲光, (b) 产生持续时间为  $\tau'$  的背向布里渊散射谱的示意图, (c) 当  $\tau \geq \tau'$  时的等效脉冲光,

(d) 当  $\tau \leq \tau'$  时的等效脉冲光

Fig. 2 (a) A rectangle optical pulse, (b) schematic generation of backscattered Brillouin signal with a duration of  $\tau'$ ,

(c) equivalent optical pulse when  $\tau \geq \tau'$ , (d) equivalent optical pulse when  $\tau \leq \tau'$

(b) 当  $\tau \leq \tau'$  时:

$$y(t) = \begin{cases} A(t-t_0), & t_0 \leq t < t_0 + \tau \\ A\tau, & t_0 + \tau \leq t \leq t_0 + \tau' \\ A\tau - A(t-t_0 - \tau'), & t_0 + \tau' < t \leq t_0 + \tau + \tau' \\ 0, & \text{other} \end{cases} \quad (5b)$$

以上两种情况中的等效脉冲光形状都为梯形,如图 2(c)、图 2(d)所示,它们的脉冲宽度均为  $\tau + \tau'$ 。

## 2.2 基于等效脉冲光的多洛仑兹拟合法

对于自发布里渊散射,背向布里渊散射谱的形状为洛仑兹型<sup>[16]</sup>,它可以表示为

$$g(\nu, \nu_B) = \frac{p(\omega/2)^2}{(\nu - \nu_B)^2 + (\omega/2)^2}, \quad (6)$$

其中  $g(\nu, \nu_B)$  为布里渊光时域仪反射某次采样接收到的背向布里渊散射谱,  $\nu$  表示频率,  $\nu_B$  为背向布里渊散射谱的中心频率,  $p$  为背向布里渊散射谱的峰值功率,  $\omega$  为背向布里渊散射谱的半峰全宽。布里渊光时域反射仪在处理某次采样接收到的布里渊散射谱时,一般是通过对它进行单个的洛仑兹拟合来确定背向布里渊散射谱的中心频率,从而获得光纤中的应变信息。由 2.1 节中的分析可知,这样得到的结果是  $c(\tau + \tau')/(2n)$  长度中所包含的总体应变信息,即空间分辨力为  $c(\tau + \tau')/(2n)$ 。由于探测光脉冲的宽度至多只能短至 10 ns<sup>[13]</sup>,所以由(4)式决定的布里渊光时域反射仪的空间分辨力不能小于 1 m<sup>[17]</sup>。

本文将该  $c(\tau + \tau')/(2n)$  长的光纤看作是由  $m$  段长度为  $c(\tau + \tau')/(2mn)$  的细分光纤单元首尾连接而成,并且每个光纤单元上的应变均匀一致。则各个光纤单元对应的背向布里渊散射谱  $S_i$  均为洛仑兹型,得到的背向布里渊散射谱可表示为这  $m$  段光纤单元对应的  $m$  个布里渊谱的叠加:

$$g(\nu, \nu_B) = \sum_{i=1}^m g_i(\nu, \nu_{Bi}) = \sum_{i=1}^m \frac{p_i(\omega_i/2)^2}{(\nu - \nu_{Bi})^2 + (\omega_i/2)^2}, \quad (7)$$

式中  $g_i(\nu, \nu_{Bi})$  为第  $i$  个单元的背向布里渊散射谱  $S_i$ ,  $p_i$  为背向布里渊散射谱  $S_i$  的峰值功率,  $\omega_i$  为背向布里渊散射谱  $S_i$  的半峰全宽,  $\nu_{Bi}$  表示背向布里渊散射谱  $S_i$  的中心频率。

在光纤上应变均匀一致的位置处测得的  $g(\nu, \nu_B)$  形状为较理想的洛仑兹型,组成它的各背向布里渊散射谱  $S_i$  的  $\nu_{Bi}$ 、 $\omega_i$  与  $\nu_B$ 、 $\omega$  一致,因此可以通过对  $g(\nu, \nu_B)$  进行单个的洛仑兹拟合求得各背向布

里渊散射谱  $S_i$  的  $\nu_{Bi}$ 、 $\omega_i$ 。同时又可以由等效脉冲光相应地细分为  $m$  段,根据等效脉冲光的形状确定出各段的功率在总功率中的比例,以各段功率所占的比例为权重通过  $p$  求得与各段相应背向布里渊散射谱  $S_i$  的  $p_i$ 。

当光纤中某一小段长度上存在应变时,由应变引起的  $p$  和  $\omega$  的变化较小<sup>[16,18]</sup>,因此可认为  $p_i$  与  $\omega_i$  保持不变,只有  $\nu_{Bi}$  会发生改变。从已知应变的位置起,利用(7)式以细分光纤单元的长度为步进长度沿光纤逐步向后对  $g(\nu, \nu_B)$  进行迭代拟合,可以求出起始计算点后每一个细分光纤单元上背向布里渊散射谱的中心频率,再由(1)式即可得到每个细分光纤单元上对应的应变信息,从而把布里渊光时域反射仪的空间分辨力提高  $m$  倍。在实际应用中,细分光纤单元的长度  $c(\tau + \tau')/(2mn)$  应为布里渊光时域反射仪采样步长的整数倍,只有这样才能利用布里渊光时域反射的测量数据进行迭代拟合。

## 3 实验结果及分析

实验中采用的布里渊光时域反射仪设备是 AQ8603 光纤应变分析仪,用它来测量长度约为 200 m 的光纤上某一位置处的应变情况。实验装置如图 3 所示:夹具 A 与夹具 B 相距 0.1 m,且分别夹紧光纤;使 A 前的光纤松弛并将 A 固定在底座 C 上;B 可以在底座 C 上自由滑动,并被一个 1.47 N 的砝码通过滑轮来牵引使 A 与 B 间 0.1 m 长的光纤受到拉力。测量时探测光脉冲宽度为 10 ns,等效采样步长为 0.1 m。

用光示波器(Agilent 86105B)测得 AQ8603 发射的 10 ns 脉冲光波形如图 4(a)中的点阵所示,相应的脉冲形状如图中梯形实线所示,其上升沿和下降沿均为 2 ns。经过实验验证,AQ8603 实时单次采样接收时间为 5 ns。但是该仪器通过等效采样的方法缩短采样步长,其等效采样步长最小为 0.05 m。图 4(b)是利用 2.1 节所述的方法求得的功率归一化的等效脉冲光。可见该等效脉冲光宽度为 15 ns,对应的空间分辨力为 1.5 m。为获得 0.1 m 的空间分辨力,需要将该等效脉冲光按长度等分为 15 个单

元。因此将(7)式改写为

$$g(\nu, \nu_B) = \sum_{i=1}^{15} \frac{h_i (\omega_i/2)^2}{(\nu - \nu_{Bi})^2 + (\omega_i/2)^2} \quad (8)$$

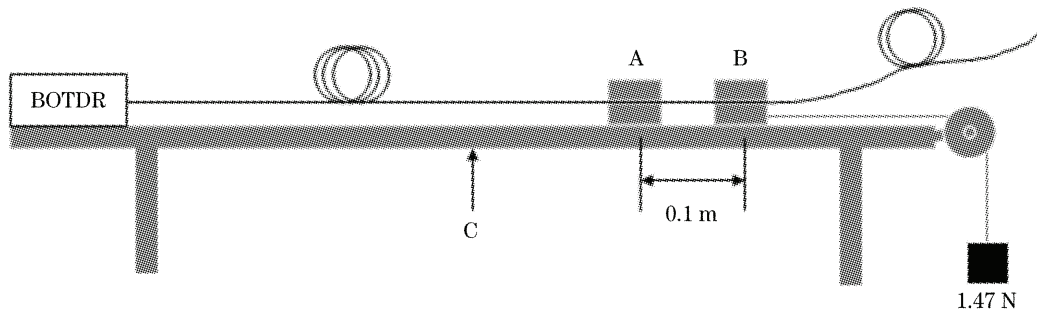


图 3 用 AQ8603 测量应力的实验装置图

Fig. 3 Experimental configuration of strain measurement with AQ8603 fiber strain analyzer

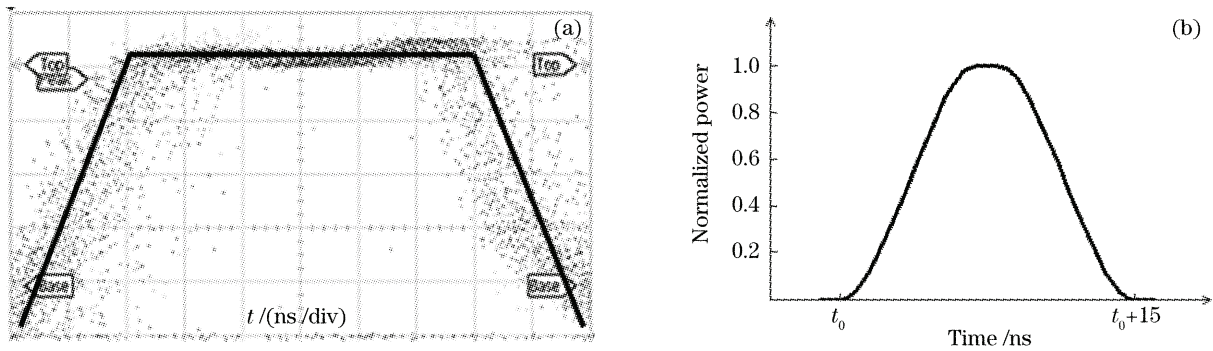


图 4 (a) AQ8603 输出的脉冲光, (b) 输出脉冲光的归一化等效脉冲光

Fig. 4 (a) Output optical pulse of AQ8603. (b) normalized equivalent optical pulse of the output optical pulse

滑块 A 前的光纤不受应变, 所以可将 A 前的光纤作为参考, 求出 15 个细分光纤单元对应的布里渊谱各自的峰值功率、半峰全宽和中心频率。然后利用(7)式和 2.2 节所述的方法逐步向后进行迭代拟合, 最后可得到参考点后各个 0.1 m 细分光纤单元长度上的应变信息。

利用本方法测得的背向布里渊散射谱的计算结果如图 5 所示, 图中明确地显示出光纤上某段 0.1 m

的长度上存在很大的应变, 其大小为 0.148%, 说明此处应为受拉位置。实验所用光纤受 1.47 N 拉力时实际应变为 0.152%, 因此其应变测量误差为 2.6%。如上文所述, 每次对布里渊光时域反射仪测得的布里渊散射谱递推拟合得到的结果是第 15 个细分光纤单元所包含的应变信息, 因此本方法在空间距离上的定位要比利用光时域反射原理得到的布里渊散射谱的空间位置向后推移 1.5 m。图 6 是用 AQ8603 直接测得的应变分布情况, 它显示在一段

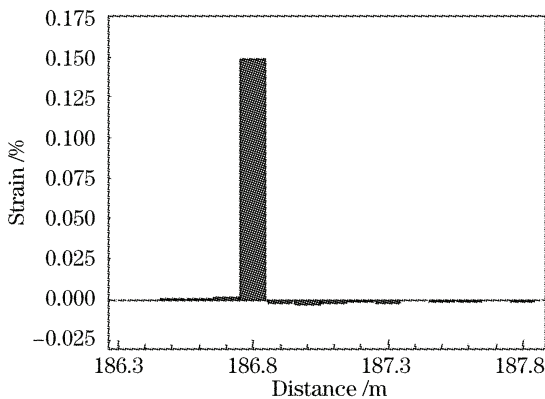


图 5 本方法得到空间分辨力为 0.1 m 的应变分布  
Fig. 5 Strain distribution with a spatial resolution of 0.1 m obtained using this method

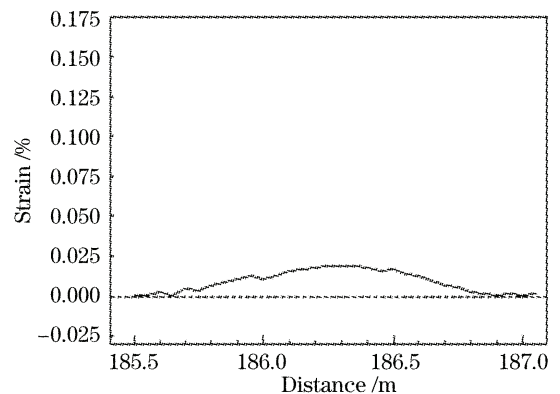


图 6 AQ8603 直接测得的应变分布  
Fig. 6 Strain distribution result by AQ8603

1.5 m 长的光纤上均有微小的应变存在,且最大应变仅为 0.019%,与光纤上实际存在的应变大小相差甚远。这是由于其空间分辨力不足造成的,它得到的是 1.5 m 长的光纤上的平均应变。因此,AQ8603 直接测量的结果很容易导致误判。它会把光纤微小长度上存在的足以造成危险的巨大应变误判为一段较长光纤上存在的安全的微小应变,从而无法及时发现应变监测对象存在的安全隐患。通过图 5 和图 6 的比较可以看出,利用本方法可以准确地检测到 0.1 m 长度光纤上存在的应变,从而在应变监测中能够及时发现光纤微小长度上存在的真实应变。

采用同样的装置,将光纤的受拉长度缩短至 0.05 m,同时将 AQ8603 的等效采样步长设为 0.05m(该仪器能达到的极限等效采样步长),用同样的方法进行计算,得到的结果如图 7 所示,其应变大小为 0.164%,应变测量误差为 7.9%,较准确地获得了光纤上 0.05 m 长度上的应变。

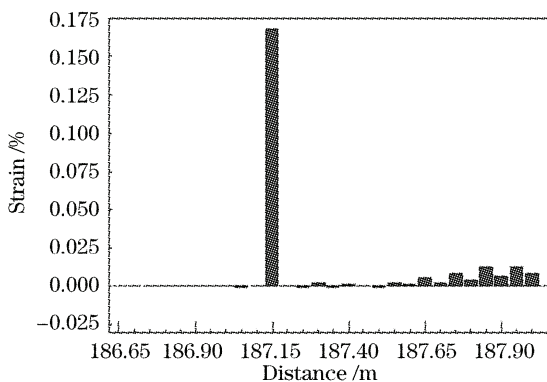


图 7 本方法得到空间分辨力为 0.05 m 的应变分布  
Fig. 7 Strain distribution with a spatial resolution of 0.05 m obtained using this method

在图 5 和图 7 中,光纤中理论上为零应变的位置处均出现了一定的应变,这是由于 AQ8603 本身的测量误差和探测脉冲光波形的测量误差所导致的。一方面,AQ8603 的测量误差导致测得的背向布里渊散射谱存在一定的误差,因而在对背向布里渊散射谱进行迭代拟合时会使得拟合结果出现误差;另一方面,因为对探测脉冲光波形的测量有不可避免的测量误差[如图 4(a)中所示],这会导致对等效脉冲光波形的确定存在误差。等效脉冲光波形与背向布里渊散射谱的误差共同导致了对各个细分背向布里渊散射谱  $S_i$  参量( $\nu_{Bi}$ 、 $\omega_i$  和  $p_i$ )的确定存在误差,从而导致测量结果中本不应出现应变的位置出现了应变。其中图 7 中测量误差导致的应变要比图 5 中的大,这是因为与图 5 相比,图 7 中的结果是由

更多的细分长度更小的光纤单元对应的背向布里渊散射谱  $S_i$  得到的,这使得在迭代拟合时,同样的背向布里渊散射谱波动及细分背向布里渊散射谱  $S_i$  参量的误差会导致更大的应变计算误差。但由于它们与光纤中实际存在的应变相差很大,并不影响对光纤中微小长度上存在的大应变的准确测量。

## 4 结 论

提出基于等效脉冲光将背向布里渊散射谱细分的思想,并根据等效脉冲光的形状准确求得各个细分背向布里渊散射谱  $S_i$  功率权重,通过多洛仑兹拟合和空间位置上递推迭代的方法获得了对应于每个细分背向布里渊散射谱  $S_i$  的空间分辨力长度上的应变信息。实验结果表明该方法有效可行,能准确检测到光纤上 0.1 m 甚至 0.05 m 长度上的应变,使布里渊光时域反射仪的空间分辨力提高了一个数量级以上。这对于克服布里渊光时域反射仪在应变监测中空间分辨力不足的缺点,及时准确地发现应变监测对象中微小长度上存在的隐患,具有十分重要的意义。

## 参 考 文 献

- 1 X. Y. Bao, M. DeMerchant, A. Brown *et al.*. Tensile and compressive strain measurement in the lab and field with the distributed Brillouin scattering sensor [J]. *J. Lightwave Technology*, 2001, **19**(11): 1698~1704
- 2 Gao Jianzhong, Jiang Zhuangde, Zhao Yulong *et al.*. Full distributed fiber optical sensor for intrusion detection in application to buried pipelines [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(11): 633~635
- 3 Wan Shengpeng, He Sailing, Hu Jiandong *et al.*. Application of edge detection technique to distributed fiber sensor [J]. *Chin. J. Lasers*, 2005, **32**(5): 673~675  
万生鹏,何赛灵,胡建东等.边缘检测技术在分布式光纤传感中的应用[J].中国激光,2005,**32**(5): 673~675
- 4 Sun An, Chen Jialin, Li Guoyang *et al.*. Detection of spontaneous Brillouin backscattered power in distributed optical fiber sensor system based on high frequency microwave technology [J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(4): 503~506  
孙安,陈嘉琳,李国扬等.基于高频微波技术的分布式光纤传感器布里渊散射信号检测[J].中国激光,2007,**34**(4): 503~506
- 5 Zhang Lixun, Liao Yun, Ou Zhonghua *et al.*. Symmetrical demodulation of distributed fiber Raman temperature sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(3): 400~403  
张利勋,廖云,欧中华等.分布式光纤拉曼温度传感器的对称解调[J].光学学报,2007,**27**(3): 400~403
- 6 Song Muping, Zhuang Baiyun. Polarization-induced fading elimination technique in Brillouin optical time-domain analysis sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(4): 711~715  
宋牟平,庄白云.布里渊光时域分析传感器的消偏振衰落技术[J].光学学报,2007,**27**(4): 711~715
- 7 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*

- Technology*, 1994, **12**(5): 730~736
- 8 V. Lecoecuche, D. J. Webb, C. N. Pannell *et al.*. 25 km Brillouin based single-ended distributed fibre sensor for threshold detection of temperature or strain[J]. *Opt. Commun.*, 1999, **168**(1~4): 95~102
- 9 Song Muping, Zhao Bin, Zhang Xianmin. Brillouin optical time domain analysis distributed optic-fiber sensor based on microwave electrooptic modulation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(8): 1053~1056  
宋牟平, 赵 斌, 章献民. 基于微波电光调制的布里渊光时域分析传感器[J]. *光学学报*, 2005, **25**(8): 1053~1056
- 10 Zhang Dan, Shi Bin, Wu Zhishen *et al.*. Distributed optical fiber sensor based on BOTDR and its application to structural health monitoring[J]. *China Civil Engineering J.*, 2003, **36**(11): 83~87  
张 丹, 施 斌, 吴智深等. BOTDR 分布式光纤传感器及其在结构健康监测中的应用[J]. *土木工程学报*, 2003, **36**(11): 83~87
- 11 Zhang Xuping, Dong Yuming, Lu Yuangang. Brillouin-scattering based fully distributed optical fiber sensing technology and its application in optical cable monitoring [C]. *5th International Conference on Optical Communications and Networks & the 2nd International Symposium on Advances and Trends in Fiber Optics and Applications*, Chengdu and Jiuzhaigou China, 2006. 408~411
- 12 Y. G. Lu, X. P. Zhang, Y. M. Dong *et al.*. Optical cable fault location method based on BOTDR and cable localized heating[C]. *4th International Symposium on Instrumentation Science and Technology*, Harbin, China, 2006. 1010~1014
- 13 A. Fellay, L. Thevenaz, M. Facchini *et al.*. Distributed sensing using stimulated Brillouin scattering: towards ultimate resolution [J]. *Proc. OSA Technol. Dig.*, 1997, **16**: 324~327
- 14 H. Murayama, K. Kageyama, A. Shimada *et al.*. Improvement of spatial resolution for strain measurements by analyzing Brillouin gain spectrum[C]. *Proc. SPIE*, 2005, **5855**: 551~554
- 15 H. Naruse, M. Tateda, H. Ohno *et al.*. Dependence of the Brillouin gain spectrum on linear strain distribution for optical time-domain reflectometer-type strain sensors[J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(34): 7212~7217
- 16 X. Bao, J. Smith, A. 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
- 17 T. Horiguchi, K. Shimizu, T. Kurashima. Development of a distributed sensing technique using Brillouin scattering [J]. *J. Lightwave Technology*, 1995, **13**(7): 1296~1302
- 18 T. R. Parker, M. Farhadiroushan, V. A. Handerek *et al.*. Temperature and strain dependence of the power level and frequency of spontaneous Brillouin scattering in optical fibers[J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(11): 787~789